สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารอิเล็คทรอนิคประกอบการสอนวิชาการออกแบบคอนกรีตอัดแรง

ELECTRONIC FILES ON PRESTRESSED CONCRETE DESIGN

T045828

โดย

นายวิศรุต ด่านสุนทรวงศ์

นายสักกะพันธุ์ เมฆเลอสรวง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45828
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอิเล็คทรอนิคประกอบการสอนวิชาการออกแบบคอนกรีตอัดแรง

ELECTRONIC FILES ON PRESTRESSED CONCRETE DESIGN

โดย

นายวิศรุต ด่านสุนทรวงศ์

นายสักกะพันธุ์ เมฆเลอสรวง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRONIC FILES ON PRESTRESSED CONCRETE DESIGN

MR.WISARUT DANSUNTORNWONG

MR.SAKKAPHANT MEKLERSUEWONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	เอกสารอิเล็คทรอนิคประกอบการสอนวิชา การออกแบบคอนกรีตอัดแรง		
นักศึกษา	นายวิศรุต ด่านสุนทรวงศ์	รหัสประจำตัว	41014744
	นายสักกะพันธุ์ เมฆเลอสรวง	รหัสประจำตัว	41014768
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ		

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ อ. ศิลป์ชัย จานสุวรรณ ผศ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.แดง เหรียญสุวรรณ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 30 เดือน เมษายน พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ เอกสารอิเล็คทรอนิคประกอบการสอนสำหรับวิชาการออกแบบคอนกรีตอัดแรง
ELECTRONIC FILES ON PRESTRESSED CONCRETE DESIGN
นักศึกษา นายวิศรุต ด่านสุนทรวงศ์
นายสักกะพันธุ์ เมฆเลอสรวง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกในการเรียนการสอนของภาควิชา วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เอกสารอิเล็คทรอนิคนี้จะแสดงผลบนโปรแกรม Microsoft Word 2000 และยังสามารถนำเข้าสู่ Internet ได้ นักศึกษาสามารถนำไปใช้ได้ง่าย และศึกษาด้วยตนเองได้ก่อนที่จะเริ่มการสอน อาจารย์ผู้สอนสามารถนำไปเป็นสื่อการเรียนการสอน เป็นการพัฒนาการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

โครงงานพิเศษนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 เป็นเนื้อหา โจทย์ตัวอย่าง และแผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน วสท.ปี 2534 และ ACI 318-99

ส่วนที่ 2 เป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ในส่วนของคาน และ พื้น โดยเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel 2000 โปรแกรมคำนวณนี้ มีหลักการคือ ติดต่อกับผู้ใช้งานเพื่อขอรับรายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ แล้วนำมาคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรมคำนวณ โดยจะได้ผลลัพธ์เป็น ขนาดหน้าตัดของคอนกรีตที่มีความเหมาะสม และปริมาณของเหล็กเสริมอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	:	ELECTRONIC FILES ON PRESTRESSED CONCRETE DESIGN
Name	:	MR.WISARUT DANSUNTORNWONG
		MR.SAKKAPHANT MEKLERSUEWONG
Field	:	CIVIL ENGINEERING
Department	:	CIVIL ENGINEERING
Faculty	:	ENGINEERING
Advisor	:	ASST.PROF.DR.SIKRIT HIRANMAS

ABSTRACT

The object of this special project is to pioneer computer aided instruction in the department of civil engineering. Electronic files were gathered and published in a form of Microsoft Word 2000 document and is available for access via the Internet. Students can access and download these files for self-studying or for references. Instructors can present these files on the screen in the classroom in a more effective manner than putting sheet by sheet of transparencies on the overhead projector.

This report consists of two parts

The main part contains theories, examples and flowcharts used in the analysis and design of prestressed concrete structures. The design follows Engineering Institute of Thailand (E.I.T. 2534) and American Concrete Institute (ACI 318-99) standards.

The supplementary part contains a design aid, which is a program written in Microsoft Excel 2000. The program covers the design of beams and slabs based on ACI Standard 318-99. This small supplementary program concept is to allow user to input in a user-friendly way and to provide output, which is easy to read and understand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่สามารถใช้บ่งบอกถึงความกรุณา และความอนุเคราะห์ของอาจารย์ศรีกริช หิรัญมาศ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษนี้ได้ เนื่องจากท่านเป็นผู้ให้กำเนิดแนวความคิดในการทำโครงงานพิเศษนี้ เพราะตลอดเวลาที่ได้รับความรู้จากท่าน ผู้ประพันธ์ มีความรู้สึกประทับใจและชื่นชมในรูปแบบการสอนของท่านตลอดมา ท่านได้ทุ่มเทกำลังกายกำลังใจในการสอน เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าใจ และกระจ่างในเนื้อหาวิชาเรียน โดยมีระบบการสอนที่เข้าใจง่าย นอกจากนี้ความรู้ทั้งหมดที่ได้นำมาใช้ประกอบในโครงงานพิเศษนี้ ได้รับการถ่ายทอดมาจากอาจารย์ศรีกริชทั้งสิ้น จึงขอกล่าวคำขอบคุณอย่างซาบซึ้งและนับถือ แด่อาจารย์ศรีกริช หิรัญมาศ ไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้จะขาดเสียมิได้สำหรับคำขอบพระคุณแด่บุพการีของผู้จัดทำโครงงาน ตั้งแต่การสั่งสอน การเลี้ยงดู ทำให้มีทุกวันนี้ได้ จนถึงความช่วยเหลือที่ท่านมีในระหว่างทำโครงงานทั้งเป็นกำลังใจและกำลังทุนทรัพย์ รวมทั้งความรักที่มีให้แก่บุตรเสมอมา

นายวิศรุต ด่านสุนทรวงศ์

นายสักกะพันธุ์ เมฆเลอสรวง

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญรูป	ฌ
1	**บทนำ**	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
	1.4. ขอบเขตการศึกษา	2
	1.5. วิธีการศึกษา	2
2	**วรรณกรรมปริทัศน์**	
	2.1. นิยาม	3
	2.2. เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง	3
	2.2.1. ด้านเวลา	3
	2.2.2. ด้านราคา	3
	2.2.3. ด้านคุณภาพ	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	**โปรแกรมออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง**	
	3.1. กล่าวนำ	5
	3.2. วัตถุประสงค์ของโปรแกรม	5
	3.3. ขอบเขตของโปรแกรม	5
	3.4. วิธีการเขียนโปรแกรม	6
	3.5. ส่วนประกอบของโปรแกรม	6
	บรรณานุกรม	15
	ภาคผนวก ก. ส่วนเนื้อหาวิชาการออกแบบคอนกรีตอัดแรง	ผก1
	ภาคผนวก ข. แผนผังขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง	ผข1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.1.	แสดงโปรแกรมออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน	8
3.2.	แสดงโปรแกรมออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน(ต่อ)	9
3.3.	แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน	11
3.4.	แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน(ต่อ)	12
3.5.	แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน(ต่อ)	13
3.6.	แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน(ต่อ)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันสื่อการเรียนการสอนเกี่ยวกับการออกแบบคอนกรีตอัดแรง ยังไม่มีมากนักทั้งๆ ที่โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงเริ่มมีใช้อย่างแพร่หลาย ทำให้สื่อการเรียนการสอนและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคอนกรีตอัดแรง เป็นที่ต้องการของวิศวกร นักศึกษา และผู้ที่สนใจทั่วไป ดังนั้น ผู้จัดทำจึงได้เรียบเรียงสื่อการเรียนการสอนและเอกสารประกอบการสอนการออกแบบคอนกรีตอัดแรงขึ้น เพื่อให้ท่านผู้สนใจได้ทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น โดยมีภาพประกอบและตัวอย่างให้มากซึ่งจะได้เป็นแนวทางในการออกแบบ และเป็นข้อมูลอ้างอิง

คณะผู้จัดทำได้ตั้งใจทำเอกสารชุดนี้เพื่อให้เป็นสื่อการเรียนการสอนประกอบการเรียนวิชา การออกแบบคอนกรีตอัดแรง โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดครอบคลุมหลักสูตรของวิชานี้ในระดับหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา นอกจากนี้ยังสามารถใช้เอกสารชุดนี้เป็นคู่มือการออกแบบคอนกรีตอัดแรงได้เนื่องจากผู้จัดทำ ได้อ้างอิงจากข้อกำหนดของการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับการออกแบบคอนกรีตอัดแรงของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ปี พ.ศ. 2537 และมาตรฐาน ACI 318-99 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงทั่วไปในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในประเทศไทย

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศมีความสำคัญกับอย่างยิ่งทุกสาขาวิชา และจุดนี้เองทำให้เกิดการเรียนการเรียนการสอนแบบใหม่ขึ้น เพื่อให้ทันกับเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน เราจึงต้องมีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสื่อการเรียนการสอนแบบเก่า ซึ่งจะช่วยให้การเรียนการสอนแบบเก่าเหมาะกับการเป็นสื่อที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.ให้ผู้สนใจในวิชา คอนกรีตอัดแรงมีความเข้าใจหลักการพื้นฐานและการออกแบบได้ด้วยตัวเอง

2.พัฒนาและปรับปรุงสื่อการสอนแบบเก่าให้มีความทันสมัย

3.เพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้ให้มากขึ้นโดยใช้เวลาที่น้อยลง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาโดยเน้นตามเนื้อหาที่เป็นพื้นฐานที่จำเป็นต้องรู้ โดยยึดหลักตามเนื้อหาที่ใช้ในการเรียนการสอนในห้องเป็นส่วนใหญ่และเพิ่มรูปภาพและตัวอย่างประกอบความเข้าใจให้มากขึ้น ทั้งนี้จะรวมถึงการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์

1.5 วิธีการศึกษา

ผู้จัดทำจะทำการเก็บข้อมูลจากตำราเรียน เอกสารประกอบการสอน ไม่ว่าจะเป็นทั้งในและต่างประเทศ ทั้งนี้รวมถึงการศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมที่จะใช้ และโปรแกรมอื่นๆที่จำเป็น ในโครงงานพิเศษชิ้นนี้ และอีกทั้งยังไปดูและศึกษางานจากบริษัทผู้ผลิต การก่อสร้างจริง เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากแหล่งต่างๆนำมาวิเคราะห์และเรียบเรียงในการทำสื่อการเรียนการสอนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 นิยาม

การอัดแรง หมายถึง การให้ความเค้นแก่องค์อาคารและขณะที่องค์อาคารยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรงคือคอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเพียงแต่วางเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการแต่คอนกรีตอัดแรงเหล็กเสริมจะอยู่ในสภาพเค้นตั้งแต่แรก ทั้งๆที่ยังมิได้รับแรงกระทำจากภายนอกโดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีตทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัดส่วนเหล็กจะอยู่ในสภาพความเค้นดึง สภาพเช่นนี้จะทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้นเหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงหน่วยแรงดึงสูงๆและคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุเปราะรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำเมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต

2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง

2.2.1 ด้านเวลา

โดยทั่วไปการก่อสร้างคอนกรีตอัดแรงกระทำได้รวดเร็วกว่าระบบคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเนื่องจากมีข้อได้เปรียบต่างๆเช่น การวางเหล็กเสริมน้อยกว่า การถอดแบบทำได้เร็วกว่าสามารถถอดแบบได้ทันที เมื่อขั้นตอนการดึงเหล็กเสริมอัดแรงสิ้นสุดลง

2.2.2 ด้านราคา

ก.ทางตรง วัสดุที่ใช้ในคอนกรีตอัดแรงเป็นวัสดุคุณภาพสูงคือคอนกรีตและเหล็กที่ใช้มีกำลังสูงโดยที่ปริมาณวัสดุที่ใช้จะน้อยและโครงสร้างสามารถลดขนาดลงเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปในปัจจุบันคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรงมีคุณภาพสูงราคาก็ไม่สูงมากนักการใช้ปริมาณวัสดุน้อยลงทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมของวัสดุลดลงมากกว่าราคาวัสดุต่อหน่วยที่แพงขึ้นเมื่อใช้วัสดุกำลังสูงดังนั้นแนวโน้มการใช้วัสดุกำลังสูงในปัจจุบันมีมากขึ้นเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.ทางอ้อม เนื่องจากการก่อสร้างคอนกรีตอัดแรงสามารถทำได้รวดเร็วทำให้ประหยัดค่าโสหุ้ยในการก่อสร้างและการถอดแบบที่เร็วขึ้นทำให้สามารถนำไม้แบบมาหมุนเวียนใช้ได้เร็วขึ้นจึงเป็นการประหยัดค่าก่อสร้าง

2.2.3 ด้านคุณภาพ

ก.คอนกรีตอัดแรงเหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีช่วงยาวและรับน้ำหนักบรรทุกมากโดยโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปทำให้รูปร่างไม่ใหญ่โตเทอะทะ

ข. คอนกรีตอัดแรงสามารถออกแบบให้ไม่มีรอยแตกร้าวในคอนกรีตขณะใช้งานในกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกเกินอาจทำให้มีการแตกร้าวในโครงสร้างแต่รอยแตกร้าวเหล่านี้ถ้าไม่เสียหายมากนักจะถูกปิดลงทันทีที่น้ำหนักบรรทุกที่เกินนี้ถูกนำออกไป

ค. การโก่งตัวของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะน้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเนื่องจากผลของแรงยกตัวซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับน้ำหนักบรรทุกและเนื่องจากหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงเป็นหน้าตัดที่ไม่มีรอยแตกร้าวขณะใช้งานดังนั้นสติฟเนสของคอนกรีตอัดแรงจึงสูงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปซึ่งเป็นหน้าตัดที่มีรอยแตกร้าวขณะใช้งาน

ง. คอนกรีตอัดแรงสามารถต้านการกัดกร่อนในเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเพราะไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรงแต่อย่างไรก็ดีถ้าการกัดกร่อนเกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรงปัญหาจะรุนแรงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
โปรแกรมออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

3.1 กล่าวนำ

เนื่องจากปัจจุบันเวลามีส่วนสำคัญในการออกแบบโครงสร้าง และคอมพิวเตอร์ก็เป็นเครื่องมือช่วยลดเวลาในการออกแบบลงได้มากเช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบด้วยมือ อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างทั้งหลายด้วยโปรแกรม จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่ง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นโปรแกรมดังกล่าวจะต้องมี ความถูกต้อง เข้าใจ และตรวจสอบได้ง่าย ไปพร้อมกันด้วย โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโปรมแกรมอย่างลึกซึ้งมาก่อน และโปรแกรมที่ผู้ศึกษาเห็นว่า มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะข้างต้น คือ "โปรแกรม Microsoft Excel "

3.2 วัตถุประสงค์ของโปรแกรม

1. ช่วยลดเวลาในการออกแบบ
2. สามารถที่จะใช้เป็นใบประกอบรายการคำนวณยื่นขออนุมัติได้ทันที
3.ง่ายต่อการเปลี่ยนแบลงข้อมูลใหม่ที่ผู้พิจารณาเห็นสมควร
4. ผู้ใช้โปรแกรมไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโปรแกรมอย่างลึกซึ้ง

3.3 ขอบเขตของโปรแกรม

โปรแกรมดังกล่าวทำการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงหลักๆดังนี้

1. การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน
   - แนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นเส้นตรง
   - แนวเหล็กเสริมอัดแรงมีการหักงอกลางช่วง
2. การออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการเขียนโปรแกรม

ผู้จัดทำจะทำการเก็บข้อมูลจากตำราเรียน เอกสารประกอบการสอน และทำการวิเคราะห์ จัดทำลำดับขั้นตอนการออกแบบ เขียนภาพแผนผังออกแบบที่จะใช้เริ่มต้นในการเขียนโปรแกรม ศึกษาคำสั่งที่ต้องใช้ในการออกแบบจากคู่มือการสอนโปรแกรม และอีกทั้งยังศึกษาจากโปรแกรมออกแบบที่มีมาก่อน เพื่อเป็นแบบอย่างในการออกแบบ และพัฒนาโปรแกรมออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงนี้ให้มีความคุ้นเคย และง่ายต่อความเข้าใจของผู้ใช้มากสุด

3.5 รูปแบบของโปรแกรม

โปรแกรมเป็นลักษณะการป้อนค่าที่ต้องการตามผู้ออกแบบกำหนด โดยทำการป้อนค่าไปยังเซลล์ที่มีตัวเลขที่ขีดเส้นใต้สีน้ำเงิน หรือเลือกข้อมูลจากช่องรายการที่มีให้ โดยโปรแกรมจะคำนวณค่าโดยอัตโนมัติทันทีที่ป้อนข้อมูลเข้า และจะเห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าที่ป้อนเข้าแต่ละตัว ทำให้ผู้ออกแบบ สามารถเลือกออกแบบได้ตามความเหมาะสม โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาเพียงตัวแปรบางค่าเท่านั้น และการคำนวณยังทำตามขั้นตอน ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ไปพร้อมกับการคำนวณได้

และอีกทั้งโปรแกรมยังตรวจสอบอีกว่า ข้อมูลที่ป้อนค่าเข้าไปเหมาะสม ในการออกแบบหรือไม่ โดยโปรแกรมจะเตือน ในลักษณะมีข้อความสีแดง ให้เราป้อนค่าข้อมูลใหม่ที่เหมาะสม จนกว่าข้อความนั้นจะหายไป นั้นแสดงว่าข้อมูลที่ให้นั้น มีความถูกต้องเหมาะสมแล้ว และเมื่อไม่มีข้อความเตือนสีแดงปรากฏตลอกรายการคำนวณ ก็แสดงได้ว่า ทั้งข้อมูลและขนาดองค์อาคารที่ป้อนให้กับโปรแกรมที่ออกแบบนั้น มีความถูกต้องเหมาะสม สามารถที่จะนำไปก่อสร้างได้อย่างปลอดภัย ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐานองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. (2537)

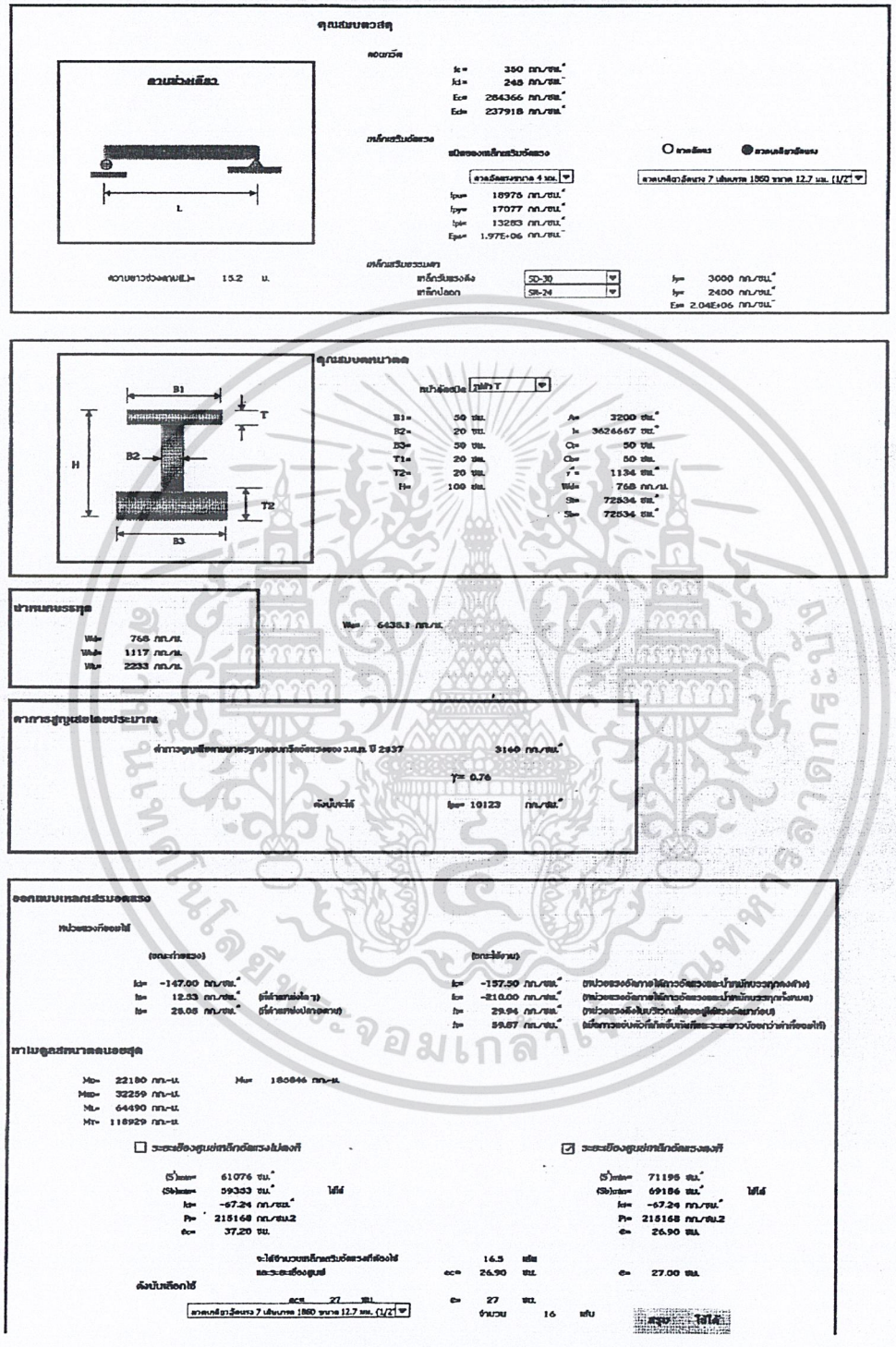
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบโปรแกรมการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน



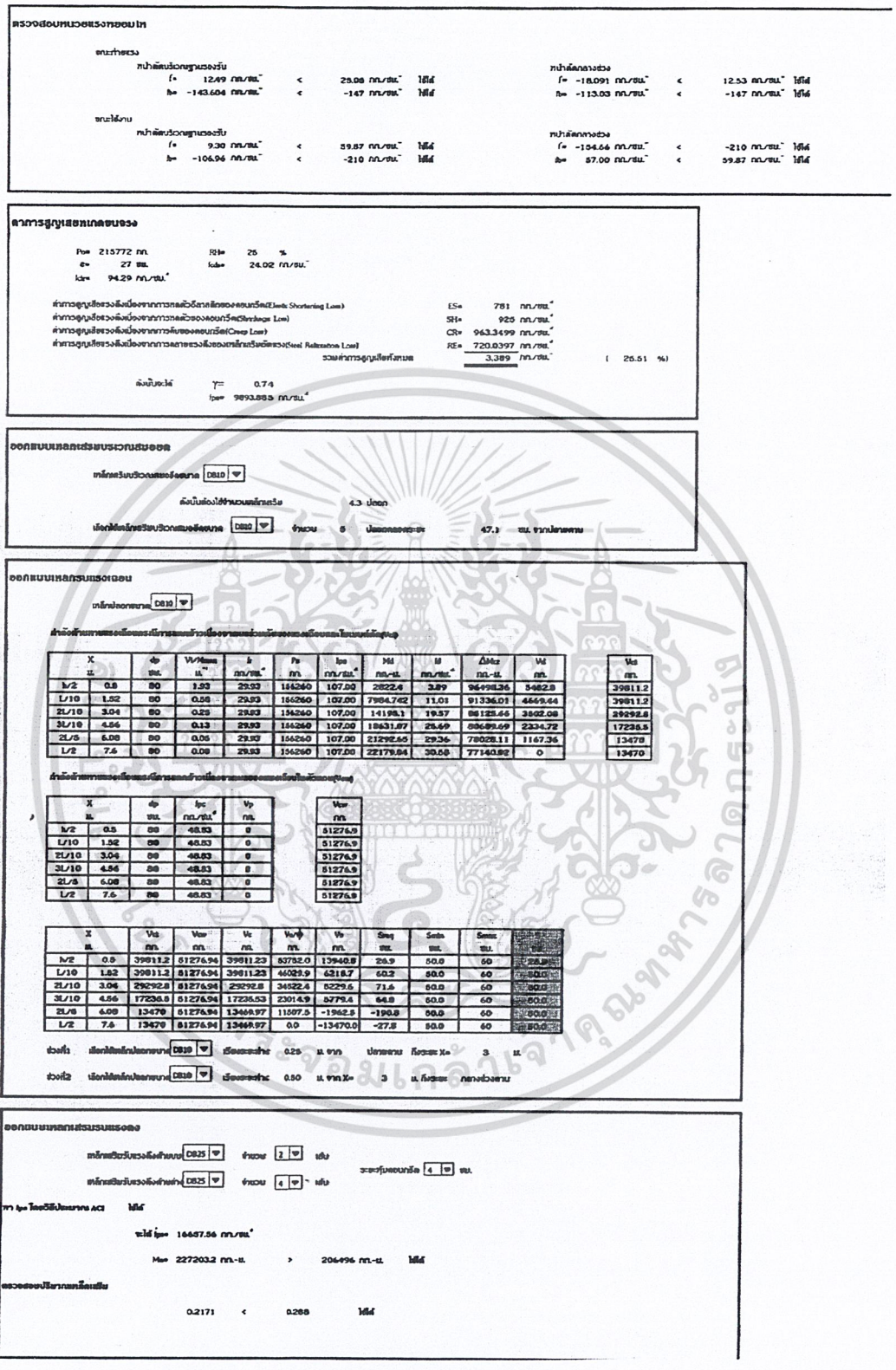
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project	Spreadsheet for Prestressed Concrete	Department of Civil Engineering			
Title	Section Properties				
Client	Ladkrabang Team				
Location	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Made by	Check by	Date	Page
	© 2002 by Department of Civil Engineering	Project Team		19-พ.ค.-02	



รูปที่ 3.1- แสดงโปรแกรมออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2- แสดงโปรแกรมออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน (ต่อ)

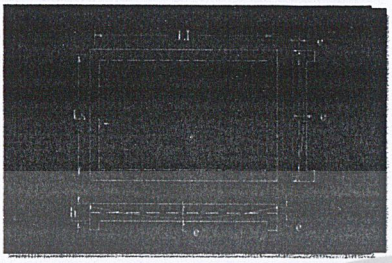
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแบบโปรแกรมการออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษ	ออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงด้วยโปรแกรมเอ็กเซล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	
รายการ	***ออกแบบแผ่นพื้นสองทางมีที่รองรับที่ปลาย***	ออกแบบโดย	Project Team
พัฒนาโดย	นักศึกษาปริญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา	ตรวจสอบโดย	
สถานที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	วันที่ออกแบบ	18-พ.ค.-02
	© 2002 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	แผ่นที่	1

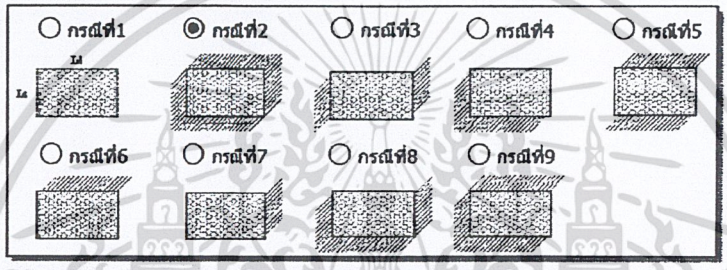


☐ เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว

☑ เหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว

กว้าง	10	เมตร
ยาว	12	เมตร
น้ำหนักบรรทุกคงที่	150	กก./ม.^{2}
น้ำหนักบรรทุกจร	300	กก./ม.^{2}

ชนิดของพื้น



คุณสมบัติวัสดุ

กำลังประลัยของคอนกรีต 350 กก./ซม.^{2} β_1= 0.81

ลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้นและมีการคลายแรงดึงต่ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มม. เกรด 1725 (มอก. 420-2534)

กำลังรับแรงดึงที่จุดประลัย	17500	กก./ซม.^{2}
กำลังรับแรงดึงที่จุดคลาก	15800	กก./ซม.^{2}

ค่าการเสื่อมฉดในเหล็กอัดแรง

ด้านสั้น	15	%
ด้านยาว	15	%

ความหนาเริ่มต้นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

ความหนาเริ่มต้น	20.0	ซม.
เลือกใช้ความหนาพื้น	25	ซม.
ระยะหุ้มคอนกรีต	2	ซม.

แรงพยุงเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรง

น้ำหนักพื้น	600	กก./ม.^{2}
แรงพยุง	750	กก./ม.^{2} (ผลรวมของน้ำหนักพื้นและน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม)

หน่วยแรงอัดคอนกรีตเฉลี่ยในด้านยาว	10	กก./ซม.^{2}	(ไม่น้อยกว่า 7)
แรงอัดประสิทธิผลในทิศทางยาวต่อความกว้าง 1 เมตร	25000	กก./ความกว้าง 1 เมตร	
ระยะเยื้องศูนย์	8.3	ซม.	
แรงพยุงในทิศทางยาว	231	กก./ม.^{2}	
แรงพยุงในทิศทางสั้น	519	กก./ม.^{2}	
แรงอัดประสิทธิผลในทิศทางสั้นต่อความกว้าง 1 เมตร	39082	กก./ความกว้าง 1 เมตร	
หน่วยแรงอัดคอนกรีตเฉลี่ยในด้านสั้น	15.64	กก./ซม.^{2}	(ไม่น้อยกว่า 9)

รูปที่ 3.3- แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษ	ออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงด้วยโปรแกรมเอ็กเซล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	
รายการ	*ออกแบบแผ่นพื้นสองทางมีที่รองรับที่ปลาย*	ออกแบบโดย	Project Team
พัฒนาโดย	นักศึกษาปริญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา	ตรวจสอบโดย	
สถานที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	วันที่ออกแบบ	18-พ.ค.-02
	© 2002 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	แผ่นที่	2

แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิก

ด้านสั้น 45979 กก./ความกว้าง 1 เมตร
ด้านยาว 29412 กก./ความกว้าง 1 เมตร
แรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงด้วยเครื่องดึงลวด 14000 กก./ซม.^{2}

รายละเอียดการเสริมเหล็ก

ระยะห่างของลวดเกลียวอัดแรงในทิศทางสั้น	30.5	ซม.	เลือกใช้	30	ซม.
ระยะห่างของลวดเกลียวอัดแรงในทิศทางยาว	47.6	ซม.	เลือกใช้	45	ซม.

ปริมาณเหล็กเสริมธรรมดา 5.00 ซม.^{2}
เลือกใช้ DB16 เกรด SD40 ระยะห่าง 25 ซม. (A_s= 8.04 ซม.^{2})

ตรวจสอบหน่วยแรงในคอนกรีต

m= 0.80

โมเมนต์ลบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$C_{s,neg}$= 0.07
$C_{l,neg}$= 0.03
$M_{s,neg}$= 1950 กก.-ม.
$M_{l,neg}$= 1167 กก.-ม.

โมเมนต์บวกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$C_{s,ll}$= 0.04
$C_{l,ll}$= 0.02
$M_{s,pos,ll}$= 1230 กก.-ม.
$M_{l,pos,ll}$= 735 กก.-ม.

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ 157.50 กก./ม.^{2}
หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ 29.94 กก./ม.^{2}

ด้านสั้น

บริเวณที่รองรับ
ที่ผิวบน -3.08 กก./ซม.^{2} < 29.94 กก./ซม.^{2} _
ที่ผิวล่าง 34.36 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2} _

บริเวณกึ่งกลางช่วงพื้น
ที่ผิวบน 27.45 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2} _
ที่ผิวล่าง 3.84 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2} _

ด้านยาว

บริเวณที่รองรับ
ที่ผิวบน -1.21 กก./ซม.^{2} < 29.94 กก./ซม.^{2}
ที่ผิวล่าง 21.21 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2}

บริเวณกึ่งกลางช่วงพื้น
ที่ผิวบน 17.06 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2}
ที่ผิวล่าง 2.95 กก./ซม.^{2} < 157.50 กก./ซม.^{2}

ตรวจสอบค่าการโก่งตัวของแผ่นพื้น

E_c= 284366 กก./ซม.^{2}
I_c= 130209 ซม.^{4}
Δ_s= 0.32 ซม.
Δ_l= 0.27 ซม.
Δ_T= 0.30 ซม. < 2.78 ซม.

รูปที่ 3.4- แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษ	ออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงด้วยโปรแกรมเอ็กเซล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	
รายการ	*ออกแบบแผ่นพื้นสองทางมีที่รองรับที่ปลาย*	ออกแบบโดย	Project Team
พัฒนาโดย	นักศึกษาปริญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา	ตรวจสอบโดย	
สถานที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง	วันที่ออกแบบ	18-พ.ค.-02
	© 2002 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา	แผ่นที่	3

ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัย

ด้านสั้น			*ด้านยาว*		
โมเมนต์สุทธิ	4875	กก.-ม.	โมเมนต์สุทธิ	2916	กก.-ม.
โมเมนต์หลัก	3244	กก.-ม.	โมเมนต์หลัก	2075	กก.-ม.
โมเมนต์รอง	1631	กก.-ม.	โมเมนต์รอง	841	กก.-ม.

ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัยในทิศทางสั้น

น้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด	750	กก./ม.^{2}
น้ำหนักบรรทุกจร	300	กก./ม.^{2}
โมเมนต์ดัดประลัย	-8509	กก.-ม.

f_{ps}= 14292 กก./ซม.^{2}
a= 2.6 ซม.
ϕM_n= 13606 กก.-ม. > 8509 กก.-ม.

ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัยในทิศทางยาว

โมเมนต์ดัดประลัย -5225 กก.-ม.

f_{ps}= 14683 กก./ซม.^{2}
a= 2.1 ซม.
ϕM_n= 11289 กก.-ม. > 5225 กก.-ม.

ตรวจสอบกำลังในการรับแรงเฉือน

น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด 187200 กก. d_p= 20.8 ซม.
W_s= 0.71 แรงเฉือนที่ถ่ายลงบนขอบพื้นด้านยาว 5538 กก./ม.
W_l= 0.29 แรงเฉือนที่ถ่ายลงบนขอบพื้นด้านสั้น 2715 กก./ม.

ที่ขอบพื้นด้านยาว

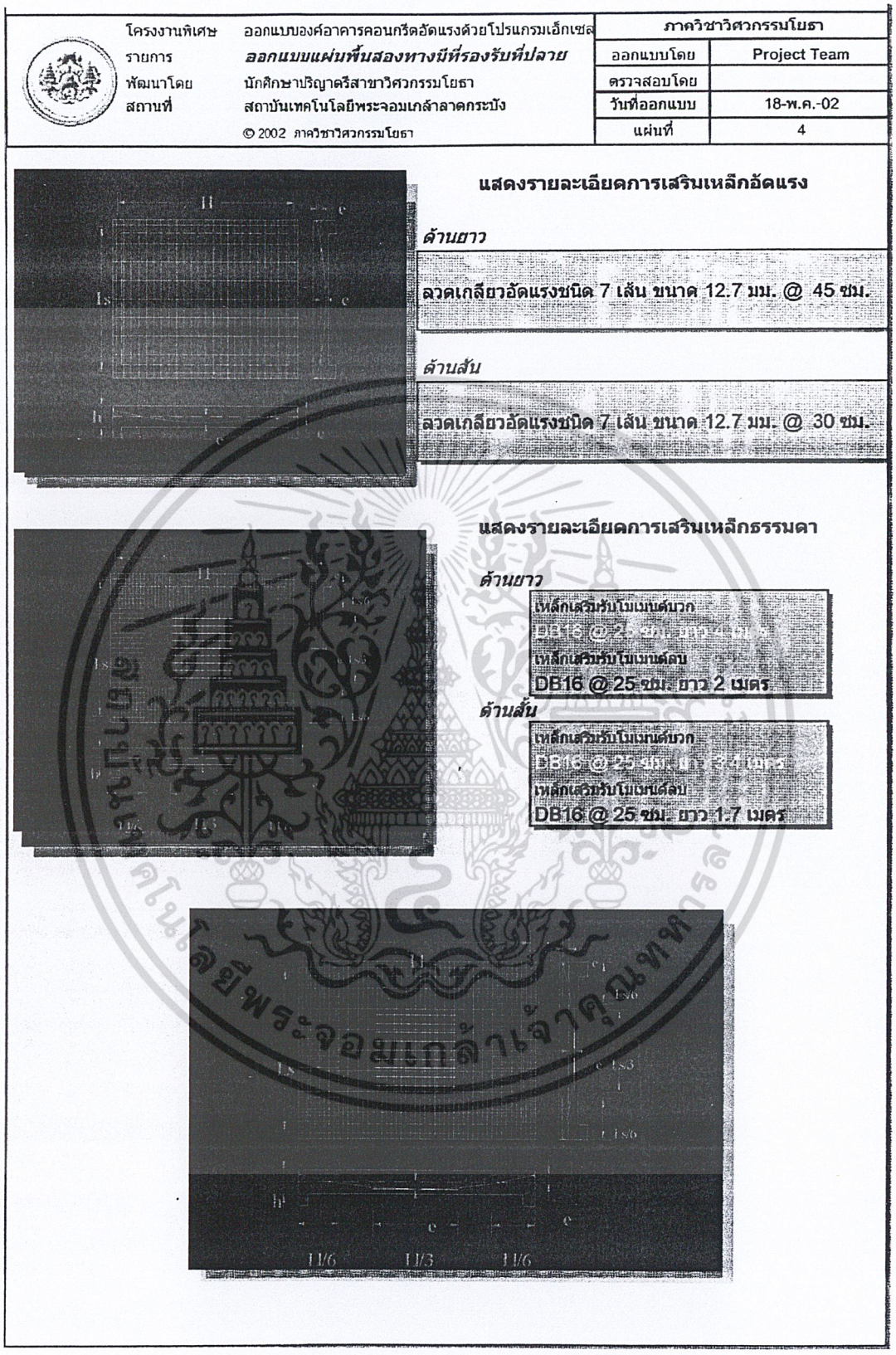
V_c= 20625 กก.
ϕV_c= 17532 กก. > 5538 กก.

ที่ขอบด้านสั้น

V_c= 20625 กก.
ϕV_c= 17532 กก. > 2715 กก.

รูปที่ 3.5- แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6- แสดงโปรแกรมออกแบบพื้นสองทางแบบมีฐานรองรับทุกด้าน (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- นเรศ พันธราธร, 2543. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ : รุ่งแสงการพิมพ์.
- ต่อกุล กาญจนาลัย, 2539. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- Edward G. Nawy, 1999. Prestressed concrete a fundamental approach. 3th Ed., New Jersey : Prentice.
- กรภัทร์ สุทธิดารา, สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร, 2544. Basic&Advanced Excel 2000. พิมพ์ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส.
- สมศักดิ์ ศรีขจรเกียรติ, 2544. Inside Excel. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : บิบลิโอไฟล์ พับลิชชิ่ง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ส่วนเนื้อหาเอกสารประกอบการสอนวิชาคอนกรีตอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	**พื้นฐานของคอนกรีตอัดแรง**	
1.1	บทนำ	I-1
	1.1.1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก	I-2
	1.1.2 ความประหยัดของคอนกรีตอัดแรง	I-3
1.2	วิวัฒนาการของคอนกรีตอัดแรง	I-4
1.3	หลักการพื้นฐานในการอัดแรง	I-5
	1.3.1 คำนำ	I-5
	1.3.2 วิธีพื้นฐาน	I-7
	1.3.3 วิธีแนวแรงอัด	I-10
	1.3.4 วิธีแรงพยุง	I-12
1.4	การจัดหมวดหมู่และชนิด	I-18
	1.4.1 การอัดแรงภายนอกหรือภายใน	I-18
	1.4.2 การอัดแรงในแนวตรงหรือแนวโค้ง	I-19
	1.4.3 การอัดแรงแบบดึงก่อนหรือดึงทีหลัง	I-19
	1.4.4 การยึดลวดที่ปลายหรือบริเวณใกล้ปลาย	I-19
	1.4.5 ลวดอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยวหรือไร้การยึดเหนี่ยว	I-19
	1.4.6 โครงสร้างหล่อสำเร็จ หล่อในที่ และเชิงประกอบ	I-20
	1.4.7 การอัดแรงอย่างเต็มที่หรือบางส่วน	I-20
1.5	ขั้นตอนการรับน้ำหนัก	I-21
	1.5.1 ขั้นตอนเบื้องต้น	I-21
	1.5.2 ขั้นตอนกลาง	I-23
	1.5.3 ขั้นตอนสุดท้าย	I-24
1.6	การเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตอัดแรงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก	I-25
	1.6.1 การใช้งาน	I-26
	1.6.2 ความปลอดภัย	I-27
	1.6.3 ความประหยัด	I-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45828

บทที่ 2 วัสดุและระบบสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง

2.1	คอนกรีต	II-1
	2.1.1 บทนำ	II-1
	2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคอนกรีต	II-1
	2.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีต	II-1
	2.1.3.1 กำลังรับแรงอัด	II-2
	2.1.3.2 กำลังรับแรงดึง	II-3
	2.1.3.3 กำลังรับแรงเฉือน	II-4
2.2	แผนภาพความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีต	II-4
2.3	โมดูลัสยืดหยุ่นและการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดตามเวลา	II-5
	2.3.1 คอนกรีตกำลังสูง	II-6
	2.3.2 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเบื้องต้น	II-8
2.4	การคืบ	II-9
	2.4.1 ผลของการคืบ	II-12
	2.4.2 ค่าของการคืบ	II-13
2.5	การหดตัว	II-14
2.6	เหล็กเสริมธรรมดา	II-16
2.7	เหล็กเสริมอัดแรง	II-18
	2.7.1 ประเภทของเหล็กเสริม	II-18
	2.7.2 ลวดและลวดตีเกลียวอัดแรงชนิดคลายหน่วยแรงและคลายแรงดึงต่ำ	II-19
	2.7.3 เหล็กเส้นกำลังสูง	II-21
	2.7.4 การคลายหน่วยแรงของเหล็กเสริมอัดแรง	II-23
	2.7.5 การกัดกร่อนและการเสื่อมสภาพของลวดตีเกลียวอัดแรง	II-24
2.8	หน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตและเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ACI	II-25
	2.8.1 หน่วยแรงในคอนกรีต	II-25
	2.8.2 หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง	II-25
2.9	ระบบการอัดแรงและสมอยึด	II-26
	2.9.1 ระบบอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน	II-26
	2.9.2 ระบบอัดแรงแบบดึงทีหลัง	II-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 ระบบการดึงเหล็กเสริม II-27
2.9.4 การอัดน้ำปูน II-28
2.9.4.1 วัสดุที่ใช้ในการอัดน้ำปูน II-28
2.9.4.2 ท่อร้อยเหล็กเสริม II-28
2.9.4.3 ขั้นตอนการอัดน้ำปูน II-29

บทที่ 3 การเสื่อมลดของการอัดแรง

3.1 บทนำ III-1
3.2 การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต III-4
3.2.1 องค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน III-4
3.2.2 องค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง III-6
3.3 การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของเหล็กเสริมอัดแรง III-7
3.4 การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต III-10
3.5 การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัว III-11
3.6 การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน III-13
3.7 การเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด III-16
3.8 การเปลี่ยนแปลงแรงอัดเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคาร III-17

บทที่ 4 การออกแบบรับแรงดัด

4.1 บทนำ IV-1
4.2 การเลือกหน้าตัด IV-4
4.2.1 แนวทางทั่วไป IV-4
4.2.2 โมดูลัสหน้าตัดที่น้อยที่สุด IV-4
4.2.2.1 คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงไม่คงที่ IV-6
4.2.2.2 คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงคงที่ IV-8
4.3 ตัวอย่าง การออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน IV-10
4.4 การเลือกหน้าตัดและคุณสมบัติที่เหมาะสมของคาน IV-20
4.4.1 ข้อกำหนดทั่วไป IV-20
4.4.2 หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดและหน้าตัดแปลง IV-21
4.4.3 ขอบเขตของแนวของเหล็กเสริมอัดแรง IV-21
4.4.4 ข้อดีของการวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบโค้งหรือแบบงอ IV-22
4.4.5 ขอบเขตจำกัดของระยะเยื้องศูนย์ IV-26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	4.4.6 การลดแรงอัดที่ใกล้ฐานรองรับ	IV-31
4.5	ปลายคานเหนือฐานรองรับ	IV-32
	4.5.1 การกระจายหน่วยแรง	IV-32
	4.5.2 ระยะฝังและระยะถ่ายแรงในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน	IV-33
	4.5.3 บริเวณสมอยึดของระบบอัดแรงแบบดึงทีหลัง	IV-36
	4.5.3.1 วิธีการออกแบบสำหรับบริเวณทั่วไป	IV-36
	4.5.3.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติก	IV-38
	4.5.3.3 วิธีค้ำยันและยึดโยง	IV-39
	4.5.3.4 หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้	IV-44
4.6	การออกแบบรับแรงดัดของคานเชิงประกอบ	IV-51
	4.6.1 พื้นที่ไม่มีการค้ำยัน	IV-51
	4.6.2 พื้นที่มีการค้ำยันเต็มที่	IV-52
	4.6.3 ความกว้างประสิทธิผลของปีก	IV-53
4.7	สรุปขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน	IV-54
4.8	การออกแบบรับแรงดัดโดยวิธีกำลัง	IV-66
	4.8.1 โมเมนต์แตกร้าว	IV-66
	4.8.2 การอัดแรงบางส่วน	IV-67
4.9	ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณลดกำลัง	IV-69
	4.9.1 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและขอบเขตความปลอดภัยตามมาตรฐาน ACI	IV-69
	4.9.2 การอัดแรงเพียงบางส่วน	IV-70
	4.9.3 กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบและกำลังระบุ	IV-70
4.10	กำลังรับแรงดัดขององค์อาคารแบบมีการยึดเหนี่ยว	IV-71
	4.10.1 บทนำ	IV-71
	4.10.2 การกระจายหน่วยแรงอัดในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าและกำลังโมเมนต์ระบุ	IV-73
	4.10.2.1 กำลังระบุรับโมเมนต์ในหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	IV-74
	4.10.2.2 กำลังระบุรับโมเมนต์ในหน้าตัดแบบมีปีก	IV-76
	4.10.2.3 การหาหน่วยแรงวิบัติของเหล็กเสริมอัดแรง	IV-77
	4.10.2.4 พิกัดของค่าดัชนีเหล็กเสริม	IV-79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.2.5 ขอบเขตสภาวะแรงดัดโดยวิธีกำลัง ในเหล็กเสริมอัดแรงแบบไม่มีการยึดเหนี่ยว IV-82
4.11 การออกแบบเบื้องต้นโดยวิธีกำลัง IV-84
4.12 สรุปขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงภายใต้สภาวะวิบัติ IV-85

บทที่ 5 การออกแบบรับแรงเฉือน

5.1 บทนำ V-1
5.2 พฤติกรรมของคานภายใต้แรงเฉือน V-1
5.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน V-4
5.4 คานคอนกรีตซึ่งไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงดึงในแนวทแยง V-4
5.4.1 ชนิดของการวิบัติของคานซึ่งไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงดึงในแนวทแยง V-6
5.4.2 การวิบัติโดยแรงดัด V-6
5.4.3 การวิบัติโดยแรงดึงในแนวทแยง V-6
5.4.4 การวิบัติโดยแรงเฉือนร่วมกับการอัดแตก V-7
5.5 หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงหลักในคานอัดแรง V-8
5.5.1 กำลังรับผลร่วมของแรงเฉือนและแรงดัด V-9
5.5.2 กำลังรับแรงเฉือนในแกนคาน V-12
5.5.3 กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V-13
5.6 เหล็กเสริมรับแรงเฉือน V-14
5.6.1 โครงถักเสมือน V-14
5.6.2 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง V-16
5.6.3 ข้อกำหนดของขนาดและระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน V-17
5.7 กำลังรับแรงเฉือนแนวนอนในโครงสร้างเชิงประกอบ V-18
5.7.1 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน V-18
5.7.2 ภายใต้ทฤษฎีกำลัง V-18
5.8 ขั้นตอนการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน V-21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่อง

6.1	บทนำ	VI-1
6.2	ข้อเสียของความต่อเนื่องในการอัดแรง	VI-2
6.3	แนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานต่อเนื่อง	VI-2
6.4	การวิเคราะห์คานอัดแรงต่อเนื่อง	VI-5
	6.4.1 คำนำ	VI-5
	6.4.2 วิธีการเคลื่อนตัวของฐานรองรับ	VI-5
	6.4.3 วิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า	VI-8
6.5	ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างแบบต่อเนื่อง	VI-10
6.6	การเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมและความสอดคล้องกับแนวแรงอัด	VI-16
6.7	กำลังประลัยและขอบเขตสภาวะวิบัติของคานต่อเนื่อง	VI-22
6.8	ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรงและการปรับ	VI-23

บทที่ 7 การยกตัวและการแอ่นตัว

7.1	บทนำ	VII-1
7.2	สมมติฐานเบื้องต้นในการหาระยะแอ่นตัว	VII-2
7.3	การแอ่นตัวเบื้องต้นขององค์อาคารทั้งแตกร้าวและไม่แตกร้าว	VII-2
	7.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว	VII-2
	7.3.1.1 สภาวะก่อนการแตกร้าว	VII-3
	7.3.1.2 สภาวะหลังการแตกร้าวช่วงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน	VII-5
	7.3.1.3 สภาวะแตกร้าวหลังช่วงการใช้งานและขอบเขตของพฤติกรรมของการแอ่นตัว ณ จุดวิบัติ	VII-6
	7.3.2 หน้าตัดไม่แตกร้าว	VII-6
	7.3.2.1 การหาระยะแอ่นตัว	VII-6
	7.3.2.2 การหาหน่วยการยืดหดตัวและความโค้ง	VII-8
	7.3.3 หน้าตัดแตกร้าว	VII-10
	7.3.3.1 วิธีโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล	VII-10
	7.3.3.2 วิธีเชิงเส้นคู่	VII-12
	7.3.3.3 วิธีเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง	VII-13
7.4	การแอ่นตัวและการยกตัวระยะยาว	VII-22
7.5	พิกัดของระยะแอ่นตัว	VII-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8 ระบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสองทาง

8.1	บทนำ	VIII-1
8.2	พฤติกรรมของแผ่นพื้นสองทางภายใต้แรงดัด	VIII-3
8.3	วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า	VIII-5
	8.3.1 ข้อจำกัดของวิธีออกแบบโดยตรง	VIII-5
	8.3.2 การหาโมเมนต์สถิต	VIII-6
	8.3.3 การวิเคราะห์โดยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า	VIII-8
	8.3.4 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร	VIII-11
8.4	แรงพยุงสองทิศทาง	VIII-12
8.5	กำลังดัดของแผ่นพื้นอัดแรง	VIII-14
8.6	แถบของเหล็กเสริมอัดแรงและพิกัดของหน่วยแรงในคอนกรีต	VIII-17
	8.6.1 การกระจายเหล็กเสริมอัดแรง	VIII-17
	8.6.2 พิกัดของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน	VIII-19
	8.6.2.1 แรงดัด	VIII-19
	8.6.2.2 เหล็กเสริม	VIII-19
	8.6.2.3 แรงเฉือน	VIII-21
8.7	ระบบแผ่นพื้นทางเดียว	VIII-22
8.8	การถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนจากแผ่นพื้นสู่เสา	VIII-28
	8.8.1 กำลังรับแรงเฉือน	VIII-28
	8.8.2 การส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์	VIII-28
	8.8.3 ความหนาน้อยสุดตามข้อกำหนดของระยะแอ่นตัว	VIII-31
8.9	ขั้นตอนในการออกแบบระบบแผ่นพื้นอัดแรงสองทาง	VIII-33

บทที่ 9 ข้อต่อในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

9.1	บทนำ	IX-1
9.2	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้	IX-2
9.3	องค์อาคารเชิงประกอบ	IX-2
9.4	แรงแบกทานของคอนกรีตในองค์อาคารเชิงประกอบ	IX-4
9.5	ข้อต่อที่ปลายคานที่ปลายเป็นแบบมีบ่าตื้น	IX-9
	9.5.1 เหล็กเสริมรับแรงดัดและแรงดึงตามแกน	IX-10
	9.5.2 เหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนในแนวดิ่ง	IX-11
	9.5.3 เหล็กเสริมรับแรงดึงทแยงที่มุม	IX-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	9.5.4 เหล็กเสริมรับแรงดึงทแยงในบ่า	IX-12
9.6	เท้าแขนและแป้นหูช้าง	IX-16
9.7	เชิงยื่น	IX-16
9.8	ตัวอย่างรายละเอียดข้อต่อ	IX-21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1
พื้นฐาน

1.1 บทนำ

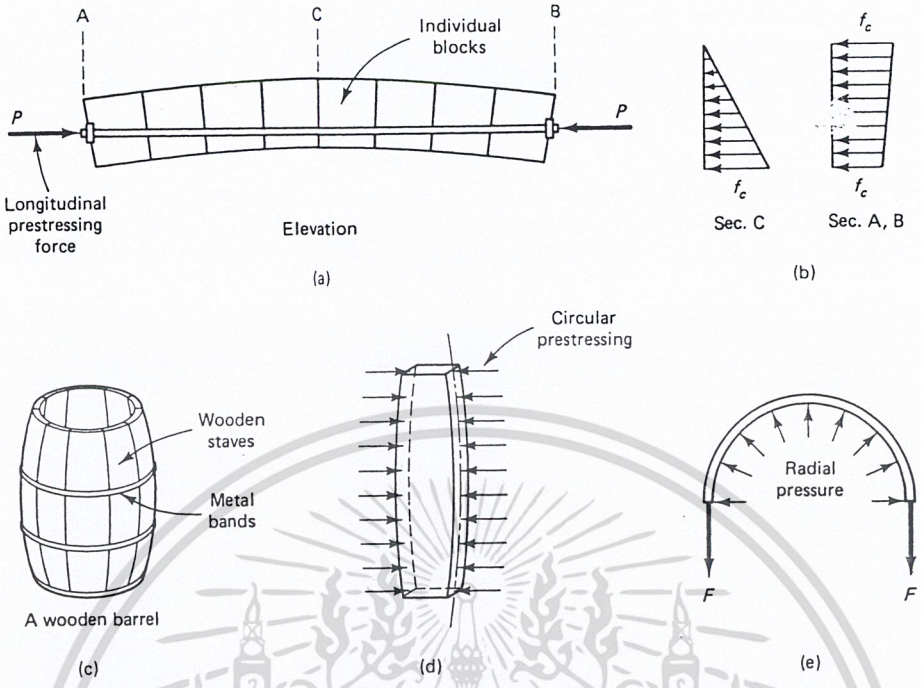
คอนกรีตรับแรงอัดได้สูงแต่รับแรงดึงได้น้อยมาก กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะแปรเปลี่ยนระหว่างร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 14 ของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงที่ต่ำทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดขึ้นได้ง่ายภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ไม่มากนัก การป้องกันหรือการลดรอยแตกร้าวจะกระทำได้ด้วยการเพิ่มแรงอัดตามแกนเข้าไปในองค์อาคาร แรงดังกล่าวจะช่วยลดหน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่หน้าตัดวิกฤตบริเวณกลางช่วงและบริเวณฐานรองรับ ทำให้องค์อาคารมีกำลังรับแรงดัด รับแรงเฉือน รับแรงบิดเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น เกือบทั้งหน้าตัดขององค์อาคารจะอยู่ภายใต้แรงอัด ทำให้เนื้อคอนกรีตบนหน้าตัดได้ถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

จะเรียกแรงตามแกนดังกล่าวว่า "แรงอัด" (prestressing force) เป็นแรงที่ทำให้เกิดหน่วยแรงเบื้องต้นบนทุกหน้าตัดตามแกนขององค์อาคาร ก่อนที่จะมีการใช้งานหรือรับน้ำหนักบรรทุก ชนิดและขนาดของแรงขึ้นอยู่กับ ระบบโครงสร้าง ความยาวช่วง และความชะลูดขององค์อาคาร เนื่องจากการอัดแรงกระทำตามยาวในแนวขนานหรือตามแนวแกนขององค์อาคาร การอัดแรงในระบบนี้จึงเป็นที่รู้จักกันว่าเป็น "การอัดแรงในแนวตรง" (linear prestressing)

การอัดแรงในแนวโค้ง (circular prestressing) มักจะใช้ในถังเก็บของเหลว ท่อ และเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การอัดแรงในระบบนี้ใช้พื้นฐานเดียวกับการอัดแรงในแนวตรง โดยแรงอัดตามแนวเส้นรอบวงของโครงสร้างทรงกลม จะต้านหน่วยแรงดึงบนผิวของโครงสร้างซึ่งเกิดมาจากแรงดันภายใน

รูปที่ 1.1 แสดงพื้นฐานการอัดแรงทั้งสองประเภทและแสดงพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น รูป (a.) แสดงแท่งคอนกรีตหลายแท่งมาประกอบกันเป็นคาน โดยการยึดเข้ากันไว้ด้วยแรงอัด P การเคลื่อนตัวแยกออกจากกันในแนวดิ่งของแท่งคอนกรีตจะถูกต้านด้วยแรงอัด P เช่นเดียวกับถังไม้ในรูป (c.) ซึ่งน้ำภายในถังพยายามดันไม้แต่ละชิ้นให้แยกจากกัน แต่ก็ถูกต้านด้วยแรงอัดในแผ่นเหล็กที่รัดรอบถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 – การอัดแรงในแนวตรงและแนวโค้ง (a) คานซึ่งประกอบด้วยแท่งคอนกรีตหลายแท่งยึดเข้าด้วยกันโดยแรงอัดในแนวตรง (b) หน่วยแรงอัดที่กลางช่วง หน้าตัด C และที่ปลาย หน้าตัด A และ B (c) แรงอัดในแนวโค้งบนถังไม้เกิดจากแรงดึงในแผ่นเหล็ก (d) แรงอัดในแนวเส้นรอบรูปกระทำบนแผ่นไม้ซึ่งประกอบเป็นถัง (e) แรงดึง F ในแผ่นเหล็กรัดรอบเกิดจากแรงดันภายในถังซึ่งจะต้องสมดุลกับแรงอัดในแนวโค้งบนทุกแผ่นไม้รอบถัง

1.1.1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากหัวข้อที่แล้ว จะเห็นว่าหน่วยแรงถาวรในองค์อาคารอัดแรงจะเกิดขึ้นก่อนที่น้ำหนักบรรทุกภายนอกทั้งหลายจะมากระทำบนองค์อาคาร การอัดแรงมีจุดประสงค์เพื่อลดหน่วยแรงดึงสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเหล่านั้น ในระหว่างที่ในคอนกรีตเสริมเหล็ก จะถือว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีน้อยมากจนไม่นำมาคิด ทั้งนี้ก็เพราะว่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์จะถูกต้านด้วยแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการเสริมเหล็ก รอยแตกร้าวและการแอ่นตัวในคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเป็นสิ่งที่แก้ไขไม่ได้เมื่อองค์อาคารอยู่ภายใต้สภาวะสูงสุดของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

เหล็กเสริมในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ได้ถ่ายแรงโดยตรงลงสู่องค์อาคาร ตรงกันข้ามกับเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งอัดแรงโดยตรงเข้าสู่องค์อาคาร ช่วยในการควบคุมรอยแตกร้าวและการแอ่นตัว แต่เมื่อแรงดัดทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีตสูงเกินกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต องค์อาคารคอนกรีตอัดแรงก็จะเริ่มมีพฤติกรรมเหมือนองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ปริมาณของการอัดแรงเป็นตัวควบคุมให้ระบบโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหรือเปราะโดยไม่มีผลกระทบต่อกำลังของโครงสร้าง ในระหว่างที่ในคอนกรีตเสริมเหล็ก การควบคุมพฤติกรรมเหล่านี้เป็นสิ่งที่ทำได้ยากเมื่อต้องคำนึงถึงราคาของโครงสร้าง โครงสร้างแบบยืดหยุ่น เช่น เสาเข็มกันกระแทกบริเวณท่าเรือ จำเป็นต้องใช้คอนกรีตอัดแรงเพื่อให้เข็มรับการกระแทกและคืนรูปเข้าสู่สภาพเดิม ในโครงสร้างที่ต้องรับแรงสั่นสะเทือนที่รุนแรง เช่น ฐานรากของเครื่องจักร ก็จะต้องใช้การอัดแรงเพื่อลดการแอ่นตัวของฐานราก

1.1.2 ความประหยัดของคอนกรีตอัดแรง

เมื่อมีความยาวช่วงเท่ากันและภายใต้น้ำหนักบรรทุกเดียวกัน องค์อาคารคอนกรีตอัดแรงจะมีความหนาประสิทธิผลน้อยกว่าองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปความหนาจะประมาณร้อยละ 65 ถึง 80 ขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงจะใช้คอนกรีตน้อยกว่า และใช้เหล็กเสริมประมาณร้อยละ 20 ถึง 35 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ความประหยัดของวัสดุก็ถูกลบล้างไปด้วยราคาที่แพงขึ้นเมื่อต้องใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการอัดแรง และงานไม้แบบที่ยุ่งยากขึ้น เพราะโดยทั่วไปหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงจะมีปีกเพิ่มขึ้นนอกเหนือไปจากหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

ถึงแม้ค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีการผลิตชิ้นส่วนหล่อสำเร็จรูปเป็นจำนวนมาก ราคาเบื้องต้นของระบบอัดแรงก็จะไม่แตกต่างมากนักจากระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ความประหยัดทางอ้อมในระยะยาวจะเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการบำรุงรักษาที่น้อยกว่า อายุการใช้งานที่ยาวกว่าเนื่องจากการควบคุมคุณภาพที่ดีกว่า และฐานรากที่ประหยัดกว่า เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างที่เบากว่า

เมื่อใช้ในช่วงยาวเกิน 20 ถึง 30 เมตร น้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะมาก จนทำให้เกิดการแอ่นตัวสูงในระยะยาวส่งผลในเกิดการแตกร้าวในปริมาณที่มาก ดังนั้นในโครงสร้างช่วงยาว จึงมักจะใช้คอนกรีตอัดแรงแทนโครงสร้างแบบโค้งตั้ง (arch) เพราะโค้งตั้งมีราคาค่อนข้างแพงและมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนักเนื่องจากการหดตัวและการคืบ ในโครงสร้างช่วงยาว เช่นสะพานซึ่งแยกเป็นหลายส่วนแล้วนำมาต่อเข้าด้วยกัน (segmental bridges) หรือสะพานขึงจะต้องก่อสร้างโดยระบบอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วิวัฒนาการของคอนกรีตอัดแรง

คอนกรีตอัดแรงไม่ใช่เรื่องใหม่ ย้อนกลับไปในปี พ.ศ. 2415 เมื่อ P. H. Jackson วิศวกรจากมลรัฐแคลิฟอร์เนีย ได้จดสิทธิบัตรระบบอัดแรงโดยใช้เหล็กดึงยึดแท่งคอนกรีตหลายแท่งประกอบเป็นคานหรือโค้งตั้ง [รูปที่ 1.1(a)] ในปี พ.ศ. 2431 C .W. Doehring ชาวเยอรมัน ได้จดสิทธิบัตรพื้นคอนกรีตอัดแรงโดยใช้ลวดโลหะ แต่ระบบดังกล่าวไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรเนื่องจากการเสื่อมลดของแรงอัด J. Lund ชาวนอร์เวย์ และ G.R. Steiner ชาวอเมริกันได้พยายามแก้ไขปัญหานี้ในตอนต้นทศวรรษที่ 25 แต่ไม่ประสบความสำเร็จ

หลังจากที่เวลาผ่านไปนานโดยไม่มีความคืบหน้าในการแก้ปัญหานี้ เนื่องจากในเวลานั้นยังไม่มีการพัฒนาลวดแรงสูง R.E. Dill ชาวเมืองอเล็กซานเดรีย มลรัฐเนบราสก้า ได้ค้นพบผลของการคืบและการหดตัวที่มีต่อการเสื่อมลดของแรงอัด และได้แก้ไขการเสื่อมลดของแรงอัดในลวดอัดแรงเนื่องจากการหดตัวขององค์อาคารอันเป็นผลมาจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต ด้วยการใช้ลวดที่ไม่มีการยึดเหนี่ยวกับเนื้อคอนกรีตและดึงลวดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ต้นปี พ.ศ. 2463 W. H. Hewett ชาวเมืองมินนีอาโพลิส ได้พัฒนาหลักการการอัดแรงตามแนวโค้ง โดยใช้การอัดแรงเหล็กเสริมในแนวนอนรอบผนังของถังคอนกรีตด้วยเกลียวเร่ง (turnbuckle) การอัดแรงรอบถังช่วยป้องกันการแตกร้าวในผนังเนื่องจากแรงดันของของเหลวภายในถัง ทำให้คอนกรีตภายใต้แรงอัดมีสภาพทึบน้ำ ตั้งแต่นั้นมา ได้มีการอัดแรงในถังน้ำและท่อน้ำอย่างแพร่หลายในอเมริกา ในสามทศวรรษหลังจากนั้น ประมาณได้ว่ามีการสร้างถังน้ำ ถังเก็บสารเคมีและแก๊สด้วยการอัดแรงเป็นจำนวนหลายพัน และมีการวางท่ออัดแรงเป็นความยาวที่วัดไม่ได้

การอัดแรงในแนวตรงยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในยุโรปและฝรั่งเศส ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากความสามารถของ Eugene Freyssinet ผู้ซึ่งได้เสนอวิธีแก้การเสื่อมลดของแรงดึงในระหว่างปี พ.ศ. 2469 ถึง 2471 ด้วยการใช้เหล็กซึ่งมีกำลังและความเหนียวสูง ในปี พ.ศ. 2483 เขาได้นำเสนอระบบของ Freyssinet อันมีชื่อเสียงและเป็นที่นิยมใช้ทั่วไป ระบบดังกล่าวประกอบด้วยลิ่มรูปโคนซึ่งใช้เป็นตัวยึดลวดอัดแรงตีเกลียว 12 เส้น

ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สองและทั้งในช่วงเวลาหลังสงคราม มีความจำเป็นที่จะต้องสร้างสะพานหลักขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อทดแทนสะพานที่ถูกทำลายไปในระหว่างสงคราม G. Magnel ชาวเมืองเก็นต์ ประเทศเบลเยี่ยม และ Y. Guyon ชาวเมืองปารีส ได้พัฒนาพื้นฐานการออกแบบและระบบการก่อสร้างคอนกรีตอัดแรง ซึ่งใช้ก่อสร้างสะพานเป็นจำนวนมากในตอนกลางและในด้านตะวันตกของทวีปยุโรป ระบบของ Magnel มีส่วนคล้ายระบบของ Freyssinet ในการใช้ลิ่มเป็นตัวยึดลวดอัดแรง จะแตกต่างกันในส่วนที่ลิ่มในระบบนี้มีรูปร่างแบนและใช้ยึดลวดได้เพียงสองเส้น

ในระหว่างทศวรรษ 2470 ถึง 2500 การพัฒนาที่สมควรแก่การกล่าวถึงได้แก่ การที่ P. W. Abeles ชาวอังกฤษได้นำเสนอและพัฒนาหลักการอัดแรงแต่บางส่วน และการที่ผู้ทรงคุณวุฒิสามท่าน อันได้แก่ F. Leonhardt ชาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เยอรมัน V. Mikhailov ชาวรัสเซีย และ T. Y. Lin ชาวอเมริกัน ได้มีส่วนร่วมอย่างมากในวิวัฒนาการของการออกแบบคอนกรีตอัดแรง วิธีแรงพยุงของ Lin (load balancing method) สมควรที่จะได้รับการยกย่องอย่างยิ่ง เพราะเป็นวิธีที่ทำให้การออกแบบโครงสร้างต่อเนื่องกลายเป็นเรื่องที่ง่าย ผลของการพัฒนาในยุคนี้ส่งผลให้คอนกรีตอัดแรงเป็นสิ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตอัดแรงอย่างแพร่หลายในอาคาร โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างในทะเล โรงปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และสะพานระบบต่าง ๆ ความสำเร็จในการพัฒนาและการก่อสร้างเป็นผลมาจากความก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยีของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในลวดอัดแรง และความรู้ที่ได้สะสมต่อเนื่องในเรื่องของการเสื่อมลดแรงดึงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

1.3 หลักการพื้นฐานในการอัดแรง

1.3.1 คำนำ

แรงอัด P ที่เหมาะสมกับรูปร่างและน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนองค์อาคารใด ๆ (รูปที่ 1.2) จะหาได้จากหลักของกลศาสตร์และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัว โดยจะถือว่าคานอัดแรงมีคุณสมบัติที่คงที่และอยู่ภายใต้พิกัดยืดหยุ่น

คานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าช่วงเดี่ยว [รูปที่ 1.2(a)] อยู่ภายใต้แรงอัดตามแกน P หน่วยแรงอัดบนหน้าตัดของคานจะคงที่และมีค่า

$$f = -\frac{P}{A_c} \qquad (1.1)$$

โดยที่ A_C = bh เป็นพื้นที่หน้าตัดของคาน ซึ่งมีความกว้าง b และความลึก h ในตลอดหนังสือเล่มนี้จะใช้เครื่องหมายลบแสดงหน่วยแรงอัดและเครื่องหมายบวกแสดงหน่วยแรงดึง

ถ้าน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำต่อคาน และทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุด M ที่กลางช่วง หน่วยแรงลัพธ์จะมีค่าเป็น

$$f^t = -\frac{P}{A} - \frac{Mc}{I_g} \qquad (1.2a)$$

และ

$$f_b = -\frac{P}{A} + \frac{Mc}{I_g} \qquad (1.2b)$$

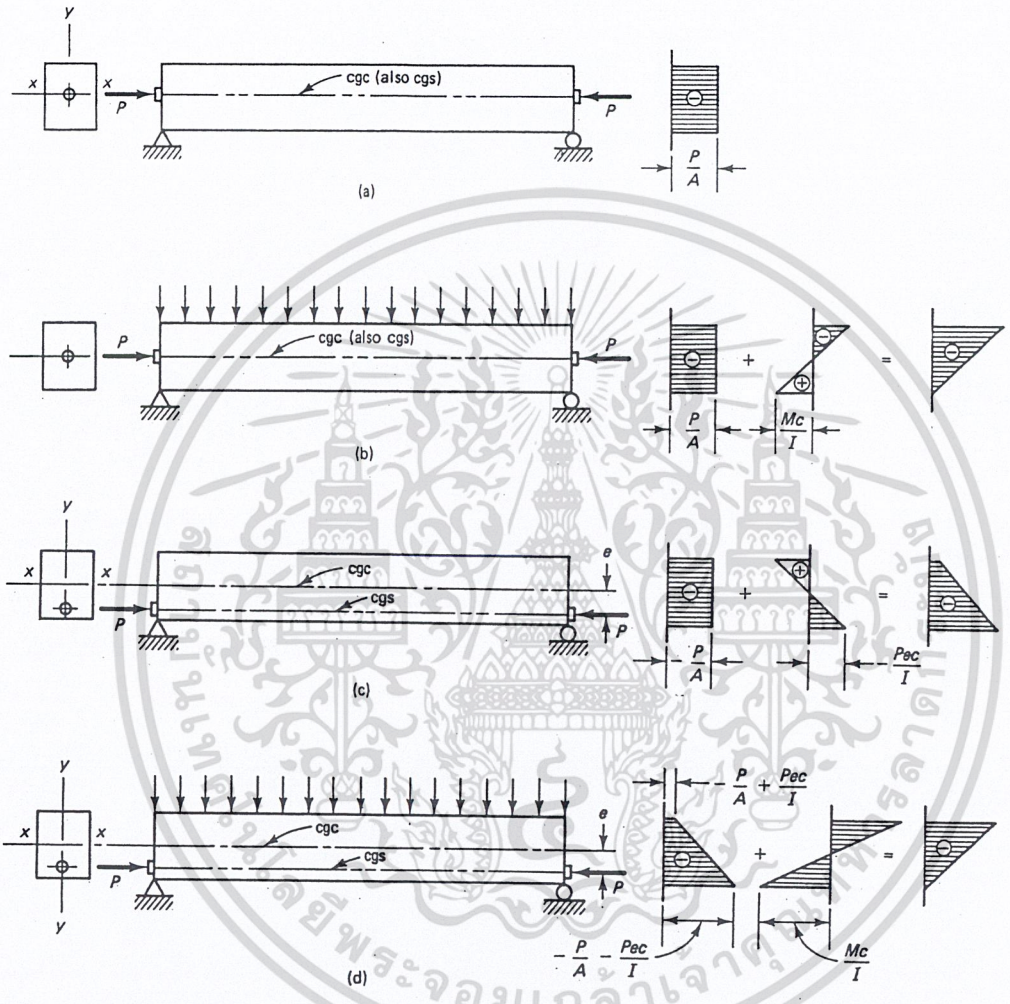
โดยที่ f^t = หน่วยแรงที่ผิวบนของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_b = หน่วยแรงที่ผิวล่างของคาน

c = h/2 สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

I_g = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ($bh^3/12$ สำหรับคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า)



รูปที่ 1.2 – การกระจายหน่วยแรงบนผิวของคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอัดแรงด้วยลวดเส้นตรง (a) ลวดวางตามแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด แรงอัดอย่างเดียว (b) รวมน้ำหนักคาน (c) ลวดวางตามแนวเยื้องศูนย์ แรงอัดอย่างเดียว (d) รวมน้ำหนักคาน

สมการที่ 1.2b แสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรง – P/A ช่วยลดหน่วยแรงดึงเนื่องจากการดัด Mc/I ให้อยู่ภายใต้ค่าที่ยอมให้ หรืออาจจะลดให้เป็นศูนย์หรือแม้กระทั่งทำให้ทั้งหน้าตัดอยู่ภายใต้แรงอัดก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ทำให้หน้าตัดนั้นไม่มีการแตกร้าวและมีคุณสมบัติแบบยืดหยุ่น จะเห็นได้ว่าจุดอ่อนของคอนกรีตในด้านการรับแรงดึงได้ถูกแก้ไขด้วยแรงอัดจากลวดอัดแรง

ที่ผิวบนของคาน จากสมการ 1.2a หน่วยแรงอัดเนื่องจากการอัดแรงจะรวมกับหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนัก - Mc/I ตามที่แสดงในรูปที่ 1.2b ดังนั้นจะเห็นว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของคานจะถูกลดลงเมื่อใช้การอัดแรงตามแนวศูนย์ถ่วงของคาน แต่ถ้าวางลวดอัดแรงใต้แกนสะเทินที่กลางช่วง การอัดแรงจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่ผิวบนของคาน [รูปที่ 1.2(c) และ (d)] ถ้าวางลวดอัดแรงที่ระยะ e จากแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด จะทำให้เกิดโมเมนต์ Pe และทำให้หน่วยแรงที่กลางช่วงกลายเป็น

$$f' = -\frac{P}{A} + \frac{Pec}{I_g} - \frac{Mc}{I_g} \qquad (1.3a)$$

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{Pec}{I_g} + \frac{Mc}{I_g} \qquad (1.3b)$$

เนื่องจากบริเวณฐานรองรับของคานช่วงเดี่ยว จะไม่รับโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ทำให้บริเวณนี้เกิดหน่วยแรงดึงสูงเนื่องจากการอัดแรง เพื่อลดหน่วยแรงนี้ จะลดระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงในบริเวณนี้ หรืออาจจะวางลวดอัดแรงไว้เหนือแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดก็ได้

1.3.2 วิธีพื้นฐาน (Basic Concept Method)

ในแนวคิดของวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง จะใช้การหาหน่วยแรงในคอนกรีตโดยตรงจากแรงภายนอกที่กระทำอันประกอบด้วยการอัดแรงตามแกนและน้ำหนักบรรทุกภายนอก ด้วยการปรับปรุงสมการ 1.3a และ b ให้ง่ายขึ้น เพื่อใช้หาหน่วยแรงเบื้องต้นที่สภาวะอัดแรง และที่สภาวะรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ถ้าให้ P_i เป็นหน่วยแรงเบื้องต้นจากการอัดแรงก่อนการเสื่อมลด และให้ P_e เป็นหน่วยแรงอัดประสิทธิผลหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง จะได้

$$\gamma = \frac{P_e}{P_i}$$

ซึ่งจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของแรงอัดที่เหลือ ถ้าแทนค่า r^2 ด้วย I_g/A_c ลงในสมการ 1.3 โดยที่ r เป็นรัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดทั้งหมด จะเขียนสมการของหน่วยแรงใหม่ได้ดังนี้

(a) เนื่องจากการอัดแรงอย่างเดียว

$$f' = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) \qquad (1.4a)$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) \qquad (1.4b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ c_t และ c_b เป็นระยะจากศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงขอบบนและขอบล่างตามลำดับ

(b) เนื่องจากการอัดแรงร่วมกับน้ำหนักขององค์อาคาร

ถ้าน้ำหนักของคานทำให้เกิดโมเมนต์ M_D ที่หน้าตัดที่พิจารณา สมการที่ 1.4a และ b จะกลายเป็น

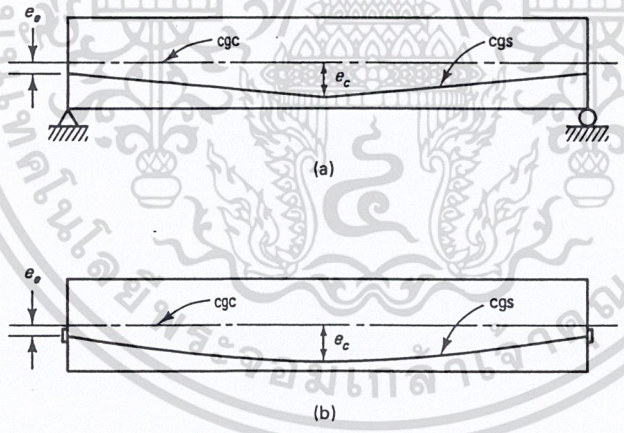
$$f' = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \qquad (1.5a)$$

และ

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \qquad (1.5b)$$

โดยที่ S^t และ S_b เป็นโมดูลัสหน้าตัดที่ขอบบนและขอบล่างตามลำดับ

การเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์จากกลางช่วงไปยังบริเวณฐานรองรับ กระทำได้อย่างฉับพลันด้วยการงอลวดที่กลางช่วงซึ่งเรียกว่า "harping" หรือค่อย ๆ ลดในรูปของพาราโบล่าซึ่งเรียกว่า "draping" รูปที่ 1.3(a) แสดงการวางลวดอัดแรงแบบงอกลางช่วงซึ่งมักจะใช้ในคานแบบอัดแรงก่อน (pre-tensioned) ในระหว่างที่รูปที่ 1.3(b) แสดงการวางลวดอัดแรงในรูปของพาราโบล่าซึ่งมักจะใช้ในคานแบบอัดแรงทีหลัง (post-tensioned)



รูปที่ 1.3 - แนวการวางลวดอัดแรง (a) แบบงอกลางช่วง (b) แบบพาราโบล่า

หลังจากการติดตั้งแผ่นพื้น น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำบนโครงสร้างจะทำให้เกิดโมเมนต์เพิ่มขึ้น M_s ผลของน้ำหนักบรรทุกเหล่านี้จะเกิดขึ้นเต็มที่หลังจากการก่อสร้างอาคารเสร็จเรียบร้อยและเมื่อการเสื่อมลดของการอัดแรงได้เกิดขึ้น ดังนั้นแรงอัดที่ใช้ในสมการของหน่วยแรง จะต้องเป็นแรงอัดประสิทธิผล P_e และถ้าให้โมเมนต์ทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนักโน้มถ่วงเป็น M_T จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L \tag{1.6}$$

โดยที่ M_D = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง

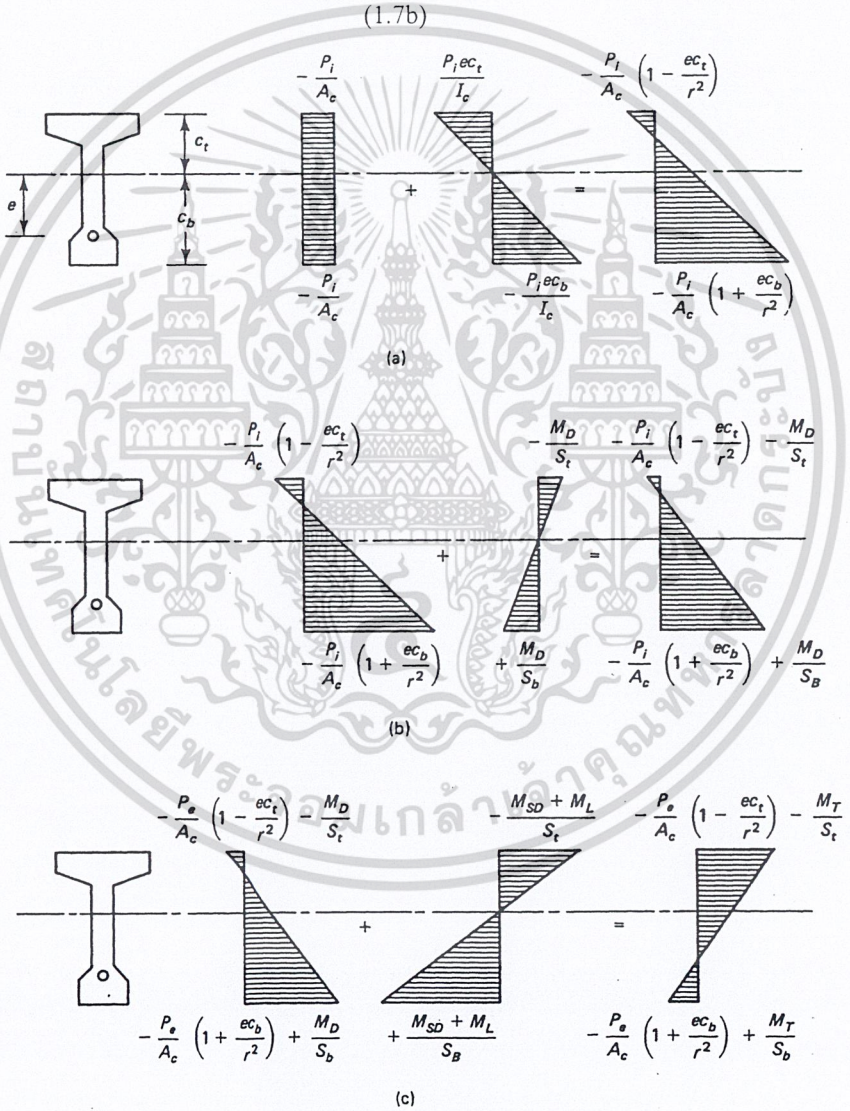
M_{SD} = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่น ๆ เช่น แผ่นพื้น

M_L = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร รวมทั้งน้ำหนักกระแทก แรงแผ่นดินไหว และอื่น ๆ

สมการที่ 1.5 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$f' = -\frac{P_e}{A_e}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t} \tag{1.7a}$$

(1.7b)



รูปที่ 1.4 – หน่วยแรงที่สภาวะต่าง ๆ (a) การอัดแรงเบื้องต้นก่อนการสูญเสีย (b) รวมน้ำหนักของตัวเอง (c) น้ำหนักบรรทุกใช้งานและแรงอัดประสิทธิผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.4 แสดงรูปแบบทั่วไปของการกระจายหน่วยแรงที่หน้าตัดวิกฤติของหน้าตัดอัดแรงแบบมีปีก หน่วยแรงดึงทั้งหมดตามรูป (c) จะต้องไม่เกินค่าสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ ถ้าเกิน จะต้องออกแบบเหล็กเสริมไม่อัดแรงเพื่อรับแรงดึงทั้งหมดและเพื่อควบคุมการแตกร้าวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

1.3.3 วิธีแนวแรงอัด (C–Line Method)

ในแนวคิดนี้จะวิเคราะห์คานเสมือนกับเป็นคานคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กโดยใช้หลักกลศาสตร์เบื้องต้น แรงจากการอัดแรงจะถือเป็นแรงอัดจากภายนอก และแรงดึง T ในลวดอัดแรงจะถือว่ามีค่าคงที่ตลอดความยาวของคาน ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงผลจากน้ำหนักบรรทุกโน้มถ่วงภายนอก (external gravity loads) การวิเคราะห์จะใช้สมการสมดุล $\Sigma H = 0$ และ $\Sigma M = 0$ พิจารณาที่หน้าตัด

รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ของแนวแรงอัด C และแรงดึง T ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ในคานคอนกรีตอัดแรง จะเห็นได้ว่า แรง T ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ ระยะห่างระหว่างแรงคู่ควบ a จะมีค่าคงที่ตลอดเวลา ในระหว่างที่ในคานคอนกรีตอัดแรง ระยะห่างระหว่างแรงคู่ควบจะเริ่มจากศูนย์ที่สภาวะอัดแรง ไปจนถึงค่าสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำเต็มที่

จาก free-body diagram ของคานในรูปที่ 1.6 จะเห็นการแปรเปลี่ยนของระยะระหว่างแรงคู่ควบ และจะหาโมเมนต์ได้จาก

$$M = Ca = Ta \tag{1.8}$$

และถ้ารู้ระยะเยื้องศูนย์ e จะได้

$$e' = a - e \tag{1.9a}$$

เนื่องจาก $C = T$ และ $a = M/T$ จะได้

$$e' = \frac{M}{T} - e \tag{1.9b}$$

และ

$$f' = -\frac{C}{A_C} - \frac{Ce'c_t}{I_C} \tag{1.10a}$$

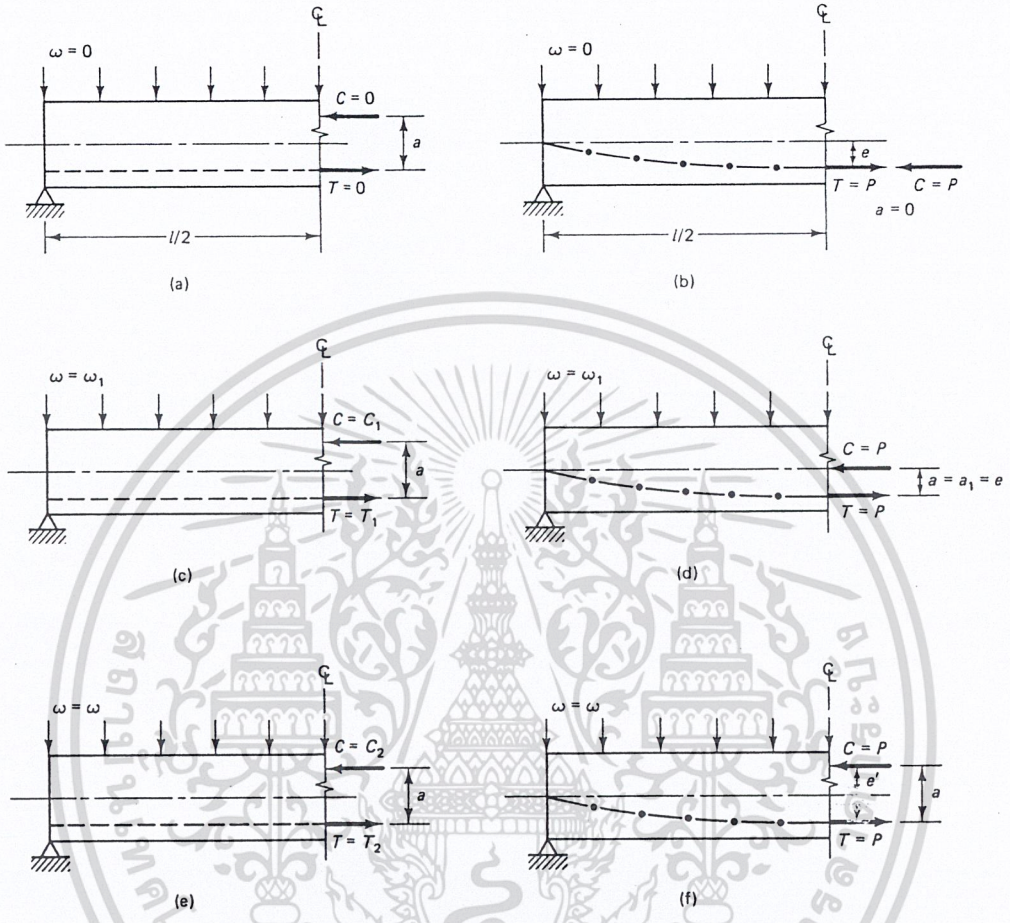
$$f_b = -\frac{C}{A_C} + \frac{Ce'c_b}{I_C} \tag{1.10b}$$

แต่เนื่องจากแรงดึงในลวด T มีค่าเท่ากับแรงจากการอัดแรง P_e ดังนั้น

$$f' = -\frac{P_e}{A_C} - \frac{P_e e'c_t}{I_C} \tag{1.11a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_b = -\frac{P_e}{A_C} + \frac{P_e e' c_b}{I_C} \qquad (1.11b)$$

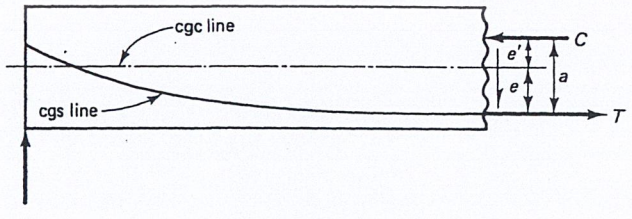


รูปที่ 1.5 – การเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) กับคานคอนกรีตอัดแรง (คอร.)

(a) คาน คสล. เมื่อไม่มีน้ำหนักกระทำ (b) คาน คอร. เมื่อไม่มีแรงกระทำ

(b) คาน คสล. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกบางส่วน w_1 (d) คาน คอร. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกบางส่วน w_1

(e) คาน คสล. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (f) คาน คอร. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด



รูปที่ 1.6 – Free-body diagram ของแนวแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

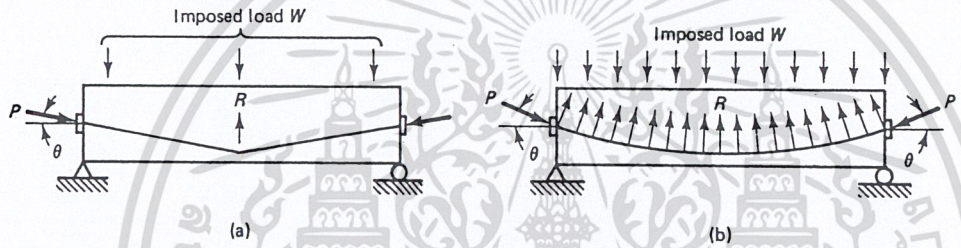
เนื่องจาก $I_c = A_c r^2$ จะเขียนสมการที่ 1.11a และ b ใหม่ได้เป็น

$$f' = -\frac{P_e}{A_C}\left(1+\frac{e'c_t}{r^2}\right) \tag{1.12a}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_C}\left(1-\frac{e'c_b}{r^2}\right) \tag{1.12b}$$

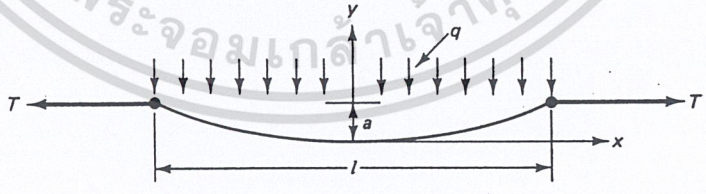
1.3.4 วิธีแรงพยุง (Load-Balancing Method)

แนวคิดที่สามเป็นวิธีที่เหมาะกับคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องคือ วิธีแรงพยุงซึ่งพัฒนาโดย Lin ตามที่กล่าวมาแล้ว วิธีนี้จะใช้แรงในแนวดิ่งของลวดอัดแรงแบบงอหรือแบบพาราโบล่า เพื่อต้านหรือพยุงรับน้ำหนักบรรทุกโน้มถ่วงที่กระทำบนคาน ดังนั้นวิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะกับลวดอัดแรงที่ไม่ได้ดึงเป็นแนวตรงตลอด



รูปที่ 1.7 - แรงพยุงของ (a) ลวดแบบงอที่กลางช่วง (b) ลวดแบบพาราโบล่า

รูปที่ 1.7 แสดงแรงพยุงในคานอัดแรงด้วยลวดที่หักงอกลางช่วงและลวดแนวโค้ง แรงลัพธ์ของแรงพยุง R จะเท่ากับองค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงอัด P องค์ประกอบในแนวนอนของแรง P สำหรับคานช่วงยาวโดยประมาณจะถือว่าเท่ากับแรง P ที่ใช้ในการหาหน่วยแรงในผิวคอนกรีตที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยว แต่บนหน้าตัดอื่น ๆ จะใช้ค่าจริงขององค์ประกอบในแนวนอนของแรง P



รูปที่1.8 – แนวลวดอัดแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุก (q)

พิจารณาลวดที่วางเป็นแนวพาราโบล่า ตามที่แสดงในรูปที่ 1.8 ถ้าใช้สมการของพาราโบล่า

$$Ax^2 + Bx + C = y \tag{1.13}$$

แทนแนวเส้นลวดอัดแรง และให้ T เป็นแรงดึงในเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ x = 0 จะได้ $y = 0$ และ $C = 0$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \text{ และ } B = 0$$

และที่ x = $l/2$ จะได้ $y = a$ และ $A = \frac{4a}{\ell^2}$

แต่จากแคลคูลัส จะได้หน่วยแรงในแนวดิ่ง

$$q = T\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad (1.14)$$

หา $\partial^2 y/\partial x^2$ จากสมการ 1.13 และแทนค่าในสมการ 1.14 จะได้

$$q = T\frac{4a}{\ell^2} \times 2 = \frac{8Ta}{\ell^2} \qquad (1.15a)$$

หรือ

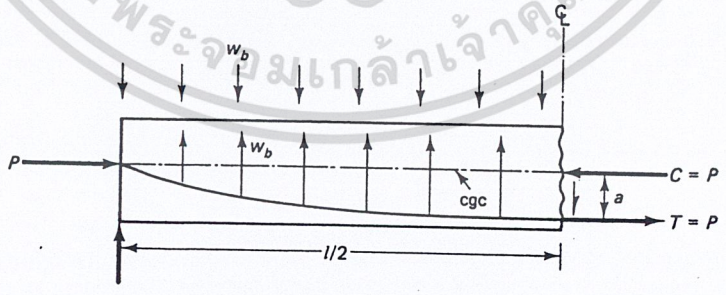
$$T = \frac{q\ell^2}{8a} \qquad (1.15b)$$

$$Ta = \frac{q\ell^2}{8} \qquad (1.15c)$$

ดังนั้น ถ้าลวดอัดแรงวางเป็นแนวพาราโบล่าและดึงด้วยแรง P จะเกิดหน่วยแรงพยุงมีค่าเท่ากับ

$$w_b = \frac{8Pa}{\ell^2} \qquad (1.16)$$

รูปที่ 1.9 แสดงแรงที่กระทำบนคานอัดแรงซึ่งมีแนวลวดอัดแรงเป็นแบบพาราโบล่า จะเห็นว่าหน่วยแรงตามขวาง w_b สองชุดซึ่งมีค่าที่เท่ากันและมีทิศทางตรงกันข้าม จะหักล้างกันไปเอง ทำให้ไม่เกิดหน่วยแรงเนื่องจากแรงดัด ซึ่งก็เป็นตามที่คาดไว้ เพราะในกรณีที่ T เท่ากับ C ก็จะต้องหักล้างกันไปเพื่อความสมดุล เนื่องจากไม่เกิดแรงดัด คานก็จะคงรูปตรง ไม่มีการแอ่นหรือยกตัวที่ผิวบน



รูปที่ 1.9 – แรงพยุงภายใต้สภาวะสมดุล

ทำให้ได้หน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตตลอดความลึกของหน้าตัดที่กลางคานเท่ากับ

$$f'_b = -\frac{P'}{A} = -\frac{C}{A} \qquad (1.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงซึ่งมีค่าคงที่นี้ เป็นผลมาจากแรง $P' = P\cos\theta$ รูปที่ 1.10 แยกแสดงหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นแล้วรวมกันเป็นหน่วยแรงสุดท้ายบนหน้าตัด จะเห็นว่าแรงอัดในวิธีของแรงพยุงจะต้องกระทำที่จุดศูนย์ถ่วง (cgc) ของหน้าตัดที่ฐานรองรับในคานช่วงเดี่ยวและที่จุดศูนย์ถ่วงของปลายยื่นในกรณีของคานยื่น เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดโมเมนต์ที่ไม่สมดุลเนื่องจากการเยื้องศูนย์

เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากกว่าแรงพยุง w_b ทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุลเพิ่มขึ้นเท่ากับ w_{ub} ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ $M_{ub} = w_{ub}l^2/8$ ขึ้นที่กลางช่วง จะได้หน่วยแรงที่กลายช่วงเท่ากับ

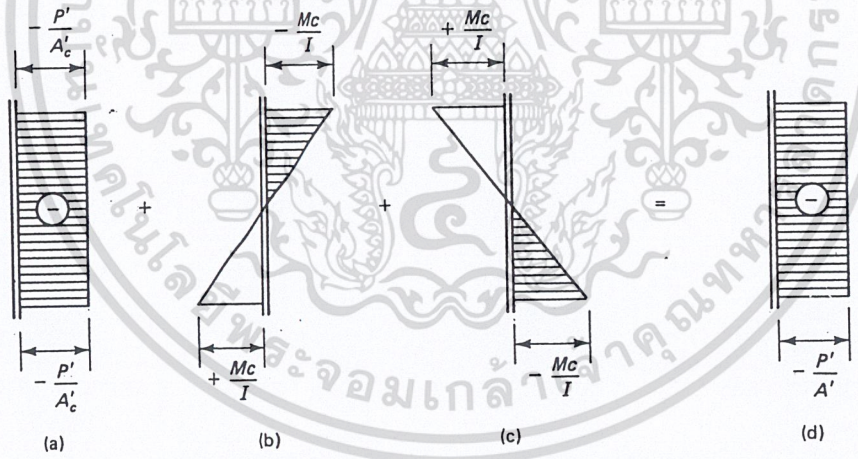
$$f_b' = -\frac{P'}{A_C} \mp \frac{M_{ub}c}{I_C} \tag{1.18}$$

หรือจะแยกเขียนได้เป็นสองสมการ

$$f' = -\frac{P'}{A_C} - \frac{M_{ub}}{S'} \tag{1.19a}$$

$$f_b = -\frac{P'}{A_C} + \frac{M_{ub}}{S_b} \tag{1.19b}$$

สมการ 1.19 จะให้ค่าหน่วยแรงเท่ากับในสมการ 1.7 และ 1.12 โดยที่ P' จะมีค่าเท่ากับ P ที่กลางช่วง เพราะที่ตำแหน่งนั้นแรงอัดมีทิศทางตามแนวนอน ($\theta = 0$)



รูปที่ 1.10 – หน่วยแรงในวิธีแรงพยุง (a) หน่วยแรงเนื่องจากแรงการอัดแรง (b) หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก (c) หน่วยแรงเนื่องจากแรงพยุง (d) หน่วยแรงสุทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 1.1</u> – การหาหน่วยแรงในคานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีพื้นฐาน

คานช่วงเดี่ยวอัดแรงแบบดึงก่อน รูปทีคู่แบบไม่เททับหน้าขนาด 10LDT24 (หน้าตัดกว้าง 10 ฟุต, DT – Double Tee หน้าตัดทีคู่, ลึก 24 นิ้ว) มีความยาวช่วง 20 เมตร ตามที่แสดงไว้ในรูปข้างล่าง รับน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ w_{SD} และน้ำหนักบรรทุกจร w_L รวมเป็น 625 กก./ม. หน่วยแรงดึงเบื้องต้นก่อนการเสื่อมลด f_{pi} = $0.70f_{pu}$ = 13 290 กก./ซม.^{2} และหน่วยแรงดึงประสิทธิผลหลังการเสื่อมลด f_{pe} = 10 550 กก./ซม.^{2} จงหาหน่วยแรงในคอนกรีตที่กลางช่วง เนื่องจาก

(a) ภายใต้การอัดแรงเบื้องต้นและยังไม่รับน้ำหนักบรรทุก

(b) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกและหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง

กำหนดให้

f_{pu} = 18 990 กก./ซม.^{2} = หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ลวดอัดแรงรับได้, f_{py} = 15 470 กก./ซม.^{2} = จุดครากของลวดอัดแรง

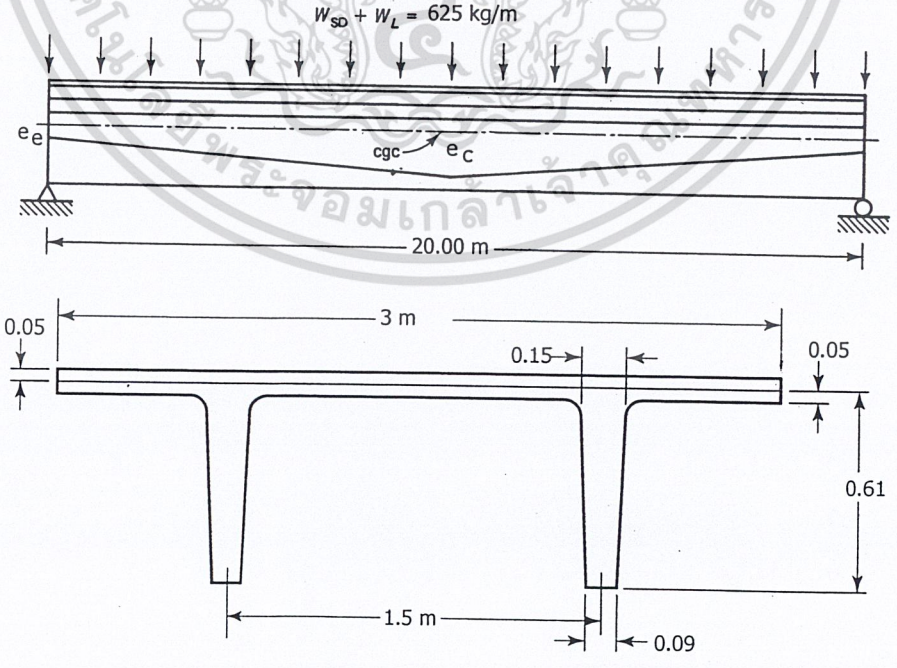
f'_c = 420 กก./ซม.^{2} , $f_t = 3.2\sqrt{f'_c}$ = 65.58 กก./ซม.^{2} = หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีต

$f'_{ci} = 0.8\,f'_c$ = 336 กก./ซม.^{2} = กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเริ่มการอัดแรง

$f_{ci} = 0.6\,f_{ci}'$ = 201.6 กก./ซม.^{2} = หน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตเมื่อเริ่มการอัดแรง

$f_c = 0.45f_c'$ = 189กก./ซม.^{2} = หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตที่สภาวะใช้งาน

สมมติใช้ลวดตีเกลียวแบบเจ็ดเส้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.7 มม. จำนวน 10 เส้น จะได้ A_{ps} = 10 x 99 = 990 มม.^{2}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของหน้าตัด

$A_c = 2897$ ซม.^{2}, $I_c = 935\,347$ ซม.^{4}, $r^2 = I_c / A_c = 323$ ซม.^{2}, $c_b = 45.2$ ซม. , $c_t = 15.8$ ซม.

$e_c = 37.5$ ซม., $e_e = 19.74$ ซม., $S_b = 20\,713$ ซม.^{3}, $S^t = 59\,108$ ซม.^{3}, $w_D = 534$ กก./ม.

---

1. สภาวะเบื้องต้นเมื่อเริ่มการอัดแรง

$A_{ps} = 990$ มม.^{2}

$P_i = A_{ps} f_{pi} = 990 \times 13\,290 = 131\,571$ กก.

$P_e = A_{ps} f_{pe} = 990 \times 10\,550 = 104\,445$ กก.

หาโมเมนต์ที่กลางช่วงเนื่องจากน้ำหนักตัวมันเอง

$$M_D = \frac{w\ell^2}{8} = \frac{534(20)^2}{8} = 26\,700 \text{ กก.ม.}$$

จากสมการที่ 1.5a: $$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} = -\frac{131\,571}{2897}\left(1 - \frac{37.5 \times 15.8}{323}\right) - \frac{26\,700 \times 100}{59\,108}$$

$= +37.89 - 45.17 = -7.28$ กก./ซม.^{2} $< f_{ci} = 201.6$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

จากสมการที่ 1.5b: $$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S^t} = -\frac{131\,571}{2897}\left(1 + \frac{37.5 \times 45.2}{323}\right) + \frac{26\,700 \times 100}{20\,714}$$

$= -283.75 + 128.90 = -154.85$ กก./ซม.^{2} $< f_{ci}$ ใช้ได้

2. สภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง

$w_{SD} + w_L = 625$ กก./ม. ดังนั้น $M_{SD} + M_L = \frac{625(20)^2}{8} = 31\,285$ กก.ม.

โมเมนต์ทั้งหมด $M_T = 26\,700 + 31\,285 = 57\,985$ กก.ม.

จากสมการที่ 1.7a: $$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec^t}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_t} = -\frac{104\,445}{2897}\left(1 - \frac{37.5 \times 15.8}{323}\right) - \frac{57\,985 \times 100}{59\,108}$$

$= +30.08 - 98.10 = -68.02$ กก./ซม.^{2} $< f_c = 189$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

จากสมการที่ 1.7b: $$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} = -\frac{104\,445}{2897}\left(1 + \frac{37.5 \times 45.2}{323}\right) + \frac{57\,985 \times 100}{20\,714}$$

$= -225.25 + 279.93 = +54.68$ กก./ซม.^{2} $< f_t = 65.58$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 1.2 – การหาหน่วยแรงในคานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีแนวแรงอัด

หาหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานจากตัวอย่างที่ 1.1 ด้วยวิธีแนวแรงอัด

P_e = 104 445 กก., M_T = 57 985 กก.ม.,

$a = M_T/P_e$ = 57 985(100)/104 445 = 55.52 ซม., e' = a - e = 55.52 – 37.50 = 18.02 ซม.

จากสมการที่ 1.12: $f' = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{e'c_t}{r^2}\right) = -\frac{104\,445}{2897}\left(1+\frac{18.02\times 15.8}{323}\right) = -67.83$ กก./ซม.^{2}

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{e'c_b}{r^2}\right) = -\frac{104\,445}{2897}\left(1-\frac{18.02\times 45.2}{323}\right) = +54.86 \text{ กก./ซม.}^2$$

ตัวอย่างที่ 1.3 – การหาหน่วยแรงในคานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีแรงพยุง

หาหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานจากตัวอย่างที่ 1.1 ด้วยวิธีแรงพยุง

ที่กลางช่วง $P' = P_e$ = 104 445 กก., และ $a = e_c$ = 0.375 ม.

จะได้หน่วยแรงพยุง $w_b = 8Pa/l^2 = 8(104\,445)(0.375)/(20)^2$ = 783.34 กก./ม.

ดังนั้นถ้าน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 783.34 กก./ม. และลวดอัดแรงวางเป็นแนวพาราโบล่าโดยไม่มีการเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับ ในคานจะเกิดเพียงหน่วยแรงตามแกน P'/A แต่อย่างเดียว ทั้งนี้เพราะน้ำหนักบรรทุกจะถูกต้านโดยลวดอัดแรงที่กลางช่วง

แต่น้ำหนักบรรทุกจริงทั้งหมด = $w_D + w_{SD} + w_L$ = 534 + 625 = 1159 กก./ม.

ดังนั้นเกิดน้ำหนักบรรทุกที่ไม่สมดุล w_{ub} = 1159 – 783.34 = 375.66 กก./ม.

และทำให้เกิดโมเมนต์ที่ไม่สมดุล $M_{ub} = w_{ub}l^2/8 = 375.66(20)^2/8$ = 18 783 กก.ม.

จากสมการที่ 1.19

$$f' = -\frac{P'}{A_C} - \frac{M_{ub}}{S_t} = -\frac{104\,445}{2897} - \frac{18\,783(100)}{59\,108} = -36.05 - 31.78 = -67.83 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_b = -\frac{P'}{A_C} + \frac{M_{ub}}{S_b} = -\frac{104\,445}{2897} + \frac{18\,783(100)}{20\,714} = -36.05 + 90.68 = +54.63 \text{ กก./ซม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การจัดหมวดหมู่และชนิด

จะจัดแบ่งแยกโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงตามวิธีการออกแบบและการก่อสร้างได้ตามข้างล่าง

1.4.1 การอัดแรงภายนอกหรือภายใน

ถึงแม้ว่าเนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงที่ถูกอัดแรงจากภายในด้วยลวดเหล็กแรงดึงสูง แต่บางครั้งก็จะมีบางโครงสร้างที่ใช้การอัดแรงจากแรงปฏิกิริยาภายนอก ตามทฤษฎี เราอาจจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในผิวล่างและหน่วยแรงดึงในผิวบนของคานช่วงเดี่ยวด้วยการดันที่บางตำแหน่งของคานด้วยแม่แรง ดังในรูปที่ 1.11 ซึ่งจะเป็นผลทำให้แทบจะไม่ต้องมีเหล็กเสริมในคานนั้นเลย แต่ผลของการอัดแรงด้วยวิธีดังกล่าว ก็จะสูญเสียไปเนื่องจากการหดตัวและการคืบของคอนกรีต



รูปที่ 1.11 - การอัดแรงในคานช่วงเดี่ยวด้วยการใช้แม่แรงดันกับฐานรับด้านข้าง



รูปที่ 1.12 - การอัดแรงในคานต่อเนื่องด้วยปรับระดับที่ฐานรองรับ

สำหรับโครงสร้างเช่นคานต่อเนื่อง การอัดแรงด้วยแรงปฏิกิริยาภายนอก อาจจะกระทำได้ด้วยการปรับระดับของฐานรองรับโดยการใส่แม่แรงไว้ที่ตำแหน่งนั้น ดังในรูปที่ 1.12 ในทำนองเดียวกับคานช่วงเดี่ยว การหดตัวและการคืบของคอนกรีต จะทำให้เกิดการเสื่อมลดในแรงอัด ส่งผลให้ต้องมีการปรับระดับกันอยู่ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 การอัดแรงในแนวตรงหรือแนวโค้ง

การอัดแรงในแนวโค้งใช้กับโครงสร้างที่มีรูปแบบโค้ง เช่น ถังกลมและท่อ จะวางลวดอัดแรงในแนวรอบทรงกลม การอัดแรงในแนวตรงใช้กับโครงสร้างอื่น ๆ เช่น คานและพื้น ถึงแม้ว่าจะไม่จำเป็นต้องวางลวดอัดแรงเป็นเส้นตรง จะหักงอหรือเป็นแนวโค้งก็ได้ แต่ก็ไม่วางวิ่งรอบ ๆ ทรงกลมเหมือนในการอัดแรงในแนวโค้ง

1.4.3 การอัดแรงแบบดึงก่อนหรือดึงทีหลัง (Pretensioning and Posttensioning)

การอัดแรงแบบดึงก่อน หมายถึง การดึงลวดอัดแรงก่อนที่จะเทคอนกรีต ดังนั้นจะต้องยึดและดึงลวดอัดแรงติดไว้กับฐานที่แข็งแรง แรงอัดจะถ่ายเข้าสู่คอนกรีต เมื่อมีการตัดลวดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัว กระบวนการนี้มักใช้ในโรงงานหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป การอัดแรงแบบดึงทีหลัง หมายถึง การดึงลวดอัดแรงหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นจะต้องยึดและดึงลวดอัดแรงไว้กับเนื้อคอนกรีต กระบวนการนี้ใช้ได้กับทั้งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จและหล่อในที่

1.4.4 การยึดลวดที่ปลายหรือยึดบริเวณใกล้ปลาย (End-Anchored or Non-End-Anchored Tendons)

ในการอัดแรงแบบดึงทีหลัง ลวดอัดแรงจะถูกยึดที่ปลายด้วยเครื่องมือกลเพื่อส่งถ่ายแรงอัดสู่เนื้อคอนกรีต บางครั้งอาจจะมีการอัดน้ำปูนเข้าไปในช่องว่างระหว่างลวดอัดแรงกับเนื้อคอนกรีต เพื่อเป็นตัวยึดเหนี่ยวลวดอัดแรงเข้ากับเนื้อคอนกรีต ในการอัดแรงแบบดึงก่อน แรงอัดจะถ่ายจากลวดอัดแรงเข้าสู่เนื้อคอนกรีตด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับลวดอัดแรง ซึ่งบริเวณที่มีการถ่ายแรงมากจะเกิดที่บริเวณใกล้ปลายของลวด การถ่ายแรงแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงสำหรับลวดขนาดเล็ก หรือลวดตีเกลียวซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นมาเล็กน้อย เพราะจะมีการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตดีกว่าลวดที่มีผิวเรียบ ลวดอัดแรงที่นิยมใช้ในการอัดแรงแบบดึงก่อนจะเป็นลวดตีเกลียวแบบเจ็ดเส้น

1.4.5 ลวดอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยวหรือไร้การยึดเหนี่ยว (Bonded or Unbonded Tendons)

ลวดอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยวจะยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตที่หุ้มรอบ ๆ ตลอดความยาวของมัน ลวดอัดแรงซึ่งไม่มีการยึดที่ปลายจะต้องเป็นลวดแบบมีการยึดเหนี่ยว ลวดอัดแรงที่มีการยึดที่ปลายอาจจะเป็นลวดแบบมีการยึดเหนี่ยวหรือไร้การยึดเหนี่ยวก็ได้ โดยทั่วไปการยึดเหนี่ยวของลวดในการอัดแรงแบบดึงทีหลังจะเกิดขึ้นเมื่อมีการอัดน้ำปูนเข้าไปในช่องว่างระหว่างลวดอัดแรงกับเนื้อคอนกรีต ถ้าไม่มีการอัดน้ำปูนจะต้องป้องกันลวดอัดจากการกัดกร่อนด้วยการฉาบสังกะสี เคลือบด้วยจาระบีหรือวัสดุอื่น ๆ โดยทั่วไปจะใช้การเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดอัดแรงแบบไร้การยึดเหนี่ยวด้วยจาระบีและหุ้มด้วยกระดาษ หรือพลาสติก เพื่อป้องกันการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต

1.4.6 โครงสร้างหล่อสำเร็จ หล่อในที่ และเชิงประกอบ

โครงสร้างหล่อสำเร็จ คือโครงสร้างที่หล่อจากที่อื่น อาจจะเป็นในโรงงานผลิตหรือบริเวณใกล้เคียงกับที่ก่อสร้างแล้วนำมาติดตั้งในที่ ๆ ต้องการ ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จที่หล่อเหมือนกันในปริมาณมาก จะสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างดีและประหยัด โครงสร้างหล่อในที่จะต้องใช้ไม้แบบและนั่งร้านในปริมาณที่สูงกว่าโครงสร้างหล่อสำเร็จ แต่จะประหยัดในด้านค่าขนส่งและค่าติดตั้ง องค์อาคารที่จัดว่าอยู่ในระหว่างโครงสร้างสองประเภทนี้ได้แก่ ผนังแบบยกขึ้น (Tilt-up Wall) และแผ่นพื้นแบบยกวาง (Lift slab) ซึ่งจะหล่อในบริเวณใกล้หรือภายในอาคารแล้วยกขึ้นติดตั้ง บ่อยครั้งจะประหยัดมากขึ้นถ้าใช้องค์อาคารหล่อสำเร็จเป็นบางส่วน หลังจากที่ติดตั้งส่วนนั้นเรียบร้อย ก็จะใช้การหล่อส่วนที่เหลือในที่ ซึ่งขบวนการนี้เรียกว่า การก่อสร้างแบบเชิงประกอบ การเชื่อมต่อองค์อาคารหล่อสำเร็จในการก่อสร้างแบบเชิงประกอบจะทำได้ง่ายกว่าในโครงสร้างที่ประกอบด้วยองค์อาคารแบบหล่อสำเร็จแต่อย่างเดียว และการก่อสร้างแบบนี้จะใช้ไม้แบบและนั่งร้านน้อยกว่าการก่อสร้างแบบหล่อในที่ อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของแต่ละโครงสร้าง

1.4.7 การอัดแรงอย่างเต็มที่หรือบางส่วน (Partial or Full Prestressing)

เมื่อองค์อาคารถูกออกแบบให้ไม่เกิดหน่วยแรงดึงในเนื้อคอนกรีตเลยภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน องค์อาคารนั้นจะถืออยู่ภายใต้การอัดแรงอย่างเต็มที่ แต่ถ้าเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในบางส่วน จะถือว่าองค์อาคารนั้นอยู่ภายใต้การอัดแรงแบบบางส่วน ซึ่งจะต้องใช้เหล็กเสริมธรรมดามาช่วยรับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติค่อนข้างจะยากมากในการระบุถึงความแตกต่าง เพราะทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับขนาดของน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่ใช้ในการออกแบบ ยกตัวอย่าง เช่นสะพานทางหลวงซึ่งถูกออกแบบมาให้อยู่ภายใต้การอัดแรงแบบเต็มที่ อาจจะมีบางส่วนที่อยู่ภายใต้แรงดึงเมื่อมีรถสิบล้อซึ่งบรรทุกน้ำหนักเกินวิ่งผ่าน ในระหว่างที่คานรับหลังคาซึ่งถูกออกแบบมาให้อยู่ภายใต้การอัดแรงแบบบางส่วน อาจจะไม่มีส่วนไหนอยู่ภายใต้แรงดึงเลย เพราะน้ำหนักที่ถ่ายลงบนหลังคาจริงน้อยกว่าน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการรับน้ำหนัก

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในคอนกรีตอัดแรงก็คือขั้นตอนในการรับน้ำหนัก ขั้นตอนเหล่านี้บางส่วนอาจจะเกิดในคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาด้วย แต่บางส่วนก็จะเกิดเพียงในการอัดแรง สำหรับโครงสร้างหล่อในที่ จะต้องออกแบบคอนกรีตอัดแรงอย่างน้อยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกในระหว่างการอัดแรงและขั้นตอนสุดท้ายภายใต้น้ำหนักกระทำภายนอก สำหรับองค์อาคารหล่อสำเร็จ จะต้องเพิ่มขั้นตอนที่สาม ในการขนส่งและติดตั้ง ในระหว่างสามขั้นตอนนี้ จะมีช่วงเวลาที่โครงสร้างจะอยู่ภายใต้สภาวะน้ำหนักกระทำภายนอกที่แตกต่างกัน ตารางที่ 1.1 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้ที่ขั้นตอนต่าง ๆ

1.5.1 ขั้นตอนเบื้องต้น

โครงสร้างอยู่ภายใต้การอัดแรงแต่อย่างเดียว ยังไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกภายนอก ขั้นตอนนี้อาจจะแบ่งย่อยเป็นช่วงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- *ก่อนการอัดแรง*

  ช่วงนี้คอนกรีตจะยังรับน้ำหนักไม่ได้ จะต้องมีการบ่มที่ดีเพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว การแตกร้าวจะทำลายความสามารถของคอนกรีตในการรับแรงเฉือน และถ้าเกิดขึ้นแล้ว ก็ยังไม่สามารถกำหนดได้ว่าหลังจากการอัดแรงแล้ว จะสามารถปิดรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้หรือไม่

- *ระหว่างการอัดแรง*

  เป็นช่วงวิกฤตในการทดสอบกำลังของเหล็กเสริมอัดแรง เพราะหน่วยแรงสูงสุดในเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นในช่วงนี้ (ดูตารางที่ 1.1) เหล็กเสริมอัดแรงบางเส้นอาจจะถูกดึงขาดในช่วงนี้ ถ้าเป็นลวดอัดแรงเดี่ยว ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนลวด แต่ถ้าเป็นส่วนของลวดตีเกลียว ก็อาจจะไม่จำเป็นต้องเปลี่ยน เพราะลวดส่วนที่เหลือก็จะช่วยรับแรงดึงได้ สำหรับคอนกรีต ช่วงนี้ก็จะเป็นช่วงวิกฤตในการทดสอบกำลังรับแรงแบกทานที่ตำแหน่งของสมอยึด เนื่องจากในช่วงนี้กำลังของคอนกรีตยังไม่ถึงจุดที่สูงเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 - หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (ACI 318-99)

หน่วยแรงในเหล็กเสริม – จะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

1. ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก $0.94f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.80f_{pu}$

   หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอยึด

2. ทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร $0.82f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.74f_{pu}$

โดยที่ f_{py} เป็น กำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง มีหน่วยเป็น กก./ซม.^{2}

และ f_{pu} เป็น กำลังประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง มีหน่วยเป็น กก./ซม.^{2}

หน่วยแรงในคอนกรีต – จะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

1. ทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริม (ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง)

   หน่วยแรงอัด $0.60f_{ci}'$

   หน่วยแรงดึง $0.80\sqrt{f_{ci}'}$ และ $1.60\sqrt{f_{ci}'}$ ที่ปลายคานช่วงเดี่ยว

2. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง)

   หน่วยแรงอัดภายใต้การอัดแรงและน้ำหนักบรรทุกคงค้าง $0.45f_c'$

   หน่วยแรงอัดภายใต้การอัดแรงและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด $0.60f_c'$

   หน่วยแรงดึงในบริเวณที่เคยอยู่ใต้แรงอัดมาก่อน $1.60\sqrt{f_c'}$

   หรือ $3.20\sqrt{f_c'}$

   ถ้ามีการพิสูจน์ว่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีและระยะยาวน้อยกว่าค่าที่ยอมให้

โดยที่ f_{ci}' กำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง มีหน่วยเป็น กก./ซม.^{2}

และ f_c' กำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น กก./ซม.^{2}

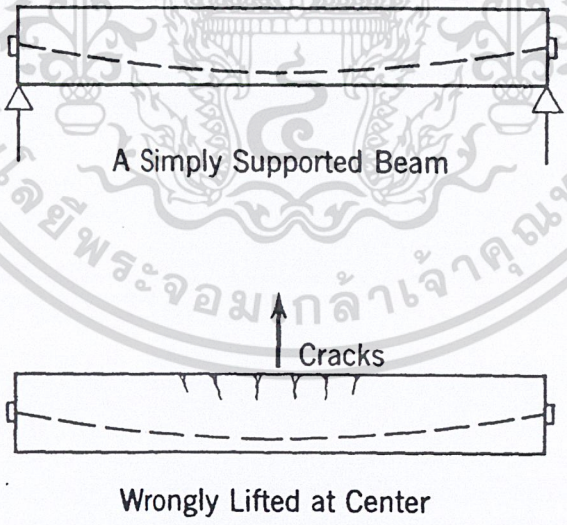
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *ระหว่างการถ่ายแรง*

สำหรับการอัดแรงแบบดึงก่อน การถ่ายแรงจะรวดเร็วและจบในขั้นตอนเดียว แต่สำหรับการอัดแรงแบบดึงทีหลัง การถ่ายแรงจะใช้เวลานานและค่อยเป็นค่อยไป จะดึงลวดอัดแรงทีละเส้นจนครบตามจำนวนที่ต้องการ ในทั้งสองกรณีน้ำหนักที่กระทำบนองค์อาคารในช่วงนี้ คือ น้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัด มักจะรวมน้ำหนักดังกล่าวในการออกแบบช่วงนี้เพื่อใช้ในการหาการยกตัว (camber) ขององค์อาคารเนื่องจากการอัดแรง ซึ่งจำเป็นที่จะต้องรู้สภาวะของการรองรับขององค์อาคารล่วงหน้าก่อน ยกตัวอย่างเช่นในคานช่วงเดี่ยวรองรับที่ปลายทั้งสอง น้ำหนักของคานจะทำให้เกิดโมเมนต์บวกสูงสุดที่กลางช่วงเพื่อใช้ต้านโมเมนต์ลบเนื่องจากการอัดแรง แต่ถ้านำคานนี้ไปวางบนพื้นดิน โดยไม่มีฐานรองรับที่ปลายทั้งสองตามสมมติฐาน โมเมนต์บวกเนื่องจากน้ำหนักคานก็จะไม่เกิดขึ้น ส่งผลในเกิดโมเมนต์ลบเนื่องจากการอัดแรงสูงเกินไป ทำให้คานเกิดการวิบัติได้

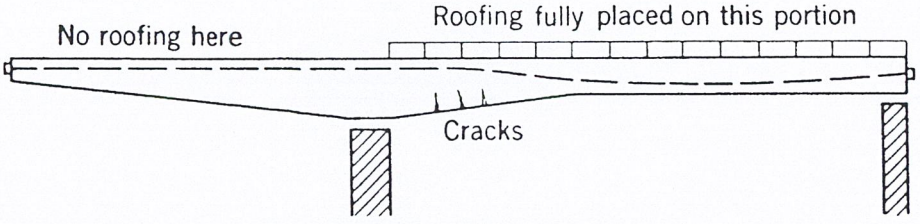
1.5.2 ขั้นตอนกลาง

เป็นขั้นตอนสำหรับการขนส่งและติดตั้ง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับองค์อาคารหล่อสำเร็จ เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องระวังการรองรับและขนย้ายตลอดเวลา ยกตัวอย่างเช่น คานช่วงเดี่ยวซึ่งออกแบบมาให้มีฐานรองรับที่ปลาย จะเกิดการวิบัติอย่างง่ายดาย ถ้าเคลื่อนย้ายโดยการยกที่กลางช่วง ตามรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 - การวิบัติของคานเกิดขึ้นโดยความไม่ระวังในการขนย้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.14 - การแตกร้าวของคานเนื่องจากการวางน้ำหนักบรรทุกผิดขั้นตอน

ไม่เพียงแต่ต้องระวังเวลาขนย้ายเท่านั้น แม้กระทั่งเวลาวางน้ำหนักบรรทุกลงบนโครงสร้าง ก็ต้องให้ความสำคัญไม่แพ้กัน จากรูปที่ 1.14 การวางน้ำหนักบรรทุกเพียงบางส่วนจะทำให้เกิดผลที่เลวร้ายกว่าการวางน้ำหนักบรรทุกเต็มที่เสียอีก

1.5.3 ขั้นตอนสุดท้าย

เป็นขั้นตอนที่โครงสร้างจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกอย่างเต็มที่ ในการก่อสร้างทั่วไป ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงสภาวะวิกฤตที่เกิดจากการกระทำร่วมกันของน้ำหนักบรรทุกจรชนิดต่าง ๆ บนแต่ละส่วนของโครงสร้าง และต้องพิจารณาร่วมกับแรงตามแนวนอน เช่น แรงจากลมและแผ่นดินไหว และอาจจะต้องรวมถึงผลของความแตกต่างของอุณหภูมิและการทรุดตัวของฐานรองรับ สำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงก็เช่นเดียวกัน และนอกเหนือไปจากน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ที่กล่าวถึงแล้ว ยังจะต้องพิจารณาถึงการแตกร้าวและน้ำหนักบรรทุกประลัย รวมไปถึงพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (sustained load) นอกเหนือจากพฤติกรรมทั่วไปภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

- *น้ำหนักบรรทุกคงค้าง*

  การยกตัวหรือการแอ่นตัวขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (ส่วนมากจะประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่) มักจะเป็นปัจจัยที่ควบคุมการออกแบบ เนื่องจากการคืบภายใต้แรงดัดจะส่งผลให้การยกตัวหรือการแอ่นตัวมีค่ามากขึ้น

- *น้ำหนักบรรทุกใช้งาน*

  การออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานมักจะเป็นการตรวจสอบว่าหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดต่ำกว่าค่าที่ยอมให้หรือไม่ วิศวกรที่คุ้นเคยกับกำลังของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงมักจะออกแบบโครงสร้างให้รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน จากนั้นจึงตรวจสอบกำลังสูงสุดที่โครงสร้างจะรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *น้ำหนักแตกร้าว (Cracking Load)*

  การแตกร้าวในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรงเฉือนและแรงเหนี่ยวรั้งอย่างกระทันหัน น้ำหนักแตกร้าวบางครั้งจะใช้เป็นตัวระบุถึงน้ำหนักล้า (fatigue strength) ในโครงสร้างเช่น ถังและท่อ การแตกร้าวหมายถึงการวิบัติ การวิเคราะห์หาน้ำหนักแตกร้าวเป็นสิ่งที่สำคัญมาก สำหรับโครงสร้างภายใต้สภาวะกัดกร่อน, โครงสร้างแบบไร้ความเหนี่ยวรั้ง และโครงสร้างที่การแตกร้าวจะมีผลต่อการแอ่นตัว

- *น้ำหนักบรรทุกประลัย*

  โครงสร้างซึ่งออกแบบโดยพื้นฐานของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน อาจจะมีกำลังไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากทุกโครงสร้างจะต้องมีอัตราส่วนปลอดภัยอยู่อย่างน้อยค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหากำลังรับน้ำหนักประลัยของมัน โดยทั่วไปกำลังรับน้ำหนักประลัยของโครงสร้างคือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างสามารถจะรับได้ก่อนการวิบัติ แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะถึงจุดนั้น จะมีบางส่วนในโครงสร้างที่หน่วยแรงถึงจุดคราก ถึงแม้ว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้เกินกว่าจุดคราก จะถือว่าเป็นน้ำหนักเผื่อก่อนการวิบัติ แต่วิศวกรบางคนก็ถือว่ากำลังส่วนเกินนั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้และเลือกที่จะออกแบบบนพื้นฐานของกำลังใช้งานแทนที่จะใช้พื้นฐานของกำลังประลัย แต่อย่างไรก็ตาม กำลังประลัยของโครงสร้างจะหาได้ง่ายกว่าและก็เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปในการใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงเหมือนในโครงสร้างอื่น ๆ

1.6 การเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตอัดแรงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก

สิ่งแตกต่างที่สำคัญที่สุดระหว่างคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตเสริมเหล็กก็คือ การใช้วัสดุที่มีกำลังสูงในคอนกรีตอัดแรง การจะใช้กำลังของเหล็กแรงดึงสูงได้อย่างเต็มที่ จะต้องใช้การดึงล่วงหน้าเสียก่อน การยึดเหล็กและยึดเหล็กติดกับคอนกรีตทำให้เกิดหน่วยแรงและการหดตัวเบื้องต้นในเนื้อคอนกรีตซึ่งช่วยลดหรือกำจัดการแตกร้าวในคอนกรีต ทำให้สามารถใช้งานได้ในทุกส่วนของหน้าตัดของคอนกรีตอัดแรง ในระหว่างที่ในคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดที่สามารถนำมาใช้งานได้ก็คือเพียงส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทิน

การวางลวดอัดแรงเป็นแนวโค้งจะช่วยรับแรงเฉือนบางส่วนในองค์อาคาร นอกเหนือไปกว่านี้ แรงอัดเบื้องต้นในเนื้อคอนกรีตจะช่วยลดหน่วยแรงดึงหลัก เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนขององค์อาคาร ทำให้สามารถใช้หน้าตัดคอนกรีตอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่เล็กกว่าเพื่อรับแรงเฉือนในปริมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งประกอบด้วยแกนที่แคบจึงเป็นหน้าตัดที่นิยมใช้ในคอนกรีตอัดแรง

คอนกรีตกำลังสูงซึ่งไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในคอนกรีตเสริมเหล็ก กลายเป็นวัสดุที่เหมาะและจำเป็นสำหรับคอนกรีตอัดแรง ในคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้คอนกรีตกำลังสูงจะได้หน้าตัดที่เล็กแต่ต้องใช้เหล็กเสริมจำนวนมาก ส่งผลให้ราคาสูง ในคอนกรีตอัดแรง คอนกรีตกำลังสูงใช้ควบคู่กับเหล็กเสริมแรงดึงสูงกลายเป็นองค์ประกอบที่ประหยัด คอนกรีตกำลังสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับคอนกรีตอัดแรง เพราะต้องมีกำลังแบกทานสูงที่บริเวณสมอยึด และกำลังสูงก็เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับหน้าตัดที่แคบ

วัสดุแต่ละอย่างและวิธีการก่อสร้างแต่ละวิธี ก็มีความเหมาะสมสำหรับแต่ละวิธีของการประยุกต์ใช้งาน หัวข้อต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของคอนกรีตอัดแรงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก ในด้านของการใช้งาน ความปลอดภัย และความประหยัด

1.6.1 การใช้งาน (Serviceabilily)

คอนกรีตอัดแรงเหมาะกับโครงสร้างที่มีช่วงยาวและรับน้ำหนักบรรทุกสูง เพราะวัสดุที่ใช้ในคอนกรีตอัดแรงเป็นวัสดุกำลังสูง โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะมีขนาดบางกว่า ทำให้ดูมีช่องว่างมากกว่าและสวยงามกว่า คอนกรีตอัดแรงจะไม่เกิดการแตกร้าวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน และถ้าเกิดการแตกร้าวภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่มากกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน รอยแตกร้าวนั้นก็ปิดตัวมันเองเมื่อเอาน้ำหนักบรรทุกส่วนเกินออก การแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่จะน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการยกตัวเบื้องต้นเนื่องจากการอัดแรง ทำให้คอนกรีตอัดแรงใช้งานได้ดีในโครงสร้างที่มีช่วงยื่นที่ยาวมาก การแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรจะน้อยมาก เพราะสามารถใช้คอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพทั่วทั้งหน้าตัด ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยจะมีค่าประมาณสองถึงสามเท่าของหน้าตัดแตกร้าวที่ใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็ก องค์อาคารหล่อสำเร็จมักจะใช้คอนกรีตอัดแรงเพราะมีน้ำหนักเบากว่า

ข้อเสียในด้านการใช้งานของคอนกรีตอัดแรง ดูเหมือนจะมีเพียงข้อเดียวก็คือ การที่มีน้ำหนักค่อนข้างเบา ในบางสภาวะ น้ำหนักและมวลของโครงสร้างอาจจะเป็นสิ่งสำคัญเหนือกว่ากำลัง ซึ่งในสภาวะเช่นนั้นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตล้วน ๆ จะเหมาะสมมากกว่าและจะมีราคาถูกกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.2 ความปลอดภัย (Safety)

ยังสรุปไม่ได้โครงสร้างชนิดใดให้ความปลอดภัยมากกว่ากัน ความปลอดภัยของโครงสร้างขึ้นอยู่กับการออกแบบและการก่อสร้างมากกว่าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตาม ความปลอดภัยของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงก็เป็นสิ่งที่สมควรจะกล่าวถึง คอนกรีตอัดแรงได้ผ่านการทดสอบถึงความสามารถในการรับน้ำหนักตั้งแต่ขั้นตอนการอัดแรง ซึ่งในขั้นตอนนั้นทั้งเหล็กและคอนกรีตจะอยู่ภายใต้หน่วยแรงที่สูงที่สุด ถ้าทั้งสองวัสดุสามารถรับแรงในขั้นตอนการอัดแรงได้ ก็หมายความทั้งสองวัสดุมีกำลังที่จะรับแรงตลอดชีวิตการใช้งาน

เมื่อผ่านการออกแบบอย่างถูกต้อง คอนกรีตอัดแรงจะมีอัตราส่วนความปลอดภัยไม่น้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ก่อนการวิบัติ คอนกรีตอัดแรงจะเกิดการแอ่นตัวเพียงพอที่จะสังเกตเห็นเป็นการเตือนก่อนได้ ความสามารถในการรับแรงกระทำและแรงกระทำซ้ำไม่ด้อยไปกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ในองค์อาคารที่มีความหนาของคอนกรีตหุ้มเท่ากัน ความต้านทานการกัดกร่อนจะเหนือกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการไร้รอยแตกร้าวและการใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพสูงกว่า แต่ถ้าเกิดการแตกร้าวขึ้น การกัดกร่อนในคอนกรีตอัดแรงจะมีผลรุนแรงกว่า ในด้านความคงทนต่ออัคคีภัย ถึงแม้ว่าเหล็กเสริมกำลังสูงจะทนไฟน้อยกว่า และเมื่อใช้ระยะคอนกรีตหุ้มน้อยสุดเท่ากัน เหล็กเสริมอัดแรงจะถือได้ว่ามีระยะคอนกรีตหุ้มหนากว่า เนื่องจากการกระจายของเหล็กเสริมอัดแรงและการวางเหล็กในแนวโค้งขึ้นลงตามแนวขององค์อาคาร

1.6.3 ความประหยัด (Economics)

เพื่อจะรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน คอนกรีตอัดแรงจะใช้คอนกรีตและเหล็กเสริมน้อยกว่า เพราะวัสดุทั้งสองที่ใช้มีกำลังสูงกว่าที่ใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็ก ปริมาณเหล็กปลอกรับแรงเฉือนก็จะใช้น้อยกว่า เพราะแรงดึงในแนวทแยงจะถูกลดลงเมื่อหน้าตัดอยู่ภายใต้แรงอัด การใช้หน้าตัดที่เล็กกว่าทำให้ได้น้ำหนักขององค์อาคารน้อยกว่า ซึ่งก็จะมีผลต่อขนาดขององค์อาคารที่รับการถ่ายแรงต่อ ๆ ไป ในด้านของชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ การใช้หน้าตัดที่เล็กและเบากว่าของคอนกรีตอัดแรงก็จะมีผลต่อค่าขนส่ง

แต่เราก็ไม่สามารถจะมองข้ามข้อเท็จจริงที่ว่า วัสดุที่มีคุณภาพสูงกว่าก็ต้องมีราคาแพงกว่า นอกเหนือไปจากนี้ คอนกรีตอัดแรงจะต้องใช้ชิ้นส่วนประกอบเพิ่มขึ้น เช่น สมอยึด ท่อร้อยลวดอัดแรง และน้ำปูนเพื่อการยึดเหนี่ยว ไม้แบบก็จะต้องใช้มากกว่า เพราะหน้าตัดขององค์อาคารในคอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้ทั่วไปในคอนกรีตเสริมเหล็ก การวางเหล็กเสริมก็จะต้องใช้แรงงานมากกว่า การออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการควบคุมงานก็ต้องใช้ความระมัดระวังมากกว่า ถึงแม้ว่างานในสองส่วนหลังนี้จะขึ้นอยู่ประสบการณ์ของวิศวกรและทีมงานก่อสร้างก็ตาม

อาจจะสรุปได้ว่า คอนกรีตอัดแรงอาจจะประหยัดกว่าสำหรับโครงสร้างที่มีช่วงยาวและรับน้ำหนักบรรทุกสูง รวมทั้งหน้าตัดของโครงสร้างที่ใช้มีขนาดเหมือนกันและใช้ซ้ำกันหลายตำแหน่ง และคอนกรีตอัดแรงจะเหมาะกับการก่อสร้างเชิงประกอบซึ่งก็จะประหยัดกว่าการก่อสร้างแบบหล่อในที่อย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

1.1 Freyssinet, E. *The Birth of Prestressing*. London: Public Translation, Cement and concrete Association, 1954.

1.2 Guyon, Y. *Limit State Design of Prestressed Concrete*, vol. 1. Halsted-Wiley, New York, 1972.

1.3 Gerwick, B.C., Jr. *Construction of Prestressed Concrete Structures*. Wiley-Interscience, New York, 1993, 591 p.

1.4 Lin, T. Y., and Burns, N. H. *Design of Prestressed Concrete Structures*. 3d ed. John Wiley & Sons, New York, 1981.

1.5 Nawy, E.G. Reinforce Concrete – A Fundamental Approach. 4th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2000, 776p.

1.6 Dobell, C. "Patents and Code Relating to Prestressed Concrete." *Journal of American Concrete Institute* 46, 1950, 713-724.

1.7 Naaman, A. E. *Prestressed Concrete Analysis and Design*. McGraw Hill, New York, 1982.

1.8 Dill, R. E. "Some Experience with Prestressed Steel in Small Concrete Units." *Journal of American Concrete Institute* 38, 1942, 165-168.

1.9 Institution of Structural Engineers. "First Report on Prestressed Concrete." *Journal of the Institution of Structural Engineers*, September 1951.

1.10 Magnel, G. *Prestressed Concrete*. London: Cement and Concrete Association, 1948.

1.11 Abeles, P. W., and Bardhan-Roy, B. K. *Prestressed Concrete Designer's Handbook*. 3d ed. Viewpoint Publications, London, 1981.

1.12 Nawy, E. G., *Fundamentals of High Performance Concrete*, 2nd ed. John Wiley & son, New York, 2000.

1.13 Nawy, E. G., editor-in-chief, *Concrete Construction Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1998, 1250 p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2

วัสดุและระบบสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง

2.1 คอนกรีต

2.1.1 คำนำ

คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตกำลังสูง เป็นองค์ประกอบหลักขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมคุณภาพและมีการตรวจสอบในด้านกำลังและความคงทนในระหว่างการผลิต มีเอกสารมากมายที่ครอบคลุมเนื้อหาในด้านการผลิตคอนกรีต การควบคุมคุณภาพ และมาตรฐานการออกแบบ หัวข้อต่อไปนี้จะเน้นเฉพาะในด้านของคอนกรีตในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงและระบบต่าง ๆ โดยถือว่าผู้อ่านมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว

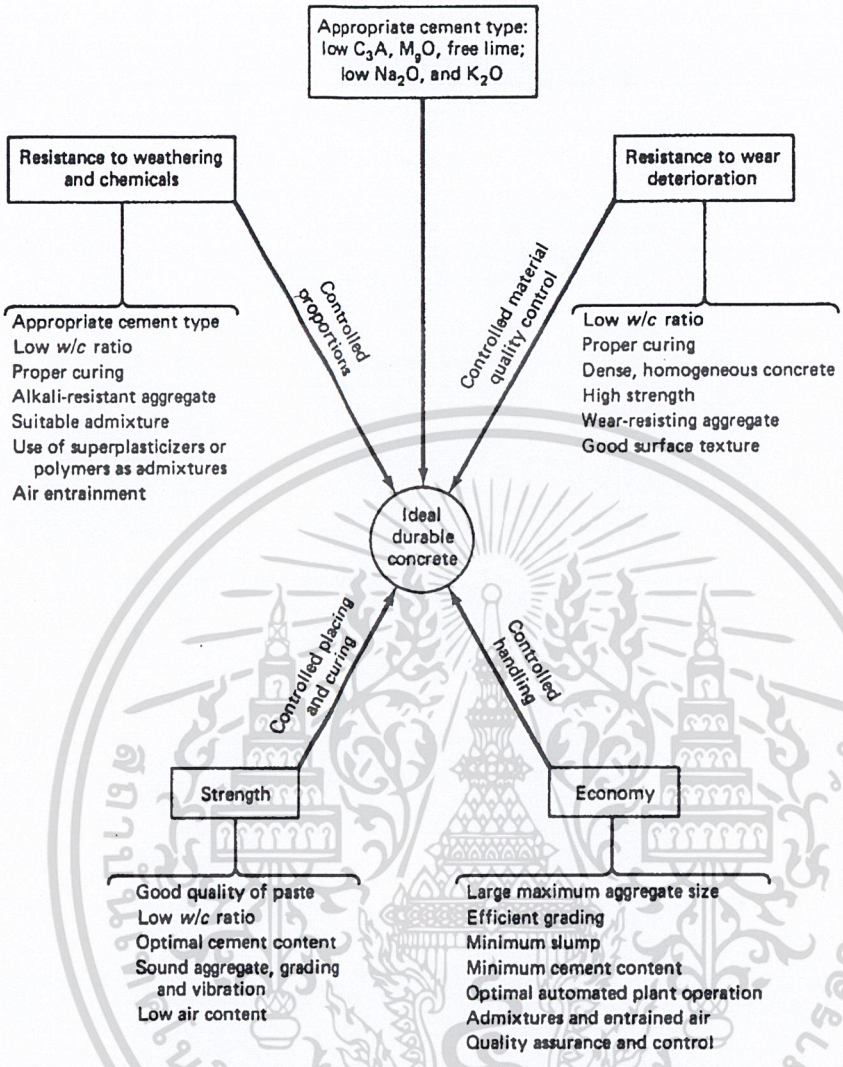
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคอนกรีต

กำลังและความคงทนเป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง จุดอ่อนต่าง ๆ ที่มีผลเสียขึ้นกับอายุของคอนกรีตอาจจะทำให้แรงอัดลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการวิบัตินอกเหนือความคาดหมาย ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพและตรวจสอบทุกขั้นตอนของการผลิตควบคู่ไปกับการบำรุงรักษา รูปที่ 2.1 แสดงปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งจะส่งผลให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี

2.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีต

จะแบ่งกลสมบัติของคอนกรีตออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ คุณสมบัติในระยะสั้นหรือคุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติในระยะยาวซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา คุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ กำลังรับแรงอัด รับแรงดึง รับแรงเฉือน และสติฟเนสในรูปของโมดูลัสยืดหยุ่น คุณสมบัติตามเวลา จะจัดอยู่รูปของการคืบและการหดตัว หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 – คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคุณภาพสูง

2.1.3.1 กำลังรับแรงอัด

ชนิดของส่วนผสม คุณสมบัติของมวลรวม ระยะเวลาและคุณภาพของการบ่ม อาจจะส่งผลให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 1400 กก./ซม.^{2} คอนกรีตที่ผลิตในเชิงพาณิชย์โดยใช้มวลรวมปกติจะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 280 ถึง 840 กก./ซม.^{2} โดยทั่วไปกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าประมาณ 420 กก./ซม.^{2}

กำลังรับแรงอัด f'_c จะหาได้จากกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. ซึ่งถูกบ่มภายใต้มาตรฐานในห้องปฏิบัติการ และทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐานการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบ ASTM C-39 ของประเทศสหรัฐอเมริกา กำลังของคอนกรีตในโครงสร้างจริง อาจจะแตกต่างจากกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตมาตรฐาน เนื่องจากความแตกต่างในด้านการเขย่าเข้าแบบและสภาวะการบ่ม

ในการทดสอบด้านกำลัง มาตรฐาน American Concrete Institute (ACI) ระบุให้ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบแท่งทรงกระบอกมาตรฐานสองตัวอย่าง จากส่วนผสมเดียวกันที่อายุ 28 วัน ในด้านความถี่ของการทดสอบ มาตรฐานให้ยอมรับกำลังของคอนกรีตแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบได้ ถ้าผลเฉลี่ยของการทดสอบสามครั้งต่อเนื่องให้ค่าไม่น้อยกว่าค่า f'_c ที่ต้องการ และกำลังอัดที่ทดสอบแต่ละครั้ง (ค่าเฉลี่ยจากสองทรงกระบอก) ต่ำกว่า f'_c ไม่เกิน 35 กก./ซม.^{2} จะต้องออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้ได้กำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่า f'_c ในปริมาณที่ขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนที่ยอมให้ในการผลิต

ดังนั้น f'_c ที่ใช้ในการออกแบบจึงไม่ควรเป็นกำลังอัดเฉลี่ย แต่ควรจะเป็นค่าต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง

2.1.3.2 กำลังรับแรงดึง

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต f_{ct} จะมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าประมาณ $0.10f'_c < f_{ct} < 0.20f'_c$ การทดสอบหากำลังรับแรงดึงโดยตรงเป็นไปได้ยากเพราะปัญหาของการยึดจับที่ปลายของชิ้นส่วนทดสอบในเครื่องทดลอง มีวิธีหลายวิธีที่ใช้หากำลังรับแรงดึงทางอ้อม วิธีที่นิยมกันมากได้แก่ วิธีทรงกระบอกผ่าซีก (cylinder splitting) หรือ การทดสอบแบบ Brazilian

สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด จะใช้ค่าโมดูลัสแตกร้าว f_r แทนกำลังรับแรงดึงผ่าซีก f_{ct} ในการออกแบบ โมดูลัสแตกร้าวได้มาจากการทดสอบคานคอนกรีตล้วนที่มีพื้นที่หน้าตัด 15 x 15 ซม. ยาว 45 ซม. รับน้ำหนักกระทำที่ทุกตำแหน่งหนึ่งในสามของช่วง ตามมาตรฐาน ASTM C-781 โมดูลัสแตกร้าวนี้จะมีค่าสูงกว่ากำลังดึงแยกผ่าซีก ACI กำหนดค่าโมดูลัสแตกร้าวไว้เท่ากับ $2\sqrt{f'_c}$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ

โดยทั่วไป คอนกรีตน้ำหนักเบาจะมีกำลังรับแรงดึงน้อยกว่าคอนกรีตน้ำหนักปกติ มาตรฐานการออกแบบระบุให้ปรับค่าโมดูลัสแตกร้าวตามข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้

1. ถ้ารู้กำลังดึงแยกผ่าซีก f_{ct} ให้ใช้

$$f_r = 1.09f_{ct} \leq 2\sqrt{f'_c} \qquad (2.1)$$

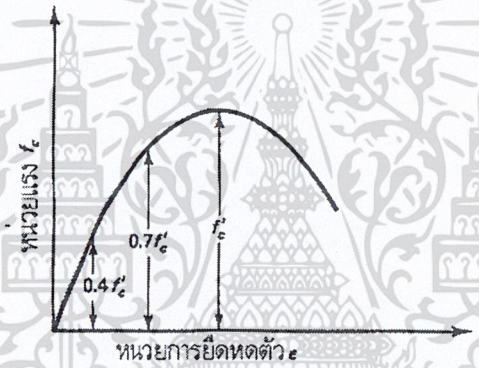
2. ถ้าไม่รู้ค่า f_{ct} ให้คูณ f_r ด้วย 0.75 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาล้วน และให้คูณด้วย 0.85 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาที่ใช้ทรายผสม กรณีที่ใช้ทรายผสมแทนที่เพียงบางส่วน อนุญาตให้ใช้ค่าตัวคูณที่ได้จากวิธีเทียบส่วนแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 กำลังรับแรงเฉือน

จะหากำลังรับแรงเฉือนจากการทดลองได้ยากกว่ากำลังอย่างอื่น เพราะการที่จะแยกผลของแรงเฉือนอย่างเดียวออกจากแรงอื่นเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก ทำให้ค่าที่นำออกมาเผยแพร่แตกต่างกันอย่างมากมาย มีตั้งแต่ร้อยละ 20 ของกำลังรับแรงอัด ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทั่วไป จนถึงร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัด ภายใต้การกระทำร่วมของแรงเฉือนและแรงอัด แต่โดยทั่วไปแล้ว กำลังรับแรงเฉือนมักจะไม่เป็นปัจจัยวิกฤติในการออกแบบ เพราะจะออกแบบให้ได้หน่วยแรงเฉือนที่ต่ำที่สุดเพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยง

2.2 แผนภาพความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีต

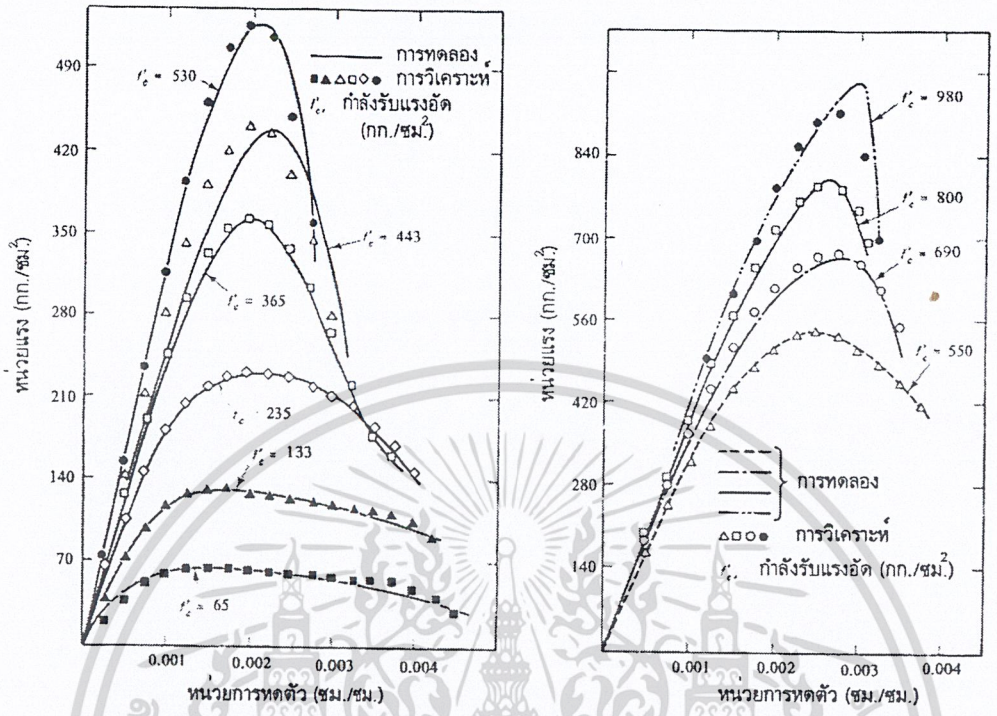


รูปที่ 2.2 – ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัว

ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีต เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างสมมติฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีต รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีต ซึ่งได้มาจากการกดแท่งคอนกรีตทรงกระบอก จะถือว่าในช่วงแรกซึ่งหน่วยแรงอัดมีค่าน้อยกว่า $0.4f'_c$ ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น และเริ่มเบี่ยงเบนเป็นเส้นโค้ง จนถึงหน่วยแรงอัดประมาณ $0.7f'_c$ วัสดุจะสูญเสียกำลังส่วนใหญ่ ทำให้ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งอย่างชัดเจน ที่หน่วยแรงสูงสุด จะมองเห็นรอยแตกร้าวในแนวดิ่ง ส่งผลให้เกิดการวิบัติในที่สุด Portland Cement Association (PCA) นำเสนอรูปแบบของความสัมพันธ์ของคอนกรีตที่กำลังต่าง ๆ ในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

1. คอนกรีตกำลังต่ำ จะมีหน่วยการหดตัวที่จุดวิบัติสูง
2. ช่วงของความสัมพันธ์เชิงเส้นจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของคอนกรีต
3. คอนกรีตกำลังสูงจะเปราะมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 – ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตกำลังต่าง ๆ

2.3 โมดูลัสยืดหยุ่นและการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงอัดตามเวลา

เนื่องจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 เปลี่ยนจากเชิงเส้นเป็นเส้นโค้งตั้งแต่หน่วยแรงยังต่ำอยู่ จึงหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้เพียงจากเส้นสัมผัสที่จุดเริ่มต้น จะเรียกความลาดเบื้องต้นของเส้นสัมผัสว่า *โมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น* (initial tangent modulus) และจะหาโมดูลัสสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้จากความลาดของเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งนั้น ความลาดของเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปยังเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่งใด ๆ (มักจะใช้ตำแหน่งหน่วยแรงที่ $0.4f'_c$) จะเรียกว่า *โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนท์* (secant modulus of elasticity) จะใช้ค่านี้เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในการออกแบบ เพราะถือว่าเป็นไปตามสมมติฐานของความยืดหยุ่นของวัสดุ เมื่อถอดน้ำหนักกระทำออก วัสดุก็จะกลับคืนสู่รูปเดิม (ในกรณีนี้ หน่วยการหดตัวกลับหาศูนย์) การหดตัวภายใต้น้ำหนักกระทำนอกเหนือจากนี้ ถือว่าเกิดจากการคืบ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.)กำหนดค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังต่อไปนี้

$$E_c = 4270 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad \text{สำหรับ } 1.45 < w_c < 2.48 \text{ ตัน/ม.}^3 \qquad (2.2a)$$

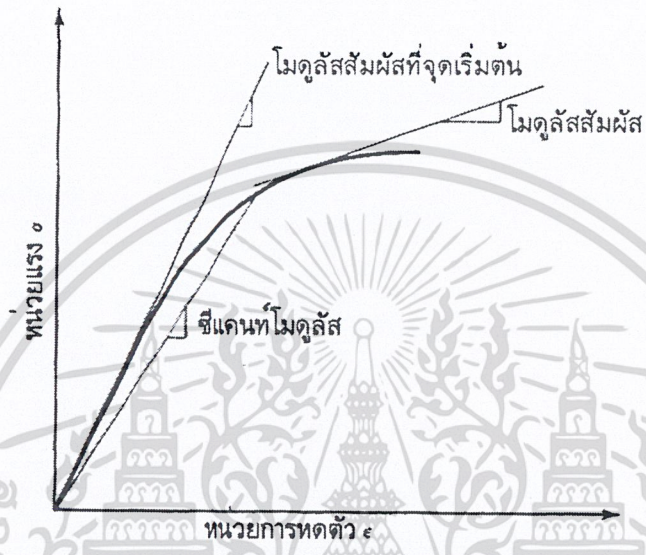
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ w_c คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต, ตัน/ม.^{3}

f'_c คือกำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

สำหรับคอนกรีตที่มีน้ำหนักปกติ $w_c = 2.32$ ตัน/ม.^{3} อาจใช้ค่า

$$E_c = 15\,200\sqrt{f'_c} \qquad (2.2b)$$



รูปที่ 2.4 – โมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสและโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนท์ของคอนกรีต

2.3.1 คอนกรีตกำลังสูง

มาตรฐาน ACI318 บัญญัติว่า คอนกรีตกำลังสูงคือคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเกิน 420 กก./ซม.^{2} สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 420 ถึง 840 กก./ซม.^{2} จะหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ดังนี้

$$E_c = [10\,608\sqrt{f'_c} + 70\,000](w_c/2320)^{1.5} \qquad (2.3)$$

โดยที่ w_c คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต, กก./ม.^{3}

f'_c คือกำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

ปัจจุบันจะผสมคอนกรีตให้มีกำลังสูงถึง 1400 กก./ซม.^{2} ได้ไม่ยากนัก โดยการใช้หินขนาดใหญ่ไม่เกิน 10 มม. และใช้ Silica fume เป็นวัสดุผสม การผสมที่หน้างานจะได้กำลังดังกล่าวถ้ามีการควบคุมคุณภาพอย่างดี สำหรับคอนกรีตกำลังสูงระหว่าง 1400 ถึง 2100 กก./ซม.^{2} จะใช้ใยเหล็กหรือใยคาร์บอนเป็นวัสดุผสม การออกแบบส่วนผสมจะต้องทำหลายครั้ง (ไม่ต่ำกว่า 5 ครั้ง) จะต้องปรับแต่งส่วนผสม ให้ได้ความสามารถในการเทที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาคาร Two Union Squareในเมือง Seattle รัฐ Washington เป็นตัวอย่างของการใช้คอนกรีตที่มีกำลังสูงประมาณ 1400 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 56 วัน และมีโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 548 550 กก./ซม.^{2} ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้จริงในอาคารดังกล่าว โดยค่าในวงเล็บเป็นค่าจากการออกแบบส่วนผสม จากอัตราส่วนระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่ใช้ซึ่งมีค่าประมาณ 0.22 จะได้การยุบตัวประมาณ 20 ซม. รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอายุของคอนกรีตในตารางที่ 2.1 โดยที่กำลังอัดได้มาจากการทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 10 ซม. x 20 ซม.

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างที่มหาวิทยาลัย Rutgers ในมลรัฐ New Jersey ส่วนผสมถูกออกแบบให้มีกำลังอัด 840 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน แต่ในการผสมที่หน้างาน บางครั้งได้กำลังสูงถึง 930 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน อัตราส่วนของ ซีเมนต์/มวลละเอียด/มวลหยาบ เท่ากับ 1 : 1.22 : 2.06 โดยมีการยุบตัวประมาณ 10 ถึง 15 ซม.

ตารางที่ 2.1 – ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 1260 กก./ซม.^{2}

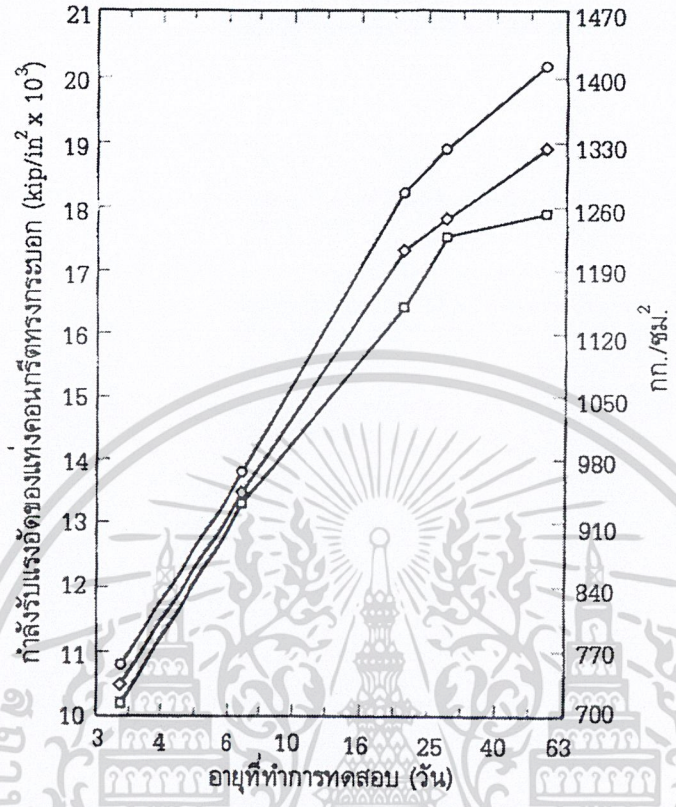
มวลรวมหยาบ ขนาด 10 มม., กก.	มวลรวมละเอียด กก.	ซีเมนต์ กก.	น้ำ กก.	ซิลิก้าฟูม ลบม.	น้ำยาลดน้ำของ W.R. Grace Dartard 40 (กก. ต่อ ซีเมนต์หนึ่งถุง)	Mighty 150
850	530	435	100	0.049	0.016	0.074
860	530	435	100	0.049	0.016	0.124
(820)	(500)	430	(w/c = 0.23) 30 กก.		(0.045)	(< 0.181)

ค่าในวงเล็บเป็นค่าจากการออกแบบส่วนผสม

ตารางที่ 2.2 – ส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ม.^{3}) ที่มีกำลังอัดสูงกว่า 910 กก./ซม.^{2}

มวลรวมหยาบ ขนาด 10 มม.	มวลรวม ละเอียด	ซีเมนต์ ชนิด III	น้ำ	ผงซิลิก้าฟูม force-10,000	น้ำยาลดน้ำของ W.R. Grace
1090	650	425	170	100	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 - ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอายุของคอนกรีตกำลังสูง

2.3.2 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเบื้องต้น

เนื่องจากจะทำการอัดแรงก่อนที่คอนกรีตมีอายุถึง 28 วัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต f'_{ci} ที่เวลาถ่ายแรง รวมทั้งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ขั้นตอนต่าง ๆ ของน้ำหนักกระทำ สมการทั่วไปซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและเวลาคือ

$$f'_{ci} = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c \qquad (2.4a)$$

โดยที่ f'_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

t = เวลา, วัน

α และ β = ตัวคูณซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของซีเมนต์และวิธีการบ่ม

ประเภทซีเมนต์/วิธีบ่ม	I / บ่มชื้น	III / บ่มชื้น	I / บ่มไอน้ำ	III / บ่มไอน้ำ
α	4.00	2.30	1.00	0.70
β	0.85	0.92	0.95	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ I และบ่มชื้น จะได้

$$f_{ci}^{'} = \frac{t}{4.00 + 0.85t} f_{c}^{'} \qquad (2.4b)$$

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของคอนกรีต E'_c คือ

$$E'_c = \text{หน่วยแรง / (หน่วยการหดตัวอีลาสติก + หน่วยการคืบ)} \qquad (2.5)$$

และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลสูงสุดของคอนกรีต E'_{cn} คือ

$$E_{cn} = \frac{E_c}{1+\gamma_t} \qquad (2.6a)$$

โดยที่ γ_t เป็น อัตราส่วนการคืบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของการคืบสูงสุดต่อหน่วยการหดตัวอีลาสติก ซึ่งมีพิกัดสูงสุดและต่ำสุดดังต่อไปนี้

พิกัดสูงสุด: $\gamma_t = 1.75 + 2.25(100 - H)/65$ (2.6b)

พิกัดต่ำสุด: $\gamma_t = 0.75 + 0.75(100 - H)/50$ (2.6c)

โดยที่ H เป็น ร้อยละของความชื้นเฉลี่ย

สมการทั้งหลายที่กล่าวมาจะใช้ได้ในกรณีทั่วไปเท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยอื่นนอกเหนือไปจากน้ำหนักที่กระทำ เช่น ปริมาณความชื้นในคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ อายุของคอนกรีต และอุณหภูมิ ดังนั้นสำหรับโครงสร้างพิเศษ เช่น โค้งตั้ง อุโมงค์ และถังเก็บน้ำ จะต้องหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากห้องปฏิบัติการ

ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการในด้านการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากแรงดึงยังมีน้อยมาก อาจเป็นเพราะในการคำนวณจะถือว่าคอนกรีตไม่รับแรงดึงเลย แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าจำเป็นต้องใช้ ก็จะถือว่าโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากแรงดึงเท่ากับค่าโมดูลัสเนื่องจากแรงอัด

2.4 การคืบ

การคืบ เป็นค่าหน่วยการหดตัวที่เพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง การหดตัวเบื้องต้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจะเรียกว่า *หน่วยการหดตัวยืดหยุ่น* ในระหว่างที่หน่วยการหดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง จะเรียกว่า *หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบ* สมมติฐานนี้เป็นที่ยอมรับได้ เพราะผลกระทบต่าง ๆ ที่แปรผันตามเวลามักจะไม่มีผลต่อการหดตัวเบื้องต้น

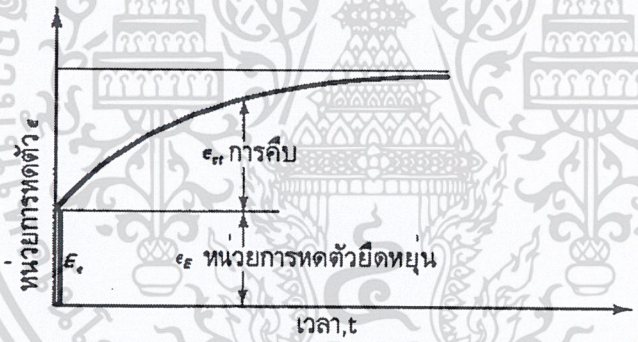
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบเพิ่มขึ้นตามเวลา เช่นเดียวกับการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage) อัตราการคืบจะลดลงตามเวลา เราจะหาการคืบโดยตรงไม่ได้ แต่จะหาได้จากการหักหน่วยการหดตัวยืดหยุ่นและหน่วยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น ออกจากหน่วยการหดตัวทั้งหมด ถึงแม้ว่าการคืบและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น จะขึ้นอยู่ซึ่งกันและกัน แต่ก็อาจจะแยกออกจากกันได้ดังนี้

หน่วยการหดตัวทั้งหมด (ε_t) = หน่วยการหดตัวยืดหยุ่น (ε_e) + หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบ (ε_c) + หน่วยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (ε_{sh})

ความสัมพันธ์ของหน่วยการหดตัวทั้งสามหน่วย สำหรับแท่งตัวอย่างคอนกรีตปกติ ภายใต้หน่วยแรงอัด 60 กก./ซม.^{2} มีแสดงดังต่อไปนี้

หน่วยการหดตัวยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นทันที, ε_e	$= 250 \times 10^{-6}$	ซม./ซม.
หน่วยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นหลังจากเวลา 1 ปี, ε_{sh}	$= 500 \times 10^{-6}$	ซม./ซม.
หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบหลังจากเวลา 1 ปี, ε_c	$= 750 \times 10^{-6}$	ซม./ซม.
หน่วยการยืดหดตัวทั้งหมด, ε_t	$= 1500 \times 10^{-6}$	ซม./ซม.

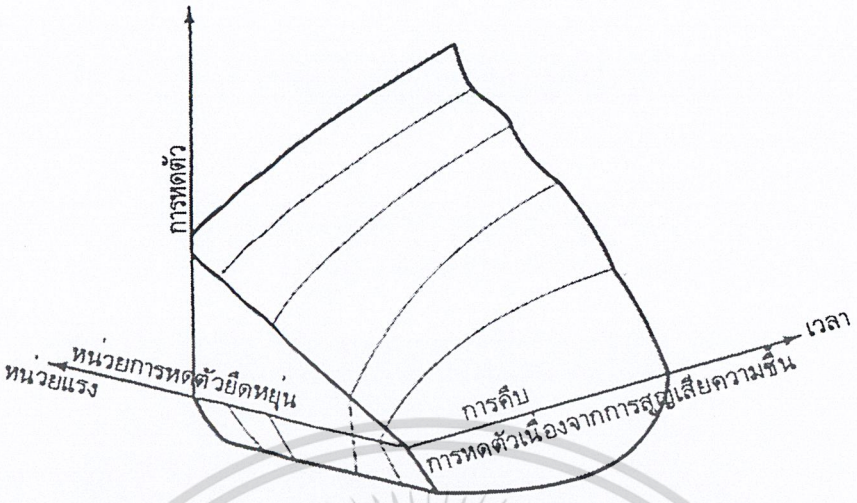


รูปที่ 2.6 – ความสัมพันธ์ของหน่วยการหดตัวกับเวลา

จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกเบื้องต้น แทบจะไม่มีผลเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกระยะยาวซึ่งจะกลายเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์สามมิติของหน่วยการหดตัวทั้งสามชนิด ซึ่งเป็นผลมาจากหน่วยแรงอัดคงค้างและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กับระยะเวลา ดังนั้นแกนสามมิติจะประกอบด้วยแกนการหดตัว แกนหน่วยแรง และแกนเวลา

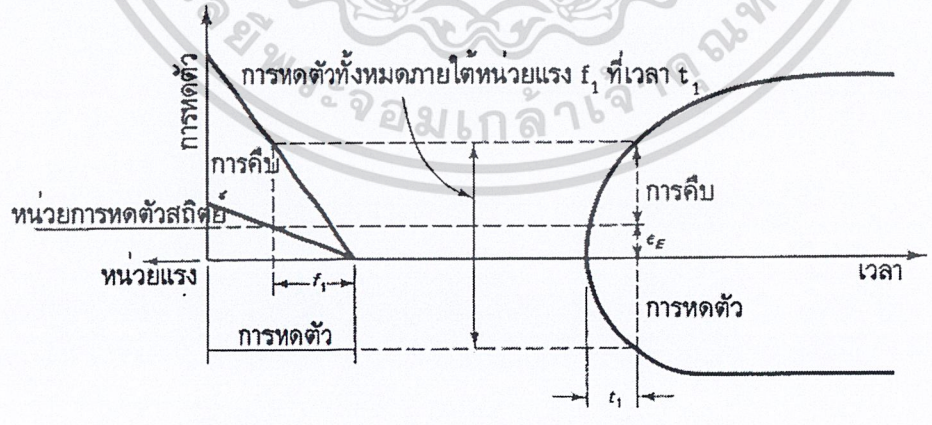
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 – ความสัมพันธ์สามมิติแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างที่ขึ้นกับเวลา

ผลจากห้องปฏิบัติการระบุว่า การคืบแปรเปลี่ยนตามหน่วยแรง แต่จะหาความสัมพันธ์ได้เพียงในช่วงหน่วยแรงต่ำ และหน่วยแรงสูงสุดที่คงความสัมพันธ์นี้จะอยู่ประมาณ $0.2f'_c$ ถึง $0.5f'_c$ ขอบเขตนี้มีพื้นฐานมาจากข้อสังเกตที่ว่า การแตกร้าวจะเกิดขึ้นอย่างมากในคอนกรีต ที่หน่วยแรงประมาณ $0.4f'_c$

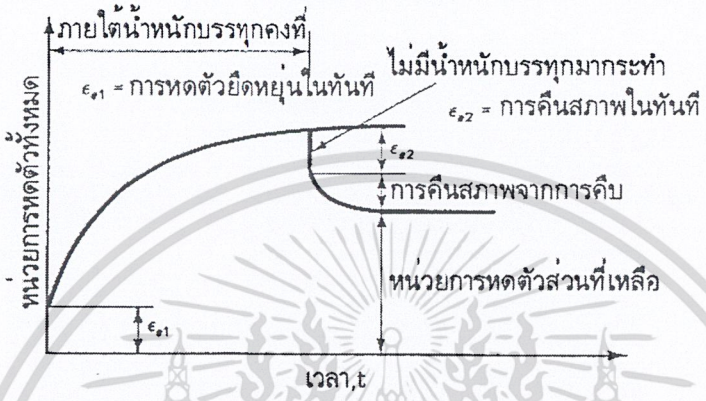
รูปที่ 2.8a แสดงรูปตัดสองมิติของความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.7 ในระนาบของหน่วยแรงและการหดตัวที่เวลา t_1 จะเห็นว่า ทั้งหน่วยการหดตัวยืดหยุ่นและหน่วยการคืบ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรง ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 2.8b แสดงรูปตัดในระนาบของเวลาและหน่วยการหดตัวที่หน่วยแรง f_1 จะเห็นความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันของหน่วยการคืบและหน่วยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น กับเวลา



รูปที่ 2.8 – (a) ระนาบของหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัว (b) ระนาบของหน่วยการหดตัวกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหดตัวเนื่องจากการคืบและการสูญเสียความชื้นจะเกิดอย่างถาวรเป็นบางส่วน ถ้าถอดน้ำหนักออกจากชิ้นส่วนตัวอย่างหลังจากที่อยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการคืนสภาพยืดหยุ่นขึ้นทันที ตามด้วยการคืนสภาพในอัตราที่ช้าลง ซึ่งเรียกว่า *การคืนสภาพจากการคืบ* (creep recovery) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.9 การคืนสภาพขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มมีน้ำหนักกระทำ คอนกรีตที่มีอายุมากกว่าจะมีการคืนสภาพสูงกว่า



รูปที่ 2.9 – ความสัมพันธ์ของการคืนสภาพจากการคืบกับเวลา

การคืบและการหดตัวเนื่องจากความชื้นเป็นองค์ประกอบซึ่งกันและกัน โดยทั่วไป คอนกรีตที่สูญเสียน้ำน้อยจะเกิดการคืบน้อย ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการคืบจะได้แก่ ส่วนผสมของคอนกรีต สภาพแวดล้อม และขนาดของชิ้นตัวอย่าง แต่ปัจจัยหลักก็คือ น้ำหนักบรรทุกและระยะเวลาที่กระทำ

ส่วนผสมของคอนกรีต จะกำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ หรือซีเมนต์ร่วมกับสารผสมเพิ่ม มวลรวม ชนิดและปริมาณของซีเมนต์ ดังนั้นการคืบและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์และปริมาณของซีเมนต์ และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของมวลรวม

2.4.1 ผลของการคืบ

การคืบและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจะทำให้ระยะแอ่นของคานและแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการเสื่อมลดของการอัดแรง . นอกจากนี้ยังทำให้ระยะเยื้องศูนย์ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายแรงอัดจากคอนกรีตไปยังเหล็กเสริม

เมื่อเหล็กถึงจุดคราก น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นจะถูกรับโดยคอนกรีต ส่งผลให้กำลังของเสาลดลง เสาเกิดการโก่งตัวมากขึ้น เกิดหน่วยแรงสูงกว่าที่คอนกรีตจะรับได้ ทำให้เกิดการวิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ค่าของการคืบ

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาหน่วยการคืบ C ภายใต้น้ำหนักบรรทุกหลังจากระยะเวลา t คือ

$$C = \frac{t}{a + bt} \tag{2.7}$$

โดยที่ a และ b เป็น ค่าคงที่ได้มาจากการทดลอง

หรือจะหาได้อีกวิธี โดยถือว่าหน่วยการหดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืบ มีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon_{cu} = \rho_u f_{ci} \tag{2.8}$$

โดยที่ ρ_u = สัมประสิทธิ์ของหน่วยการคืบ หรือการคืบจำเพาะ

f_{ci} = หน่วยแรงในองค์อาคารที่ทำให้เกิดหน่วยการหดตัว,ε_{ci}

ค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบสูงสุด หาได้จาก

$$C_u = \rho_u E_c \tag{2.9}$$

โดยที่ ค่าเฉลี่ยของ $C_u \approx 2.35$

และความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการคืบ C_t ณ เวลาใด ๆ ต่อสัมประสิทธิ์ของการคืบสูงสุด (ในสภาวะมาตรฐาน) มีค่าเท่ากับ

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} C_u \tag{2.10}$$

หรือ

$$\rho_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \tag{2.11}$$

โดยที่ t เป็น วัน และ ρ_t เป็น ตัวคูณเนื่องจากเวลา และสภาวะมาตรฐานหมายถึง คอนกรีตที่มีการยุบตัวไม่เกิน 10 ซม. ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 40%

ในสภาวะที่แตกต่างออกไป จะต้องคูณสองสมการข้างบนด้วยตัวคูณปรับค่า ดังต่อไปนี้

(a) สำหรับคอนกรีตที่บ่มชื้นและรับน้ำหนักเมื่ออายุ 7 วันหรือหลังจากนั้น

$$k_a = 1.25t^{-0.118} \tag{2.12}$$

(b) สำหรับคอนกรีตที่บ่มด้วยไอน้ำและรับน้ำหนักเมื่ออายุ 1 ถึง 3 วันหรือหลังจากนั้น

$$k_a = 1.13t^{-0.095} \tag{2.13}$$

และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 40% จะต้องปรับแก้สองสมการข้างบนด้วยตัวคูณ

$$k_{c1} = 1.27 - 0.0067H \tag{2.14}$$

โดยที่ H เป็นร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์

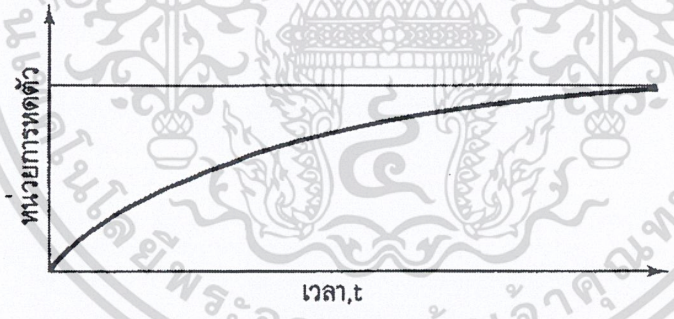
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การหดตัว

โดยทั่วไป จะแบ่งการหดตัวออกเป็นสองชนิด ได้แก่ การหดตัวในคอนกรีตสด และ การหดตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว *การหดตัวในคอนกรีตสด*จะเกิดขึ้นในสองสามชั่วโมงแรกหลังจากเทคอนกรีตสดลงในแบบ ความชื้นในผิวที่สัมผัสกับอากาศแห้งเช่นในแผ่นพื้น จะระเหยออกอย่างรวดเร็วจนน้ำจากชั้นล่างของคอนกรีตเยิ้มเข้ามาแทนที่ไม่ทัน ในทางตรงกันข้าม *การหดตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว* จะเกิดหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นส่วนใหญ่ไปแล้ว

การหดตัวหลังจากแข็งตัวแล้ว เป็นการลดปริมาตรของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นโดยการระเหย ในทางตรงข้าม ถ้าปริมาตรเพิ่มขึ้นโดยการดูดซึมน้ำ จะเรียกว่า การบวมตัว (swelling) สรุปได้ว่าปรากฏการณ์ทั้งสองเป็น การเคลื่อนที่ของน้ำเข้าออกจากซีเมนต์เจลเนื่องจากความแตกต่างของความชื้นระหว่างองค์อาคารกับสภาวะแวดล้อม โดยไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกภายนอก

การหดตัวส่วนใหญ่จะไม่สามารถคืนกลับได้ ถ้านำคอนกรีตที่หดตัวเต็มที่แล้วไปแช่ในน้ำ มันจะไม่ขยายตัวกลับสู่สภาพเดิม รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มของหน่วยการหดตัว, ε_{sh} ตามเวลา อัตราการเพิ่มจะลดลงตามเวลา เนื่องจากคอนกรีตที่มีอายุมากขึ้นจะมีกำลังต้านหน่วยแรงมากขึ้น ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง จนเกือบไม่มีการหดตัวเลยเมื่อถึงเวลาช่วงหนึ่ง

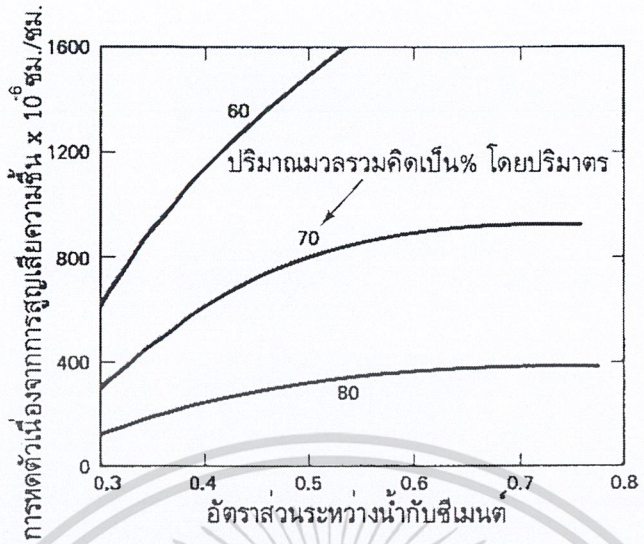


รูปที่ 2.10 – ความสัมพันธ์ของการหดตัว กับ เวลา

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดของการหดตัวแบบแห้งมีดังต่อไปนี้

1. *มวลรวม* มวลรวมจะต้านการหดตัวของคอนกรีตสด ดังนั้นคอนกรีตที่มีมวลรวมมากจะเกิดการหดตัวน้อย ปริมาณการต้านจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม มวลรวมที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงหรือมีผิวที่ผิวขรุขระก็ต้านการหดตัวได้ดี
2. *อัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์* การหดตัวจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนนี้ รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของสองปัจจัยนี้กับการหดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 – ผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์และปริมาณของมวลรวมที่มีต่อการหดตัว

3. *ขนาดขององค์อาคาร* อัตราการหดตัวและปริมาณการหดตัวทั้งหมดจะแปรผกผันกับปริมาตรขององค์อาคาร อย่างไรก็ตามการหดตัวจะต้องใช้เวลามากสำหรับองค์อาคารที่มีขนาดใหญ่ เพราะจะต้องใช้เวลามากก่อนที่ความชื้นในเนื้อคอนกรีตส่วนในจะเกิดการระเหย เป็นไปได้ว่า อาจจะต้องใช้เวลาถึงหนึ่งปี ก่อนที่การระเหยจะเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตลึก 25 ซม. จากผิวนอก และที่ลึก 60 ซม. อาจจะต้องใช้เวลาถึง 10 ปี
4. *สภาวะแวดล้อม* ความชื้นสัมพัทธ์จะมีผลอย่างมากต่อกระทบต่อปริมาณของการหดตัว อัตราการหดตัวจะแปรผกผันกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง โดยที่ การหดตัวจะไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ
5. *ปริมาณเหล็กเสริม* คอนกรีตเสริมเหล็กจะหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตล้วน ความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กเสริม
6. *สารผสมเพิ่ม* ผลกระทบจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารผสมเพิ่ม สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น สารปอซโซลานิคจะเพิ่มการหดตัวแบบแห้ง ในระหว่างที่สารกักฟองอากาศจะมีผลน้อยมากต่อการหดตัว
7. *ชนิดของซีเมนต์* ซีเมนต์ชนิดก่อตัวเร็วจะเกิดการหดตัวมากกว่าชนิดอื่น ชนิดที่ต้านการหดตัวจะเกิดการหดตัวน้อยมาก และยังกำจัดรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวเมื่อมีการเสริมเหล็กที่เหมาะสม
8. *Carbonation* การหดตัวแบบนี้ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เจล ส่งผลให้เกิดการลดของปริมาตรของซีเมนต์เจลและเกิดการหดตัว ปริมาณของการหดตัวทั้งหมดขึ้นอยู่กับขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา carbonation และขบวนการของการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้น ถ้าปรากฏการณ์ทั้งสองเกิดพร้อมกัน จะเกิดการหดตัวน้อย อย่างไรก็ตามปฏิกิริยา Carbonation นี้ จะเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 50 %

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวกับเวลา ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์มาตรฐาน (≈ 40 %) แสดงได้ดังนี้

(a) สำหรับคอนกรีตบ่มชื้นที่เวลาใด ๆ t หลังจาก 7 วัน

$$\varepsilon_{SH,t} = \frac{t}{35+t}\varepsilon_{SH,u} \qquad (2.15)$$

โดยที่ $\varepsilon_{SH,u}$ = 800 x 10^{-6} ซม../ซม. ถ้าไม่มีข้อมูลในท้องถิ่นนั้น

(b) สำหรับคอนกรีตที่บ่มด้วยไอน้ำ หลังจาก 1 - 3 วัน

$$\varepsilon_{SH,t} = \frac{t}{55+t}\varepsilon_{SH,u} \qquad (2.16)$$

ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่างจากความชื้นสัมพัทธ์มาตรฐาน จะต้องปรับแก้สองสมการข้างบนด้วยตัวคูณ

(a) เมื่อ $40 < H \le 80$ %

$$k_{SH} = 1.40 - 0.010H \qquad (2.17a)$$

(b) เมื่อ $80 < H \le 100$ %

$$k_{SH} = 3.00 - 0.30H \qquad (2.17b)$$

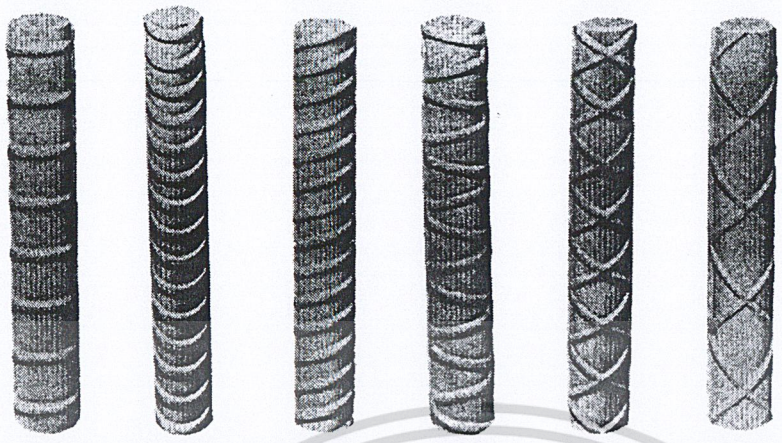
2.6 เหล็กเสริมธรรมดา

เหล็กเสริมในคอนกรีต ประกอบด้วย เหล็กเส้น ลวด และ ตะแกรงเหล็ก ซึ่งทั้งหมดจะต้องผ่านการผลิตตามมาตรฐานของ ASTM คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กเสริมประกอบด้วย

1. โมดูลัสยืดหยุ่น, E_s
2. กำลังคราก, f_y
3. กำลังประลัย, f_u
4. ชั้นคุณภาพ
5. ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นหรือลวด

เพื่อเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ขั้นตอนการผลิตจะทำให้เกิดรอยบั้งหรือข้ออ้อยขึ้นบนผิวของเหล็กเส้น ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 ข้ออ้อยจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A616-76 ในกรณีของลวดจะใช้รอยกดเป็นร่องบนลวดแทนข้ออ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



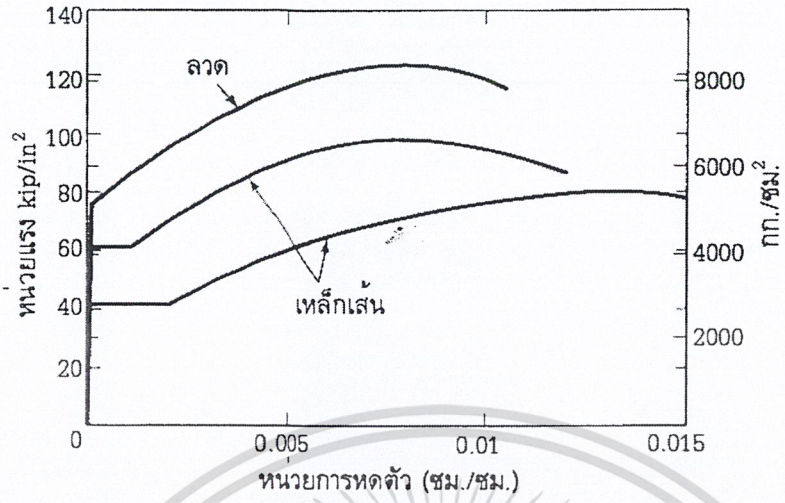
รูปที่ 2.12 – ตัวอย่างของเหล็กข้ออ้อยแบบต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM

รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัว ของเหล็กชั้นคุณภาพ SD30 SD40 และ SD50 ซึ่งจะมีกำลังครากที่ 3000, 4000, และ 5000 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ โดยมีจุดครากแสดงบนความสัมพันธ์อย่างชัดเจน สำหรับเหล็กที่ไม่มีจุดครากแสดงอย่างชัดเจนบนความสัมพันธ์ จะใช้กำลังครากเป็นหน่วยแรงที่หน่วยการยืดตัวเท่ากับ 0.005 สำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ SD30 และ SD40 และที่หน่วยการยืดตัวเท่ากับ 0.035 สำหรับเหล็กคุณภาพ SD50 กำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กชั้นคุณภาพเหล่านี้ มีค่าเท่ากับ 4900, 6300 และ 7000 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การยืดตัวที่จุดวิบัติ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชั้นคุณภาพ ขนาดของเหล็ก และแหล่งผลิต มีค่าระหว่างร้อยละ 4.5 ถึง 12 เมื่อใช้ความยาวของชิ้นส่วนทดสอบเป็น 20 ซม.

จะนิยมใช้ตะแกรงเหล็กกันมากในแผ่นพื้น เพราะความง่ายในการวางเหล็ก ระยะเรียงที่ไม่คลาดเคลื่อน และการยึดเหนี่ยวที่ดีกับคอนกรีต จะใช้ลวดผิวเรียบหรือลวดมีร่องที่ผิววางทำแนวตั้งฉากกันและเชื่อมตรงบริเวณจุดตัด

สำหรับเหล็กกล้าละมุนทั่วไป จะมีพฤติกรรมทั้งในช่วงอีลาสติกและพลาสติก โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2.04×10^6 กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 – ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัว สำหรับเหล็กเสริมไม่อัดแรง

2.7 เหล็กเสริมอัดแรง

2.7.1 ประเภทของเหล็กเสริม

เพราะปริมาณที่ค่อนข้างสูงของการเสื่อมลดเนื่องจากการคืบและการหดตัวในคอนกรีต จึงต้องใช้เหล็กเสริมซึ่งมีกำลังสูงอย่างน้อยเท่ากับ 18 900 กก./ซม.^{2} เพื่อให้ได้แรงอัดประสิทธิผลตามที่ต้องการ โดยปกติการเสื่อมลดของการอัดแรงจะมีค่าประมาณ 2460 ถึง 4220 กก./ซม.^{2} ทำให้เห็นได้ว่าถ้าใช้เหล็กปกติซึ่งมีกำลังคราก f_y = 4000 กก./ซม.^{2} จะแทบไม่เหลือแรงอัดเลยหลังจากการเสื่อมลด เหล็กเสริมกำลังสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง โดยจะใช้แรงดึงเบื้องต้นในเหล็กเสริมอัดแรงค่าประมาณ 12 650 ถึง 15 470 กก./ซม.^{2}

เหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้อยู่ทั่วไป ประกอบด้วย ลวดเส้นเดียว ลวดตีเกลียว และเหล็กเส้นกำลังสูง ชนิดที่ใช้ทั่วไป ได้แก่

- ลวดที่มีการคลายหน่วยแรงหรือคลายแรงดึงต่ำไม่มีการเคลือบ (Uncoated stress-relieved or low-relaxation wires)
- ลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรงและคลายแรงดึงต่ำไม่มีการเคลือบ (Uncoated stress-relieved and low-relaxation strands)
- เหล็กเส้นกำลังสูงไม่มีการเคลือบ (Uncoated high-strength steel bars)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ลวดและลวดตีเกลียวอัดแรงชนิดคลายความหน่วยแรงและคลายแรงดึงต่ำ (Stress-Relieved and Low-Relaxation Wires and Strands)

ลวดอัดแรงชนิดคลายหน่วยแรงเป็นลวดที่ถูกรีดเย็นตามมาตรฐาน ASTM A421 ส่วนลวดตีเกลียวชนิดคลายหน่วยแรงจะผลิตตามมาตรฐาน ASTM A416 มักจะประกอบด้วยลวดหกเส้นขนาดเท่ากันพันรอบแกนซึ่งเป็นลวดอีกหนึ่งเส้นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า โดยขนาดของเกลียวจะมีค่าประมาณ 12 ถึง 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด เมื่อลวดทั้งเจ็ดเส้นถูกพันเข้าด้วยกัน ก็จะทำให้มีความสามารถในการคลายหน่วยแรง ตารางที่ 2.3 และ 2.4 แสดงคุณสมบัติของลวดและลวดตีเกลียวอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM

เพื่อที่จะให้ได้เนื้อที่หน้าตัดมากที่สุด ลวดมาตรฐานจะถูกรีดจนรวมกันเป็นหน้าตัดแบบกระชับ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.14(b) ซึ่งกำลังต่ำสุดและคุณสมบัติต่าง ๆ จะต้องเป็นตามมาตรฐาน ASTM A779 ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

รูปที่ 2.15(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัวของลวดและลวดตีเกลียวอัดแรง และรูปที่ 2.15(b) แสดงการเปรียบเทียบของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัวของลวดตีเกลียวอัดแรงกับเหล็กกล้าละมุน



(a) (b)

รูปที่ 2.14 – ลวดตีเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้นแบบหน้าตัดมาตรฐานและแบบหน้าตัดกระชับ

ตารางที่ 2.3 – ลวดอัดแรง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม	พื้นที่หน้าตัด มม^2	กำลังรับแรงดึงประลัยน้อยสุด กก/ซม^2		กำลงคลากน้อยที่สุดที่% หน่วยการยืดตัว กก/ซม^2	
		ชนิดBA	ชนิดWA	ชนิดBA	ชนิดWA
4.88	18.70	-	17,580	-	14,950
4.98	19.48	16,870	17,580	14,350	14950
6.35	31.67	16,870	16,870	14,350	14,350
7.01	38.56	16,870	16,520	14,050	14,050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 – ลวดตีเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้นหน้าตัดมาตรฐาน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.	กำลังประลัยของ กก.	พื้นที่หน้าตัด มม2	น้ำหนัก กก/ 1,000ม	น้ำหนักบรรทุกน้อยสุดที่1 %
เกรด250				
6.35	4,080	2322	18178	3,470
7.94	6,580	3742	29353	5,579
9.53	9,070	5161	40528	7,710
1111	12,240	6968	54683	10,431
1270	16320	9290	73010	13877
1524	24490	13950	1,09813	20816
เกรด270				
9.53	10,430	5484	43210	8,866
1111	14060	7419	58110	11,950
1270	18730	9871	77480	15,918
1524	26580	14000	1,10260	22,585

ตารางที่ 2.5 - ลวดตีเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้นหน้าตัดกระชับ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม	กำลังประลัยของ กก	พื้นที่หน้าตัด มม2	น้ำหนัก กก/1,000 ม.
12.7	21,310	112.23	894.00
15.24	30,580	165.12	1,300.77
17.78	38,740	223.17	1,752.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 – เหล็กเส้นอัดแรง

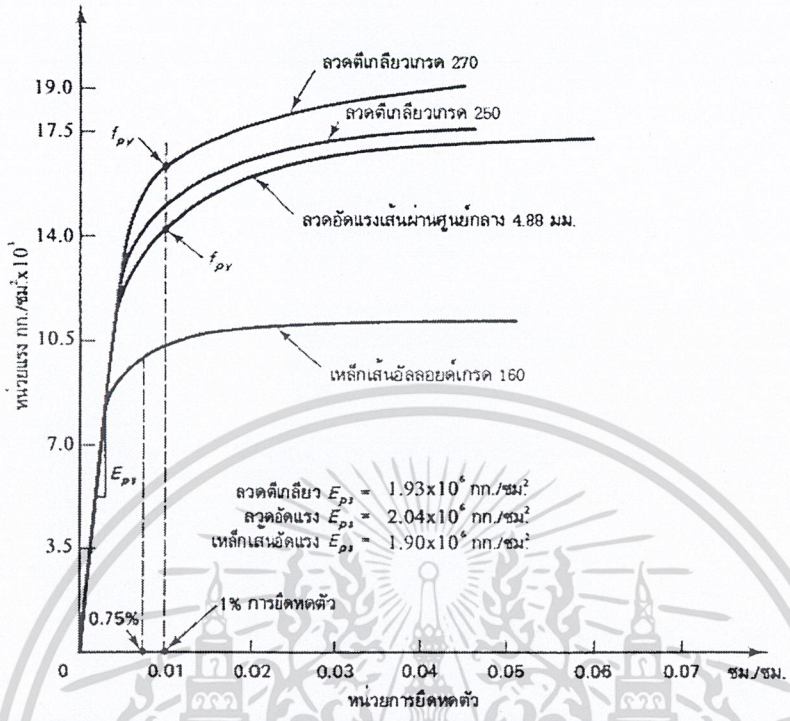
ชนิดของเหล็กเส้นอัดแรง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม	พื้นที่หน้าตัด มม.^{2}
เหล็กอัลลอยด์เรียบ	19.05	285.09
เกรด145 หรือ160	22.23	387.65
ASTM A722	25.40	506.33
	28.58	641.13
	31.75	791.42
	34.93	957.83
เหล็กข้ออ้อย	15.88	180.60
	25.40	549.54
	31.75	835.28

2.7.3 เหล็กเส้นกำลังสูง (High-Strength Prestressing Bars)

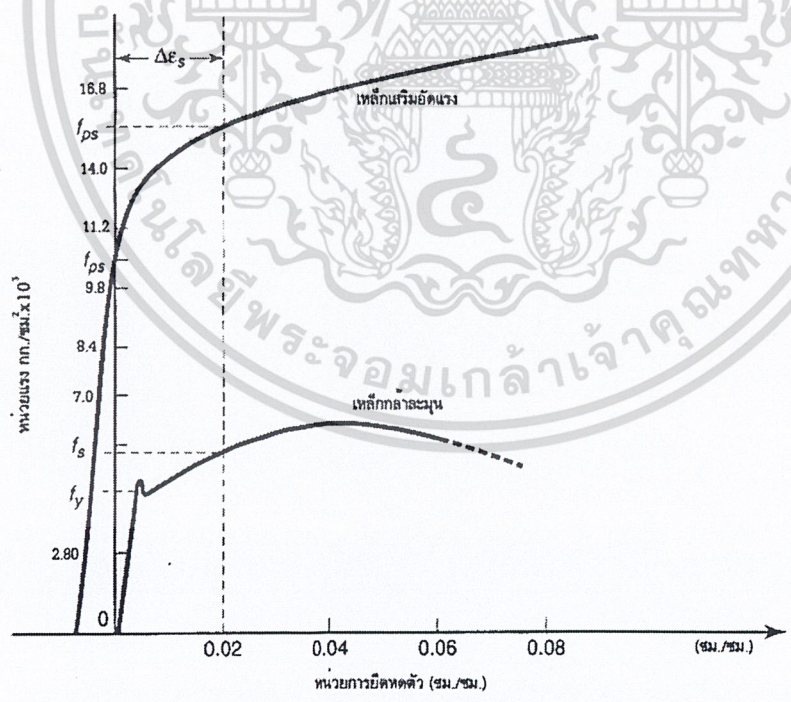
เหล็กเส้นอัดแรงมีทั้งแบบผิวเรียบและแบบข้ออ้อย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 19 มม. ถึง 35 มม. จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A722 ใช้การรีดเย็นเพื่อเพิ่มกำลังคราก และยังต้องมีการคลายหน่วยแรงเพื่อเพิ่มความเหนียวอีกด้วย ซึ่งจะทำได้ด้วยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยทั่วไปไม่เกิน 500°C ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการทำให้เกิดการคลายหน่วยแรงทั้งในเหล็กเส้นและในลวดตีเกลียว กำลังรับแรงดึงของเหล็กเส้นอัดแรงจะต้องไม่น้อยกว่า 10 500 กก./ซม.^{2} และกำลังครากจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของกำลังสูงสุดสำหรับเหล็กกลม และไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับเหล็กข้ออ้อย

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเส้นแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15a - ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเส้นอัดแรง



รูปที่ 2.15b - เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเส้นอัดแรงและเหล็กเสริม

ธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 การคลายหน่วยแรงของเหล็กเสริมอัดแรง (Steel Relaxation)

การคลายหน่วยแรงของเหล็กเสริมอัดแรงเป็นการเสื่อมลดของแรงอัด เกิดขึ้นเมื่อลวดหรือลวดตีเกลียวถูกดึงให้ยืดอยู่เป็นเวลานาน เปรียบเสมือนกับการคืบในคอนกรีต เพียงแต่ว่าการคืบเพิ่มหน่วยการหดตัว แต่ในกรณีนี้ทำให้หน่วยแรงในเหล็กเสริมลดลง ถ้าให้ t เป็นเวลาในชั่วโมงหลังจากการดึงลวด จะหาการเสื่อมลดของแรงอัดเนื่องการคลายหน่วยแรงในลวดอัดแรงและลวดตีเกลียวอัดแรงชนิดคลายหน่วยแรงได้จากสมการ

$$\Delta f_R = f_{pi} \frac{\log t}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) \tag{2.18}$$

โดยที่ $f_p / f_{py} \geq 0.55$

และ $f_{py} \approx 0.85 f_{pu}$ สำหรับลวดตีเกลียวชนิดคลายหน่วยแรง

$\approx 0.9 f_{pu}$ สำหรับลวดตีเกลียวชนิดคลายแรงดึงต่ำ

$f_{pi} = 0.82 f_{py}$ ทันทีหลังจากการถ่ายแรง แต่ $f_{pi} \leq 0.74 f_{pu}$ สำหรับการอัดแรงแบบดึงก่อน และ $0.70 f_{pu}$ สำหรับการอัดแรงแบบดึงทีหลัง โดยทั่วไป $f_{pi} \approx 0.70 f_{pu}$

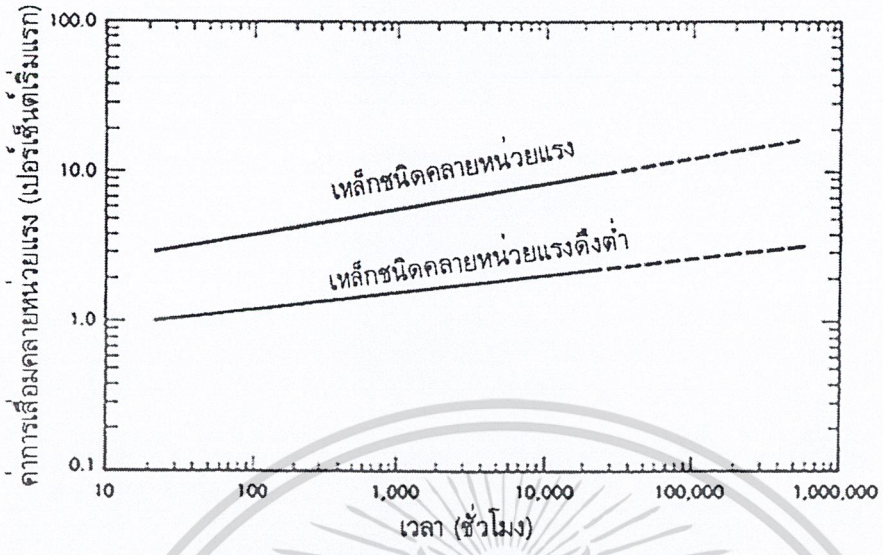
จะลดการเสื่อมลดเนื่องจากการคลายหน่วยแรงได้ด้วยการดึงลวดทิ้งไว้ที่หน่วยแรงเท่ากับ $0.70 f_{pu}$ ในช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 100°C ซึ่งจะทำให้เกิดการยืดตัวถาวร ขบวนการนี้เรียกว่า *stabilization* เหล็กเสริมอัดแรงที่ทำตามขบวนการนี้ จะกลายเป็น *เหล็กอัดแรงชนิดคลายแรงดึงต่ำ* ซึ่งจะมีการเสื่อมลดเนื่องจากการคลายหน่วยแรงประมาณร้อยละ 25 ของเหล็กเสริมอัดแรงชนิดคลายหน่วยแรงธรรมดา

จะหาการเสื่อมลดของแรงอัดเนื่องการคลายหน่วยแรงในลวดอัดแรงและลวดตีเกลียวอัดแรงชนิดคลายแรงต่ำได้จากสมการ

$$\Delta f_R = f_{pi} \frac{\log t}{45} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) \tag{2.19}$$

รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบการเสื่อมลดของลวดตีเกลียว 7 เส้น แบบคลายหน่วยแรงและแบบคลายแรงดึงต่ำ เมื่อถูกดึงให้มีความยาวคงที่ ที่อุณหภูมิ 29.5°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 - การเสื่อมคลายหน่วยแรงตามเวลาของเหล็กเสริมอัดแรงชนิดคลายหน่วยแรงและแบบคลายแรงดึงต่ำเมื่อดึงที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังประลัย

2.7.5 การกัดกร่อนและการเสื่อมสภาพของลวดตีเกลียวอัดแรง

การป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กเสริมอัดแรงมีความสำคัญมากกว่าในเหล็กเสริมธรรมดา เพราะว่ากำลังขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงขึ้นอยู่กับแรงดึงในเหล็กเสริม ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม เมื่อพื้นที่หน้าตัดลดลงเนื่องจากการกัดกร่อน จะทำให้กำลังรับโมเมนต์ขององค์อาคารลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการวิบัติของระบบโครงสร้างก่อนเวลาอันควร ในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน คอนกรีตที่หุ้มอยู่รอบจะช่วยป้องกันการกัดกร่อน ถ้ามีระยะหุ้มของคอนกรีตที่เหมาะสม ในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง จะใช้การอัดน้ำปูนเข้าไปในท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากที่อัดแรงเรียบร้อยแล้ว หรืออาจจะใช้การเคลือบผิวเหล็กเสริมอัดแรง

นอกเหนือไปจากการกัดกร่อนตามที่กล่าวข้างบาน ยังมีการกัดกร่อนอีกชนิดหนึ่งคือ *การกัดกร่อนที่เกิดจากหน่วยแรงดึง (stress corrosion)* ซึ่งเกิดจากรอยแตกร้าวขนาดเล็กซึ่งเกิดจากแรงดึงในเหล็กเสริม และเมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงนาน ๆ ก็จะทำให้เกิดความเปราะและวิบัติได้ การเสื่อมลดประเภทนี้จะเกิดเฉพาะในกรณีที่หน่วยแรงสูงมาก ซึ่งโอกาสที่จะเกิดอาจจะน้อยมากแต่ถ้าเกิดแล้วก็ยากต่อการป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 หน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตและเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ACI

นิยามของพจน์ที่ใช้ในหัวข้อนี้ ได้แก่

f_{py} = กำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง, กก. /ซม^2.

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริมธรรมดา, กก. /ซม^2.

f_{pu} = หน่วยแรงดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง, กก. /ซม^2.

f_c' = กำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน, กก. /ซม^2.

f_{ci}' = กำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง, กก. /ซม^2

2.8.1 หน่วยแรงในคอนกรีต

ทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริม (ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง)

(a) หน่วยแรงอัด $0.60f_{ci}'$

(b) หน่วยแรงดึง $0.80\sqrt{f_{ci}'}$ และ $1.60\sqrt{f_{ci}'}$ ที่ปลายคานช่วงเดี่ยว

ถ้าหน่วยแรงดึงเกินค่าข้างบน จะต้องเสริมเหล็กพิเศษเพื่อการเหนี่ยวรั้ง (จะเป็นแบบอัดแรงหรือไม่อัดแรงก็ได้) ในบริเวณที่รับแรงดึง เพื่อต้านแรงดึงทั้งหมดในคอนกรีต ตามที่คำนวณภายใต้สมมุติฐานของหน้าตัดไม่แตกร้าว

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง)

(a) หน่วยแรงอัดภายใต้การอัดแรงและน้ำหนักบรรทุกคงค้าง $0.45f_c'$

(b) หน่วยแรงอัดภายใต้การอัดแรงและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด $0.60f_c'$

(c) หน่วยแรงดึงในบริเวณที่เคยอยู่ใต้แรงอัดมาก่อน $1.60\sqrt{f_c'}$

หรือ $3.20\sqrt{f_c'}$

ถ้ามีการพิสูจน์ว่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีและระยะยาวน้อยกว่าค่าที่ยอมให้

2.8.2 หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง

หน่วยแรงในเหล็กเสริม จะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

(a) ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก $0.94f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.80f_{pu}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอยึด

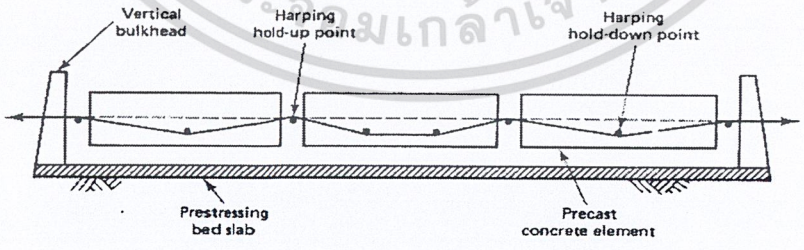
(b) ทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร $0.82f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.74f_{pu}$

(c) ในระบบอัดแรงทีหลัง ที่สมอยึดหลังจากการยึดเหล็กเสริม $0.70f_{pu}$

2.9 ระบบการอัดแรงและสมอยึด

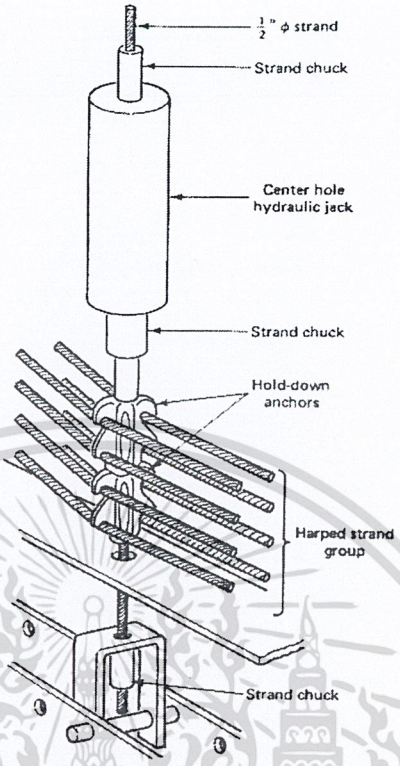
2.9.1 ระบบอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน (Pretensioning)

จะดึงเหล็กเสริมอัดแรงระหว่างตัวยึดก่อนการเทคอนกรีตรอบเหล็กเสริม ตัวยึดอาจจะเป็นแท่งคอนกรีตขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถรับแรงดึงสูงที่กระทำบนเหล็กเสริมแต่ละเส้น การดึงก่อนเป็นการดึงเหล็กเสริมอย่างเดียว ไม่ใช่ดึงคานทั้งคาน ดังนั้น*คานอัดแรงแบบดึงก่อน* จะหมายถึงคานซึ่งมีการดึงเหล็กเสริมก่อนการเทคอนกรีตหล่อคาน ในขณะที่*คานอัดแรงแบบดึงทีหลัง* เป็นคานซึ่งมีการดึงเหล็กเสริมหลังจากการหล่อคานและคอนกรีตในคานมีความแข็งแรงแล้ว โดยปกติระบบดึงเหล็กก่อนมักจะทำในโรงงาน ซึ่งประกอบด้วยพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อบนพื้นไปตามยาว โดยมีตัวยึดในแนวตั้งหรือกำแพงที่ปลายทั้งสองข้างของพื้น จะดึงเหล็กเสริมอัดแรงโดยยึดไว้ที่ปลายข้างหนึ่ง โดยอาจจะดึงทีละเส้นหรือดึงทีเดียวพร้อมกันทุกเส้น เนื่องจากพื้นคอนกรีตที่ใช้เป็นฐานหล่ออาจจะมีความยาวเป็นหลายร้อยเมตร ดังนั้นในการผลิตแต่ละครั้งจะได้ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จหลายชิ้นส่วน ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 จะตัดเหล็กเสริมที่อยู่นอกแบบหล่อหลังจากคอนกรีตแข็งตัว สำหรับแนวเหล็กเสริมที่มีการหักงอ (harp tendon profile) จะมีเครื่องยึดลวดให้งอตามแนว ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 - รูปจำลองฐานผลิตคอนกรีตอัดแรงแบบดึงก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 – ตัวยึดเพื่อให้เหล็กเสริมงอตามแนวที่ออกแบบไว้

2.9.2 ระบบอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลัง (Post-Tensioning)

จะดึงเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยเหล็กเสริมจะวางอยู่ในท่อร้อยตามแนวยาวในองค์อาคาร แรงในการอัดแรงถูกถ่ายผ่านสมอยึดทั้งสองข้าง จะอัดน้ำปูนเพื่อการเหนี่ยวรั้งหลังจากสิ้นสุดการอัดแรง

2.9.3 ระบบการดึงเหล็กเสริม

ขั้นตอนสำคัญของการก่อสร้างอัดแรง ได้แก่การดึงเหล็กแสริม ซึ่งมักจะใช้แม่แรงแบบไฮดรอลิก มีกำลังประมาณ 10 ถึง 20 ตัน โดยมีช่วงดึงประมาณ 15 ถึง 120 ซม. ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบของการอัดแรงว่า เป็นแบบดึงก่อนหรือทีหลัง ดึงทีละเส้นหรือดึงทีเดียวพร้อมกัน ถ้าดึงทีเดียวพร้อมกันจะต้องใช้แม่แรงที่มีกำลังสูงและมีช่วงดึงอย่างน้อย 75 ซม. ซึ่งก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าการดึงทีละเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 การอัดน้ำปูน

เพื่อป้องกันการกัดกร่อนแบบถาวรสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงระบบดึงทีหลัง และเพื่อการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีต จะอัดน้ำปูนเข้าไปในจนเต็มท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรง

2.9.4.1 วัสดุที่ใช้ในการอัดน้ำปูน

1. ***ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*** ปูนซีเมนต์ที่ใช้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 อาจจะเป็นประเภท I II หรือ III ก็ได้ จะต้องใช้ปูนใหม่ ซึ่งไม่เกาะกันเป็นก้อนในถุง บ่งถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นบางส่วน
2. **น้ำ** จะต้องเป็นน้ำที่ดื่มได้ สะอาด และปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อ ซีเมนต์ หรือเหล็กเสริมอัดแรง
3. ***สารผสมเพิ่ม*** ถ้าใช้สารผสมเพิ่มเพื่อคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการ เช่น ลดปริมาณน้ำ ง่ายต่อการเท ลดการแยกตัวของน้ำ และเพื่อการขยายตัว สารผสมเพิ่มเหล่านั้นจะต้องไม่เป็นอันตรายต่อซีเมนต์หรือเหล็กเสริมอัดแรงสูตร ไม่ควรใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ (ในรูปของ C1 มากกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของสารผสมเพิ่ม ถ้าใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณ 2 กก. ต่อซีเมนต์ 1 ถุง) ฟลูออไรด์ ซัลไฟด์ หรือ ไนเตรท อาจจะใช้ผงอลูมินัมที่มีความละเอียดที่เหมาะสมในปริมาณที่เหมาะสม หรือใช้สารกักฟองอากาศผสมอย่างสม่ำเสมอในน้ำปูน จะทำให้น้ำปูนขยายตัวขึ้นได้ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

2.9.4.2 ท่อร้อยเหล็กเสริม

1. ***ชนิด***

(ก) **ท่ออ่อน** ทำด้วยแผ่นวัสดุอ่อนม้วนทับเป็นท่อ ได้แก่ แผ่นเหล็กซึ่งอาจจะเคลือบสังกะสีหรือไม่ก็ได้ จะทิ้งท่อนี้ไว้ในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นท่อจะยอมให้คอนกรีตซึมเข้าไปในท่อไม่ได้ จะต้องทำให้เกิดการเหนี่ยวรั้งตามต้องการและจะต้องคงรูปร่างเดิมภายใต้น้ำหนักของคอนกรีตที่เทลงในแบบ

(ข) **ท่อคอนกรีต** อาจจะใช้ท่อหรือเหล็กเส้นวางไว้ในแบบ แล้วดึงออกหลังจากเทคอนกรีตแต่ก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ทำให้เหลือช่องเปิดเป็นท่อคอนกรีตซึ่งจะต้องเปิดว่างตลอดไม่ปิดทางไหลของน้ำปูนอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **ช่องอัดน้ำปูนและช่องระบายอากาศ**

ท่อร้อยเหล็กเสริมทุกท่อจะต้องมีช่องเปิดใช้อัดน้ำปูนทั้งสองข้าง สำหรับเหล็กเสริมที่วางเป็นแนวพาราโบล่า จะต้องมีช่องเปิดทุกตำแหน่งที่สูงสุด ยกเว้นในตำแหน่งที่รัศมีน้อยมาก เช่น ในแผ่นพื้นต่อเนื่อง ช่องเปิดทุกช่องจะต้องมีการป้องกันไม่น้ำปูนรั่วได้

3. **ขนาดของท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรง**

ถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงมากกว่าหนึ่งเส้นในท่อร้อยแต่ละท่อ ขนาดของท่อร้อยจะต้องไม่น้อยกว่าสองเท่าของหน้าตัดสุทธิของเหล็กเสริม ถ้ามีเหล็กเส้นอัดแรงเพียงเส้นเดียวในหนึ่งท่อ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะต้องใหญ่กว่าขนาดของเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 1.25 ซม.

4. **การวางท่อร้อยเหล็กอัดแรง**

หลังจากวางท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรง วางเหล็กเสริม และเข้าแบบเรียบร้อยแล้ว จะต้องตรวจดูตำแหน่งที่ท่ออาจเกิดความเสียหายได้ จะต้องซ่อมแซมช่องเปิดในท่อก่อนการเทคอนกรีต และจะต้องยึดท่อ ช่องอัดน้ำปูน และรูระบายอากาศเพื่อต้านการเคลื่อนตัวในระหว่างเทคอนกรีต

2.9.4.3 ขั้นตอนการอัดน้ำปูน

1. ถ้าใช้ท่อคอนกรีต จะต้องอัดน้ำเข้าในท่อคอนกรีต เพื่อให้ผนังเปียกชื้นตลอด
2. เปิดช่องอัดน้ำปูนและช่องระบายอากาศที่ตำแหน่งสูงสุดทุกช่องก่อนการอัดน้ำปูน เมื่ออัดน้ำปูนจากช่องแรก จะต้องให้น้ำปูนไหลออกมาจากช่องอากาศอันแรกเพื่อไล่น้ำและอากาศที่ค้างในท่อออก แล้วจึงเปิดช่องระบายอากาศตัวนั้น ใช้ขั้นตอนเดียวกันกับช่องระบายอากาศตัวต่อไป แรงดันที่ใช้ในการอัดน้ำปูนไม่ควรเกิน 250 psig.
3. อัดน้ำปูนต่อเนื่องและปล่อยให้น้ำปูนไหลออกมาจากท่อระบายอากาศ จนกระทั่งสังเกตได้ว่าเมื่ออัดน้ำปูนเข้าไปก็จะไหลออกมาจากท่อระบายในทันที จึงอุดหรือปิดช่องเปิดทุกช่อง และทิ้งไว้จนกว่าน้ำปูนจะแข็งตัว
4. ถ้าเกิดผิดพลาดจากขั้นตอนที่ 2 และ 3 จะต้องอัดน้ำเพื่อล้างน้ำปูนออกทันที
5. อุณหภูมิของคอนกรีต ณ เวลาที่อัดน้ำปูน ต้องไม่น้อยกว่า 2°C และตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ของน้ำปูนจะต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 56 กก./ซม^2.
6. อุณหภูมิของน้ำปูนระหว่างการผสมและการอัดต้องไม่เกิน 32°C ใช้น้ำเย็นผสมถ้าจำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3

การเสื่อมลดของการอัดแรง

3.1 บทนำ

แรงอัดเบื้องต้นที่กระทำในเนื้อคอนกรีต จะมีการเสื่อมลดโดยผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลาประมาณ 5 ปี ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องหาแรงอัดในทุกขั้นตอนของการรับน้ำหนัก เริ่มจากการถ่ายแรงเบื้องต้น การรับน้ำหนักที่สภาวะต่าง ๆ จนถึงสภาวะใช้งาน จนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่สภาวะรับน้ำหนักสูงสุด การเสื่อมลดนี้จะแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่

1. การเสื่อมลดที่เกิดขึ้นทันทีในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจาก การหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต การเข้าที่ของสมอยึด และแรงเสียดทานระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับท่อร้อย
2. การเสื่อมลดที่เกิดขึ้นในเวลาต่อมา ซึ่งเป็นผลมาจาก การคืบ การหดตัว การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการล้าของเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งผลทั้งหมดนี้จะหาที่สภาวะใช้งาน

การหาปริมาณการเสื่อมลดอย่างละเอียด โดยเฉพาะส่วนที่ขึ้นอยู่กับเวลา ค่อนข้างที่จะยุ่งยากเพราะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง การคำนวณโดยใช้แนวทางจากการทดลอง (Empirical Method) ก็จะแตกต่างกันไปตามมาตรฐานที่เลือกใช้ ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานของ สถาบันคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete Institute, PCI) คณะกรรมาธิการร่วมระหว่าง American Concrete Institute (ACI) และ American Society of Civil Engineers (ASCE) หรือวิธีการหาการเสื่อมลดแบบรวมของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

การใช้ค่ารวมของการเสื่อมลด เป็นวิธีที่ง่ายแต่จะใช้ได้เฉพาะกับองค์อาคารภายใต้สภาวะปกติ ค่าการเสื่อมลดรวมจาก มาตรฐานของ AASHTO ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และจากมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตอัดแรงแบบดึงทีหลัง (Post-Tensioning Institute, PCI) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ค่าในตารางได้รวมการเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต การล้าของเหล็กเสริมอัดแรง การคืบ และการหดตัว ค่าจากตารางเหล่านี้ใช้ได้เฉพาะในองค์อาคารรูปแบบธรรมดา ใช้คอนกรีตมวลปกติ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบปกติ ภายใต้การควบคุมคุณภาพ วิธีการก่อสร้าง และสภาวะแวดล้อมแบบทั่วไป ถ้าสภาวะแตกต่างจากที่กล่าวมา จะต้องใช้ขั้นตอนอย่างละเอียดในการหาการเสื่อมลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 - การเสื่อมลดรวมของ AASHTO

ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง	การเสื่อมลดทั้งหมด (กก./ซม.^{2})	
	f'_c = 280 กก./ซม.^{2}	f'_c = 350 กก./ซม.^{2}
ลวดตีเกลียวแบบดึงก่อน		3150
ลวดและลวดตีเกลียวแบบดึงทีหลัง	2240	2310
เหล็กเส้น	1540	1610

* ไม่รวมการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3.2 - การเสื่อมลดโดยประมาณสำหรับการอัดแรงแบบดึงทีหลัง

เหล็กเสริมอัดแรง	การเสื่อมลด (กก./ซม.^{2})	
	แผ่นพื้น	คานและตง
ลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 270 และลวดที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 240	2100	2450
เหล็กเส้น	1400	1750
ลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรงต่ำ เกรด 270	1050	1400

หมายเหตุ: ค่าประมาณนี้ใช้ในการหาขนาดของเหล็กเสริมอัดแรงแบบดึงทีหลัง ในกรณีที่ผู้ออกแบบไม่ได้ระบุค่าของการเสื่อมลดมาให้ ค่านี้ใช้ได้กับคอนกรีตมวลปกติและกำลังปกติ ภายใต้แรงอัดและสภาวะแวดล้อมทั่วไป ถ้าใช้การอัดแรงต่ำหรือสูงเกินไป หรือภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แห้งหรือชื้นเกินไป ค่าจริงของการเสื่อมลดอาจจะแตกต่างมากจากค่าในตาราง อนึ่ง ค่าในตารางไม่รวมการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3.3 - ชนิดของการเสื่อมลด

ชนิดของการเสื่อมลด	เกิดเมื่อ		การเสื่อมลด	
	อัดแรงแบบดึงก่อน	อัดแรงแบบดึงทีหลัง	ระยะเวลา (t_i, t_j)	สัญลักษณ์
การหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต	ขณะถ่ายแรง	ขณะดึงลวด	....	ES
การคลายแรงในเหล็กเสริมอัดแรง	ก่อนและหลังการถ่ายแรง	ขณะถ่ายแรง	$RE(t_i, t_j)$	RE
การคืบ	หลังการถ่ายแรง	ขณะถ่ายแรง	$CR(t_i, t_j)$	CR
การหดตัว	หลังการถ่ายแรง	หลังการถ่ายแรง	$SH(t_i, t_j)$	SH
แรงเสียดทาน	...	ขณะดึงลวด	....	FR
การเข้าที่ของสมอยึด	...	ขณะถ่ายแรง	....	AN
ผลรวม	ตลอดการใช้งาน	ตลอดการใช้งาน	$\Delta f_{PT}(t_i, t_j)$	Δf_{pT}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ได้สรุปต้นเหตุของการเสื่อมลดและขั้นตอนที่เกิด โดยใช้ตัวห้อย i แสดงสภาวะเบื้องต้น และ j แสดงสภาวะ ของน้ำหนักบรรทุกกระทำต่าง ๆ หลังจากการอัดแรง จากตารางนี้จะหาการเสื่อมลดทั้งหมดทั้งในคอนกรีตอัดแรงแบบดึงก่อนและดึงทีหลัง ได้ดังต่อไปนี้

1. องค์อาคารอัดแรงก่อน

$$\Delta f_{pT} = ES + RE + CR + SH \qquad (3.1a)$$

โดยที่ $RE = RE(t_0, t_{tr}) + RE(t_{tr}, t_s)$

t_0 = เวลาขณะดึงลวด

t_{tr} = เวลาขณะถ่ายแรง

t_s = เวลาเมื่อการเสื่อมลดสิ้นสุด

ดังนั้นจะต้องหาการเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของเหล็กเสริมตลอดระยะเวลา t_1 ถึง t_2 ของทุกขั้นตอนการรับน้ำหนัก เช่น ถ้าให้การถ่ายแรงใช้เวลา 18 ชั่วโมง จะได้ $t_{tr} = t_2 = 18$ และ $t_0 = t_1 = 0$ ถ้าหากการรับน้ำหนักบรรทุกขั้นต่อไปอยู่ระหว่างการถ่ายแรงและระยะเวลา 5 ปี (17 250 ชั่วโมง) ซึ่งถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดของการเสื่อมลด จะได้ $t_2 = t_s = 17\ 520$ และ $t_1 = 18$ ดังนั้นถ้าให้ f_{pi} เป็นแรงอัดเบื้องต้นในเนื้อคอนกรีตและ f_{pJ} เป็นแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง จะได้

$$f_{pi} = f_{pJ} - RE(t_0, t_{tr}) - ES \qquad (3.1b)$$

2. องค์อาคารอัดแรงทีหลัง

$$\Delta f_{pT} = AN + FR + ES + RE + CR + SH \qquad (3.1c)$$

โดยที่ ES ได้มาจากการดึงลวดทีละเส้น ไม่ใช่ดึงพร้อมกัน

ในการดึงทีหลัง การเสื่อมลดเนื่องการคลายแรงของเหล็กเสริมอัดแรง จะเริ่มจากเวลาถ่ายแรง $t_1 = t_{tr}$ และสิ้นสุดที่ t_2 ของแต่ละขั้นตอนการรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น

$$f_{pi} = f_{pJ} - AN - FR \qquad (3.1d)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (ES)

คอนกรีตจะหดตัวภายใต้แรงอัด เหล็กเสริมอัดแรงซึ่งยึดเหนี่ยวติดกับเนื้อคอนกรีตก็จะหดตัวด้วย ส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริม และแรงอัดในเนื้อคอนกรีต

3.2.1 องค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน

สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน (องค์อาคารหล่อสำเร็จ) แรงอัดที่ถ่ายลงบนคานเนื่องเหล็กเสริมอัดแรงจะทำให้คานหดตัวในแนวแกน ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีหน่วยการหดตัวเป็น $\epsilon_{ES} = \Delta_{ES} / L$ ดังนั้น

$$\epsilon_{ES} = f_c/E_c = P_i'/(A_cE_c) \qquad (3.2a)$$

เหล็กเสริมอัดแรงก็จะต้องหดตัวด้วยปริมาณเท่ากัน

$$ES = E_s\epsilon_{ES} = E_sP_i/(A_cE_c) = nP_i/A_c = nf_{cs} \qquad (3.2b)$$

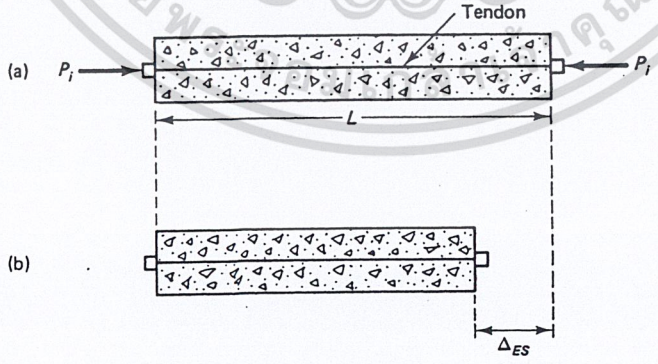
หน่วยแรงในคอนกรีตที่แนวศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมเนื่องจากการอัดแรงเบื้องต้น

$$f_{cs} = - P_i/A_c \qquad (3.3)$$

ถ้าแนวเหล็กเสริมในรูปที่ 3.1 มีการเยื้องศูนย์เป็นระยะ e ที่กลางช่วง และถ้ารวมโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของตัวคาน M_G หน่วยแรงในคอนกรีตที่กลางช่วง ณ แนวเหล็กเสริมอัดแรงจะกลายเป็น

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e^2}{r^2}\right)+\frac{M_G e}{I_c} \qquad (3.4)$$

โดยที่ P_i เป็นแรงอัดในคอนกรีตหลังจากการถ่ายแรง ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าแรงดึงเริ่มต้นในเหล็กเสริมอัดแรง P_J แต่การหาค่า P_i ที่แท้จริงค่อนข้างจะยาก ดังนั้นจึงอนุโลมให้ใช้ค่าแรงอัดก่อนการถ่ายแรงแทนในสมการที่ 3.2 ถึง 3.4 หรืออาจจะลดลงร้อยละ 10 ถ้าต้องการ



รูปที่ 3.1 - การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติก (a) สภาพเดิมของคาน (b) สภาพหลังการหดตัวตามแนวแกน

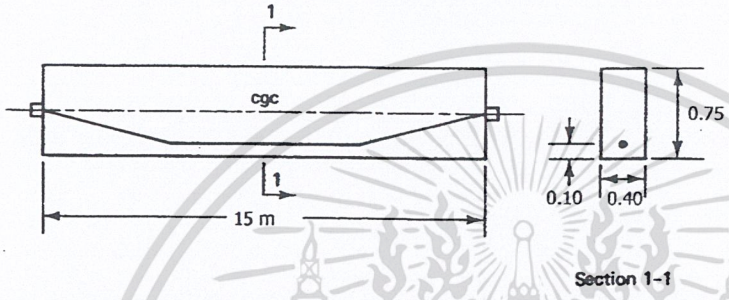
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 3.1 - การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกในคานอัดแรงแบบดึงก่อน

คานอัดแรงแบบดึงก่อนมีความยาวช่วง 15 เมตรดังแสดงในรูปที่ 3.2 จงหาหน่วยแรงในคอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริมอัดแรงขณะถ่ายแรงที่กลางช่วง และหาการเสื่อมลดของแรงอัดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต สมมติให้หน่วยแรงในการดึงเหล็กเสริมเป็นร้อยละ 75 ของ f_{pu} และกำหนดให้

f'_c = 420 กก./ซม.^{2}, f_{pu} = 18 980 กก./ซม.^{2}, f'_{ci} = 315 กก./ซม.^{2}, E_{ps} = 1.97(10)^6 กก./ซม.^{2}

A_{ps} = ลวดตีเกลียวเจ็ดเส้นขนาด 12.7 มม. จำนวน 10 เส้น = 10(0.9871) = 9.87 ซม.^{2}



A_c = 40(75) = 3000 ซม.^{2}, น้ำหนักคาน = 3000(2400)/10^4 = 720 กก./ม.

I_c = 40(75)^3/12 = 1 406 250 ซม.^{4}, $r^2 = I_c/A_c$ = 468.75 ซม.^{2}, e_c = (75/2) – 10 = 27.5 ซม.,

$P_i = 0.75 f_{pu} A_{ps} = 0.75(18\,980)(9.87) = 140\,499.45$ กก.

$M_G = wl^2/8 = 720(15)^2/8 = 20\,250$ กก.ม.

จากสมการที่ 3.4 หน่วยแรงในคอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริมอัดแรงขณะถ่ายแรง โดยสมมติให้ $P_i = P_J$ เป็น

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e^2}{r^2}\right)+\frac{M_G e}{I_c} = -\frac{140\,499.45}{3000}\left(1+\frac{27.5^2}{468.75}\right)+\frac{20\,250(100)(27.5)}{1\,406\,250}$$

$$= -122.39 + 39.60 = -82.79 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง $E_{ci} = 15\,200\sqrt{f'_{ci}} = 15\,200\sqrt{315} = 269\,773$ กก./ซม.^{2}

ได้อัตราส่วนโมดูลัส $n = E_s/E_{ci} = 1.97(10)^6/269\,773 = 7.30$

จากสมการที่ 3.2b การเสื่อมลดของการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกเป็น

$$ES = nf_{cs} = 7.30(82.79) = 604.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

ถ้าลดค่า P_i ลงร้อยละ 10 จะได้ ES = 0.9(604.6) = 544.1 กก./ซม.^{2}

ผลต่างของหน่วยแรง 60.5 กก./ซม.^{2} ในเหล็กเสริม ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบการเสื่อมลดเนื่องจากตัวแปรทั้งหมดซึ่งจะมีผลรวมประมาณ 3150 ถึง 3850 กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 องค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง

ในคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติก จะมีค่าแปรผันจากศูนย์ ถ้าดึงลวดพร้อมกันทีเดียวทั้งหมด จนถึงครึ่งหนึ่งของการเสื่อมลดจากกรณีอัดแรงแบบดึงก่อน ถ้าดึงลวดทีละชุด เช่น อาจจะดึงทีละสองเส้น เป็นต้น ถ้าให้ n เป็นจำนวนครั้งของการดึง จะได้

$$ES = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} ES_j \qquad (3.5)$$

จะเห็นว่าลวดที่ดึงชุดสุดท้ายจะไม่เกิดการเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติก ในระหว่างที่ลวดที่ดึงชุดแรกจะเกิดการเสื่อมลดมากที่สุด

ตัวอย่าง 3.2 - การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกในคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 3.1 ถ้าขั้นตอนในการอัดแรงเป็นดังต่อไปนี้

(a) ดึงลวดทีละสองเส้น, (b) ดึงทีละหนึ่งเส้น และ (c) ดึงทีเดียวพร้อมกัน

(a) จากตัวอย่างที่ 3.1 ได้ ES = 604.6 กก./ซม.^{2}

ลวดที่ดึงในชุดสุดท้ายจะไม่เกิดการเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัว ดังนั้นจะมีลวดเพียงสี่ชุดที่เกิดการเสื่อมลด โดยที่ชุดแรกจะเกิดการเสื่อมลดมากที่สุดเท่ากับ 604.6 กก./ซม.^{2} ดังนั้นจากสมการที่ 3.5

$$ES = \frac{4/4+3/4+2/4+1/4}{5}(604.6) = \frac{1}{2}(604.6) = 302.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

(b) $$ES = \frac{9/9+8/9+.....+2/9+1/9}{10}(604.6) = \frac{1}{2}(604.6) = 302.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

ในทั้งสองกรณีของการเสื่อมลดในการอัดแรงในคานแบบดึงทีหลังเป็นครึ่งหนึ่งของแบบดึงก่อน

(c) ES = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของเหล็กเสริมอัดแรง (RE)

ลวดที่มีการคลายหน่วยแรง จะเกิดการล้าถ้าถูกดึงให้ยืดอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้แรงดึงภายในลวดลดลง ปริมาณของการเสื่อมลดไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่แรงดึงค้างอยู่ในลวด แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของของหน่วยแรงดึงเบื้องต้นต่อกำลังครากของเหล็กเสริม f_{pi}/f_{py} การเสื่อมลดในรูปแบบนี้ เรียกว่า "การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของเหล็กเสริม" มาตรฐาน ACI 318-99 จำกัดหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงไว้ดังนี้

(a) หน่วยแรงในการดึงเหล็ก $f_{pJ} = 0.94f_{py}$ แต่ไม่เกินค่าที่น้อยกว่าของ $0.80f_{pu}$ และค่าสูงสุดที่ระบุโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมและสมอยึด

(b) หน่วยแรงขณะถ่ายแรง $f_{pi} = 0.82f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.74f_{pu}$

(c) หน่วยแรงหลังจากการถ่ายแรงที่สมอยึดในลวดอัดแรงแบบดึงที่หลัง เท่ากับ $0.70f_{pu}$

โดยที่ได้กำหนดค่า f_{py} ไว้ในกรณีต่างดังนี้

ในเหล็กเส้นอัดแรง : $f_{py} = 0.80f_{pu}$

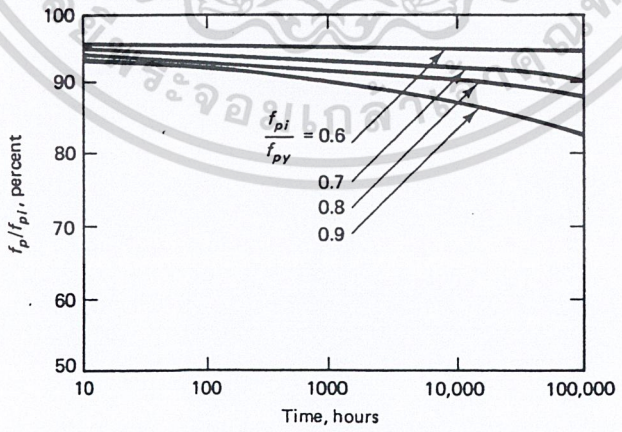
ในลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรง: $f_{py} = 0.85f_{pu}$

ในลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรงต่ำ: $f_{py} = 0.90f_{pu}$

ถ้าให้ f_{pR} เป็นหน่วยแรงที่คงเหลือหลังจากการคลายหน่วยแรงในเหล็กเสริม จะได้

$$\frac{f_{pR}}{f_{pi}} = 1 - \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) \qquad (3.6)$$

ในกรณีของเหล็กที่มีการคลายหน่วยแรงต่ำ จะแทนตัวหาร 10 ด้วย 45 รูปที่ 3.2 แสดงผลของสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.2 – การล้าในเหล็กเสริม

ถ้าแทนพจน์ $\log t_2 - \log t_1$ ในสมการที่ 3.6 ด้วยค่าโดยประมาณ $\log t = \log(t_2 - t_1)$ จะได้สมการของการเสื่อมลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RE = f'_{pi}\,\frac{\log t}{10}\left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) \qquad (3.7)$$

โดยที่ f'_{pi} เป็นหน่วยแรงเบื้องต้นที่ถ่ายจากเหล็กเสริมสู่เนื้อคอนกรีต ถ้าจะหาการเสื่อมลดที่ละขั้นตอน จะใช้สมการ

$$RE = f'_{pi}\left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) \qquad (3.8)$$

โดยที่ t_1 เป็นเวลาเริ่มต้นของการดึงลดและ t_2 เป็นเวลาสิ้นสุดขั้นตอนที่จะหาการเสื่อมลด

<u>ตัวอย่าง 3.3</u> - การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของเหล็กเสริม

หาการเสื่อมลดเนื่องการล้าของเหล็กเสริมในตัวอย่างที่ 3.1 หลังจากเวลา 5 ปี สมมติให้การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าจากขั้นตอนการดึงเหล็กเสริมถึงการถ่ายแรง การเสื่อมลดจากการหดตัวอีลาสติก การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบและหดตัวรวมเป็นร้อยละ 20 ของหน่วยแรงดึงเบื้องต้น ให้ใช้ f_{py} = 16 100 กก./ซม.^{2}

จากตัวอย่างที่ 3.1: $f_{pi} = 0.75 f_{pu} = 0.75(18\,980) = 14\,235$ กก./ซม.^{2} และจากสมการที่ 3.1b สำหรับขั้นตอนนี้

$$f_{pi} = f_{pJ} - RE\,(t_0, t_{tr}) = 14\,235 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงที่ลดลงเพื่อใช้ในการหาการเสื่อมลดเนื่องการล้า

$$f'_{pi} = (1 - 0.20)(14\,235) = 11\,388 \text{ กก./ซม.}^2$$

ช่วงเวลาของการล้า = 5(365)(24) = 44 000 ชั่วโมง

จากสมการที่ 3.7 $RE = f'_{pi}\,\frac{\log t}{10}\left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right)$

$$= 11\,388 \times \frac{\log 44\,000}{10}\left(\frac{11\,388}{16\,100} - 0.55\right) = 831.9 \text{ กก./ซม.}^2$$

คณะกรรมการร่วม ACI-ASCE ได้เสนอทางเลือกอีกทางในการหาการเสื่อมลดเนื่องจากการล้า โดยถือว่าเป็นผลร่วมของการหดตัวอีลาสติก การคืบ และการหดตัว ตามที่แสดงไว้ในสมการข้างล่าง

$$RE = C[K_{re} - J(ES + CR + SH)] \qquad (3.9)$$

โดยที่ค่าของ K_{re} J และ C ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 - ค่าของ C

f_{pi} / f_{pu}	ลวดหรือลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรง	เหล็กเส้นที่มีการคลายหน่วยแรง หรือ ลวดหรือลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรงต่ำ
0.80		1.28
0.79		1.22
0.78		1.16
0.77		1.11
0.76		1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33

ตารางที่ 3.5 - ค่าของ K_{re} และ J

ชนิดของเหล็กเสริม	K_{re} (กก./ซม.^{2})	J
ลวดหรือลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 270	1400	0.150
ลวดหรือลวดตีเกลียวที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 250	1300	0.140
ลวดที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 240 หรือ 235	1240	0.130
ลวดตีเกลียวที่มีการคลายแรงดึงต่ำ เกรด 270	350	0.040
ลวดที่มีการคลายแรงดึงต่ำ เกรด 250	325	0.037
ลวดที่มีการคลายแรงดึงต่ำ เกรด 240 หรือ 235	310	0.035
เหล็กเส้นที่มีการคลายหน่วยแรง เกรด 145 หรือ 160	420	0.050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (CR)

การคืบ คือ การที่วัสดุหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งให้เนื้อวัสดุนั้นอยู่ภายใต้น้ำหนักกระทำคงค้าง (sustained loads) เป็นเวลานาน การเสื่อมลดของหน่วยแรงเนื่องจากการคืบ จึงเป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกคงค้างแต่อย่างเดียว หน่วยการหดตัวจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของน้ำหนักกระทำ ระยะเวลาที่กระทำ คุณสมบัติของคอนกรีตอันได้แก่ ส่วนผสม การบ่ม อายุขององค์อาคารเมื่อเริ่มใช้งาน และสภาพแวดล้อม เนื่องจากหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น เราจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวจากการคืบ ϵ_{CR} และหน่วยการหดตัวอีลาสติก ϵ_{EL} ได้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การคืบ C_u ดังต่อไปนี้

$$C_u = \epsilon_{CR}/\epsilon_{EL} \qquad (3.10a)$$

และสัมประสิทธิ์การคืบที่เวลาใด ๆ t (วัน) จะแสดงได้ด้วย

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10+t^{0.60}} C_u \qquad (3.10b)$$

C_u จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 2.35 สำหรับการคืบสูงสุด การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบในองค์อาคารอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว จะหาได้จากสมการข้างล่าง

$$CR = C_t \frac{E_{ps}}{E_c} f_{cs} \qquad (3.11)$$

โดยที่ f_{cs} เป็นหน่วยแรงในคอนกรีตที่แนวของเหล็กเสริมอัดแรง โดยทั่วไปการเสื่อมลดจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา แต่ในการอัดแรงแบบดึงทีหลังในระบบที่ไม่การยึดเหนี่ยว จะถือว่าการเสื่อมลดเกิดสม่ำเสมอตลอดทั้งช่วงคาน ดังนั้นจึงจะใช้ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงในคอนกรีต $\overline{f_{cs}}$ ระหว่างสมอยึดในการหาการเสื่อมลดในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง

สมการของ ACI-ASCE ในการหาการเสื่อมลดเนื่องจากการคืบมีรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ 3.11 ดังต่อไปนี้

$$CR = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} (\overline{f}_{cs} - \overline{f}_{csd}) \qquad (3.12a)$$

หรือ

$$CR = nK_{CR} (\overline{f}_{cs} - \overline{f}_{csd}) \qquad (3.12b)$$

โดยที่ $K_{CR} = 2.0$ สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน

$= 1.6$ สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง

$\overline{f}_{cs}$ = หน่วยแรงในคอนกรีตที่แนวของเหล็กเสริมอัดแรง ทันทีหลังจากการถ่ายแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\overline{f}_{csd}$ = หน่วยแรงในคอนกรีตที่แนวของเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการอัดแรง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมด

n = อัตราส่วนโมดูลัส

สำหรับคอนกรีตมวลเบา ควรจะลดค่า K_{CR} ลงมาร้อยละ 20

ตัวอย่าง 3.4 - การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต

หาการเสื่อมลดเนื่องการคืบของคอนกรีตในตัวอย่างที่ 3.1 โดยให้น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (ไม่รวมน้ำหนักคาน) หลังจากการถ่ายแรงเป็น 560 กก./ม.

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_c = 15\,200\sqrt{f'_c} = 15\,200\sqrt{420} = 311\,507$ กก./ซม.^{2}

ได้อัตราส่วนโมดูลัส $n = E_s/E_c = 1.97(10)^6/311\,507 = 6.32$

$M_{SD} = 560\,(15^2)/8 = 15\,750$ กก.ม.

$$\overline{f}_{csd} = \frac{M_{SD}e}{I_c} = \frac{15\,750(100)(27.5)}{1\,406\,250} = 30.8 \text{ กก./ซม.}^2$$

จากตัวอย่างที่ 3.1 $\overline{f}_{cs} = 82.79$ กก./ซม.^{2}

สำหรับคอนกรีตมวลปกติและเป็นคานอัดแรงแบบดึงก่อน ใช้ $K_{CR} = 2.0$ และจากสมการที่ 3.11a

$$CR = nK_{CR}(\overline{f}_{cs} - \overline{f}_{csd})$$

$$= 6.32(2.0)\,(82.79 - 30.80) = 657.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

3.5 การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัว (SH)

เช่นเดียวกับการคืบ ปริมาณการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ซึ่งได้แก่ ส่วนผสม ชนิดของมวลหยาบ ชนิดของซีเมนต์ ระยะเวลาในการบ่ม ระยะเวลาระหว่างการสิ้นสุดของการบ่มกับการเริ่มอัดแรง ขนาดขององค์อาคาร และสภาพแวดล้อม ร้อยละ 80 ของการหดตัวทั้งหมดจะเกิดขึ้นในปีแรก รายงานของ ACI 209R-92 ให้ค่าเฉลี่ยของหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตทั้งที่บ่มด้วยความชื้นและบ่มด้วยไอน้ำเป็น $780(10^{-6})$ มม./มม. ค่าเฉลี่ยนี้จะแปรเปลี่ยนตามระยะของการบ่มด้วยความชื้นเบื้องต้น ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นผิวขององค์อาคาร อุณหภูมิ และส่วนผสมของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันคอนกรีตอัดแรง (PCI) กำหนดให้หน่วยการหดตัวเฉลี่ยสำหรับสภาวะทั่วไปมีค่าสูงสุด $(\epsilon_{SH})_u$ เท่ากับ $820(10^{-6})$ มม./มม. ถ้าให้ ϵ_{SH} เป็นหน่วยการหดตัวหลังจากปรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว V/S จะได้การเสื่อมลดของแรงอัดในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน เป็น

$$SH = \epsilon_{SH} \times E_{ps} \qquad (3.13)$$

การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลังจะน้อยกว่าองค์อาคารแบบดึงก่อน เพราะการหดตัวบางส่วนจะเกิดไปแล้วก่อนที่จะมีการอัดแรง ถ้าให้ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และรวมผลของอัตราส่วน V/S จะได้สมการทั่วไป PCI ในการหาการเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวเป็น

$$SH = 8.2(10^{-6})\, K_{SH}\, E_{PS} \left(1 - 0.024 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \qquad (3.14)$$

โดยที่ $K_{SH} = 1.0$ สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน และแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6 สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง

ตารางที่ 3.6 - ค่า K_{SH} สำหรับองค์อาคารแบบดึงทีหลัง

เวลา,วัน*	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{SH}	0.92	0.85	0.80	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45

*จำนวนวันหลังจากสิ้นสุดการบ่มถึงวันเริ่มดึงลวด

<u>ตัวอย่าง 3.5</u> - การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

หาการเสื่อมลดเนื่องการหดตัวของคอนกรีตในตัวอย่างที่ 3.1 และ 3.2 ที่อายุ 7 วันหลังจากการบ่มชื้น โดยให้ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70 % และให้อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวของคานเป็น 2.0

(a) ถ้าเป็นคานอัดแรงแบบดึงก่อน $K_{SH} = 1.0$ จากสมการที่ 3.14

$$SH = 8.2(10^{-6})\,(1)(1.97 \times 10^{6})(1 - 0.024 \times 2.0)(100 - 70)$$
$$= 461.4 \text{ กก./ซม.}^2$$

(b) ถ้าเป็นคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง จากตารางที่ 3.6 $K_{SH} = 0.77$

$$SH = 0.77(461.4) = 355.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

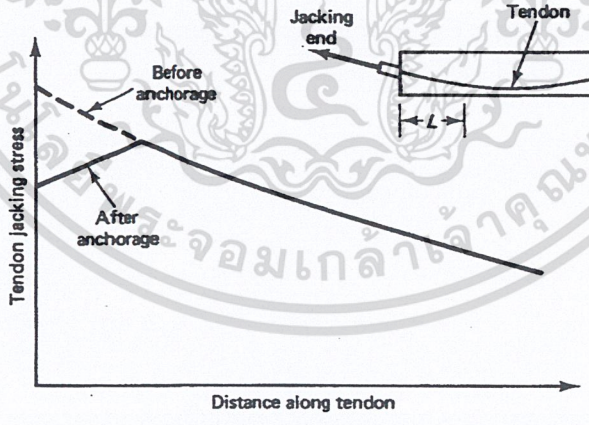
3.6 การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน (FR)

การเสื่อมลดของแรงอัดในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างลวดอัดแรงและท่อร้อยลวด ปริมาณของการเสื่อมลดขึ้นอยู่กับแนวของการวางลวดอัดแรง ซึ่งเรียกว่า เป็นผลจากความโค้ง (curvature effect) และความเบี่ยงเบนในการวางแนว ซึ่งเรียกว่า เป็นผลจากการเบี่ยงเบน (wobble effect) จะปรับผลแรกได้ในระหว่างการเตรียมแบบก่อสร้าง (shop drawing) ด้วยการเลือกชนิดของลวดและเลือกแนวในการวางท่อร้อยลวด ทำให้สามารถที่จะหาผลจากความโค้งล่วงหน้าได้ แต่ผลจากการเบี่ยงเบนเป็นผลมาจากการวางแนวผิดโดยความพลาดพลั้งหรือเป็นกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากการวางแนวท่อได้อย่างสมบูรณ์แบบเป็นไปได้ยากมาก

การเสื่อมลดจะเกิดสูงสุดที่ปลายของคานด้านตรงข้ามกับด้านที่ดึงลวด ดังนั้นการเสื่อมลดจึงแปรผันเป็นเส้นตรงตามความยาวของคาน ถ้าต้องการจะหาค่าที่ตำแหน่งใดก็ใช้การเทียบอัตราส่วนเอาได้

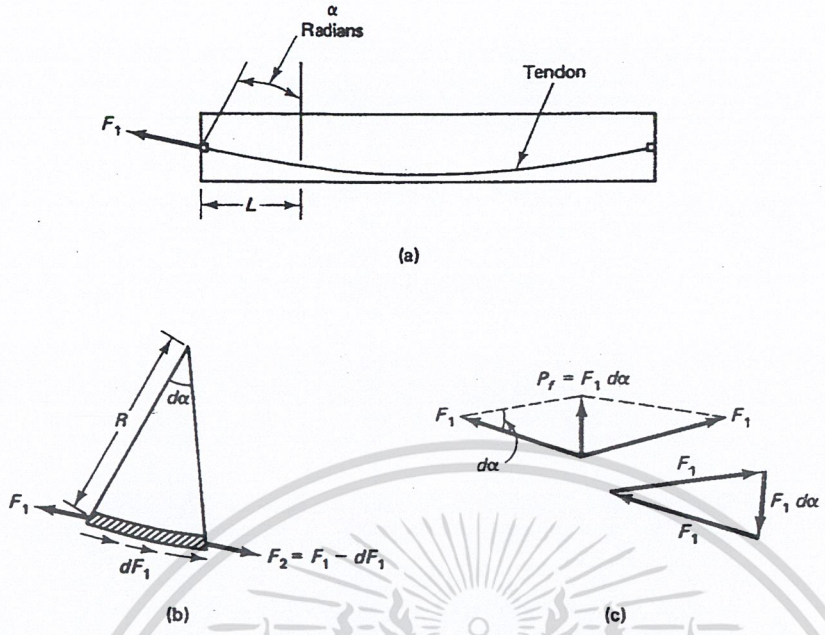
3.6.1 ผลจากความโค้ง (Curvature Effect)

ขณะที่ลวดถูกดึงด้วยแรง F_1 ที่ปลายด้านเครื่องดึงเหล็ก จะเกิดแรงเสียดทานระหว่างลวดกับท่อร้อย ทำให้หน่วยแรงในลวดแปรเปลี่ยนจากระนาบของเครื่องดึงไปยังระยะ L ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 และถ้าพิจารณาชิ้นส่วนสั้น ๆ ของลวดซึ่งแสดงด้วย free-body diagram ในรูปที่ 3.5 พร้อมกับให้ μ เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานตามแนวโค้งระหว่างลวดกับท่อร้อย จะได้



รูปที่ 3.4 - หน่วยแรงเสียดทานตามความยาวของลวดอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 - การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานในแนวความโค้ง

(a) แนววางลวด (b) แรงบนลวดโดยที่ F_1เป็นแรงดึงจากเครื่องดึง (c) แรงรวมเมื่อสมมติ $F_1=F_2$

$$dF_1 = -\mu F_1 d\alpha$$

หรือ
$$\frac{dF_1}{F_1} = -\mu d\alpha \qquad (3.16a)$$

อินทิเกรตได้
$$\log_e F_1 = -\mu\alpha \qquad (3.16b)$$

และถ้า $\alpha = L/R$ จะได้
$$F_2 = F_1 e^{-\mu\alpha} = F_1 e^{-\mu(L/R)} \qquad (3.17)$$

3.6.2 ผลจากการเบี่ยงเบน (Wobble Effect)

ถ้าให้ K เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างลวดและท่อร้อยในแนวการเบี่ยงเบน การเสื่อมลดเกิดจากการวางแนวผิด ซึ่งจะมีผลตลอดความยาวของท่อ ไม่ว่าเป็นการวางแนวแบบเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ใช้หลักการเดียวกับการสร้างสมการที่ 3.16 จะได้

$$\log_e F_1 = -KL \qquad (3.18)$$

หรือ
$$F_2 = F_1 e^{-KL} \qquad (3.19)$$

รวมเข้ากับผลของความโค้งจะได้
$$F_2 = F_1 e^{-\mu\alpha - KL}$$

หรือในพจน์ของหน่วยแรง จะได้
$$f_2 = f_1 e^{-\mu\alpha - KL} \qquad (3.20)$$

ดังนั้นการเสื่อมลดเนื่องจากเสียดทาน
$$FR = f_1 - f_2 = f_1(1 - e^{-\mu\alpha - KL}) \qquad (3.21)$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบที่ง่าย ได้เป็น
$$FR = -f_1(\mu\alpha + KL) \qquad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

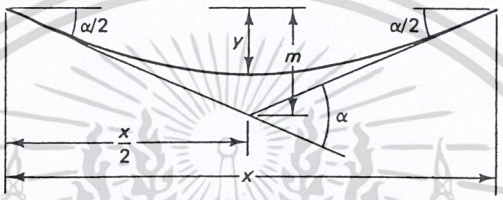
เนื่องจากอัตราส่วนความลึกคานต่อความยาวช่วงมีค่าน้อยมาก จะถือว่าความยาวของลวดเท่ากับความยาวของเส้นสัมผัส ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 มุมที่กลางช่วง α จะมีค่าเป็นสองเท่าของความลาดที่ปลายทั้งสองข้าง ดังนั้น

$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{x/2} = \frac{2m}{x}$$

และถ้าให้ $y \cong m/2$ จะได้ $\alpha/2 = 4y/x$

ดังนั้น $\alpha = 8y/x$ เรเดียน (3.23)

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในกรณีต่าง ๆ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ACI 318-99



รูปที่ 3.6 - มุมกลางของลวดในแนวโค้ง

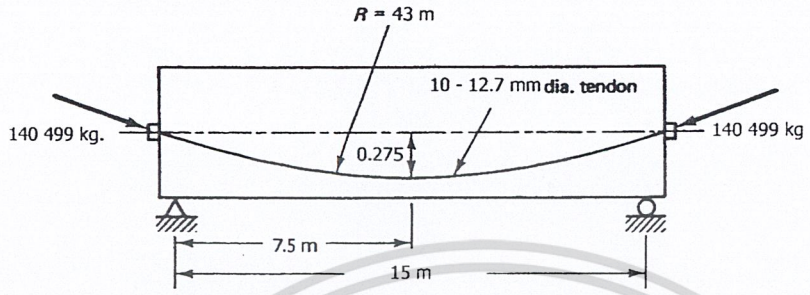
ตารางที่ 3.7 - สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง	K (ต่อเมตร)	μ
เหล็กเสริมอัดแรงในท่ออ่อน		
- ลวด	0.0033 – 0.0050	0.15 - 0.25
- ลวดตีเกลียว 7 เส้น	0.0016 – 0.0066	0.15 - 0.25
- เหล็กเสริมแรงสูง	0.0003 – 0.0020	0.08 - 0.30
ลวดตีเกลียว 7 เส้นในท่อโลหะแข็ง	0.0066	0.15 - 0.25
ลวดและลวดตีเกลียว 7 เส้นทาจารบี	0.0033 – 0.0066	0.05 – 0.15
ลวดและลวดตีเกลียว 7 เส้นเคลือบจากโรงงาน	0.0010 – 0.0066	0.05 – 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 3.6 - การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

สมมติให้คานอัดแรงแบบดึงทีหลังในตัวอย่างที่ 3.2 ใช้ลวดตีเกลียวแบบ 7 เส้นร้อยในท่ออ่อน โดยมีแนวท่อตามที่แสดงในรูปข้างล่าง หาการเสื่อมลดของแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทาน



P_i = 140 499.45 กก.

f_i = 140 499.45/9.87 = 14 235 กก./ซม.^{2}

จากสมการ 3.23 $\alpha = 8y/x = 8(27.5)/(7.5 \times 100) = 0.2933$ เรเดียน

จากตารางที่ 3.7 ใช้ค่า K = 0.0066 และ $\mu = 0.20$ แทนค่าในสมการที่ 3.22 จะได้การเสื่อมลดเนื่องจากความเสียดทาน

$$FR = f_{pi}(\mu\alpha + KL) = 14\,235(0.2 \times 0.2933 + 0.0066 \times 15) = 14\,235(15.77)$$

$$= 2244.3 \text{ กก./ซม.}^2$$

จะเห็นว่าการเสื่อมลดเนื่องจากความเสียดทานคิดเป็นร้อยละ 15.77 ของการอัดแรงเบื้องต้น

3.7 การเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (AN)

การเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด เกิดขึ้นในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงทีหลัง เมื่อลิ่มเคลื่อนตัวเข้าฝังอยู่กับที่เมื่อแรงดึงหลังจากที่ลวดถูกปล่อยจากเครื่องดึง จะพบการเสื่อมลดประเภทนี้ในโรงงานผลิตองค์อาคารแบบดึงก่อนเช่นกัน มักจะเป็นการที่ฐานยึดหัวท้ายปรับตัวเมื่อแรงดึงถูกปล่อยจากเครื่องดึงลวด จะแก้ไขการเสื่อมลดประเภทนี้ได้ด้วยการดึงลวดให้เกิดแรงดึงเผื่อไว้ การเคลื่อนตัวเข้าที่ของลิ่มชนิดสองชิ้น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 6.35 มม. และ 9.53 มม. ปริมาณของการดึงเผื่อขึ้นอยู่กับระบบสมอยึดที่ใช้ เพราะแต่ละระบบก็จะมีการปรับตัวต่างกัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะหาได้จากผู้ผลิต

ถ้าให้ Δ_A เป็นระยะปรับตัวเข้าที่ ให้ L เป็นความยาวของเหล็กเสริมอัดแรง และ E_{ps} เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม จะได้การเสื่อมลดเนื่องจากเข้าที่ของสมอยึดเป็น

$$AN = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} \qquad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 3.7 – การเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด

หาการเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดของคานอัดแรงแบบดึงทีหลังในตัวอย่างที่ 3.2 ถ้าให้ระยะปรับตัวเข้าที่เป็น 6.35 มม.

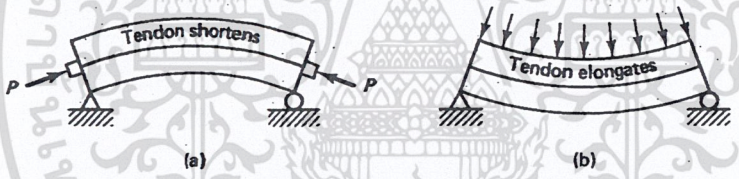
$E_{ps} = 1.97(10^6)$ กก./ซม.^{2}

$\Delta_A = 6.35$ มม.

$$AN = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} = \frac{6.35}{15(1000)} 1.97(10^6) = 833.9 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

อัตราการเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดจะสูงมากในคานช่วงสั้น ทำให้การอัดแรงแบบดึงทีหลังในคานช่วงสั้นมักจะได้ผลที่ไม่ดีนัก

3.8 การเปลี่ยนแปลงแรงอัดเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคาร (BE)



รูปที่ 3.7 – การโก่งตัวของคาน (a) เนื่องจากการอัดแรง (b) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก

ภายใต้การอัดแรงและน้ำหนักบรรทุก คานอาจจะแอ่นตัวหรือโก่งตัวขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถ้าให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตที่แนวของเหล็กเสริมอัดแรงเป็น ϵ_c จะได้การเปลี่ยนแปลงของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงเป็น

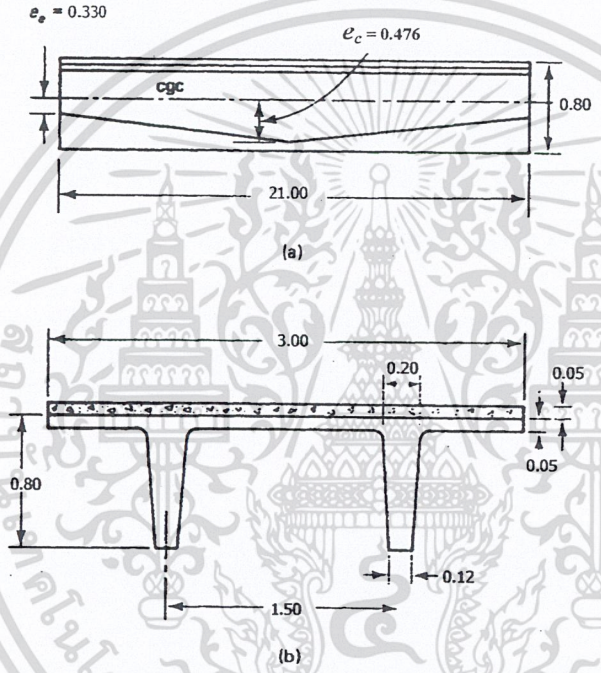
$$BE = \epsilon_c E_{ps}$$

ซึ่ง E_{ps} เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่รวมผลของการเสื่อมลดเนื่องจากการโก่งตัวเพราะการวัดแรงอัด มักจะกระทำหลังจากที่คานได้เกิดการโก่งตัวไปแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่าง 3.8</u> – การเสื่อมลดในคานอัดแรงแบบดึงก่อน

คานรูปทีคู่มวลเบา มีความยาวช่วงเดี่ยวเป็น 21 เมตร อัดแรงแบบดึงก่อนด้วยลวดตีเกลียวแบบมีการคลายแรง เกรด 270 ใช้ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 12 เส้น หักงอลวดที่กลางช่วง โดยมีระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วงเป็น 47.6 ซม. และที่ปลายเป็น 33.0 มม. ให้การก่อสร้างอยู่ในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% จงหาการเสื่อมลดของแรงอัดเนื่องจากน้ำหนักขององค์อาคารเองและเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ที่หน้าตัดวิกฤตซึ่งถือเป็นที่ระยะ 0.40 ของความยาวช่วง โดยพิจารณาที่ขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 – ที่การถ่ายแรง , ขั้นตอนที่ 2 – หลังจากเทคอนกรีตทับหน้า และ ขั้นตอนที่ 3 – สองปีหลังจากเทคอนกรีตทับหน้า



ให้เททับหน้าที่เวลา 30 วัน ด้วยคอนกรีตมวลปกติหนา 5 ซม. และให้เริ่มการถ่ายแรงที่ 18 ชั่วโมงหลังจากการดึงลวด

ให้ใช้ f'_c = 350 กก./ซม.^{2} และ f'_{ci} = 245 กก./ซม.^{2}

และให้คุณสมบัติของคานในรูปข้างบนเป็นดังต่อไปนี้

A_c = 3968 ซม.^{2} , I_c = 2.49 x 10^6 ซม.^{4}, c_b = 55 ซม. , c^t = 25 ซม., S_b = 44 520 ซม.^{3} , S^t = 97 670 ซม.^{3}

w_G (ไม่รวมทับหน้า) = 730 กก./ม., w_{SD} (ทับหน้า 5 ซม.) = 0.05(2400)(3) = 360 กก./ม.

น้ำหนักบรรทุกจร w_L = 200 กก./ม.^{2}

f_{pu} = 18 990 กก./ซม.^{2}, $f_{py} = 0.85f_{pu}$ = 16 065 กก./ซม.^{2},

$f_{pi} = 0.70f_{pu} = 0.82f_{py}$ = 0.82 x $0.85f_{pu} \cong 0.70f_{pu}$ = 13 293 กก./ซม.^{2}, E_{ps} = 1.97(10^6) กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f'_{ci} = 245 กก./ซม.^{2}

E_{ci} = $15\,200\sqrt{245}$ = 237 918 กก./ซม.^{2}

E_c = $15\,200\sqrt{350}$ = 284 366 กก./ซม.^{2}

ขั้นตอนที่ 1 - ขณะถ่ายแรง

(a) *การหดตัวอีลาสติก*

หน้าตัดวิกฤตห่างจากฐานรองรับ = 0.4(21) = 8.4 เมตร

ระยะเยื้องศูนย์ e ที่หน้าตัดวิกฤต = 33 + 0.8(47.6 - 33) = 44.68 ซม.

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคาน M_G ที่ 0.4 ของความยาวช่วง

$$M_G = \frac{w_G L}{2}x - \frac{w_G x^2}{2} = \frac{w_G x}{2}(L-x) = \frac{730(8.4)}{2}(21-8.4) = 38\,631.6 \text{ กก.ม.}$$

$f_{pi} = 0.70 f_{pu}$ = 13 293 กก./ซม.^{2}

สมมติให้การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกและการล้าของลวดเท่ากับ 1260 กก./ซม.^{2}

ดังนั้นหน่วยแรงสุทธิของลวด f_{pi} = 13 293 – 1260 = 12 033 กก./ซม.^{2}

$P_i = A_{ps} f_{pi}$ = 12(0.987)(12 033) = 142 519 กก.

$r^2 = I_c/A_c$ = 2.49(10^6)/3968 = 627.52 ซม.^{2}

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e^2}{r^2}\right)+\frac{M_G e}{I_c} = -\frac{142\,519}{3968}\left(1+\frac{44.68^2}{627.52}\right)+\frac{38\,631.6(100)(44.68)}{2.49(10^6)}$$

= -150.2 + 69.3 = - 80.9 กก./ซม.^{2}

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} = \frac{1.97(10^6)}{237\,918} = 8.28$$

$ES = n f_{cs}$ = 8.28(80.9) = 669.9 กก./ซม.^{2}

ถ้าใช้ f_{pi} = 13 293 กก./ซม.^{2} จะได้ f_{pi} สุทธิ = 13 293 – 669.9 = 12 623.1 กก./ซม.^{2} จะได้

$$f_{cs} = -\frac{12\,623.1}{12\,033}(150.2)+69.3 = -88.3 \text{ กก./ซม.}^2$$

$ES = n f_{cs}$ = 8.28(88.3) = 730.8 กก./ซม.^{2}

เปรียบเทียบกับ 669.9 กก./ซม.^{2} จะแตกต่างกันเพียงร้อยละ 9 ดังนั้นสมมติฐานที่ให้การเสื่อมลดเบื้องต้นเป็นร้อยละ 10 โดยใช้ $P_i \cong 0.9P_J$ จึงเป็นสิ่งที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) *การล้าของลวด*

$f_{py} = 0.85f_{pu} = 16\,065$ กก./ซม.^{2}

$f_{pi} = 0.70f_{pu} = 13\,293$ กก./ซม.^{2} หรืออาจจะใช้ f_{pi} สุทธิ $= 13\,293 - 1260 = 12\,033$ กก./ซม.^{2}

t = 18 ชั่วโมง

$$RE = f_{pi}\left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) = 13\,293\left(\frac{\log 18}{10}\right)\left(\frac{13\,293}{16\,065} - 0.55\right)$$

$= 462.9$ กก./ซม.^{2}

ES + RE = 669.9 + 462.9 = 1132.9 กก./ซม.^{2} ใกล้เคียงกับค่าที่สมมติไว้ในเบื้องต้น 1260 กก./ซม.^{2}

(c) *การคืบของคอนกรีต :* CR = 0

(d) *การหดตัวของคอนกรีต :* SH = 0

ดังนั้นการเสื่อมลดในขั้นตอนที่ 1 = ES + RE + CR + SH = 669.9 + 462.9 + 0 + 0

= 1132.9 กก./ซม.^{2}

แรงดึงในลวดอัดแรง f_{pi} เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 = 13 293 – 1132.9 = 12 160 กก./ซม.^{2}

ได้ $P_i = 12\,160(12)(0.987) = 144\,024$ กก.

<u>ขั้นตอนที่ 2 - จากการถ่ายแรงถึงการเททับหน้า หลังจาก 30 วัน</u>

(a) *การคืบของคอนกรีต :*

$$E_c = 15\,200\sqrt{350} = 284\,366 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} = \frac{1.97(10^6)}{284\,366} = 6.93$$

$f_{cs} = 80.9$ กก./ซม.^{2}

w_{SD} (ทับหน้า 5 ซม. ด้วยคอนกรีตมวลปกติ) $= 0.05(2400)(3) = 360$ กก./ม.

$$M_{SD} = \frac{w_{SD}x}{2}(L - x) = \frac{360(8.4)}{2}(21 - 8.4) = 19\,051.2 \text{ กก.ม.}$$

$$\overline{f}_{csd} = \frac{M_{SD}e}{I_c} = \frac{19\,051.2(100)(44.68)}{2.49(10^6)} = 34.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าระยะเวลา 30 วันจะสิ้นเกินไป สำหรับการหาการเสื่อมลดตามเวลา แต่ในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างนอกเหนือไปจากน้ำหนักของคานและทับหน้า การเสื่อมลดในขั้นตอนนี้ก็จะมีค่าเท่ากับการเสื่อมลดในขั้นที่ 3 ด้วย

สำหรับคอนกรีตมวลเบา ใช้ $K_{CR} = 2.0 \times 80\% = 1.6$ จากสมการที่ 3.12 จะได้การเสื่อมลดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต

$$CR = nK_{CR}(f_{cs} - f_{csd}) = 6.93(1.6)\,(80.9 - 34.2) = 517.8 \text{ กก./ซม.}^2$$

(b) การหดตัวของคอนกรีต:

จากสมการที่ 3.14 การเสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

$$SH = 8.2(10^{-6})\,K_{SH}\,E_{PS}\,(1 - 0.024\frac{V}{S})\,(100 - RH)$$

โดยการประมาณจากหน้าตัดของคานจะได้เส้นรอบรูป $P = 2(300) + 2(5) + 4(75) = 910$ ซม.

$V/S = A/P = 3968/910 = 4.36$, $K_{SH} = 1.0$ สำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน ได้

$$SH = 8.2(10^{-6})(1)(1.97)(10^6)\,[1 - 0.024(4.36)](100 - 70) = 433.9 \text{ กก./ซม.}^2$$

(c) ***การล้าของลวด :***

$t_1 = 18$ ชั่วโมง, $t_2 = 30$ วัน $= 30 \times 24 = 720$ ชั่วโมง

$f_{pi} = 12\,160$ กก./ซม.^{2} จากขั้นตอนที่ 1

$$RE = f_{pi}\left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) = 12\,160\left(\frac{\log 720 - \log 18}{10}\right)\left(\frac{12\,160}{16\,065} - 0.55\right)$$

$= 403.1$ กก./ซม.^{2}

ดังนั้นการเสื่อมลดในขั้นตอนที่ 2 $= CR + SH + RE = 517.8 + 433.9 + 403.1$

$= 1354.8$ กก./ซม.^{2}

หน่วยแรงในลวดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าเป็น

$$f_{SD} = n\,\overline{f}_{csd} = 6.93(34.2) = 237.0 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นแรงดึงในลวดอัดแรง เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 2

f_{pe} = แรงดึงเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 – การเสื่อมลด + f_{SD}

$= 12\,160.0 - 1354.8 + 237.0 = 11\,042.2$ กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 - สองปีหลังจากเททับหน้า

จะถือว่าการเสื่อมลดเนื่องการคืบและการหดตัวหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มไม่มากนักจากขั้นตอนที่ 2 เพราะไม่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างเพิ่มเติม ดังนั้นจะถือว่า

f_{pe} = 11 042.2 กก./ซม.^{2}

t_1 = 30 วัน = 720 ชั่วโมง

t_2 = 2 ปี x 365 x 24 = 17520 ชั่วโมง

การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของลวด

$$RE = 11\,042.2\left(\frac{\log 17\,520 - \log 720}{10}\right)\left(\frac{11\,042.2}{16\,065} - 0.55\right) = 210.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นแรงดึงในลวด f_{pe} ที่ระยะสุดท้ายของขั้นตอนที่ 3 = 11 042.2 – 210.2 = 10 832.0 กก./ซม.^{2}

สรุปหน่วยแรง

หน่วยแรงที่ขั้นตอนต่าง ๆ	หน่วยแรงในลวด, กก./ซม.^{2}	ร้อยละ
หลังการดึง ($0.70f_{pu}$)	13 293.0	100.0
เสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติก	- 669.9	- 5.0
เสื่อมลดเนื่องจากคืบของคอนกรีต	- 517.8	- 3.9
เสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต	- 433.9	- 3.3
เสื่อมลดเนื่องจากการล้าของลวด (462.9 + 403.1 + 210.2)	- 1076.2	- 8.1
เพิ่มเนื่องจากคอนกรีตทับหน้า	237.0	1.8
หน่วยแรงสุทธิ f_{pe}	10 832.3	81.5

การเสื่อมลดทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 18.5 สำหรับคานอัดแรงแบบดึงก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3.9 – การเสื่อมลดในคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 3.8 โดยถือว่าเป็นคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง สมมติให้การเคลื่อนตัวเข้าที่ของสมอยึดเป็นระยะ 0.635 ซม. ให้ลวดทุกเส้นวางอยู่ในท่ออ่อนและดึงพร้อมกัน และให้ถือว่าแรงดึงจากเครื่องดึงลวดก่อนการเสื่อมลดจากความเสียดทานและการเข้าที่ของสมอยึดเป็น f_{pi} = 13 293 กก./ซม.^{2} (ใช้ $f_{pJ} = f_{pi}$ จากสมการ 3.1d)

(a) ***การเข้าที่ของสมอยึด***

Δ_A = 0.635 ซม. , L = 21 ม.

จากสมการที่ 3.24 การเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดเป็น

$$AN = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} = \frac{0.635}{21(100)}(1.97)(10^6) = 595.7 \text{ กก./ซม.}^2$$

(b) ***การหดตัวอีลาสติก***

เนื่องจากลวดทุกเส้นถูกดึงพร้อมกัน การหดตัวจะเกิดพร้อมกับการดึง จึงไม่เกิดการเสื่อมลด ES = 0

(c) ***การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน***

สมมติให้แนวลวดเป็นรูปพาราโบล่า ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนของวงกลม จากสมการที่ 3.23

$$\alpha = \frac{8y}{x} = \frac{8(47.6-33)}{21(100)} = 0.0556 \text{ เรเดียน}$$

จากตารางที่ 3.7 ใช้ K = 0.0033, μ = 0.25 และ f_{pi} = 13 293 กก./ซม.^{2}

จากสมการที่ 3.22 การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานเป็น

$$FR = f_{pi}(\mu\alpha + KL) = 13\,293[(0.25)(0.0556) + (0.0033)(21)] = 1106 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงที่เหลือในลวดอัดแรงหลังจากการเสื่อมลดเบื้องต้นเป็น

$$f_{pi} = 13\,293 - 595.7 - 1106 = 11\,591.3 \text{ กก./ซม.}^2$$

ซึ่งจะได้แรงอัดสุทธิเป็น

$$P_i = 11\,591.3(12)(0.987) = 137\,287.4 \text{ กก.}$$

เปรียบเทียบกับ P_i = 144 024 กก./ซม.^{2} ในคานอัดแรงแบบดึงก่อนในตัวอย่างที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 - ขณะถ่ายแรง

(a) การเข้าที่ของสมอยึด และแรงเสียดทาน

การเสื่อมลด = 595.7 + 1106 = 1701.7 กก./ซม.^{2} ได้หน่วยแรงสุทธิ = 11 591.3 กก./ซม.^{2}

(b) การล้าของลวดอัดแรง

$$RE = f_{pi}\left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) = 11\,591.3\left(\frac{\log 18}{10}\right)\left(\frac{11\,591.3}{16\,065} - 0.55\right)$$

$$= 249.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

(c) การคืบของคอนกรีต, CR = 0

(d) การหดตัวของคอนกรีต, SH = 0

แรงดึงในลวดอัดแรง f_{pi} เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 = 11 591.3 – 249.6 = 11 341.7 กก./ซม.^{2}

ขั้นตอนที่ 2 - จากการถ่ายแรงถึงการเททับหน้า หลังจาก 30 วัน

(a) การคืบของคอนกรีต

$$P_i = 11\,341.7(12)(0.987) = 134\,331 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e^2}{r^2}\right)+\frac{M_G e}{I_c} = -\frac{134\,331}{3968}\left(1+\frac{44.68^2}{627.52}\right)+\frac{38\,631.6(100)(44.68)}{2.49(10^6)}$$

$$= -141.6 + 69.3 = -72.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$E_c = 15\,200\sqrt{350} = 284\,366 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} = \frac{1.97(10^6)}{284\,366} = 6.93$$

w_{SD} (ทับหน้า 5 ซม. ด้วยคอนกรีตมวลปกติ) = 0.05(2400)(3) = 360 กก./ม.

$$M_{SD} = \frac{w_{SD}x}{2}(L-x) = \frac{360(8.4)}{2}(21-8.4) = 19\,051.2 \text{ กก.ม.}$$

$$\overline{f}_{csd} = \frac{M_{SD}e}{I_c} = \frac{19\,051.2(100)(44.68)}{2.49(10^6)} = 34.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นการเสื่อมลดเนื่องจากการคืบเป็น

$$CR = nK_{CR}(f_{cs} - f_{csd}) = 6.93(1.6)(72.6 - 34.2) = 425.8 \text{ กก./ซม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) *การหดตัว*

จากตัวอย่างที่ 3.8 ได้ค่าเสื่อมลด SH สำหรับคานอัดแรงแบบดึงก่อนซึ่งใช้ K_{SH} = 1แต่ในกรณีของคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง จากตารางที่ 3.6 เมื่ออายุ 30 วัน จะได้ K_{SH} = 0.58 และ

$$SH = 433.9 \times 0.58 = 251.7 \text{ กก./ซม.}^2$$

(c) *การล้าของลวด :*

t_1 = 18 ชั่วโมง, t_2 = 30 วัน = 30 x 24 = 720 ชั่วโมง

f_{pi} = 11 341.7 กก./ซม.^{2} จากขั้นตอนที่ 1

$$RE = f_{pi}\left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10}\right)\left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55\right) = 11341.7\left(\frac{\log 720 - \log 18}{10}\right)\left(\frac{11341.7}{16065} - 0.55\right)$$

$$= 283.4 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นการเสื่อมลดในขั้นตอนที่ 2 = CR + SH + RE = 425.8 + 251.7 + 283.4

$$= 960.9 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงในลวดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าเป็น

$$f_{SD} = n\overline{f}_{csd} = 6.93(34.2) = 237.0 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นแรงดึงในลวดอัดแรงเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 2

f_{pe} = แรงดึงเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 1 – การเสื่อมลด + f_{SD}

=11 341.7 – 960.9 + 237.0 = 10 617.8 กก./ซม.^{2}

<u>ขั้นตอนที่ 3 - สองปีหลังจากเททับหน้า</u>

จะถือว่าการเสื่อมลดเนื่องการคืบและการหดตัวหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มไม่มากนักจากขั้นตอนที่ 2 เพราะไม่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างเพิ่มเติม ดังนั้นจะถือว่า

f_{pe} = 10 617.8 กก./ซม.^{2}

t_1 = 30 วัน = 720 ชั่วโมง, t_2 = 2 ปี x 365 x 24 = 17520 ชั่วโมง

การเสื่อมลดเนื่องจากการล้าของลวด

$$RE = 10617.8\left(\frac{\log 17520 - \log 720}{10}\right)\left(\frac{10617.8}{16065} - 0.55\right) = 163.3 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้นแรงดึงในลวด f_{pe} ที่ระยะสุดท้ายของขั้นตอนที่ 3 = 10 617.8 – 163.3 = 10 454.5 กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปหน่วยแรง

หน่วยแรงที่ขั้นตอนต่าง ๆ	หน่วยแรงในลวด, กก./ซม.^{2}	ร้อยละ
หลังการดึง ($0.70f_{pu}$)	13 293.0	100.0
เสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวอีลาสติก	0.0	-
เสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด*	- 595.7	- 4.5
เสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทาน*	- 1106.0	- 8.3
เสื่อมลดเนื่องจากคืบของคอนกรีต	- 425.8	- 3.2
เสื่อมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต	- 251.7	- 1.9
เสื่อมลดเนื่องจากการล้าของลวด (249.6 + 283.4 + 163.3)	- 696.3	- 5.2
เพิ่มเนื่องจากคอนกรีตทับหน้า	237.0	1.8
หน่วยแรงสุทธิ f_{pe}	10 454.5	78.7

การเสื่อมลดทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 21.3 สำหรับคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง

* แสดงหน่วยแรงทั้งสองไว้ในตารางด้วย เพราะกำหนดแรงดึงเบื้องต้นไว้เป็น $0.70f_{pu}$ ในความเป็นจริงจะใช้การดึงหน่วยแรงให้สูงกว่านี้ เผื่อไว้เพื่อลบล้างการเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดและเนื่องจากแรงเสียดทาน

<u>ตัวอย่างที่ 3.10</u> – การเสื่อมลดโดยใช้ค่ารวม

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 3.8 และ 3.9 โดยวิธีค่ารวมและจงเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

สำหรับการอัดแรงแบบดึงก่อน จากตารางที่ 3.1 ได้ผลรวมของการเสื่อมลดเป็น 3150 กก./ซม.^{2} ดังนั้นหน่วยแรงดึงสุทธิ f_{pe} = 13 293 - 3150 = 10 143 กก./ซม.^{2}

จากตัวอย่างที่ 3.8, f_{pe} = 10 832.3 กก./ซม.^{2} ต่างกัน (10 832.3 – 10 143)/13 293 = 5.2 %

สำหรับการอัดแรงแบบดึงทีหลัง จากตารางที่ 3.2 สำหรับลวดตีเกลียวที่มีการคลายแรง ได้ผลรวมของการเสื่อมลดเป็น 2450 กก./ซม.^{2} ดังนั้นหน่วยแรงดึงสุทธิ f_{pe} = 13 293 - 2450 = 10 843 กก./ซม.^{2}

จากตัวอย่างที่ 3.9, f_{pe} = 10 454.5 กก./ซม.^{2} ต่างกัน (10 843 – 10 454.5)/13 293 = 2.9 %

จะเห็นว่าในทั้งสองแบบของการอัดแรง การแยกคิดโดยละเอียดให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างมากนักจากการหาค่ารวมโดยประมาณ ดังนั้นในสภาวะปกติทั่วไป ทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4

การออกแบบรับแรงดัด

4.1 คำนำ

โดยทั่วไปหน่วยแรงดัดซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำภายนอก จะเป็นตัวกำหนดขนาดหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงทั้งในแบบอัดแรงแบบดึงก่อนหรือดึงทีหลัง การออกแบบจะเริ่มโดยการเลือกหน้าตัดเบื้องต้นขึ้นมาก่อนแล้วทำการปรับแต่งด้วยวิธีลองผิดลองถูก จนกระทั่งได้หน้าตัดสุดท้าย พร้อมทั้งขนาดและแนวของเหล็กเสริมอัดแรง หน้าตัดสุดท้ายจะต้องผ่านข้อกำหนดในด้านหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดัดทั้งในคอนกรีตและในเหล็กเสริม และจะต้องผ่านข้อกำหนดในด้านของ แรงเฉือน แรงบิด การแอ่นตัว และการแตกร้าว

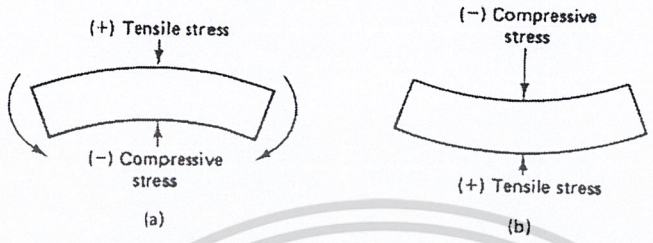
ถึงแม้ว่าข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ แต่ในความเป็นจริงการออกแบบจะควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ หน้าตัดเบื้องต้นที่ออกแบบมา จะถูกวิเคราะห์ว่าสามารถรับแรงอัดและน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้หรือไม่ ดังนั้นความเข้าใจในพื้นฐานของการวิเคราะห์จะช่วยทำให้การออกแบบง่ายขึ้น จากบทที่ 1 จะเห็นว่าความรู้ในด้านพื้นฐานกลศาสตร์ของวัสดุ พื้นฐานของความสมดุลของแรงภายใน และหลักการของ Superposition เป็นสิ่งที่จะต้องในทุกขั้นตอนของการรับน้ำหนัก

การออกแบบรับแรงดัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะเลือกหน้าตัดโดยใช้ขอบเขตของสภาวะหน่วยแรงที่จุดวิบัติเป็นตัวกำหนด ควบคู่ไปกับข้อกำหนดในด้านการใช้งาน กำลังรับแรงเฉือน และการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ในระหว่างที่การออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง จะทำการตรวจสอบเพิ่มเติมที่สภาวะการถ่ายแรง สภาวะขอบเขตของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน และสภาวะขอบเขตที่จุดวิบัติ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจะเป็นตัวระบุถึงกำลังสำรองที่เผื่อไว้เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกเกิน การตรวจสอบทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมานี้ จะสร้างความมั่นใจว่าการแตกร้าวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานจะมีค่าน้อยมาก และระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นตามเวลาก็น้อยกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ

บทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อหลักสำคัญในการออกแบบรับแรงดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานและตรวจสอบด้วยการออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยใช้หลักการและวิธีต่าง ๆ ในบทที่ 1 เป็นพื้นฐานและขยายความไปถึงขั้นตอนในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง โดยรวมผลของการเสื่อมลดแรงอัดตามบทที่ 3 โดยจะเริ่มจากการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบหน้าตัดเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ตามด้วยการวิเคราะห์หากำลังระบุ M_n ของหน้าตัดนั้นภายใต้สภาวะวิบัติ หนังสือเล่มนี้จะใช้เครื่องหมาย (-) แสดงถึงหน่วยแรงอัดและเครื่องหมาย (+) แสดงถึงหน่วยแรงดึงในหน้าตัดของคอนกรีต การโก่งตัวขึ้นแสดงถึงโมเมนต์ลบ และแอ่นตัวลงแสดงถึงโมเมนต์บวก ดังแสดงในรูปที่ 4.1



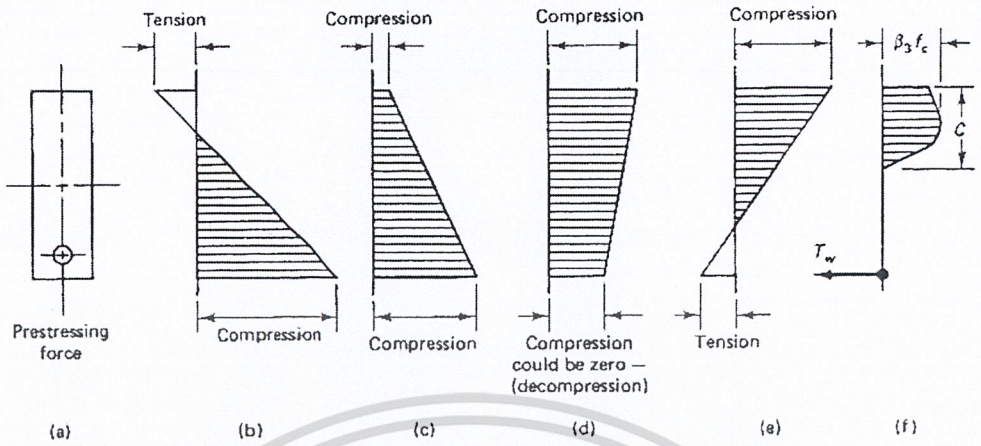
รูปที่ 4.1 – ข้อกำหนดของหน่วยแรงดัดและโมเมนต์ (a) โมเมนต์ลบ (b) โมเมนต์บวก

สิ่งที่แตกต่างกับการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็คือในการที่น้ำหนักบรรทุกคงที่ภายนอกและน้ำหนักบรรทุกจร จะกระทำบนองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงเป็นขั้นตอนและกระทำเมื่อกำลังของคอนกรีตแตกต่างกัน จะสรุปขั้นตอนของน้ำหนักที่กระทำได้ดังต่อไปนี้

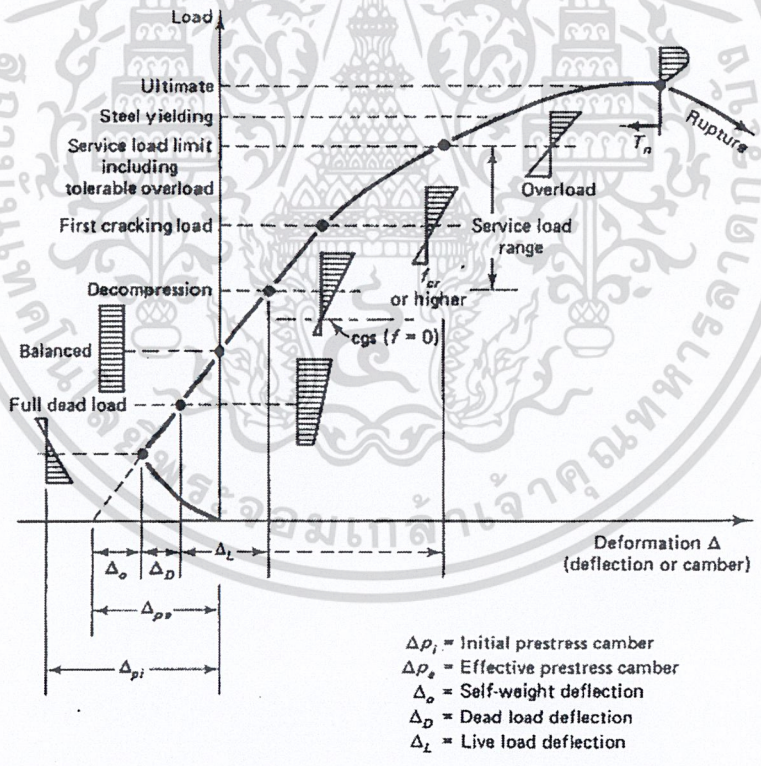
- ดึงด้วยแรงอัดเบื้องต้น P_i และเมื่อถ่ายแรง แรงจะถูกส่งผ่านจากเหล็กเสริมอัดแรงไปยังคอนกรีต
- น้ำหนักขององค์อาคาร w_D กระทำร่วมกับแรงอัดเบื้องต้น โดยถือว่าองค์อาคารมีการรองรับแบบคานช่วงเดี่ยว
- น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม w_{SD} ซึ่งรวมถึงน้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าในองค์อาคารเชิงประกอบ
- การเสื่อมลดเบื้องต้น ทำให้แรงอัดเหลือเป็น P_{eo}
- น้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด พร้อมกับเกิดการเสื่อมลดตามระยะเวลา ซึ่งได้แก่ การคืบ การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และการคลายแรงของเหล็กเสริม ทำให้เหลือแรงอัดสุทธิเป็น P_e
- น้ำหนักบรรทุกเกิน (ถ้ามี) กระทำเพิ่มไปจนถึงสภาวะขีดจำกัดของการวิบัติ

รูปที่ 4.2 แสดงสภาวะทั่วไปของน้ำหนักบรรทุกพร้อมกับการกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดวิกฤติภายใต้สภาวะนั้น ในระหว่างที่รูปที่ 4.3 แสดงการยกตัวและการแอ่นตัวภายใต้สภาวะต่าง ๆ เริ่มจากภายใต้น้ำหนักขององค์อาคารเอง ไปจนถึงสภาวะวิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 - การกระจายหน่วยแรงดัดภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของน้ำหนักบรรทุก: (a) หน้าตัดคาน (b) แรงอัดเบื้องต้น (c) น้ำหนักตัวเองและแรงอัดประสิทธิผล (d) น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและแรงอัดประสิทธิผล (e) น้ำหนักบรรทุกใช้งานเต็มที่และแรงอัดประสิทธิผล (f) หน่วยแรงที่จุดวิบัติ



รูปที่ 4.3 – ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะยกตัวหรือแอ่นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเลือกหน้าตัด

4.2.1 แนวทางทั่วไป

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน จะถือว่าคานมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นและสม่ำเสมอ ทั้งนี้มาจากสมมติฐานที่ว่าแรงอัดจะปิดรอยร้าวทั้งหมดที่อาจจะเกิดขึ้นในหน้าตัด ทำให้ถือได้ว่าเป็นหน้าตัดที่ไม่มีการแตกร้าว ดังนั้นการวิเคราะห์หาหน่วยแรงในคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้สภาวะต่าง ๆ จะไม่แตกต่างไปจากการวิเคราะห์หาหน่วยแรงในคานเหล็ก หรือที่ถูกต้องก็คือ เสาเหล็ก เพราะว่าจะมีแรงตามแนวแกนในหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรงตลอดเวลา โดยที่อาจจะมีหรือไม่มีโมเมนต์ก็ได้

จากบทที่ 1 จะเห็นประโยชน์ของการวางเหล็กเสริมอัดแรงให้มีระยะเยื้องศูนย์ที่หน้าตัดวิกฤต เช่น ที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยว และบริเวณฐานรองรับของคานต่อเนื่อง และจะเห็นว่าหน้าตัดแบบมีปีกจะเหนือกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยมธรรมดา ในด้านของการใช้เนื้อคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ และในการจัดวางเนื้อคอนกรีตส่วนใหญ่ไว้ในบริเวณที่จำเป็นเพื่อรับแรงอัด

สมการที่ 4.1 4.2 และ 4.3 เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงบนหน้าตัด หลังจากที่ได้เลือกหน้าตัดของคานมาแล้ว แต่ถ้าจะใช้สมการเหล่านี้ในการออกแบบ ก็จะต้องปรับสมการทั้งสามใหม่ ให้มีตัวแปรที่จะหาเป็นพื้นที่หน้าตัด รัศมีไจเรชั่น และ โมดูลัสหน้าตัด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงที่ยอมให้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนหน้าตัดตามข้อกำหนดของมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งสุดท้ายก็จะได้หน้าตัดเล็กสุดที่รับน้ำหนักบรรทุกได้ทุกสภาวะหลังจากการเสื่อมลดของแรงอัด

4.2.2 โมดูลัสหน้าตัดที่น้อยที่สุด

การออกแบบหรือการเลือกหน้าตัด จะได้จากการหาค่าโมดูลัสหน้าตัดที่น้อยที่สุด S_b และ S^t ถ้าให้

f_{ci} = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในคอนกรีต ทันทีหลังจากการถ่ายแรงและก่อนการเสื่อมลดแรงอัด

$= 0.60 f'_{ci}$

f_{ti} = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในคอนกรีต ทันทีหลังจากการถ่ายแรงและก่อนการเสื่อมลดแรงอัด

$= 0.8\sqrt{f'_{ci}}$ หรือ $1.60\sqrt{f'_{ci}}$ สำหรับองค์อาคารช่วงเดี่ยว

f_c = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในคอนกรีต หลังจากการเสื่อมลดแรงอัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

$= 0.45 f_c'$ หรือ $0.60 f_c'$ เมื่อมาตรฐานการออกแบบยอมให้

f_t = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในคอนกรีต หลังจากการเสื่อมลดแรงแรงอัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= 1.60\sqrt{f_c'}$ หรือ $3.20\sqrt{f_c'}$ สำหรับระบบทางเดียว ถ้าระยะแอ่นตัวไม่เกินข้อกำหนด

ดังนั้น หน่วยแรงจริงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะต้องไม่เกินค่าในข้อกำหนดข้างบน

เมื่อใช้หน้าตัดที่ไม่สมมาตรและไม่มีการแตกร้าว จะใช้สมการของหน่วยแรงจากหัวข้อ 1.3 สำหรับสภาวะของน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ได้ดังนี้

- หน่วยแรงขณะถ่ายแรง

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \le f_{ti} \qquad (4.1a)$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \le f_{ci} \qquad (4.1b)$$

โดยที่ P_i เป็นองค์ประกอบในแนวอนของแรงอัดเบื้องต้น ซึ่งจะยอมให้ค่าของแรงอัดเบื้องต้น เพราะมีค่าใกล้เคียงกัน

- หน่วยแรงประสิทธิผลหลังการเสื่อมลดของแรงอัด

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \le f_t \qquad (4.2a)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \le f_c \qquad (4.2b)$$

- หน่วยแรงน้ำหนักบรรทุกใช้งานสุดท้าย

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t} \le f_c \qquad (4.3a)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \le f_t \qquad (4.3b)$$

โดยที่ $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$

P_i = แรงอัดเบื้องต้น

P_e = แรงอัดประสิทธิผลหลังการเสื่อมลดแรงอัด

e = ระยะเยื้องศูนย์ของแนวเหล็กเสริมอัดแรงจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีต, cgc

r^2 = รัศมีไจเรชันยกกำลังสอง

S^t / S_b = โมดูลัสหน้าตัดที่ผิวบน/ผิวล่างของหน้าตัดคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะการลดแรงอัด (Decompression ในรูปที่ 4.3) เกิดจากการที่เหล็กเสริมอัดแรงเกิดการยืดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น จากสภาวะภายใต้แรงอัดประสิทธิผล P_e กระทำเพียงอย่างเดียว ไปถึงสภาวะภายใต้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนทำให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดลดลงจนถึงศูนย์ ที่สภาวะนี้ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

$$f_{decomp} = \frac{P_e}{A_c}(1+\frac{e^2}{r^2}) \qquad (4.3c)$$

สมการข้างบนสร้างจากสมมติฐานที่ว่า เหล็กเสริมอัดแรงมีการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตล้อมรอบจนทำให้การเพิ่มของหน่วยแรงในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับการลดของหน่วยแรงในคอนกรีต

4.2.2.1 คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงไม่คงที่

ในกรณีนี้ แนวเหล็กเสริมอาจจะเป็นเส้นโค้งหรือหักงอบางตำแหน่ง ระยะเยื้องศูนย์สูงสุดมักจะอยู่ที่ระยะกึ่งกลางช่วงสำหรับคานช่วงเดี่ยว ถ้าสมมติให้แรงอัดประสิทธิผล $P_e = \gamma P_i$ โดยที่ γ เป็นอัตราส่วนของแรงอัดที่เหลือ ดังนั้นการเสื่อมลดแรงอัดมีค่าเป็น

$$P_i - P_e = (1-\gamma)P_i \qquad (a)$$

และถ้าหน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงนี้หลังจากการเสื่อมลดจากสมการ 4.1a และ 4.1b จะได้เป็น

$$\Delta f^t = (1-\gamma)(f_{ti} + \frac{M_D}{S^t}) \qquad (b)$$

$$\Delta f_b = (1-\gamma)(-f_{ci} + \frac{M_D}{S_b}) \qquad (c)$$

จากรูปที่ 4.4(a) ภายใต้โมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม M_{SD} และโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกจร M_L จะได้หน่วยแรงสุทธิที่ผิวบนเป็น

$$f^t_n = f_{ti} - \Delta f^t - f_c$$

หรือ $$f^t_n = \gamma f_{ti} - (1-\gamma)\frac{M_D}{S^t} - f_c \qquad (d)$$

และหน่วยแรงสุทธิที่ผิวล่างเป็น

$$f_{bn} = f_t - f_{ci} - \Delta f_b$$

หรือ $$f_{bn} = f_t - \gamma f_{ci} - (1-\gamma)\frac{M_D}{S_b} \qquad (e)$$

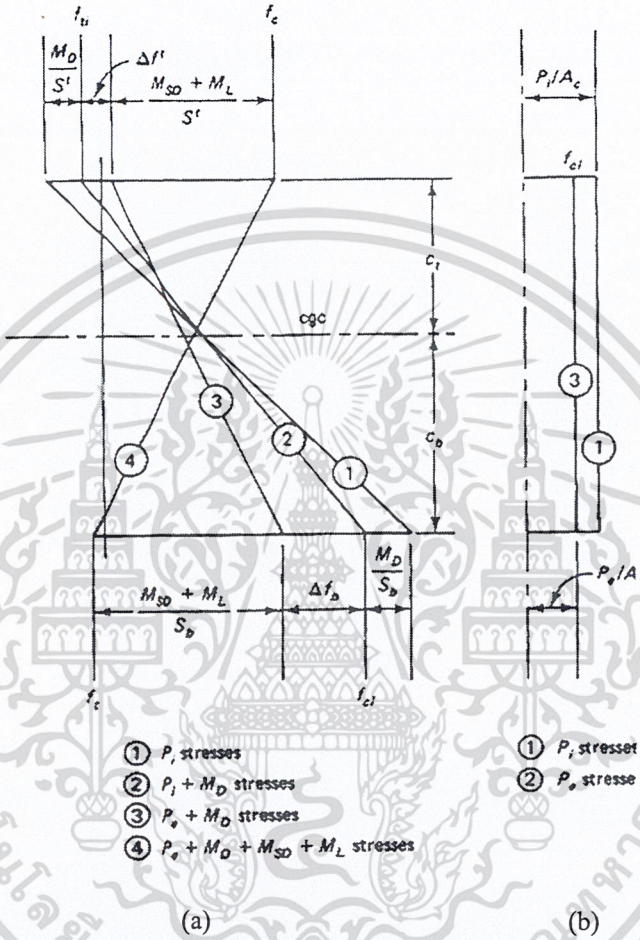
จากสมการ (d) และ (e) จะเลือกหน้าตัดให้มีค่าโมดูลัสของหน้าตัดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S^t \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c} \quad (4.4a)$$

และ

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}} \quad (4.4b)$$



รูปที่ 4.4 (a) – หน่วยแรงสูงสุดในคานเสริมด้วยเหล็กแนวโค้งหรือหักงอ: (a) หน้าตัดวิกฤต เช่น ที่กลางช่วง (b) บริเวณฐานรองรับในคานช่วงเดี่ยว ($e_e = 0$ แนวเหล็กเสริมอยู่ในตำแหน่ง cgc)

ระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องการของเหล็กอัดแรงที่หน้าตัดวิกฤต เช่น ที่กลางช่วง

$$e_c = (f_{ci} - \bar{f}_{ci})\frac{S^t}{P_i} + \frac{M_D}{P_i} \quad (4.4c)$$

โดยที่ $\bar{f}_{ci}$ เป็นหน่วยแรงที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีตขณะถ่ายแรง ดังนั้น $P_i = \bar{f}_{ci} A_c$

จะได้

$$\bar{f}_{ci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h}(f_{ti} - f_{ci}) \quad (4.4d)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงคงที่

เป็นคานซึ่งมีเหล็กเสริมอัดแรงวางในแนวตรง จะพบในคานสำเร็จรูปช่วงเดี่ยว ระยะเยื้องศูนย์เหนือฐานรองรับ จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงที่ผิวบน หน่วยแรงนี้จะคงค่าเดิมถึงแม้จะมีโมเมนต์เพิ่ม M_D + M_{SD} + M_L กระทำแล้วก็ตาม ส่งผลให้เลือกใช้ระยะเยื้องศูนย์ในคานประเภทนี้ได้ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับคานในหัวข้อที่แล้ว ทำให้หน้าตัดวิกฤตเพื่อการออกแบบในคานประเภทนี้ กลายเป็นหน้าตัดเหนือฐานรองรับ รูปที่ 4.4(b) แสดงการกระจายหน่วยแรงเหนือฐานรองรับ ดังนั้น

$$\Delta f^{t} = (1-\gamma)(f_{ti}) \qquad \text{(a')}$$

และ $$\Delta f_{b} = (1-\gamma)(-f_{ci}) \qquad \text{(b')}$$

หน่วยแรงสุทธิที่ผิวบน ภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งานหลังการเสื่อมลดแรงอัด

$$f^{t}_{n} = f_{ti} - \Delta f^{t} - f_{c}$$

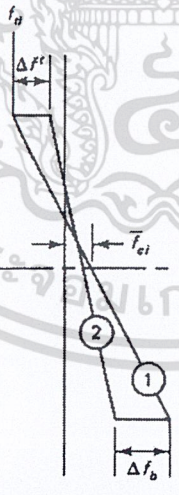
หรือ $$f^{t}_{n} = \gamma f_{ti} - f_{cs} \qquad \text{(c')}$$

โดยที่ f_{cs} เป็นหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังนั้นจะหาหน่วยแรงสุทธิได้เป็น

$$f_{bn} = f_{t} - f_{ci} - \Delta f_{b}$$

หรือ $$f_{bn} = f_{t} - \gamma f_{ci} \qquad \text{(d')}$$

จากสมการ (c') และ (d') จะเลือกหน้าตัดให้มีค่าโมดูลัสของหน้าตัดได้ดังนี้



(1) P_i stresses
(2) P_e stresses

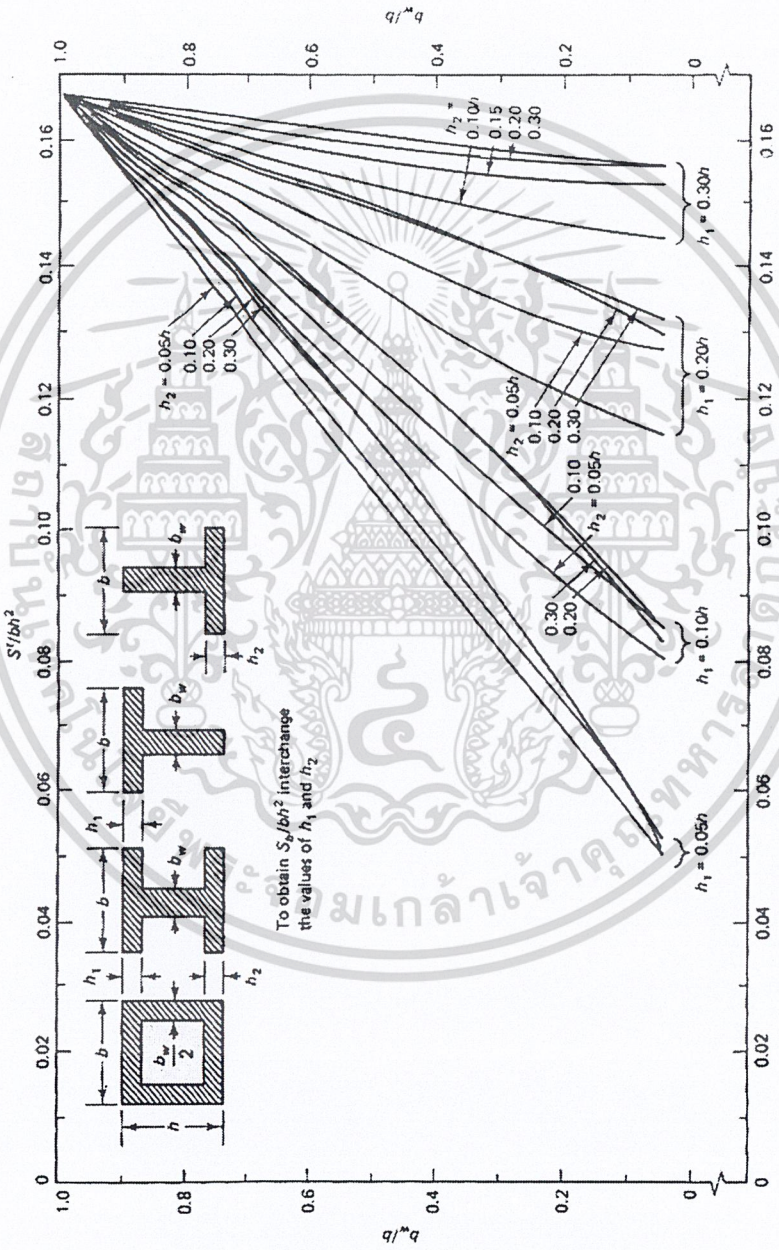
รูปที่ 4.4 (b) - หน่วยแรงสูงสุดบนหน้าตัดเหนือฐานรองรับของคานซึ่งมีเหล็กเสริมในแนวตรง (การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัดที่กลางช่วงจะเหมือนกับในรูปที่ 4.4 a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S^t \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c} \quad (4.5a)$$

และ $$S_b \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}} \quad (4.5b)$$

ระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องการที่หน้าตัดวิกฤต เช่น ที่ฐานรองรับ ซึ่งสอดคล้องกับหน้าตัดที่ได้จากสมการที่ 4.5a และ 4.5b $e_e = (f_{ti} - \bar{f}_{ci})\frac{S^t}{P_i}$ (4.5 c)



รูปที่ 4.5 - โมดูลัสหน้าตัดของรูปกล่องและรูปแบบมีปีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4.1 – การออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน สำหรับคานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงไม่คงที่

ใช้มาตรฐานการออกแบบ ACI318 ในการหาหน่วยแรงที่ยอมให้ ออกแบบคานช่วงเดี่ยวรูปตัวทีคู่เสริมเหล็กแบบหักงอรองรับลานจอดรถโดยมีความยาวช่วงเท่ากับ 18 ม. ให้น้ำหนักบรรทุกใช้งานเพิ่มเติมเป็น 1650 กก./ ม. และน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมเป็น 150 กก./ ม. ไม่ต้องมีคอนกรีตทับหน้า สมมติว่าคานทำจากคอนกรีตน้ำหนักปกติ f_c' = 350 กก./ซม.^{2} และกำลังของคอนกรีตที่ถ่ายแรง f_{ci}' มีค่าเป็นร้อยละ 75 ของกำลังที่ทดสอบจากแท่งทรงกระบอกตัวอย่าง สมมติให้การเสื่อมลดแรงอัดระยะยาวเป็นร้อยละ 18 ของแรงอัดเบื้องต้น ให้ f_{pu} = 18 620 กก./ ซม.^{2} สำหรับลวดตีเกลียวคลายหน่วยแรง และ $f_t = 3.20\sqrt{f_c'}$

$$\gamma = 100 - 18 = 82\ \%$$

$$f_{ci}' = 0.75\,(350) = 262.5 \text{ กก./ซม.}^2$$

จากหัวข้อที่ 4.2.2: $f_{ci} = 0.6f'_{ci} = 157.5$ กก./ซม.^{2} และ $f_c = 0.45f'_c = 157.5$ กก./ซม.^{2}

$$f_{ti} = 0.8\sqrt{f_{ci}'} = 0.8\sqrt{262.5} = 12.96 \text{ กก./ซม.}^2$$

ใช้ $f_t = 3.20\sqrt{f_c'} = 59.87$ กก./ซม.^{2} เป็นหน่วยแรงดึงสูงสุด และสมมติให้คานหนัก 1500 กก./ม. ดังนั้น โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวมันเองมีค่า

$$M_D = \frac{wl^2}{8} = \frac{1500(18)^2}{8} = 60\,750 \quad \text{กก.ม.}$$

และ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักจร

$$M_{SD} + M_L = \frac{(1650+150)(18)^2}{8} = 72\,900 \quad \text{กก.ม.}$$

เนื่องจากแนวเสริมเหล็กเป็นแบบหักงอ หน้าตัดวิกฤตจะอยู่ในบริเวณกลางช่วง ซึ่งโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมมีค่าสูงสุด ในหลายกรณีอาจให้หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ระยะ 0.4L จากฐานรองรับ โดยที่ L เป็นความยาวช่วง จากสมการ 4.4a และ b

$$S^t \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c}$$

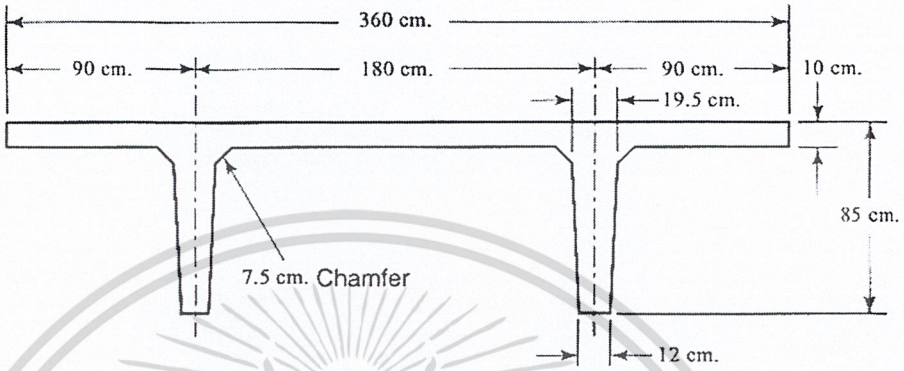
$$\geq \frac{[(1-0.82)60\,750 + 72\,900](100)}{0.82(12.96)+157.5} = 49\,864 \text{ ซม.}^3$$

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}}$$

$$\geq \frac{[(1-0.82)60\,750 + 72\,900](100)}{59.87 + (0.82)(157.5)} = 44\,352 \text{ ซม.}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคู่มือการออกแบบของ PCI เลือกคานรูปทีคู่แบบ 12 DT 34 168-D1 (กว้าง 12 ฟุต ลึก 34 นิ้ว เสริมด้วยลวดตีเกลียวขนาด 8/16 นิ้ว จำนวน 16 เส้น งอหนึ่งตำแหน่ง) เพราะว่ามีค่า S_b ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ จะได้คุณสมบัติหน้าตัดที่เลือกดังนี้



A_c = 6310 ซม.^{2} c_t = 21 ซม.

I_c = 3 582 587 ซม.^{4} c_b = 64 ซม.

$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = 567.74$ ซม.^{2} e_c = 56 ซม.

S^t = 171 376 ซม.^{3} e_e = 32 ซม.

S_b = 54 733 ซม.^{3} w_D = 1516 กก./ม.

V/S = 6.07 ซม.

ออกแบบลวดเกลียว และตรวจสอบหน่วยแรง จากคุณสมบัติข้างบน จะเห็นว่าน้ำหนักตัวคานเองที่สมมติขึ้นในตอนแรกมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ดังนั้นใช้

$M_D = \frac{1516}{1500}(60\,750) = 61\,398$ กก.ม.

$f_{pi} = 0.70(18\,620) = 13\,034$ กก./ซม.^{2}

$f_{pe} = 0.82 f_{pi} = 0.82(13\,034) = 10\,688$ กก./ซม.^{2}

(a) วิเคราะห์หน่วยแรงขณะถ่ายแรง จากสมการ 4.1a

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \le f_{ti} = 12.96 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้น
$$12.96 = -\frac{P_i}{6310}\left(1 - \frac{56\times 21}{567.74}\right) - \frac{61\,398(100)}{171\,376}$$

$$P_i = 287\,335 \text{ กก.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการจำนวนเหล็กอัดแรง = $\frac{287\,335}{13\,034(0.99)}$ = 22 เมื่อใช้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.7 มม.

ลองใช้ลวดเกลียวอัดแรงสำหรับหน้าตัดมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 16 เส้น

A_{ps} = 16 x 0.99 = 15.84 ซม.^{2}

P_i = 15.84 x 13 034 = 206 458.56 กก.

P_e = 15.84 x 10 688 = 169 297.92 กก.

(b) วิเคราะห์หน่วยแรงที่กลางช่วงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

P_e = 169 297.92 กก.

$M_{SD} = \frac{150(18)^2}{8}$ = 6075 กก.ม.

$M_L = \frac{1650(18)^2}{8}$ = 66 825 กก.ม.

โมเมนต์รวม $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$ = 60 750 + 72 900

= 133 650 กก.ม.

จากสมการ 4.3a

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t}$$

$$= -\frac{169\,297.92}{6310}\left(1-\frac{56\times 21}{567.74}\right) - \frac{133\,650(100)}{171\,376}$$

$$= +28.75 - 77.99$$

$$= -49.24 \text{ กก./ซม.}^2 < f_c = -157.5 \text{ กก./ซม.}^2$$ ใช้ได้

จากสมการ 4.3b

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b}$$

$$= -\frac{169\,297.92}{6310}\left(1+\frac{56\times 64}{567.74}\right) + \frac{133\,650(100)}{54\,733}$$

$$= -196.20 + 244.19$$

$$= +47.99 \text{ กก./ซม.}^2 < f_t = +59.87 \text{ กก./ซม.}^2$$ ใช้ได้

(c) วิเคราะห์หน่วยแรงที่หน้าตัดบริเวณฐานรองรับ

e_e = 32 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_{ti} = 1.60\sqrt{f'_{ci}} = 1.60\sqrt{262.5} = 25.92$ กก./ซม.^{2}

$f_t = 3.20\sqrt{f'_c} = 3.20\sqrt{350} = 59.87$ กก./ซม.^{2}

(i) ขณะถ่ายแรง

$$f^t = -\frac{206\,458.56}{6310}\left(1-\frac{32\times 21}{567.74}\right)-0 = +6.01 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (T)}$$

$$f_b = -\frac{206\,458.56}{6310}\left(1+\frac{32\times 64}{567.74}\right)+0 = -150.75 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)}$$

$< f_{ci} = -157.5$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

ถ้า $f_b > f_{ci}$ จะต้องปรับเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับ

(ii) ที่น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

$$f^t = -\frac{169\,297.92}{6310}\left(1-\frac{32\times 21}{567.74}\right)-0 = +4.93 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (T)}$$

$< f_t = 59.87$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_b = -\frac{169\,297.92}{6310}\left(1+\frac{32\times 64}{567.74}\right)+0 = -123.61 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)}$$

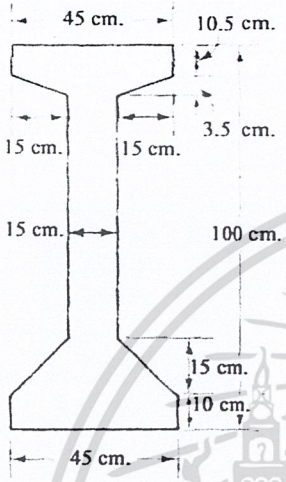
$< f_{ci} = -157.5$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

ดังนั้นใช้หน้าตัดมาตรฐานเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานใช้ลวดเกลียว 16 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. โดยมีระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วง $e_c = 56.0$ ซม. และระยะเยื้องศูนย์ที่ปลายช่วง $e_c = 32$ ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 4.2</u> – คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงไม่คงที่และไม่จำกัดความสูง

ออกแบบคานรูปตัว I ซึ่งมีความยาวช่วง 20 ม. ให้มีค่าหน้าตัดโมดูลัสที่ต้องการดังต่อไปนี้ S^t = 58 535 ซม.^{3} และ S_b = 61 940 ซม.^{3} ให้ใช้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามตัวอย่างที่ 4.1



เนื่องจากโมดูลัสหน้าตัดที่ผิวบนและผิวล่างมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะเลือกใช้หน้าตัดแบบสมมาตร ตามรูปข้างบน ซึ่งได้เลือกมาจากการลองผิดลองถูก

S^t = 54 733, S_b = 61 451.5 ซม.^{3},

c_b = 47.85, c^t = 52.15 ซม.

1. <u>การวิเคราะห์หน่วยแรงขณะถ่ายแรง</u> จากสมการ 4.4d

$$\bar{f}_{ci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h}(f_{ti} - f_{ci})$$

$$= +12.96 - \frac{52.15}{100}(+12.96 + 157.5) \cong -75.93 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$P_i = A_c \bar{f}_{ci} = 2432(75.93) = 184\,662 \text{ กก.}$$

$$M_D = \frac{585(20)^2}{8} = 29\,250 \text{ กก.ม.}$$

จากสมการที่ 4.4c ระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องการเพื่อรับโมเมนต์สูงสุดที่กลางช่วง คือ

$$e_c = (f_{ti} - \bar{f}_{ci})\frac{S^t}{P_i} + \frac{M_D}{P_i} = (12.96 + 75.93)\frac{58535}{184\,662} + \frac{29\,250(100)}{184\,662}$$

$$= 28.18 + 15.84 = 44.02 \text{ ซม.}$$

เนื่องจาก c_b = 47.85 ซม. และถ้าให้ระยะคอนกรีตหุ้มเป็น 9.5 ซม.

จะได้ค่า e_c = 47.85 - 9.5 = 38.35 ซม.

พื้นที่เหล็กเสริมอัดแรงที่ต้องการ $A_{ps} = \frac{P_i}{f_{pi}} = \frac{184\,662}{13\,034} = 14.17$ ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเส้นของเหล็กอัดแรง $= \frac{14.17}{0.99} = 14.31$

ลองใช้เหล็กอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม.จำนวน 13 เส้นมี $A_{ps} = 12.87$ ซม.^{2}

และได้แรง $P_i = 13\,034\,(12.87) = 167\,747.58$ กก. และตรวจสอบหน่วยแรงในคอนกรีต

จากสมการที่ 4.1a: $f^t = -\frac{P_i}{A_c}(1 - \frac{ec_t}{r^2}) - \frac{M_D}{S^t}$

$$= -\frac{167\,747.58}{2432}(1 - \frac{38.35 \times 52.15}{1210}) - \frac{29\,250(100)}{54\,733}$$

$$= +45.03 - 53.44 = -8.41 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

จากสมการที่ 4.1b: $f_b = -\frac{P_e}{A_c}(1 + \frac{ec_b}{r^2}) + \frac{M_D}{S_b}$

$$= -\frac{167\,747.58}{2432}(1 + \frac{38.35 \times 47.85}{1210}) + \frac{29\,250(100)}{61\,451.5}$$

$$= -173.58 + 47.60 = -125.98 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

2. <u>วิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน</u> จากสมการที่ 4.3a

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}(1 - \frac{ec_t}{r^2}) - \frac{M_T}{S^t}$$

$P_e = 13\,(0.99)(10\,688) = 137\,554.56$ กก.

โมเมนต์ทั้งหมด $M_T = M_D + M_{SD} + M_L = 29\,250 + 72\,900 = 102\,150$ กก.ม.

$$f^t = -\frac{137\,554.56}{2432}(1 - \frac{38.35 \times 52.15}{1210}) - \frac{102\,150(100)}{54\,733}$$

$= +36.93 - 186.63 = -149.70$ กก./ซม.^{2} (C) $< f_c$ ใช้ได้

ถ้า $f^t > f_c$ จะต้องใช้หน้าตัดที่มีความลึกมากขึ้น หรือใช้คอนกรีตที่มีกำลังสูงมากขึ้น

3. <u>ตรวจสอบหน่วยแรงที่หน้าตัดฐานรองรับ</u>

ค่าที่ยอมให้ $f'_{ci} = 0.75 \times 350 = 262.5$ กก./ซม.^{2}, $f_{ci} = 0.60 \times 262.5 = 157.5$ กก./ซม.^{2}

$f_{ti} = 0.8\sqrt{f'_{ci}} = 12.96$ กก./ซม.^{2} สำหรับที่กึ่งกลางช่วง

$f_{ci} = 1.60\sqrt{f'_{ci}} = 25.92$ กก./ซม.^{2} สำหรับที่ฐานรองรับ

$f_c = 0.45 f'_c = 157.5$ กก./ซม.^{2}

$f_{t1} = 1.60\sqrt{f'_c} = 29.94$ กก./ซม.^{2}, $f_{t2} = 3.20\sqrt{f'_c} = 58.87$ กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) ขณะถ่ายแรง หน่วยแรงอัดที่ฐานรองรับ

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}(1 + \frac{ec_b}{r^2}) + 0$$

$$P_i = 167\,747.58 \quad \text{กก.}$$

หรือ $$-157.5 = -\frac{167\,747.58}{2432}(1 + \frac{47.85e}{1210})$$

ได้ $e_e = 32.45$ ซม. ลองใช้ค่า $e_e = 30$ ซม.

$$f^t = -\frac{167\,747.58}{2432}(1 - \frac{30 \times 52.15}{1210}) - 0$$

$$= 20.21 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (T)} < 25.92 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_b = 150.80 \text{ กก./ซม.}^2$$

ถ้า $f^t > 25.92$ กก./ซม.^{2} จะต้องเสริมเหล็กธรรมดาที่ขอบบนของหน้าตัดที่ฐานรองรับเพื่อรับแรงดึงทั้งหมดในคอนกรีต หรือใช้คอนกรีตที่มีกำลังสูงมากขึ้น หรือลดระยะเยื้องศูนย์ลง

(b) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

$$f^t = -\frac{137\,554.56}{2432}(1 - \frac{30 \times 52.15}{1210}) - 0 = 16.57 \text{ กก./ซม.}^2 < 59.87 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

$$f_b = -\frac{137\,554.56}{2432}(1 + \frac{30 \times 47.85}{1210}) + 0 = -123.66 \text{ กก./ซม.}^2 < -157.5 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

ดังนั้นเลือกคานอัดแรงรูปตัว I ที่มีความลึก 100 ซม. ใช้ค่า $f'_c = 350$ กก./ซม.^{2} คอนกรีตมวลปกติกับเหล็กอัดแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 13 เส้น มีระยะเยื้องศูนย์ที่กึ่งกลางช่วง $e_c = 38.35$ ซม.ที่กลางช่วง และหน้าตัดที่ปลายช่วง $e_e = 30$ ซม.

หรือในอีกวิธี อาจจะเลือกใช้คอนกรีตเหมือนเดิม แต่เปลี่ยนจำนวนเส้นของลวดตีเกลียวและเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 4.3</u> - คานซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงคงที่

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 4.2 โดยให้เหล็กอัดแรงมีระยะเยื้องศูนย์คงที่ ใช้ $f_c' = 350$ กก./ซม.^{2} สำหรับคอนกรีตมวลปกติ แรงดึงสูงสุดในคอนกรีตที่ยอมรับได้ $f_t = 3.2\sqrt{f_c'} = 59.87$ กก./ซม.^{2}

เนื่องจากเหล็กอัดแรงมีระยะเยื้องศูนย์คงที่ ที่ฐานรองรับของคานช่วงเดี่ยว โมเมนต์ไม่ว่าจะเกิดจากน้ำหนักใดก็ตาม มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นหน้าตัดที่ฐานรองรับจะเป็นหน้าตัดวิกฤตสำหรับการออกแบบ ค่าโมดูลัสหน้าตัดที่ต้องการที่ฐานรองรับ จากสมการที่ 4.5a และ 4.5b คือ

$$S^t \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c}, \qquad S_b \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}}$$

สมมติให้ $w_D = 650$ กก./ม. จะได้ $M_D = \dfrac{650(20)^2}{8} = 32\,500$ กก.ม.

และจากตัวอย่างที่แล้ว $M_{SD} + M_L = 72\,900$ กก.ม.

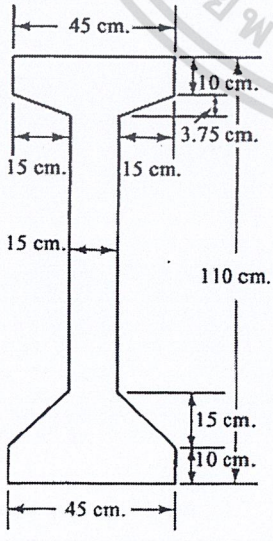
ได้ค่าโมเมนต์ทั้งหมด $M_T = 105\,400$ กก.ม.

และค่าที่ยอมให้ $\gamma = 0.82$, $f_{ci} = -157.5$, $f_{ci}' = -262.5$, $f_c = -157.5$, $f_t = +59.87$ กก./ซม.^{2}

$f_{ti} = 1.6\sqrt{f_{ci}'}$ สำหรับที่ฐานรองรับ $= 25.92$ กก./ซม.^{2}

ดังนั้นจะต้องมี $S^t = \dfrac{105\,400(100)}{(0.82\times 25.92 + 157.5)} = 58\,963.58$ ซม.^{3}

$S_b = \dfrac{105\,400(100)}{(59.87 + 0.82\times 157.5)} = 55\,761.30$ ซม.^{3}



<u>ลองครั้งที่ 1</u> เนื่องจากต้องการ $S^t = 58\,963.58$ ซม.^{3} ซึ่งมากกว่าค่า S^t ของคานในตัวอย่างที่ 4.2 ดังนั้นเลือกหน้าตัดรูปตัว I ที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยเลือกใช้ h = 110 ซม. ตามที่แสดงในรูป ซึ่งมีคุณสมบัติของหน้าตัดดังต่อไปนี้

$I_c = 3\,858\,465.32$ ซม.^{4}, $r^2 = 1476.77$ ซม.^{2}, $A_c = 2612.9$ ซม.^{2},

$w_D = 628$ กก./ม. $c_t = 57.60$ ซม., $c_b = 52.40$ ซม.

$S^t = 66\,040$ ซม.^{3}, $S_b = 72\,430.82$ ซม.^{3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.5c ระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องใช้ที่ฐานรองรับ

$$e_e = (f_{ti} - \bar{f}_{ci})\frac{S^t}{P_i}$$

โดยที่ $\bar{f}_{ci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h}(f_{ti} - f_{ci})$

$$= 25.92 - \frac{57.6}{110}(25.92 + 157.5) = 70.13 \text{ กก./ซม.}^2$$

และ $P_i = A_c \bar{f}_{ci} = 2612.9\ (70.13) = 183\ 242.68$ กก.

ดังนั้น $e = (25.92 + 70.13)\frac{66\ 040}{183\ 242.68} = 34.62$ ซม.

เนื้อที่ของเหล็กอัดแรงที่ต้องการคือ

$$A_p = \frac{P_i}{f_{pi}} = \frac{183\ 242.68}{13\ 034} = 14.06 \text{ ซม.}^2$$

ถ้าใช้ลวดตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จะต้องใช้ 14.06/0.99 = 14.20 เส้น ดังนั้นจะลองใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 14 เส้น ซึ่งจะได้

$$P_i = 14\ (0.99)(13\ 034) = 180\ 651.24 \text{ กก.}$$

(a) *วิเคราะห์หน่วยแรงขณะถ่ายแรงที่หน้าตัดที่ปลายช่วง*

จากสมการที่ 4.1a, $f^t = -\frac{P_i}{A_c}(1 - \frac{ec_t}{r^2}) - \frac{M_D}{S^t}$

$$= -\frac{180\ 651.24}{2612.9}(1 - \frac{34.62 \times 57.6}{1476.77}) - 0$$

$= +24.22 \text{ กก./ซม.}^2 < f_{ti} = 25.92$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

จากสมการที่ 4.2b, $f_b = -\frac{P_e}{A_c}(1 + \frac{ec_b}{r^2}) + \frac{M_D}{S_b}$

$$= -\frac{180\ 651.24}{2612.9}(1 + \frac{34.62 \times 52.4}{1476.77}) + 0$$

$= -154.07$ กก./ซม.^{2}

(b) *วิเคราะห์หน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานสุดท้ายที่ฐานรองรับ*

$$P_e = 14\ (0.99)(0.82 \times 13\ 034) = 148\ 135.68 \text{ กก.}$$

โมเมนต์ทั้งหมด $M_T = M_D + M_{SD} + M_L = 0$

จากสมการที่ 4.3a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t}$$

$$= -\frac{148\,135.68}{2612.9}\left(1 - \frac{34.62 \times 57.6}{1476.77}\right) - 0$$

$$= 19.86 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (T)} < f_t = 59.87 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

ใช้ได้

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b}$$

$$= -\frac{148\,135.68}{2612.9}\left(1 + \frac{34.62 \times 52.4}{1476.77}\right) + 0$$

$$= -126.34 \text{ กก./ซม.}^2 < f_c = -157.5 \quad \text{กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

(c) วิเคราะห์หน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานสุดท้ายที่กึ่งกลางช่วง

โมเมนต์ทั้งหมดที่หามาแล้ว $M_T = M_D + M_{SD} + M_L = 105\,400$ กก.ม.

$$f_1^t = \frac{M_T}{S^t} = \frac{105\,400(100)}{66\,040} = -159.60 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

$$f_{1b} = \frac{M_T}{S_b} = \frac{105\,400(100)}{72\,430.82} = +145.52 \text{ กก./ซม.}^2$$

ดังนั้น หน่วยแรงสุดท้ายที่กลางช่วง

$$f^t = +19.86 - 159.60$$

$$= -139.74 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)} < f_c = -157.5 \quad \text{กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

$$f_b = -126.34 + 145.52$$

$$= +19.18 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (T)} < f_t = 59.87 \quad \text{กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

ดังนั้นจะใช้หน้าตัดที่เลือกมีระยะเยื้องศูนย์คงที่ e = 34.62 ซม. และใช้ลวดตีเกลียวแรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 14 เส้น

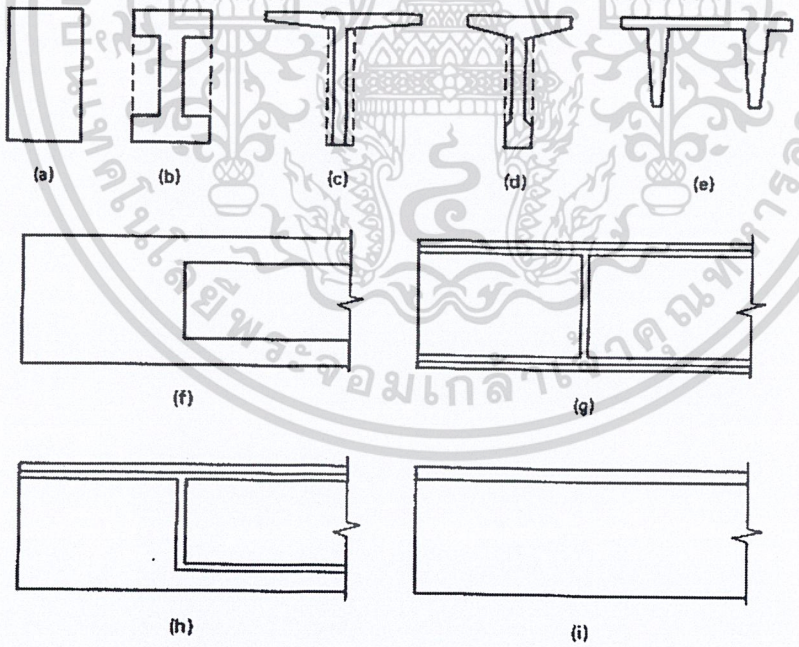
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเลือกหน้าตัดและคุณสมบัติที่เหมาะสมของคาน

4.4.1 ข้อกำหนดทั่วไป

หน้าตัดขององค์อาคารอัดแรงยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอนเหมือนหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ โดยทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบจะเลือกหน้าตัดเพื่อนำใช้เฉพาะในแต่ละโครงการ สิ่งสำคัญในคานช่วงเดียวคือระยะห่างระหว่างแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีตและแนวเหล็กเสริม ซึ่งจะต้องออกแบบเพื่อรับแรงอัดที่ต้องการ เนื่องจากโมเมนต์ที่กลางช่วงจะเป็นตัวควบคุมการออกแบบ ดังนั้นถ้าจัดให้มีระยะเยื้องศูนย์ได้มากแรงอัดที่ต้องใช้ก็จะลดน้อยลงไป ทำให้ได้หน้าตัดที่ประหยัด แต่ระยะเยื้องศูนย์ที่มากก็จะเป็นผลมาจากเนื้อคอนกรีตที่มากในด้านบน ทำให้นิยมใช้หน้าตัดรูปตัวทีหรือรูปตัวไอปีกกว้าง แต่ในบริเวณส่วนปลายคาน มักจะใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน เพื่อต้านระยะเยื้องศูนย์ที่มากในบริเวณที่โมเมนต์เป็นศูนย์ เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนในบริเวณฐานรองรับ และเพื่อป้องกันการวิบัติในบริเวณสมอยึด

หน้าตัดรูปอื่น ๆ ที่นิยมใช้ ได้แก่ หน้าตัดรูปตัวทีคู่ ซึ่งจะดีกว่ารูปทีเดี่ยวในด้านของความง่ายในการติดตั้ง เพราะมันสามารถตั้งอยู่ได้ด้วยตัวมันเอง รูปที่ 4.6 แสดงหน้าตัดที่นิยมใช้กันทั่วไป



รูปที่ 4.6 - หน้าตัดคอนกรีตอัดแรง (a) หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยม, (b) หน้าตัดคานรูปตัวไอ, (c) หน้าตัดคานรูปตัวที, (d) หน้าตัดคานรูปตัวทีมีปีกล่าง, (e) หน้าตัดรูปตัวทีคู่, (f) ส่วนปลายของคานใน (b), (g) ส่วนปลายของคานใน (c), (h) ส่วนปลายของคานใน (d), (i) ส่วนปลายของคานใน (e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าตัดอย่างอื่นที่นิยมใช้ได้แก่ แผ่นพื้นหน้าตัดกลวง (hollow-core slabs) และหน้าตัดที่ไม่สมมาตร จะใช้หน้าตัดที่ไม่สมมาตรแบบมีปีกแทนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมตันที่มีความลึกเท่ากันได้ โดยไม่มีข้อแตกต่างในด้านกำลังรับแรงดัด อย่างไรก็ตาม มักจะนิยมใช้หน้าตัด สี่เหลี่ยมเป็นคานหลักในกรณีของช่วงสั้น ๆ ในอาคารจอดรถช่วงยาว มักจะนิยมหน้าตัดรูปตัวไอเป็นคานในองค์อาคารเชิงประกอบร่วมกับแผ่นพื้นหล่อในที่ ในด้านของโครงสร้างสะพาน มักจะนิยมใช้หน้าตัดรูปตัวทีซึ่งมีปีกหนาด้านล่าง ตามแสดงในรูปที่ 4.6(d) หน้าตัดรูปทีคู่เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายในระบบพื้นของอาคารและในระบบพื้นของที่จอดรถ ซึ่งจะรับน้ำหนักเป็นแบบเชิงประกอบร่วมกับคอนกรีตทับหน้าที่หล่อบนปีกของคาน ซึ่งอาจจะมีความกว้าง 3 ถึง 4.5 เมตร

นิยมใช้หน้าตัดกลวงในแผ่นพื้นทางเดียว แต่ถ้าเป็นรูปคานกล่อง (hollow box girder) ขนาดใหญ่ จะนิยมใช้เป็นคานหลักในสะพานซึ่งมีช่วงยาวมาก ในระบบที่เรียกว่า "*segmental bridge deck systems*" โครงสร้างแบบนี้จะต้านแรงบิดได้สูง และอัตราของกำลังรับแรงดัดต่อน้ำหนัก ก็จะสูงกว่าทุก ๆ หน้าตัดในระบบอัดแรง

4.4.2 หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดและหน้าตัดแปลง (Gross Area and the Transformed Section)

โดยทั่วไป จะใช้หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตแต่อย่างเดียวในการออกแบบองค์อาคารอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ผู้ออกแบบหลายคนเลือกที่จะใช้หน้าตัดแปลง ซึ่งจะได้ความละเอียดเพิ่มขึ้นโดยคำนึงถึงผลของความแข็งแรงของหน้าตัดของเหล็กเสริมเมื่อเทียบกับคอนกรีต แต่ผลที่ได้ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก ในคานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงทีหลัง ซึ่งท่อร้อยลวดจะถูกฉีดเต็มด้วยน้ำปูน การใช้หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดแต่อย่างเดียวก็ดูจะสมเหตุสมผล ยกเว้นแต่ในกรณีของสะพานช่วงยาวและคานอัดแรงในงานอุตสาหกรรม ซึ่งต้องใช้เหล็กเสริมอัดแรงในปริมาณที่มากกว่าปกติ การใช้หน้าตัดแปลง หรือหน้าตัดสุทธิของคอนกรีตหักพื้นที่ของท่อร้อยออก จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

4.4.3 ขอบเขตของแนวของเหล็กเสริมอัดแรง

หน่วยแรงดึงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน จะต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ เช่น ACI, PCI หรือ AASHTO ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดขอบเขตพื้นที่ในหน้าตัดของคอนกรีต ซึ่งการอัดแรงจะต้องกระทำอยู่ภายในบริเวณนี้ เพื่อที่จะทำให้ไม่เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่ผิวของคอนกรีต บริเวณของพื้นที่นี้จะเรียกว่า "*พื้นที่ kern*" และจุดที่มุมของพื้นที่จะเรียกว่า "*จุด kern*"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.1a พิจารณาในส่วนของการอัดแรงอย่างเดียว: $f_t = 0 = \frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right)$

จะได้ $e = r^2/c_t$ ดังนั้น ตำแหน่งของจุด kern ล่าง

$$k_b = \frac{r^2}{c_t} \qquad (4.6a)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าให้ $f_b = 0$ ในสมการที่ 4.1b จะได้ $e = -r^2/c_b$ โดยที่เครื่องหมายลบแสดงการวัดขึ้นเหนือจากแนวแกนสะเทิน ส่วนเครื่องหมายบวกแสดงการวัดลงใต้แกนสะเทิน (ระยะเยื้องศูนย์ถือว่าเป็นบวกเมื่ออยู่ใต้แนวศูนย์ถ่วง) ดังนั้น ตำแหน่งของจุด kern บน

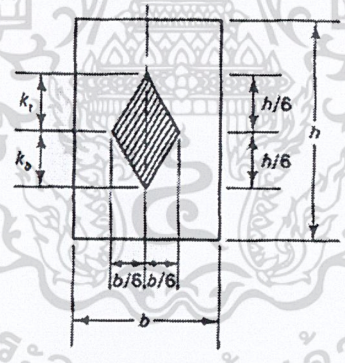
$$k_t = \frac{r^2}{c_b} \qquad (4.6b)$$

จากขั้นตอนข้างบนจะเห็นได้ว่า

(a) ถ้าแรงอัดกระทำต่ำกว่าจุด kern ล่าง จะเกิดแรงดึงขึ้นที่ผิวบนของหน้าตัดคอนกรีต

(b) ถ้าแรงอัดกระทำสูงกว่าจุด kern บน จะเกิดแรงดึงขึ้นที่ผิวล่างของหน้าตัดคอนกรีต

ในทำนองเดียวกัน ก็จะหาจุด kern ซ้ายและขวาของแนวตั้งของแกนสมมาตรของหน้าตัดได้ ทำให้ได้ขอบเขตพื้นที่ kern ของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ตามที่แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 - พื้นที่ kern ของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4.4.4 ข้อดีของการวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบโค้งหรือหักงอ

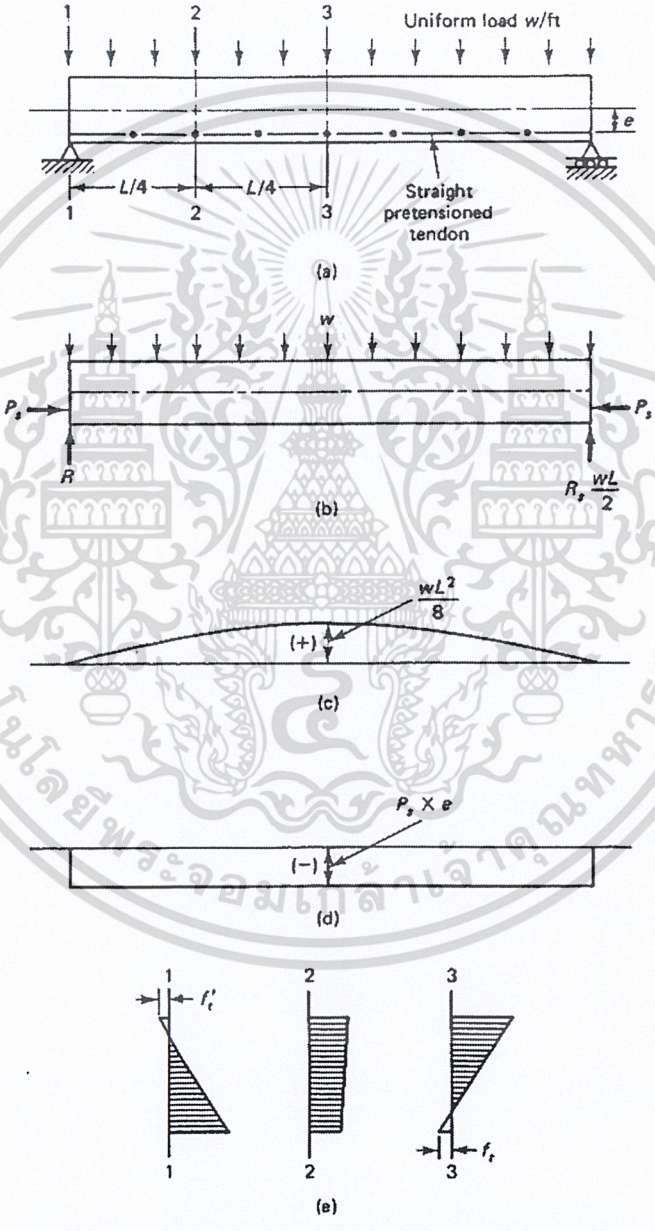
ถึงแม้ว่าการวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบเส้นตรงตลอดจะเป็นที่นิยมใช้กันในคานหล่อสำเร็จช่วงปานกลาง ในคานหล่อในที่และอัดแรงแบบดึงทีหลัง กลับนิยมใช้การวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบโค้ง การวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบไม่ใช่เส้นตรงตลอด จะมีอยู่สองวิธี ดังต่อไปนี้

(a) แบบโค้ง (Draped) จะมีแนวในรูปของพาราโบลา ใช้ในคานซึ่งน้ำหนักบรรทุกหลักเป็นน้ำหนักแผ่กระจายแบบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) แบบหักงอ (Harped) จะวางเป็นแนวเอียงและหักเปลี่ยนทิศทางภายใต้ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำเป็นจุด ใช้ในคานซึ่งน้ำหนักบรรทุกหลักเป็นน้ำหนักกระทำเป็นจุด

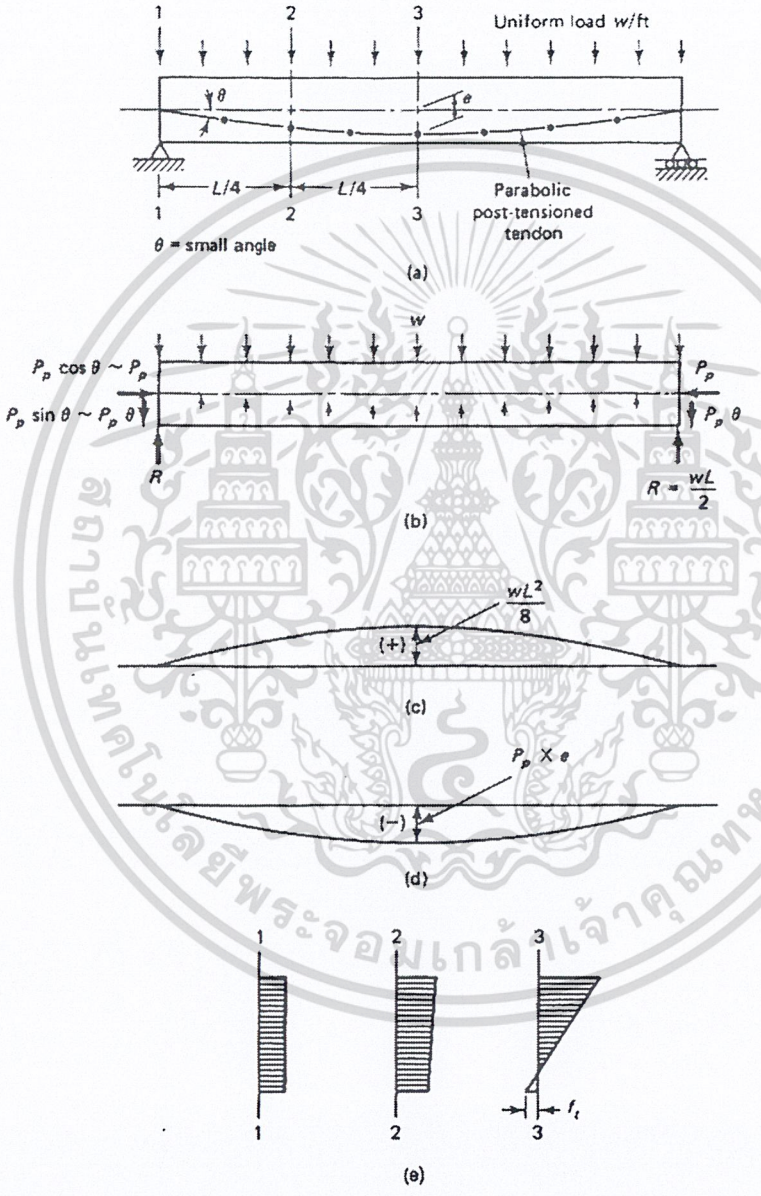
รูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 แสดงแรงดัดและการกระจายหน่วยแรงในคานซึ่งวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวตรงตลอด ในแนวโค้ง และแนวหักงอ แผนภาพแสดงถึงความประหยัดและข้อดีของแนวเหล็กเสริมแบบโค้งและแบบหักงอเมื่อเปรียบเทียบการวางแบบแนวเส้นตรงตลอด



รูปที่ 4.8 – คานซึ่งวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวตรงตลอด: (a) ข้อมูล, (b) Free-body diagram, (c) แผนภาพโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุก, (d) แผนภาพโมเมนต์ของแรงอัด, (e) การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัด 1, 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

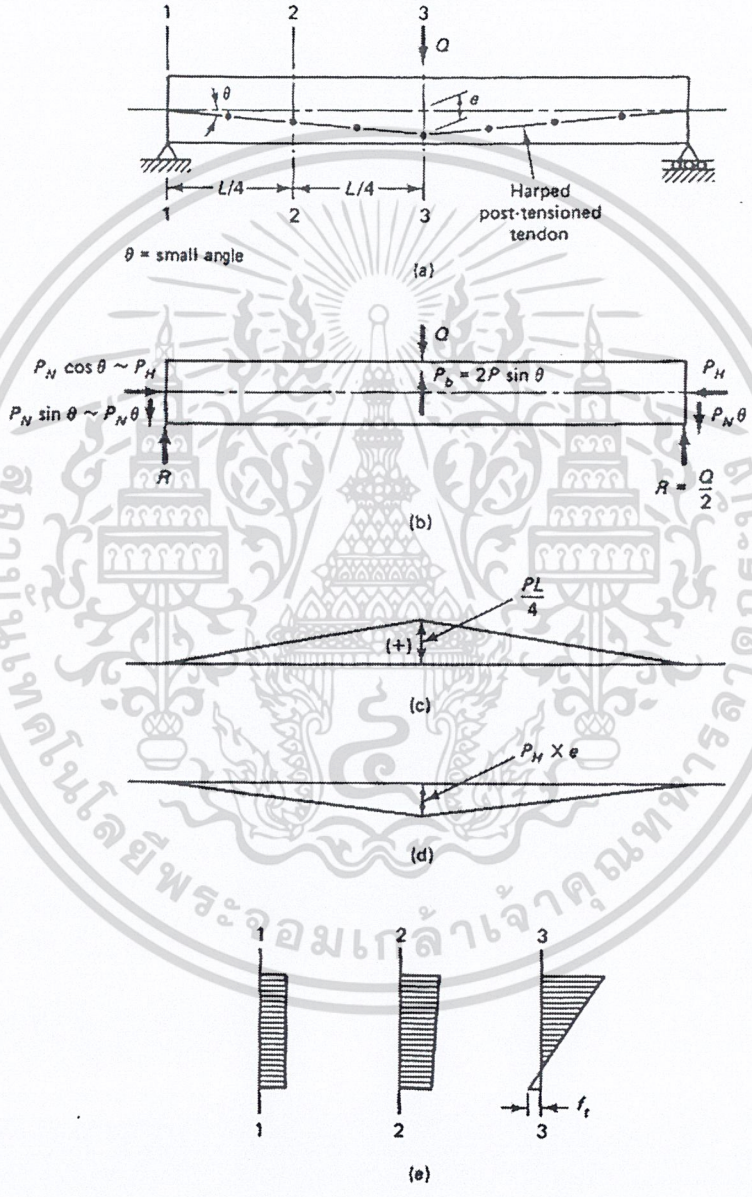
ในรูปที่ 4.8 จะเห็นหน่วยแรงดึงที่ไม่ต้องการเกิดที่ผิวบนของหน้าตัด 1-1 แต่บนหน้าตัด 1-1 ในรูป 4.9 และ 4.10 จะเห็นการกระจายของแรงอัดที่สม่ำเสมอ เมื่อเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่จุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดที่ฐานรองรับ ข้อดีอีกอย่างของการวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบแนวโค้งและแบบแนวเอียง ก็คือการที่ทำให้เกิดแรงพยุงช่วยให้คานรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น



รูปที่ 4.9 – คานซึ่งวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวโค้ง: (a) ข้อมูล, (b) Free-body diagram, (c) แผนภาพโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุก, (d) แผนภาพโมเมนต์ของแรงอัด, (e) การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัด 1, 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งก็จะส่งผลให้ แรงอัดที่ต้องการที่กลางช่วง P_p สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงที่วางแบบโค้ง ในรูป 4.9 และ P_h สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงแบบหักงอ ในรูปที่ 4.10 น้อยกว่าแรงอัดที่ต้องการในเหล็กอัดแรงแบบตรงตลอดในรูปที่ 4.8 ดังนั้นเพื่อรับหน่วยแรงเดียวกัน จะใช้จำนวนเส้นของเหล็กเสริมแบบโค้งและแบบหักงอน้อยกว่าและบางครั้งก็อาจจะใช้หน้าตัดที่เล็กกว่า

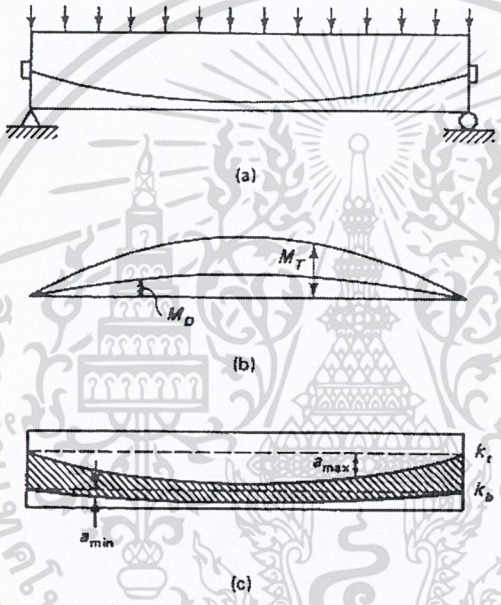


รูปที่ 4.10 – คานซึ่งวางเหล็กเสริมอัดแรงแบบหักงอ: (a) ข้อมูล, (b) Free-body diagram, (c) แผนภาพโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุก, (d) แผนภาพโมเมนต์ของแรงอัด, (e) การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัด 1, 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ขอบเขตจำกัดของระยะเยื้องศูนย์

จะต้องออกแบบระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของคาน เพื่อทำให้ไม่เกิดแรงดึงขึ้นบนผิวของคานที่ตำแหน่งเหล่านั้น หรืออาจเกิดขึ้นได้แต่ต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับเหล็กเสริมในแนวโค้ง ถ้าให้ M_D เป็นโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของตัวคานเอง และ M_T เป็นโมเมนต์รวมเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ดังนั้นระยะแขนของแรงคู่ควบซึ่งประกอบด้วยแนวแรงอัด (C- Line) และแนวของเหล็กเสริมอัดแรง (แนว cgs) เนื่องจาก M_D จะมีค่าเป็น a_{min} และเนื่องจาก M_T จะมีค่าเป็น a_{max} ตามที่แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 - การหาขอบเขตของแนวเหล็กเสริม cgs: (a) แนวเหล็กอัดแรงในคาน, (b) แผนภาพโมเมนต์, (c) ขอบเขตของแนวเหล็กเสริม cgs

ขอบเขตล่างของแนวเหล็กเสริม ระยะน้อยสุดของแรงคู่ควบ

$$a_{min} = \frac{M_D}{P_i} \qquad (4.7a)$$

ซึ่งจะเป็นระยะห่างสุดใต้แนว kern ล่างที่จะวางแนวเหล็กเสริมได้ โดยไม่ทำให้แนวแรงอัด (C- Line) ตกมาอยู่ใต้แนว kern ล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงในผิวบนได้ ดังนั้นขอบเขตล่างของระยะเยื้องศูนย์คือ

$$e_b = (a_{min} + k_b) \qquad (4.7b)$$

ขอบเขตบนของแนวเหล็กเสริม ระยะห่างสุดของแรงคู่ควบ

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_e} \qquad (4.7c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเป็นระยะห่างสุดใต้แนว kern บนที่จะวางแนวเหล็กเสริมได้ โดยไม่ทำให้แนวแรงอัด (C- Line) เลยขึ้นไปอยู่เหนือแนว kern บน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงในผิวล่างได้ ดังนั้นขอบเขตบนของระยะเยื้องศูนย์ คือ $e_t = (a_{max} - k_t)$ (4.7d)

ถ้าจะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในหน้าตัดทั้งขณะถ่ายแรงและภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน แต่ต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ ก็หมายความว่า ยอมให้แนวเหล็กเสริมหลุดออกไปเล็กน้อยนอกขอบเขตที่ระบุโดยสมการที่ 4.7a และ c ส่งผลให้เกิดระยะเยื้องศูนย์ e'_b และ e'_t เพิ่มขึ้นบนขอบเขตของแนวเหล็กเสริม

ถ้าให้หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นในผิวบนของคอนกรีตเป็น $f^{(t)}$ และในผิวล่างเป็น $f_{(b)}$ จะได้

$$f^{(t)} = \frac{P_i e'_b c_t}{I_c} \quad (4.8a)$$

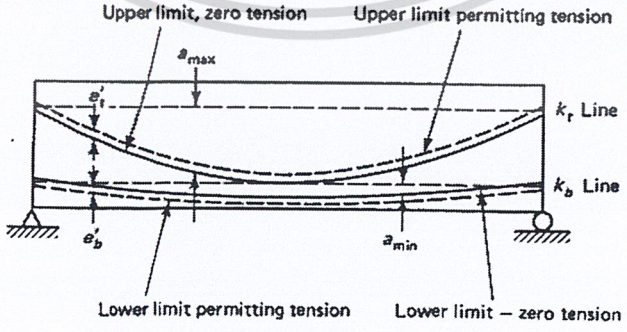
และ $$f_{(b)} = \frac{P_e e'_t c_b}{I_c} \quad (4.8b)$$

โดยที่ t และ b ระบุถึงผิวบนและผิวล่างตามลำดับ จากสมการที่ 4.6 จะได้ระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องเพิ่ม ในสมการ 4.7b และ d เป็น

$$e_b' = \frac{f^{(t)} A_c k_b}{P_i} \quad (4.9a)$$

และ $$e_t' = \frac{f_{(b)} A_c k_t}{P_e} \quad (4.9b)$$

รูปที่ 4.12 แสดงขอบเขตที่ยอมให้เกิดแรงดึง จะเห็นว่าขอบเขตบนตกไปอยู่นอกหน้าตัด แต่หน่วยแรงยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนด แสดงถึงหน้าตัดที่ไม่ประหยัด จะแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์หรือปรับแต่งแรงอัด



รูปที่ 4.12 - ขอบเขตที่ยอมให้เกิดแรงดึงในคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4.4 - ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรง

ให้คานในตัวอย่างที่ 4.2 เป็นคานอัดแรงแบบดึงทีหลังและมีการเหนี่ยวรั้ง มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงวางเป็นรูปพาราโบลา จงหาขอบเขตของแนวเหล็กเสริม ที่จะทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตทุกสภาวะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ให้พิจารณาหน้าตัดที่กลางช่วง หนึ่งในสี่ของช่วง และที่ปลายคาน สมมติการเสื่อมลดแรงอัดเท่ากับในตัวอย่างที่ 4.2

แต่ให้ใช้ $P_i = 249\ 218.27$ กก. $P_e = 204\ 358.59$ กก. $f'_c = 420$ กก./ซม.^{2} $e_c = 33$ ซม. $e_e = 15$ ซม.

โมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบของคานรูปตัว I ในตัวอย่างที่ 4.2 และคุณสมบัติของหน้าตัดมีแสดงไว้ตามข้างล่าง

$M_D = 29\ 250$กก.ม., $M_{SD} + M_L = 72\ 900$ กก.ม., $M_T = M_D + M_{SD} + M_L = 102\ 150$ กก.ม.

$A_c = 2432$ ซม.^{2}, $r^2 = 1210$ซม.^{2}, $c_t = 52.15$ ซม., $c_b = 47.85$ ซม.

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในตัวอย่างนี้เป็นน้ำหนักแผ่กระจายแบบคงที่ ดังนั้นแผนภาพโมเมนต์จะเป็นรูปพาราโบล่า โดยมีโมเมนต์เป็นศูนย์ที่ฐานรองรับ ดังนั้นที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่ของช่วง

$M_D = 0.75 \times 29\ 250 = 21\ 938$ กก.ม.

$M_T = 0.75 \times 102\ 150 = 76\ 613$กก.ม.

จากสมการ 4.6a และ b ขอบเขตของจุด kern คือ

$k_t = r^2 / c_b = 1210/47.85 = 25.29$ ซม.

$k_b = r^2 / c_t = 1210/52.15 = 23.20$ ซม.

ขอบเขตล่าง

จากสมการที่ 4.7a ระยะห่างสุดใต้แนว kern ล่างที่จะวางแนวเหล็กเสริมได้ โดยไม่ทำให้แนวแรงอัด (C- Line) ตกมาอยู่ใต้แนว kern ล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงในผิวบน จะหาได้ดังต่อไปนี้

(i) *ที่กลางช่วง*

$$a_{min} = M_D / P_i = \frac{29\ 250(100)}{249\ 218.27} = 11.74 \text{ ซม.}$$

ได้ $e_1 = k_b + a_{min} = 23.20 + 11.74 = 34.94$ ซม.

(ii) *ที่ 1/4 ของช่วง*

$$a_{min} = \frac{21\ 938(100)}{249\ 218.27} = 8.80 \text{ ซม.}$$

ได้ $e_2 = 23.20 + 8.80 = 32$ ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(iii) *ที่ฐานรองรับ*

$a_{min} = 0$

ได้ $e_3 = 23.20 + 0 = 23.20$ ซม.

<u>ขอบเขตบน</u>

จากสมการที่ 4.7c ระยะห่างสุดใต้แนว kern บนที่จะวางแนวเหล็กเสริมได้ โดยไม่ทำให้แนวแรงอัด (C- Line) เลย ขึ้นไปอยู่เหนือแนว kern บน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงในผิวล่าง จะหาได้ดังต่อไปนี้

(i) *ที่กลางช่วง*

$$a_{max} = M_T / P_e = \frac{102\,150(100)}{204\,358.59} = 49.99 \text{ ซม.}$$

ได้ $e_1 = a_{max} - k_t = 49.99 - 25.29 = 24.70$ ซม.

ความหนาคอนกรีตหุ้มน้อยสุด = 7.5 ซม.

จะต้องตรวจสอบว่า e_1 มีค่าไม่เกิน c_b มิฉะนั้นจะได้แนวเหล็กเสริมอัดแรงอยู่นอกหน้าตัด

(ii) *ที่ 1/4 ของช่วง*

$$a_{max} = \frac{76\,613(100)}{204\,358.59} = 37.50 \text{ ซม.}$$

ได้ $e_2 = 37.50 - 25.29 = 11.60$ ซม.

(iii) *ที่ฐานรองรับ*

$a_{max} = 0$

$e_2 = 0 - 25.29 = -25.29$ ซม. (เหนือแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีต cgc)

ถ้าให้หน่วยแรงดึงสูงสุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานมีค่าไม่เกิน $f_t = 1.6\sqrt{f_c'} = 32.79$ กก./ซม.^{2} ทั้งผิวบนและล่าง จากสมการที่ 4.9a ระยะเยื้องศูนย์ที่จะต้องเพิ่มลงในขอบเขตจำกัดล่างของแนวเหล็กเสริม เพื่อยอมให้เกิดแรงดึงในผิวบน

$$e_b' = \frac{f^{(t)} A_c k_b}{P_i} = \frac{32.79(2432)(23.20)}{249\,218.27} = 7.42 \text{ ซม.}$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ 4.9b ระยะเยื้องศูนย์ที่จะต้องเพิ่มลงในขอบเขตจำกัดบนของแนวเหล็กเสริม เพื่อยอมให้เกิดแรงดึงในผิวล่าง

$$e_t' = \frac{f_{(b)} A_c k_b}{P_i} = \frac{32.79(2432)(25.29)}{204\,358.59} = 9.87 \text{ ซม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

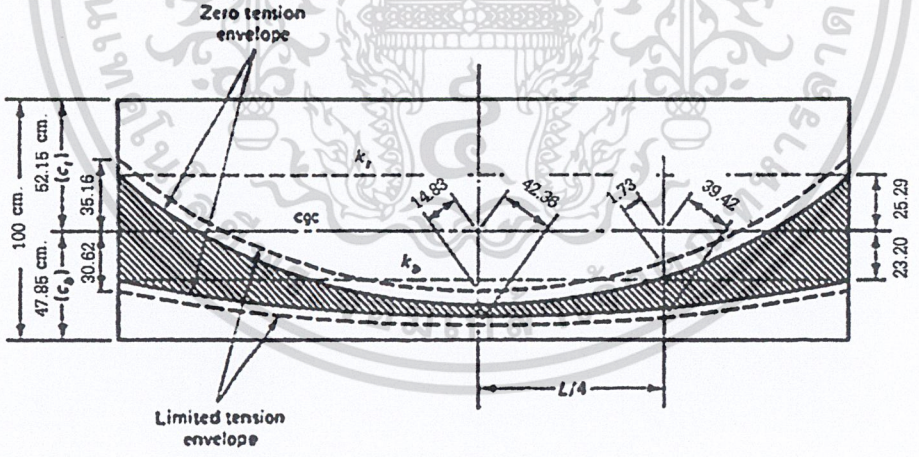
สรุประยะเยื้องศูนย์ของขอบเขตของแนวเหล็กเสริมได้ดังนี้

	ไม่เกิดแรงดึง, ซม.	เพิ่ม	ยอมให้เกิดแรงดึง, ซม.
กลางช่วง			
ขอบเขตล่าง	34.94	+ 7.42	42.36
ขอบเขตบน	24.70	- 9.87	14.83
ที่หนึ่งในสี่ของช่วง			
ขอบเขตล่าง	32	+ 7.42	39.42
ขอบเขตบน	11.6	- 9.87	1.73
ที่ฐานรองรับ			
ขอบเขตล่าง	23.20	+ 7.42	30.62
ขอบเขตบน	- 25.29	- 9.87	- 35.16

ระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วง $e_c = 33$ ซม. < 42.36 ซม. ดังนั้น แนวเหล็กเสริมอยู่ภายในขอบเขตที่กลางช่วง

ระยะเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับ $e_c = 15$ ซม. < 30.62 ซม.

ดังนั้นแนวเหล็กเสริมอยู่ภายในขอบเขตที่ฐานรองรับ



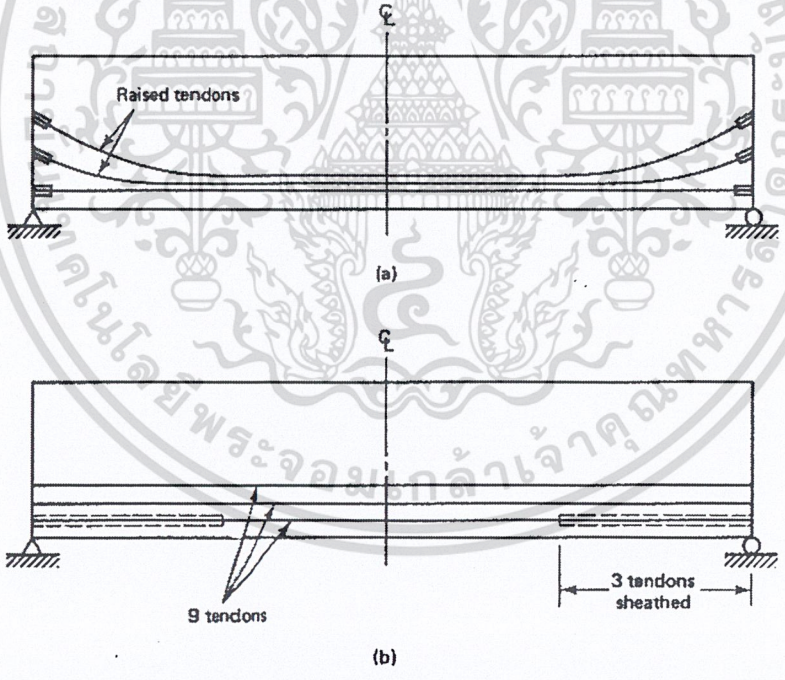
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 การลดแรงอัดที่ใกล้ฐานรองรับ

จากตัวอย่างที่ 4.3 และหัวข้อ 4.4.3 และ 4.4.5 จะเห็นว่า การวางเหล็กเสริมเป็นแนวตรงตลอดในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงในผิวคอนกรีตที่บริเวณเหนือฐานรองรับ เพราะในบริเวณนั้นโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักขององค์อาคารเองและเนื่องจากน้ำหบรรทุกภายนอกมีค่าเป็นศูนย์ โมเมนต์ที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็นผลมาจากการอัดแรงเพียงอย่างเดียว วิธีที่ใช้กันทั่วไปในการลดหน่วยแรงที่ฐานรองรับมีสองวิธี ได้แก่

1. ลดระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมบางเส้น ด้วยการยกแนวให้สูงขึ้นในบริเวณฐานรองรับเพื่อลดโมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a)
2. หุ้มเหล็กเสริมบางเส้นด้วยท่อพลาสติกในบริเวณฐานรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14(b) วิธีนี้จะกำจัดแรงอัดบางส่วนที่ถ่ายลงในบริเวณฐานรองรับของคานช่วงเดี่ยว

ในคานช่วงยาวอัดแรงแบบดึงทีหลัง ก็นิยมใช้วิธีการยกแนวเหล็กเสริมให้สูงขึ้น เพื่อลดแรงอัดบางส่วนที่ไม่จำเป็นต้องใช้แล้ว แต่รัศมีความโค้งที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 – การลดแรงอัดบริเวณใกล้ฐานรองรับ: (a) ยกแนวของเหล็กเสริมอัดแรงบางเส้น, (b) หุ้มบางส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง

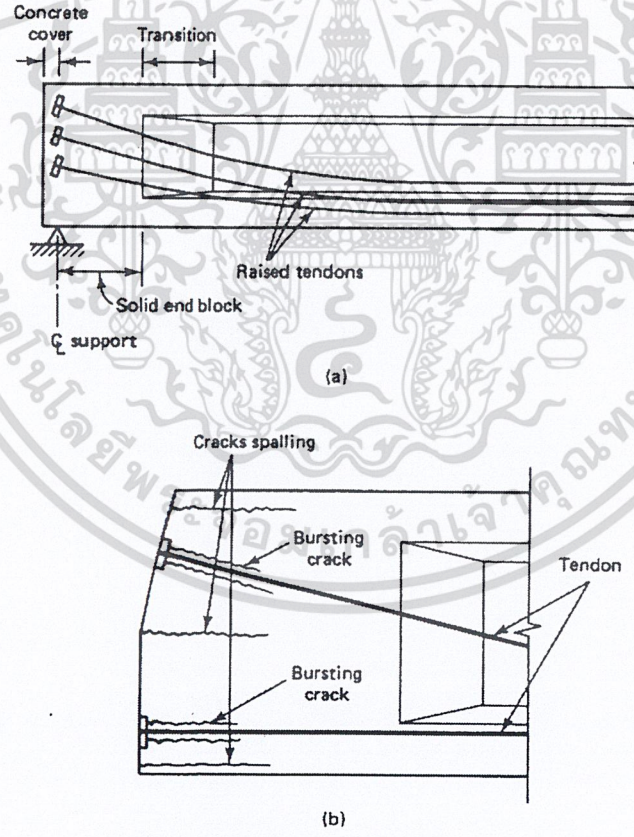
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ปลายคานเหนือฐานรองรับ

4.5.1 การกระจายหน่วยแรง

แรงอัดจากเหล็กเสริมจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในแนวนอนที่สูงมากบนพื้นที่เล็ก ๆ ที่ขอบของคานเหนือฐานรองรับ ทั้งในคานอัดแรงแบบดึงก่อนและดึงทีหลัง ในคานอัดแรงแบบดึงก่อน แรงอัดจะถ่ายสู่คอนกรีตล้อมรอบทีละน้อยจากปลาย จนกระทั่งถ่ายเต็มที่ที่ระยะ l_t จากขอบของฐานรองรับ ในคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง แรงอัดจะกระทำโดยตรงบนขอบของคานผ่านแผ่นรองรับและสมอยึด

การแปรเปลี่ยนแปลงของแรงอัดในแนวนอนจากสภาวะที่กระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ จนมากลายเป็นหน่วยแรงอัดกระจายทั่วหน้าตัดของคาน ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวดิ่งที่มีค่าสูงกว่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในแนวนอนขึ้นที่บริเวณสมอยึด ซึ่งตำแหน่งของการแตกร้าวนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางและตำแหน่งของสมอยึด

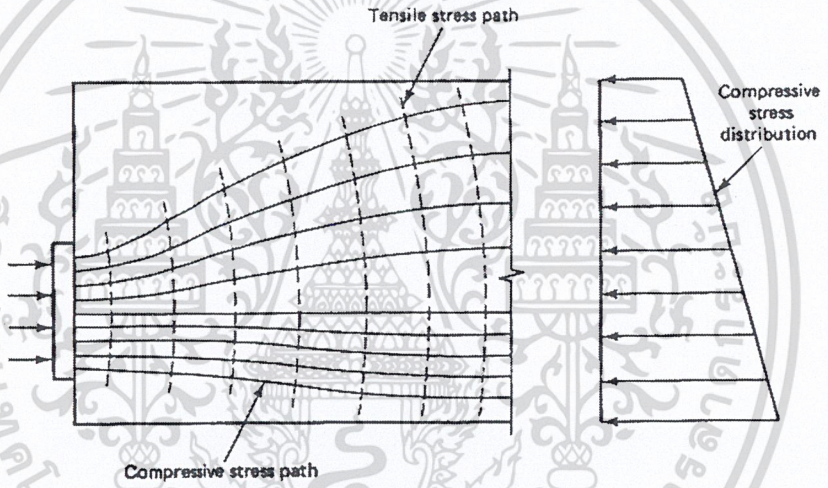


รูปที่ 4.15 - บริเวณปลายสมอยึดสำหรับเหล็กอัดแรงที่มีแรงยึดเหนี่ยว (a) การเพิ่มขนาดหน้าตัดที่ฐานรองรับ (b) การแตกร้าวบริเวณปลายคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางครั้งอาจจะต้องเพิ่มขนาดหน้าตัดบริเวณฐานรองรับโดยการเพิ่มขนาดของแกนคานทีละน้อย จนกระทั่งมีความกว้างเท่ากับปีก เปลี่ยนจากหน้าตัดรูปตัวทีกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงที่ยกแนวขึ้นมา ตามที่แสดงในรูปที่ 4.15(a) แต่การเพิ่มพื้นที่นี้ไม่ได้ช่วยต้านการแตกร้าว และไม่ได้ช่วยลดหน่วยแรงดึงในแนวดิ่ง ในทางกลับกัน ผลจากห้องปฏิบัติการและจากการวิเคราะห์ระบุว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดบริเวณฐานรองรับอาจจะทำให้หน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้น

ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีเหล็กเสริมในบริเวณของการถ่ายแรง เหล็กเสริมอาจจะเป็นเหล็กลูกตั้งหรืออุปกรณ์สมอยึดใด ๆ ก็ได้ แต่จะต้องทำวงปิดล้อมรอบเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมธรรมดา ในกรณีของคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง ควรจะเพิ่มตะแกรงเหล็กวางในแนวดิ่งชิดกับสมอยึด รูปที่ 4.16 แสดงแนวของหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.16 - แนวของหน่วยแรงที่ปลายช่วง

4.5.2 ระยะฝังและระยะถ่ายแรงในองค์อาคารอัดแรงแบบดึงก่อน

หลังจากปล่อยเหล็กเสริมจากเครื่องดึงเหล็ก เหล็กเสริมจะพยายามที่จะหดตัวแต่ถูกต้านด้วยแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตทำให้เกิดแรงอัดขึ้นในเนื้อคอนกรีต แรงที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมอัดแรงกับเนื้อคอนกรีต จะค่อย ๆ เปลี่ยนแรงอัดจากเหล็กเสริมแต่ละเส้นให้กลายเป็นแรงอัดแผ่กระจายในเนื้อคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นบนช่วงความยาวหนึ่งระหว่างขอบของคานกับกลางช่วง จะเรียกช่วงความยาวนี้ว่า "*ระยะฝัง*" ซึ่งจะเป็นตัวระบุถึงขนาดของแรงอัดที่เกิดขึ้นในช่วงคาน

ลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น ขนาด 12.7 มม. ซึ่งมีระยะฝัง 100 ซม. จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัด 12 410 กก./ซม.^{2} แต่ถ้ามีระยะฝัง 175 ซ.ม. จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัด 14 200 กก./ซม.^{2} จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะฝัง l_d ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุด ประกอบด้วยระยะถ่ายแรง l_t และระยะยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงดัด l_f โดยที่

$$l_t = \frac{1}{70}\left(\frac{f_{pe}}{3}\right)d_b \qquad (4.10a)$$

หรือ

$$l_t = \frac{f_{pe}}{210}d_b \qquad (4.10b)$$

และ

$$l_f = \frac{1}{70}\left(f_{ps} - f_{pe}\right)d_b \qquad (4.10c)$$

โดยที่ f_{ps} = หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่กำลังระบุ (กก./ซม.^{2})

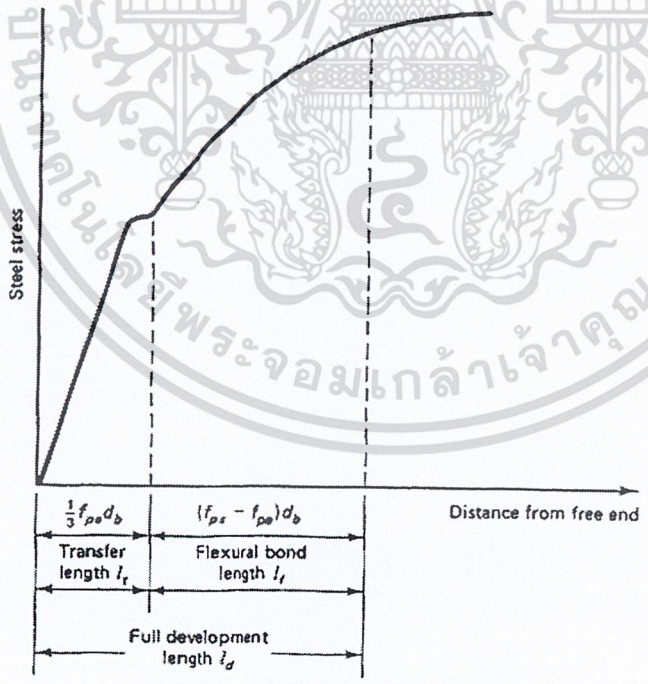
f_{pe} = หน่วยแรงอัดประสิทธิผลหลังการเสื่อมลด (กก./ซม.^{2})

d_b = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กอัดแรง (ซม.)

รวมสมการ 4.10b และ 4.10c จะได้ระยะฝังต่ำสุดที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงตามต้องการ

$$\text{Min } l_d = \frac{1}{70}\left(f_{ps} - \frac{2}{3}f_{pe}\right)d_b \qquad (4.10d)$$

ถ้ามีการหุ้มหรือเคลือบเหล็กเสริมเพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวที่บริเวณปลายคาน ทำให้ไม่การถ่ายแรงในบริเวณนั้น จะต้องปรับค่าของระยะฝัง



รูปที่ 4.17 - ระยะฝังสำหรับเหล็กเสริมอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากห้องปฏิบัติการโดย Mattock ให้แรงที่เกิดขึ้นในเหล็กลูกตั้งมีค่าดังต่อไปนี้

$$F = 0.0106\frac{P_i h}{\ell_t} \tag{4.11}$$

โดยที่ h เป็นความลึกของคานและ l_t เป็นระยะถ่ายแรง ถ้าให้หน่วยแรงเฉลี่ยในเหล็กลูกตั้งเป็นครึ่งหนึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ f_s ดังนั้น $F = \frac{1}{2} A_t f_s$ แทนค่า F ลงในสมการที่ 4.11 จะได้

$$A_t = 0.021\frac{P_i h}{f_s \ell_t} \tag{4.12}$$

โดยที่ A_t เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กลูกตั้ง และ $f_s \leq 1400$ กก./ซม.^{2} เพื่อควบคุมการแตกร้าว

ตัวอย่างที่ 4.5 – เหล็กเสริมที่ปลายของคานอัดแรงแบบดึงก่อน

ออกแบบเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่ปลายของคานเนื่องจากการถ่ายแรง ใช้คานจากตัวอย่างที่ 4.2

จากตัวอย่างที่ 4.2: P_i = 167 747.58 กก., f_{pe} = 10 688 กก./ซม.^{2}, d_b = 12.7 มม., h = 100 ซม.

จากสมการที่ 4.10b ระยะถ่ายแรง, $l_t = \frac{f_{pe}}{210} d_b = \frac{10\,688(1.27)}{210} = 64.64$ ซม.

จากสมการที่ 4.12: $A_t = 0.021\frac{P_i h}{f_s \ell_t}$ และให้ $f_s \leq 1400$ กก./ซม.^{2} ได้

$$A_t = 0.021\frac{(167\,747)(100)}{(1400)(64.64)} = 3.89 \text{ ซม.}^2$$

ลอง DB10 รัดรอบ พื้นที่ต่อเส้น = 2 (0.78) = 1.56 ซม.^{2}

ดังนั้น จะต้องใช้เหล็กลูกตั้งอย่างน้อยจำนวน = 3.89/1.56 = 2.49

ใช้ DB10 จำนวน 3 เส้น รัดรอบเหล็กเสริมหลักทุกเส้น

และใช้ลวดเหล็กพันต่อเนื่องรอบเหล็กเสริมเหล็กในช่วงความยาว l_t เพื่อช่วยในการถ่ายแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 บริเวณสมอยึดของระบบอัดแรงแบบดึงทีหลัง

จะระบุนิยามของ*บริเวณสมอยึด*ว่า เป็นปริมาตรของคอนกรีตซึ่งใช้ในการกระจายแรงอัดบนพื้นที่เล็ก ๆ ของแผ่นยึดจนกลายเป็นหน่วยแรงแผ่กระจายทั่วทั้งหน้าตัดขององค์อาคาร ความยาวของบริเวณนี้ เป็นไปตามพื้นฐานของ St. Venant โดยมีหลักการว่า หน่วยแรงจะมีค่าคงที่ที่ระยะห่างจากสมอยึดเท่ากับความลึกขององค์อาคาร h ดังนั้นจะถือว่าระยะถ่ายแรงมีค่าเท่ากับระยะฝังและเท่ากับ h ด้วย

บริเวณนี้ประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่

1. *บริเวณทั่วไป*: ได้แก่ บริเวณครอบคลุมระยะฝัง ดังนั้นโดยทั่วไปบริเวณนี้จะมีความยาวเท่ากับ h
2. *บริเวณเฉพาะ*: ได้แก่ เนื้อคอนกรีตรอบแผ่นยึดและหุ้มเหล็กลูกตั้งต้านการแตกร้าว ตามที่แสดงเป็นบริเวณแรงเงาในรูปที่ 4.18(c) และแสดงภาพขยายในรูปที่ 4.18(a) ซึ่งได้แสดงการกระจายหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดในบริเวณเฉพาะไว้ด้วย จะถือว่าความยาวของบริเวณเฉพาะเป็นค่าที่มากกว่าของความกว้างขององค์อาคารและความยาวของแผ่นยึด

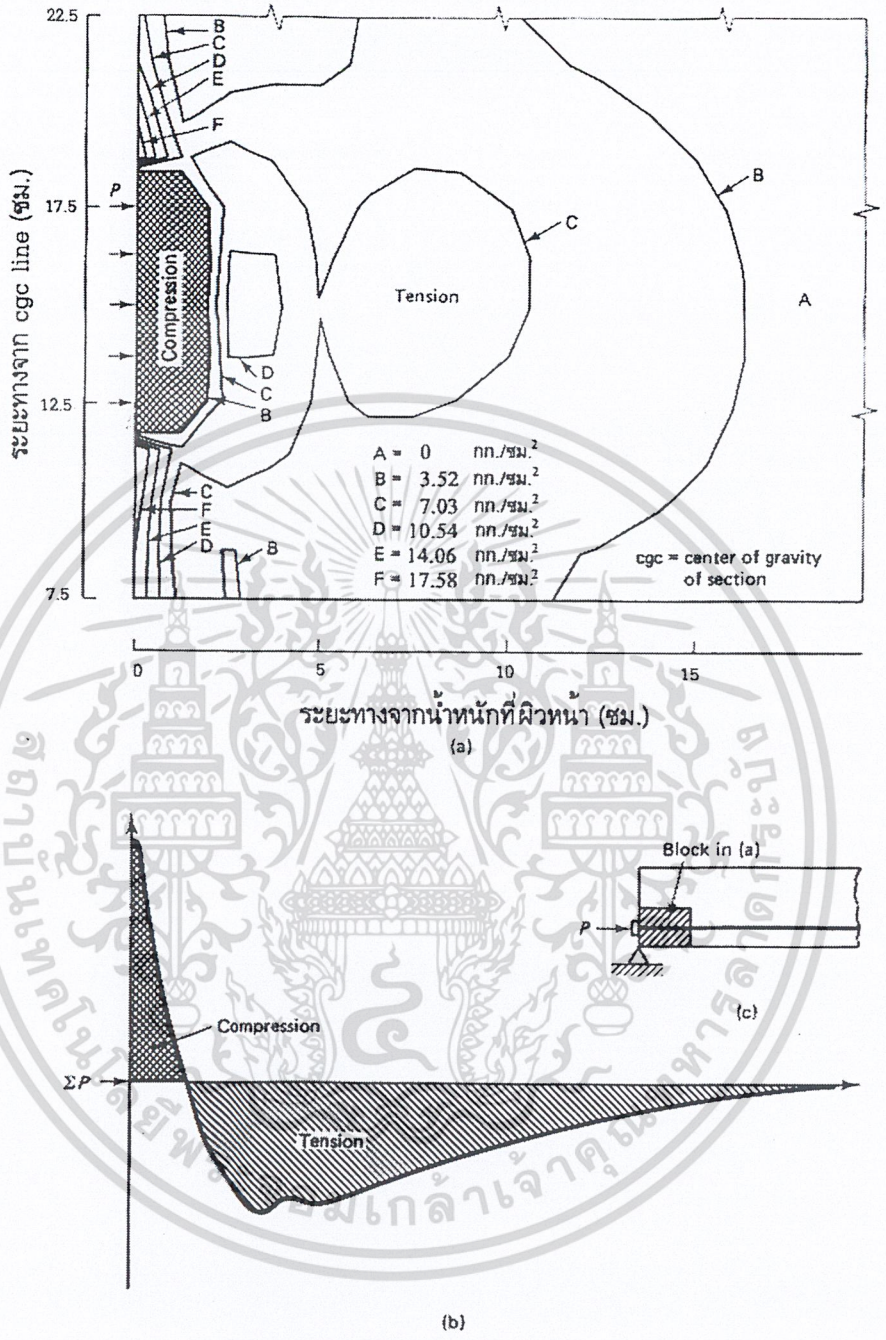
จะต้องออกแบบเหล็กลูกตั้งล้อมรอบเหล็กเสริมอัดแรงตลอดทั้งระยะฝัง ให้ต้านการแตกร้าวเนื่องแรงอัดสูงที่ส่งผ่านแผ่นยึด และยังจะต้องตรวจสอบหน่วยแรงแบกทานของคอนกรีตในบริเวณเฉพาะว่า ไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

4.5.3.1 วิธีการออกแบบสำหรับบริเวณทั่วไป

การออกแบบบริเวณสมอยึดโดยทั่วไป มีอยู่สามวิธีด้วยกัน ได้แก่

1. *การวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติก (Linear Elastic Stress Analysis) รวมทั้งวิธี Finite Element*: วิธีนี้จะวิเคราะห์สภาวะหน่วยแรงอย่างละเอียดโดยถือว่าอยู่ภายใต้ขอบเขตปฏิภาค การใช้ วิธี Finite Element ค่อนข้างจะมีปัญหาในการสร้างแบบจำลองซึ่งรวมผลของการแตกร้าวในคอนกรีต แต่ถ้าใช้สมมติฐานที่เหมาะสม ก็จะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียง
2. *วิธีสมดุลพลาสติก (Equilibrium–Based Plasticity) จากแบบจำลองค้ำยันและยึดโยง (Strut–and–Tie)*: วิธีนี้จะจำลองแนวแรงอัดเสมือนกับเป็นโครงถักโดยแรงที่เกิดขึ้นจะต้องเป็นไปตามพื้นฐานของความสมดุล น้ำหนักวิบัติจากวิธีนี้จะได้มาจากแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติขึ้นในค้ำยันหรือยึดโยง ซึ่งมักจะได้ค่าที่ค่อนข้างต่ำ ให้อัตราส่วนความปลอดภัยสูง
3. *วิธีประมาณค่า* (Approximate methods): วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะกับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมต่อเนื่องตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 – เส้นระดับของหน่วยแรงดึงหลักซึ่งมีหน่วยแรงในแนวดิ่งเท่ากัน (e_e = 15 ซม.)

(a) เส้นระดับหน่วยแรง (b) การกระจายหน่วยแรงที่ 11.25 ซม. เหนือขอบล่าง (c) ด้านข้างของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติก เพื่อหาเหล็กเสริมรัดรอบ

จากรูปที่ 4.18(a) จะเห็นว่าบริเวณสมอยึดอยู่ภายใต้หน่วยแรงสามระดับ ได้แก่

(a) หน่วยแรงแบกทานสูงติดกับแผ่นยึด

จะต้องมีเหล็กเสริมรัดรอบเนื้อคอนกรีตในบริเวณนี้ เพื่อช่วยต้านการวิบัติโดยแรงอัดของบริเวณพื้นที่แรเงา ในรูปที่ 4.18(a) และ 4.18(b)

(b) หน่วยแรงดึงแตกร้าวในบริเวณที่แสดงเส้นระดับหน่วยแรงดึง ตั้งฉากกับแนวของเหล็กเสริมอัดแรง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.18(a) และ (b) และรูปที่ 4.19(b)

(c) หน่วยแรงอัดสูงในบริเวณของจุด D และ E ในรูปที่ 4.18(a)

เนื้อหาข้างล่างแสดงการใช้วิธีวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติกหาตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าว และประมาณค่าและทิศทางของหน่วยแรงหลังจากเกิดการแตกร้าว จะใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งจะหาได้จากการรวมหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ในบริเวณรับแรงอัด อาจจะต้องเสริมเหล็กช่วยถ้าแรงอัดสูงมาก การวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element ภายใต้ขอบเขตปฏิภาค จะให้ผลที่ละเอียดมาก ตามที่แสดงในรูปที่ 4.18 แต่จะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง และผลที่ได้ก็จะถูกจำกัดโดยความยากในการที่จะแบบจำลองซึ่งรวมผลของการแตกร้าวในคอนกรีต การวิเคราะห์ในขั้นที่หน่วยแรงสูงกว่าขอบเขตปฏิภาคเพื่อหาพฤติกรรมหลังจากการแตกร้าว อาจจะให้ผลที่ดีกว่า แต่ก็คงจะไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในปัจจุบันที่ต้องการผลอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 4.19 แสดงแรงที่กระทำบนปลายคาน แสดงหน่วยแรงเนื่องจากแรงอัด P_i และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ระยะ y จากท้องคาน ตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์สูงสุด M_{max} จะเป็นตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าวในแนวนอน โมเมนต์นี้จะถูกต้านโดยคู่ควบซึ่งประกอบด้วยแรงดึง T ในเหล็กลูกตั้งและแรงอัด C ในเนื้อคอนกรีต ในระหว่างที่แรงเฉือนในแนวราบ V บนผิวของรอยแตกร้าวจะถูกต้านด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวม ในทางปฏิบัติ จะกระจายเหล็กลูกตั้งในระยะ h/2 จากปลายคาน ทำให้เกิดแรงรวม T กระทำที่ระยะ x มีค่าประมาณ h/4 ถึง h/5 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.19

จากความสมดุลของโมเมนต์

$$T = \frac{M_{max}}{h - x} \tag{4.13}$$

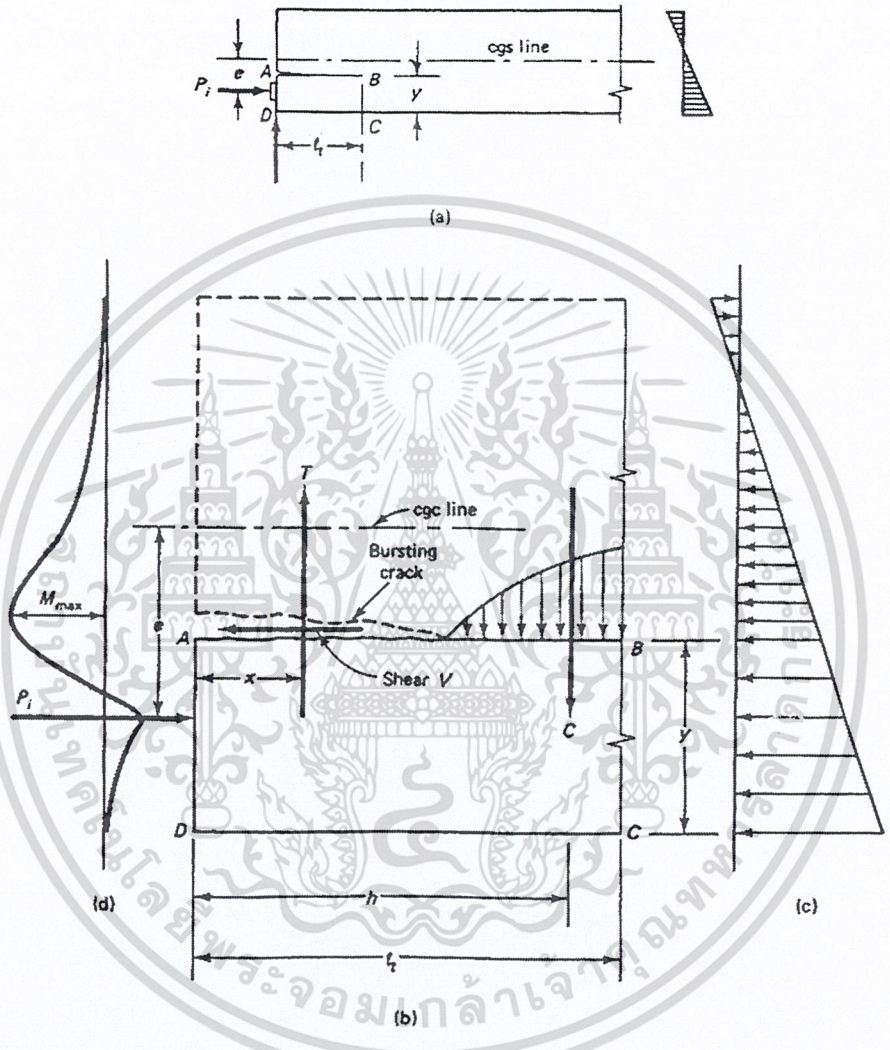
และพื้นที่ทั้งหมดของเหล็กเสริมในแนวตั้งจะเป็น

$$A_t = \frac{T}{f_s} \tag{4.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f_s \leq 1400$ กก./ซม.^{2} เพื่อควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าว

วิธีที่กล่าวมานี้ อาจจะให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดน้อยกว่าวิธี Finite Element แต่ก็เป็นผลลัพธ์ที่สมเหตุสมผล เพื่อใช้ในการออกแบบบริเวณสมอยึด ดังแสดงในตัวอย่างที่ 4.6 ในส่วน (a)



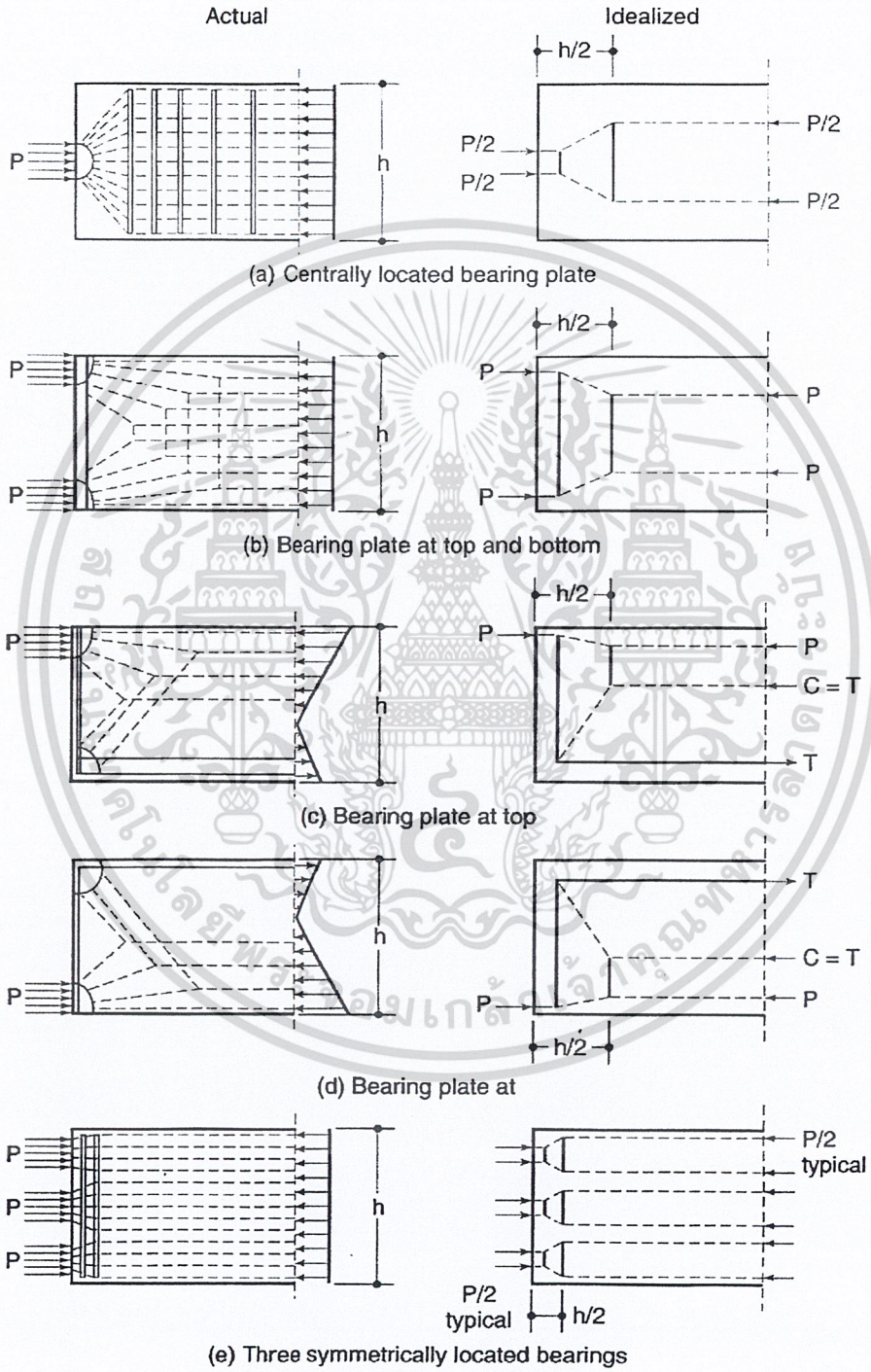
รูปที่ 4.19 - แรงที่ปลายคานอัดแรงแบบดึงที่หลัง (a) รูปด้านของคาน แสดงระยะถ่ายแรง l_t (b) free-body diagram ของบริเวณ ABCD (c) การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัด (d) โมเมนต์บนหน้าตัดเนื่องจากรอยแตกร้าว AB ที่เกิดบนระยะ y เหนือท้องคาน

4.5.3.3 วิธีค้ำยันและยึดโยง (Strut–and-Tie) เพื่อหาเหล็กเสริมรัดรอบ

วิธีนี้ใช้การวิเคราะห์ในขั้นที่หน่วยแรงสูงกว่าขอบเขตปฏิภาคเพื่อหาการกระจายของแรงในบริเวณสมอยึดโดยใช้กลุ่มของค้ำยันรับแรงอัดและยึดโยงรับแรงดึง ยึดต่อประกอบกันเป็นโครงถัก แรงอัดจะรับโดยเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

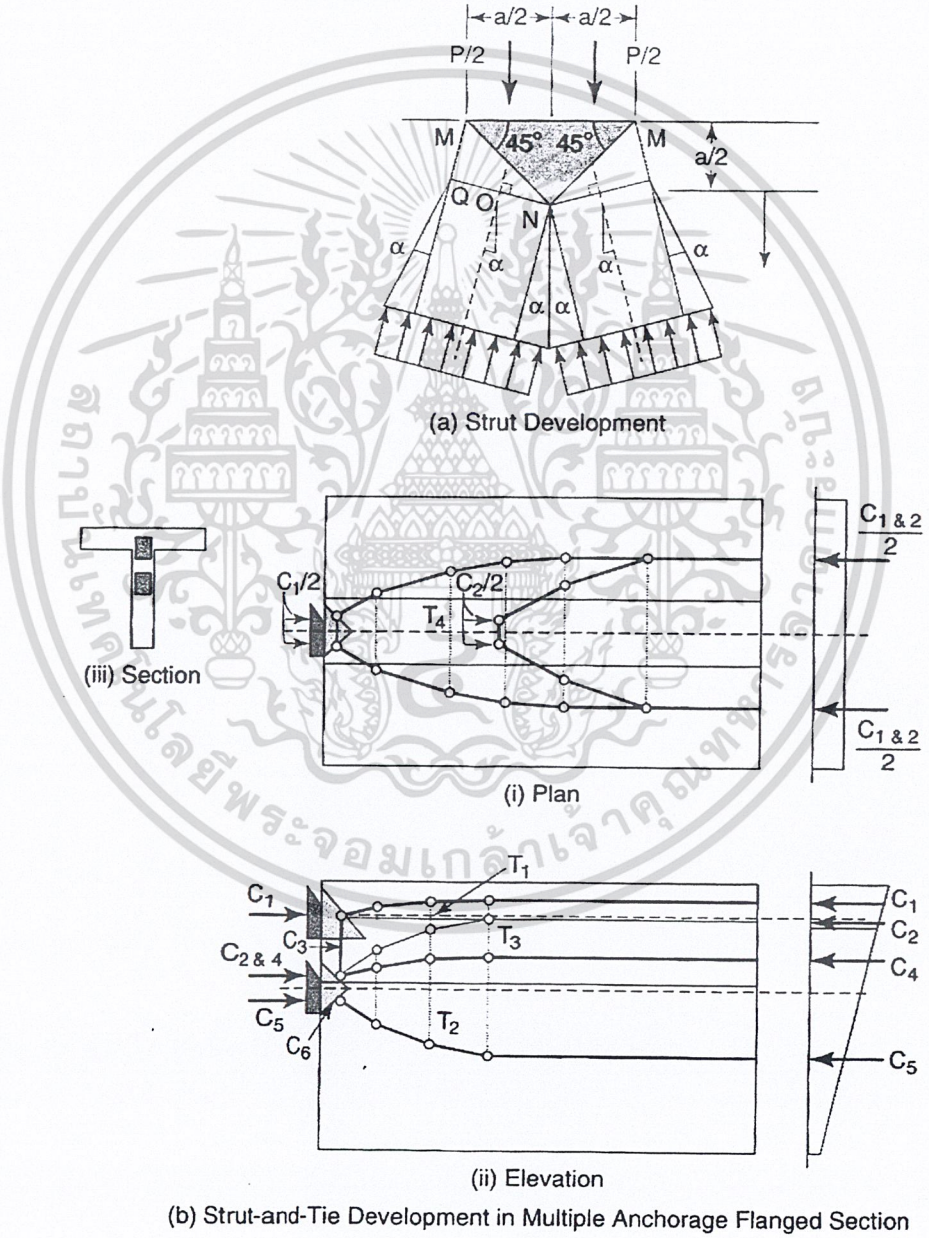
คอนกรีตและแรงดึงจะรับโดยเหล็กลูกตั้งหรือโดยเหล็กเสริมอัดแรง จะหาพื้นที่ทั้งหมดของเหล็กลูกตั้งที่ต้องใช้ได้จากกำลังครากของเหล็กเสริม รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายแรงของแรงอัด P ทั้งที่เยื้องศูนย์และไม่เยื้องศูนย์ จากแผ่นยึดไปจนถึงบริเวณทั่วไปซึ่งมีหน่วยแรงคงที่ตามหลักของ St. Venant



รูปที่ 4.20 - การกระจายแรงผ่านค้ำยันและยึดโยง

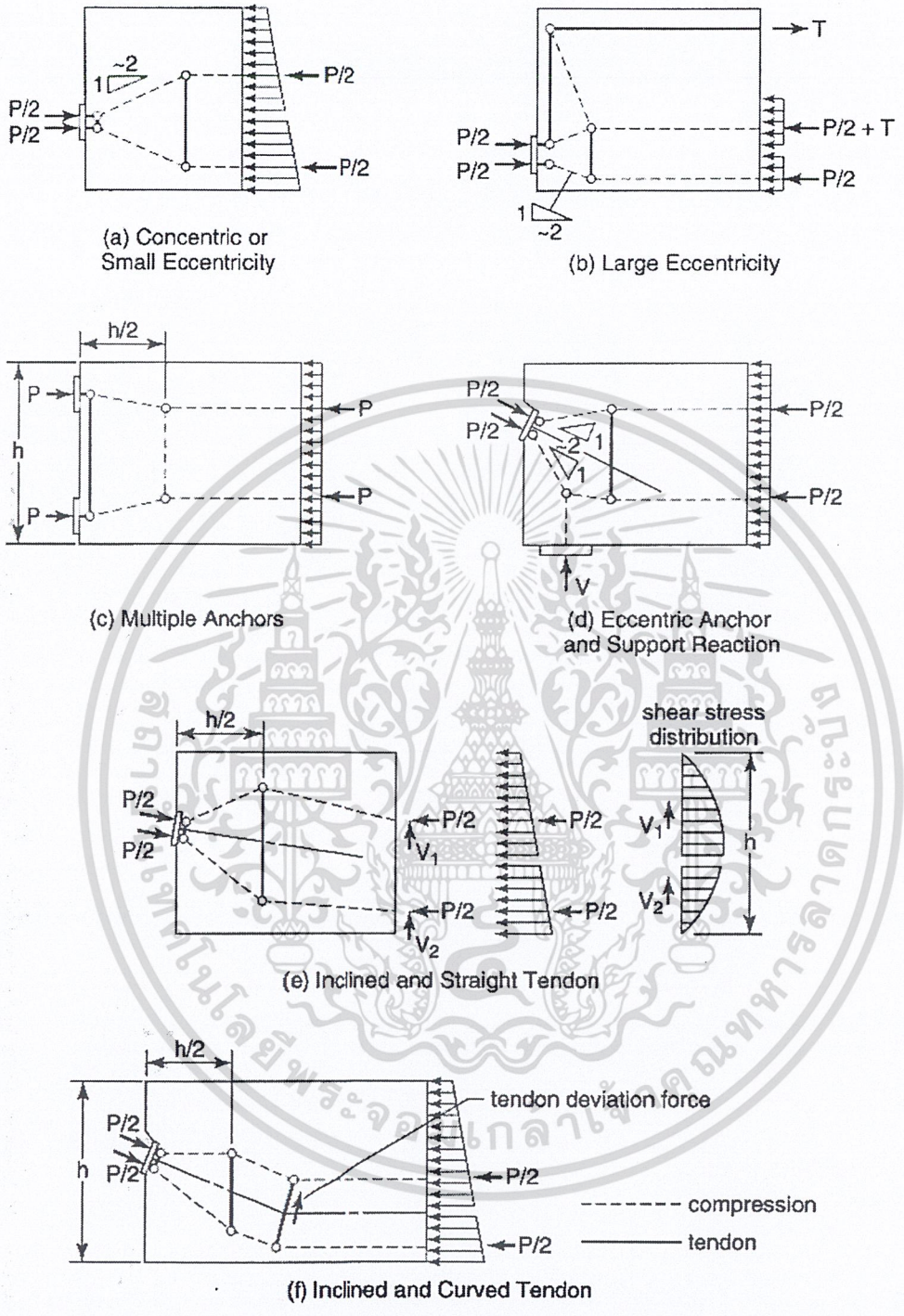
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการแตกร้าว หน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเริ่มรวมกันกระทำในแนวเส้นตรงทำให้แทนรูปแบบได้เหมือนกับเป็นค้ำยันรับแรงอัดตามแกน ค้ำยันเหล่านี้เป็นส่วนของโครงถักซึ่งยึดต่อกับส่วนยึดโยงที่มีแนวตามทิศทางของหน่วยแรงดึงหลัก ซึ่งทิศทางนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางของค้ำยัน รูปที่ 4.21(a) แสดงการสร้างแบบจำลองของค้ำยัน และรูปที่ 4.21(b) แสดงโครงถักจำลองสำหรับแผ่นยึดหลายแผ่นในคานรูปตัวที รูปที่ 4.22 แสดงผลสรุปของโครงถักจำลองในกรณีต่าง ๆ และรูปที่ 4.23 แสดงโครงถักจำลองสำหรับแรงอัดตามแกนและเยื้องศูนย์ ทั้งในหน้าตัดสี่เหลี่ยมและแบบมีปีกตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 318-99



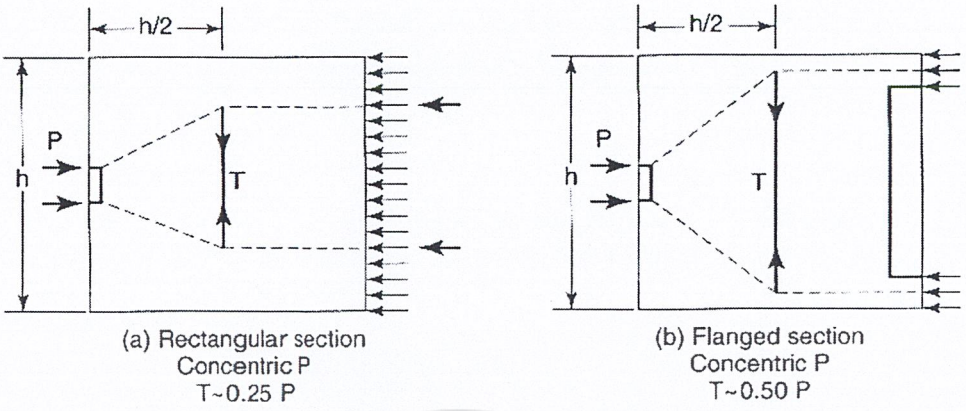
รูปที่ 4.21 – การจำลองค้ำยันและยึดโยง

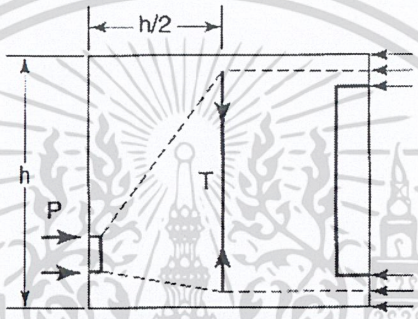
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 – โครงถักจำลองในบริเวณสมอยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.23 - โครงถักแบบรับแรงอัดตามแกนและเยื้องศูนย์ตามมาตรฐาน ACI 318-99

จะถือว่าชิ้นส่วนยึดโยงในโครงถักจำลองกระทำที่ระยะ h/2 จากแผ่นยึด สมมติฐานนี้สอดคล้องกับตำแหน่งโดยประมาณของแรงดึง T ในรูปที่ 4.19 ของวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติก จากรูปแสดงโครงถักจำลองที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าจำนวนของค้ำยัน ตัวยึดโยง และจุดต่อ จะอยู่ในดุลยพินิจของผู้ออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีทั่วไปซึ่งมีสมอยึดหลายตัว ส่วน (b) ของตัวอย่างที่ 4.6 แสดงแนวทางในการใช้โครงถักจำลองสำหรับคานรูปตัว I จะสรุปเป็นสมการคร่าว ๆ ได้ว่า

แรงดึงที่ทำให้เกิดการแตกร้าว $T_{burst} = 0.25 \sum P_{su}(1-\frac{a}{h})$ 4.15 (a)

และระยะที่เกิดรอยร้าวจากท้องคาน $d_{burst} = 0.5\ (h - 2e)$ 4.15 (b)

โดยที่ $\sum P_{su}$ = ผลรวมของแรงที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้วในเหล็กเสริมทั้งหมด

a = ความลึกของแผ่นยึดหรือกลุ่มของแผ่นยึดถ้าวางใกล้กัน

e = ระยะของแผ่นยึดกลุ่มของแผ่นยึดถ้าวางใกล้กันจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด

h = ความลึกของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถือว่าแผ่นยึดวางใกล้กัน ถ้าระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของแต่ละแผ่นไม่เกิน 1.5 เท่าของความกว้างของแผ่นยึด

4.5.3.4 หน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้

หน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ยอมให้ที่สมอยึดจะต้องมีค่าไม่เกิน ค่าที่น้อยกว่าของค่าทั้งสองจากสมการ 4.16(a) และ 4.16 (b) ตามข้างล่าง

$$f_b \leq 0.7\phi f_{ci}^{'}\sqrt{A/A_g} \qquad 4.16(a)$$

$$f_b \leq 2.25\phi f_{ci}^{'} \qquad 4.16(b)$$

โดยที่ f_b = แรงอัดสูงสุดที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่ม P_u หารด้วยพื้นที่แบกทานประสิทธิผล A_b

f_{ci} = กำลังอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรง

A = พื้นที่ใหญ่สุดของส่วนรับแรงแบกทาน ต้องอยู่ในแนวของแรงและมีรูปร่างเหมือนแผ่นรับแรงแบกทาน

A_g = พื้นที่ของแผ่นรองรับแบกทาน

A_b = พื้นที่สุทธิประสิทธิผลของแผ่นรองรับแบกทาน หาจากพื้นที่ A_g ลบด้วยพื้นที่ช่องเปิดของแผ่นรองรับแบกทาน

จะใช้สมการ 4.16(a) และ 4.16(b) ได้ก็ต่อเมื่อมีการเสริมเหล็กใน*บริเวณทั่วไป*และความยาวของบริเวณทั่วไปไม่น้อยกว่าสองเท่าของ*บริเวณเฉพาะ*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4.6 – การออกแบบเหล็กเสริมที่ปลายยึดของคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง

ออกแบบเหล็กเสริมที่ปลายยึดของคานอัดแรงแบบดึงทีหลังในตัวอย่างที่ 4.2 ใช้คอนกรีตน้ำหนักปกติมี f_c' = 345 กก./ซม.^{2} สมมติให้หน้าตัดที่ปลายคานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 45 ซม. เป็นระยะ 100 ซม. ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นรูปตัวทีเหลือแกนคานหนา 15 ซม. ให้ทำโจทย์โดยวิธี (a) การวิเคราะห์หน่วยแรงอีลาสติก (b) วิธีค้ำยันและยึดโยง พร้อมทั้งวาดรูปโครงถักด้วย กำหนดข้อมูลจากตัวอย่างที่ 4.2 ไว้ให้ตามข้างล่าง:

คานลึก 100 ซม. มีระยะ c_b = 47.85 ซม. ใช้ลวดตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 13 เส้น (A_{ps} = 0.99 ซม.^{2}/เส้น) มีระยะเยื้องศูนย์เหนือฐานรองรับ e_e = 31.72 ซม., f_{pu} = 18 620 กก./ซม.^{2}, P_i = 167 747 กก. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน เกิดหน่วยแรงบนหน้าตัดปลายคาน: f_t = 28.21 และ f_b = 158 กก./ซม.^{2}

(a) วิธีหน่วยแรงอีลาสติก

1. จัดลวดตีเกลียวให้ได้ระยะเยื้องศูนย์ = 31.72 ซม.

เนื่องจาก c_b = 47.85 ซม. ดังนั้นแนวลวดห่างจากท้องคาน = 47.85 – 31.72 = 16.13 ซม.

จัดวางลวดให้ได้แนวรวมตามข้างบน โดยจะลองจัดตามข้างล่าง

แถวที่ 1 ลวด 5 เส้น ที่ระยะ 7.0 ซม. จากท้องคาน

แถวที่ 2 ลวด 5 เส้น ที่ระยะ 17.5 ซม. จากท้องคาน

แถวที่ 3 ลวด 3 เส้น ที่ระยะ 29.0 ซม. จากท้องคาน

ระยะจากศูนย์ถ่วงของกลุ่มลวดไปยังท้องคาน = [5(7 + 17.5) + 3(29)]/13 = 16.11 ซม. ใช้ได้

2. แรงประลัยในแนวลวดแต่ละแนว และเป็นแรงแบกทานที่คอนกรีตจะต้องรับ

แถวที่ 1 แรง P_{u1} = 5(0.99)(18 620) = 92 169 กก.

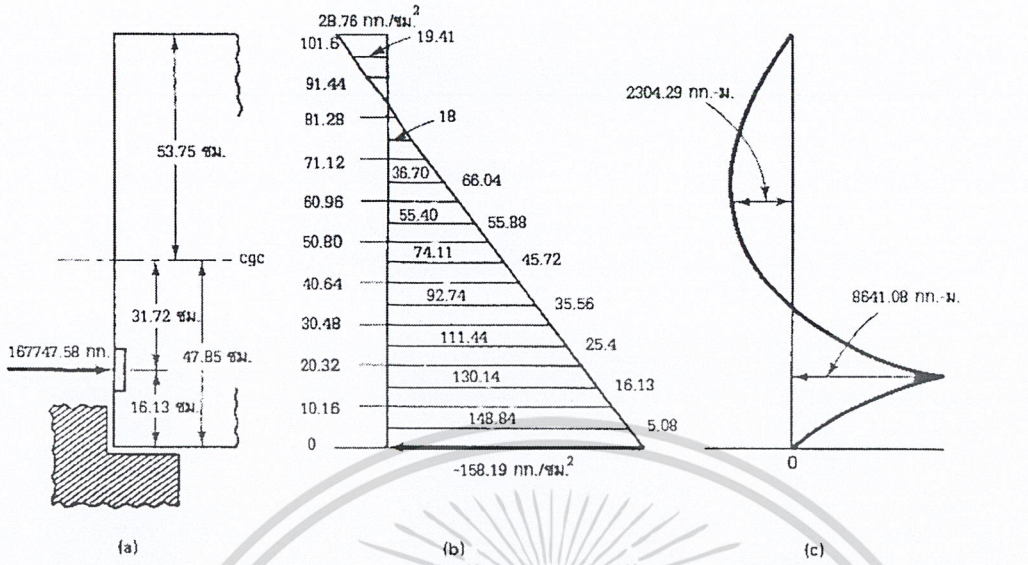
แถวที่ 2 แรง P_{u2} = 5(0.99)(18 620) = 92 169 กก.

แถวที่ 3 แรง P_{u3} = 3(0.99)(18 620) = 55 301 กก.

3. การวิเคราะห์แรงอีลาสติก

แบ่งคานตามความลึกเป็นชั้นโดยมีความหนาชั้นละ 10 ซม. และสมมติให้หน่วยแรงในคอนกรีตที่จุดศูนย์กลางของแต่ละชั้นมีค่าคงที่ตลอดทั้งชั้น จากนั้นหาโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงภายในเหล่านี้และเนื่องจากแรงจากการอัดแรง P_i รอบแนวนอนในแต่ละชั้น เพื่อหาโมเมนต์สุทธิบนหน้าตัด ตำแหน่งของโมเมนต์สุทธิสูงสุดเป็นตำแหน่งของการแตกร้าว และจะนำค่าของโมเมนต์นั้นไปใช้ในการหาเหล็กเสริมต้านการแตกร้าว ให้โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบ d จากท้องคาน (ซม.)	ความกว้างของหน้าตัด (ซม.)	หน่วยแรงที่ระนาบ (d – 5)* กก./ซม.^{2}	แรงในคอนกรีตที่ระนาบ (d – 5)* กก.	โมเมนต์ M_p รอบระนาบ (1) เนื่องจาก P_i กก.ม.	โมเมนต์ M_c รอบระนาบ (1) เนื่องจาก (4) กก.ม.	โมเมนต์สุทธิ $(M_c - M_p)$ (6) + (5) กก.ม.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0	45.72	-158.19	73 481.66	0	0	0
10.16	45.72	-148.84	69 138.44	0	+3 512.23	+3 512.23
16.13	35.56	-130.14	47 018.23	0	+8 641.08	+8 641.08
20.32	25.4	-111.44	28 758.65	-7 028.62	+12 925.22	+5 896.6
30.48	15.24	-92.74	14 359.71	-24 540.67	+25923.24	+1 382.57
40.64	15.24	-74.11	11 475.07	-41 822.83	+40 785.9	-1 036.93
50.8	15.24	-55.40	8 578.05	-59 104.99	+56 915.91	-2 189.08
60.96	15.24	-36.70	5 682.57	-76 502.36	+74 198.07	-2 304.29
71.12	15.24	-18	2 787.09	-93 784.52	+92 056.31	-1 728.21
81.28	15.24	≈0	≈0	-111 181.90	+110 721.04	-460.86
91.44	45.72	+19.41	-9 016.24	-128 464.06	+128 233.63	-230.43
101.6	45.72	+28.76	-13 359.46	-145 861.43	+145 746.22	-115.21

*d = ระยะจากระนาบที่จะหาโมเมนต์ลบด้วยครึ่งของความหนาของแต่ละระนาบ

จากรูปข้างบน จะได้โมเมนต์ภายในของคอนกรีตที่ระนาบ 10 ซม. จากท้องคาน

$M_{c10} = 148.84(10)(45)(5) = 334\ 890$ กก.ซม.

และที่ระนาบ 20 ซม. จากท้องคาน

$$M_{c20} = 148.84(10)(45)(15) + 130.14(10)\left(\frac{40+25}{2}\right)(5) = 1\ 216\ 147 \text{ กก.ซม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์เนื่องจากแรงอัดที่ระนาบ 20 ซม. จากท้องคาน

M_{p20} = - 167 747(20 – 16.13) = - 649 181 กก.ซม.

ดังนั้นโมเมนต์สุทธิที่ตำแหน่ง คือ 1 216 147 – 649 181 = 566 966 กก.ซม.

ทำซ้ำด้วยวิธีนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จะได้ค่าโมเมนต์สุทธิบนระนาบอื่น ๆ ตามที่แสดงไว้ในตารางข้างบน ซึ่งจะได้ค่าโมเมนต์สุทธิสูงสุด $+M_{max}$ = 8641กก.ม. ที่ระนาบ 16.13 ซม. เหนือท้องคาน (รอยร้าวปริตามแนวแกน) และ $-M_{max}$ = 2304 กก.ม. ที่ระนาบ 61 ซม. เหนือท้องคาน (รอยร้าวปริด้านข้าง)

4. *การออกแบบเหล็กเสริมบริเวณสมอยึด*

จากสมการ 4.13 ถ้าให้จุดศูนย์กลางของแรงดึงในแนวดิ่ง T อยู่ที่ระยะ x ≈ 37.5 ซม. จะได้

$$T_b = \frac{M_{\max}}{h-x} = \frac{+8641.08(100)}{100-37.5} = 13\,826 \text{ กก.}$$

หน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ในเหล็กเสริม f_s = 1400 กก./ซม.^{2} (มาตรฐาน ACI ยอมให้ใช้ถึง $0.6f_y$ = 2400 กก./ซม.^{2})

ปริมาณเหล็กเสริมต้านการแตกร้าวตามแนวแกน (bursting zone)

$$A_t = \frac{T_b}{f_s} = \frac{13\,826}{1400} = 9.88 \text{ ซม.}^2$$

ลอง DB10 รัดรอบ พื้นที่ต่อเส้น = 2 (0.78) = 1.56 ซม.^{2}

จะต้องใช้เหล็กลูกตั้งอย่างน้อยจำนวน = 9.88/1.56 = 6.33

ดังนั้น ใช้ DB10 จำนวน 6 เส้น นอกเหนือไปจากเหล็กลูกตั้งที่ต้องใช้รับแรงเฉือน

แรงในบริเวณที่เกิดการปริด้านข้าง (spalling zone)

$$T_s = \frac{M_{\max}}{h-x} = \frac{-2304.29(100)}{100-37.5} = 3686.86 \text{ กก.}$$

$$A_t = \frac{T_s}{f_s} = \frac{3686.86}{1400} = 2.63 \text{ ซม.}^2$$

ดังนั้น ใช้ DB10 จำนวน 3 เส้น

จะได้จำนวนเหล็กลูกตั้ง DB10 ทั้งหมด = 6.33 + 2.63 + 4 ≈ 12.96

ดังนั้น ใช้เหล็กลูกตั้ง DB10 รัดรอบจำนวน 12 เส้น วางเหล็กต่อเนื่องเข้าไปในบริเวณรับแรงอัดตามที่แสดงในรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ระยะเรียงเป็น 7.5 ซม. วางเหล็กลูกตั้งตัวแรก 7.5 ซม. จากปลายคาน และให้เสริมตามแนวนอนด้วยตะแกรงเหล็ก DB10 ยาว 25 ซม. ระยะเรียง 7.5 ซม. วางห่าง 5 ซม. จากปลายคาน เนื่องจากการแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในแนวดิ่งและแนวนอน อาจเสริมเหล็กปลอกเกลียวเพิ่มบริเวณสมอยึดถ้าบริษัทผู้ผลิตแนะนำ

ขั้นตอนต่อไป จะต้องตรวจสอบหน่วยแรงแบกทานที่แผ่นยึด

(b) วิธีโครงถักเสมือน

1. *จัดลวดตีเกลียวให้ได้ระยะเยื้องศูนย์ = 31.72 ซม.*

เนื่องจาก c_b = 47.85 ซม. ดังนั้นแนวลวดห่างจากท้องคาน = 47.85 – 31.72 = 16.13 ซม.

จัดวางลวดให้ได้แนวรวมตามข้างบน โดยจะลองจัดตามข้างล่าง

แถวที่ 1 ลวด 5 เส้น ที่ระยะ 7.0 ซม. จากท้องคาน

แถวที่ 2 ลวด 5 เส้น ที่ระยะ 17.5 ซม. จากท้องคาน

แถวที่ 3 ลวด 3 เส้น ที่ระยะ 29.0 ซม. จากท้องคาน

ระยะจากศูนย์ถ่วงของกลุ่มลวดไปยังท้องคาน = [5(7 + 17.5) + 3(29)]/13 = 16.11 ซม. ใช้ได้

2. *แรงประลัยในแนวลวดแต่ละแนว และเป็นแรงแบกทานที่คอนกรีตจะต้องรับ*

แถวที่ 1 แรง P_{u1} = 5(0.99)(18 620) = 92 169 กก.

แถวที่ 2 แรง P_{u2} = 5(0.99)(18 620) = 92 169 กก.

แถวที่ 3 แรง P_{u3} = 3(0.99)(18 620) = 55 301 กก.

แรงอัดประลัยทั้งหมด = 92 169 + 92 169 + 55 301 = 239 639 กก.

พื้นที่ทั้งหมดของแผ่นยึดที่รองรับสมอยึดแบบ Supreme 13-chucks

A_g = 35(28) + 15(10) = 1130 ซม.^{2}

ทำให้เกิดหน่วยแรงแบกทาน f_b = 239 639/1130 = 212.1 กก./ซม.^{2}

จากสมการ 4.16(a) และ (b) หน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ยอมให้บนคอนกรีต คือ

$$f_b \le 0.7\phi f_{ci}^{'}\sqrt{A/A_g}$$

$$f_b \le 2.25\phi f_{ci}^{'}$$

ให้กำลังของคอนกรีตขณะถ่ายแรง $f_{ci}^{'} = 0.75f_c^{'} = 0.75(345) = 258.75$ กก./ซม.^{2}

พื้นที่ของเนื้อคอนกรีตร่วมศูนย์กับแผ่นยึด A ≅ 45(36) + 25(18) = 2070 ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $\sqrt{A/A_g} = \sqrt{2070/1130} = 1.35$

ดังนั้นหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้,

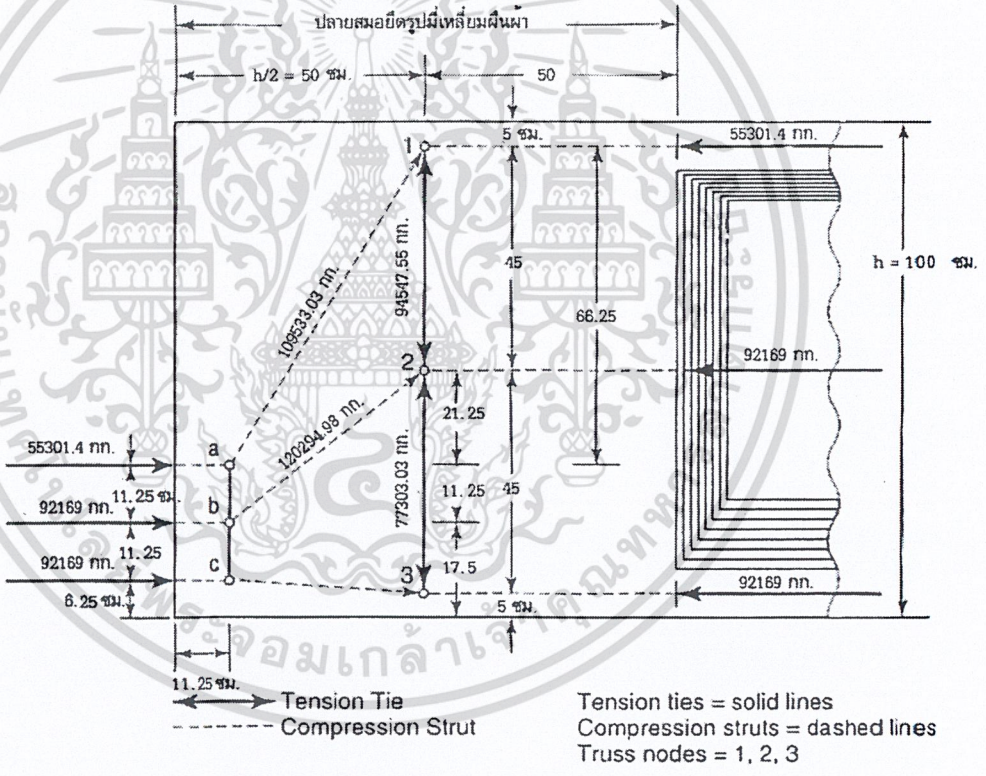
$f_b = 0.7(0.9)(258.75)(1.35) = 220.6$ กก./ซม.^{2} > 212.1 กก./ซม.^{2} ใช้ได้

3. *วาดแบบโครงถักเสมือน*

จากรูปที่ 4.21(a) ระยะห่าง a ระหว่างแรง P_{u1} และ P_{u3} = 29 – 7 = 22 ซม.

ดังนั้น ระยะ $a/2$ หลังสมอยึด = 22/2 = 11 ซม.

สร้างโครงถักเสมือนมีรูปแบบตามรูปข้างล่าง



วิเคราะห์โครงถักด้วยสมการสมดุลจะได้แรงภายในชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

แรงดึงในชิ้นส่วน 1-2 $= 55301.4(\frac{67.31}{39.37}) = 94547.55$ กก.

แรงดึงในชิ้นส่วน 3-2 $= 92169(\frac{33.02}{39.37}) = 77303.03$ กก.

นำค่าที่มากกว่าไปใช้ในการออกแบบเหล็กลูกตั้งรับแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ DB10 รัดรอบ ให้ลูกตั้งแต่ละตัวมีกำลังรับแรงดึง

$= \phi f_y A_v = 0.9(4000)(1.56) = 5616$ กก.

จะต้องใช้เหล็กลูกตั้งจำนวน = 94 547/5616 = 16.8

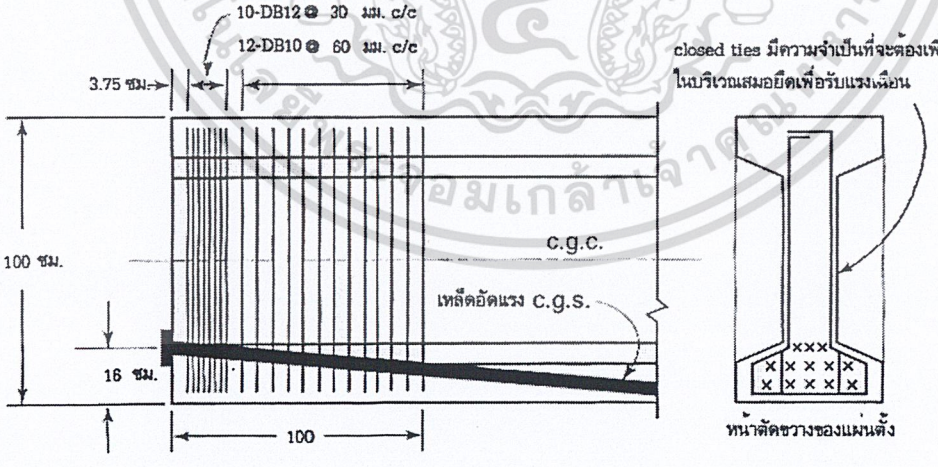
สำหรับชิ้นส่วน a-b-c ในรูปข้างบน ให้ใช้แรงดึงภายใน = 77 303 กก. ในการออกแบบเหล็กลูกตั้งขนาด DB12 ในบริเวณใกล้กับสมอยึด โดยวางเหล็กลูกตั้งตัวแรกที่ระยะ 3.75 ซม. จากแผ่นยึดเพื่อถ่ายแรงจากสมอยึดมายังคอนกรีต

จำนวนของเหล็กลูกตั้ง $= \dfrac{77\ 303}{0.9(4000)(2\times 1.13)} = 9.50$

ใช้เหล็กลูกตั้ง DB12 จำนวน 10 เส้นที่ระยะเรียง 3 ซม. โดยให้ลูกตั้งตัวแรกห่าง 3.75 ซม. จากแผ่นยึด เป็นระยะทั้งหมด = 3.75 + 9(3) = 30.75 ซม. เหลือระยะที่จะวาง DB10 = 100 – 30.75 = 69.5 ซม. ซึ่งถ้าใช้ระยะเรียง 6 ซม. จะต้องใช้จำนวน = 69.5/6 = 12 ตัว

จะเห็นว่าวิธีนี้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าวิธีวิเคราะห์แรงอีลาสติก ดังนั้นจะเลือกใช้เหล็กเสริมจากวิธีนี้ รายละเอียดของการเสริมเหล็กมีแสดงไว้ในรูปข้างล่าง

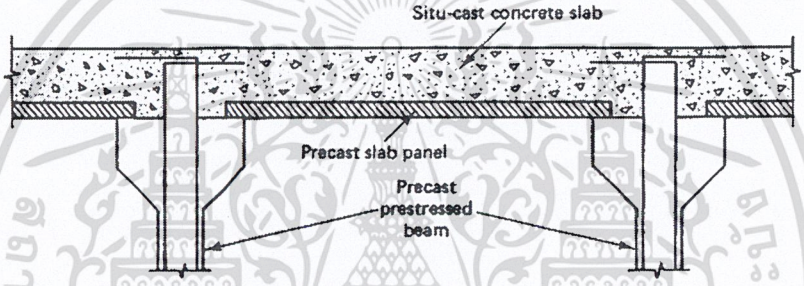
ในกรณีที่มีเหล็กเสริมอัดแรงหลายแนว จะต้องสร้างแนวค้ำยันเสมือนให้ครอบคลุมเหล็กเสริมอัดแรงทุกแนว ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างที่ 4.7 ถ้าวิเคราะห์โดยการแทนแนวเหล่านั้นด้วยแนวเดียว จะได้ผลลัพธ์ซึ่งให้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าที่จำเป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การออกแบบรับแรงดัดของคานเชิงประกอบ

หน้าตัดเชิงประกอบโดยทั่วไป จะเป็นคานอัดแรงสำเร็จรูปรองรับแผ่นพื้นหล่อในที่ และร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุก จุดเด่นของหน้าตัดเชิงประกอบก็คือ การที่ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จจะทำหน้าที่เสริมในการเป็นนั่งร้านและไม้แบบให้กับแผ่นพื้นที่จะหล่อในที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ในบางครั้งจะมีการค้ำยันเพื่อช่วยชิ้นส่วนสำเร็จรูปรับแรงในระหว่างการเทคอนกรีตและการบ่มแผ่นพื้น ในกรณีเช่นนี้ น้ำหนักของแผ่นพื้นจะกระทำบนหน้าตัดเชิงประกอบ ซึ่งมีค่าโมดูลัสหน้าตัดสูงกว่าหน้าตัดของคานสำเร็จรูปมาก ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงผลของการค้ำยันในการหาหน่วยแรงในคอนกรีต รูปที่ 4.25 แสดงการกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตในองค์อาคารเชิงประกอบ



รูปที่ 4.24 - การก่อสร้างแบบเชิงประกอบของคอนกรีตอัดแรง

4.6.1 พื้นที่ไม่มีการค้ำยัน

จากสมการที่ 4.2a และ b หน่วยแรงในคอนกรีตก่อนที่จะเทแผ่นพื้น ได้แก่

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D+M_{SD}}{S^t} \qquad (4.17)$$

และ $$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D+M_{SD}}{S_b} \qquad (4.18)$$

โดยที่ S^t และ S_b เป็นโมดูลัสหน้าตัดของคานสำเร็จรูปแต่อย่างเดียว และ M_{SD} เป็นโมเมนต์เพิ่มเติมเนื่องจากพื้นคอนกรีต

หลังจากที่พื้นคอนกรีตหล่อในที่แข็งตัว ก็จะเกิดพฤติกรรมเชิงประกอบช่วยกันรับน้ำหนักบรรทุก ค่าโมดูลัสหน้าตัดใหม่จะเพิ่มเป็น S_c^t และ S_{cb} และแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด cgc ก็จะเลื่อนสูงขึ้นไปหาผิวบน หน่วยแรงในคอนกรีตจากสมการ 4.17 และ 4.18 สำหรับผิวบนและผิวล่างของคานหล่อสำเร็จในหน้าตัดเชิงประกอบจะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D+M_{SD}}{S^t}-\frac{M_{CSD}+M_L}{S_c^t} \qquad (4.19a)$$

และ $$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D+M_{SD}}{S_b}+\frac{M_{CSD}+M_L}{S_{cb}} \qquad (4.19b)$$

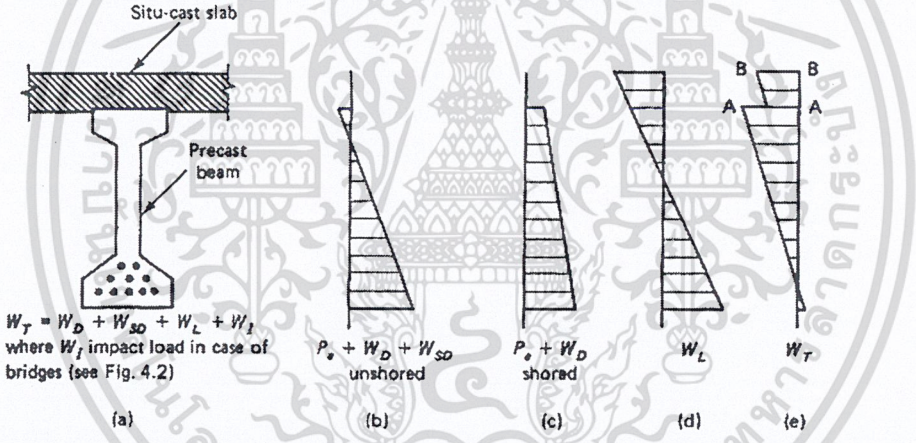
โดยที่ M_{SCD} เป็นโมเมนต์เพิ่มเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมหลังจากการติดตั้ง S_c^t และ S_{cb} เป็นโมดุลัสหน้าตัดของหน้าตัดเชิงประกอบที่ผิวบนและล่างของหน้าตัดคอนกรีตสำเร็จรูป

หน่วยแรงที่ผิวบนและผิวล่างของแผ่นพื้นหล่อในที่ (ระดับ BB และ AA ในรูปที่ 4.25(e) ได้แก่

$$f^{ts} = -\frac{M_{CSD}+M_L}{S_{cb}^t} \qquad (4.20a)$$

และ $$f_{bs} = -\frac{M_{CSD}+M_L}{S_{bcb}} \qquad (4.20b)$$

โดยที่ $M_{CSD} + M_L$ เป็นโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นบนหน้าตัดเชิงประกอบ และ S^t_{cb} และ S_{bcb} เป็นโมดูลัสหน้าตัดของหน้าตัดเชิงประกอบ ที่ผิวบน AAและผิวล่าง BBของแผ่นพื้นในรูปที่ 4.32(e)



รูปที่ 4.25 - การกระจายหน่วยแรงดัดในคานเชิงประกอบ (a) คานเชิงประกอบ (b) การกระจายหน่วยแรงในคอนกรีต (c) การกระจายหน่วยแรงในกรณีมีค้ำยัน (d) หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรในกรณีมีค้ำยัน หรือน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมสำหรับกรณีที่ไม่มีค้ำยัน (e) หน่วยแรงสุดท้ายเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด

4.6.2 พื้นที่มีการค้ำยันเต็มที่

ในกรณีที่มีการค้ำยันแผ่นพื้นหล่อในที่ตลอดเวลาจนกระทั่งแข็งตัวเป็นหน้าตัดเชิงประกอบช่วยคานสำเร็จรูปรับน้ำหนักบรรทุกได้ หน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตก่อนการค้ำยันและก่อนการเทพื้น จากสมการที่ 4.18 และ 4.19

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t} \qquad (4.21a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b} \qquad (4.21b)$$

หลังจากหล่อแผ่นพื้นและแผ่นพื้นแข็งตัวจนเกิดพฤติกรรมเชิงประกอบ สมการที่ 4.19a และ b สำหรับคานที่มีการค้ำยันหลังจากการติดตั้งแล้วจะกลายเป็น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t}-\frac{M_{SD}+M_{CSD}+M_L}{S_c^t} \qquad (4.22a)$$

และ $$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b}+\frac{M_{SD}+M_{CSD}+M_L}{S_{cb}} \qquad (4.22b)$$

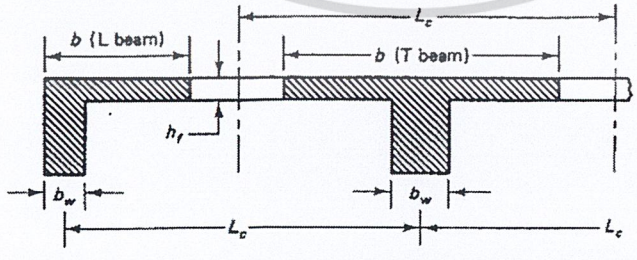
อย่าลืมตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนในแนวนอนที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างคานสำเร็จรูปกับแผ่นพื้นหล่อในที่ตามวิธีในบทที่ 5

4.6.3 ความกว้างประสิทธิผลของปีก

เพื่อที่จะหาพฤติกรรมขององค์อาคารเชิงประกอบในการรับหน่วยแรงดัด จะต้องรู้ความกว้างของแผ่นพื้นที่จะนำมาเพิ่มสติฟเนสในพฤติกรรมเชิงประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.1 แสดงข้อกำหนดในการหาความกว้างประสิทธิผลของปีกในพฤติกรรมเชิงประกอบตามมาตรฐานการออกแบบ ของ ACI และ AASHTO ถ้าคอนกรีตในแผ่นพื้นมีกำลังแตกต่างจากคอนกรีตในคานสำเร็จรูป จะต้องดัดแปลงความกว้าง b ให้รวมผลของความแตกต่างของโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อให้เกิดความสอดคล้องของหน่วยการหดตัวของวัสดุทั้งสองที่แนวต่อ ความกว้างของแผ่นพื้นเพื่อใช้ในหาโมเมนต์ความเฉื่อย I_{cc} ของหน้าตัดเชิงประกอบจะดัดแปลงเป็น

$$b_m = \frac{E_{ct}}{E_c}(b) = n_c b \qquad (4.23)$$

โดยที่ E_c และ E_{ct} เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในคานสำเร็จรูปและแผ่นพื้นตามลำดับ หลังจากได้ b_m แล้วจะถือว่าหน้าตัดทั้งหมดทำด้วยคอนกรีตที่กำลังสูงกว่า



รูปที่ 4.26 – ความกว้างประสิทธิผลของปีกของหน้าตัดประกอบ

ตารางที่ 4.1 – ความกว้างประสิทธิผลของปีกตามมาตรฐาน ACI และ AASHTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ช่วงปลาย	ช่วงอื่น
ใช้ค่าที่น้อยสุด	$b_w + 6h_f$	$b_w + 16h_f$*
	$\frac{1}{2}(b_w + L_c)$	L_c
	$b_w + (L/12)$	$L/4$

* สำหรับ AASHTO แทนค่า $16h_f$ ด้วย $12h_f$

L = ความยาวช่วงของคาน

4.7 สรุปขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

1. กำหนด น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม w_{SD} น้ำหนักบรรทุกจร w_L ความยาวช่วงและความลึกของคาน กำลังของวัสดุที่ใช้ ได้แก่ f_{pu} , f'_c ชนิดของคอนกรีต และชนิดของการอัดแรงว่าเป็นแบบอัดก่อนหรืออัดทีหลัง
2. สมมติน้ำหนักคาน w_D แล้วหาโมเมนต์ M_D, M_{SD} และ M_L
3. หา f_{pi} , f'_{ci} , f_{ti} , f_t และ f_c โดยที่ $f_{pi} = 0.70f_{pu}$, $f_{ci} = 0.60f'_c$, $f_{ti} = 1.6\sqrt{f'_c}$ สำหรับหน้าตัดเหนือฐานรองรับ $f_c = 0.45f'_c$ หรือ $0.60f'_c$ ตามข้อกำหนดและ $f_t = 1.6\sqrt{f'_c}$ ถึง $3.2\sqrt{f'_c}$
4. หาการเสื่อมลดของแรงอัด Δf_{pT} = ES + RE + SH + CR +AN สำหรับชนิดของการอัดแรงที่ใช้ และหาหน่วยแรงสุทธิ $f_{pe} = f_{ps} - \Delta f_{PT}$
5. หาค่าโมดูลัสหน้าตัดที่น้อยสุดที่ต้องการจากหน่วยแรงที่ยอมให้ในคอนกรีตที่ผิวด้านบนและล่าง

   (a) สำหรับเหล็กเสริมวางแนวโค้งหรือหักงอ ใช้หน้าตัดที่กลางช่วงในการหา

$$S^t \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c}$$

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}}$$

   โดยที่ $\gamma = \frac{P_c}{P_t}$

   (b) สำหรับเหล็กเสริมวางแนวตรงตลอด ใช้หน้าตัดเหนือฐานรองรับ

$$S^t \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c}$$

$$S_b \geq \frac{M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}}$$

6. เลือกหน้าตัดเบื้องต้นให้มีโมดูลัสหน้าตัดใกล้เคียงกับค่าที่หามาได้จากขั้นตอนที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หาหน่วยแรงในคอนกรีตขณะถ่ายแรง สำหรับ (a) ที่ตำแหน่งวิกฤตในช่วง (โดยทั่วไปใช้ที่กลางช่วงหรือที่ระยะ 0.4 ของความยาวช่วง) (b) ที่ฐานรองรับ และ (c) ที่ตำแหน่งบนช่วง ถ้าใช้ทั้งเหล็กเสริมในแนวตรงและโค้งร่วมกัน

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t}$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b}$$

ถ้าหน่วยแรงที่ได้สูงกว่าค่าที่ยอมให้ ต้องเปลี่ยนหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น หรือเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ e_c หรือ e_e หรือทั้งคู่

8. หาหน่วยแรงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ตามขั้นตอนที่ 7

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_T}{S^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_T}{S_b}$$

โดยที่ $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$ ถ้าหน่วยแรงที่ได้สูงกว่าค่าที่ยอมให้ ต้องเปลี่ยนหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น หรือเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ e_c หรือ e_e หรือทั้งคู่

9. ในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมอัดแรงหลายเส้น จะต้องกำหนดขอบเขตแนวเหล็กเสริมเพื่อไม่ให้เกิดแรงดึงขึ้นในหน้าตัด $e_b = (k_b + a_{min})$ และ $e_t = (a_{max} - k_t)$ โดยที่ $a_{min} = M_D/P_i$ และ $a_{max} = M_T/P_e$ แต่ถ้ายอมให้เกิดแรงดึงได้บ้าง เพิ่มขอบเขตด้านล่างและด้านบนด้วย

$$e_b' = \frac{f^{(t)} A_c k_b}{P_i}$$

และ

$$e_t' = \frac{f_{(b)} A_c k_t}{P_e}$$

โดยที่ $f^{(t)}$ และ $f_{(b)}$ เป็น หน่วยแรงที่ยอมให้ในคอนกรีต

10. หาหน่วยแรงบริเวณสมอยึด และออกแบบเหล็กเสริมที่จำเป็นเพื่อป้องกันการแตกร้าว หาระยะฝังน้อยสุดที่ต้องการ

$$\ell_d = \frac{1}{70}\left(f_{ps} - \frac{2}{3} f_{pe}\right) d_b$$

โดยมีระยะถ่ายแรง $l_t = \frac{f_{pe} d_b}{210}$ โดยที่ f_{pe} มีหน่วยเป็น กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง ออกแบบเหล็กเสริมในบริเวณแผ่นยึด โดยใช้วิธีโครงถักจำลองหาแร ึงที่ต้องการในตัวยึดโยง แล้วนำไปออกแบบเหล็กลูกตั้งรัดรอบเหล็กเสริมอัดแรง

ในคานอัดแรงแบบดึงก่อน หาเหล็กลูกตั้งจากสมการ $A_t = 0.021\frac{P_i h}{f_s \ell_t}$

11. หาหน่วยแรงในพฤติกรรมเชิงประกอบ เปลี่ยนหน้าตัดคานถ้าหน่วยแรงที่ได้สูงกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ทั้งในคานสำเร็จรูปและในแผ่นพื้นหล่อในที่ ในการหาโมดูลัสหน้าตัดของหน้าตัดเชิงประกอบ ให้ใช้ความกว้างประสิทธิผลดัดแปลง $b_m = (E_{ct}/E_c)b$ สำหรับความกว้างของปีกส่วนบน

(a) ***สำหรับแผ่นพื้นที่ไม่มีการค้ำยัน*** ก่อนที่จะหล่อแผ่นพื้น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D+M_{SD}}{S^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D+M_{SD}}{S_b}$$

หลังจากที่หล่อแผ่นพื้นและบ่มจนช่วยรับน้ำหนักบรรทุกได้ หน่วยแรงที่ผิวบนและล่างของคานสำเร็จรูปจะกลายเป็น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D+M_{SD}}{S^t}-\frac{M_{CSD}+M_L}{S_c^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D+M_{SD}}{S_b}+\frac{M_{CSD}+M_L}{S_{cb}}$$

โดยที่ S^t_c และ S_{cb} เป็นโมดูลัสหน้าตัดของหน้าตัดเชิงประกอบที่ระดับผิวบนและล่างของคานสำเร็จรูป และ M_L จะรวมค่า M_l ด้วย ถ้ามีน้ำหนักกระแทกกระทำ

หน่วยแรงที่ระดับผิวบนและล่างของแผ่นพื้นหล่อในที่เป็น

$$f^{ts} = -\frac{M_{CSD}+M_L}{S^t_{cb}}$$

$$f_{bs} = -\frac{M_{CSD}+M_L}{S_{bcb}}$$

โดยที่ S^t_{cb} และ S_{bcb} เป็นโมดูลัสหน้าตัดของหน้าตัดเชิงประกอบที่ระดับผิวบนและล่างของพื้นหล่อในที่

(b) ***สำหรับแผ่นพื้นที่มีการค้ำยัน*** ก่อนการค้ำยันและก่อนที่จะหล่อแผ่นพื้น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b}$$

หลังจากหล่อและบ่มแผ่นพื้นจนช่วยรับน้ำหนักบรรทุกได้

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t}-\frac{M_{SD}+M_{CSD}+M_L}{S_c^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_c}+\frac{M_{SD}+M_{CSD}+M_L}{S_{cb}}$$

โดยที่จะหาความกว้างประสิทธิผลของปีกบนของหน้าตัดเชิงประกอบได้จากข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI หรือ AASHTO

M_D = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคานสำเร็จรูป

M_{SD} = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของแผ่นพื้นและสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ

M_{CSD} = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมของหน้าตัดเชิงประกอบ

12. หากำลังของหน้าตัดที่สภาวะจำกัดของการวิบัติ และหากำลังรับแรงเฉือนและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4.7 - ออกแบบคานเชิงประกอบ

สะพานช่วงเดี่ยวรับสองช่องจราจร มีช่วงยาว 19.5 ม. ความกว้างของสะพานวัดจากศูนย์กลางของคานภายนอกเท่ากับ 8.6 ม. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของคานภายในเป็น 2.15 ม. จงออกแบบคานภายในเป็นคานเชิงประกอบ ให้รับน้ำหนักบรรทุกของ AASHTO HS20-44 โดยไม่มีการค้ำยันพื้นของสะพานระหว่างการก่อสร้าง จงหาระยะเยื้องศูนย์และขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรง และออกแบบเหล็กเสริมในบริเวณสมอยึด กำหนดวัสดุที่ใช้ดังต่อไปนี้

คอนกรีต: คานสำเร็จรูป $f_c' = 350$ กก./ซม.^{2} คอนกรีตน้ำหนักปกติ

พื้นสะพานหนา 15 ซม. $f_c' = 210$ กก./ซม.^{2} คอนกรีตน้ำหนักปกติ

$f_{ci}' = 280$ กก./ซม.^{2}

$f_{ci} = 0.6 f_{ci}' = 0.6(280) = -168$ กก./ซม.^{2}

$f_c = 0.45 f_c' = 0.45(350) = -157.5$ กก./ซม.^{2}

$f_{ti} = 0.80\sqrt{f_{ci}'} = 13.38$ กก./ซม.^{2}

$f_t = 1.60\sqrt{f_c'} = 30$ กก./ซม.^{2}

เหล็กเสริมอัดแรง: $f_{pu} = 18\,990$ กก./ซม.^{2}

$f_{py} = 0.90 f_{pu} = 0.9(18\,990) = 17\,091$ กก./ซม.^{2}

$f_{pi} = 0.70 f_{pu} = 0.7(18\,990) = 13\,293$ กก./ซม.^{2}

หลังจากการเสื่อมลด $f_{pe} = 0.80 f_{pi} = 0.8(13\,293) = 10\,634.4$ กก./ซม.^{2}

วาดการกระจายเหล็กเสริมอัดแรงสำหรับหน้าตัดที่กลางช่วงและปลายคาน โดยใช้ค่าโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรรวมผลของการกระแทกตาม AASHTO HS20-44 ต่อคานตัวในหนึ่งตัวที่มีช่วงสะพานยาว 19.5 ม. = 107 000 กก.ม.

---

1. โมเมนต์

เมื่อรู้ระยะห่างระหว่างคานและความยาวช่วง ก็จะหาโมเมนต์เนื่องจากพื้นหล่อในที่ได้ ถ้าให้สมมติแกนคานหนา 17.5 ซม. จะได้ระยะช่วงว่างระหว่างแกนคาน = 2.15 – 0.175 = 1.975 ม. สมมุติพื้นสะพานหนา 15 ซม. ประกอบด้วยพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 ซม. และคอนกรีตทับหน้าหนา 10 ซม. ที่กลางช่วงมีครีบคอนกรีตหนา 20 ซม. ลึก 120 ซม. หล่อเป็นเนื้อเดียวกับแผ่นพื้น จะได้

น้ำหนักของครีบ $= 0.2(1.20)(1.975)(2400) = 1137.6$ กก.

น้ำหนักของแบบหล่อพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 ซม = $0.05(2.15)(2400) = 258$ กก./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าหนา 10 ซม. = 0.10(2.15)(2400) = 516 กก./ม.

$$M_{SD1} = \frac{258(19.5)^2}{8} = 12\ 263.06 \text{ กก.ม.}$$

M_{CSD} = โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมบนคานเชิงประกอบ = 0

$$M_{SD2} = \frac{PL}{4} + \frac{w_{SD}L^2}{8} = \frac{1137.6(19.5)}{4} + \frac{516(19.5)^2}{8}$$

= 5545.8 + 24 526.12 = 30 071.92 กก.ม.

M_{SD} ทั้งหมด = 12 263.06 + 30 071.92 = 42 334.98 กก.ม.

2. โมดูลัสหน้าตัดน้อยสุดและการเลือกหน้าตัดเบื้องต้น

$$\gamma = f_{pe}/f_{pi} = 0.8$$

$$S^t \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} + f_c}$$

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{f_t + \gamma f_{ci}}$$

สมมุติให้น้ำหนักคานคอนกรีตสำเร็จรูป = 870 กก./ม.ดังนั้น

$$M_D = \frac{870(19.5)^2}{8} = 41\ 352.19 \text{ กก.ม.}$$

$$Min S^t = \frac{(1-0.80)41\ 352.19 + 42\ 334.98 + 107\ 000}{0.80(13.38) - (-157.5)} \times 10^2 = 93\ 720 \text{ ซม.}^3$$

$$Min S_b = \frac{(1-0.80)41\ 352.19 + 42\ 334.98 + 107\ 000}{30 - 0.80(-168)} \times 10^2 = 95\ 889 \text{ ซม.}^3$$

โมดูลัสหน้าตัดที่ผิวบนในหน้าตัดเชิงประกอบโดยปกติจะมากกว่าโมดูลัสหน้าตัดที่ผิวล่าง ดังนั้นจะเลือกคานสำเร็จรูปให้มีโมดูลัสหน้าตัด S_b = 95 889 ซม.^{3}

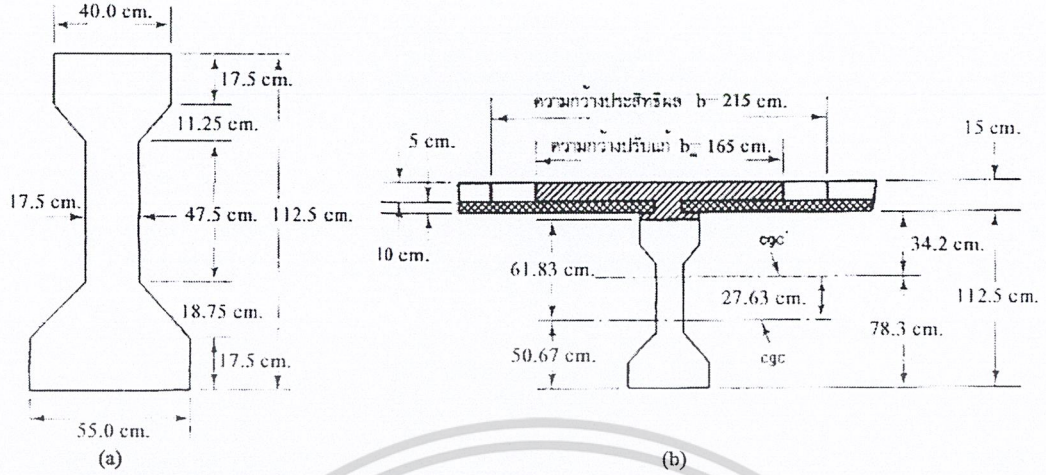
ลองเลือก AASHTO ชนิด 3 ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงมากที่สุด

S^t = 83 082 ซม.^{3}, S_b = 101 370 ซม.^{3}, $I_c = 5.2(10^6)$ ซม.^{4}, A_c = 3613 ซม.^{2}, r^2 = 1445 ซม.^{2}

c_t = 61.83 ซม., c_b = 50.67 ซม., w_D = 870 กก./ม.

และลองใช้ลวดตีเกลียว 7 เส้น ชนิดคลายหน่วยแรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวน 22 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. หน่วยแรงขณะถ่ายแรง

$M_t = 41\,352.19 + 42\,334.98 + 107\,000 = 190\,687.17$ กก.ม.

$A_{ps} = 22(0.987) = 21.7$ ซม.^{2}

$P_i = A_{ps} f_{pi} = 21.7(13\,293) = 288\,458$ กก.

$P_e = 0.80P_i = 0.8(288\,458) = 230\,766$ กก.

$$k_t = \frac{r^2}{c_b} = \frac{1445}{50.67} = 28.52 \text{ ซม.}$$

$$k_b = \frac{r^2}{c_t} = \frac{1445}{61.83} = 23.37 \text{ ซม.}$$

$$a_{\min} = \frac{M_D}{P_i} = \frac{41\,352.19(10)^2}{288\,610} = 14.33 \text{ ซม.}$$

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} = \frac{190\,723.17(10)^2}{230\,766} = 82.63 \text{ ซม. (ขอบเขตบนอยู่นอกหน้าตัด)}$$

$e_b = a_{\min} + k_b = 14.33 + 23.37 = 37.70$ ซม.

$e_t = a_{\max} - k_t = 82.63 - 28.52 = 54.11$ ซม.

ดังนั้นลองใช้ระยะเยื้องศูนย์ $e_c = 41.3$ ซม., $e_e = 25.0$ ซม.

(a) ที่กลางช่วง

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1 - \frac{e_c c_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= -\frac{288\ 458}{3613}\left(1-\frac{41.3\times 61.83}{1445}\right)-\frac{41\ 352.19\times 10^2}{83\ 082}$$

$= 61.25 - 49.77 = 11.48$ กก./ซม.^{2} $< f_{ti} = 13.38$ กก. /ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e_c c_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b}$$

$$= -\frac{288\ 458}{3\ 613}\left(1+\frac{41.3\times 50.67}{1\ 445}\right)+\frac{41\ 352.19\times 10^2}{101\ 370}$$

$= - 195.46 + 40.79 = - 154.67$ กก./ซม.^{2} $< f_{ci} = 168$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

(b) ที่ฐานรองรับ

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1-\frac{e_e c_t}{r^2}\right) = -\frac{288\ 458}{3\ 613}\left(1-\frac{25\times 61.83}{1\ 445}\right)$$

$= + 5.57$ กก./ซม.^{2} $< f_{ti} = 13.38$ กก. /ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e_e c_b}{r^2}\right) = -\frac{288\ 458}{3\ 613}\left(1+\frac{25\times 50.67}{1\ 445}\right)$$

$= - 149.83$ กก./ซม.^{2} $< f_{ci} = 168$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

4. คุณสมบัติหน้าตัดเชิงประกอบ

$$\frac{E_{c(topping)}}{E_{c(precast)}} = \frac{15\ 200\sqrt{210}}{15\ 200\sqrt{350}} = 0.77$$

จากตารางที่ 4.1:

$L_c = 215$ ซม., $L/4 = 19.5(100)/4 = 487.5$ ซม., $b_w + 16h_f = 17.5 + 16(15) = 257.5$ ซม.

ดังนั้น ใช้ความกว้างประสิทธิผลของปีก = 215 ซม.

ความกว้างประสิทธิผลปรับแก้ = 0.77(215) = 165 ซม.

$$c_b' = \frac{(15\times 165)(112.5)+(3613\times 50.67)}{(15)(165)+3613} = 78.81 \text{ ซม.}$$

$$I_c' = 5.2\times 10^6 + 3613(78.88-50.67)^2 + \frac{165(15)^3}{12} + 165\times 15(41.12)^2 = 12.3(10^6) \text{ ซม.}^4$$

$r^2 = 2020.37$ ซม.^{2}

สำหรับคานสำเร็จรูป: $c^t = 112.5 - 78.81 = 33.69$ ซม.

$S_c^t = 12.3(10^6)/33.69 = 365\ 854$ ซม.^{3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_{cb} = 12.3(10^6)/78.81 = 156\ 072$ ซม.^{3}

สำหรับพื้นสะพาน $c^t = 33.69 + 15 = 48.69$ ซม.

$S_{cs}{}^t = 12.3(10^6)/48.69 = 252\ 619$ ซม.^{3} ที่ผิวบนของพื้น

$S_{bcs} = 12.3(10^6)/(48.69 - 10) = 317\ 912$ ซม.^{3} ที่ผิวล่างของพื้น

5. หน่วยแรงหลังจากการติดตั้งแบบหล่อพื้นหนา 5 ซม. w_{SD} ก่อนหล่อพื้น

(a) ที่กลางช่วง

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{e_c c_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t}$$

$M_D + M_{SD} = 41\ 352.19 + 12\ 263.06 = 53\ 615.25$ กก.ม.

$$f^t = -\frac{230\ 766}{3613}\left(1 - \frac{41.3 \times 61.83}{1445}\right) - \frac{53\ 615.25 \times 10^2}{83\ 082}$$

$= 48.92 - 64.53 = -15.61$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด) ไม่เกิดแรงดึง ใช้ได้

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{e_c c_b}{r^2}\right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_b}$$

$$= -\frac{230\ 766}{3613}\left(1 + \frac{41.3 \times 50.67}{1445}\right) + \frac{53\ 615.25 \times 10^2}{101\ 370}$$

$= -156.37 + 52.89 = -103.48$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด) $< f_c = -157.5$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

(b) ที่ฐานรองรับ

$$f^t = -\frac{230\ 766}{3613}\left(1 - \frac{25.4 \times 61.83}{1445}\right) = 5.55 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงดึง)} < f_t = 30 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

$$f_b = -\frac{230\ 766}{3613}\left(1 + \frac{25.4 \times 50.67}{1445}\right) = -120.76 \text{ กก./ซม.}^2 < f_c = -157.5 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

6. หน่วยแรงที่เกิดขึ้นทันทีหลังจากเทคอนกรีตพื้น: ที่กลางช่วง (คอนกรีตยังไม่แข็งตัว)

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{e_c c_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t}$$

$M_D + M_{SD} = 53\ 615.25 + 30\ 071.92 = 83\ 687.17$ กก.ม.

$$f^t = -\frac{230\ 766}{3613}\left(1 - \frac{41.3 \times 61.83}{1445}\right) - \frac{83\ 687.17 \times 10^2}{83\ 082}$$

$= -49.00 - 100.73 = -51.73$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด) $< f_c = -140$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{e_c c_b}{r^2}\right)+\frac{M_D + M_{SD}}{S_b}$$

$$= -\frac{230\ 766}{3613}\left(1+\frac{41.3\times 50.67}{1445}\right)+\frac{83\ 687.17\times 10^2}{101\ 370}$$

$$= -156.37 + 82.56 = -73.81 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)} < f_c = -140 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

7. หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานรวมผลของ M_{SD2} เนื่องจากแผ่นพื้นไม่มีค้ำยัน

(a) ที่หน้าตัดกลางช่วง

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{e_c c_t}{r^2}\right)-\frac{M_s + M_{SD}}{S_t}-\frac{M_{CSD} + M_L}{S_c^t}$$

$M_D + M_{SD} = 83\ 687.17$ กก.ม.

$M_{CSD} = M_L = 0 + 107\ 000 = 107\ 000$ กก.ม.

จากสภาวะก่อนหน้านี้ได้ $f^t = -51.73$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด) และ $f_b = -73.91$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด)

ดังนั้นหน่วยแรงบนผิวบนและล่างของคานสำเร็จรูปภายใต้พฤติกรรมเชิงประกอบ

$$f_c^t = -51.73 - \frac{107\ 000\times 10^2}{365\ 854} = -51.73 - 29.25 = -80.98 \text{ กก./ซม.}^2$$

$< f_c = -140$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_{bc} = -73.81 + \frac{107\ 000\times 10^2}{156\ 072} = -73.81 + 68.56 = -5.25 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)}$$

หน่วยแรงที่ผิวบนของพื้นหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว เป็น

$$f_{cs}^t = -\frac{107\ 000\times 10^2}{252\ 619}\times 0.77 = -32.61 \text{ กก./} < f_c = -140 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)}$$

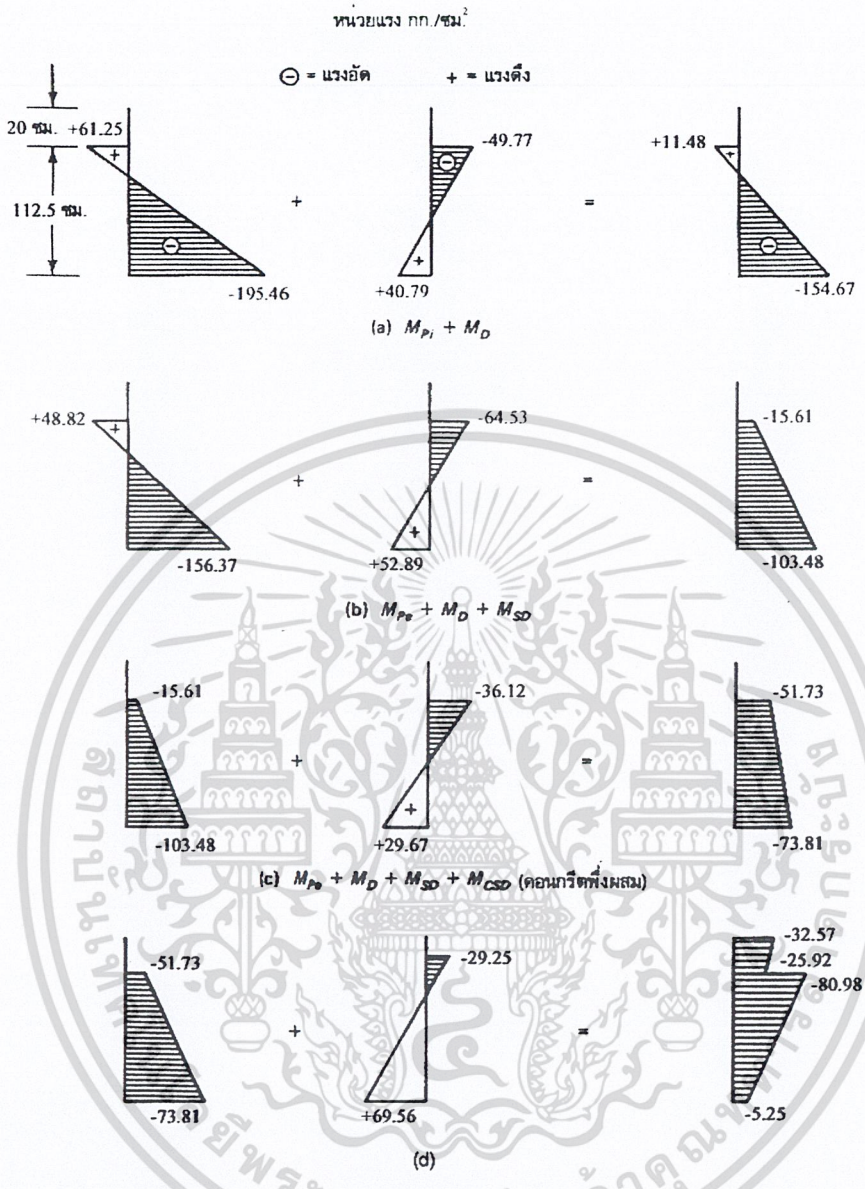
และหน่วยแรงที่ผิวล่างของพื้นเป็น

$$f_{bcs} = -\frac{107\ 000\times 10^2}{317\ 912}\times 0.77 = -25.92 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)}$$

(b) ที่ฐานรองรับ เนื่องจากโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ไม่มีผลต่อหน่วยแรงที่ฐานรองรับ ดังนั้นหน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตจะคงค่าเดิม โดย $f^t = 5.55$ กก./ซม.^{2} (แรงดึง) และ $f_b = -120.76$ กก./ซม.^{2} (แรงอัด)

การกระจายหน่วยแรงที่สภาวะต่าง ๆ ได้แสดงสรุปไว้ในรูปข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



8. ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรง

a. ที่กลางช่วง

$$a_{\min} = \frac{M_D}{P_i} = \frac{41\,352.19(10)^2}{288\,458} = 14.33 \text{ ซม.}$$

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} = \frac{190\,687.37(10)^2}{230\,766} = 82.63 \text{ ซม.}$$

b. ที่หนึ่งในสี่ของช่วงความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคานช่วงเดี่ยวภายใต้น้ำหนักแผ่กระจายคงที่ ที่ระยะ x จากฐานรองรับ:

$$M_x = Rx - wx^2/2 = \frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2} = \frac{wx}{2}(L-x)$$

ที่ x = L/4: $M_x = \frac{w}{2}\frac{L}{4}\left(L - \frac{L}{4}\right) = \frac{3wL^2}{32} = \frac{3}{4}\frac{wL^2}{8} = 0.75M_{midspan}$

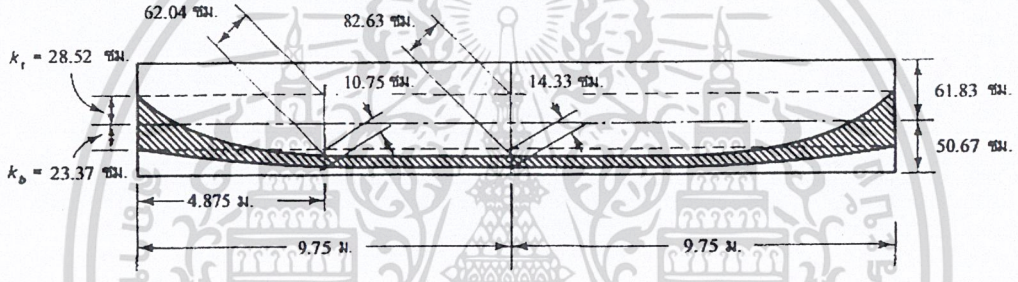
และถ้าถือว่าน้ำหนักของครีบมีผลต่อโมเมนต์น้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายอย่างอื่น

จะได้ M_T ที่หนึ่งในสี่ของช่วง = 0.75(M_T ที่กลางช่วง)

ทำให้ได้ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมที่ระยะหนึ่งในสี่ของช่วงเป็น ¾ ของขอบเขตที่กลางช่วง ดังนั้น

a_{min} = 0.75(14.33) = 10.75 ซม., a_{max} = 0.75(82.63) = 61.97 ซม.

ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรง ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แสดงสรุปไว้ในรูปข้างล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การออกแบบรับแรงดัดโดยวิธีกำลัง

4.8.1 โมเมนต์แตกร้าว

จากที่กล่าวในบทที่ 1 แล้วว่า ความแตกต่างพื้นฐานระหว่างคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตเสริมเหล็กก็คือ การที่แนวแรงอัด (C-line) เคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องจากแนวเหล็กเสริม (เส้น cgs) ตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การที่ระยะระหว่างแรงคู่ควบภายในเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามน้ำหนักบรรทุกโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง f_{pe} เมื่อโมเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเต็มที่ หน่วยแรงอัดที่ผิวด้านล่างของคานจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกสภาวะหน่วยแรงนี้ว่า *"การสลายแรงอัด"* (decompression) ถ้ามีน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำเพิ่มจากสภาวะนี้จนทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตสูงเกินโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต f_r จะเกิดรอยร้าวแรกขึ้นที่ผิวล่าง จะเรียกโมเมนต์ที่สภาวะนี้ว่า โมเมนต์แตกร้าว M_{cr} ที่สภาวะนี้หน่วยแรงในเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงดึงซึ่งเดิมรับด้วยคอนกรีต จะส่งถ่ายมาให้เหล็กเสริมเป็นตัวรับแทน

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับหน่วยแรงในเหล็กเสริมที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกต่างๆ จะเห็นการเพิ่มหน่วยแรงอย่างฉับพลันในคานแบบมีการเหนี่ยวรั้งเมื่อเกิดการแตกร้าวครั้งแรกหลังจากสภาวะการสลายแรงอัด หลังจากสภาวะนี้จะไม่ถือว่าคานมีพฤติกรรมแบบอีลาสติกอีกต่อไป แนวแรงอัดจะไม่เคลื่อนตัวอีกต่อไป หน้าตัดจะเริ่มมีพฤติกรรมเหมือนกับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีระยะระหว่างแรงคู่ควบภายในค่าคงที่

ดังนั้นจะเห็นว่า การรู้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะเป็นสิ่งที่ทำให้สติฟเนสของหน้าตัดลดลง ส่งผลให้ระยะแอ่นตัวเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังจะต้องควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมหรือการรั่วซึมในกรณีที่องค์อาคารอัดแรงเป็นถังบรรจุของเหลว

หน่วยแรงของคอนกรีตที่ผิวรับแรงดึง

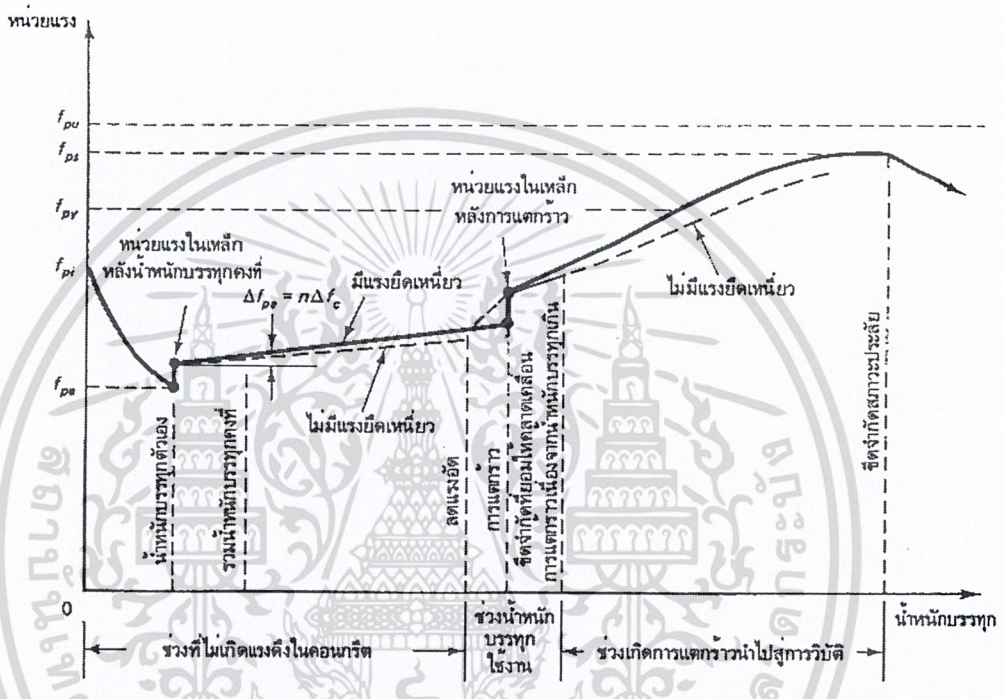
$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_{cr}}{S_b} = f_r \qquad (4.24)$$

โดยที่โมดูลัสแตกร้าว $f_r = 2.0\sqrt{f_c'}$ และโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} เป็นโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ($M_D + M_{SD} + M_L$) ที่สภาวะนั้น ดังนั้นจากสมการที่ 4.24 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{cr} = f_r S_b + P_e\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \tag{4.25}$$

จะเห็นว่าพจน์ r^2/c_b เป็นค่า kern บน k_t ดังนั้น $P_e r^2/c_b$ เป็นโมเมนต์ที่ทำให้แนวแรงอัดเคลื่อนไปอยู่ที่จุด kern บน ส่งผลให้หน่วยแรงที่ผิวล่างมีค่าเป็นศูนย์พอดี ดังนั้นพจน์ $f_r S_b$ จึงเป็นโมเมนต์เพิ่มที่ทำให้เกิดการแตกร้าวครั้งแรกขึ้นที่ผิวภายใต้แรงดึง ซึ่งในกรณีนี้คือ ผิวล่างที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยว



รูปที่ 4.27 - หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ระดับต่างๆของน้ำหนักบรรทุก

4.8.2 การอัดแรงบางส่วน

"การอัดแรงบางส่วน" แสดงถึงคานคอนกรีตอัดแรงที่ยอมให้เกิดการแตกร้าวได้บ้าง โดยจะใช้เหล็กเสริมธรรมดาควบคุมปริมาณและความกว้างของรอยแตกร้าว และจะให้เหล็กเสริมนั้นมีส่วนร่วมในการรับโมเมนต์สูงสุด ข้อได้เปรียบสองประการของการอัดแรงเพียงบางส่วนคือ การใช้วัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ และการควบคุมการยกตัวที่มากเกินไปเนื่องจากผลการคืบในระยะยาวของคอนกรีตภายใต้แรงอัด

โดยทั่วไป จะออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าที่สภาวะสมดุล เพื่อให้เกิดการวิบัติแบบช้า (ductile failure) โดยการครากของเหล็กเสริม แต่ในคอนกรีตอัดแรง จะออกแบบคานให้วิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบใดก็ได้ ใช้เหล็กเสริมธรรมดาในปริมาณต่ำ ส่งผลให้เกิดการวิบัติด้วยแรงดึงในเหล็กเสริม หรือเสริมในปริมาณมากกว่าปริมาณที่สภาวะสมดุล ก็จะส่งผลให้วิบัติโดยการอัดแตกของคอนกรีตที่ผิวบน

การวิบัติอีกอย่างเป็นการวิบัติก่อนกำหนดเกิดทันทีที่เกิดการแตกร้าวครั้งแรก โดยที่ M_{cr} มีค่าใกล้เคียงกับกำลังโมเมนต์ระบุ M_n ของหน้าตัด การวิบัติประเภทนี้จะเกิดในองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมในปริมาณต่ำ หรือในองค์อาคารอัดแรงตามแกนที่มีปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงน้อย หรือในองค์อาคารกลวง ด้วยสาเหตุนี้ มาตรฐาน ACI จึงกำหนดให้ องค์อาคารอัดแรงซึ่งมีการเสริมเหล็กธรรมดาด้วย จะต้องมีกำลังรับโมเมนต์ที่ต้องการ $\phi M_n \geq 1.2M_{cr}$

การรู้ค่าของโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} เป็นสิ่งที่ระบุให้รู้ว่าหน้าตัดมีกำลังสำรองอยู่เท่าใด และระบุถึงขีดจำกัดของน้ำหนักบรรทุกเกินที่หน้าตัดพอรับได้

<u>ตัวอย่างที่ 4.8</u> - โมเมนต์แตกร้าว

หาโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} ของคานรูปตัว I ในตัวอย่างที่ 4.2 และหาค่าโมเมนต์น้ำหนักบรรทุกเกิน (overload moment) ซึ่งคานจะรับได้ที่สภาวะแตกร้าว และอัตราส่วนปลอดภัยของการแตกร้าวต่อน้ำหนักบรรทุกเกิน

กำหนดให้ $f_r = 2\sqrt{f'_c} = 2\sqrt{350} = 37.4$ กก./ซม.^{2}

จากตัวอย่างที่ 4.2: P_e = 137 555 กก., r^2/c_b = 1210/47.85 = 25.3 ซม., Sb = 61 451 ซม.^{3}, e_c = 38.1 ซม.

$M_D + M_{SD}$ = 28 668 กก.ม., M_L = 87 620 กก.ม.

จากสมการที่ 4.25: $M_{cr} = f_r S_b + P_e\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right)$ = 37.4(61 451) + 137 555(38.1 + 25.3) = 110 192 กก.ม.

$M_T = M_D + M_{SD} + M_L$ = 28 668 + 87 620 = 116 288 กก.ม.

โมเมนต์น้ำหนักบรรทุกเกิน = $M_T - M_{cr}$ = 116 288 – 110 192 = 6096 กก.ม.

เนื่องจาก $M_T > M_{cr}$ จะเกิดการแตกร้าวขึ้นในคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ตามที่แสดงเป็นหน่วยแรงดึงที่ผิวในตัวอย่างที่ 4.2 ดังนั้นอัตราส่วนปลอดภัยต่อการแตกร้าว

$$\frac{M_{cr}}{M_T} = \frac{110\ 192}{116\ 288} = 0.95$$

ถ้าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน $M_T < M_{cr}$ อัตราส่วนปลอดภัยต่อการแตกร้าวจะมากกว่า 1 ซึ่งเป็นกรณีทั่วไปขององค์อาคารอัดแรงเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณลดกำลัง

4.9.1 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและขอบเขตความปลอดภัยตามมาตรฐาน ACI

ในมาตรฐาน ACI ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก γ และตัวคูณลดกำลัง ϕ จะเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยทั้งหมดบนแต่ละชนิดของน้ำหนักบรรทุก

$$S.F. = \frac{\gamma_1 D + \gamma_2 L}{D + L} \times \frac{1}{\phi} \tag{4.26}$$

โดยที่ ϕ เป็นตัวคูณลดกำลัง γ_1 และ γ_2 เป็นตัวคูณน้ำหนักบรรทุกสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ D และน้ำหนักบรรทุกจร L โดยทั่วไปจะใช้หนึ่งค่าสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่และอีกหนึ่งค่าสำหรับน้ำหนักบรรทุกจร ความไม่แน่นอนของกำลังรับน้ำหนักจะรวมอยู่ในค่า ϕ ดังนั้นวิธีนี้เป็นวิธีง่ายที่ดัดแปลงมาจากผลของการทดลองเพื่อให้ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง ซึ่งอาจจะไม่ประหยัดนักสำหรับทุกกรณี และอาจจะไม่เหมาะสมในบางกรณี เช่น ในการหาผลร่วมของน้ำหนักบรรทุกคงที่และแรงลม

ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เป็นตัวที่ให้ค่าเผื่อสำหรับน้ำหนักบรรทุกชนิดต่าง ๆ ด้วยการคูณน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่ประมาณมาได้ด้วยสัมประสิทธิ์ ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์ 1.4 สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ 1.7 สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร จะจำแนกชนิดของน้ำหนักบรรทุกทั่วไปได้เป็น น้ำหนักบรรทุกคงที่ D น้ำหนักบรรทุกจร L แรงลม W แรงเนื่องจากแรงดันด้านข้าง เช่น จากดินในกำแพงกันดิน H แรงดันด้านข้างเนื่องจากของเหลว F แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว E และแรงเนื่องจากผลที่ขึ้นกับเวลา เช่น การคืบหรือการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น

การกระทำร่วมของน้ำหนักบรรทุกในแนวโน้มถ่วง ได้แก่ การกระทำร่วมของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร น้ำหนักบรรทุกคงที่ประกอบด้วยน้ำหนักของโครงสร้างและสิ่งก่อสร้างถาวรซึ่งจะประมาณได้ถูกต้องมากกว่าน้ำหนักบรรทุกจร น้ำหนักบรรทุกจรจะประมาณจากน้ำหนักบรรทุกที่ไม่คงที่ เช่น ผู้คนและเฟอร์นิเจอร์ การกระทำชั่วคราวของน้ำหนักบรรทุกจรทำให้เป็นการยากที่จะหาได้ถูกต้อง ดังนั้นโดยปกติจึงใช้ตัวคูณที่สูงกว่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ ถ้ารวมเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่ จะได้น้ำหนักบรรทุกที่ต้องการเป็น

$$U = 1.4D + 1.7L \tag{4.27a}$$

แต่มักจะไม่มีเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรบนโครงสร้างแต่อย่างเดียว แรงลมมักจะมีส่วนร่วมด้วย ดังนั้นในโครงสร้างที่พิจารณาแรงลมด้วย จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad (4.27b)$$

เนื่องจากโอกาสที่ค่าสูงสุดของน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และแรงลมจะกระทำร่วมกัน จะมีไม่มากนัก ดังนั้นผลรวมจึงถูกลดลงด้วยตัวคูณ 0.75 และเนื่องจากแรงลมกระทำด้านข้าง จึงเป็นไปได้ว่าถ้าไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจรในแนวดิ่งขณะที่แรงลมกระทำ อาจจะให้หน่วยแรงสูงสุดในโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบผลรวมตามข้างล่าง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการสูงสุด

$$U = 0.9D + 1.3W \quad (4.27c)$$

โครงสร้างที่ต้องรับแรงดันด้านข้างเนื่องจากการถมดินหรือแรงดันของของเหลว จะต้องออกแบบให้รับกรณีวิกฤตของการกระทำร่วมดังต่อไปนี้

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (4.28a)$$
$$U = 0.9D + 1.7H \quad (4.28b)$$
$$U = 1.4D + 1.7L \quad (4.28c)$$
$$U = 1.4D + 1.7L + 1.4F \quad (4.28d)$$
$$U = 0.9D + 1.4F \quad (4.28e)$$

และถ้ารวมผลของแผ่นดินไหว จะต้องออกแบบให้รับกรณีวิกฤตของการกระทำร่วมดังต่อไปนี้

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.87E) \quad (4.29a)$$
$$U = 0.9D + 1.3W \quad (4.29b)$$
$$U \geq 1.4D + 1.7L \quad (4.29c)$$

การเลือกผลกระทำร่วมของแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ใช้แนวเดียวกับการเลือกผลกระทำร่วมเนื่องจากแรงลม

4.9.3 กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบและกำลังระบุ: ตัวคูณลดกำลัง

จะเรียกกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในองค์อาคารซึ่งหามาจากวิธีที่ใช้กันทั่วไปว่า *กำลังระบุ* (nominal strength) ยกตัวอย่าง เช่น กำลังรับโมเมนต์ในคานซึ่งหามาจากสมการสมดุลและคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม จะเรียกว่า *กำลังระบุรับโมเมนต์* M_n ของหน้าตัด เนื่องจากความไม่แน่นอนในการก่อสร้าง เช่น ขนาดหรือการวางตำแหน่งที่ไม่ถูกต้องของเหล็กเสริม หรือความแตกต่างระหว่างค่าของคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณกับค่าจริงที่หน้างาน เราจะลดกำลังระบุนี้ลงด้วยการคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง ϕ และจะเรียกกำลังที่ลดลงมานี้ว่า *กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ*

กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบในคาน ϕM_n จะต้องไม่น้อยกว่าโมเมนต์ที่ต้องการ M_u ซึ่งหามาจากกรณีที่วิกฤติที่สุดของการกระทำร่วมของน้ำหนักบรรทุก U ค่าของตัวคูณลดกำลัง ϕ จะเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมและชนิดขององค์อาคาร เช่น สำหรับแรงดัดในคานจะใช้ ϕ เท่ากับ 0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเสาปลอกเดี่ยวซึ่งรับแรงอัดเป็นแรงหลัก จะใช้ตัวคูณลดกำลัง $\phi = 0.7$ การใช้ค่าตัวคูณลดกำลังที่มีค่าน้อยในเสา เป็นเพราะว่าเสาเป็นองค์อาคารสำคัญที่ใช้รับโครงสร้างทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์อาคารอื่น ๆ และอีกทั้งยังต้องป้องกันการวิบัติต่อเนื่อง รวมถึงการวิบัติแบบฉับพลัน (brittle failure) ซึ่งไม่มีการเตือนล่วงหน้า ในระหว่างที่คานถูกออกแบบมาให้เกิดการแอ่นตัวอย่างเห็นได้ชัดก่อนการวิบัติเพื่อเป็นการเตือนล่วงหน้า ตัวคูณลดกำลังในคานจึงมีค่าสูงกว่าในเสา

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวคูณลดกำลัง ϕ สำหรับองค์อาคารชนิดต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ACI เปรียบเทียบกับค่าจากมาตรฐานอื่น จะเห็นว่ามาตรฐาน ACI ให้ค่าที่เผื่อเพื่อความปลอดภัยไว้ค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4.2 - ตัวคูณลดกำลัง ϕ

องค์อาคาร	ϕ
แรงดัดในคานหรือพื้น	0.9
เสาปลอกเดี่ยว	0.7
เสาปลอกเกลียว	0.75
เสาปลอกเดี่ยวรับน้ำหนักบรรทุกตามแกนน้อย	0.7 - 0.9
เสาปลอกเกลียวรับน้ำหนักบรรทุกตามแกนน้อย	0.75 - 0.9
แรงเฉือนและแรงบิดในคาน	0.85

4.10 กำลังรับแรงดัดขององค์อาคารแบบมีการยึดเหนี่ยว

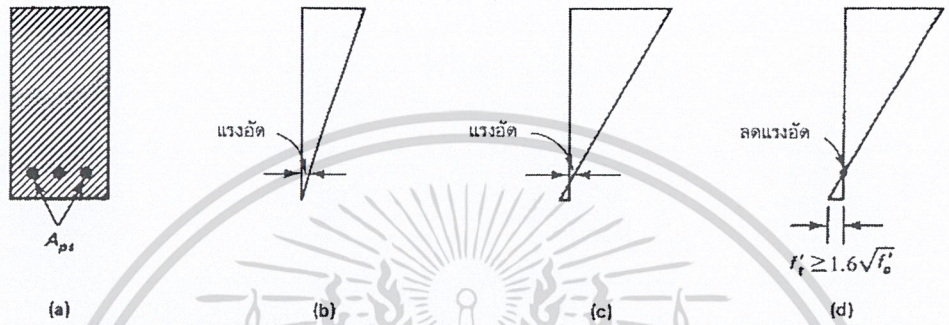
4.10.1 คำนำ

จากหัวข้อที่ 4.8.1 จะเห็นว่าคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีพฤติกรรมเหมือนคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อโมเมนต์ที่มากระทำมีค่ามากกว่าโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} และโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด M_T ดังนั้นหลักการทั้งหลายของทฤษฎีกำลังในคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็จะนำมาใช้ได้ในคอนกรีตอัดแรง จะแตกต่างกันก็เพียงในด้านของวัสดุที่ใช้ และหน้าตัดขององค์อาคารที่เป็นเอกลักษณ์ของคอนกรีตอัดแรง รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงดึงในผิวคอนกรีตที่หน้าตัดวิกฤตสูงกว่าโมดูลัสแตกร้าว $f_r \cong 2\sqrt{f'_c}$ ก่อนที่จะถึงสภาวะนี้ น้ำหนักบรรทุกเกินจะทำให้แรงอัดในคอนกรีตที่ระดับของเหล็กเสริมอัดแรงลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกลายเป็นศูนย์ จะเรียกน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะนี้ว่า *น้ำหนักบรรทุกสลายแรงอัด*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Decompression load) และเรียกหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะนี้ว่า *หน่วยแรงสลายแรงอัด (Decompression stress)*

นักวิจัยบางรายให้นิยามของน้ำหนักบรรทุกสลายแรงอัดว่า เป็นน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวที่ผิวนอกของหน้าตัดวิกฤติ เช่น ที่ผิวล่างของหน้าตัดกลางคานช่วงเดียว ซึ่งก็จะเป็นสภาวะที่แตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นการวิเคราะห์จะถือตามนิยามสุดท้ายนี้



รูปที่ 4.28 - หน่วยการหดตัวของคอนกรีตจนถึงสภาวะสลายแรงอัด (a) หน้าตัด (b) หน้าตัดภายใต้แรงอัดทั้งหมด (c) แรงดึงที่ผิวล่างน้อยกว่าโมดูลัสแตกร้าว (d) สภาวะสลายแรงอัด

ถ้าให้หน่วยแรงประสิทธิผล f_{pe} ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด ทำให้เกิดหน่วยการหดตัวเป็น $\in_1$ ดังนั้น

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} \qquad (4.30a)$$

ที่สภาวะสลายแรงอัด เมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมอัดแรงถูกหักล้างด้วยหน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเกิน ถ้าให้หน่วยการหดตัวที่สภาวะนี้ $\in_{decomp} = \in_2$ จะได้

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{decomp} = \frac{P_e}{A_c E_c}\left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) \qquad (4.30b)$$

รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงการกระจายหน่วยแรงที่สภาวะสลายแรงอัดและหลังจากนั้นซึ่งเป็นสภาวะเมื่อคานคอนกรีตอัดแรงเริ่มมีพฤติกรรมเหมือนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเข้าใกล้สภาวะประลัย หน่วยการหดตัวที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ($\in_3$) จะมีค่าตามการกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมตามที่แสดงในรูปที่ 4.29(b) โดยที่หน่วยการหดตัวสูงสุดที่ผิวรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ $\in_c$ = 0.003 ซม./ซม. ซึ่งจะทำให้หน่วยการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าน้ำหนักบรรทุกสลายแรงอัด มีค่าเป็น

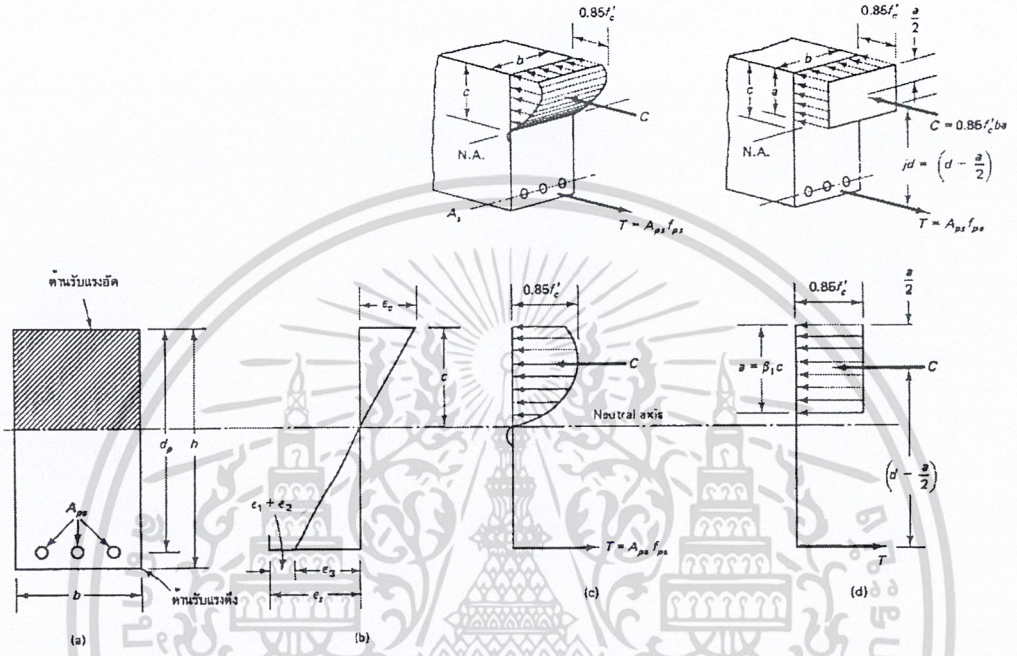
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_c\left(\frac{d-c}{c}\right) \qquad (4.30c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ c เป็นความลึกของแกนสะเทิน ดังนั้นหน่วยการยืดตัวทั้งหมดในเหล็กอัดแรงที่สภาวะนี้เป็น

$$\epsilon_s = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \qquad (4.30d)$$

ทำให้หาหน่วยแรงในเหล็กเสริม f_{ps} ที่กำลังระบุได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัว



รูปที่ 4.29 - การกระจายหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวตามความลึกของคาน (a) หน้าตัดคาน (b) หน่วยการยืดหดตัว (c) หน่วยแรง (d) สี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า

4.10.2 การกระจายหน่วยแรงอัดในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าและกำลังโมเมนต์ระบุ

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความสำคัญของการหากำลังสำรองในคานคอนกรีตอัดแรง ถึงจุดวิบัติ ดังนั้นการออกแบบทั้งหมดจะต้องรวมการหากำลังรับโมเมนต์โดยวิธีกำลังของหน้าตัดนอกเหนือไปจากการตรวจสอบหน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ตามที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1 ถึง 4.7 โดยจะต้องเป็นไปตามสมมติฐานของวิธีกำลัง ดังต่อไปนี้

1. หน่วยการยืดหดตัวกระจายเป็นแบบเชิงเส้น โดยยึดถือสมมติฐานของ Bernoulli ว่า หน้าตัดยังคงระนาบเดิมและตั้งฉากกับแกนสะเทินหลังจากการดัด
2. การยืดหดตัวของเหล็กมีค่าเท่ากับคอนกรีตล้อมรอบในทุกสภาวะ ไม่ว่าจะเป็นสภาวะก่อนหรือหลังการแตกร้าวของคอนกรีตหรือการคราก ของเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก ประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเพียงในระยะเริ่มต้นของการรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้นจะไม่รวมหน้าตัดของคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณรับแรงดึงในการวิเคราะห์และออกแบบ จะถือว่าแรงดึงทั้งหมดรับโดยเหล็กเสริม

จากรูปที่ 4.29 เพื่อความสมดุลของแรงในแนวนอน แรงอัดในคอนกรีต C จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริม T ดังนั้น

$$C = T \tag{4.31}$$

4.10.2.1 กำลังระบุรับโมเมนต์ในหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การกระจายหน่วยแรงอัดจริงในหน้าตัดคอนกรีตจะอยู่ในรูปของพาราโบลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4.29(c) ทำให้ต้องเสียเวลามากในการหาพื้นที่และจุดศูนย์ถ่วงเพื่อแปลงเป็นแรงและแนวกระทำ Whitney เสนอให้แทนการกระจายหน่วยแรงรูปพาราโบล่าด้วยการกระจายหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าซึ่งง่ายกว่าและให้ค่าแรงอัดและกำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดเท่ากัน สี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าของหน่วยแรงมีความลึกเท่ากับ a และมีกำลังแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ $0.85f_c'$ จากรูปที่ 4.29(d) จะเห็นว่า $a = \beta_1 c$ โดยที่สัมประสิทธิ์ β_1 ได้มาจากการปรับให้สี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่ามีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ของหน่วยแรงอัดพาราโบล่าจริง ทำให้ได้แรงอัด C เท่ากันไม่ว่าจะใช้การกระจายหน่วยแรงตามจริงเป็นพาราโบล่าหรือใช้การกระจายเป็นรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่า การใช้ $0.85f_c'$ เป็นค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า เป็นผลมาจากการทดสอบคอนกรีตในโครงสร้างที่มีอายุอย่างน้อยเท่ากับ 28 วัน หลังจากการเก็บข้อมูลมาเป็นเวลายาวนาน มาตรฐาน ACI เลือกใช้หน่วยการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.003 ซม./ซม. เป็นขีดจำกัดเพื่อความปลอดภัย ถึงแม้จะมีการนำเสนอรูปแบบต่าง ๆ ของหน่วยแรงเทียบเท่า เช่น รูปสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นต้น แต่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าก็เป็นที่ยอมรับใช้เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยจะถือว่าเหล็กเสริมมีพฤติกรรมเหนือขอบเขตปฏิภาค

ใช้สมมุติฐานดังกล่าว จะแทนแผนภาพการกระจายหน่วยแรงอัดจากรูปที่ 4.29(c) ได้ด้วยรูปที่ 4.29(d) ทำให้ได้ $C = 0.85f_c'ba$ ซึ่งเป็นปริมาตรของพื้นที่ใต้แผนภาพการกระจายหน่วยแรงอัดคูณกับความกว้างของคาน ที่สภาวะใกล้จุดวิบัติเมื่อเหล็กเสริมถึงจุดคราก ($\epsilon_s > \epsilon_y$) แรงดึง T มีค่าเท่ากับ $A_{ps}f_{ps}$ จะเขียนสมการที่ 4.31 ได้ใหม่เป็น

$$A_{ps}f_{ps} = 0.85f_c'ba \tag{4.32}$$

หรือ

$$a = \beta_1 c = \frac{A_{ps}f_{ps}}{0.85f_c'b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะหากำลังระบุรับโมเมนต์ได้จากการคูณ C และ T ด้วยแขนโมเมนต์ $(d_p - \frac{a}{2})$ ได้

$$M_n = A_{ps} f_{ps} (d_p - \frac{a}{2}) \tag{4.33a}$$

โดยที่ d_p เป็นระยะจากผิวรับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง ถ้าให้อัตราส่วนเหล็กเสริม $\rho_p = A_{ps}/bd_p$ จะได้

$$M_n = \rho_p f_{ps} b d_p^2 (1 - 0.59 \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c'}) \tag{4.33b}$$

ถ้าให้ดรรชนีเหล็กเสริม $\omega_p = \rho_p(f_{ps}/f_c')$ จะได้

$$M_n = \rho_p f_{ps} b d_p^2 (1 - 0.59 \omega_p) \tag{4.33c}$$

ถ้าเสริมเหล็กธรรมดาช่วยรับแรงดึงด้วย จะได้ความลึก a ของรูปสี่เหลี่ยมรับแรงอัดเทียบเท่าเป็น

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y}{0.85 f_c' b} \tag{4.34a}$$

ถ้า $c = a/\beta_1$ จะได้หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมธรรมดาเป็น (ดูรูปที่ 4.30)

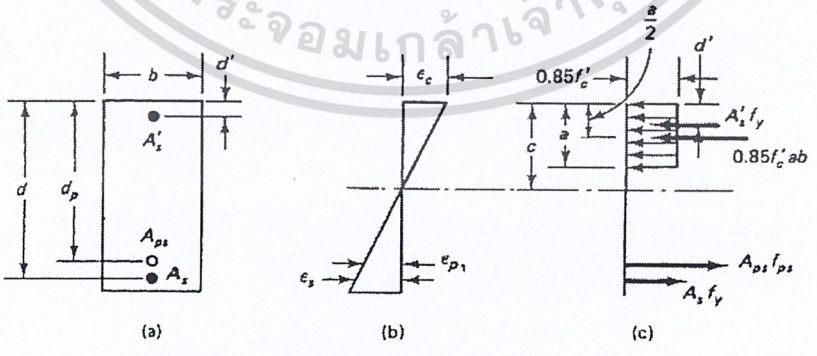
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_c (\frac{d - c}{c}) \tag{4.34b}$$

จะได้สมการที่ 4.33(b) สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีเหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับแรงดึงอย่างเดียว เป็น

$$M_n = \rho_p f_{ps} b d_p^2 \left(1 - 0.59 \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c'}\right) + \rho_p f_y b d^2 \left(1 - 0.59 \frac{f_y}{f_c'}\right) \tag{4.35a}$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left\{1 - 0.59\left(\omega_p + \frac{d}{d_p}\omega\right)\right\} + A_s f_y \left\{1 - 0.59\left(\frac{d_p}{d}\omega_p + \omega\right)\right\} \tag{4.35b}$$



รูปที่ 4.30 - คานอัดแรงมีเหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับแรงดึง
(a) หน้าตัดคาน (b) หน่วยการยืดหดตัว (c) หน่วยแรงและแรงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\omega = \rho(f_y/f_c')$ หรือ

$$M_n = A_{ps} f_{ps}(d_p - \frac{a}{2}) + A_s f_y(d - \frac{a}{2}) \quad (4.35c)$$

และถ้าเสริมเหล็กธรรมดาช่วยรับทั้งแรงดึงและแรงอัด และเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก จะได้

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y}{0.85 f_c' b} \quad (4.36)$$

โดยที่ b เป็นความกว้างของคานด้านรับแรงอัด

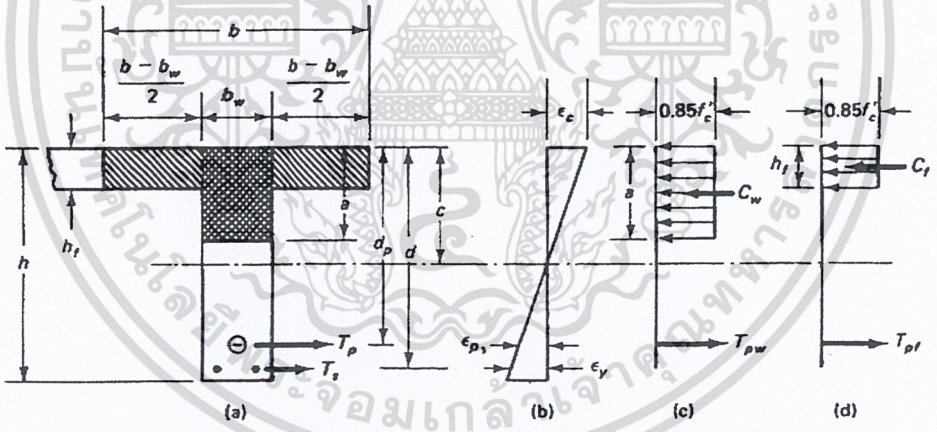
รวมโมเมนต์รอบแนวแรงอัดของคอนกรีตในรูปที่ 4.30 จะได้กำลังระบุรับโมเมนต์เป็น

$$M_n = A_{ps} f_{ps}(d_p - \frac{a}{2}) + A_s f_y(d - \frac{a}{2}) + A'_s f_y(\frac{a}{2} - d') \quad (4.37)$$

4.10.2.2 กำลังระบุรับโมเมนต์ในหน้าตัดแบบมีปีก

ถ้าความหนาของปีกด้านรับแรงอัด h_f น้อยกว่าความลึกของสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า a จะถือว่าเป็นหน้าตัดแบบมีปีกตามที่แสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งจะได้

$$T_p + T_s = T_{pw} + T_{pf} \quad (4.38)$$



รูปที่ 4.31 - หน้าตัดแบบมีปีก (a) หน้าตัดคาน (b) หน่วยการยืดหดตัว (c) หน่วยแรงและแรงภายในแกนคาน (d) หน่วยแรงและแรงภายในปีก

โดยที่ T_p = แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง = $A_{ps} f_{ps}$

T_s = แรงดึงในเหล็กเสริมธรรมดา = $A_s f_y$

T_{pw} = ส่วนของแรงดึงที่ต้องใช้เพื่อความสมดุลกับแรงอัดในแกนคาน = $A_{pw} f_{ps}$

A_{pw} = พื้นที่เหล็กเสริมที่ทำให้เกิดแรง T_{pw}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{pf} = ส่วนของแรงดึงที่ต้องใช้เพื่อความสมดุลกับแรงอัดในปีก = $C_f = 0.85f_c'(b - b_w)h_f$

$C_w = 0.85f_c' b_w a$

แทนในสมการที่ 4.38 จะได้

$$T_{pw} = A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - 0.85f_c'(b - b_w)h_f \quad (4.39)$$

รวมแรงทั้งหมดในรูป 4.31(c) และ (d) จะได้

$$T_{pw} + T_{pf} = C_w + C_f$$

และ
$$a = \frac{A_{pw}f_{ps}}{0.85f_c'b_w} \quad (4.40a)$$

หรือ
$$a = \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - 0.85f_c'(b - b_w)h_f}{0.85f_c'b_w} \quad (4.40b)$$

ดังนั้นกำลังระบุรับโมเมนต์สำหรับหน้าตัดมีปีกซึ่ง $a > h_f$ จะมีรูปแบบเหมือนสมการที่ 4.37 สำหรับหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับแรงอัดด้วย ดังต่อไปนี้

$$M_n = A_{pw}f_{ps}(d_p - \frac{a}{2}) + A_s(d - d_p) + 0.85f_c'(b - b_w)h_f(d_p - \frac{h_f}{2}) \quad (4.41)$$

ในทุกกรณี จะได้โมเมนต์ที่ใช้คำนวณออกแบบ

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4.42)$$

โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับแรงดัด

การที่จะหาว่าความลึกของสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่ามากกว่าความลึกของปีกหรือไม่ จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างแรงอัดทั้งหมด C_n และแรงดึงทั้งหมด T_n ถ้า Tp + Ts ในรูปที่ 4.31 มากกว่า C_f จะได้ $a > h_f$ ทำให้ต้องออกแบบหน้าตัดเป็นหน้าตัดแบบมีปีก แต่ถ้า $a \leq h_f$ จะออกแบบเสมือนเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีความกว้างเท่ากับความกว้างของปีกรับแรงอัด

หรืออาจจะใช้การหาค่า a จากสมการที่ 4.40b แล้วเปรียบเทียบกับ h_f

4.10.2.3 การหาหน่วยแรงวิบัติของเหล็กเสริมอัดแรง f_{ps}

ถ้าหน่วยแรงดึงประสิทธิผล f_{pe} น้อยกว่า $0.50f_{pu}$ จะหาหน่วยแรง f_{ps} ในเหล็กอัดแรงได้จากความสอดคล้องกับหน่วยการยืดตัว *(Strain compatibility)* ที่ทุกสภาวะของน้ำหนักบรรทุกจนถึงการวิบัติ แต่ถ้าหน่วยแรงดึงประสิทธิผลไม่น้อยกว่า $0.50f_{pu}$ มาตรฐาน ACI ยอมให้ค่าโดยประมาณดังต่อไปนี้

a. เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว ใช้สมการสร้างจากผลจากห้องปฏิบัติการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]\right) \qquad (4.43)$$

โดยที่ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดเป็น $\omega' = \rho'(f_y/f_c')$ ถ้ารวมเหล็กเสริมรับแรงอัดในการหา f_{ps} จากสมการที่ 4.43 พจน์ $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]$ ต้องไม่น้อยกว่า 0.17 และ d' ต้องไม่มากกว่า $0.15d_p$ และ

γ_p = 0.55 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.80

= 0.40 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.85

= 0.28 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.90

ค่าของ γ_p ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่ว่า $f_{py} = 0.80f_{pu}$ สำหรับเหล็กเส้นอัดแรงกำลังสูง 0.85 สำหรับลวดตีเกลียวคลายหน่วยแรง และ 0.9 สำหรับลวดตีเกลียวคลายแรงดึงต่ำ

b. เหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว

สำหรับอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \qquad (4.44a)$$

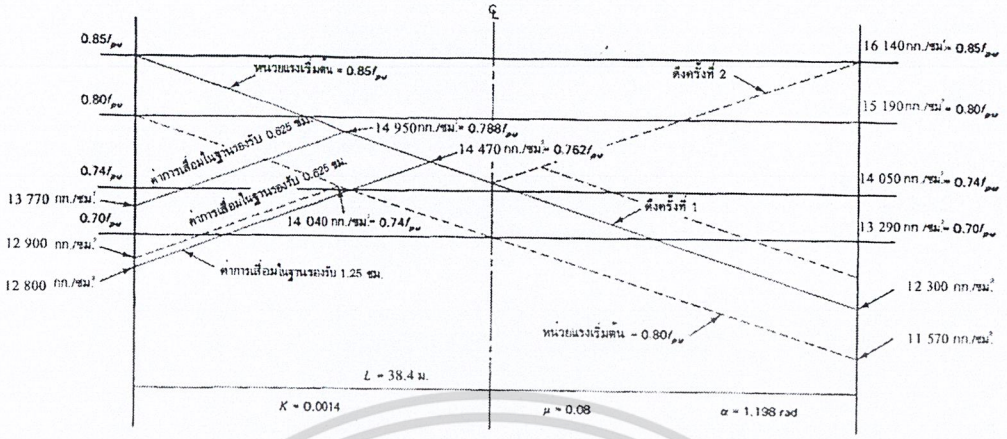
แต่ f_{ps} จะต้องมีค่าไม่เกิน f_{py} และ $f_{pe} + 4000$ กก./ซม.^{2}

สำหรับอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกิน 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \qquad (4.44b)$$

แต่ f_{ps} จะต้องมีค่าไม่เกิน f_{py} และ $f_{pe} + 2000$ กก./ซม.^{2} รูปที่ 4.32 ซึ่งคัดลอกมาจาก PCI Design Handbook แสดงค่าการเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดรองรับสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 - แผนผังหน่วยแรงสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยวกับค่าต่างๆของหน่วยแรงเริ่มต้นและค่าการเสื่อมลดเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด

4.10.2.4 พิกัดของค่าดัชนีเหล็กเสริม

ดัชนีเหล็กเสริม ω_p ซึ่งเป็นตัวระบุถึงอัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรงในหน้าตัด หาได้จาก

$$\omega_p = \frac{A_{ps} f_{ps}}{b d_p f_c'} = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c'} \qquad (4.45)$$

a. เหล็กเสริมน้อยสุด ถ้ามีเหล็กเสริมน้อยเกินไป หน้าตัดจะไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงหลังจากการแตกร้าว และหน้าตัดก็จะมีพฤติกรรมเสมือนกับหน้าตัดปราศจากเหล็กเสริม ทำให้เกิดการวิบัติทันทีเนื่องจากการดึงขาดของเหล็กเสริม เพื่อป้องกันการวิบัติแบบนี้ จึงต้องมีข้อกำหนดพิกัดของเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมีในหน้าตัด ในรูปของอัตราส่วนน้อยสุด ρ_{min} หรือดัชนีน้อยสุด $\omega_{p\,min}$ มาตรฐาน ACI กำหนดให้ปริมาณรวมของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมธรรมดาในหน้าตัด ต้องมีมากพอที่จะรับโมเมนต์ที่ต้องการ $M_u = \phi M_n$ โดยที่

$$M_u \geq 1.2 M_{cr} \qquad (4.46a)$$

และ M_{cr} หาได้จากโมดูลัสแตกร้าว $f_r = 2.0\sqrt{f_c'}$ จะยกเว้นข้อกำหนดนี้สำหรับหน้าตัดที่มีกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนไม่น้อยกว่าสองเท่าของที่ต้องการตามสมการที่ 4.33 นอกเหนือไปจากนี้ มาตรฐาน ACI ยังกำหนดพื้นที่น้อยสุดของเหล็กเสริมธรรมดาเพื่อแรงยึดเหนี่ยวไว้ตามข้างล่าง

$$\text{Min } A_s = 0.004A \qquad (4.46b)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่ในส่วนระหว่างผิวด้านรับแรงดึงกับแนวศูนย์ถ่วง cgc ของหน้าตัดทั้งหมด (ซม.^{2}) จะต้องวางเหล็กเสริมนี้ให้กระจายทั่วพื้นที่รับแรงดึงและให้ใกล้ผิวนอกภายใต้แรงดึงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นพื้นสองทางไร้คาน ถ้าค่าหน่วยแรงดึงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานสูงกว่า $0.53\sqrt{f'_c}$ จะต้องมีเหล็กเสริมธรรมดาเพื่อแรงยึดเหนี่ยวดังต่อไปนี้

$$A_s = \frac{N_c}{0.5 f_y} \qquad (4.47a)$$

โดยที่ $f_y \leq 4200$กก./ซม.^{2}

N_c = แรงดึงในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรไม่คูณตัวคูณเพิ่ม (D + L)

ในบริเวณพื้นที่รับโมเมนต์ลบในแผ่นพื้นบริเวณเสารองรับ จะต้องเสริมเหล็กธรรมดาทั้งสองทิศทาง โดยพื้นที่ของเหล็กเสริมในแต่ละทิศทางต้องไม่น้อยกว่า

$$A_s = 0.00075 h \ell \qquad (4.47b)$$

โดยที่ h = ความหนาของพื้น

ℓ = ความยาวช่วงในทิศทางที่หาเหล็กเสริม

จะต้องกระจายเหล็กเสริมนี้บนความกว้างในระยะ 1.5h จากขอบเสาทั้งสองด้าน โดยจะต้องมีเหล็กเสริมอย่างน้อยสี่เส้นในแต่ละทิศทางและระยะเรียงต้องไม่เกิน 30 ซม.

b. เหล็กเสริมมากสุด ถ้าปริมาณเหล็กเสริมมากเกินไป การวิบัติจะเกิดอย่างฉับพลันด้วยการอัดแตกของคอนกรีตในขณะที่เหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดคราก โดยปกติคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกออกแบบให้มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าที่สภาวะสมดุล โดยเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมสูงสุดจะต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล ρ_b ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากพร้อมกับการอัดแตกของคอนกรีตที่ผิวรับแรงอัด

แต่ข้อกำหนดข้างบนอาจจะใช้ไม่ได้เสมอไปกับคานคอนกรีตอัดแรง แรงดึงขณะถ่ายแรง P_i และแรงดึงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน P_e จะเป็นตัวระบุถึงพื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้รวมไปถึงพื้นที่ของเหล็กเสริมธรรมดา นอกเหนือไปจากนี้ กำลังครากและหน่วยการยืดตัวที่จุดครากในเหล็กเสริมอัดแรงก็เป็นสิ่งที่หาได้ไม่แน่นอน ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตอัดแรงให้รับน้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด อาจจะส่งผลให้คานมีพฤติกรรมแบบเหนียวหรือเปราะก็ได้ภายใต้การทดสอบด้วยวิธีกำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน

เพื่อที่จะทำให้ได้พฤติกรรมแบบเหนียว มาตรฐาน ACI จำกัดค่าดัชนีเหล็กเสริมไว้ที่ $0.36\beta_1$ โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 280)}{70} \geq 0.65 \qquad (4.48)$$

สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเหล็กเสริมอัดแรงอย่างเดียว

$$\omega_p = \rho_p \frac{f_{ps}}{f'_c} \leq 0.36\beta_1 \qquad (4.49a)$$

สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับแรงดึงและแรงอัด

$$\left[\omega_p + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right] \leq 0.36\beta_1 \qquad (4.49b)$$

โดยที่ $\omega = \dfrac{A_s f_y}{bdf'_c}$ และ $\omega' = \dfrac{A'_s f_y}{bdf'_c}$

และสุดท้ายสำหรับหน้าตัดที่มีปีก

$$\left[\omega_{pw} + \frac{d}{d_p}(\omega_w - \omega'_w)\right] \leq 0.36\beta_1 \qquad (4.49c)$$

โดยจะหา ω_{pw} , ω_w , และ ω_w' , ได้จากสมการ 4.49a และ 4.49b เพียงแต่แทนค่า b ในสมการเหล่านั้นด้วยความกว้างของแกนคาน b_w การพิสูจน์ข้างล่างแสดงให้เห็นว่าพจน์ ω_p ,

$\left[\omega_p + \dfrac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]$ และ $\left[\omega_{pw} + \dfrac{d}{d_p}(\omega_w - \omega'_w)\right]$ มีค่าเท่ากับ $0.85a/d_p$ โดยที่ a เป็นความลึกของรูปสี่เหลี่ยมแรงอัดเทียบเท่า

- ในหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและหน้าตัดแบบมีปีกซึ่งมี $a \leq h_f$

$$\left[\omega_p + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right] = \left[\frac{A_{ps}}{bd_p}\cdot\frac{f_{ps}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}\left(\frac{A_s}{bd}\cdot\frac{f_y}{f'_c} - \frac{A'_s}{bd}\cdot\frac{f_y}{f'_c}\right)\right]$$

$$= \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - A'_s f_y}{bd_p \cdot f'_c} = \frac{0.85f'_c ab}{bd_p f'_c} = \frac{0.85a}{d_p}$$

- สำหรับหน้าตัดแบบมีปีกซึ่งมี $a > h_f$ ถ้าให้ C_F เป็นแรงอัดของคอนกรีตในส่วนปีก

$$\left[\omega_{pw} + \frac{d}{d_p}(\omega_w - \omega'_w)\right] = \left[\frac{(A_{ps}f_{ps} - C_F)}{b_w d_p f'_c}\cdot + \frac{d}{d_p}\left(\frac{A_s}{b_w d}\cdot\frac{f_y}{f'_c} - \frac{A'_s}{b_w d}\cdot\frac{f_y}{f'_c}\right)\right]$$

$$= \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - A'_s f_y - C_F}{b_w d_p \cdot f'_c} \qquad (4.49d)$$

$$= \text{แรงอัดในแกนคาน}/(b_w d_p f'_c)$$

$$= \frac{0.85f'_c b_w a}{b_w d_p f'_c} = \frac{0.85a}{d_p}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะยกเว้นข้อจำกัดของสมการที่ 4.49a, b และ c ได้ ตราบใดที่กำลังรับแรงดัดที่ใช้คำนวณออกแบบมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงดัดที่หามาจากแรงอัดในคอนกรีตแต่อย่างเดียว กล่าวคือถ้าไม่มีการวิเคราะห์โดยใช้ความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัวแล้ว กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีเหล็กเสริมมากกว่าปริมาณที่สภาวะสมดุลกำลังโมเมนต์จะหาได้จากสมการที่สร้างมาจากผลของการทดลอง

สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $M_n = 0.25f_c'bd^2$ (4.50a)

สำหรับหน้าตัดแบบมีปีก $M_n = 0.25f_c'bd^2 + 0.85f_c'(b - b_w)h_f(d - 0.5h_f)$ (4.50b)

ซึ่งจะดัดแปลงสมการข้างบนได้เป็น

- สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีเหล็กเสริมมากกว่าปริมาณที่สภาวะสมดุล

$$M_n = f_c'bd_p^2\left(0.36\beta_1 - 0.08\beta_1^2\right) \quad (4.51a)$$

- สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมแบบมีปีกที่มีเหล็กเสริมมากกว่าปริมาณที่สภาวะสมดุล

$$M_n = f_c'b_wd_p^2\left(0.36\beta_1 - 0.08\beta_1^2\right) + 0.85f_c'\left(b - b_w\right)h_f\left(d - 0.5h_f\right) \quad (4.51b)$$

4.10.2.5 ขอบเขตสภาวะแรงดัดโดยวิธีกำลังในเหล็กเสริมอัดแรงแบบไม่มีการยึดเหนี่ยว

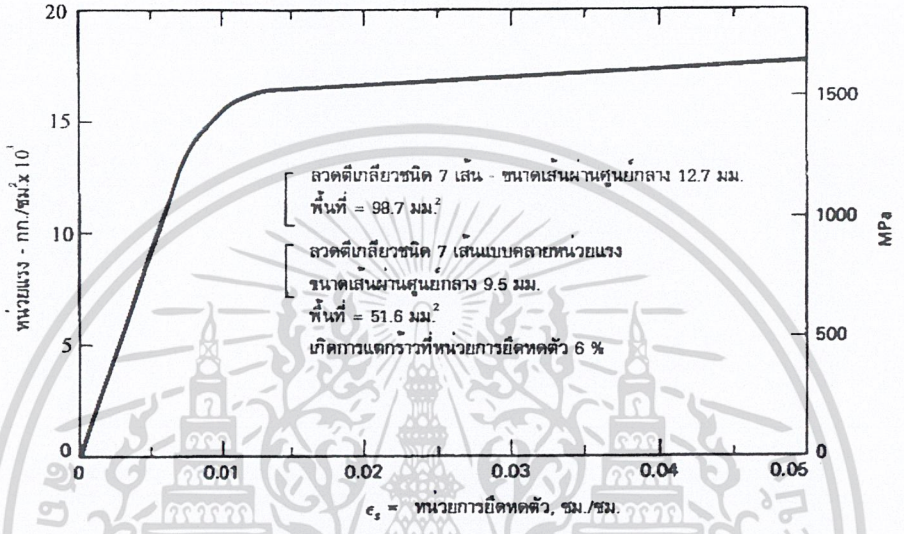
หัวข้อ 4.10.1 และ 4.10.2 แสดงการออกแบบและการวิเคราะห์สำหรับคานอัดแรงแบบดึงก่อน ซึ่งมีการยึดเหนี่ยวเต็มที่ระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีตที่หล่อล้อมรอบ เช่นเดียวกับคานอัดแรงแบบดึงทีหลัง แต่มีการอัดน้ำปูนเข้าไปในท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงเพื่อทำให้เกิดการยึดเหนี่ยว

เหล็กเสริมอัดแรงแบบดึงทีหลังที่ไม่มีการอัดน้ำปูนในท่อร้อย หรือมีการเคลือบเหล็กเสริมอัดแรงด้วยยางมะตอย (นิยมมากในอเมริกา) จะจัดว่าเหล็กเสริมอัดแรงที่ไม่มีการยึดเหนี่ยว ดังนั้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำจะเกิดการเลื่อนไถลระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตล้อมรอบ ทำให้เกิดการยืดตัวคงที่ความยาวของเหล็กเสริมอัดแรง เมื่อเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นในบริเวณที่มีโมเมนต์สูง หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นและจะไม่เพิ่มเฉพาะบริเวณของรอยร้าว แต่จะเพิ่มสม่ำเสมอตลอดความยาวของเหล็กเสริมอัดแรงที่เลื่อนไถลได้อย่างอิสระ ส่งผลให้หน่วยการยืดตัวและหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นในกรณีของเหล็กเสริมอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยว ปริมาณรอยร้าวที่เกิดขึ้นก็จะน้อยกว่า แต่รอยร้าวจะกว้างกว่า หน่วยแรงที่จุดวิบัติในเหล็กเสริมอัดแรงจะสูงกว่าหน่วยแรงดึงประสิทธิผล f_{pe} เพียงเล็กน้อย

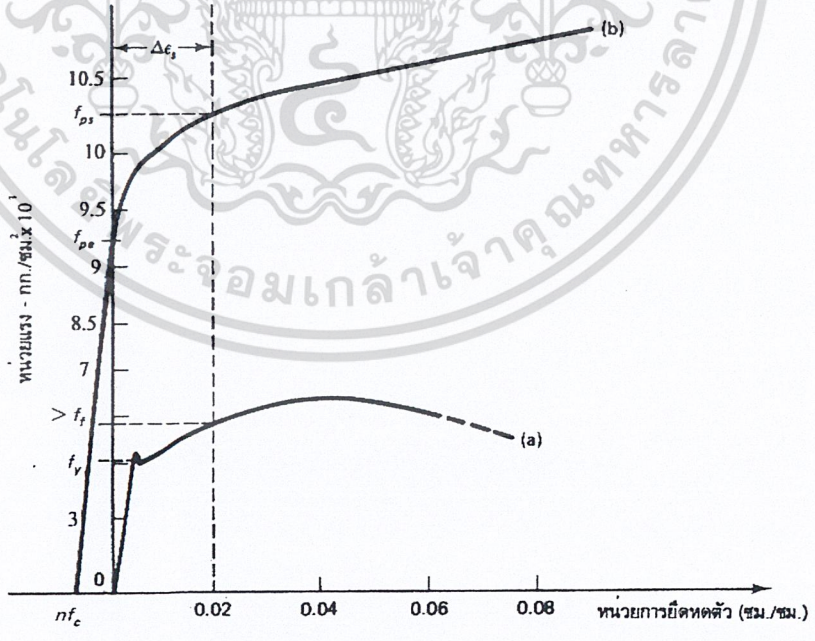
เพื่อที่จะประกันว่าโครงสร้างนั้นใช้งานได้ดี จะต้องเสริมเหล็กธรรมดาพอประมาณแต่ต้องอยู่ภายใต้พิกัดในหัวข้อที่ 4.10.2.4 เหล็กเสริมธรรมดาจะควบคุมปริมาณและความกว้างของรอยแตกร้าว และยังช่วยเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังรับแรงดัด M_n ของหน้าตัดอย่างมาก เหล็กเสริมนี้จะเกิดการยืดตัวมากกว่าการยืดที่จุดคราก เพราะขนาดของการยืดตัวจะต้องสอดคล้องกับการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นที่จุดวิบัติหน่วยแรงในเหล็กเสริมธรรมดาจะสูงกว่ากำลังครากของตัวมันเอง รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัว สำหรับลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้นขนาด 12.7 มม. เกรด 270 ในระหว่างที่รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ดังกล่าวของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมธรรมดา



รูปที่ 4.33 - ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัว สำหรับลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น ขนาด 12.7 มม. เกรด 270



รูปที่ 4.34 - เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวข้างบน จะสรุปได้ว่าสมการที่ใช้หากำลังระบุรับโมเมนต์ M_n ของคานแบบมีการยึดเหนี่ยวก็ใช้ได้สำหรับคานแบบไม่มีการยึดเหนี่ยว ถึงแม้ว่าการอัดน้ำปูนในท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงระบบดึงเหล็กทีหลังเป็นสิ่งที่สมควรกระทำ แต่บางครั้งก็เป็นไปได้ค่อนข้างยาก เช่น ในระบบพื้นสองทางหรือชิ้นส่วนรูปกล่องซึ่งมีความหนาไม่มาก และยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการอัดน้ำปูนในกรณีที่มีเหล็กเสริมอัดแรงแออัดมาก

4.11 การออกแบบเบื้องต้นโดยวิธีกำลัง

ถ้าใช้วิธีกำลังในการออกแบบเบื้องต้น ค่าโมเมนต์ที่ใช้คำนวณออกแบบ ϕM_n จะต้องไม่น้อยกว่าโมเมนต์ที่ต้องการ M_u ความลึกที่เลือกครั้งแรกจะได้มาจากอัตราส่วนของความยาวช่วงต่อความลึกที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น จะใช้เป็นที่พักอาศัยหรือลานจอดรถจะเป็นตัวระบุถึงความกว้างของปีกบน ซึ่งอาจจะเป็นหน้าตัดทีคู่หรือรูปกล่อง หรือถ้าใช้ในงานสะพานซึ่งระยะระหว่างคานแต่ละตัวจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกและจำนวนช่องจราจร หน้าตัดรูปตัว I ก็จะเหมาะสมมากกว่า

โดยทั่วไป ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเท่ากัน คานคอนกรีตอัดแรงจะมีความลึกประมาณร้อยละ 75 ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก หรืออีกวิธีหนึ่ง จะใช้ความลึก 5 ซม.ต่อช่วงยาว 1 ม. หลังจากที่เลือกความลึกเบื้องต้นแล้ว ก็จะหาค่าอื่น ๆ ต่อไป

สมมติให้แนวของเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ที่ 0.85h จากกึ่งกลางความหนาของปีก จะได้แขนของแรงคู่ควบ jd ≈ 0.80h และสมมติให้กำลังระบุของลวดอัดแรงเป็น $f_{ps} \cong 0.90 f_{pu}$ จะได้พื้นที่ A_{ps} ของเหล็กเสริมอัดแรงเป็น

$$A_{ps} = \frac{Mu/\phi}{0.9 f_{pu}(0.80h)} \tag{4.52a}$$

หรือ

$$A_{ps} = \frac{M_n}{0.72 f_{pu} h} \tag{4.52b}$$

ถ้าความลึกของสี่เหลี่ยมแรงอัดเทียบเท่า a เท่ากับความหนาของปีก h_f และให้ $ba = A_c'$ จากรูปที่ 4.29(d) จะได้

$$C = 0.85 f_c' A_c'$$

$$T = 0.9 f_{pu} A_{ps} = \frac{M_n}{0.8h}$$

จากความสมดุลของแรง C = T ดังนั้นพื้นที่แรงอัดในปีกเป็น

$$A_c' = \frac{M_n}{0.85 f_c'(0.8h)} = \frac{M_n}{0.68 f_c' h} \tag{4.53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เลือกความกว้างของปีกคานและรู้ความลึกของคาน ก็จะหาความหนาของแกนคานได้จากข้อกำหนดของแรงเฉือนในบทที่ 5 หลังจากนั้นก็ใช้การลองค่าและปรับแก้ จนได้หน้าตัดสำหรับกรณีรับน้ำหนักบรรทุกนั้น นำไปสู่การวิเคราะห์หน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

4.12 สรุปขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงภายใต้สภาวะวิบัติ

1. พิจารณาดูว่าจะใช้คอนกรีตอัดแรงแบบบางส่วนหรือไม่ โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิผลของเหล็กเสริมธรรมดา เลือกความลึกเบื้องต้น h โดยใช้ h = 0.05L หรือ 0.75 ของความลึกของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำลังระบุรับโมเมนต์ $M_n = M_u/\phi$

2. เลือกความหนาของปีก ซึ่งจะให้พื้นที่ทั้งหมดของคอนกรีตในปีก $A_c' \cong M_n/(0.68 f_c' h)$ โดยที่การเลือกความกว้างของปีกจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและระยะห่างของคาน เลือกพื้นที่เบื้องต้นของเหล็กเสริมอัดแรง $A_{ps} = M_n/(0.72 f_{pu} h)$

3. เลือกหน่วยแรงในเหล็กเสริม f_{ps} ที่จุดวิบัติให้เหมาะสมในการสมมุติครั้งแรก ถ้า $f_{pe} < 0.5 f_{pu}$ จะต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีการสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว เลือกจะใช้เหล็กเสริมอัดแรงเป็นแบบมีการยึดเหนี่ยวหรือไม่มีการยึดเหนี่ยว ใช้หน่วยแรงประสิทธิผล f_{pe} จากการวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานถ้าได้ทำการออกแบบไปแล้ว ถ้า $f_{pe} > 0.5 f_{pu}$ ใช้ค่าโดยประมาณดังต่อไปนี้

   (a) เหล็กเสริมอัดแรงที่มีการยึดเหนี่ยว

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left\{\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right\}\right)$$

   (b) เหล็กเสริมอัดแรงที่ไม่มีการยึดเหนี่ยว อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึก ≤ 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{100\rho_p}$$

   (c) เหล็กเสริมอัดแรงไม่มีการยึดเหนี่ยว อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึก > 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เลือกใช้หน้าตัดว่า ควรจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือเป็นแบบมีปีกจากการหาตำแหน่งของแกนสะเทิน c = a/β_1

ถ้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $a = \dfrac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - A_s^{'} f_y}{0.85 f_c^{'} b}$

ถ้าเป็นแบบมีปีก $a = \dfrac{A_{pw} f_{ps}}{0.85 f_c^{'} b_w}$

โดยที่ $A_{pw} f_{ps} = A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - 0.85 f_c^{'}(b - b_w) h_f$

5. ถ้า h_f มากกว่า c และ a วิเคราะห์หน้าตัดเสมือนกับเป็นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวหรือมีเหล็กเสริมรับแรงอัดด้วย

6. หาค่าดัชนีเหล็กเสริม ω_p, ω และ ω' ในกรณีที่ $a < h_f$ (แกนสะเทินอยู่ในปีก ดังนั้นใช้เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า)

(a) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงอย่างเดียว

$$\omega_T = \omega_p = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_c^{'}} = \frac{A_{ps}}{b d_p} \frac{f_{ps}}{f_c^{'}}$$

(b) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีทั้งเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดและรับแรงดึง

$$\omega_T = \omega_p + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')$$

ถ้าดัชนีเหล็กเสริมทุกค่าที่หามาจาก (a) หรือ (b) มีค่าไม่เกิน $0.36\beta_1$ จะได้กำลังรับโมเมนต์

$$M_n = A_{ps} f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_y \left(\frac{a}{2} - d'\right)$$

7. หาค่าดัชนีเหล็กเสริม ω_p, ω และ ω' ในกรณีที่ $a > h_f$ (แกนสะเทินอยู่นอกปีก), ค่าดัชนีรวมทั้งหมดเป็น

$$\omega_T = \omega_{pw} + \frac{d}{d_p}(\omega_w - \omega_w')$$

โดยดัชนีทุกค่าจะหามาจากการแทนค่า b = b_w (ความกว้างของแกนคาน)

ถ้าดัชนีทั้งหมด $\omega_T < 0.36\beta_1$ จะได้

$$M_n = A_{pw} f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d - d_p\right) + 0.85 f_c'\left(b - b_w\right) h_f \left(d_p - \frac{h_f}{2}\right)$$

โดยที่ $a = \dfrac{A_{pw} f_{ps}}{0.85 f_c' b_w}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $A_{pw}f_{ps} = A_{ps}f_{ps} + A_s f_y - 0.85f_c'(b-b_w)h_f$

ถ้าค่าดัชนีทั้งหมด $\omega_T > 0.36\beta_1$ แสดงว่าหน้าตัดเสริมเหล็กเกินสภาวะสมดุล จะได้กำลังระบุรับโมเมนต์เป็น

$$M_n = f_c'b_w d_p^2\left(0.36\beta_1 - 0.08\beta_1^2\right) + 0.85f_c'\left(b-b_w\right)h_f\left(d_p - 0.5h_f\right)$$

8. ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาน้อยสุดที่ต้องมีเพื่อการเหนี่ยวรั้ง $A_s > 0.004A$ พร้อมกับตรวจให้ $M_u \geq 1.2M_{cr}$ เพื่อจะได้ปริมาณเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึงที่พอเพียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ไม่มีการยึดเหนี่ยว

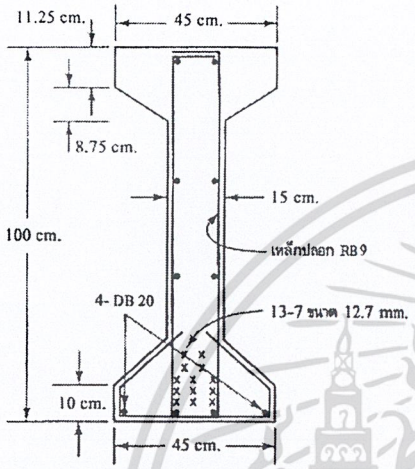
9. เลือกขนาดและระยะเรียงของเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึงและรับแรงอัด ถ้าต้องมี

10. ตรวจสอบว่าโมเมนต์ที่ใช้คำนวณออกแบบ ϕM_n ต้องไม่น้อยกว่าโมเมนต์ที่ต้องการ M_u ถ้าน้อยกว่าต้องปรับแก้การออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4.9 -ใช้วิธีกำลังออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงโดยใช้ความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว

ใช้วิธีกำลังออกแบบคานชนิดมีการยึดเหนี่ยวตามตัวอย่างที่ 4.2 ให้ใช้เหล็กเสริมธรรมดาช่วยรับน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการ และให้หา f_{ps} จากความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัวจากหน้าตัดกลางช่วงตามที่แสดงในรูปข้างล่าง ซึ่งรองรับแผ่นพื้นหล่อในที่หนา 7.5 ซม. กำหนดให้



f_{pu} = 19 000 กก./ซม.^{2}

สำหรับลวดตีเกลียวชนิดคลายหน่วยแรง

$f_{py} = 0.85 f_{pu}$ = 16 150 กก./ซม.^{2}

f_y = 4000 กก./ซม.^{2}

f_c' = 350 กก./ซม.^{2}

ใช้ลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. ให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมธรรมดาเป็น 4 ซม. และไม่มีเหล็กรับแรงอัด ไม่คิดแรงลมหรือแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

จากตัวอย่างที่ 4.2

น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน	w_L = 1640	กก./ม.
น้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่รวมน้ำหนักคาน	w_{SD} = 150	กก./ม.
สมมติน้ำหนักคาน	w_D = 600	กก./ม.
ความยาวช่วง	L = 19.5	ม.

1. โมเมนต์ที่ต้องการ

$w_u = 1.4(w_D + w_{SD}) + 1.7w_L = 1.4(600 + 150) + 1.7(1640) = 3838$ กก./ม.

โมเมนต์ที่ต้องการ $M_u = \frac{w_u l^2}{8} = \frac{3838(19.5)^2}{8} = 182\ 425$ กก.ม.

กำลังระบุรับโมเมนต์ $M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{182\ 425}{0.9} = 202\ 694$ กก.ม.

2. เลือกหน้าตัดเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ความลึกเป็น 5 ซม. ต่อช่วงความยาว 1 ม. จะได้ความลึกเบื้องต้น h = 5(19.5) ≈ 100 ซม. และสมมติให้ใช้เหล็กเสริมธรรมดา 4-DB20 = 4(3.14) = 12.56 ซม.^{2} จากสมการที่ 4.53

$$A_c' = \frac{M_n}{0.68 f_c' h} = \frac{202\ 694 \times 10^2}{0.68 \times 350 \times 100} = 851.66 \text{ ซม.}^2$$

สมมติความกว้างของปีกเป็น 45 ซม. จะได้ค่าเฉลี่ยของความหนาของปีก = 851.66/45 = 18.93 ซม. และสมมติให้แกนคาน b_w = 15 ซม. จากสมการที่ 4.52b

$$A_{ps} = \frac{M_n}{0.72 f_{pu} h} = \frac{202\ 694 \times 10^2}{0.72 \times 19\ 000 \times 100} = 14.82 \text{ ซม.}^2$$

ซึ่งจะต้องใช้ลวดตีเกลียวคลายหน่วยแรงขนาด 12.7 มม. จำนวน 14.82/0.99 = 15.01 เส้น จะลองใช้ 13 เส้น ได้ $A_{ps} = 13(0.99) = 12.83$ ซม.^{2}

3. หาหน่วยแรง f_{ps} ที่กำลังระบุ โดยใช้ความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว (Strain compability)

หน้าตัดเบื้องต้นที่เลือกมา มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหน้าตัดที่โจทย์กำหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความลึกของคานและความกว้างของปีก ดังนั้นจะใช้ข้อมูลของหน้าตัดตามที่โจทย์กำหนด

A_c = 2493.75 ซม.^{2}, c_t = 50.68 ซม., e = 38 ซม., d_p = 38 + 50.68 = 88.68 ซม., r^2 = 1192.79 ซม.^{2},

e^2 = 1444 ซม.^{2}, e^2/r^2 = 1.21, Ec = 15 200 $\sqrt{350}$ = 282 495 กก./ซม.^{2}, E_{ps} = 1.97x10^6 กก./ซม.^{2} หน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีตที่จุดวิบัติ ϵ_c = 0.003 ซม./ซม. และสมมติให้หน่วยแรงอัดประสิทธิผลภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน $f_{pe} \approx$ 10 900 กก./ซม.^{2}

(a)
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_{ps}} = \frac{10\ 900}{1.97 \times 10^6} = .00556$$

$$P_e = 13 \times 98.71 \times 10^{-2} \times 10\ 900 = 139\ 872 \text{ กก.}$$

ลวดอัดแรงยืดตัวเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงอัดในคอนกรีตลดน้อยลงภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น หน่วยการยืดตัวนี้จะหาได้จากสมการ (ดังใน รูปที่ 4.3 และสมการที่ 4.3c)

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{decomp} = \frac{P_e}{A_c E_c}\left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right)$$

$$= \frac{139\ 872}{2493.75 \times 282\ 495}(1 + 1.21) = 0.000439$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) ลองครั้งแรก โดยสมมติให้ $f_{ps} \approx$ 14 4 00 กก./ซม.^{2} และจะเห็นว่าแกนสะเทินอยู่ภายในปีกของคาน ดังนั้นจากสมการ 4.34a

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{12.83 \times 14\ 400 + 11.36 \times 4\ 200}{0.85 \times 350 \times 45} = 17.36 \text{ ซม.}$$

น้อยกว่า $h_f = 7.5 + 11.25 + 8.75/2 = 23.125$ ซม.

ดังนั้นสี่เหลี่ยมแรงอัดผืนผ้าเทียบเท่าอยู่ในปีก จะคิดหน้าตัดนี้เสมือนเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับ $f_c' = 350$ กก./ซม.^{2}

$\beta_1 = 0.85 - 0.05 = 0.8$

$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{17.36}{0.80} = 21.7$ ซม.

d = 100 – ความหนาคอนกรีตหุ้ม (4 ซม.) – เหล็กลูกตั้ง (1 ซม.) – รัศมีเหล็กเสริม (1 ซม.)
= 94 ซม.

หน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิบัติ จะหาได้จากสมการที่ 4.30 (c)

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_c \left(\frac{d-c}{c}\right) = 0.003\left(\frac{94.1-21.7}{21.7}\right) = 0.01 \text{ ซม./ซม.}$$

รวมเป็นหน่วยการยืดตัวทั้งหมด

$$\varepsilon_{ps} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$
$$= 0.00556 + 0.000439 + 0.01 = 0.016$$

จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัว ในรูปที่ 4.33 จะได้ f_{ps} ที่สอดคล้องกับ $\varepsilon_{ps} = 0.0162$ เป็น 16 170 กก./ซม.^{2} ต่างกับที่สมมติไว้ 14 400 กก./ซม.^{2}

ลองที่สอง โดยสมมติให้ $f_{ps} \approx$ 16 000 กก./ซม.^{2}

$$a = \frac{12.83 \times 16\ 000 + 11.36 \times 4\ 200}{0.85 \times 350 \times 45} = 18.90 \text{ ซม.}$$

$$c = \frac{18.90}{0.80} = 23.625 \text{ ซม.}$$

$$\varepsilon_3 = 0.003\left(\frac{94.1 - 23.625}{23.625}\right) = 0.00895$$

ได้หน่วยการยืดตัวทั้งหมดเป็น $\varepsilon_{ps} = 0.00556 + 0.000439 + 0.00895 = 0.015$ ซม./ซม.

จากรูปที่ 4.33 ได้ $f_{ps} \approx$ 16 000 กก./ซม.^{2} ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_s = 4 - DB20 = 12.56 \text{ ซม.}^2$$

4. กำลังรับโมเมนต์

จากสมการที่ 4.35c ถ้าแกนสะเทินตกอยู่ภายในปีก

$$M_n = 12.83 \times 16\ 000\left(88.68 - \frac{18.90}{2}\right)\times 10^{-2} + 11.36 \times 4\ 200\left(94.1 - \frac{18.90}{2}\right)\times 10^{-2}$$

$$= 162\ 643.34 + 40\ 388.20 = 203\ 031.54 \text{ กก.ม.}$$

$> M_n$ ที่ต้องการ $= 202\ 694$ กก.ม.

โมเมนต์ที่รับโดยเหล็กเสริมธรรมดาคิดเป็นร้อยละ 40 388.2/202 694 = 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตรวจสอบค่าเหล็กเสริมน้อยสุด และ มากสุด

(a) A_s น้อยสุด = 0.004A

โดยที่ A เป็นพื้นที่ส่วนของหน้าตัดระหว่างผิวรับแรงดึง กับ cgc

$$A = 2493.75 - 45(11.25 + \frac{8.75}{2}) - 15[50.68 - (11.25 + 8.75)] = 1330.425 \text{ ซม.}^2$$

A_s น้อยสุด = 0.004(1330.425) = 5.32 ซม.^{2} < 4-DB20

(b) ค่าดัชนีเหล็กเสริมมากสุด จากสมการ 4.57b คือ

$$\omega_p + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega') \le 0.36\beta_1 < 0.29 \text{ สำหรับ } \beta_1 = 0.80$$

และค่าดัชนีเหล็กเสริมทั้งหมด

$$\omega_T = \frac{12.83 \times 16\ 000}{45 \times 88.68 \times 350} + \frac{94.1}{88.68}\left(\frac{12.56 \times 4\ 200}{45 \times 94.1 \times 350}\right)$$

$$= 0.147 + 0.0377 = 0.1847 < 0.29 \text{ ใช้ได้}$$

6. เลือกหน้าตัดสำหรับน้ำหนักบรรทุกประลัย

จากขั้นตอนที่ 1-5 จะเห็นว่าคานในตัวอย่างนี้ซึ่งได้ดัดแปลงมาจากคานในตัวอย่างที่ 4.2 มีกำลังระบุ M_n พอที่จะต้านกำลังที่ต้องการได้ โดยต้องมีเหล็กเสริมธรรมดา DB20 มาช่วยในด้านรับแรงดึงเสมือนเป็นคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน

ดังนั้นจะนำคานตัวนี้ไปใช้งานได้ เพราะได้ผ่านการตรวจสอบข้อกำหนดของหน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งที่กลางช่วงและที่ฐานรองรับ จะเห็นว่าคานตัวนี้จะรับโมเมนต์ระบุที่ต้องการ M_n = 202 694 กก.ม. ได้ก็ต่อเมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดาวางในด้านรับแรงดึงช่วยต้านประมาณร้อยละ 20 ของโมเมนต์ที่ต้องการ และจะเห็นว่าคานตัวนี้ใช้คอนกรีตที่มีกำลัง 350 กก./ซม.^{2} ในระหว่างที่คานในตัวอย่างที่ 4.2 ต้องเพิ่มไปใช้คอนกรีตกำลัง 420 กก./ซม.^{2} จึงจะผ่านข้อกำหนดในด้านหน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ ดังนั้นจะเห็นว่าวิธีกำลังเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบคอนกรีตอัดแรง เพราะเป็นการตรวจสอบว่าหน้าตัดสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณแล้วทั้งหมดได้ จึงจะต้องถือว่าวิธีกำลังเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 4.10</u> - การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบมีแรงยึดเหนี่ยวโดยวิธีกำลังด้วยการใช้วิธีประมาณ

ออกแบบคานในตัวอย่างที่ 4.9 เป็นคานอัดแรงบางส่วนโดยใช้วิธีประมาณตาม ACI ใช้หน้าตัดจริงในตัวอย่างที่ 4.2 ด้วย (a) เหล็กอัดแรงแบบมีแรงยึดเหนี่ยว (b) เหล็กอัดแรงแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยว ไม่ต้องรวมเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด

---

1. <u>คุณสมบัติหน้าตัด</u>

ความกว้างของปีกบน ในตัวอย่างที่ 4.2 b = 45 ซม.และความหนาเฉลี่ยของปีก

$$h_f = 11.25 + \frac{8.75}{2} = 15.625 \text{ ซม.}$$

ลองใช้เหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง 4-DB20 ร่วมกับเหล็กเสริมอัดแรง

2. <u>หน่วยแรง f_{ps} ในเหล็กเสริมอัดแรงที่กำลังระบุ</u>

จากตัวอย่างที่ 4.9: $f_{pe} \approx 10\,900$ กก./ซม.^{2}

$$0.5 f_{pu} = 0.5 \times 19\,000 = 9\,500 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_{pe} > 0.5 f_{pu}$$

ดังนั้นสามารถใช้วิธีประมาณตาม ACI ในการหา f_{ps}

(A) *แบบมีแรงยึดเหนี่ยว*

เมื่อยังไม่รู้ตำแหน่งของแกนสะเทิน จะลองวิเคราะห์เหมือนเป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมตามข้างล่าง:

จากสมการที่ 4.43

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]\right)$$

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{16\,000}{19\,000} = 0.84 \text{ ใช้ } \gamma_p = 0.40$$

$$A_{ps} = 13 \times 0.9871 = 12.83 \text{ ซม.}^2$$

$$A_s = 4 \times 3.14 = 12.56 \text{ ซม.}^2$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b d_p} = \frac{12.83}{45 \times 88.68} = 0.0032$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = \frac{A_s}{bd} \times \frac{f_y}{f_c'} = \frac{11.36}{45 \times 95.5} \times \frac{4\ 200}{350} = 0.0317$$

สำหรับ $\omega' = 0$

$$f_{ps} = 19\ 000\left(1 - \frac{0.40}{0.80}\left[0.0032 \times \frac{19\ 000}{350} + \frac{94.1}{88.68}(0.0317)\right]\right)$$

$$= 19\ 000 \times 0.896 = 17\ 024 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$a = \frac{12.83 \times 17\ 024 + 11.36 \times 4\ 000}{0.85 \times 350 \times 45} = 19.71 > h_f = 15.625 \text{ ซม.}$$

ดังนั้นแกนสะเทินอยู่ใต้ปีก จะต้องวิเคราะห์แบบหน้าตัดรูปตัว T ให้ความกว้างของแกนคานเป็น b_w

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd_p} = \frac{12.83}{45 \times 88.68} = 0.0032$$

$$\omega_w = \frac{A_s}{b_w d} \times \frac{f_y}{f_c'} = \frac{11.36}{15 \times 94.1} \times \frac{4\ 200}{350} = 0.0966$$

$$f_{ps} = 19\ 000\left(1 - \frac{0.40}{0.80}\left[0.00964 \times \frac{19\ 000}{350} + \frac{95.5}{88.68}(0.0966 - 0)\right]\right)$$

$$= 13\ 040.24 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$A_{pw} f_{ps} = A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - 0.85 f_c'(b - b_w) h_f$$

$$= 12.83 \times 13\ 040.24 + 11.36 \times 4\ 200 - 0.85 \times 350(45 - 15) \times 15.625$$

$$= 167\ 306.28 + 47\ 712 - 139\ 453.12 = 75\ 565.16 \text{ กก.}$$

$$a = \frac{75\ 565.16}{0.85 \times 350 \times 15} = 16.93 \text{ ซม.}$$

3. กำลังระบุรับโมเมนต์

$$M_n = A_{pw} f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y (d - d_p) + 0.85 f_c'(b - b_w) h_f \left(d_p - \frac{h_f}{2}\right)$$

$$= 75\ 565.16\left(88.68 - \frac{16.93}{2}\right) \times 10^{-2} + 11.36\left(4\ 200\right)(95.5 - 88.68) \times 10^{-2}$$

$$+ 0.85(350)(45 - 15) \times 15.625\left(88.68 - \frac{15.625}{2}\right) \times 10^{-2}$$

$= 176\ 640.8$ กก.ม. $< M_n$ ที่ต้องการ $= 202\ 694$ กก.ม. ดังนั้นหน้าตัดไม่เพียงพอ

ลองใหม่โดยจะเพิ่มปริมาณของเหล็กเสริมธรรมดา เป็น 5-DB25. $A_s = 24.53$ ซม.^{2} จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_w = \frac{24.53}{15\times 94.1}\times\frac{4\ 200}{350} = 0.285$$

ให้ $f_{ps} = 12\ 200$ กก./ซม.^{2} และ $A_{pw}f_{ps} = 120\ 098.87$ กก. ดังนั้น

$$a = \frac{120\ 098.87}{0.85\times 350\times 15} = 26.91 \text{ ซม.}$$

$$M_n = 120\ 098.98\left(88.68-\frac{26.91}{2}\right)+24.53\left(4\ 200\right)\left(94.1-88.68\right)$$

$$+0.85\left(350\right)\left(45-15\right)\times 15.625\left(88.68-\frac{15.625}{2}\right)$$

$= 208\ 700.72$ กก.ม.$> M_n$ ที่ต้องการ $= 202\ 694$ กก.ม. ใช้ได้

ดังนั้นจะใช้เหล็กเสริมธรรมดา 5-DB25 ที่ผิวล่าง ในกรณีของเหล็กเสริมอัดแรงแบบมีแรงยึดเหนี่ยว

(B) *แบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยว*

อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึก $= \frac{19.5}{1.0} = 19.5 < 35$

ดังนั้น จากสมการที่ 4.44a

$$f_{ps} = f_{pe}+700+\frac{f'_c}{100\rho_p} = 10\ 900+700+\frac{350}{100\times 12.83/\left(15\times 88.68\right)}$$

$= 11\ 962.87$ กก./ซม.^{2}

จะเห็นว่าใช้ $b_w = 15$ ซม. ในที่นี้เพื่อหา ρ_p เพราะรู้แล้วว่าจะต้องวิเคราะห์หน้าตัดเสมือนกับคานรูปตัว T เนื่องจากแกนสะเทินอยู่ใต้ปีก ดังนั้น

$$f_{ps} = 11\ 962.87 \text{ กก./ซม.}^2$$

1. เลือกเหล็กเสริมธรรมดา

ลองเหล็กเสริมรับแรงดึง 5-DB25 ช่วยรับโมเมนต์ที่ต้องการ

$A_s = 5\times 4.906 = 24.53$ ซม.^{2}

$A_{pw}f_{ps} = 12.83\times 11\ 962.87+24.53\times 4\ 200-0.85\times 350(45-15)15.625 = 117\ 056.5$ กก.

$$a = \frac{A_{pw}f_{ps}}{0.85f'_c b_w} = \frac{117\ 056.5}{0.85\times 350\times 15} = 26.23 \text{ ซม.}$$

2. กำลังรับโมเมนต์

จากสมการที่ 4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_n = 117\ 056.5\left(88.68-\frac{26.23}{2}\right)\times10^{-2}+24.53\times4\ 200\left(94.1-88.68\right)\times10^{-2}$$

$$+0.85\times350\left(45-15\right)\times15.625\times\left(88.68-\frac{15.625}{2}\right)\times10^{-2}$$

$= 206\ 810$ กก.ม. > M_n ที่ต้องการ $= 202\ 694$ กก.ม.

(C) ตรวจสอบพิกัดของเหล็กเสริม

1. ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุด

จากสมการที่ 4.25 โมเมนต์แตกร้าว M_{cr} หาได้โดย

$$M_{cr} = f_r s_b + P_e\left(e+\frac{r^2}{c_b}\right)$$

จากตัวอย่างที่ 4.2 $f_r = 2\sqrt{350} = 37.42$ และเนื่องจาก $S_b = 60\ 310.34$ ซม.^{3}

e = 38 ซม., $r^2/c_b = 1\ 192.79/49.32 = 24.18$ ซม. และ $P_e = 139\ 872$ กก. จะได้

$M_{cr} = 37.42\times60\ 310.34\times10^{-2}+139\ 872(38+24.18)\times10^{-2} = 109\ 540.54$ กก.ม.

$1.2M_{cr} = 1.2\times109\ 540.54 = 131\ 448.64$ กก.ม.

$M_u = \phi M_n = 0.9\times202\ 694 = 182\ 424.6$ กก.ม. > $1.2M_{cr}$

ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดผ่านข้อกำหนดทั้งในกรณีแบบมีแรงยึดเหนี่ยวและไม่มีแรงยึดเหนี่ยว

2. ดัชนีเหล็กเสริมมากสุดที่ยอมให้

ω_p มากสุดที่ยอมให้ $= 0.36\beta_1 = 0.36\times0.80 = 0.288$

ω_p ที่ใช้จริง $= \rho_p\left(f_{ps}/f'_c\right) = 0.0032\times\frac{11\ 962.87}{350} = 0.109$

ω ที่ใช้จริง $= \rho\left(f_y/f'_c\right) = \frac{24.53}{45\times94.1}\times\frac{4\ 200}{350} = 0.0695$

ดังนั้น $\omega_p+\omega = 0.109+0.0695 = 0.1785 < 0.288$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะใช้หน้าตัดของคานในตัวอย่างที่ 4.2 ร่วมกับเหล็กเสริมธรรมดา 5-DB25 วางในด้านรับแรงดึง จะเห็นกำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยวจะน้อยกว่ากำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดแบบมีแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งก็เป็นตามที่ควรจะเป็น (208 700.72 กก.ม. กับ 206 810 กก.ม.)

ถ้าใช้ f'_c= 420 กก./ซม.^{2} ในตัวอย่างนี้เหมือนกับที่ใช้ในการออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานของหน้าตัดในตัวอย่างที่ 4.2 ก็จะใช้ปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาน้อยลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5

ออกแบบรับแรงเฉือน

5.1 คำนำ

เนื่องจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดมาก การออกแบบเพื่อรับแรงเฉือนและแรงบิดจึงเป็นสิ่งสำคัญในโครงสร้างคอนกรีตทุกประเภท

พฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงที่วิบัติภายใต้แรงเฉือนหรือแรงเฉือนร่วมกับแรงบิด จะแตกต่างกับพฤติกรรมภายใต้แรงดัดอย่างมาก การวิบัติจะเกิดอย่างฉับพลันโดยไม่อาจจะรู้ล่วงหน้าได้ และรอยแตกร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นก็จะมีขนาดกว้างกว่ารอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด ทั้งแรงเฉือนและแรงบิดจะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือน ซึ่งหน่วยแรงนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stresses) ที่หน้าตัดวิกฤต ซึ่งมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

หน่วยแรงเฉือนในคานทั่วไป ไม่ได้เกิดโดยตรงจากแรงเฉือนหรือแรงบิด แต่จะเกิดจากผลร่วมของน้ำหนักบรรทุกภายนอกและโมเมนต์ ผลร่วมนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงดัด ซึ่งเรียกว่า "*แรงดึงในแนวทแยง*" (*diagonal tension*) ในกรณีพิเศษจริง ๆ ระบบโครงสร้างบางประเภทจึงจะอยู่ภายใต้แรงเฉือนหรือแรงบิดโดยตรง ยกตัวอย่าง เช่น ในหูช้างซึ่งจะรับแรงเฉือนโดยตรง และในดาดฟ้าหรือหลังคายื่นซึ่งจะทำให้เกิดการบิดโดยตรงบนคานที่รองรับ

5.2 พฤติกรรมของคานภายใต้แรงเฉือน

พิจารณาชิ้นส่วนเล็ก ๆ A_1 และ A_2 บนคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูปที่ 5.1(a) คานดังกล่าวทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติคงที่ สม่ำเสมอ และมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวเป็นเชิงเส้น รูปที่ 5.1(b) แสดงการกระจายหน่วยแรงดัดหรือหน่วยแรงดึงตามแกนซึ่งเกิดจากโมเมนต์และหน่วยแรงเฉือนตามความลึกของหน้าตัด ถ้าให้ f_1 เป็นหน่วยแรงดึงตามแกนซึ่งเกิดจากโมเมนต์ และ v เป็นหน่วยแรงเฉือนบนชิ้นส่วน A_1 บนระนาบ a_1-a_1 ที่ระยะ y จากแกนสะเทิน จากสมการของกลศาสตร์ของวัสดุจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_t = \frac{My}{I} \tag{5.1}$$

และ
$$v = \frac{VA\bar{y}}{Ib} = \frac{VQ}{Ib} \tag{5.2}$$

โดยที่ M และ V = โมเมนต์และแรงเฉือนที่หน้าตัด a-a

A = พื้นที่ของส่วนของคานด้านนอกของระนาบที่ตัดผ่านศูนย์ถ่วงของ A_1

$\bar{y}$ = ระยะจากศูนย์ถ่วงของ A_1 ไปยังแกนสะเทิน

Q = โมเมนต์ของพื้นที่ A รอบแกนสะเทิน และ

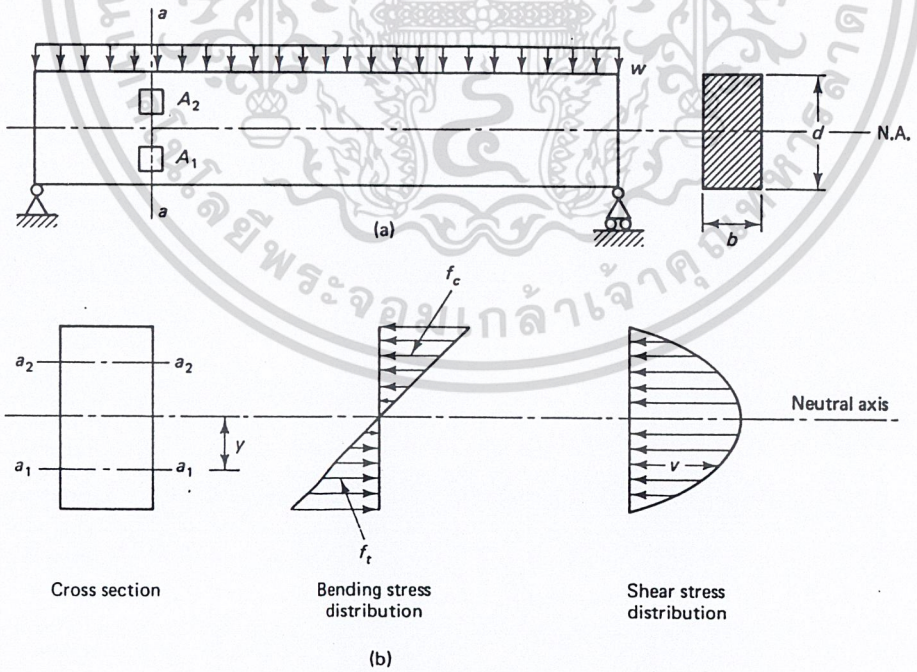
b = ความกว้างของคาน

รูปที่ 5.2 แสดงหน่วยแรงภายในกระทำบนชิ้นส่วน A_1 และ A_2 ใช้ Mohr's Circle ตามที่แสดงในรูปที่ 5.2(b) ก็จะหาหน่วยแรงหลักบนชิ้นส่วน A_1 บริเวณภายใต้แรงดึงใต้แกนสะเทิน เป็น

$$f_{t(max)} = f_t/2 + \sqrt{(f_t/2)^2 + v^2} \quad \text{(หน่วยแรงดึงหลัก)} \tag{5.3a}$$

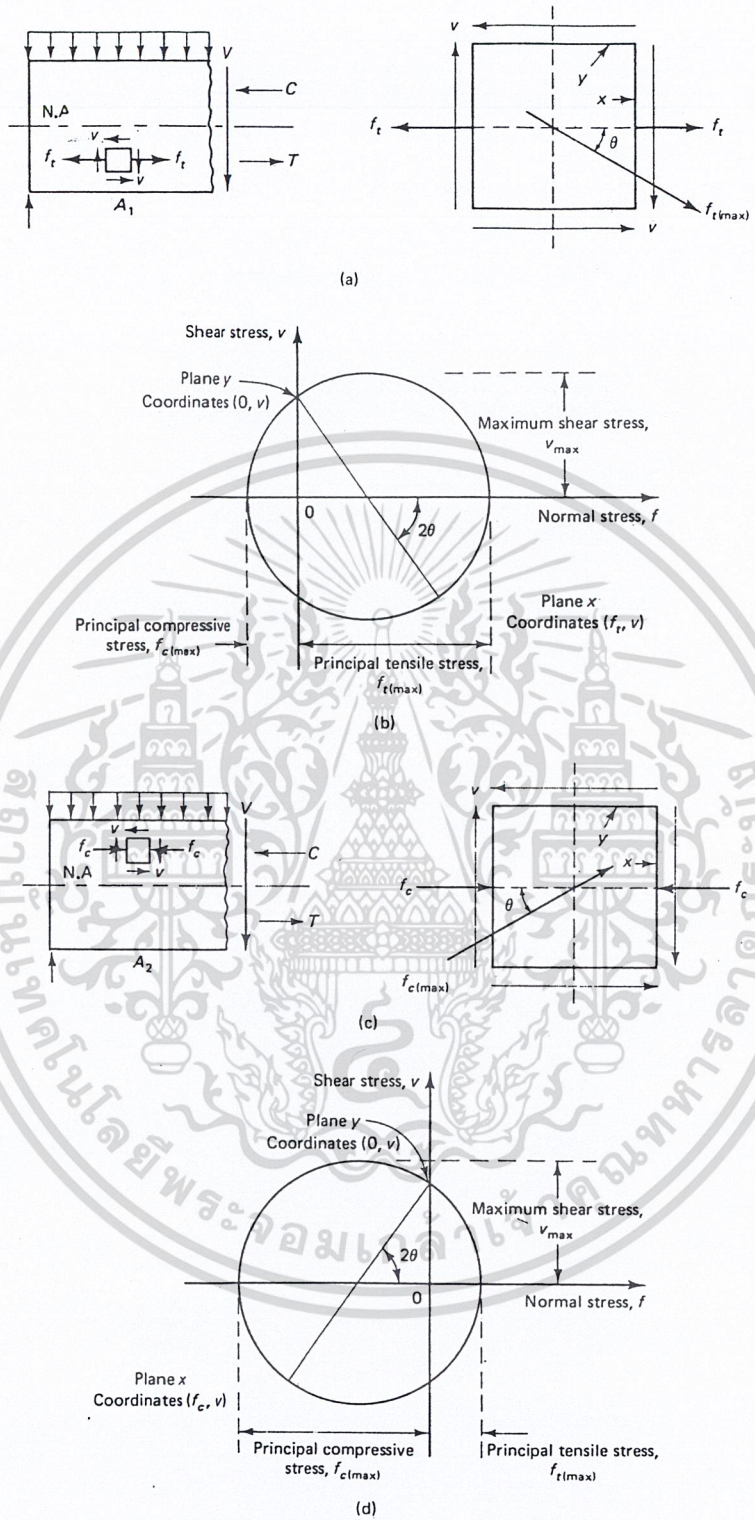
$$f_{c(max)} = f_t/2 - \sqrt{(f_t/2)^2 + v^2} \quad \text{(หน่วยแรงอัดหลัก)} \tag{5.3b}$$

และ
$$\tan(2\theta_{max}) = \frac{v}{f_t/2} \tag{5.3c}$$



รูปที่ 5.1 – การกระจายหน่วยแรงสำหรับคานซึ่งทำจากวัสดุที่มีคุณภาพคงที่และสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 – สภาวะหน่วยแรงของชิ้นส่วน A_1 และ A_2

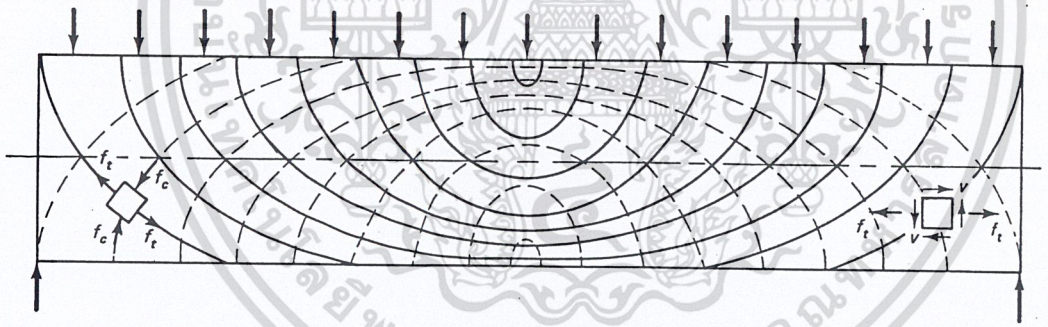
(a) หน่วยแรงบน A_1 (b) Mohr's circle ของ A_1 (c) หน่วยแรงบน A_2 (d) Mohr's circle ของ A_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน

แต่เมื่อมองกลับมายังคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่คงที่และไม่สม่ำเสมอ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีเพียงหนึ่งในสิบของกำลังรับแรงอัด ดังนั้นหน่วยแรงอัด f_c ของชิ้นส่วน A_2 เหนือแกนสะเทินจะช่วยป้องกันการแตกร้าวเพราะหน่วยแรงหลักสูงสุดบนชิ้นส่วนนั้นเป็นหน่วยแรงอัด แต่สำหรับชิ้นส่วน A_1 ซึ่งหน่วยแรงหลักสูงสุดบนชิ้นส่วนนั้นเป็นหน่วยแรงดึง จะทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นในบริเวณนั้น ถ้าพิจารณาบริเวณใกล้ฐานรองรับ ซึ่งโมเมนต์และ f_t จะมีค่าน้อยและแรงเฉือนมีค่ามาก หน่วยแรงดึงหลัก $f_{t(max)}$ จะมีทิศทางทำมุมประมาณ 45° กับแนวตามแกนคาน ตามรูปที่ 5.3 เนื่องจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งต่ำมาก ทำให้เกิดรอยร้าวในแนวทแยงตามระนาบตั้งฉากกับระนาบของหน่วยแรงหลัก ซึ่งเรียกว่า “diagonal tension crack” หรือ ”รอยร้าวจากแรงดึงทแยง” จึงจำเป็นที่จะต้องมีเหล็กเสริมต้านแรงดึงทแยงเพื่อป้องกันรอยร้าวเหล่านี้

ถ้าสมมติให้ f_t ในบริเวณฐานรองรับเป็นศูนย์ ชิ้นส่วนจะอยู่ภายใต้สภาวะของแรงเฉือนอย่างเดียว และหน่วยแรงหลักจากสมการที่ 5.3b ก็จะเป็นหน่วยแรงเฉือน v กระทำในระนาบ 45° ซึ่งก็จะเป็นหน่วยแรงดึงทแยงที่ทำให้เกิดรอยร้าวในแนวทแยงนั่นเอง

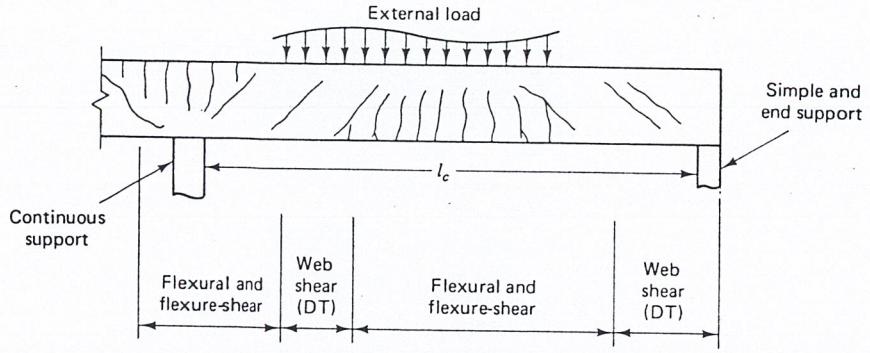


รูปที่ 5.3 – แนวของหน่วยแรงหลักในคานที่ใช้วัสดุคงที่และสม่ำเสมอ

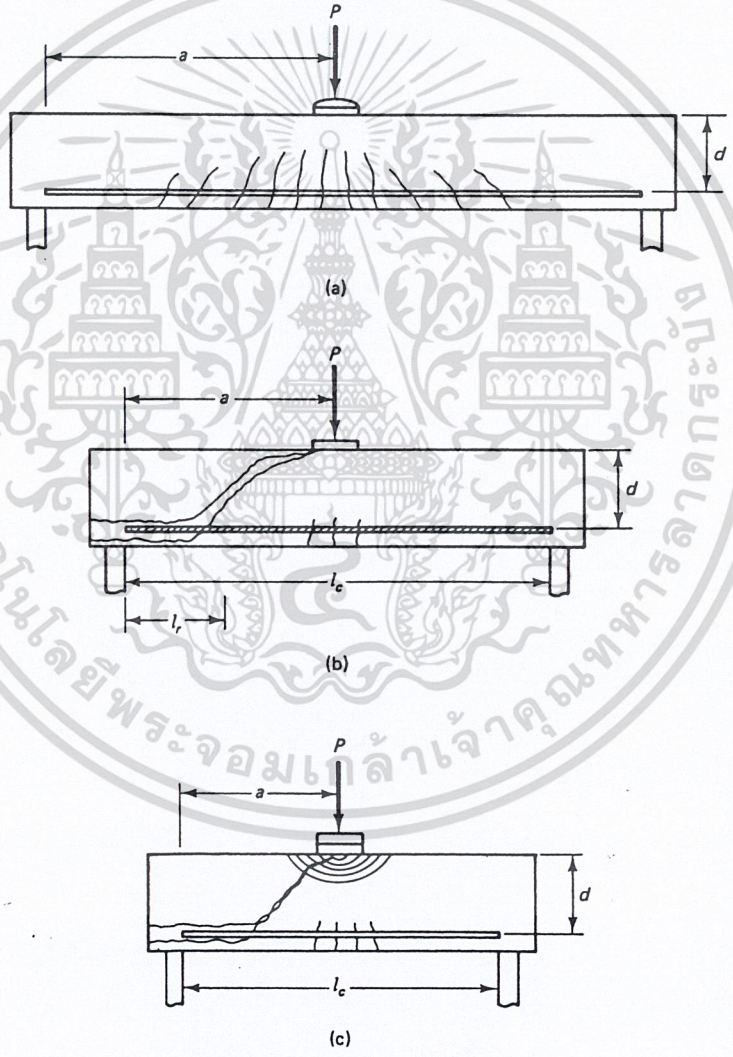
5.4 คานคอนกรีตซึ่งไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงดึงในแนวทแยง

ในบริเวณที่มีโมเมนต์สูง รอยร้าวจะมีทิศทางเกือบจะตั้งฉากกับแนวของคาน รอยร้าวเหล่านี้เป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด ในบริเวณที่มีแรงเฉือนสูงเนื่องจากแรงดึงทแยง รอยร้าวในแนวทแยงจะเกิดต่อจากรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด เรียกว่าเป็นรอยร้าวเนื่องจากผลร่วมของแรงดัดและแรงเฉือน (flexure shear crack) รูปที่ 5.4 แสดงรอยร้าวในกรณีต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 – รอยร้าวชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 5.5 – รูปแบบของการวิบัติตามลำดับของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกของคาน
(a) โดยแรงดัด (b) โดยแรงเฉือนในแนวทแยง (c) โดยแรงอัดร่วมกับแรงเฉือนในแกนคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 ชนิดของการวิบัติของคานซึ่งไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงดึงในแนวทแยง

อัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึกของคาน จะเป็นตัวระบุถึงรูปแบบของการวิบัติของคาน รูปที่ 5.5 แสดงรูปแบบของการวิบัติสำหรับอัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึกของคานที่ต่างกัน ช่วงแรงเฉือน a เป็นระยะจากตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกเป็นจุดกระทำถึงขอบของฐานรองรับ หรือความยาวช่วงว่างสำหรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจาย การวิบัติโดยทั่วไปจะแบ่งสามรูปแบบ ได้แก่ การวิบัติโดยแรงดัด โดยแรงเฉือนในแนวทแยง และการวิบัติโดยแรงอัดร่วมกับแรงเฉือนในแกนคาน

5.4.2 การวิบัติโดยแรงดัด [Flexure - F]

ในบริเวณที่วิบัติโดยแรงอัด จะเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งตั้งฉากกับแนวของหน่วยแรงหลัก ในบริเวณกลางคานกินเนื้อที่ประมาณหนึ่งในสามของความยาวช่วง ซึ่งเป็นบริเวณที่หน่วยแรงเฉือน v มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยแรงดัด f ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงหลัก $f_{t(\max)}$ ในทิศทางเกือบขนานกับแนวนอน โดยจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวที่กลางช่วง ที่น้ำหนักบรรทุกกระทำประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น จะเกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นในบริเวณส่วนกลางของช่วง รอยแตกร้าวเบื้องต้นจะกว้างขึ้นและขยายยาวขึ้นไปหาแกนสะเทิน ส่งผลให้ระยะแอ่นตัวของคานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าเหล็กเสริมในคานมีน้อย จะเกิดการวิบัติแบบช้าซึ่งเตือนให้เห็นก่อนด้วยการยืดตัวของเหล็กเสริมหลัก พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดในคานที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึก มากกว่า 5.5 ภายใต้น้ำหนักกระทำเป็นจุด และ 16 ภายใต้น้ำหนักแผ่กระจาย

5.4.3 การวิบัติโดยแรงดึงในแนวทแยง [ผลร่วมของแรงเฉือนและแรงดัด, Flexure Shear - FS]

การวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อกำลังต้านแรงดึงในแนวทแยงของคานน้อยกว่ากำลังต้านแรงดัด พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดในคานที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 5.5 ภายใต้น้ำหนักกระทำเป็นจุด การแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเริ่มที่กลางช่วง ตามด้วยการสูญเสียความยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตหุ้มที่ฐานรองรับ ทำให้เกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน โดยเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงประมาณสองถึงสามรอยขึ้นที่ระยะประมาณ 1.5d ถึง 2d จากขอบของที่รองรับในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และที่ระยะประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวช่วงในคานคอนกรีตอัดแรง รอยแตกร้าวหนึ่งรอยจะขยายกว้างกลายเป็นรอยแตกร้าวหลักในแนวทแยง และขยายยาวต่อไปจนถึงผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัด ตามที่แสดงในรูปที่ 5.5(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 5.5(c) จะสังเกตได้ว่า รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะไม่ขยายไปสู่แกนสะเทินในการวิบัติแบบฉับพลันเช่นนี้ ทำให้เกิดระยะแอ่นตัวน้อยที่จุดวิบัติ

ถึงแม้ว่าแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดที่ฐานรองรับ แต่หน่วยแรงดึงหลักในบริเวณนี้จะมีค่าไม่มากนัก เนื่องจากแรงอัดจากเหล็กเสริมอัดแรงและแรงอัดในแนวดิ่งจากแรงลัพธ์ หน่วยแรงดึงหลักสูงสุดจะเกิดลึกเข้าไปในช่วงในบริเวณที่เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยง ซึ่งตำแหน่งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของการอัดแรงกับระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรง สรุปได้ว่า การวิบัติด้วยแรงดึงในแนวทแยงเป็นผลมาจากหน่วยแรงดัดและหน่วยแรงเฉือนร่วมกับแรงพยุงเนื่องจากองค์ประกอบในแนวดิ่งของการอัดแรง สังเกตได้จากการเกิดร่วมของรอยแตกร้าวในแนวดิ่งและแนวทแยง

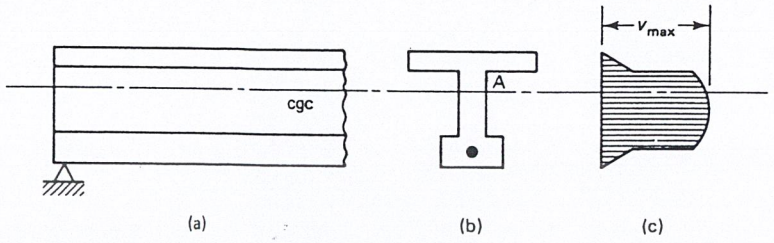
5.4.4 การวิบัติโดยแรงเฉือนร่วมกับการอัดแตก [Web Shear - WS]

คานที่วิบัติแบบนี้จะมีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกค่อนข้างน้อย โดยมีค่าประมาณ 2.5 ภายใต้น้ำหนักกระทำเป็นจุด และน้อยกว่า 5.0 สำหรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจาย เช่นเดียวกับในกรณีของแรงดึงในแนวทแยง การแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเริ่มที่กลางช่วง ตามด้วยการสูญเสียความยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตหุ้มที่ฐานรองรับ หลังจากนั้นจะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงขึ้นหนึ่งรอย ซึ่งจะมีความชันมากกว่าในกรณีของแรงดึงในแนวทแยง รอยร้าวนี้จะขยายยาวเข้าสู่แกนสะเทิน อัตราการขยายจะลดลงพร้อมกับเกิดการอัดแตกของคอนกรีตในบริเวณรับแรงอัด การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน เมื่อรอยร้าวขยายยาวเข้าสู่บริเวณคอนกรีตที่เกิดการอัดแตก ตามที่แสดงในรูปที่ 5.5(c) การวิบัติแบบนี้จะถือว่าเปราะยิ่งกว่าการวิบัติโดยแรงดึงทแยง ทำให้เป็นสิ่งที่ต้องระวังอย่างมากในการออกแบบ

การวิบัติส่วนมากจะเกิดโดยแรงดึงในแนวทแยง ซึ่งเป็นผลร่วมของแรงดัดและแรงเฉือน การวิบัติโดยแรงเฉือนร่วมกับการอัดแตก ซึ่งเกิดจากการอัดแตกของคอนกรีตในพื้นที่รับแรงอัดส่งผลให้สูญเสียกำลังต้านแรงดัด จะทำให้ปีกด้านรับแรงดึงในหน้าตัดมีปีกแยกตัวออกจากแกนคาน เมื่อรอยร้าวขยายยาวไปถึงฐานรองรับ การอัดแตกของแกนคานทำให้คานมีพฤติกรรมเหมือนกับโค้งตั้งที่มีเหล็กยึดข้างล่าง (tied arch) จะเรียกการวิบัติแบบนี้ในคานคอนกรีตอัดแรงว่า *การวิบัติโดยแรงเฉือนในแกนคาน* จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด และกำลังรับแรงเฉือนในแกนคาน ที่หน้าตัดวิกฤติ เพื่อระบุว่าสิ่งใดเป็นตัวที่ระบุถึงกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6 แสดงการกระจายหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในแนวนอนของหน้าตัดมีปีกที่ไม่แตกร้าว จะเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่แนวต่อระหว่างปีกและแกนคาน ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบกำลังของหน้าตัดที่ตำแหน่งวิกฤติตามความยาวของคาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านของการวิบัติโดยแรงเฉือนในแกนคาน



รูปที่ 5.6 - การกระจายหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในแนวนอนตามความลึกของคาน

5.5 หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงหลักในคานอัดแรง

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วว่า แรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างกับในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เพราะจะมีผลของการอัดแรงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงอัดจากลวดอัดแรงจะช่วยลดแรงเฉือนในแนวตั้งที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก ทำให้น้ำหนักบรรทุกสุทธิในคานคอนกรีตอัดแรงเหลือน้อยกว่าในคานเสริมเหล็กธรรมดามาก

นอกจากนี้ แรงอัดจากลวดอัดแรงก็จะช่วยลดผลของหน่วยแรงดึงเนื่องจากการดัด ส่งผลให้การแตกร้าวลดน้อยลง ทำให้ภายใต้สภาวะรับน้ำหนักเดียวกัน แรงเฉือนและหน่วยแรงหลักในคานคอนกรีตอัดแรงจะน้อยกว่าในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปที่ 5.7 แสดงการที่องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงอัดช่วยต้านแรงเฉือนในแนวตั้ง V ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก ทำให้ได้แรงเฉือนสุทธิที่จะต้องรับโดยคอนกรีตเหลือเป็น

$$V_c = V - V_p \tag{5.5}$$

จากสมการที่ 5.2 จะได้หน่วยแรงเฉือนสุทธิที่ตำแหน่งใด ๆ บนหน้าตัดเป็น

$$v_c = \frac{V_c Q}{Ib} \tag{5.6}$$

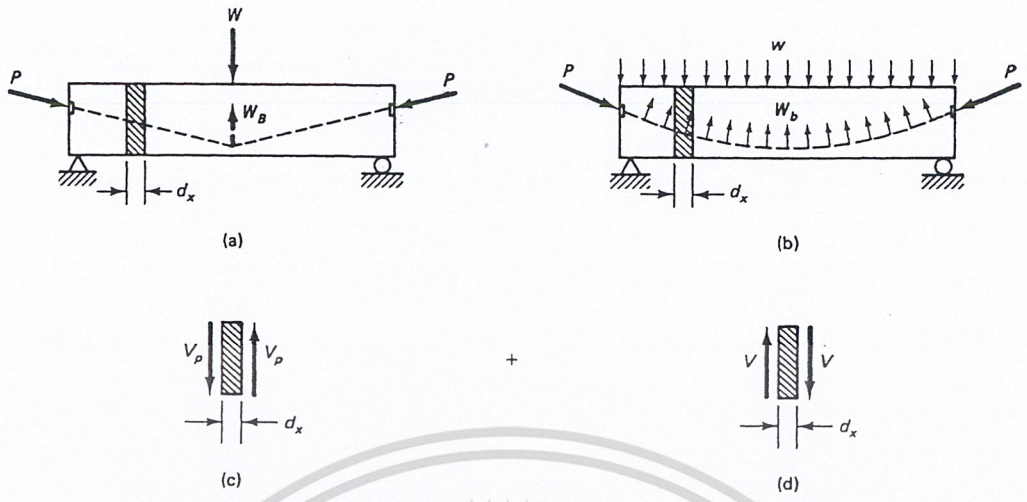
โดยที่หน่วยแรงอัดที่เกิดจากโมเมนต์กระทำภายนอก เท่ากับ

$$f_c = -\frac{P_e}{A_c} \pm \frac{P_e ec}{I_c} \mp \frac{M_T c}{I_c} \tag{5.7}$$

และจะได้หน่วยแรงดึงหลักจากสมการที่ 5.4a เป็น

$$f_t' = \sqrt{\left(\frac{f_c}{2}\right)^2 + v_c^2} - \frac{f_c}{2} \tag{5.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 – แรงพยุงต้านแรงเฉือนในแนวดิ่ง (a) คานเสริมเหล็กแบบหักงอกลางช่วง (b) คานเสริมเหล็กเป็นแนวพาราโบล่า (c) แรงเฉือน Vp เนื่องจากแรงอัด P (d) แรงเฉือน V เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก W

5.5.1 กำลังรับผลร่วมของแรงเฉือนและแรงดัด [V_{ci}]

สิ่งแรกที่จะต้องทำในการออกแบบรับแรงเฉือน คือ การระบุว่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c เป็นผลมาจากแรงเฉือนเนื่องจากแรงดัดหรือแรงเฉือนในแกนคาน รูปที่ 5.8 แสดงรอยแตกร้าวในแนวทแยงซึ่งเกิดต่อมาจากรอยแตกร้าวเริ่มต้นซึ่งเกิดจากแรงดัด ให้รอยแตกร้าวนี้ห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นเป็นระยะ d/2 ถ้าให้ความลึกประสิทธิผล d_p วัดจากผิวคอนกรีตภายใต้แรงอัดถึงแนวเหล็กเสริมอัดแรง ผลต่างระหว่างโมเมนต์ที่ตำแหน่ง 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ

$$M - M_{cr} \cong \frac{Vd_p}{2} \tag{5.9a}$$

หรือ

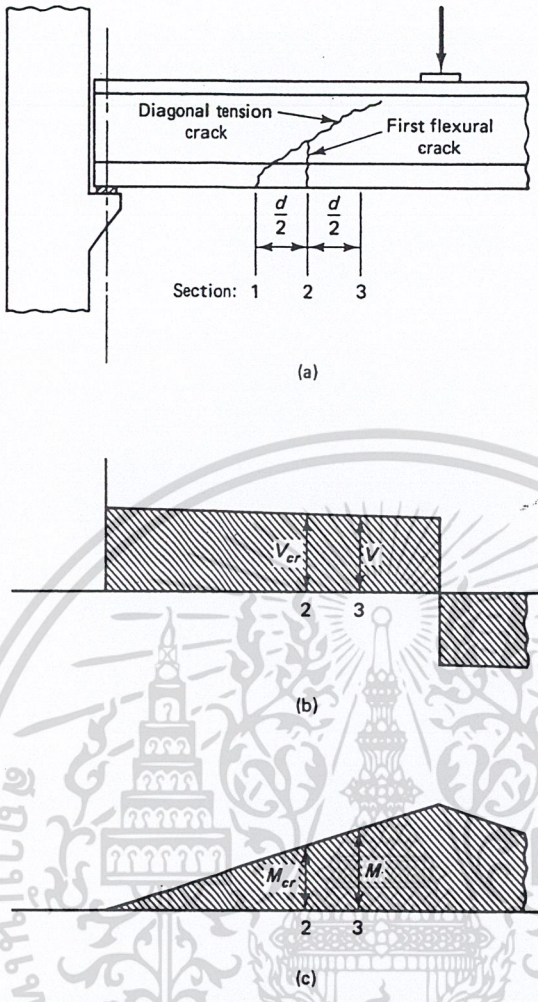
$$V = \frac{M_{cr}}{M/V - d_p/2} \tag{5.9b}$$

โดยที่ V เป็นแรงเฉือนที่หน้าตัดที่พิจารณา ผลจากห้องปฏิบัติการระบุว่า การที่จะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงตามที่แสดงในรูปที่ 5.8 จะต้องเพิ่มแรงเฉือนในแนวดิ่งในปริมาณ $0.16\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$ ดังนั้นแรงเฉือนทั้งหมดที่หน้าตัด 2 เท่ากับ

$$V_{ci} = \frac{M_{cr}}{M/V - d_p/2} + 0.16\sqrt{f_c'} b_w d_p + V_d \tag{5.10}$$

โดยที่ V_d เป็นแรงเฉือนในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักของคาน ไม่ได้รวมองค์ประกอบในแนวดิ่ง V_p ของแรงอัดไว้ในสมการนี้ เพราะว่าองค์ประกอบนี้จะมีค่าน้อยเมื่อแนวของเหล็กเสริมอัดแรงไม่ชันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 – การเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดร่วมกับแรงเฉือน (a) ชนิดและรูปแบบของรอยร้าว (b) แผนภาพแรงเฉือนแสดงแรงเฉือนแตกร้าว V_{cr} ที่ตำแหน่ง 2 (c) แผนภาพโมมนต์แสดงโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} ที่ตำแหน่ง 2

V ในสมการข้างบนเป็น แรงเฉือน V_i เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งโมเมนต์ที่ตำแหน่งนั้นมีค่าเท่ากับ M_{max} ดังนั้นจะจัดรูปของสมการ 5.10 ได้เป็น

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f_c'}\,b_w d_p + V_d + \frac{V_i}{M_{\max}}(M_{cr}) \geq 0.45\sqrt{f_c'}\,b_w d_p \qquad (5.11)$$

$$\leq \quad 1.33\sqrt{f_c'}\,b_w d_p$$

โดยที่ V_d = แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคงที่

V_{ci} = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต เมื่อเกิดรอยร้าวในแนวทแยงเนื่องจากผลร่วมของแรงเฉือนและแรงดัด

V_i = แรงเฉือนที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ที่ตำแหน่งเดียวกับ M_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M_{cr} = โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก = $\frac{I_c}{y_t}(1.6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$

f_{pe} = หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผล (หลังจากหักการเสื่อมลดทั้งหลายแล้ว) จากเหล็กเสริมอัดแรงอย่างเดียว โดยคำนวณที่ผิวนอกสุดด้านซึ่งจะเกิดหน่วยแรงดึงถ้ามีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ

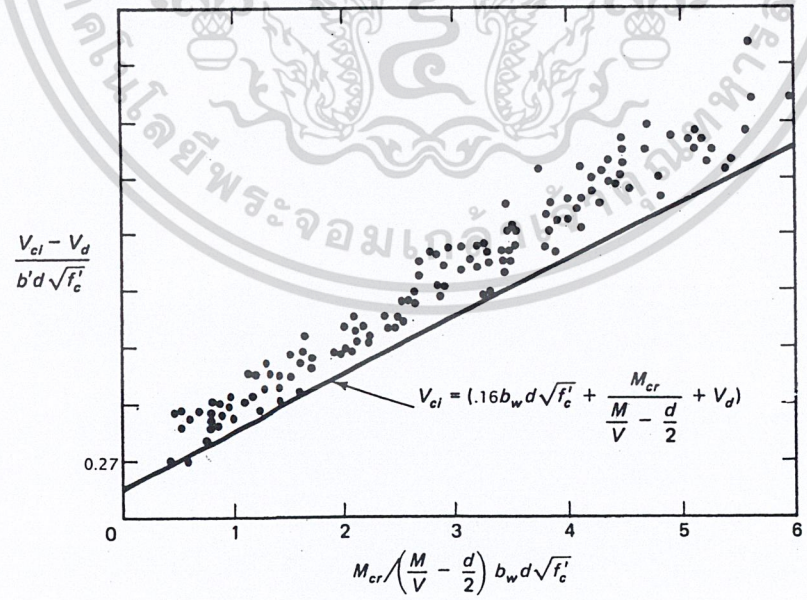
f_d = หน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน ที่ผิวนอกสุดตำแหน่งเดียวกับ f_{pe}

y_t = ระยะจากแนวศูนย์ถ่วงของคานไปยังผิวนอกสุดภายใต้แรงดึง

ถ้าใช้คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา จะต้องคูณค่า $\sqrt{f_c'}$ ในทุกสมการด้วย 0.85 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาที่ใช้ทรายผสม และคูณด้วย 0.75 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาล้วน แต่ถ้ารู้ค่าเฉลี่ยของกำลังดึงแยกผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา f_{ct} ให้แทนค่า $\sqrt{f_c'}$ ในทุกสมการด้วย $f_{ct}/1.8$ โดยที่ $f_{ct}/1.8$ จะต้องไม่มากกว่า $\sqrt{f_c'}$

รูปที่ 5.9 แสดงค่าจากสมการที่ (5.10) เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

การออกแบบรับแรงเฉือนขององค์อาคารเชิงประกอบ จะใช้ขั้นตอนเดียวกับในองค์อาคารหล่อสำเร็จ ถึงแม้ว่าองค์อาคารเชิงประกอบจะช่วยกันรับแรงเฉือนเหมือนกับเป็นองค์อาคารเดียวกัน แต่ในการหากำลังรับแรงเฉือน V_c ของคอนกรีตจะใช้หน้าตัดขององค์อาคารหล่อสำเร็จแต่อย่างเดียว เพราะกำลังส่วนใหญ่ได้มาจากตัวแกนขององค์อาคารหล่อสำเร็จ ดังนั้นจะใช้คุณสมบัติขององค์อาคารหล่อสำเร็จในการหา f_{pe} และ f_d



รูปที่ 5.9 – ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และแรงเฉือนในการแตกร้าวเนื่องแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 กำลังรับแรงเฉือนในแกนคาน [V_{cw}]

การแตกร้าวในแกนคานเกิดจากหน่วยแรงดึงหลักบนระนาบวิกฤตซึ่งจะหาได้จากสมการที่ (5.8) โดยจะแทนค่า v_c ในสมการด้วยหน่วยแรงเฉือนในแกนคาน v_{cw} ซึ่งจะมีค่าสูงสุดในบริเวณใกล้ศูนย์ถ่วงของหน้าตัดซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยง และแทนค่า f_c ในสมการด้วย f_{pc} ซึ่งเป็นหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผลและน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด หรือที่รอยต่อของแกนคานกับปีก ในกรณีที่จุดศูนย์ถ่วงตกอยู่ในปีก และให้หน่วยแรงหลักเท่ากับกำลังรับแรงดึงโดยตรง จะได้

$$f_t' = \sqrt{\left(\frac{f_{pc}}{2}\right)^2 + v_{cw}^2} - \frac{f_{pc}}{2} \qquad (5.13)$$

โดยที่ $v_{cw} = V_{cw}/(b_w d_p)$ เป็นหน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกรวมซึ่งทำให้เกิดกำลังรับแรงเฉือนระบุในแกน V_{cw} แก้สมการหา v_{cw} ได้เป็น

$$v_{cw} = f_t' \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{f_t'}} \qquad (5.14a)$$

ผลจากห้องปฏิบัติการให้ค่า $f_t' = 0.93\sqrt{f_c'}$ แทนค่าลงในสมการข้างบน จะได้

$$v_{cw} = 0.93\sqrt{f_c'} \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{0.93\sqrt{f_c'}}} \qquad (5.14b)$$

ซึ่งจะจัดให้ง่ายอยู่รูปของ $v_{cw} = 0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc}$ (5.14c)

ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนระบุของคอนกรีตเมื่อเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง อันเป็นผลมาจากหน่วยแรงดึงหลักในแกนคานสูงเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะได้เป็น

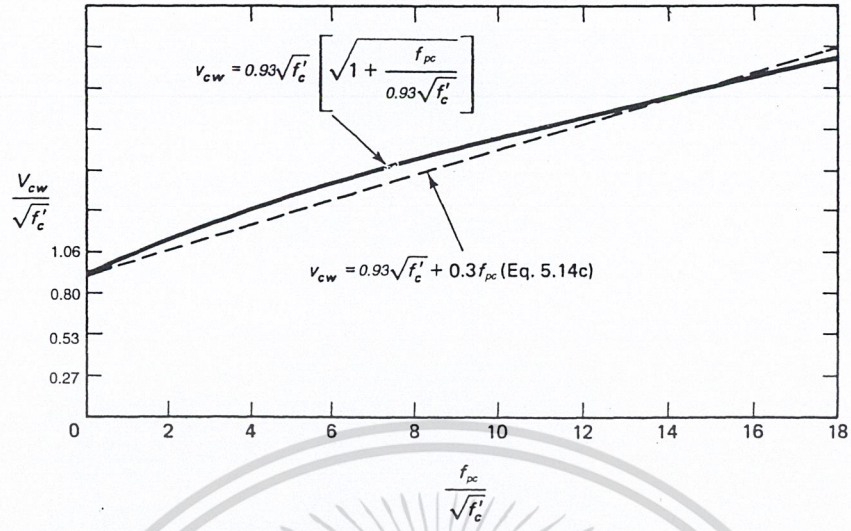
$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p \qquad (5.15)$$

โดยที่ V_p = องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงดึงประสิทธิผลที่หน้าตัดที่พิจารณา ช่วยเพิ่มกำลังระบุรับแรงเฉือน

d_p = ระยะจากผิวภายใต้แรงอัดถึงแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ต้องไม่น้อยกว่า 0.8h

รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนระบุในแกนคาน V_{cw} และหน่วยแรงอัดที่ศูนย์ถ่วงของหน้าตัด จะเห็นความใกล้เคียงของค่าจากสมการ (5.14b) และ (5.14c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 – ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดที่ศูนย์ถ่วงกับหน่วยแรงเฉือนระบุในการแตกร้าวในแกนคาน

5.5.3 กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต [V_c]

มาตรฐาน ACI กำหนดเงื่อนไขในการหาค่า V_{ci} และ V_{cw} เพื่อใช้ในการหาค่าของ V_c ไว้ดังนี้

(a) ในองค์อาคารอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน หน้าตัดวิกฤตซึ่งอยู่ที่ระยะ h/2 จากขอบของที่รองรับ จะอยู่ภายในบริเวณระยะถ่ายแรง (transfer length) ของเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งหมายความว่าแรงอัดจะไม่มีประสิทธิภาพเต็มที่ในการช่วยรับแรงเฉือน จะต้องลดค่าแรงดึงประสิทธิผลตามอัตราส่วนของระยะจากปลายคาน โดยถือว่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเป็นศูนย์ที่ปลายของลวดอัดแรง และแปรเปลี่ยนเชิงเส้นไปจนถึงค่าสูงสุดที่ระยะถ่ายแรง โดยความยาวระยะถ่ายแรง อาจจะประมาณให้เป็น 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตีเกลียวอัดแรง หรือ 100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับลวดอัดแรง นำแรงดึงประสิทธิผลที่ปรับลดแล้วไปใช้ในการหา V_{cw} โดยที่ค่าของ V_{cw} จะต้องไม่เกิน

$$V_{cw} = \left(0.16\sqrt{f'_c} + \frac{49V_u d_p}{M_u}\right) b_w d_p \geq 0.53\sqrt{f'_c}\, b_w d_p \qquad (5.16)$$

$$\leq \quad 1.33\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$$

โดยที่ $V_u d_p / M_u$ ต้องไม่เกิน 1.0

(b) ในองค์อาคารอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน ซึ่งการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมไม่ได้ครอบคลุมไปถึงบริเวณปลายขององค์อาคาร จะต้องลดค่าของแรงอัดตามวิธีในหัวข้อที่แล้ว และนำไปใช้ในการหา V_c จากสมการที่ 5.16 และจะต้องไม่เกินค่าที่หาจากได้สมการที่ 5.11 และ 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

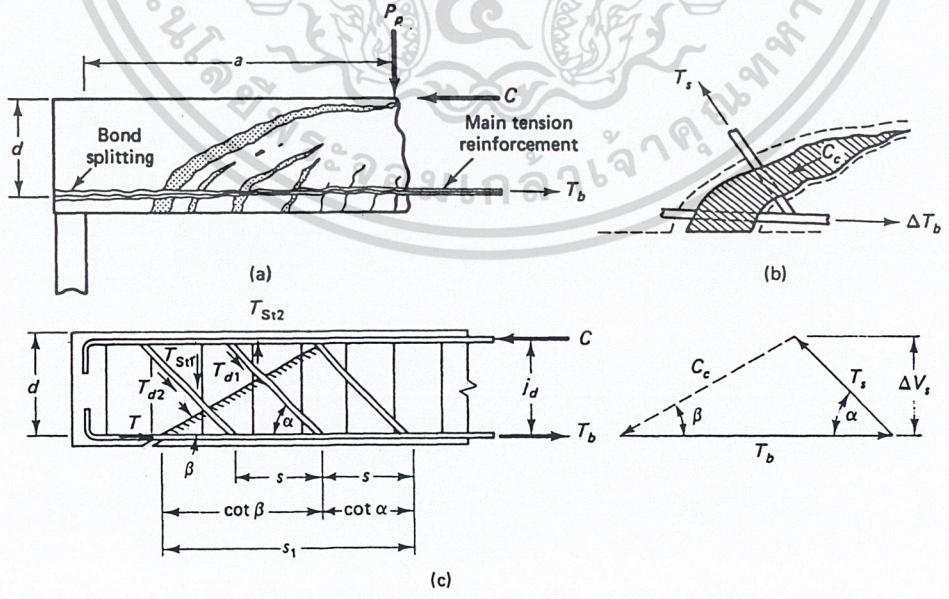
(c) จะใช้ค่าจากสมการที่ 5.16 เป็นกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c เมื่อแรงดึงประสิทธิผลไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของกำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเสริม แต่ถ้าต้องการวิเคราะห์อย่างละเอียด ก็จะใช้ค่าที่น้อยกว่าของ V_{ci} จากสมการที่ 5.11และ V_{cw} จากสมการที่ 5.16

(d) หน้าตัดวิกฤตที่ใช้ในการหาเหล็กลูกตั้งช่วยรับแรงเฉือน อยู่ที่ h/2 จากขอบของที่รองรับ

5.6 เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

5.6.1 โครงถักเสมือน

ตามที่กล่าวในหัวข้อที่แล้วว่า จำเป็นจะต้องมีเหล็กเสริมต้านแรงดึงทแยงเพื่อป้องกันรอยร้าวที่วิกฤติตามแนวทแยง ซึ่งถ้าจะเป็นไปตามทฤษฎี ก็ต้องวางเหล็กเสริมตามแนวเส้นทึบในรูปที่ 5.3 แต่ก็คงจะเป็นไปไม่ได้ในการก่อสร้างจริง จึงจำเป็นที่จะต้องเสริมเหล็กด้วยวิธีอื่นเพื่อต้านหน่วยแรงดึงหลักในบริเวณที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะเปลี่ยนคานให้มีสภาพเสมือนกับโค้งตั้ง (Arch) โดยมีส่วนรับแรงอัดอยู่ในเนื้อคอนกรีต และมีเหล็กเสริมหลักด้านล่างเป็นส่วนรับแรงดึง ตามที่แสดงในรูปที่ 5.11(a) รูปขยายของคอนกรีตในส่วนรับแรงอัดตามรูปที่ 5.11(b) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตทำหน้าที่เสมือนค้ำยันรับแรงอัดในโครงถักรูปสามเหลี่ยม ตามที่แสดงในรูปที่ 5.11(c) โดยมีแรง C_c, T_b, และ T_s เป็นแรงซึ่งกระทำบนชิ้นส่วนของโครงถัก C_c เป็นแรงอัดในตัวค้ำยันคอนกรีต T_b เป็นแรงดึงที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมหลัก และ T_s เป็นแรงในเหล็กงอคอม้า



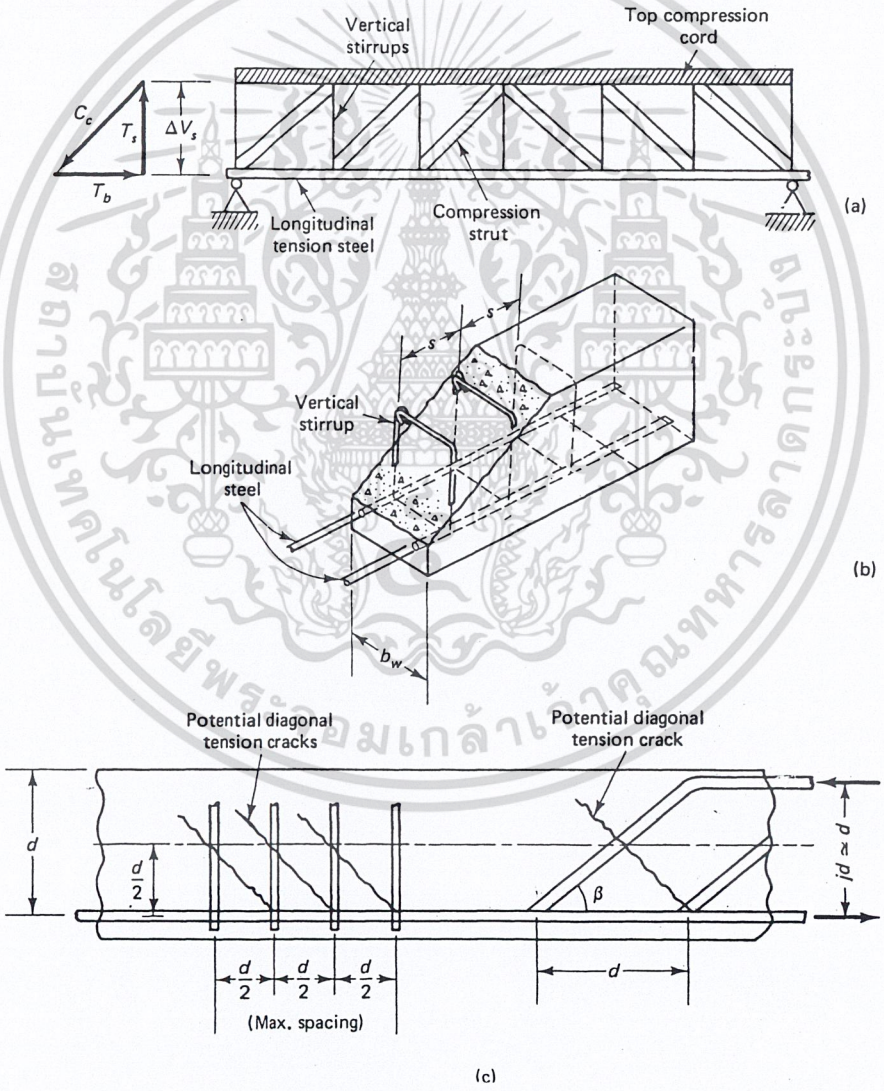
รูปที่ 5.11 – การวิบัติด้วยแรงดึงทแยง (a) รูปแบบการวิบัติ (b) ค้ำยันคอนกรีต (c) โครงถักเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12(a) แสดงโครงถักเสมือนซึ่งใช้เหล็กลูกตั้งแทนเหล็กงอคอม้า โดยที่แรง T_s จะกลายเป็นแรงดึงในแนวตั้งแทนในแนวทแยง

ดังนั้นจะเห็นว่าเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะต้องทำหน้าที่หลักสี่ประการดังต่อไปนี้

1. ช่วยรับบางส่วนของแรงเฉือนที่มากระทำ V_u
2. ต้านไม่ให้รอยร้าวในแนวทแยงขยายตัวกว้างขึ้น
3. ยึดให้เหล็กเสริมหลักอยู่ในตำแหน่ง เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวทำให้เหล็กเสริมหลักรับแรงดัดได้ตามต้องการ
4. ทำตัวเป็นกรอบห้อมล้อมคอนกรีตในส่วนที่อยู่ภายใต้แรงอัด



รูปที่ 5.12 – การจัดเหล็กลูกตั้ง (a) โครงถักเสมือนสำหรับเหล็กลูกตั้ง (b) รูปขยายของเหล็กลูกตั้ง (c) ระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.2 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง

ถ้ากำลังรับแรงเฉือนระบุของคอนกรีต V_c น้อยกว่าแรงเฉือนที่กระทำบนหน้าตัด $V_n = V_u/\phi$ จะต้องมีเหล็กเสริมช่วยรับผลต่าง ดังนั้น

$$V_s = V_n - V_c = \frac{V_n}{\phi} - V_c \tag{5.17}$$

โดยจะหา V_s ได้จากความสมดุลของโครงถักเสมือน จากรูปที่ 5.11(c)

$$V_s = T_s \sin\alpha = C_c \sin\beta \tag{5.18a}$$

โดยที่ T_s เป็นแรงรวมในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทุกตัวที่ขวางแนวของรอยแตกร้าวในแนวทแยง ถ้าให้ระยะเรียงของเหล็กเสริมเป็น s และจำนวนของระยะเรียงเป็น n จะได้ความยาวขององค์ประกอบตัวล่างของโครงถักเสมือน

$$s_1 = ns = jd(\cot\alpha + \cot\beta) \tag{5.18b}$$

ถ้าให้ $jd \approx d$ จะได้แรงในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่อหน่วยความยาวเป็น

$$\frac{T_s}{s_1} = \frac{T_s}{ns} = \frac{V_s}{\sin\alpha} \cdot \frac{1}{d(\cot\alpha + \cot\beta)} \tag{5.18c}$$

ถ้าภายในระยะ s_1 มีเหล็กงอคอม้าซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเส้นละเท่ากับ A_v อยู่จำนวน n เส้น จะได้

$$T_s = nA_v f_y \tag{5.19a}$$

ดังนั้น

$$nA_v = \frac{V_s ns}{d\sin\alpha(\cot\alpha + \cot\beta) f_y} \tag{5.19b}$$

ถ้าสมมติว่า ในกรณีของการวิบัติด้วยแรงดึงทแยง ค้ำยันรับแรงอัดทำมุม $\beta = 45^\circ$ กับแนวนอน จะได้

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}[\sin\alpha(1 + \cot\alpha)] = \frac{A_v f_y d}{s}(\sin\alpha + \cos\alpha) \tag{5.20a}$$

และหาระยะเรียงได้เป็น

$$s = \frac{A_v f_y d}{V_n - V_c}(\sin\alpha + \cos\alpha) \tag{5.20b}$$

ถ้าเหล็กงอคอม้าเป็นเหล็กเส้นเดียว หรือเป็นหลายเส้นแต่งอที่ตำแหน่งเดียวกัน จะได้

$$V_s = A_v f_y \sin\alpha \le 0.8\sqrt{f_c'}\, b_w d$$

แต่ถ้าเสริมด้วยเหล็กลูกตั้ง ซึ่งมีมุม α เป็นมุมฉาก จะได้

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \tag{5.21a}$$

และ

$$s = \frac{A_v f_y d}{V_s} \tag{5.21b}$$

ในสองสมการข้างบน จะใช้ d เป็นระยะจากผิวรับแรงอัดถึงแนวเหล็กเสริมไม่อัดแรง และ d_p เป็นระยะถึงแนวเหล็กเสริมอัดแรง โดยที่ d_p จะต้องไม่น้อยกว่า 0.8h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.3 ข้อกำหนดของขนาดและระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

สมการที่ 5.20b และ 5.21b ให้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเรียงของเหล็กเสริมกับแรงเฉือนที่เหล็กเสริมต้องรับ โดยจะต้องวางเหล็กเสริมให้ถี่ขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะให้รอยแตกร้าวทุกรอยถูกต้านด้วยเหล็กลูกตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.12c จึงกำหนดระยะเรียงสูงสุดไว้ดังต่อไปนี้

(a) $s_{max} \le (3/4)h \le 60$ ซม. โดยที่ h เป็นความลึกทั้งหมดของหน้าตัด

(b) ลดค่าในข้อ (a) ลงครึ่งหนึ่ง ถ้า $V_s > 1.06\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$

(c) เพิ่มขนาดของหน้าตัดหรือเพิ่มกำลังของคอนกรีต ถ้า $V_s > 2.12\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$

(d) ถ้า $V_c/2 < V_n = V_u/\phi < V_c$ จะต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอย่างน้อยในปริมาณที่น้อยกว่าของ

$$A_v = \frac{3.5 b_w s}{f_y} \qquad (5.22a)$$

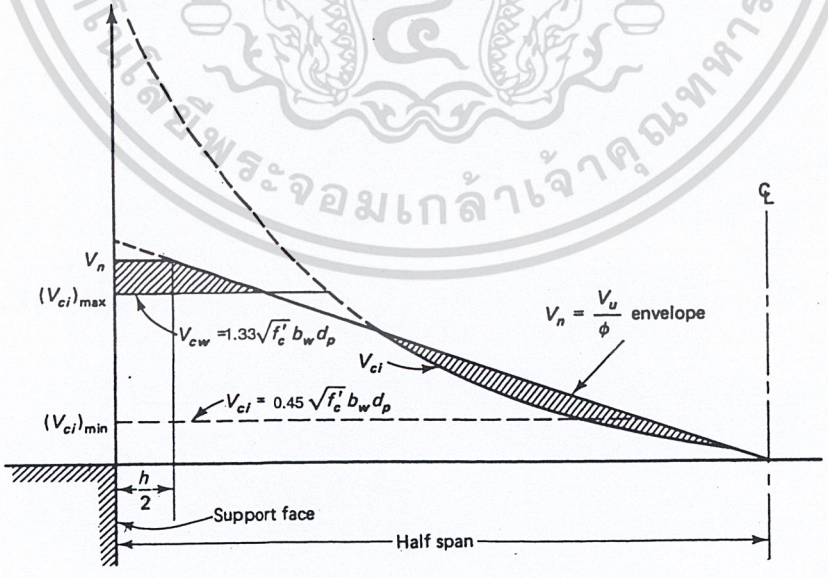
และ

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{pu}}{80 f_y} \frac{s}{d} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}} \qquad (5.22b)$$

โดยที่สมการที่ 5.22b ใช้เฉพาะในองค์อาคารที่แรงดึงประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรงสูงกว่าร้อยละ 40 ของกำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง

(e) เหล็กลูกตั้งจะต้องมีระยะฝังเพิ่มที่เพียงพอ โดยต้องยื่นเข้าไปทั้งในด้านรับแรงดึงและแรงอัดของหน้าตัด และหักงอ 90° หรือ 135° ในด้านรับแรงอัด

รูปที่ 5.13 แสดงพื้นที่แรเงา ซึ่งเป็นพื้นที่ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กลูกตั้ง



รูปที่ 5.13 – ขอบเขตการเสริมเหล็กลูกตั้งในคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจายคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 กำลังรับแรงเฉือนแนวนอนในโครงสร้างเชิงประกอบ

จะต้องมีการถ่ายแรงเฉือนในแนวนอนอย่างสมบูรณ์ บนผิวสัมผัสขององค์อาคารที่มาประกอบเข้าด้วยกัน

5.7.1 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

จะหาหน่วยแรงเฉือนในแนวนอนสูงสุด v_h ได้จาก

$$v_h = \frac{VQ}{I_c b_v} \tag{5.23}$$

โดยที่ V= แรงเฉือนในแนวดิ่งบนองค์อาคารเชิงประกอบ ไม่คูณตัวคูณเพิ่ม

Q= โมเมนต์ของพื้นที่หน้าตัดส่วนที่เหนือหรือล่างแนวศูนย์ถ่วง รอบแนวศูนย์ถ่วง

I_c = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบ

b_v= ความกว้างของแกนคานหล่อสำเร็จ หรือความกว้างของหน้าตัดที่ตำแหน่งที่จะหาหน่วยแรงเฉือน

ซึ่งจะจัดรูปแบบให้ง่ายขึ้นเป็น

$$v_h = \frac{V}{b_v d_{pc}} \tag{5.24}$$

โดยที่ d_{pc} เป็นความลึกประสิทธิผลจากผิวด้านรับแรงอัดของหน้าตัดเชิงประกอบถึงแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง

5.7.2 ภายใต้ทฤษฎีกำลัง

ภายใต้ขอบเขตของการวิบัติ จะแทนค่าแรงเฉือนใช้งาน V ด้วยแรงเฉือนที่ต้องการ V_u ลงในสมการที่ 5.24

$$v_{uh} = \frac{V_u}{b_v d_{pc}} \tag{5.25a}$$

หรือในรูปของแรงเฉือนระบุ $v_{nh} = \frac{V_u / \phi}{b_v d_{pc}} = \frac{V_n}{b_v d_{pc}}$ (5.25b)

โดยที่ $\phi = 0.85$ และถ้า V_{nh} เป็นกำลังระบุรับแรงเฉือนในแนวนอน ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า V_u จะได้

$$V_{nh} = v_{nh} b_v d_{pc} \tag{5.25c}$$

มาตรฐาน ACI จำกัดค่า v_{nh} ไว้ที่ 5.6 กก./ซม.^{2} เมื่อไม่เสริมเหล็กเดือยหรือเหล็กลูกตั้ง และมีการทำผิวสัมผัสให้หยาบ หรือถ้าผิวเรียบแต่มีการเสริมเหล็กในปริมาณที่ต่ำสุด แต่อาจจะเพิ่มได้ถึง 35 กก./ซม.^{2} โดยมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) เมื่อผิวสัมผัสสะอาดปราศจากฝ้าน้ำปูนและเป็นผิวที่ตั้งใจทำให้หยาบ ให้ใช้ค่ากำลังเฉือน

$$V_{nh} \le 5.6\, b_v\, d_{pc} \qquad (5.26a)$$

(b) เมื่อเสริมเหล็กยึดปริมาณต่ำสุด ($A_v = \frac{3.5 b_v s}{f_y}$) และผิวสัมผัสสะอาดปราศจากฝ้าน้ำปูน แต่เป็นผิวที่ไม่ตั้งใจทำให้หยาบ ให้ใช้ค่ากำลังเฉือน

$$V_{nh} \le 5.6\, b_v\, d_{pc}$$

(c) เมื่อเสริมเหล็กยึดปริมาณต่ำสุด ($A_v = \frac{3.5 b_v s}{f_y}$) และผิวสัมผัสสะอาดปราศจากฝ้าน้ำปูน และเป็นผิวที่ตั้งใจทำให้หยาบ โดยมีขนาดความขรุขระประมาณ 6 มม. ให้ใช้ค่ากำลังเฉือน

$$V_{nh} \le 35\, b_v\, d_{pc} \qquad (5.26b)$$

(d) ถ้าแรงเฉือนที่ต้องการ $V_u > \phi(35\, b_v\, d_{pc})$ จะต้องใช้วิธีแรงเฉือน-ความเสียดทานหาปริมาณเหล็กเสริม โดยที่แรงเฉือนในแนวนอนที่รับโดยเหล็กเสริมในระนาบตั้งฉาก มีค่าเป็น

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \qquad (5.27)$$

โดยที่ A_{vf} = เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน-ความเสียดทาน

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน-ความเสียดทาน ต้องไม่เกิน 4000 กก./ซม.^{2}

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

= 1.0λ สำหรับคอนกรีตที่หล่อติดกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วโดยมีผิวรอยต่อที่ทำให้หยาบ

= 0.6λ สำหรับคอนกรีตที่หล่อติดกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วโดยไม่มีผิวรอยต่อที่ทำให้หยาบ

λ = 1.0 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา

= 0.85 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาที่มีทรายเป็นส่วนผสม

= 0.75 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาล้วน อนุญาตให้เทียงส่วนแบบเชิงเส้นได้เมื่อใช้ทรายแทนที่เพียงบางส่วน

ในทุกกรณี กำลังเฉือนระบุ $V_n \le 0.2 f_c' A_c \le 5.6 A_c$ โดยที่ A_c เป็นเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตที่รับแรงเฉือนที่ถ่ายผ่าน

ระยะเรียงของเหล็กเดือยหรือเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนในแนวนอนต้องไม่เกิน 4 เท่าของมิติแคบสุดของชิ้นส่วนที่ถูกรองรับ และต้องไม่เกิน 60 ซม.

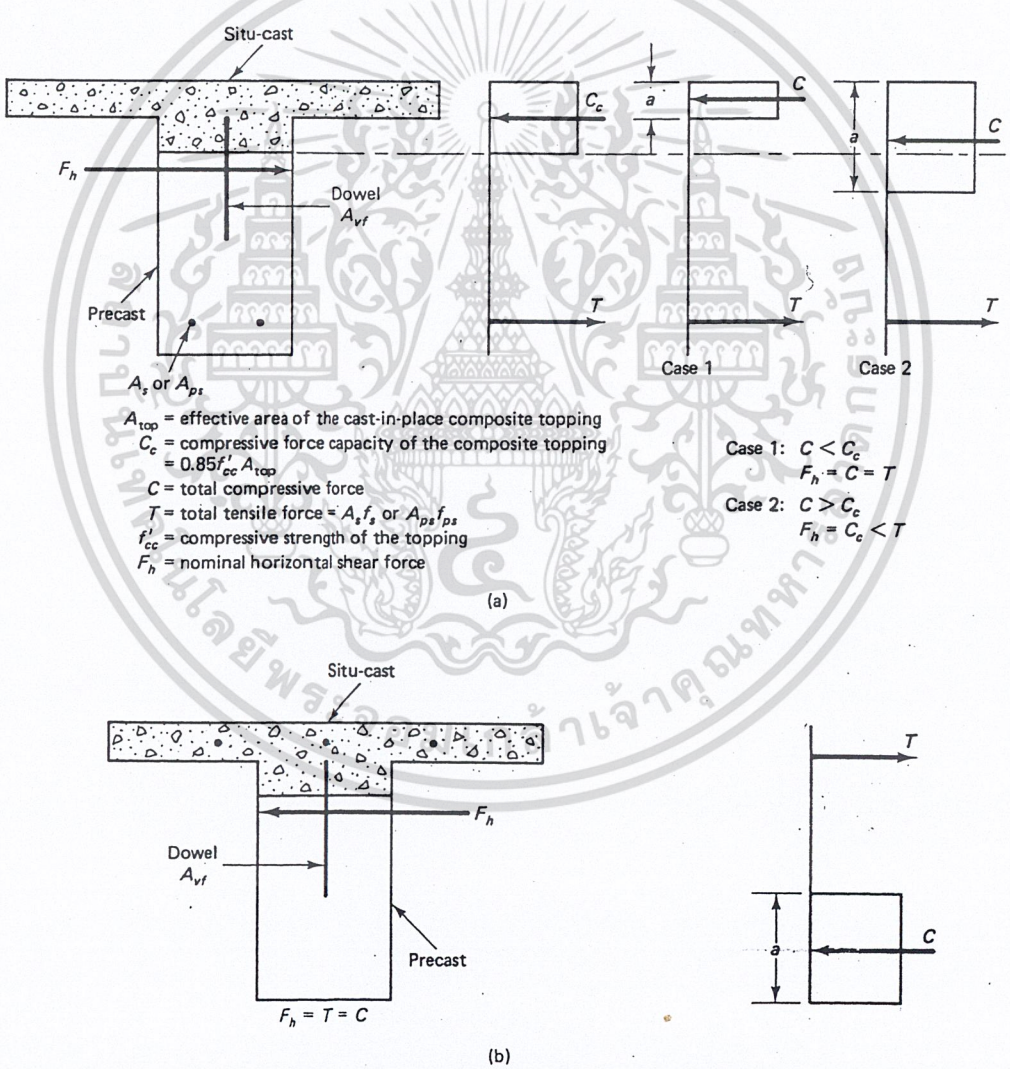
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACI ยอมให้ใช้อีกวิธีหนึ่งซึ่งง่ายกว่าวิธีที่แล้วในการหาแรงเฉือนในแนวนอน โดยแปลงการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงหรือแรงอัดในระนาบใด ๆ แล้วส่งถ่ายเป็นแรงเฉือนในแนวนอนยังฐานรองรับ แทนค่า $b_v d_{pc}$ ในสมการที่ 5.25b และ 5.25c ด้วยพื้นที่ของของผิวสัมผัส A_{cc} จะได้

$$V_n = v_{nh} A_{cc} \tag{5.28}$$

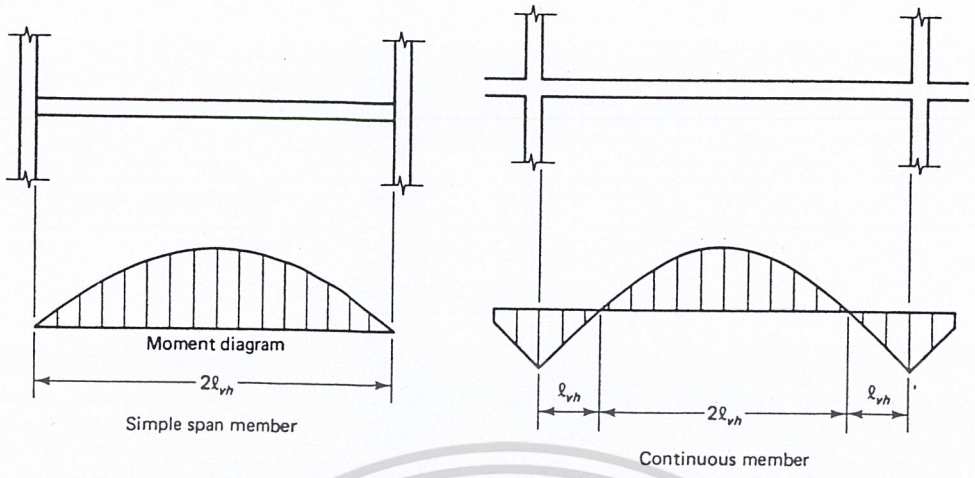
โดยที่ $V_n \geq F_h = \mu A_{vf} f_y$ ซึ่งเป็นแรงเฉือนในแนวนอน มีค่าอย่างน้อยเท่ากับแรงอัด C หรือแรงดึง T ในรูปที่ 5.14 และพื้นที่ของผิวสัมผัสจะหาได้จาก $A_{cc} = b_v l_{vh}$ (5.29)

โดยที่ l_{vh} เป็นความยาวของแรงเฉือนในแนวนอน ตามที่แสดงในรูปที่ 5.15(a) สำหรับคานช่วงเดี่ยว และในรูปที่ 5.15(b) สำหรับคานต่อเนื่อง



รูปที่ 5.14 – แรงในองค์อาคารเชิงประกอบ (F_h กระทำตามแนวช่วงคาน) (a) หน้าตัดภายใต้โมเมนต์บวก (b) หน้าตัดภายใต้โมเมนต์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 – ความยาวของแรงเฉือนในแนวนอนในองค์อาคารเชิงประกอบ

5.8 ขั้นตอนการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

1. หาแรงเฉือนระบุ $V_n = V_u/\phi$ ที่หน้าตัดวิกฤต ระยะ h/2 จากขอบของที่รองรับ

2. หากำลังรับแรงเฉือนระบุของแกนคานคอนกรีต V_c ได้จากสองวิธีข้างล่าง

(a) โดยวิธีแบบง่ายของ ACI เมื่อ $f_{pe} > 0.4f_{pu}$

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f_c'} + \frac{49V_u d_p}{M_u} \right) b_w d_p \geq 0.53\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$$

$$\leq \quad 1.33\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$$

โดยที่ V_u และ M_u ต้องเป็นค่าที่ตำแหน่งเดียวกัน และ $V_u d_p/M_u$ ต้องไม่เกิน 1.0

(b) ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง V_{ci} และ V_{cw}

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f_c'} b_w d_p + V_d + \frac{V_i}{M_{\max}}(M_{cr}) \geq 0.45\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$$

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc}) b_w d_p + V_p$$

แทนค่า d_p ด้วย 0.8h ถ้า $d_p < 0.8$h โดยที่

V_d = แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคงที่

V_{ci} = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต เมื่อเกิดรอยร้าวในแนวทแยงเนื่องจากผลร่วมของแรงเฉือนและแรงดัด

V_i = แรงเฉือนที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ที่ตำแหน่งเดียวกับ M_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M_{cr} = โมเมนต์ที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก = $\frac{I_c}{y_t}(1.6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$

y_t = ระยะจากแนวศูนย์ถ่วงของคานไปยังผิวนอกสุดภายใต้แรงดึง ในกรณีทั่วไป ซึ่งผิวนอกสุดภายใต้แรงดึงอยู่ที่ผิวล่าง จะได้ $y_t = c_b$ และ $M_{cr} = S_b(1.6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$

f_{pe} = หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผล (หลังจากหักการเสื่อมลดทั้งหลายแล้ว) จากเหล็กเสริมอัดแรงอย่างเดียว โดยคำนวณที่ผิวนอกสุดด้านซึ่งจะเกิดหน่วยแรงดึงถ้ามีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ

f_d = หน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน ที่ผิวนอกสุดตำแหน่งเดียวกับ f_{pe}

V_p = องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงดึงประสิทธิผลที่หน้าตัดที่พิจารณา ช่วยเพิ่มกำลังระบุรับแรงเฉือน

f_{pc} = หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผลและน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด หรือที่รอยต่อของแกนคานกับปีก ในกรณีที่จุดศูนย์ถ่วงตกอยู่ในปีก

3. ถ้า $V_u/\phi \le V_c/2$ ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

ถ้า $V_c/2 < V_u/\phi < V_c$ ต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยสุดตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ

ถ้า $V_u/\phi > V_c$ จะได้ $V_s = V_u/\phi - V_c$ และถ้า $V_s \le 2.12\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$ หาเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

แต่ถ้า $V_s > 2.12\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$ ต้องขยายหน้าตัดหรือเพิ่มกำลังของคอนกรีต

4. หาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยสุดที่ต้องมี

$\min A_v = \frac{3.5 b_w s}{f_y}$ และระยะเรียงต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 ซม.

ถ้า $f_{pe} \ge 0.40 f_{pu}$ ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างค่าข้างบนและ $\min A_v = \frac{A_{ps} f_{pu}}{80 f_y}\frac{s}{d}\sqrt{\frac{d_p}{b_w}}$

โดยที่ $d_p \ge 0.80h$

5. หาขนาดและระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เลือกขนาดเหล็กเสริมโดยให้ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 16 มม. และระยะเรียงที่เหมาะสม

ถ้า $V_s \le 1.06\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$, $s = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$ แต่ต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 ซม.

ถ้า $1.06\sqrt{f_c'}\, b_w d_p < V_s \le 2.12\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$, $s = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$ แต่ต้องไม่เกิน 0.375h หรือ 30 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วาดแผนภาพขอบเขตของแรงเฉือนตามความยาวของคาน แรเงาบริเวณที่ต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

7. วาดการเสริมเหล็กตามความยาวของคาน ระบุขนาดและระยะเรียง

8. ออกแบบเหล็กเดือยในกรณีขององค์อาคารเชิงประกอบ

(a) เมื่อไม่เสริมเหล็กเดือยหรือเหล็กลูกตั้งและมีการทำผิวสัมผัสให้หยาบ หรือถ้าผิวเรียบแต่มีการเสริมเหล็กในปริมาณต่ำสุด $V_{nh} \le 5.6\, b_v d_{pc}$

(b) เมื่อเสริมเหล็กในปริมาณต่ำสุด และทำผิวให้หยาบมีความขรุขระประมาณ 6 มม.

$$V_{nh} \le 35\, b_v d_{pc}$$

(c) ถ้า $V_{nh} > 35\, b_v d_{pc}$ ต้องออกแบบเหล็กเสริม โดยที่ $V_n = \mu A_{vf} f_y \le 0.2 f_c' A_c \le 5.6 A_c$

โดยที่ A_c เป็นเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตที่รับแรงเฉือนที่ถ่ายผ่าน

และ A_{vf} เป็นเนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน-ความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 5.1</u> – หน่วยแรงดึงหลักในคานรูปตัวทีและการออกแบบเหล็กเดือยในองค์อาคารเชิงประกอบ

คานเชิงประกอบรูปตัวที รับแรงเฉือนใช้งานในแนวดิ่ง V = 54,500 กก. และแรงเฉือนที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว V_u = 86,200 กก. ทำให้เกิดแรงอัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานบนหน้าตัดตามที่แสดงในรูปข้างล่าง

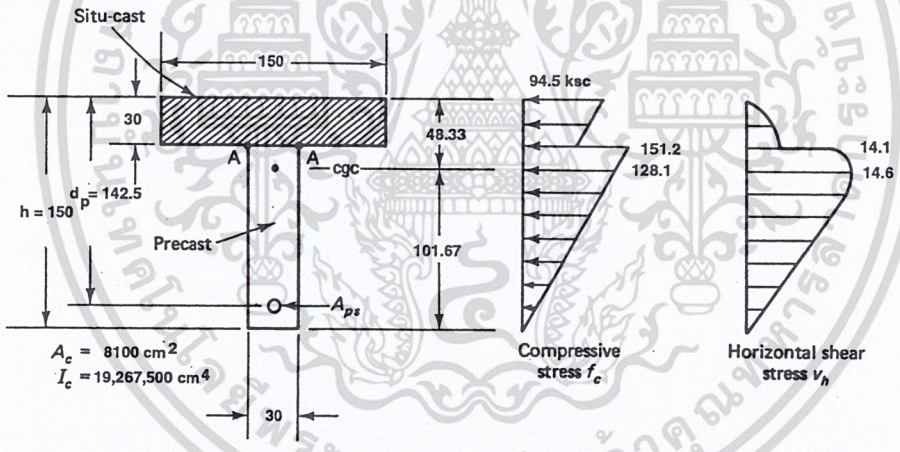
(a) จงหาหน่วยแรงดึงหลักที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัด และที่แนวต่อของปีกและแกนคาน A และจงหาหน่วยแรงเฉือนในแนวนอนสูงสุดภายใต้น้ำหนักใช้งานที่ตำแหน่งทั้งสอง

(b) จงหากำลังรับแรงเฉือนระบุในแนวนอนที่ผิวสัมผัส A-A ระหว่างตัวแกนคานสำเร็จรูปและตัวปีกหล่อในที่ และจงออกแบบเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กเดือยต้านการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ผิวสัมผัส โดยสมมติให้ผิวสัมผัสถูกทำให้ขรุขระ

กำหนดให้ใช้คอนกรีตน้ำหนักปกติโดยมี f_c' ของคานสำเร็จรูป = 420 กก./ซม.^{2}

f_c' ของปีกหล่อในที่ = 210 กก./ซม.^{2}

และให้ความกว้างประสิทธิผลของปีกคาน หลังจากคิดผลของผลต่างของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในตัวแกนคานและปีกคานแล้ว b_m = 150 ซม.



(a) หน่วยแรงเฉือนในแนวนอนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

หน่วยแรงเฉือนในแนวนอนสูงสุด $v_h = \dfrac{VQ}{I_c b_v}$

โดยที่ $Q_A = 150(30)(48.33 - 15)$ = 150 000 ซม.^{3}

$Q_{cgc} = 150\,000 + (30)(18.33)^2/2$ = 155 040 ซม.^{3}

ดังนั้น หน่วยแรงเฉือนในแนวนอนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

ที่แนวต่อ A, $v_h = 54\,500(150\,000)/[(19\,267\,500)(30)]$ = 14.143 กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แนวศูนย์ถ่วง, v_{cgc} = 54 500(155 040)/[(19 267 500)(30)]= 14.618 กก./ซม.^{2}

จากสมการที่ (5.8) $$f_t' = \sqrt{\left(\frac{f_c}{2}\right)^2 + v_h^2} - \frac{f_c}{2}$$

ดังนั้นที่ A, $$f_t' = \sqrt{\left(\frac{151.2}{2}\right)^2 + 14.1^2} - \frac{151.2}{2} = 1.31 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

และที่แนวศูนย์ถ่วง $$f_t' = \sqrt{\left(\frac{128.1}{2}\right)^2 + 14.6^2} - \frac{128.1}{2} = 1.65 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

จะเห็นว่าหน่วยแรงดึงหลักมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

(b) ออกแบบเหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนในแนวนอน

V_u = 86 200 กก.

$V_{nh} = V_u/\phi$ = 86 200/0.85 = 101 412 กก.

b_v = 30 ซม., d_{pc} = 142.5 ซม.

จากสมการที่ 5.26b, กำลังรับแรงเฉือน

$V_{nh} \le 35\, b_v d_{pc}$ = 35(30)(142.5) = 149 625 กก. > 101 412

ดังนั้นจะต้องระบุว่าต้องทำผิวสัมผัสให้มีขนาดความขรุขระประมาณ 6 มม.

และเสริมเหล็กในปริมาณต่ำสุด $A_v = \frac{3.5 b_v s}{f_y}$

ถ้าเลือกใช้เหล็กลูกตั้งสองขารูปตัวยูขนาด 10 มม. จะได้ A_v = 2(0.78) = 1.56 ซม.^{2}

และต้องใช้ระยะเรียง $$s = \frac{A_v f_y}{3.5 b_v} = \frac{1.56(4000)}{3.5(30)} = 55 \quad \text{ซม.} < 60 \text{ ซม.}$$ ใช้ได้

ดังนั้นยื่นเหล็กลูกตั้งให้โผล่จากผิวบนของแกนคานเข้าไปในแผ่นพื้นบนซึ่งหล่อในที่

การใช้เหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนในแกนคานรับแรงเฉือนในแนวนอนด้วย เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 5.2</u> – ใช้วิธีแบบง่ายของ ACI ออกแบบเหล็กเดือยในองค์อาคารเชิงประกอบในตัวอย่างที่ 5.1

สมมติให้เป็นคานช่วงเดี่ยว มีความยาวช่วงเท่ากับ 20 ม.

ดูรูปที่ 5.14 ควบคู่กับรูปหน้าตัดของคานในตัวอย่างที่แล้ว จะได้

$A_{top} = 150(30) = 4500$ ซม.^{2}

$C_c = 0.85 f_{cc}' A_{top} = 0.85(210)(4500) = 803\,250$ กก.

เนื่องจากโจทย์ไม่ได้กำหนดแรงอัดของลวดอัดแรงมาให้ จะสมมติให้ $A_{ps} f_{ps} > C_c$ ทำให้ได้

$F_h = 803\,250$ กก.

จากรูปที่ 5.15 $l_{vh} = 2000/2 = 1000$ ซม.

$b_v = 30$ ซม.

$5.6\, b_v l_{vh} = 5.6(30)(1000) = 168\,000$ กก. $< F_h = 803\,250$ กก.

ดังนั้นต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน

แต่ถ้าทำผิวสัมผัสให้ขรุขระประมาณ 6 มม. และเสริมเหล็กยึดในปริมาณต่ำสุด จะได้กำลังรับแรงเฉือนในแนวนอน

$V_{nh} \le 35\, b_v d_{pc} = 35(30)(142.5) = 149\,625$ กก.

กำลังเฉือนระบุที่ต้องการ $V_u/\phi = 86\,200/0.85 = 101\,412$ กก. $< V_{nh} < F_h$

ดังนั้นจะใช้ ค่า 101 412 กก. ในการหาปริมาณเหล็กเสริม

จากสมการที่ 5.27 โดยใช้ $\mu = 1.0$ และ $l_{vh} = 1000$ ซม. จะได้ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ

$$A_{vf} = \frac{V_n}{\mu f_y} = \frac{101\,412}{(1.0)(4000)} = 25.35 \text{ ซม.}^2$$

แต่ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมี $A_{vf} = \dfrac{3.5 b_v \ell_{vh}}{f_y} = \dfrac{3.5(30)(1000)}{4000} = 26.25$ ซม.^{2}

ดังนั้นต้องใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมี และถ้าเลือกใช้เหล็กลูกตั้งรูปตัวยูสองขาขนาด 10 มม.

ซึ่งมี $A_v = 2(0.78) = 1.56$ ซม.^{2}

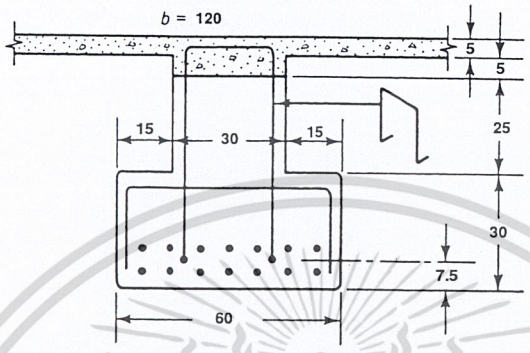
จะต้องใช้ระยะเรียง $s = \dfrac{\ell_{vh} A_v}{A_{vf}} = \dfrac{1000(1.56)}{26.25} = 59.8$ ซม. < 60 ซม. $< 4 \times 30 = 120$ ซม. ใช้ได้

ดังนั้นเลือกใช้ DB10 @ 55 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 5.3</u> – ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนในคานรูปตัวทีกลับหัว

คานช่วงเดี่ยวซึ่งมีความยาวช่วงเท่ากับ 7.2 ม. เป็นคานหน้าตัดรูปตัวทีแบบกลับหัวและมีคอนกรีตทับหน้าหนา 5 ซม. ตามที่แสดงในรูปข้างล่าง โดยไม่มีการทำผิวสัมผัสให้ขรุขระ จงออกแบบเหล็กลูกตั้งรับแรงระหว่างองค์อาคารเชิงประกอบ เพื่อรับแรงเฉือนที่ต้องการบนหน้าตัดวิกฤติ V_u = 72 600 กก.



กำหนดให้ใช้คอนกรีตน้ำหนักปกติโดยมี f_c' ของคานสำเร็จรูป = 420 กก./ซม.^{2}

f_c' ของทับหน้าหล่อในที่ = 210 กก./ซม.^{2}

และเหล็กเสริมอัดแรงเป็น ลวดตีเกลียว 12 เส้นขนาด 12 มม. เกรด 270 ซึ่งมี

f_{pu} = 18 900 กก./ซม.^{2} และ f_{ps} = 16 940 กก./ซม.^{2} และให้เหล็กลูกตั้งเป็นเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40

$d_p = 5 + 5 + 25 + 30 - 7.5 = 57.5$ ซม.

$A_{ps} = 12(0.99) = 11.85$ ซม.^{2}

$T_n = A_{ps}f_{ps} = 11.85(16\,940) = 200\,657$ กก.

b_v = 30 ซม., $l_{vh} = 7.2/2 = 3.6$ ม.

$A_{top} = 5(120) + 5(30) = 750$ ซม.^{2}

$C_c = 0.85f_{cc}'A_{top} = 0.85(210)(750) = 133\,875$ กก. $< T_n$

ดังนั้นใช้ F_h = 133 875 กก. และเมื่อไม่มีการทำผิวสัมผัสให้ขรุขระ จะมีกำลังรับแรงเฉือนในแนวนอน

$V_{nh} = 5.6b_v l_{vh} = 5.6(30)(36) = 60\,480$ กก. $< F_h$

ต้องเสริมเหล็กลูกตั้งรับพฤติกรรมขององค์อาคารเชิงประกอบ ใช้ $\lambda = 1.0$

V_{nh} ที่ต้องการ $= V_u/\phi = 72\,600/0.85 = 85\,412$ กก.

และกำลังที่รับได้ $V_{nh} = 5.6\,b_v\,d_{pc} = 5.6(30)(57.5) = 9660$ กก. $<<$ V_{nh} ที่ต้องการ

จากสมการที่ 5.27 และเมื่อไม่มีการทำผิวสัมผัสให้ขรุขระ จะได้ $\mu = 0.6\lambda = 0.6$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณเหล็กเสริม $A_{vf} = \frac{V_n}{\mu f_y} = \frac{85\,412}{(0.6)(4000)}$ = 35.59 ซม.^{2}

ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมี $A_{vf} = \frac{3.5 b_v \ell_{vh}}{f_y} = \frac{3.5(30)(360)}{4000} = 9.45$ ซม.^{2}

ดังนั้นใช้ A_{vf} = 35.59 ซม.^{2} และถ้าเลือกใช้เหล็กลูกตั้งรูปตัวยูสองขาขนาด 10 มม. ซึ่งมี $A_v = 2(0.78) = 1.56$ ซม.^{2}

จะต้องใช้ระยะเรียง $s = \frac{\ell_{vh} A_v}{A_{vf}} = \frac{360(1.56)}{35.59}$ = 15.8 ซม.

ระยะเรียงห่างสุดที่ยอมให้ = 4(5 + 5) = 40 ซม. หรือ 0.75h = 0.75(65) = 48.75 < 60 ซม

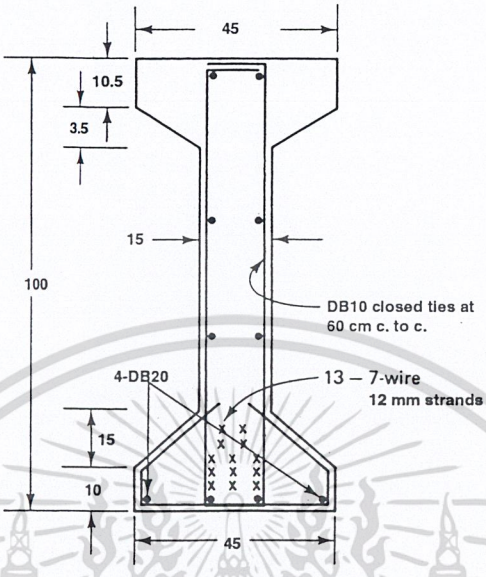
ดังนั้นเลือกใช้ DB10 @ 15 ซม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 5.4</u> – กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงและการออกแบบเหล็กเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ออกแบบคานข้างล่างต้านการวิบัติด้วยแรงเฉือน



<u>กำหนดให้</u>: f_{pu} = 18 900 กก./ซม.^{2}, f_{pe} = 10 850 กก./ซม.^{2}

f_y = 4000 กก./ซม.^{2}, f_c' = 350 กก./ซม.^{2}

A_{ps} = ลวดตีเกลียวขนาด 12 มม. จำนวน 13 เส้น = 12.8 ซม.^{2}

P_e = 138 800 กก.

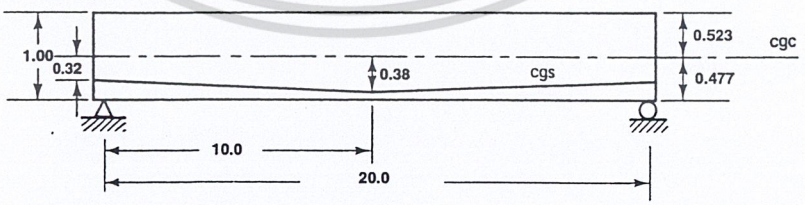
A_s = 4-DB20 = 12.56 ซม.^{2}

ความยาวช่วงว่าง = 20 ม.

น้ำหนักบรรทุกใช้งาน: w_L = 1640 กก./ม., : w_{SD} = 150 กก./ม.

น้ำหนักคาน w_D = 574 กก./ม.

h = 100, d_p = 90.28, d = 94, b_w = 15, e_c = 38, e_e = 32, c_b = 47.72, c_t = 52.28 ซม.



I = 2.856(10^6) ซม.^{4}, A_c = 2392.5 ซม.^{2} , r^2 = 1193.7 ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$w_u = 1.4(150 + 574) + 1.7(1640) =$ 3801.6 กก./ม.

ที่ขอบของฐานรองรับ $V_u = 3801.6(20)/2 =$ 38 016 กก.

กำลังรับแรงเฉือนระบุ $V_n = V_u/\phi = 38\ 016/0.85 =$ 44 725 กก.

<u>พิจารณาที่หน้าตัดวิกฤติ h/2 = 100/2 = 50 ซม. จากขอบของฐานรองรับ</u>

1. <u>กำลังรับแรงเฉือนของแกนคาน V_c</u>

$V_u = 3801.6(10 - 0.5) =$ 36 115 กก., $V_n = V_u/\phi = 36\ 115/085 =$ 42 488 กก.

$0.4f_{pu} = 0.4(18\ 900) =$ 7560 กก./ซม.^{2} < $f_{pe} =$ 10 850 กก./ซม.^{2}

ดังนั้นใช้วิธีแบบง่าย (แต่อาจจะไม่ประหยัด)

$0.8h = 80 < d_p$ ดังนั้นใช้ $d_p =$ 90.28 ซม.

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f_c'} + \frac{49V_u d_p}{M_u}\right) b_w d_p \geq 0.53\sqrt{f_c'}\, b_w d_p \leq 1.33\sqrt{f_c'}\, b_w d_p$$

ที่ระยะ h/2 จากขอบของฐานรองรับ $M_u = R_u \frac{h}{2} - \frac{w_u (h/2)^2}{2}$

$= 36\ 115(0.5) - 3801.6(0.5)^2/2 =$ 17 582.3 กก.ม.

$V_u d_p/M_u = 36\ 115(0.9028)/(17\ 582.3) = 1.85 > 1$ ดังนั้นใช้ $V_u d_p/M_u = 1$

ในกรณีนี้จะเขียนสมการใหม่อยู่ในรูปของหน่วยแรงได้เป็น

$$v_c = \left(0.16 + \frac{49}{\sqrt{f_c'}}\right)\sqrt{f_c'} = \left(0.16 + \frac{49}{\sqrt{350}}\right)\sqrt{f_c'} = 2.78\sqrt{f_c'} > v_{c,max} = 1.33\sqrt{f_c'}$$

ดังนั้น $V_c = 1.33\sqrt{f_c'}\, b_w d_p = 1.33\sqrt{350}\,(15)(90.28) =$ 33 695 กก.

น้อยกว่า V_u/ϕ **ดังนั้น ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน**

แรงเฉือนที่ต้องรับโดยเหล็กลูกตั้ง $V_s = V_u/\phi - V_c = 42\ 488 - 33\ 695 =$ 8793 กก.

เปรียบเทียบกับข้อกำหนดสูงสุด $2.12\sqrt{f_c'}\, b_w d_p =$ 53 710 กก. > V_s

แสดงว่าหน้าตัดมีขนาดเพียงพอที่จะรับแรงเฉือนได้

2. <u>ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมี</u>

$$\min \frac{A_v}{s} = \frac{3.5 b_w}{f_y} = \frac{3.5(15)}{4000} = 0.013 \text{ ซม.}^2/\text{ซม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\min \frac{A_v}{s} = \frac{A_{ps} f_{pu}}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}} = \frac{12.8(18\,900)}{80(4000)(90.28} \sqrt{\frac{90.28}{15}} = 0.0205 \quad \text{ซม.}^2/\text{ซม.}$$

3. <u>ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ</u>

$1.06\sqrt{f_c'}\, b_w d_p = 1.06\sqrt{350}\,(15)(90.28) = 26\,855$ กก. > V_s

ดังนั้น $s = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$ แต่ต้องไม่เกิน 0.75h (75 ซม.) หรือ 60 ซม.

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y d_p} = \frac{8793}{4000(90.28)} = 0.024 \quad \text{ซม.}^2/\text{ซม.}$$

ถ้าเลือกใช้เหล็กลูกตั้งรูปตัวยูสองขาขนาด 10 มม. ซึ่งมี $A_v = 2(0.78) = 1.56$ ซม.^{2}

ระยะเรียง s = 1.56/0.024 = 65 ซม.

ดังนั้นเลือกใช้ DB10 @ 60 ซม.

4. <u>ตำแหน่งที่ไม่ต้องเสริมเหล็กลูกตั้ง</u>

$V_c/2 = 33\,695/2 = 16\,848$ กก.

เทียบสามเหลี่ยมคล้าย โดยให้ระยะ x เป็นระยะจากขอบของฐานรองรับถึงตำแหน่งที่ไม่ต้องเสริมเหล็กลูกตั้ง จะได้

$$\frac{10-x}{16\,848} = \frac{10}{44\,725} \qquad \text{ได้ } x = 6.23 \text{ ม.}$$

ดังนั้นเริ่มเหล็กลูกตั้งตัวแรกที่ 45 ซม. จากขอบของฐานรองรับ โดยใช้ระยะเรียง 60 ซม. จนไปหยุดที่ระยะ 6.2 ม. หรือใช้ตลอดถึงกึ่งกลางช่วงถ้าต้องใช้เหล็กลูกตั้งช่วงรับแรงเฉือนในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 5.5</u> – กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงและการออกแบบเหล็กเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 5.4 ด้วยวิธีอย่างละเอียด ซึ่งใช้กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c เป็นค่าที่น้อยกว่าของ กำลังรับแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด V_{ci} และกำลังรับแรงเฉือนของแกนคาน V_{cw}

ที่หน้าตัดวิกฤตระยะ h/2 จากขอบของฐานรองรับ

$V_u = 3801.6(10 - 0.5) = 36\ 115$ กก.

1. <u>การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด</u>

จากสมการที่ 5.11

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f_c'}\,b_w d_p + V_d + \frac{V_i}{M_{\max}}(M_{cr}) \geq 0.45\sqrt{f_c'}\,b_w d_p$$

และจากสมการที่ 5.12 โมเมนต์แตกร้าว

$$M_{cr} = \frac{I_c}{y_t}(1.6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d)$$

โดยที่ $I_c/y_t = S_b$ เนื่องจาก y_t เป็นระยะจากแนวศูนย์ถ่วงไปยังผิวภายใต้แรงดึง

จากตัวอย่างที่ 5.4: $I = 2.856(10^6)$ ซม.^{4}, $A_c = 2392.5$ ซม.^{2}, $r^2 = 1193.7$ ซม.^{2}

$c_b = 47.72$ ซม., $S_b = I_c/c_b = 59\ 849$ ซม.^{3}

$P_e = 138\ 800$ กก.

ที่หน้าตัดวิกฤติ ระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรง $= 32 + \frac{0.5}{10}(38 - 32) = 32.3$ ซม.

จากสมการที่ 4.3b หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างสุดเนื่องจากการอัดแรงอย่างเดียว

$$f_{pe} = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) = -\frac{138\ 800}{2392.5}\left(1 + \frac{32.3 \times 47.72}{1193.7}\right) = -133.0 \text{ กก./ซม.}^2$$

น้ำหนักของคาน $w_D = 574$ กก./ม.

ที่หน้าตัดวิกฤติ $M_D = w_D\frac{L}{2}(x) - \frac{w_D x^2}{2} = \frac{w_D x}{2}(L - x) = \frac{574(0.5)}{2}(20 - 0.5)$

$= 2798.25$ กก.ม.

หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของคานที่ผิวซึ่งอยู่ภายใต้แรงดึง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

$$f_d = \frac{M_D}{S_b} = \frac{2798.25(100)}{59\ 849} = 4.67 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$M_{cr} = S_b(1.6\sqrt{f_c'} + f_{pe} - f_d) = 59\ 849(1.6\sqrt{350} + 133 - 4.67) = 94\ 719 \text{ กก.ม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_d = w_d\left(\frac{L}{2}-x\right) = 574\left(\frac{10}{2}-0.5\right) = 5453 \quad \text{กก.}$$

$w_L = 1640$ กก./ม., $w_{SD} = 150$ กก./ม.

$w_u = 1.4(150) + 1.7(1640) = 2998$ กก./ม.

แรงเฉือนที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก ที่ตำแหน่งเดียวกับ M_{max}

$$V_i = w_u\left(\frac{L}{2}-x\right) = 2998\left(\frac{10}{2}-0.5\right) = 28\,481 \text{ กก.}$$

$$M_{max} = \frac{w_u x}{2}(L-x) = \frac{2998(0.5)}{2}(20-0.5) = 14\,615 \text{ กก./ม.}$$

ดังนั้น $V_{ci} = 0.16\sqrt{350}\,(15)(90.28) + 5453 + 28\,481(94\,719)/(14\,615)$

$= 194\,090$ กก. $> 0.45\sqrt{f_c'}\,b_w d_p = 11\,401$ กก.

2. <u>การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนในแกนคาน</u>

จากสมการที่ 5.15

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p$$

โดยที่ f_{pc} = หน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผลและน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่แนวศูนย์ถ่วง

ของหน้าตัด = $P_e A_c = 138\,880/2392.5 = 58.05$ กก./ซม.^{2}

V_p = องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงอัดประสิทธิผล = $P_e\tan\theta$

θ = มุมระหว่างแนวเหล็กเสริมอัดแรงกับแนวนอน

ดังนั้น $V_p = 138\,800\left(\frac{38-32}{10\times100}\right) = 833.28$ กก.

$V_{cw} = (0.93\sqrt{350} + 0.3\text{x}58.05)(15)(90.28) + 833.28 = 47\,978$ กก. $< V_{ci}$

ดังนั้นใช้ $V_c = 47\,978$ กก. เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีแบบง่าย $V_c = 33\,695$ กก.

$V_u = 3801.6(10-0.5) = 36\,115$ กก., $V_n = V_u/\phi = 36\,115/085 = 42\,488$ กก. $< V_c$

แต่มากกว่า $V_c/2$ ดังนั้นเสริมเหล็กในปริมาณน้อยสุดที่ต้องมี

3. <u>ปริมาณเหล็กเสริมน้อยสุดที่ต้องมี</u>

จากตัวอย่างที่แล้ว ใช้ DB10 @ 60 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6

โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่อง

6.1 คำนำ

เช่นเดียวกับในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างวัสดุอื่น ๆ ความต่อเนื่องจะเกิดที่ฐานรองรับภายในและที่จุดต่อของโครงข้อแข็ง โมเมนต์และหน่วยแรงที่กลางช่วงที่ลดลงในระบบต่อเนื่องทำให้ได้องค์อาคารที่มีความลึกน้อยลงแต่แข็งแรงมากขึ้นและมีการแอ่นตัวที่น้อยกว่าองค์อาคารช่วงเดี่ยวซึ่งมีความยาวช่วงเท่ากันภายใต้น้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ส่งผลให้ได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบากว่าและมีฐานรากที่เล็กกว่า ทำให้ประหยัดค่าวัสดุและค่าก่อสร้าง อีกทั้งโครงสร้างยังมีเสถียรภาพดีขึ้นและมีกำลังรับแรงตามแกนและแรงด้านข้างได้มากขึ้น อัตราส่วนของความยาวช่วงต่อความลึกก็ดีขึ้น แต่ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของระบบต่อเนื่องที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่น ในแผ่นพื้นไร้คานแบบต่อเนื่อง จะมีอัตราส่วนนี้ประมาณ 40 ถึง 45 และในคานรูปกล่อง (box girder) จะมีอัตราส่วนประมาณ 25 ถึง 30

ข้อดีอีกอย่างของความต่อเนื่องก็คือ การกำจัดสมอยึดที่ฐานรองรับด้านในด้วยการดึงเหล็กเสริมอัดแรงอย่างต่อเนื่องบนหลายช่วง ทำให้ลดค่าวัสดุและแรงงานได้อีก

โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องจะใช้มากในระบบแผ่นพื้นไร้คานซึ่งอาจต่อเนื่องในทิศทางเดียวหรือทั้งสองทิศทาง ซึ่งอาจจะใช้การอัดแรงในทิศทางเดียวหรือทั้งสองทางก็ได้ นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในสะพานคอนกรีตอัดแรงช่วงยาวในระบบอัดแรงแบบดึงทีหลัง สะพานยื่นรับด้วยคานรูปกล่องหลายชิ้นนำมาต่อกัน (segmental bridge) เป็นที่นิยมใช้กันมากในยุโรป และเริ่มเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในสะพานที่มีช่วงยาวมาก ๆ สะพานซึ่งที่มีพื้นสะพานเป็นคอนกรีตอัดแรงก็เป็นที่นิยมใช้เช่นกัน

ความสำเร็จของระบบคอนกรีตอัดแรงส่วนใหญ่เป็นผลมาจากความประหยัดที่เกิดขึ้นจากการใช้องค์อาคารสำเร็จรูป ซึ่งมีการควบคุมคุณภาพอย่างดีในระหว่างการผลิต ข้อดีอันนี้ทำให้มีความพยายามที่ทำให้เกิดความต่อเนื่องขึ้นในองค์อาคารสำเร็จรูป ด้วยการเชื่อมด้วยคอนกรีตหล่อในที่เหนือบริเวณฐานรองรับภายใน คอนกรีตหล่อในที่จะทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักจรที่กระทำเพิ่มขึ้นบนช่วงหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว การก่อสร้างระบบนี้แทบจะไม่ต้องใช้ไม้แบบและการค้ำยัน ทำให้ประหยัดลงไปได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของคอนกรีตเสริมเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสียของความต่อเนื่องในการอัดแรง

ข้อเสียของความต่อเนื่องในองค์อาคารอัดแรง มีดังต่อไปนี้

1. การเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานจะสูงเพราะมีแนวโค้งมากและเหล็กเสริมอัดแรงก็ต้องยาวเพิ่มขึ้น
2. การเกิดโมเมนต์และแรงเฉือนร่วมกันที่หน้าตัดเหนือฐานรองรับทำให้กำลังรับโมเมนต์ที่หน้าตัดนี้ลดลง
3. การเกิดแรงด้านข้างและโมเมนต์สูงในเสารองรับที่ต่อเป็นแบบข้อแข็งกับคาน แรงภายในเหล่านี้เป็นผลมาจากการหดตัวอีลาสติกของคานช่วงยาวภายใต้การอัดแรง
4. หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น การคืบเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และการทรุดตัวของฐานรองรับ
5. โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงลัพธ์ที่เสารองรับ อันเป็นผลมาจากการอัดแรง
6. การกลับทิศทางของโมเมนต์ซึ่งอาจเกิดได้จากน้ำหนักบรรทุกกระทำสลับช่วง
7. โมเมนต์ที่ฐานรองรับด้านในจะทำต้องเพิ่มเหล็กเสริมที่ฐานรองรับ ซึ่งอาจจะไม่จำเป็นต้องมีในคานช่วงเดี่ยว

จะแก้ไขข้อเสียเหล่านี้ได้ด้วยการออกแบบและใช้ระบบก่อสร้างที่เหมาะสม รวมไปถึงการออกแบบระบบพิเศษรับแรงแบกทานที่บริเวณเสารองรับ

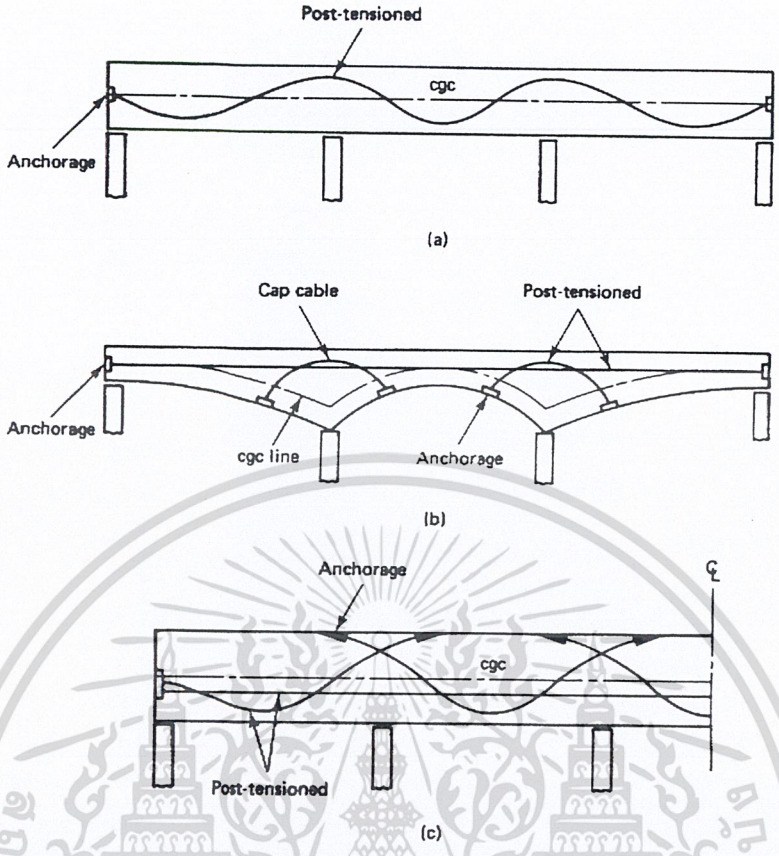
6.3 แนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานต่อเนื่อง

ระบบการก่อสร้างที่ใช้ ความยาวของช่วงคานที่ต่อกัน และวิจารณญานของวิศวกร จะเป็นตัวระบุถึงรูปแบบและระบบต่อเนื่องที่จะใช้ โดยทั่วไปคานต่อเนื่องจะจัดได้เป็นสองประเภท

1. *ความต่อเนื่องแบบเป็นเนื้อเดียวกัน* (Monolithic) ในประเภทนี้เหล็กเสริมอัดแรงทุกเส้นจะต่อเนื่องตลอดทุกช่วงของคาน และจะใช้การอัดแรงแบบดึงที่หลังในสถานที่ก่อสร้าง
2. *ความต่อเนื่องแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน* (Nonmonolithic) ในประเภทนี้ จะใช้คานสำเร็จรูปเป็นคานช่วงเดี่ยว โดยมีความต่อเนื่องเหนือฐานรองรับด้วยการหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณนั้น เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่คอนกรีตหล่อในที่แข็งตัวแล้ว

รูปที่ 6.1 แสดงระบบต่าง ๆ และการใช้ระบบต่าง ๆ ร่วมกันเพื่อให้เกิดการต่อเนื่องแบบเป็นเนื้อเดียวกัน รูปที่ 6.2 แสดงการต่อเนื่องแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



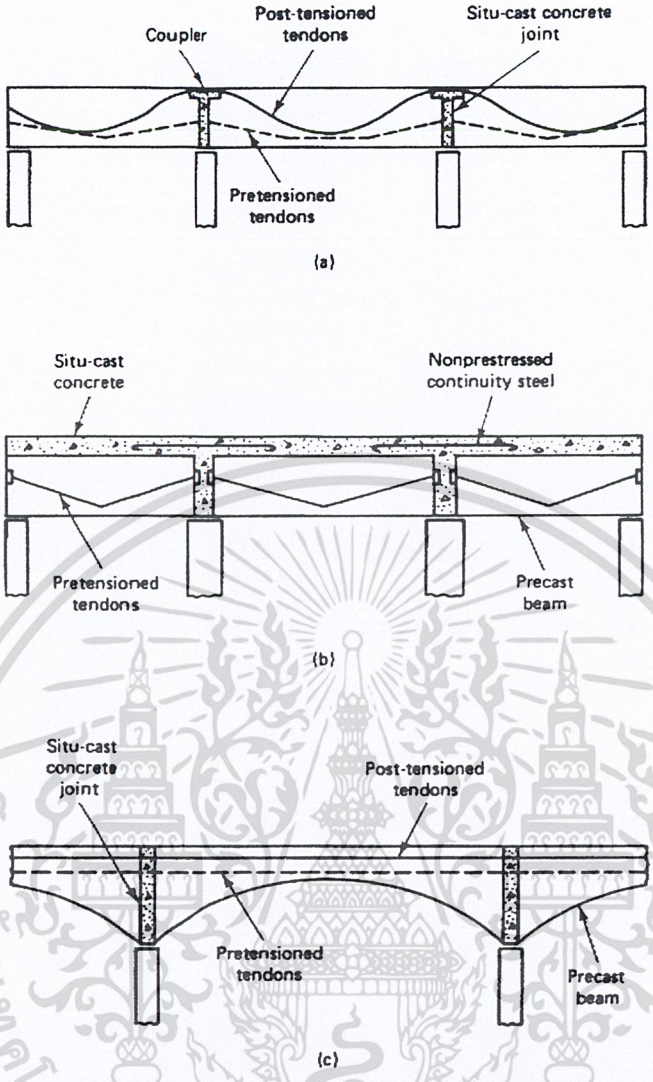
รูปที่ 6.1 – การเสริมเหล็กอัดแรงในคานต่อเนื่องแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (a) คานซึ่งมีความลึกคงที่ (b) คานซึ่งมีความลึกแปรเปลี่ยนและมีเหล็กเสริมอัดแรงซ้อนกัน (c) คานซึ่งมีความลึกคงที่และมีเหล็กเสริมอัดแรงซ้อนกัน

รูปที่ 6.1(a) แสดงการต่อเนื่องแบบพื้นฐานซึ่งใช้การหล่อคานทุกช่วงในที่และอัดแรงแบบดึงทีหลัง ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือการหาค่าการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานอย่างถูกต้อง เพราะมีการดัดงอเหล็กเสริมอัดแรงหลายตำแหน่ง ระบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1(b) ใช้การเปลี่ยนความลึกของคาน ซึ่งจะทำให้ราคาของไม้แบบแพงขึ้น

ถ้าวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวตรง ก็จะหาการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานได้ง่าย แต่ก็จะต้องใช้จำนวนสมอยึดเพิ่มขึ้น ระบบในรูปที่ 6.1(a) มีข้อดีกว่าระบบในรูปที่ 6.1(b) ในด้านที่ราคาของไม้แบบจะถูกกว่าเมื่อใช้คานที่มีหน้าตัดคงที่ แต่ในด้านของสถาปัตยกรรมแล้ว บางครั้งอาจจะเลือกใช้คานต่อเนื่องที่มีความลึกไม่คงที่

ความต่อเนื่องในระบบที่ใช้คานสำเร็จรูปร่วมกับคอนกรีตหล่อในที่จะติดตั้งง่าย และจะประหยัดกว่าเพราะไม่ต้องใช้ไม้แบบและค้ำยัน จะสังเกตเห็นความแตกต่างของความยากง่ายในการหาการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานและเนื่องจากตัวแปรอื่น ของคานในรูปที่ 6.2(a) และ (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 – ความต่อเนื่องใช้คานสำเร็จรูป (a) ต่อเนื่องด้วยการดึงทีหลังผ่านข้อต่อ (b) ต่อเนื่องด้วยการใช้เหล็กเสริมธรรมดา (c) ต่อเนื่องด้วยการดึงทีหลังในคานที่หน้าตัดไม่คงที่

ระบบต่อเนื่องที่ง่ายที่สุดสำหรับองค์อาคารเชิงประกอบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2(b) คานสำเร็จรูปจะรับโมเมนต์เนื่องจากแรงอัดและเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง ในระหว่างที่เหล็กเสริมธรรมดาในบริเวณโมเมนต์ลบเหนือฐานรองรับจะรับโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจร

โดยทั่วไปองค์อาคารหล่อสำเร็จ ในรูปที่ 6.2(a) และ (c) จะถูกออกแบบให้รับน้ำหนักตัวเองและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างขนส่งและติดตั้งด้วยเหล็กเสริมอัดแรงที่ดึงก่อน การอัดแรงแบบดึงเหล็กทีหลังหรือการใช้เหล็กเสริมธรรมดาเหนือฐานรองรับจะเป็นส่วนที่รองรับหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม จะเห็นว่าในระบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การวิเคราะห์คานอัดแรงต่อเนื่อง

6.4.1 คำนำ

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเป็นโครงสร้างแบบอินดีเทอมิเนตเนื่องจากความต่อเนื่องในการก่อสร้างแบบหล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ผลดีที่เกิดขึ้นก็คือโมเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าในคานช่วงเดี่ยว ส่งผลให้ได้หน้าตัดที่ประหยัดเพราะมีความลึกลดลง การหดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนจะไม่นำมาพิจารณายกเว้นแต่ในองค์อาคารที่มีสติฟเนสสูงมาก การทรุดตัวของฐานรองรับก็จะไม่นำมาพิจารณาเช่นกันเพราะการคืบและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงที่สูงพอ

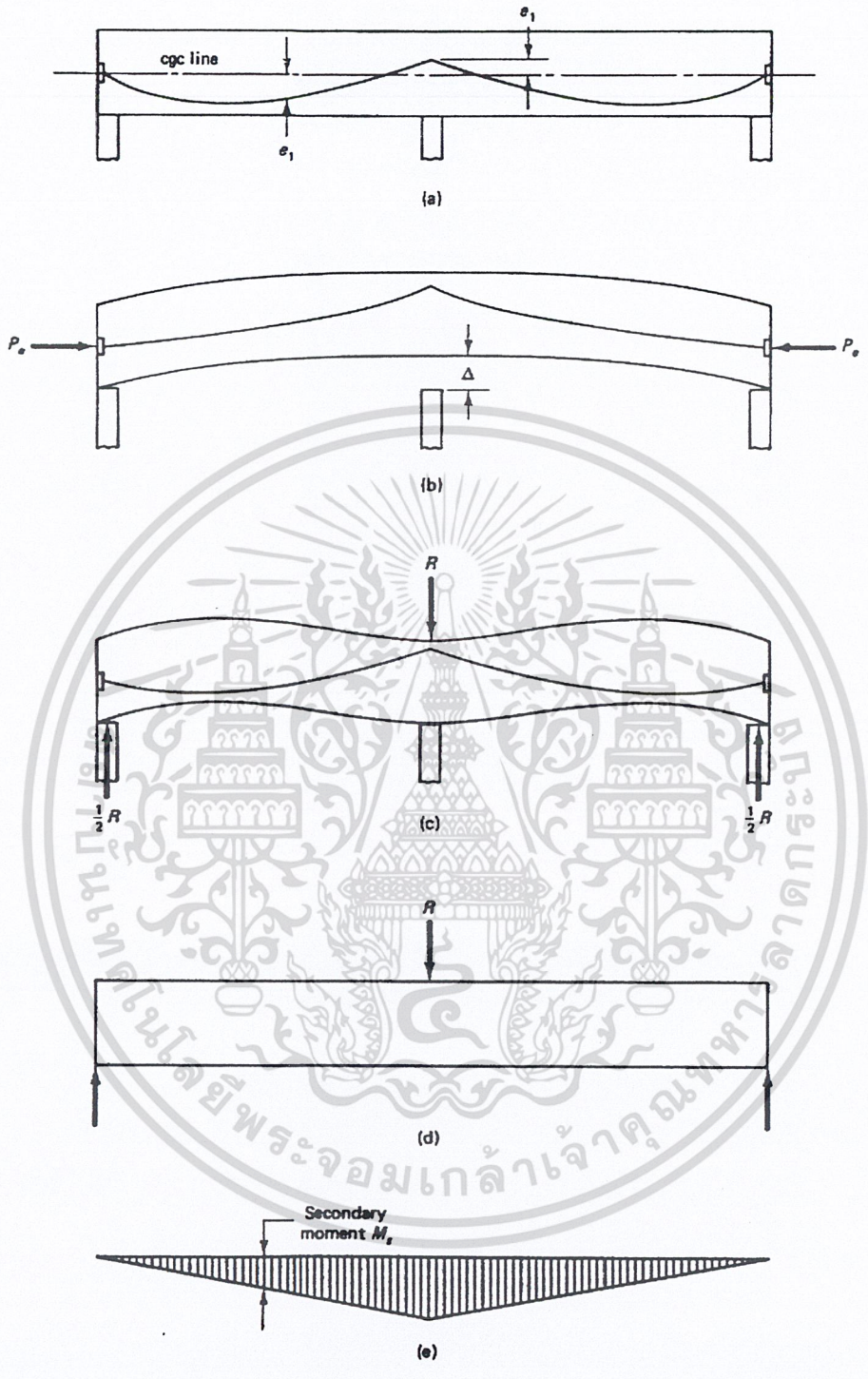
ในคอนกรีตอัดแรง ความต่อเนื่องก็ทำให้โมเมนต์ลดลงเช่นกัน แต่โมเมนต์เนื่องจากการอัดแรงเยื้องศูนย์จะทำให้เกิด *แรงลัพธ์รอง (secondary reactions)* และ*โมเมนต์รอง (secondary moments)* แรงภายในเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในผลที่ได้จากการอัดแรง อีกทั้งการหดตัวอีลาสติก การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และการคืบ ก็จะมีผลมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง

เนื่องจากข้อจำกัดในด้านการแตกร้าวในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง (รวมถึงองค์อาคารอัดแรงแบบบางส่วน) มีสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องด้วยทฤษฎีอีลาสติกจะใช้ได้ถึงสภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งาน กล่าวคือ จะถือว่าองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงมีความยืดหยุ่นและเป็นเนื้อเดียวกันเพราะการแตกร้าวที่น้อยมาก ในระหว่างที่สมมติฐานดังกล่าวจะใช้ไม่ได้ในคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะการแตกร้าวในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะเริ่มเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าเพียงร้อยละ 5 ถึง 10 ของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ

6.4.2 วิธีการเคลื่อนตัวของฐานรองรับ (Support Displacement Method)

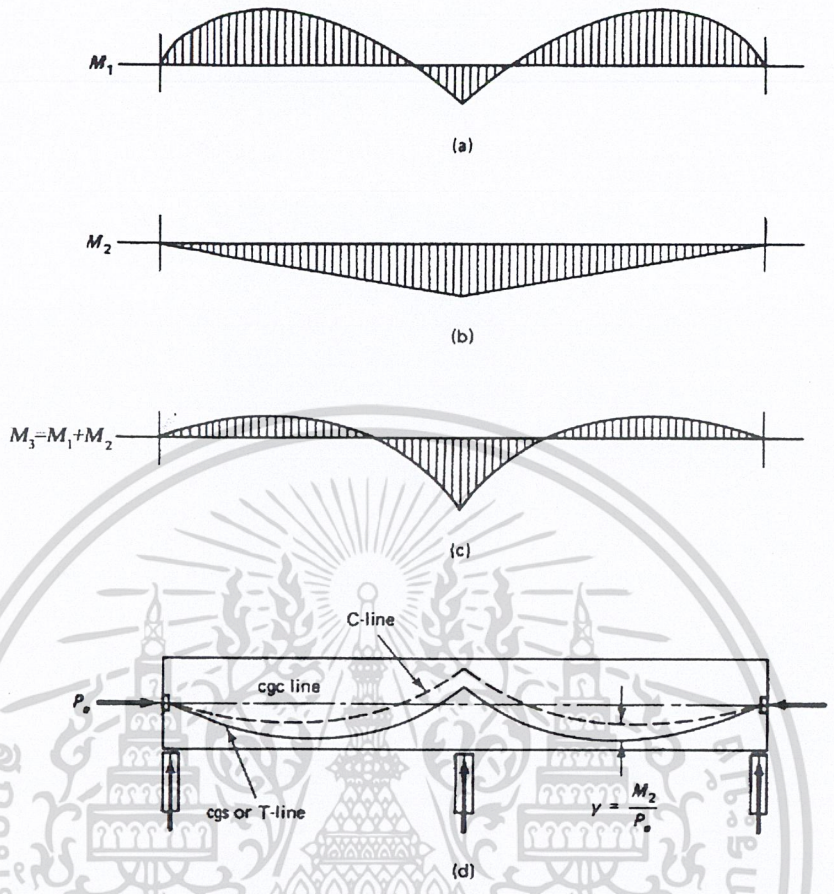
รูปที่ 6.3(a) แสดงคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องสองช่วง และในรูป (b) แสดงคานเมื่อถอดฐานรองรับตรงกลางออก แรงลัพธ์ R ที่ฐานกลางซึ่งจะถือว่าเป็น *แรงรอง (secondary force)* เกิดการการเยื้องศูนย์ของแรงอัด จะเรียกโมเมนต์เดิมที่เกิดจากการอัดแรง $M_1 = P_e e_1$ ว่า *โมเมนต์หลัก(primary moments)* และจะเรียกโมเมนต์ M_2 ซึ่งทำให้เกิดแรงลัพธ์ว่า *โมเมนต์รอง (secondary moments)* โมเมนต์รองจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวของแรงอัด (C-line)ที่ฐานรองรับภายในของโครงสร้างต่อเนื่อง และบังคับให้หน้าตัดคานที่ฐานรองรับกลับไปสู่ตำแหน่งเดิมก่อนการอัดแรง [ดูรูปที่ 6.3(c)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 – โมเมนต์รองในคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่อง (a) แนวเหล็กเสริมก่อนการอัดแรง (b) คานซึ่งไม่ได้ยึดที่ฐานกลางหลังจากการอัดแรง (c) แรงลัพธ์รองเพื่อต้านการยกตัว (d) แรงลัพธ์ R ของคานช่วงเดี่ยว (e) แผนภาพโมเมนต์รองเนื่องจาก R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 – การรวมโมเมนต์รองหลังเนื่องจากการอัดแรงและการเปลี่ยนแนวแรงอัด (a) โมเมนต์หลัก M_1 (b) โมเมนต์รอง M_2 (c) ผลรวม $M_3 = M_1 + M_2$ (d) ระยะห่างระหว่างแนวแรงอัดและแรงดึง

แนวแรงอัดเป็นแนวรวมของแรงอัดที่กระทำตามความยาวของคาน แรงลัพธ์รอง R จะต้านการยกตัว Δ และทำให้คานถูกยึดติดกับฐานรองรับภายในด้วยแรงลัพธ์ R ซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม โดยมีข้อแม้ว่าแนวแรงอัดที่ฐานรองรับภายในจะต้องเหนือแนว cgc ถ้าแนวทั้งสองทับกัน แรงลัพธ์ R จะมีค่าเป็นศูนย์ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.6

รูปที่ 6.4(a) แสดงแผนภาพของโมเมนต์หลัก M_1 ที่เกิดจากการอัดแรง ถ้านำไปรวมกับแผนภาพของโมเมนต์รอง M_2 ในรูปที่ 6.4(b) จะได้แผนภาพโมเมนต์ลัพธ์ $M_3 = M_1 + M_2$ ตามรูปที่ 6.4(c) ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากการอัดแรงที่ทำให้ขอบล่างของคานแตะกับฐานรองรับภายใน โดยที่แนวแรงอัดจะห่างจากแนวเหล็กเสริมอัดแรงหรือแนวแรงดึง (T-line) เป็นระยะเท่ากับ y ตามรูปที่ 6.4(d) โดยที่

$$y = M_2/P_e \qquad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตำแหน่งใหม่ของแนวเหล็กเสริมอัดแรง cgs จะหาได้จากโมเมนต์รวม $M_3 = M_1 + M_2$ ทำให้ได้พิกัดของระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัดเป็น

$$e' = e_3 = M_3/P_e \tag{6.2}$$

ซึ่ง P_e เป็นแรงดึงประสิทธิผลหลังจากการเสื่อมลดแล้ว จะเห็นว่า e' เป็นลบเมื่อแนวแรงอัดอยู่เหนือแกนสะเทิน ซึ่งเป็นกรณีของหน้าตัดเหนือฐานรองรับภายใน จะหาหน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตเหนือฐานรองรับภายในเนื่องจากการอัดแรง ได้จากสมการที่ 1.4a และb

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{e'_e c_t}{r^2}\right) \tag{6.3a}$$

และ

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{e'_c c_b}{r^2}\right) \tag{6.3b}$$

หน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตที่ฐานรองรับเนื่องจากการอัดแรงและน้ำหนักตัวเองเป็น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{e'_e c_t}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S^t} \tag{6.4a}$$

และ

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{e'_c c_b}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S_b} \tag{6.4b}$$

และแทนที่จะใช้ค่าโมเมนต์ M_3 ในสมการที่ 6.4a และ b อาจจะใช้โมเมนต์สุทธิบนหน้าตัด $M_4 = M_3 - M_D$ และหาหน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตที่ฐานรองรับซึ่งมีเหล็กอัดแรงอยู่เหนือแกนสะเทินได้จาก

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}-\frac{M_4}{S^t} \tag{6.5a}$$

และ

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}+\frac{M_4}{S_b} \tag{6.5b}$$

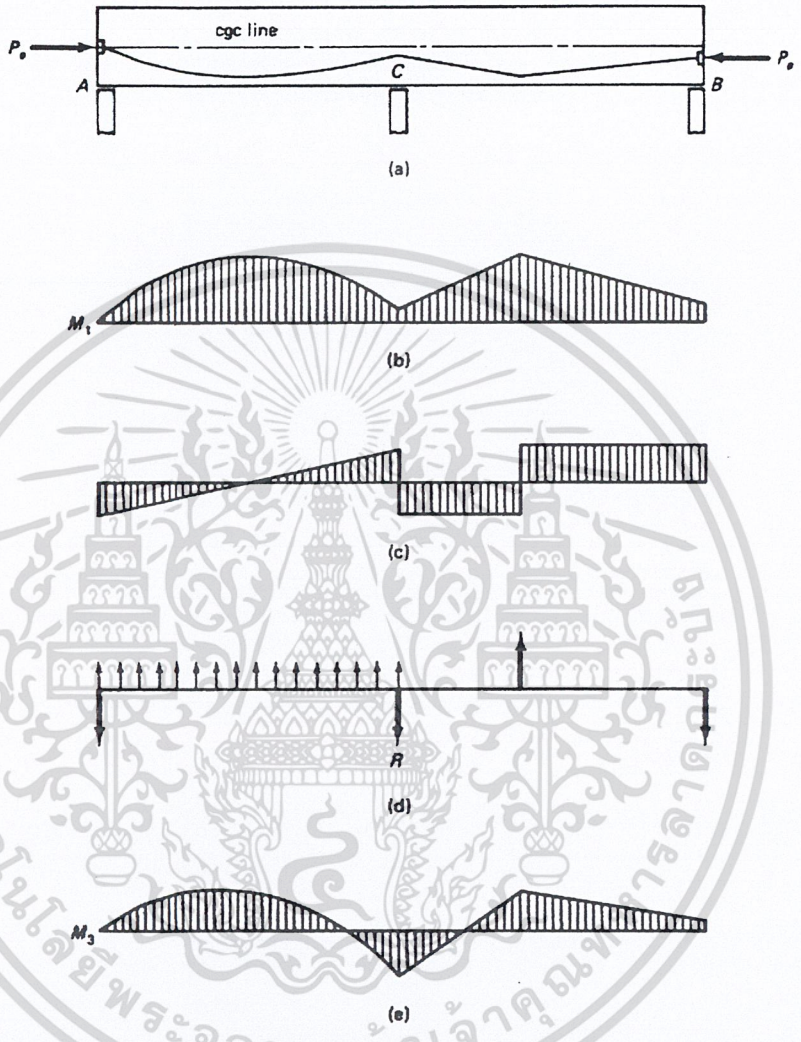
ทั้งสมการที่ 6.4 และ 6.5 ควรจะให้ผลลัพธ์เท่ากันไม่ว่าจะเป็นที่ ฐานรองรับ กลางช่วง หรือที่ใดก็ตาม

6.4.3 วิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า (Equivalent Load Method)

วิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า ใช้การแทนผลของการอัดแรงด้วยน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่าซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์ตามช่วงคานเท่ากับโมเมนต์หลัก M_1 ซึ่งเกิดจากการอัดแรง ตามที่แสดงในรูปที่ 6.5(b) ถ้าสร้างแผนภาพซองแรงเฉือนซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ M_1 ตามรูปที่ 6.5(c) และหาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดแรงเฉือนนี้ได้ตามรูปที่ 6.5(d) แรงลัพธ์ R ที่หาได้จากน้ำหนักบรรทุกนี้จะมีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่หาจากวิธีในหัวข้อที่แล้ว การกระจายโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนคานต่อเนื่องในรูปที่ 6.5(d) จะให้แผนภาพโมเมนต์ M_3 ในรูป (e) ซึ่งโมเมนต์นี้ก็มีค่าเท่ากับโมเมนต์สุทธิ M_3 ในหัวข้อที่แล้ว และจะให้พิกัดของการเยื้องศูนย์จากแนว cgs เท่ากับ $e_3 = M_3/P_e$ จะหาแรงลัพธ์ภายในเนื่องจากการอัดแรง R ได้จากรูปที่ 6.5(d) เพื่อที่จะนำไปหาโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอง M_2 ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุก R กระทำที่จุด c บนคานช่วงเดี่ยว AB ดังนั้นจะได้ระยะระหว่างแนวแรงอัดกับแนว cgs เป็น $y = M_2/P_e$ เหมือนในวิธีที่แล้ว



รูปที่ 6.5 – วิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า (a) โครงสร้างหลักหลังจากการอัดแรง (b) โมเมนต์หลัก M_1 เนื่องจากการอัดแรง (c) แผนภาพแรงเฉือนสำหรับโมเมนต์ M_1 (d) น้ำหนักบรรทุกซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ M_1 (e) แผนภาพโมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวหลังจากการกระจายโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 6.1</u> - ผลของความต่อเนื่องที่มีต่อแนวแรงอัดสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงวางแนวแบบพาราโบล่า

คานต่อเนื่องสองช่วง เป็นคอนกรีตอัดแรงระบบดึงทีหลังแบบมีแรงยึดเหนี่ยว ความยาวแต่ละช่วงเท่ากับ 27.5 ม. และมีแนวเหล็กเสริมตามที่แสดงไว้ในรูปข้างล่าง แรงดึงประสิทธิผล P_e หลังจากการเสื่อมลดเป็น 136 000 กก. คานกว้าง 30 ซม. และลึก 85 ซม. จงหาโมเมนต์หลักและโมเมนต์รองเนื่องจากการอัดแรง และหาหน่วยแรงที่ผิวคอนกรีต ณ ฐานรองรับตรงกลาง C เนื่องจากการอัดแรง ให้ใช้ทั้งวิธีการเคลื่อนตัวของฐานรองรับ และวิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า ไม่ต้องคำนึงถึงผลของแรงดึงที่แปรเปลี่ยนตามความยาวของคาน

(a) <u>วิธีการเคลื่อนตัวของฐานรองรับ</u>

โมเมนต์หลัก M_1 เนื่องจากการอัดแรงทำให้เกิดการยกตัวขึ้นที่ฐานรองรับกลาง C จะหาระยะยกตัว Δ_cได้จากกลศาสตร์พื้นฐานด้วยวิธี moment area รวมโมเมนต์ของพื้นที่ ADC รอบจุด A ในรูปที่ 6.7(a) จะได้ระยะห่างในดิ่งระหว่างเส้นสัมผัสของ elastic curve จากจุด A และ C และเนื่องจากความสมมาตรที่จุด C เส้นสัมผัสจาก C จะมีทิศทางตามแนวนอน ทำให้ได้ระยะห่างนี้มีค่าเป็นระยะแอ่นตัวที่ C

$$EI\Delta_c = \left[\left(34\ 000+11\ 900\right)\frac{27.5\times 2}{3}\right]\frac{27.5}{2} - \left(\frac{23\ 800\times 27.5}{2}\right)\frac{27.5\times 2}{3}$$

$$= 5.571(10)^6 \text{ กก.ม.}^3$$

และในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 6.7(c)

$$EI\Delta_c = \frac{13.75R\times 27.5}{2}\times\frac{27.5\times 2}{3} = 3\ 466.14R \text{ กก.ม.}^3$$

จับสองสมการเท่ากันจะได้ $5.571\times 10^6 = 3\ 466.14R$

ดังนั้น $$R_c = \frac{5.571\times 10^6}{3\ 466.14} = 1\ 607.26 \text{ กก.}$$

$$R_A = R_B = 803.63 \text{กก.}$$

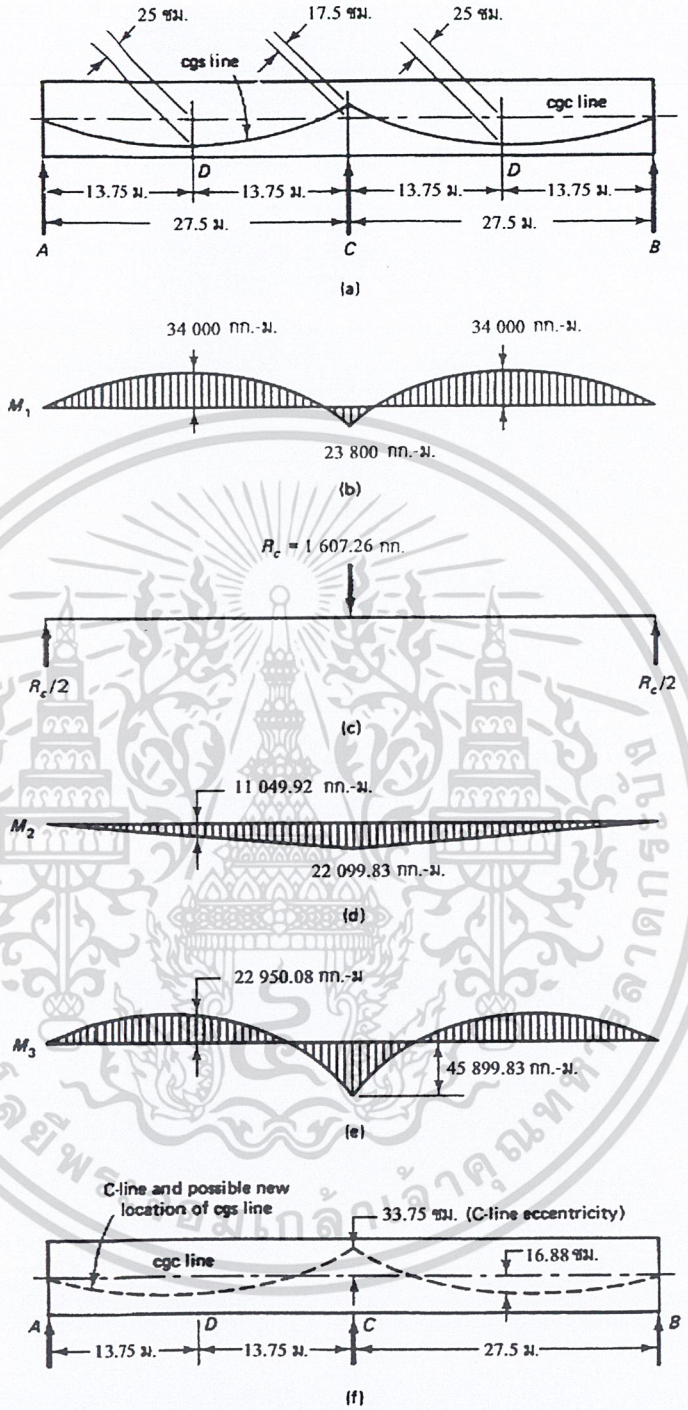
โมเมนต์รอง M_2 เนื่องจาก R_c จะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงจากฐานรองรับภายใน C ไปยังที่ฐานรองรับปลายที่ A และ B ตามที่แสดงในรูปที่ 6.6(d) และ 6.7(c) จากรูปที่ 6.6(c)

$$M_2 = \frac{R_c}{2}\times 27.5 = \frac{1\ 607.26}{2}\times 27.5 = 22\ 099.83 \text{ กก.ม.}$$

โมเมนต์รวมที่ C เนื่องจากความต่อเนื่อง

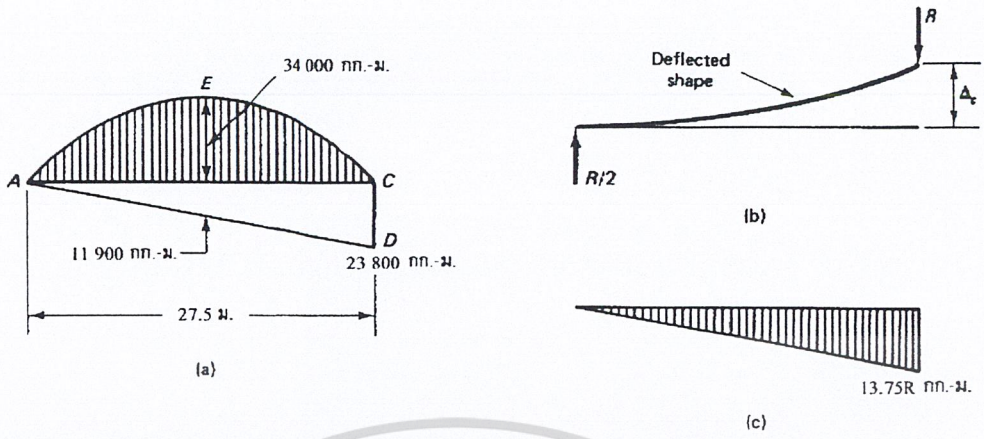
$$M_3 = M_1 + M_2 = 23\ 800 + 22\ 099.83 = 45\ 899.83 \text{ กก.ม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 – การเปลี่ยนแนวแรงอัดเนื่องจากความต่อเนื่อง (a) แนวเหล็กเสริมอัดแรงเบื้องต้น (b) โมเมนต์หลัก M_1 เนื่องจากแรงดึง P_e (c) แรงลัพธ์ R บนคานช่วงเดี่ยว (d) โมเมนต์รอง M_2 เนื่องจาก R (e) โมเมนต์สุดท้าย $M_3 = M_1+M_2$ (f) แนวแรงอัดสุดท้าย และแนว cgs ที่อาจเลือกใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 – การยกตัว Δ_c เนื่องจาก M_1 (a) โมเมนต์หลัก M_1 (b) การแอ่นตัวเนื่องจาก R
(c) โมเมนต์รอง M_2 เนื่องจาก R

จากสมการที่ 6.1 ระยะห่างระหว่างแนวแรงอัดและแนวเหล็กเสริมเหนือฐานรองรับ C เป็น

$$y = M_2/P_e = 22\ 099.83/136\ 00 = 16.25 \text{ ซม.}$$

จากสมการที่ 6.2 ระยะระหว่างแนวแรงอัดและแนว cgc หรือระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัดเหนือแนว cgc ที่ฐานรองรับภายใน C เท่ากับ $e_c = M_3/P_e = 45\ 899.83/136\ 000 = 33.75$ ซม.

โมเมนต์รวมที่กลางช่วงเป็น $M_3 = 34\ 000 - 22\ 099.83/2 = 22\ 950.08$ กก.ม.

และระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด $e_D = 22\ 950.08/136\ 00 = 16.88$ ซม.

หน่วยแรงที่ผิวคอนกรีต ณ ฐานรองรับภายใน C เนื่องจากการอัดแรงอย่างเดียว

$c^t = c_b = 85/2 = 42.5$ ซม., $e_c = 33.75$ ซม., $A_c = bh = 30(85) = 2550$ ซม.^{2},

$I_c = bh^3/12 = 30(85)^3/12 = 1.535 \times 10^6$ ซม.^{4}, $r^2 = I_c/A_c = 601.96$ ซม.^{2}

จากสมการที่ 6.3a และ b หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนเป็น

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_t}{r^2}\right) = -\frac{136\ 000}{2\ 550}\left(1+\frac{33.75\times 42.5}{601.96}\right) = -180.42 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)}$$

และหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างเป็น

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_b}{r^2}\right) = -\frac{136\ 000}{2\ 550}\left(1-\frac{33.75\times 42.5}{601.96}\right) = +73.75 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงดึง)}$$

ถึงแม้ว่าหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างจะสูงเกินหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ แต่ก็เป็นผลมาจากการอัดแรงแต่อย่างเดียว เมื่อรวมน้ำหนักของคานด้วยแล้ว หน่วยแรงนี้ก็จะลดลงอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) วิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า

จากสมการที่ 1.16 สำหรับแรงพยุง

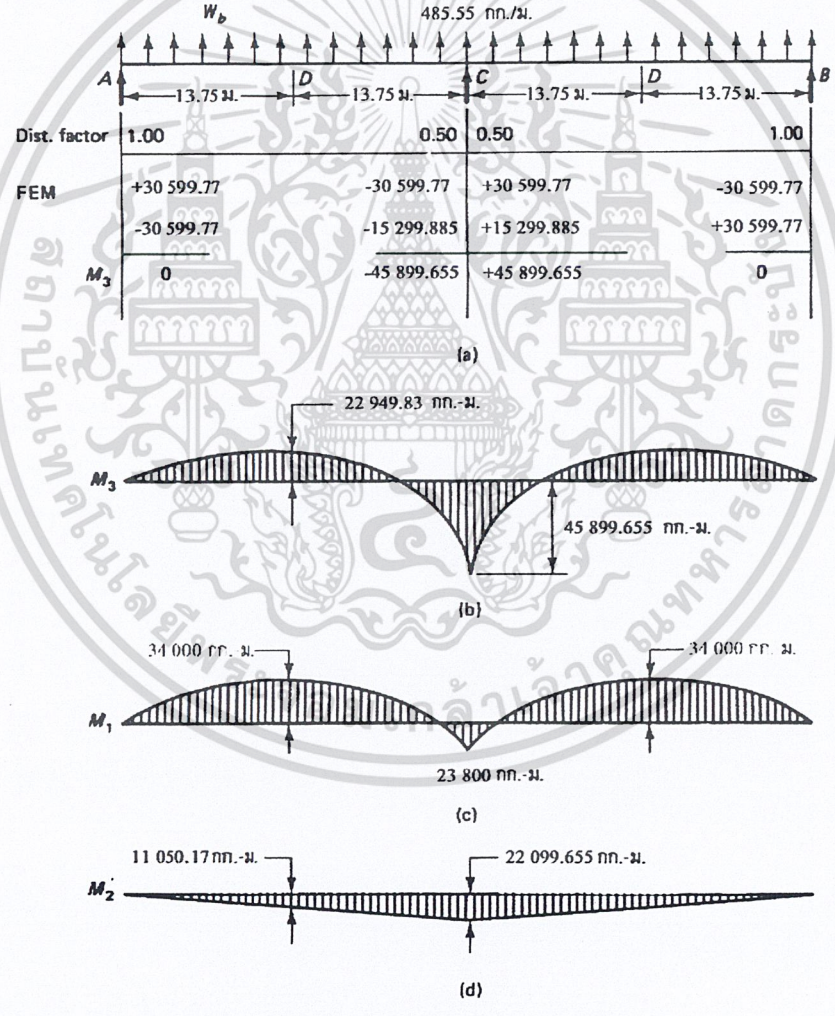
$w_b = 8Pa/L^2 = 8(136\,000)(0.3375)/27.5^2 = 485.55$ กก./ม.

$FEM = w_bL^2/12 = 485.55(27.5)2/12 = 30\,599.77$ กก.ม.

จากการกระจายโมเมนต์ในรูปที่ 6.8 โมเมนต์สุดท้ายที่ฐานรองรับด้านใน C จะมีค่าเท่ากับ

$M_3 = M_1 + M_2 = 45\,899.83$ กก.ม. ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่หามาได้จากข้อ (a)

เนื่องจากแผนภาพ M_1 เป็นแผนภาพโมเมนต์หลัก ดังนั้นจะหาแผนภาพสำหรับโมเมนต์รอง M_2 ได้จาก $M_3 - M_1$ ตามที่แสดงในรูปที่ 6.8(d) ซึ่งเหมือนกับรูปที่ 6.6(d)



รูปที่ 6.8 – การวิเคราะห์คานต่อเนื่องด้วยวิธีน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่า (a) น้ำหนักบรรทุกเทียบเท่าและการกระจายโมเมนต์ (b) โมเมนต์รวม M_3 (c) โมเมนต์หลัก M_1 (d) โมเมนต์รอง M_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 6.2</u> - ผลของความต่อเนื่องที่มีต่อแนวแรงอัดสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงวางแนวแบบหักงอกลางช่วง

ทำซ้ำตัวอย่างที่ 6.1 ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของฐานรองรับ ให้วางแนวเหล็กเสริมอัดแรงจัดแบบหักงอที่กลางช่วงและเหนือฐานรองรับ

สร้างแผนภาพโมเมนต์หลักและโมเมนต์รองตามที่แสดงในรูปที่ 6.9

$$EI\Delta_c = \left(34\ 000+11\ 900\right)27.5\times\frac{1}{2}\times\frac{27.5}{2} - \frac{23\ 800\times27.5}{2}\times\frac{27.5\times2}{3} = 2.678\times10^6 \text{ กก.ม.}^3$$

จากรูปที่ 6.7 (c) $EI\Delta_c = 3\ 466.14R_c$

ได้ $R_c = 2.678(10)6/3466.14 = 772.617$ กก.

โมเมนต์รองที่ฐานรองรับภายใน C, $M_2 = \frac{R}{2}\times27.5 = \frac{772.617}{2}\times27.5 = 10\ 623.48$ กก.ม.

ดังนั้นโมเมนต์รวม M_3 = 23 800 + 10 623.48 = 34 423.48 กก.ม.

จากสมการที่ 6.1 ระยะที่แนวแรงอัดเคลื่อนไปอยู่เหนือฐานรองรับ C,

$y = M_2/P_e = 10\ 623.48/136\ 00 = 7.81$ ซม.

จากสมการที่ 6.2 ระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัดเหนือแนว cgc ที่ฐานรองรับภายใน C เป็น

$e_c = M_3/P_e = 34\ 423.48/136\ 000 = 25.31$ ซม.

ดังนั้นโมเมนต์รวมที่กลางช่วงคาน, $M_3 = 34\ 000 - 10\ 623.48/2 = 28\ 688.26$ กก.ม.

และระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด $e_D = 28\ 688.26/136\ 000 = 21.09$ ซม.

หน่วยแรงที่ผิวคอนกรีต ณ ฐานรองรับภายใน C เนื่องจากการอัดแรงอย่างเดียว, e_c = 25.31 ซม.

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนเป็น

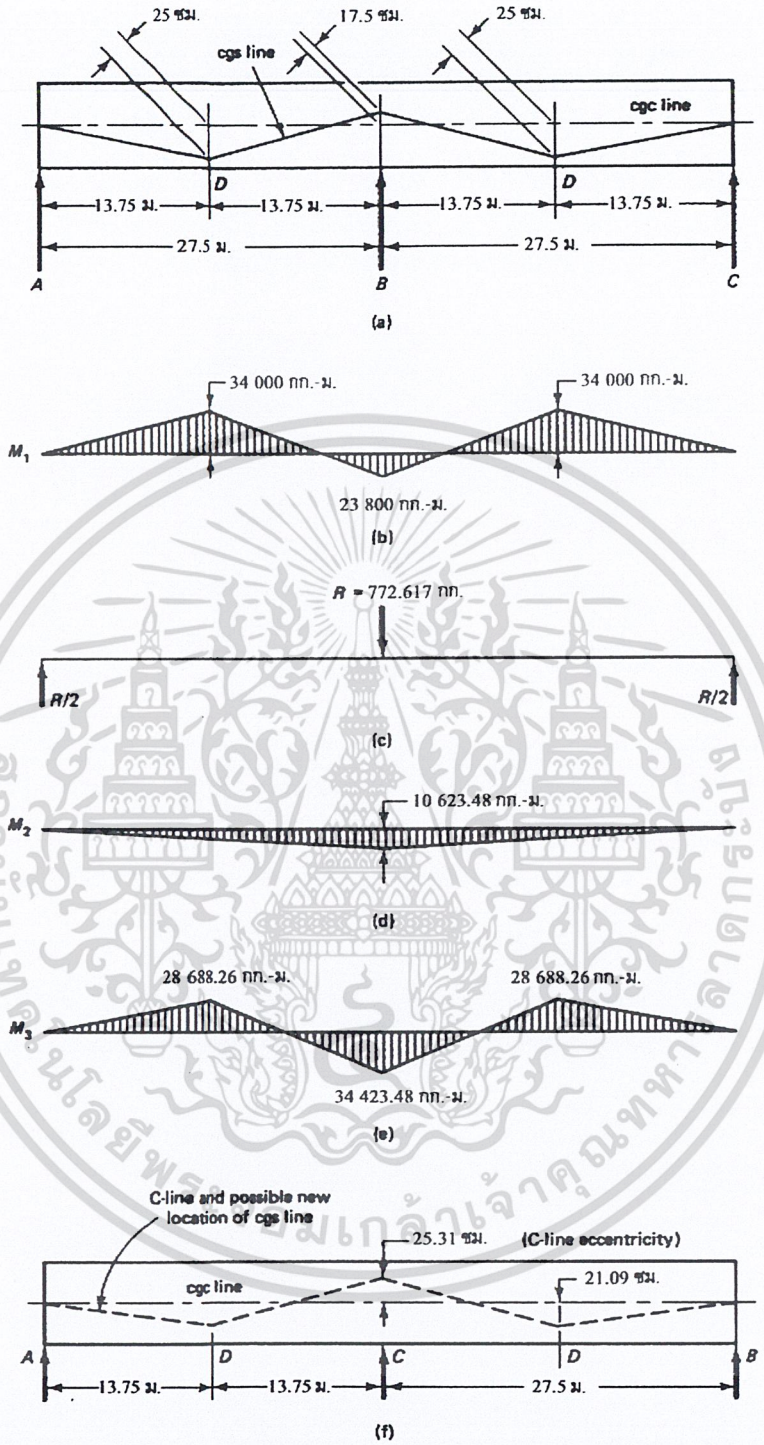
$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_t}{r^2}\right) = -\frac{136\ 000}{2\ 550}\left(1+\frac{25.31\times42.5}{601.96}\right) = -148.64 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงอัด)}$$

และหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างเป็น

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_b}{r^2}\right) = -\frac{136\ 000}{2\ 550}\left(1-\frac{25.31\times42.5}{601.96}\right) = +41.97 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงดึง)}$$

จะเห็นโมเมนต์เนื่องจากความต่อเนื่อง M_3 ในตัวอย่างนี้ น้อยกว่าในตัวอย่างที่ 6.1 เนื่องจากการวางแนวเหล็กเสริมเป็นเส้นตรงและมีการหักงอ จะได้โมเมนต์เป็นสัดส่วนกับ L/2 ในระหว่างที่การวางแนวเป็นพาราโบล่า จะได้โมเมนต์เป็นสัดส่วนกับ 2L/3 ส่งผลให้ได้หน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตน้อยกว่าในตัวอย่างที่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 – การเปลี่ยนแนวแรงอัดเนื่องจากความต่อเนื่อง (a) แนวเหล็กเสริมอัดแรงเบื้องต้น (b) โมเมนต์หลัก M_1 เนื่องจากแรงดึง P_e (c) แรงลัพธ์ R บนคานช่วงเดี่ยว (d) โมเมนต์รอง M_2 เนื่องจาก R (e) โมเมนต์สุดท้าย $M_3 = M_1+M_2$ (f) แนวแรงอัดสุดท้าย และแนว cgs ที่อาจเลือกใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 การเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมและความสอดคล้องกับแนวแรงอัด

จากหัวข้อที่ 6.4 จะเห็นว่าแนวแรงอัด (C-line) แปรเปลี่ยนตามแนวเหล็กเสริมอัดแรง (cgs line) เพราะว่าตำแหน่งของแนวแรงอัดเป็นตำแหน่งของแขนโมเมนต์ซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ของแนวเหล็กเสริมอัดแรงจากแนว cgc ซึ่งแปรเปลี่ยนตลอดความยาวของคาน พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานก็ขึ้นอยู่กับโมเมนต์นี้ และรูปแบบของแผนภาพโมเมนต์ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักบรรทุกว่า เป็นแบบกระทำเป็นจุดหรือแผ่กระจาย ดังนั้น แนวของเหล็กเสริมอัดแรงจึงมักจะเป็นแบบพาราโบล่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็นแบบแผ่กระจาย และเป็นแบบเส้นตรงและมีการหักงอเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 1 และ 4

ตัวอย่างที่ 6.1 และ 6.2 แสดงให้เห็นว่าในคานต่อเนื่อง ระยะห่างของแนวแรงอัดจากจากแนว cgc เป็นสัดส่วนโดยตรงกับโมเมนต์รอง M_2 เนื่องจากแผนภาพ M_2 แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้นกับระยะจากฐานรองรับ จึงเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนตำแหน่งของแนวแรงอัดแบบเชิงเส้นเช่นกัน ด้วยการยกให้สูงขึ้นหรือต่ำลงเหนือฐานรองรับภายใน โดยที่ยังคงตำแหน่งเดิมเหนือฐานรองรับภายนอกซึ่งเป็นแบบข้อหมุนไว้ ในทำนองเดียวกัน ก็จะทำการเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมอัดแรงได้เหมือนกัน โดยไม่มีผลต่อแนวแรงอัด ความยืดหยุ่นนี้จึงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่อง

ตัวอย่างที่ 6.3 แสดงความยืดหยุ่นนี้ เปรียบเทียบแนวเหล็กเสริมอัดแรงที่แตกต่างกันในรูปที่ 6.6(a), 6.10(a) และ 6.11(a) แต่จะเห็นว่าแนวแรงอัดอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทั้งในรูปที่ 6.6(f), 6.10(f) และ 6.11(f) และจะเห็นในหัวข้อ b ของตัวอย่างที่ 6.3 ว่า เมื่อแนวแรงอัดและเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ในแนวเดียวกัน จะได้แรงลัพธ์ $R = 0$ และโมเมนต์รอง $M_2 = 0$ ซึ่งแสดงว่าคานจะเพียงแต่แตะฐานรองรับตรงกลางและมีพฤติกรรมเหมือนกับเป็นคานช่วงเดี่ยว จะเรียกคานในกรณีนี้ว่า *คานซึ่งมีความสอดคล้องพอดี (concordant beam)* และแนวเหล็กเสริมอัดแรงในกรณีนี้ว่า *เหล็กอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดี (concordant tendon)*

สมมติฐานตามข้างล่างอธิบายการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงเส้นและความสอดคล้องของแนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่อง

1. จะเปลี่ยนแบบเชิงเส้น แนวเหล็กเสริมอัดแรงในรูปแบบใดก็ได้โดยไม่มีผลต่อแนวแรงอัด
2. คานซึ่งมีเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดี เป็นคานต่อเนื่องซึ่งมีแนวแรงอัดทับกับแนวเหล็กเสริมอัดแรง
3. เหล็กเสริมอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดีจะทำให้ไม่เกิดแรงลัพธ์ที่ฐานรองรับภายใน
4. ระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดี จะทำให้เกิดแผนภาพโมเมนต์ในรูปแบบที่เหมือนกับแผนภาพโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่ม
5. แนวแรงอัดใด ๆ ก็คือแนวของเหล็กอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งสอดคล้องพอดีหลายแนวมารวมกันก็จะได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องเหมือนเดิม แต่ถ้าแนวเหล็กเสริมอัดแรงที่ไม่สอดคล้องมารวมด้วย จะทำให้ได้แนวเหล็กเสริมอัดแรงที่ไม่สอดคล้อง

7. การเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ที่ปลายฐานรองรับด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านจะเปลี่ยนตำแหน่งของแนวแรงอัด แต่การเปลี่ยนระยะเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับภายในจะไม่มีผลต่อตำแหน่งของแนวแรงอัด

8. การเลือกใช้แนวที่สอดคล้องพอดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับระยะหุ้มของคอนกรีตและประสิทธิภาพในการเลือกความลึกของคาน รูปที่ 6.12 แสดงแผนภาพของโมเมนต์และแรงเฉือนสำหรับน้ำหนักบรรทุกในกรณีต่าง ๆ บนคานต่อเนื่อง

ควรจะเริ่มการออกแบบด้วยการพยายามใช้การสอดคล้องพอดีเพื่อลดขั้นตอนในการหา M_2 ใช้การลองผิดลองถูกจนได้ความลึกของคานที่ผ่านข้อกำหนดทุกอย่างโดยมีแนวเหล็กเสริมซึ่งสอดคล้องพอดีหรือใกล้เคียง

<u>ตัวอย่างที่ 6.3</u> – การตรวจสอบทฤษฎีการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงเส้นของแนวเหล็กเสริมอัดแรง

คานต่อเนื่องในตัวอย่างที่ 6.1 มีแนวหล็กเสริมอัดแรงใหม่เป็น

(a) รูปที่ 6.10(a) มีระยะเยื้องศูนย์ $e_c = 0$ และระยะเยื้องศูนย์ $e_D = 33.75$ ซม.ที่กลางช่วงเหมือนกับระยะเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับภายในในตัวอย่างที่ 6.1

(b) รูปที่ 6.11(a) มีระยะเยื้องศูนย์ $e_c = 33.75$ ซม. และระยะเยื้องศูนย์ $e_D = 16.88$ ซม.เหมือนกับตำแหน่งของแนวแรงอัดในตัวอย่างที่ 6.1

จงแสดงว่าแนวแรงอัดใน (a)และ (b) อยู่ในแนวเดียวกับในตัวอย่างที่ 6.1 และในรูปที่ 6.6(f) โมเมนต์รวมที่ฐานรองรับภายใน C สำหรับทั้งสองกรณีเป็น $M_3 = 45\ 899.83$ กก.ม. และที่กลางช่วง D $M_3 = 22\ 950.88$กก.ม. เหมือนในตัวอย่างที่ 6.1

(a) โมเมนต์รอง $M_2 = 45\ 899.83$ กก.ม.

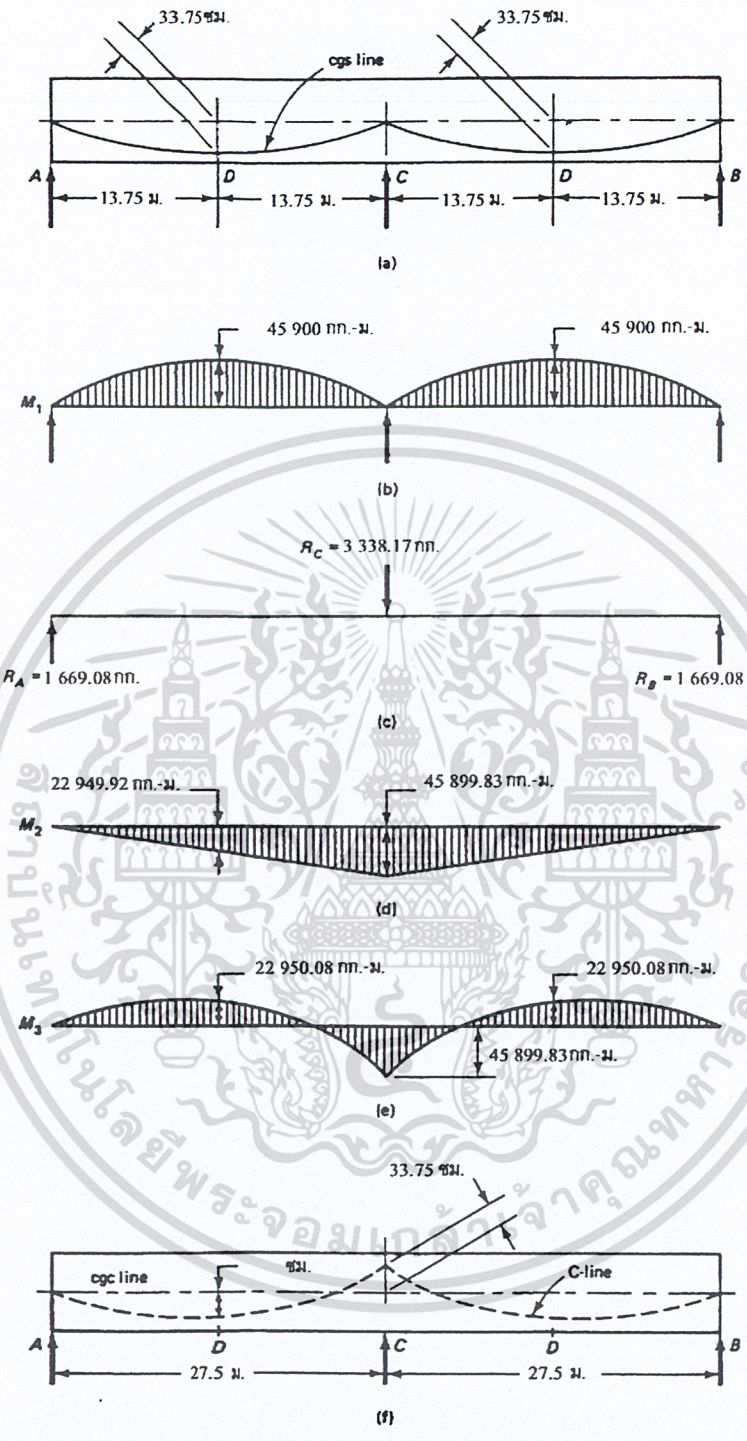
จะได้ $\frac{R_c}{2} \times 27.5 = 45\ 899.83, \quad R_c = \frac{45\ 899.83 \times 2}{27.5} = 3\ 338.17$ กก.

และ $R_A = R_B = 1669.08$ กก.

(b) ทั้ง $M_2 = 0$ และ $R = 0$

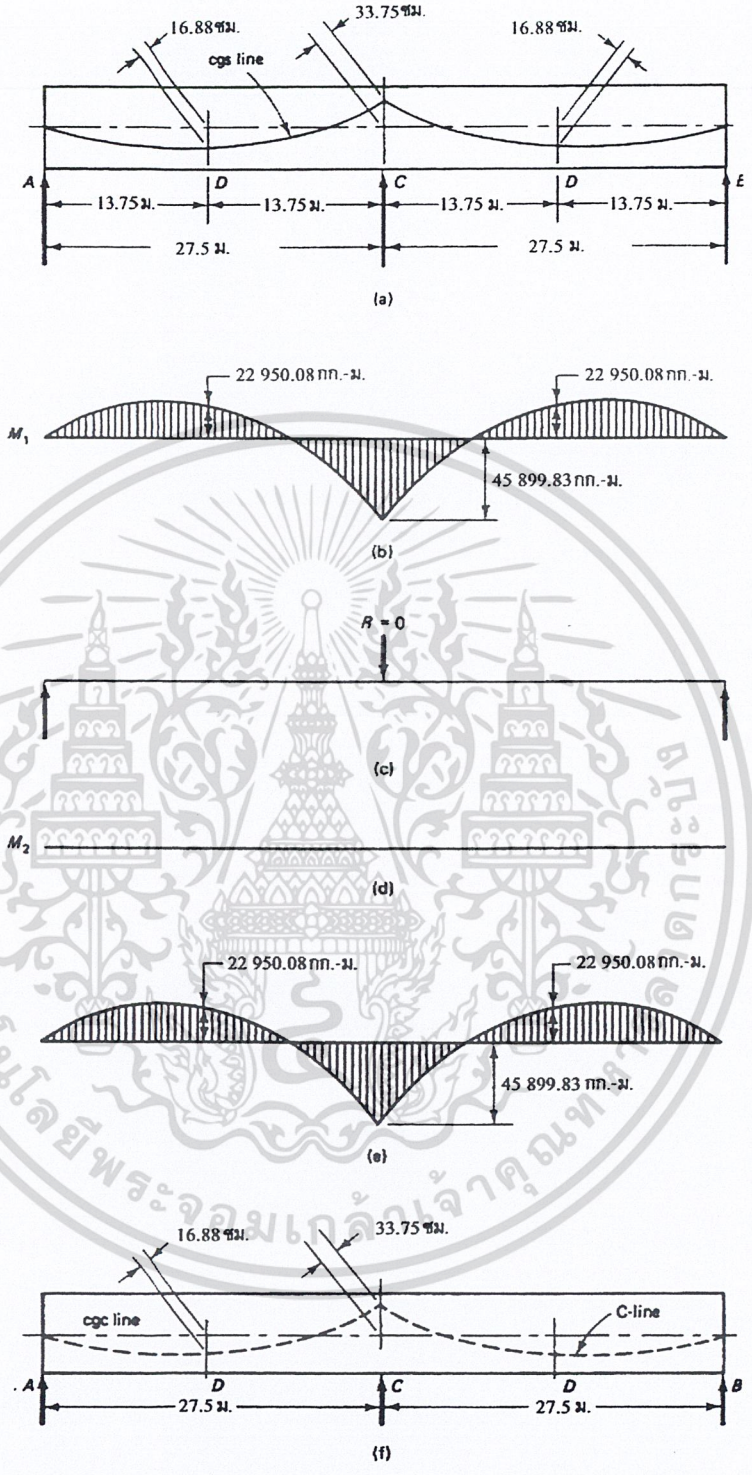
จะเห็นได้จากหัวข้อ (a) ในรูปที่ 6.10 และหัวข้อ (b) ในรูปที่ 6.11 ว่าแนวแรงอัดใกล้เคียงกับแนวในตัวอย่างที่ 6.1 และหน่วยแรงก็มีค่าเหมือนกันคือ f_t = - 180.42 กก./ซม^2. (แรงอัด) และ f_b = + 73.75 กก./ซม^2. (แรงดึง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



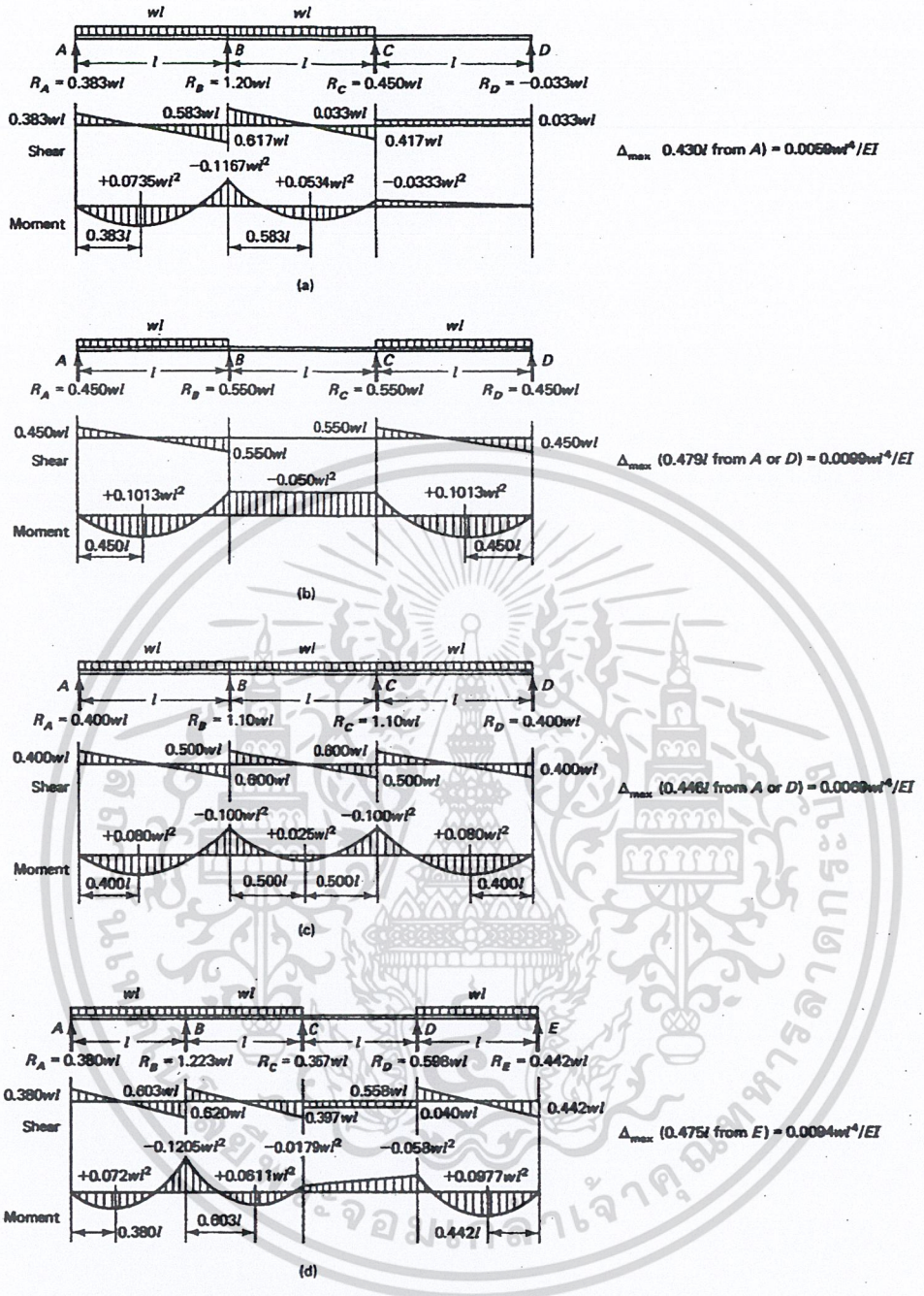
รูปที่ 6.10 – การเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมอัดแรงในตัวอย่างที่ 6.3 (แนวเลือก a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



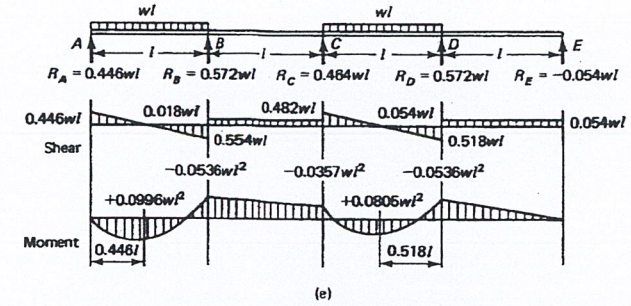
รูปที่ 6.11 – การเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมอัดแรงในตัวอย่างที่ 6.3 (แนวเลือก b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



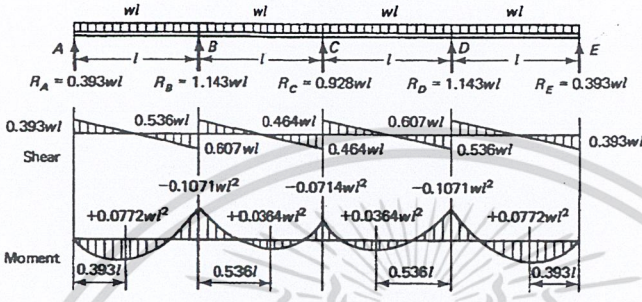
รูปที่ 6.12 – แผนภาพโมเมนต์และแรงเฉือนสำหรับคานต่อเนื่อง (a) คานต่อเนื่องมี 3 ช่วงเท่ากัน ช่วงปลายด้านหนึ่งไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ (b) คานต่อเนื่องมี 3 ช่วงเท่ากัน ช่วงกลางไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ (c) คานต่อเนื่องมี 3 ช่วงเท่ากัน มีน้ำหนักบรรทุกกระทำทุกช่วง (d) คานต่อเนื่องมี 4 ช่วงเท่ากัน มี 3 ช่วงที่รับน้ำหนักบรรทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



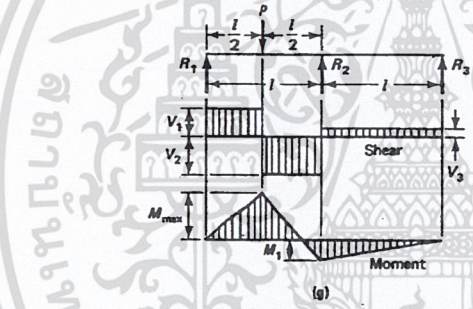
(e)

Δ_{max} (0.477l from A) = $0.0097wl^4/EI$



(f)

Δ_{max} (0.440l from A and E) = $0.0065wl^4/EI$



(g)

Total equivalent uniform load = $\frac{13}{8}P$

$R_1 = V_1 = \frac{13}{32}P$

$R_2 = V_2 + V_3 = \frac{11}{16}P$

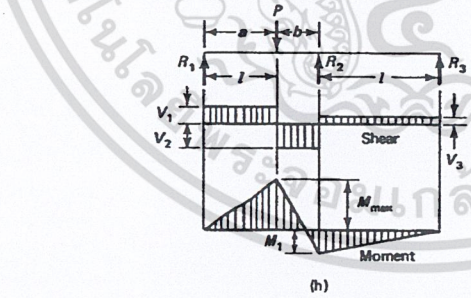
$R_3 = V_3 = -\frac{3}{32}P$

$V_2 = \frac{19}{32}P$

M_{max} (at point of load) = $\frac{13}{64}Pl$

M_1 (at support R_2) = $\frac{3}{32}Pl$

Δ_{max} (0.480l from R_1) = $0.015Pl^3/EI$



(h)

$R_1 = V_1 = \frac{Pb}{4l^3}[4l^2 - a(l+a)]$

$R_2 = V_2 + V_3 = \frac{Pa}{2l^3}[2l^2 + b(l+a)]$

$R_3 = V_3 = -\frac{Pab}{4l^3}(l+a)$

$V_2 = \frac{Pa}{4l^3}[4l^2 + b(l+a)]$

M_{max} (at point of load) = $\frac{Pab}{4l^3}[4l^2 - a(l+a)]$

M_1 (at support R_2) = $\frac{F}{4l^2}$

รูปที่ 6.12(ต่อ) - (e) คานต่อเนื่องมี 4 ช่วงเท่ากัน น้ำหนักบรรทุกกระทำสลับช่วง (f) คานต่อเนื่องมี 4 ช่วงเท่ากัน มีน้ำหนักบรรทุกกระทำทุกช่วง (g) คานต่อเนื่องมี 2 ช่วงเท่ากัน มีน้ำหนักกระทำเป็นจุดที่กลาง 1 ช่วง (h) คานต่อเนื่องมี 2 ช่วงเท่ากันมีน้ำหนักกระทำเป็นจุด ณ จุดใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 กำลังประลัยและขอบเขตสภาวะวิบัติของคานต่อเนื่อง

ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน จะถือว่าวัสดุมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น (elastic) จนถึงขอบเขตของหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ขอบเขตของหน่วยแรงดึงนี้ขึ้นอยู่กับการยอมให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตหลังจากที่การแตกร้าวได้เริ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงเกินโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต เมื่อการแตกร้าวมีมากขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเกิน และเมื่อหน่วยแรงในบริเวณวิกฤตซึ่งมักจะเป็นบริเวณที่เกิดโมเมนต์สูงสุดถึงจุดคราก จะเกิดการยืดหดตัวแบบคงที่ขึ้นในบริเวณนั้น และมีการกระจายซ้ำของโมเมนต์จากบริเวณที่โมเมนต์เป็นลบไปยังบริเวณรับโมเมนต์บวก ที่สภาวะนี้จนไปถึงขอบเขตของสภาวะวิบัติ บริเวณที่มีหน่วยแรงสูงสุดในคานต่อเนื่องจะแปรสภาพกลายเป็นข้อหมุนแบบพลาสติก (plastic hinge)

การกระจายซ้ำของโมเนต์และการเกิดข้อหมุนแบบพลาสติกขึ้นที่ฐานรองรับต่อเนื่องของคานอัดแรงที่มีแรงยึดเหนี่ยว ทำให้คานแปรสภาพกลายเป็นคานซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยสมการสมดุลแต่อย่างเดียว (statically determinate) เสมือนกับว่าวางเหล็กเสริมอัดแรงในแนวที่สอดคล้องพอดีทำให้ไม่มีโมเมนต์ที่ฐานรองรับ ในทางทฤษฎีแล้ว ในกรณีนี้จะถือว่าไม่ต้องคิดถึงโมเมนต์รอง M_2 หลังจากการแตกร้าวเริ่มขึ้น แต่ก็จะถือว่าเป็นการออกแบบที่ไม่ปลอดภัยนัก ถ้าไม่ได้ใช้แนวเหล็กเสริมอัดแรงที่สอดคล้องพอดีในการออกแบบเบื้องต้นและตรวจสอบว่าใช้ได้จนถึงขั้นสุดท้าย ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องรวมโมเมนต์รอง M_2 เนื่องจากการอัดแรงไปจนถึงขอบเขตของสภาวะน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยที่จะถือว่าตัวคูณเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 1.0 สิ่งสำคัญอีกอย่างก็คือ การที่แนวเหล็กเสริมที่ไม่สอดคล้องพอดีจะเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนพลาสติกและโมเมนต์ที่ได้จากการกระจายซ้ำ ในทางกลับกันโมเมนต์ที่ควรจะเกิดที่ฐานรองรับเนื่องจากสติฟเนสต้านการหมุนของคาน กลับจะมีค่าเปลี่ยนไปเท่ากับโมเมนต์รองเนื่องจากการอัดแรง

เพื่อที่จะหาโมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบ ควรจะปฏิบัติตามขั้นตอนต่อไปนี้:

1. หาโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มแล้ว
2. ปรับแก้ด้วยการเพิ่มโมเมนต์รอง M_2 เนื่องจากการอัดแรง
3. กระจายโมเมนต์ซ้ำตามที่ยอมให้ โมเมนต์รองบวกที่ฐานรองรับเนื่องจากการเคลื่อนแนวเหล็กเสริมอัดแรงลงต่ำลงกว่าแนวสอดคล้องพอดี จะทำให้โมเมนต์ลบใกล้ฐานรองรับมีค่าลดลง และเพิ่มโมเมนต์บวกในบริเวณกลางช่วง ถ้าเคลื่อนแนวเหล็กเสริมอัดแรงสูงขึ้นก็จะได้ผลตรงกันข้าม

มาตรฐาน ACI ยอมให้เพิ่มหรือลดโมเมนต์ลบที่หาได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยมีค่าสูงสุดไม่เกินร้อยละจากสมการข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_d = 20\left[1 - \frac{\omega_p + d/d_p(\omega - \omega')}{0.36\beta_1}\right]$$

โดยที่ $\omega_p = \rho_p f_{ps}/f_c'$, $\omega' = \rho' f_y/f_c'$, $\omega = \rho f_y/f_c'$, $\rho_p = A_{ps}/bd_p$, $\rho' = A_s'/bd$

และโมเมนต์ลบจากการกระจายซ้ำจะทำได้ในเฉพาะช่วงคานที่มีการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่เหมือนกันเท่านั้น

มาตรฐาน ACI ยังยอมให้ทำการกระจายโมเมนต์ซ้ำได้เฉพาะในหน้าตัดที่มีค่าดัชนีเหล็กเสริมไม่เกิน $0.24\beta_1$ ตามรายละเอียดข้างล่าง

$$\omega_p \text{ หรือ } \omega_p + d/d_p(\omega_p - \omega') \text{ หรือ } \omega_{pw} + d/d_p(\omega_w - \omega_w') \leq 0.24\beta_1 \qquad (6.7)$$

โดยที่ ω_{pw} ใช้สำหรับหน้าตัดแบบมีปีก และใช้ b_w สำหรับความกว้างของแกนคาน

6.8 ขอบเขตของแนวเหล็กเสริมอัดแรงและการปรับ

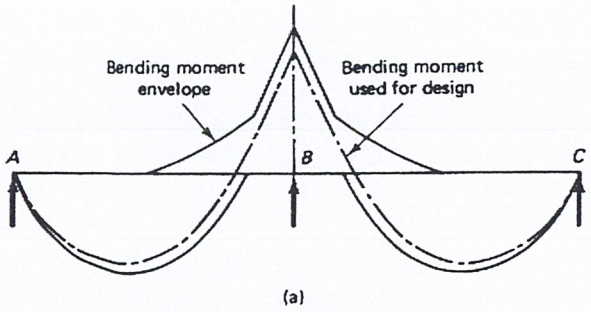
จะหาขอบเขตของระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงในคานต่อเนื่องได้เหมือนวิธีในหัวข้อ 4.4.3 สำหรับคานช่วงเดี่ยว สิ่งที่กำหนดก็คือการที่จะยอมให้เกิดแรงดึงในหน้าตัดหรือไม่ เพราะจะเป็นสิ่งที่ระบุถึงพิกัดสูงสุดและต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งเดิร์นบนและล่าง

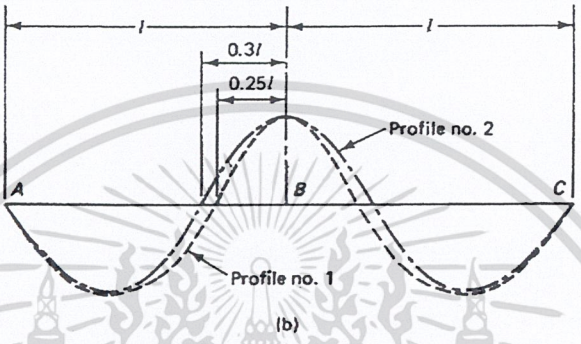
แนวเหล็กเสริมอัดแรงที่ฐานรองรับภายในจะแปรเปลี่ยนตามรูปแบบของแผนภาพโมเมนต์ลบที่ตำแหน่งนั้นไม่ได้ เนื่องจากสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและก่อสร้างจริง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงนี้ประกอบด้วย ปริมาณการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีความโค้งลดลง หน่วยแรงอัดสูงที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางของแนวเหล็กเสริมอย่างฉับพลัน รวมไปถึงความยุ่งยากในระบบดึงเหล็กทีหลัง ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมอัดแรงในบริเวณฐานรองรับให้มีลักษณะเป็นแนวโค้ง ซึ่งก็จะทำให้ต้องปรับแก้แผนภาพโมเมนต์หลัก M_1 และแผนภาพโมเมนต์รวม M_3 ตามไปด้วย

รูปที่ 6.13 แสดงแนวมาตรฐานของเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์บนและล่างเท่ากันในบริเวณที่เกิดโมเมนต์สูงสุด โดยที่เส้นประแสดงค่าโมเมนต์เฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน การเลือกแนวเหล็กเสริมอัดแรงควรจะพิจารณาดังต่อไปนี้:

1. ระยะเยื้องศูนย์ควรมีค่ามากสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ที่จุดซึ่งเกิดโมเมนต์สูงสุด ณ ขอบเขตของสภาวะวิบัติ
2. ถ้าเป็นไปได้ ควรจะให้โมเมนต์เนื่องจากการอัดแรงต้านโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานเฉลี่ยได้อย่างพอเพียงที่ทุกตำแหน่ง ซึ่งจะตรวจสอบได้จากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่ใช่จากการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ เพราะการอัดแรงทำให้เกิดหน่วยแรงตามแกนร่วมกับหน่วยแรงดัด
3. ควรพิจารณาแนวเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำให้เกิดการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานน้อยสุดร่วมไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 6.13 – การปรับแนวเหล็กเสริมอัดแรง (a) แผนภาพโมเมนต์สำหรับคานต่อเนื่อง (b) แนวเหล็กเสริมอัดแรง

4. การเลือกแนวเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องยึดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเป็นหลัก แนวเหล็กเสริมอัดแรงที่เลือกมาจากพื้นฐานของการปรับตำแหน่งเชิงเส้นและความสอดคล้องพอดี อาจจะไม่เพียงพอ เพราะอาจไม่ผ่านทั้งข้อกำหนดของหน่วยแรงที่ยอมให้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน และข้อกำหนดของการออกแบบโดยวิธีกำลัง ทั้งที่กลางช่วงและที่ฐานรองรับภายใน
5. การลดระยะเยื้องศูนย์ที่ฐานรองรับภายในจะทำให้หน่วยแรงอัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานลดลง เหลือกำลังที่จะรับโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรมากขึ้น (เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรได้) แต่มีข้อแม้ว่าระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วงและโมเมนต์ที่ตำแหน่งนั้นจะต้องผ่านข้อกำหนดของหน่วยแรงที่ยอมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 6.4 - แนวเหล็กเสริมอัดแรงและแนวแรงอัดในคานต่อเนื่อง

จงออกแบบแนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานในตัวอย่างที่ 4.7 สมมติให้เป็นคานต่อเนื่อง 3 ช่วงไม่มีการค้ำยัน มีความยาวช่วงเป็น 19.5 ม. รับน้ำหนักบรรทุกจร w_L = 2250 กก./ม. ใช้การอัดแรงแบบดึงทีหลังต่อเนื่องทั้งโครงสร้าง อัดน้ำปูนในท่อร้อยหลังจากการอัดแรง ไม่ต้องคิดถึงการแปรเปลี่ยนของแรงดึงเนื่องจากการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานในบริเวณโค้งดัดกลับ และสมมติให้ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีต $f_c = 0.45f_c'$ ที่ผิวบนของหน้าตัดเชิงประกอบ ใช้ความกว้างประสิทธิผลแปลงของปีกรับแรงอัด เนื่องจากความแตกต่างของคอนกรีตทับหน้ากับคอนกรีตของคาน b_m = 165 ซม.

1. ข้อมูลจากตัวอย่างที่ 4.7

(a) ข้อมูลของหน่วยแรง

คานสำเร็จรูป f_c' = 350 กก./ซม.^{2} คอนกรีตน้ำหนักปกติ

พื้นสะพานหนา 15 ซม. f_c' = 210 กก./ซม.^{2} คอนกรีตน้ำหนักปกติ

$f_c = 0.45\, f_c' = 0.45(350) = -157.5$ กก./ซม.^{2}

ที่ฐานรองรับ $f_t = 1.60\sqrt{f_c'} = 30$ กก./ซม.^{2}

ที่กลางช่วง $f_t = 3.20\sqrt{f_c'} = 60$ กก./ซม.^{2}

เหล็กเสริมอัดแรง: f_{pu} = 18 990 กก./ซม.^{2}

$f_{py} = 0.90f_{pu} = 0.9(18\,990) = 17\,091$กก./ซม.^{2}

$f_{pi} = 0.70f_{pu} = 0.7(18\,990) = 13\,293$ กก./ซม.^{2}

หลังจากการเสื่อมลด $f_{pe} = 0.80f_{pi} = 0.8(13\,293) = 10\,634.4$ กก./ซม.^{2}

(b) ข้อมูลของน้ำหนัก

น้ำหนักคาน w_D = 870 กก./ม. กก./ม.

น้ำหนักของแบบหล่อพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 ซม = 0.05(2.15)(2400) = 258 กก./ม.

น้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าหนา 10 ซม. = 0.10(2.15)(2400) = 516 กก./ม.

โจทย์กำหนดให้โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรรวมผลของการกระแทกตาม AASHTO HS20-44 ต่อคานตัวในหนึ่งตัวที่มีช่วงสะพานยาว 19.5 ม. = 107 000 กก.ม. ได้

$w_L = 107\,000(8)/19.5^2$ = 2250 กก./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c) คุณสมบัติของหน้าตัด

$n = E_c$ (ทับหน้า)/E_c (คานสำเร็จรูป) = 0.77

คานสำเร็จรูป h = 112.5 ซม., พื้นหล่อในที่ h_f = 15 ซม.

ความกว้างประสิทธิผลปรับแก้ของปีก b = 165 ซม.

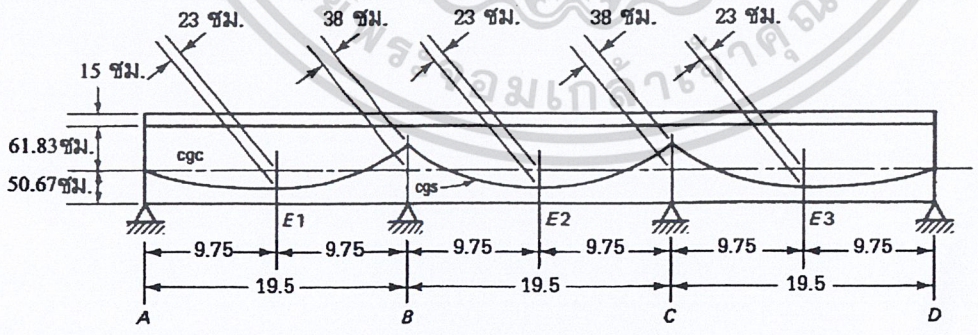
คุณสมบัติ	คานสำเร็จรูป	หน้าตัดเชิงประกอบ
A_c , ซม.^{2}	3613	6088
I_c , ซม.^{4}	5.2(10^6)	12.3(10^6)
r^2 , ซม.^{2}	1445	2021.44
c_b , ซม.	50.67	78.88
c_t , ซม.	61.83	48.62
S_b , ซม.^{3}	101 370	156 072
S^t , ซม.^{3}	83 082	365 854
S_{bcs} , ซม.^{3} (ที่ผิวล่างของพื้น)		317 912
S_{cs}^t , ซม.^{3} (ที่ผิวบนของพื้น)		252 619

(d) เหล็กเสริมอัดแรง

ใช้ลวดตีเกลียวแบบคลายหน่วยแรงต่ำ ชนิดลวด 7 เส้น เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.7 มม. จำนวน 22 เส้น

A_{ps} = 22(0.987) = 21.7 ซม.^{2}

2. สมมติแนวลวดอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 6.14



รูป 6.14 - แนวของเหล็กเสริมอัดแรง

$P_i = A_{ps} f_{pi}$ = 21.7(13 293) = 288 458 กก.

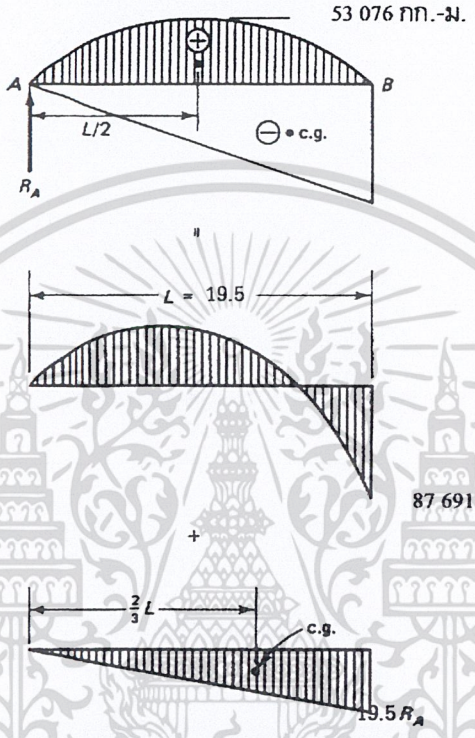
แรงอัดหลังจากการเสื่อมลด $P_e = 0.80P_i = 0.8(288\ 458)$ = 230 766 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์หลักที่ฐานรองรับ B $M_B = P_e \times e_b = 230\ 766(0.38) = 87\ 691$ กก.ม.

โมเมนต์หลักที่กลางช่วง E_1 $M_{E1} = 230\ 766(0.23) = 53\ 076$ กก.ม.

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จะสมมติให้เส้นสัมผัส elastic curve ที่จุด B มีทิศทางอยู่ในแนวนอน รวมโมเมนต์ของพื้นที่รอบจุด A ในรูปที่ 6.15 จะได้



รูป 6.15 - การหาระยะแอ่นตัว โดยวิธี moment-area ที่ฐานรองรับ A

$$E_c I_c \Delta_B = E_c I_c \Delta_c = \left[\left(\frac{87\ 691}{2} + 53\ 076\right) \times \frac{19.5(2)}{3}\right] \times \frac{19.5}{2} - \left[\frac{87\ 691(19.5)}{2}\right] \times \frac{19.5(2)}{3}$$

$$= 1\ 169\ 965.88 \text{ กก.ม.}^3$$

และ $$E_c I_c \Delta_B = (19.5R_A)\left(\frac{19.5}{2}\right)\left(\frac{19.5 \times 2}{3}\right) = 2471.625R_A \quad \text{กก.ม.}^3$$

$$R_A = R_D = 1\ 169\ 965.88/2471.625 = 473.36 \text{ กก.} \uparrow$$

ดังนั้นโมเมนต์รอง M_2 ที่ฐานรองรับ B เท่ากับ $19.5R_A = 19.5(473.36) = 9230.52$ กก.ม.

โมเมนต์ที่ฐานรองรับ B เนื่องจากแรงอัดเพียงอย่างเดียว

$M_3 = 87\ 691 + 9230.52 = 96\ 921.52$ กก.ม. (ดูรูปที่ 6.16 ประกอบ)

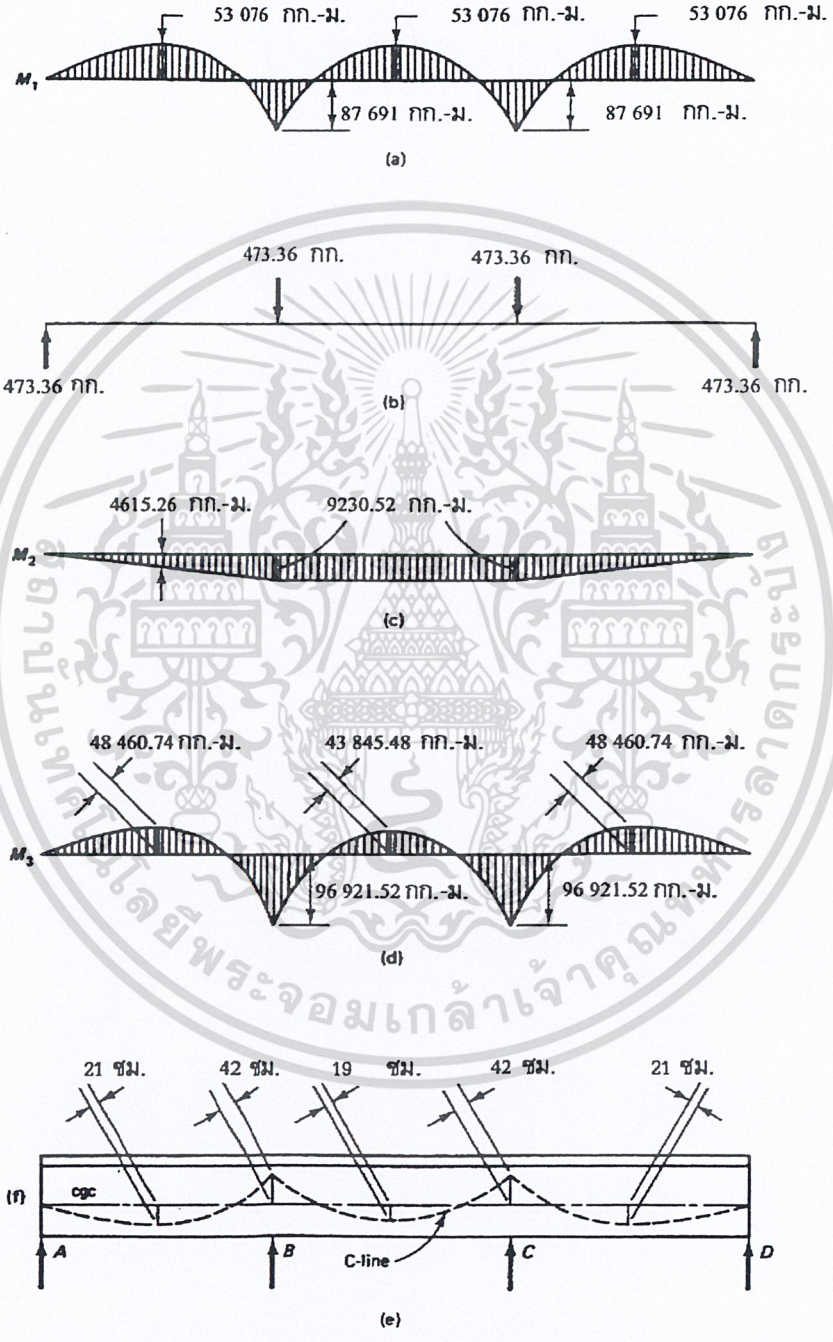
ระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด, $e_B' = -96\ 921.52(100)/230\ 766 = -42$ ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จะถือว่าระยะเยื้องศูนย์ e' ของแนวแรงอัด มีค่าเป็นลบเมื่ออยู่เหนือแกนสะเทิน เพื่อให้สอดคล้องกับ สม การที่ 6.3a และ b) และโมเมนต์ที่กลางช่วง E_1 E_2 และ E_3 เนื่องจากแรงอัดเพียงอย่างเดียว คือ

$M_3 = 53\ 076 - 4615.25 = 48\ 460.74$ กก.ม.

และระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด, $e_{E1}' = +\ 48\ 460.74(100)/230\ 766 = +\ 21$ ซม.



รูป 6.16 - แนว C-line ของเหล็กอัดแรงในคานต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน่วยแรงในคอนกรีต เนื่องจากการอัดแรง และน้ำหนักของคาน 870 กก./ม.

ใช้สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์และแรงลัพธ์ จากรูปที่ 6.12 จะได้

M_D ที่ B = M_{B1} = 0.1(870)(19.5)^2 = 33 082 กก.ม. (ดูรูปที่ 6.17)

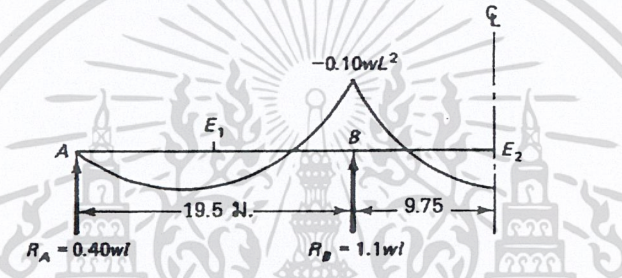
M_Dที่ E_1 = 26 465.4 กก.ม.

(ค่าโมเมนต์บวกสูงสุดไม่ได้เกิดที่กลางช่วง ดังนั้นต้องหา M_{E1} จากพื้นที่ของแผนภาพแรงเฉือน)

R_B = 1.1W↑ - 473.36 = 1.1(870)(19.5) – 473.36 = 18 188.14 กก.

โมเมนต์ที่ฐานรองรับ B เนื่องจากการอัดแรงและน้ำหนักของคาน

$M_4 = M_3 - 33082$ = 96 921.52 – 33 082 = 63 839.52 กก.ม.



รูป 6.17 - แผนภาพโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

(i) หน้าตัดที่ฐานรองรับ B หรือ C

การก่อสร้างในขั้นตอนนี้ จะประกอบด้วยการติดตั้งคานสำเร็จรูปและทำการอัดแรง หน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงและน้ำหนักของคาน จะหาได้จากสมการที่ 6.5a และ b ดังนี้

$$f_1^t = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_4}{S^t} = -\frac{230\,766}{3613} - \frac{63\,839.52(100)}{83\,082} = -63.87 - 76.84$$

= - 140.71 กก./ซม.^{2} (C) < 157.5 กก./ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_{1b} = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M_4}{S_b} = -\frac{230\,766}{3613} + \frac{63\,839.52(100)}{101\,370} = -63.87 + 62.98$$

= - 0.89 กก./ซม.^{2} (C) ไม่มีแรงดึง ใช้ได้

หรืออาจจะหาได้จาก สมการที่ 4.1a และ b หรือ สมการที่ 6.4a และ b โดยใช้ระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด e_B' = - 42 ซม. จะได้

$$f_1^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{e_e' c_t}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S^t} = -\frac{230\,766}{3613}\left(1 + \frac{42 \times 61.83}{1445}\right) + \frac{33\,082(100)}{83\,082}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= - 178.66 + 39.82 = - 138.84$ กก./ซม.^{2} (C)

$$f_{1b} = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{e_e' c_b}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S_b} = -\frac{230\,766}{3613}\left(1 - \frac{42 \times 50.67}{1445}\right) - \frac{33\,082(100)}{101\,370}$$

$= + 30.20 - 32.63 = - 2.43$ กก./ซม.^{2} (C)

(ii) กลางช่วงริม E_1

ระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วง $e_{E1}' = + 21$ ซม.

และโมเมนต์ทั้งหมด M_4 ที่ E1 = 48 460.74 – 26 465.4 = 21 995.34 กก.ม. ดังนั้น

$$f_1^t = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M_4}{S^t} = -\frac{230\,766}{3613} + \frac{21995.34(100)}{83\,082} = - 63.87 + 26.47 = - 37.40$$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

$$f_{1b} = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_4}{S^t} = -63.87 - \frac{21995.34(100)}{101\,370} = -85.57$$ กก./ซม.^{2} (C) ใช้ได้

โมเมนต์ ระยะเยื้องศูนย์ และแนวแรงอัด (C-line) ของคานต่อเนื่องในตัวอย่างนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.16

4. <u>ผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม บนหน้าตัดที่ฐานรองรับ B และ C</u>

ขั้นตอนต่อไปในการก่อสร้างได้แก่ การวางแบบหล่อพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 ซม บนคานและเทคอนกรีตทับหน้า 10 ซม. (w_{SD})

น้ำหนักของแบบหล่อพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 ซม $= 0.05(2.15)(2400) = 258$ กก./ม.

น้ำหนักของคอนกรีตทับหน้าหนา 10 ซม. $= 0.10(2.15)(2400) = 516$ กก./ม.

ดังนั้น $w_{SD} = 258 + 516 = 774$ กก./ม. โมเมนต์ที่ฐานรองรับเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม

$M_{B2} = 0.1 w \ell^2 = 0.1(774)(19.5)^2 = 29\,431$ กก.ม.

$M_5 = M_4 - 29\,431 = 63\,652.2 - 29\,431 = 34\,221$ กก.ม.

ดังนั้น

$$f_2^t = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_5}{S^t} = -63.87 - \frac{34\,408.52(100)}{83\,082} = -105.29$$ กก./ซม.^{2} (C)

$$f_{2b} = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M_5}{S_b} = -63.87 + \frac{34\,408.52(100)}{101\,370} = -29.93$$ กก./ซม.^{2} (C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลของน้ำหนักบรรทุกจร บนหน้าตัดที่ฐานรองรับ B และ C

หลังจากคอนกรีตในแผ่นพื้นแข็งตัว มีพฤติกรรมเชิงประกอบเต็มที่ร่วมกับคาน ร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกจร w_L = 2250 กก./ม. โมดูลัสหน้าตัดของคานสำเร็จรูปจะกลายเป็น S^{ct} = 365 854, ซม.^{3} และ S_{cb} = 156 072 ซม.^{3} การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดที่ฐานรองรับภายใน จะได้จากการวางน้ำหนักบรรทุกบนสองช่วงรอบฐานรองรับนั้น จากรูปที่ 6.12(a) จะได้

$$M_{B3} = -0.1167 w_L \ell^2 = 0.1167(2250)(19.5)^2 = -99\,844.14 \quad \text{กก.ม.}$$

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวบนและแรงอัดที่ผิวล่างของหน้าตัดที่ฐานรองรับ หน่วยแรงทั้งหมดในหน้าตัดสำเร็จรูป ที่ฐานรองรับเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด จะได้เป็น

$$f_T^t = f_2^t + \frac{M_{B3}}{S_c^t} = -105.29 + \frac{99\,844.14(100)}{365\,854} = -78.00 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)} < 157.5 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ ใช้ได้}$$

$$f_{bT} = f_{2b} - \frac{M_{B3}}{S_{cb}} = -29.93 - \frac{99\,844.14(100)}{156\,072} = -93.90 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)} < 157.5 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ ใช้ได้}$$

หรืออาจเลือกใช้ใช้สมการที่ 4.19a และ b

$$f_T^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t} - \frac{M_{CSD} + M_L}{S_c^t}$$

$$f_{bT} = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_b} + \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{cb}}$$

โดยที่ $e = e_B' = M_3/P_e$ และ M_{CSD} เป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมหลังจากการติดตั้งคานแล้ว ในกรณีจะถือว่าเป็นศูนย์

จากขั้นตอนที่ 2 ระยะเยื้องศูนย์ของแนวแรงอัด e_B' = - 96 921.52(100)/230 766 = - 42 ซม.

และโมเมนต์ที่ฐานรองรับ:

M_D = - 33 082 กก.ม. (ขั้นตอนที่ 3), M_{SD} = - 29 431 กก.ม. (ขั้นตอนที่ 4) และ M_L = - 99 844.14 กก.ม.

ดังนั้น ที่ขอบบนและล่างของคานสำเร็จรูป

$$f_T^t = -\frac{230\,766}{3613}\left[1 - \frac{(-42)(61.83)}{1445}\right] + \frac{(33\,082 + 29\,431)(100)}{83\,082} + \frac{99\,844.14(100)}{365\,854}$$

$$= -178.66 + 75.24 + 27.29 = -79.13 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)}$$

$$f_{bT} = -\frac{231521.4}{3612.9}\left[1 + \frac{(-41.8)(51.5)}{1444.51}\right] - \frac{(33005.7 + 27530.1)(100)}{101370.38} - \frac{99844.14(100)}{155513.24}$$

$$= +30.20 - 61.67 - 63.97 = -95.44 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C)} < 157.5 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงที่ขอบบนและล่างของพื้นหล่อในที่ หนา 10 ซม.

จากสมการที่ 4.20a และ b จะหาหน่วยแรงสูงสุดที่ขอบบนและล่างของพื้นหล่อในที่ ได้โดยใช้โมดูลัสหน้าตัด S'_{CS} และ S_{bCS} จะได้

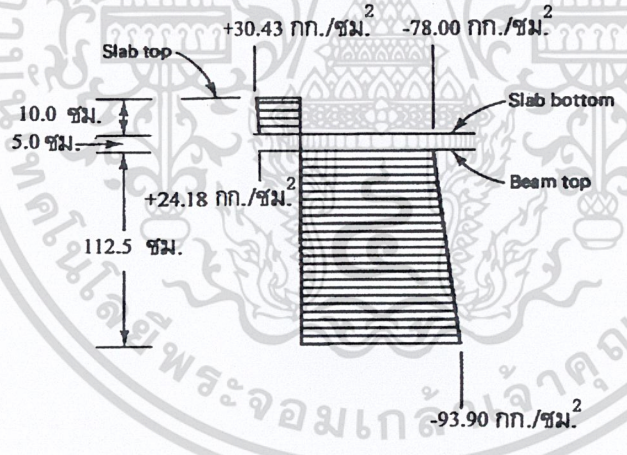
$$f'_{CS} = +n\frac{M_L}{S'_{CS}} = 0.77(\frac{99\,844.14\times100}{252\,619}) = +30.43 \text{ กก./ซม.}^2\text{ (T)} < 60 \text{ กก./ซม.}^2 \qquad \text{ใช้ได้}$$

และ $$f_{bCS} = +n\frac{M_L}{S_{bCS}} = 0.77(\frac{99\,844.14\times100}{317\,912}) = +24.18 \text{ กก./ซม.}^2\text{ (T)}$$

รวมหน่วยแรงดึงที่ขอบล่างของพื้น และหน่วยแรงอัด – 78.00 กก./ซม.^{2} ที่ขอบบนของคานสำเร็จรูป จะได้หน่วยแรงอัดสุทธิที่ขอบล่างของพื้น = - 78.00 + 24.18 = - 53.82 กก./ซม.^{2}

รูปที่ 6.18 แสดงการกระจายหน่วยแรงรวมทั้งหมดบนหน้าตัด

จะสังเกตได้ว่า หน่วยแรงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานต่ำกว่าหน่วยแรงสูงสุดที่ยอมให้ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เพราะหน้าตัดที่ใช้ได้ถูกเลือกมาจากตัวอย่างที่ 4.7 ซึ่งเป็นคานช่วงเดี่ยว เมื่อนำมาเป็นคานต่อเนื่องและรับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากัน หน้าตัดน่าจะเล็กลงหรือน่าจะรับน้ำหนักบรรทุกจรได้มากขึ้น ผลเหล่านี้จะนำไปใช้ในตัวอย่างต่อไป



รูป 6.18 - การกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตภายใต้สภาวะใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ขอบเขตของสภาวะวิบัติ

(a) ข้อจำกัดสำหรับการกระจายโมเมนต์ซ้ำ

จากสมการที่ 6.6 และ 6.7 เปอร์เซ็นต์ของการกระจายโมเมนต์ซ้ำสูงสุดที่ยอมให้

$$p_d = 20\left[1 - \frac{\omega_p + d/d_p\left(\omega - \omega'\right)}{0.36\beta_1}\right]$$

โดยที่ $\omega_p + \frac{d}{d_p}\left(\omega - \omega'\right) \le 0.24\beta_1$

และ h = 112.5 + 15 = 127.5 ซม.

d = h - คอนกรีตหุ้ม – ขนาดเหล็กปลอก – รัศมีเหล็กเสริม = 127.5 – 4 – 1.2 – 1.2/2 = 121.7 ซม.

d_p เหนือฐานรองรับภายใน = $c_b + e_B$ = 50.67 + 38 = 88.67 ซม. วัดจากขอบล่าง

เนื่องจากความกว้างของปีกล่างแรงอัด เหนือฐานรองรับ b = 55 ซม. เลือกเหล็กเสริมขนาด 12 มม. จำนวน 2 เส้น รับแรงอัด และจำนวน 4 เส้น รับแรงดึง จะได้

$$\omega' = \frac{A_s' f_y}{b d f_c'} = \frac{2(1.13)}{55(121.7)} \cdot \frac{4000}{350} = 0.0039 \text{ , } \omega = 0.0077$$

$$\omega_p = \frac{A_{ps} f_{ps}}{b d_p f_c'} = \frac{21.7(17350.72)}{55(88.67)(350)} = 0.221$$

$\beta_1 = 0.80$ สำหรับ f_c' = 350 กก./ซม.^{2}

$$\frac{d}{d_p}\left(\omega - \omega'\right) = \frac{121.7}{88.67}(0.0039) = 0.0054 \text{ , } \quad \omega_p + \frac{d}{d_p}\left(\omega - \omega'\right) = 0.221 + 0.0054 = 0.2264$$

$0.24\ \beta_1 = 0.24(0.80) = 0.19 < 0.2264$ ที่ฐานรองรับ

ดังนั้น ไม่อนุญาตให้กระจายโมเมนต์ซ้ำจากฐานรองรับไปยังกลางช่วง หรือให้ $\rho_D = 0$ สำหรับค่าที่สูงสุดที่ยอมให้ $\omega_T = 0.36\ \beta_1 = 0.36(0.80) = 0.288 > 0.2204$ ใช้ได้

(b) การปรับค่าโมเมนต์

ถ้าจะมีการปรับค่าโมเมนต์ ควรจะแยกทำระหว่างโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และเนื่องจากน้ำหนักจร เพราะโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจร มักจะมาจากการจัดน้ำหนักกระทำในรูปแบบที่ทำให้ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด ในระหว่างที่น้ำหนักบรรทุกคงที่จะกระทำพร้อมกันทุกช่วง แต่เนื่องจากจะไม่มีการกระจายโมเมนต์ซ้ำในตัวอย่างนี้ ดังนั้นโมเมนต์ที่ฐานรองรับ,

$M_D + M_{SD}$ = 33 082 + 29 431 = 62 513 กก.ม. และ M_L = 99 844.14 กก.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c) กำลังโมเมนต์ระบุ

โมเมนต์ที่ฐานรองรับ $M_u = 1.4(62\ 513) + 1.7(99\ 844.14) = 257\ 253.24$ กก.ม.

จากขั้นตอนที่ 2 โมเมนต์รองเนื่องจากแรงลัพธ์ซึ่งเป็นผลมาจากการอัดแรง จะคูณด้วยตัวคูณเพิ่ม = 1.0 ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.7 ดังนั้น $M_{2u} = 9230.52$ กก.ม.

จะได้โมเมนต์รวม $M_u = 257\ 253.24 - 9230.52 = 248\ 497$ กก.ม.

ถ้าให้ A_s' คราก จะได้ $f_s' = f_y = 4000$ กก./ซม.^{2} ความกว้าง b ที่ด้านล่างรับแรงอัด = 55 ซม. ดังนั้น

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y}{0.85 f_c' b} = \frac{21.7(17\ 350.72) + 2(1.13)(4000)}{0.85(350)(55)} = 23.56 \text{ ซม.}$$

ความลึกของปีกจนถึงแกนคานซึ่งกว้าง 17.5 ซม. ที่ฐานรองรับ

$$= 17.5 + 18.75/2 = 26.875 \text{ ซม.} > 23.56 \text{ ซม.}$$

แสดงว่าแกนสะเทินอยู่ภายในปีก และหน้าตัดจะมีพฤติกรรมเหมือนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากสมการที่ 4.44

$$M_n = A_{ps} f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_y\left(\frac{a}{2} - d'\right)$$

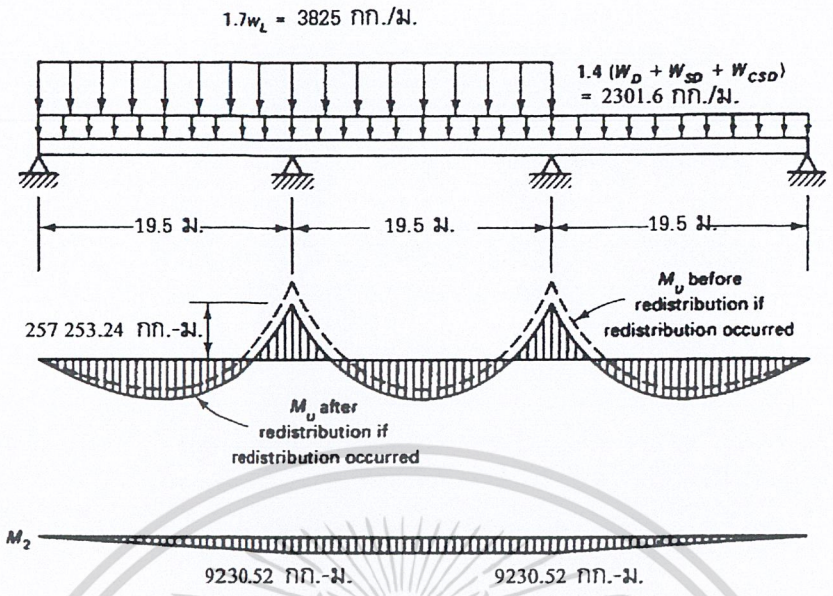
$$= 21.7(17\ 350.72)\left(88.67 - \frac{23.56}{2}\right) + 4.52(4000)\left(121.7 - \frac{23.56}{2}\right) + 2.26(4000)\left(\frac{23.56}{2} - 5.8\right)$$

$$= 289\ 499 + 19\ 873.54 + 540.59 = 309\ 913.13 \text{ กก.ม.}$$

$\phi M_n = 0.9(309\ 913) = 278\ 922$ กก.ม. $> M_u = 248\ 023$ กก.ม.

ดังนั้น จะเห็นว่าหน้าตัดรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย แต่ไม่มีประสิทธิภาพทั้งภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานและน้ำหนักประลัย ควรจะลดขนาดของหน้าตัดลงได้อีก หรือเปลี่ยนแนวเหล็กเสริม หรืออาจจะยอมให้ความยาวช่วงเพิ่มขึ้น หรือแม้กระทั่งยอมให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจร รูปที่ 6.19 แสดงน้ำหนักบรรทุกและแผนภาพโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.19 - น้ำหนักบรรทุกและแผนภาพโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 6.5</u> - การปรับแนวเหล็กเสริมอัดแรงเพื่อใช้ประโยชน์ของความต่อเนื่อง

ปรับแนวเหล็กเสริมอัดแรงแบบเชิงเส้น ในคานอัดแรงแบบต่อเนื่องในตัวอย่างที่ 6.4 เพื่อที่จะรับน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 50

1. <u>การปรับแนวเหล็กเสริมอัดแรง</u>

ระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ฐานรองรับ B ในตัวอย่างที่ 6.4 ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดบนคานสำเร็จรูป เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดเท่ากับ 78.00 กก./ซม.^{2} ที่ขอบบน และ 93.90 กก./ซม.^{2} ที่ขอบล่าง หน่วยแรงเหล่านี้มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ยอมให้ f_c = 157.5 กก./ซม.^{2} ดังนั้นจะเห็นว่าคานยังพอจะรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มได้อีก เพื่อที่จะให้คานรับน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มขึ้นอีก จะต้องเพิ่มระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรง เพื่อจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดเนื่องจากการอัดแรงเพิ่มขึ้นที่ขอบล่างของคานที่กลางช่วงคาน

สมมติให้แนวเหล็กเสริมอัดแรงเปลี่ยนเป็นแบบเชิงเส้นตลอดความยาวของช่วง โดยให้ $e_B = e_C$ = 28 ซม. ตามที่แสดงในรูปที่ 6.20 ทำให้เกิดการเปลี่ยนในแนวตั้ง = 38 – 28 = 10 ซม.

ทำให้ได้ระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วง e_{E1} = 23 + 10 = 33 ซม.

และได้โมเมนต์หลักที่ฐานรองรับ B: M_1 = 230 766(0.28) = 64 614.48 กก.ม.

และได้โมเมนต์หลักที่กลางช่วง E_1: M_1 = 230 766(0.33) = 76 152.78 กก.ม. และจะได้

$$E_c I_c \Delta_B = \left[\left(\frac{64\,614.48}{2} + 76152.78\right) \times \frac{19.5(2)}{3}\right] \times \frac{19.5}{2} - \left[\frac{64\,614.48(19.5)}{2}\right] \times \frac{19.5(2)}{3}$$

$$= 5\,557\,422.20 \text{ กก.ม.}^3$$

$$E_c I_c \Delta_c = \left[19.5 R_A \left(\frac{19.5}{2}\right)\right] \frac{19.5(2)}{3} = 2471.625 R_A \text{ กก.ม.}^3$$

$R_A = R_B$ = 5 557 422.20/2471.625 = 2248.48 กก.

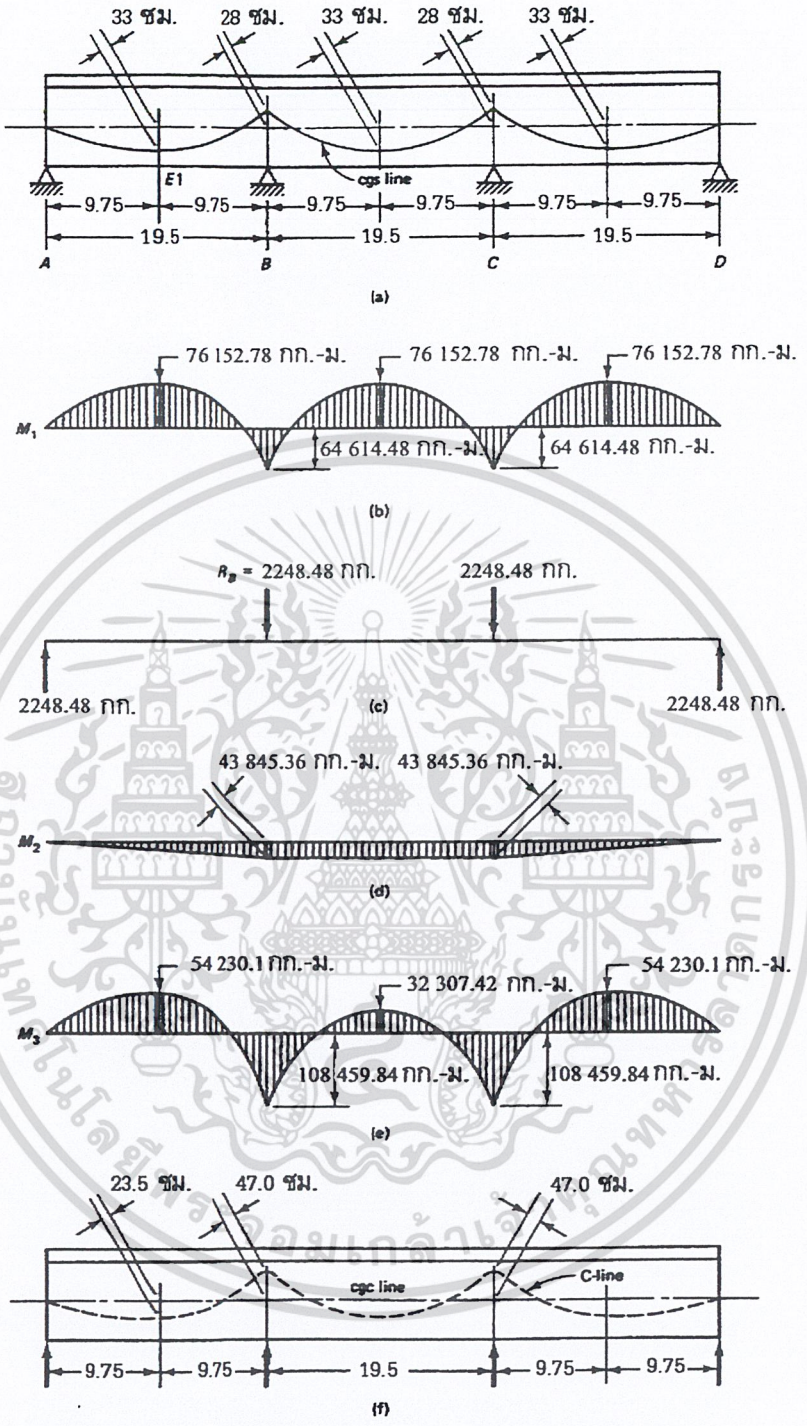
$M_2 = 19.5 R_A$ = 2248.48(19.5) = 43 845.36 กก.ม.

ที่ฐานรองรับ: M_3 = 64 614.48 + 43 845.36 = 108 459.84 กก.ม. (ดูรูปที่ 6.20)

ที่กลางช่วง: M_3 = 76 152.78 – (43 845.36)/2 = 54 230.1 กก.ม.

จากตัวอย่างที่ 6.4 P_e = 230 766 กก. ดังนั้นหาระยะเยื้องศูนย์สุดท้ายของแนวแรงอัด = M_3/ P_e ตามที่แสดงในรูปที่ 6.20 (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.20 - การเปลี่ยนแนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานต่อเนื่องของตัวอย่างที่ 6.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หน่วยแรงในคอนกรีต เนื่องจากการอัดแรง และน้ำหนักของคาน 870 กก./ม.

จากขั้นตอนที่ 3 ในตัวอย่างที่ 6.4 โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคาน = 33 082 กก.ม.

ดังนั้น โมเมนต์สุทธิ: $M_4 = M_3 - 33\,082 = 108\,459.84 - 33\,082 = 75\,377.84$ กก.ม.

(i) หน้าตัดที่ฐานรองรับ B หรือ C

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_4}{S^t} = -\frac{230\,766}{3613} - \frac{75\,377.84(100)}{83\,082} = -63.87 - 90.73$$

$= -154.60$ กก./ซม.^{2} (C) < 157.5 กก./ซม.^{2} ใช้ได้

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{M_4}{S^t} = -\frac{230\,766}{3613} - \frac{75\,377.84(100)}{83\,082} = -63.87 - 90.73$$

$= +10.49$ กก./ซม.^{2} (T) ใช้ได้

(ii) หน้าตัดกลางช่วงนอก E_1

จากขั้นตอนที่ 3 ในตัวอย่างที่ 6.4: $M_D = 26\,465.4$ กก.ม.

ดังนั้นโมเมนต์สุทธิ: $M_4 = M_3 - 26\,465.4 = 54\,230.1 - 26\,465.4 = 27\,764.7$ กก.ม.

$$f^t = -63.87 + \frac{27\,764.7(100)}{83\,082} = -30.45 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C) ใช้ได้}$$

$$f_b = -63.87 - \frac{27\,764.7(100)}{101370} = -91.26 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (C) ไม่มีแรงดึง ใช้ได้}$$

3. หาน้ำหนักบรรทุกจรที่รับได้ โดยใช้แนวเหล็กเสริมอัดแรงที่เลือกใหม่ ก่อสร้างแบบไม่มีค้ำยัน

$$f_T^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{e_B' c_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t} - \frac{M_{CSD} + M_L}{S_c^t}$$

$$f_{bT} = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{e_B' c_b}{r^2}\right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_b} + \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{cb}}$$

(i) หน้าตัดที่ฐานรองรับ B หรือ C

จากรูป 6.20(e) ได้ $M_3 = -108\,459.84$ กก.ม. ดังนั้น

$e'_B = -108\,459.84/230\,766 = -47$ ซม.

จากตัวอย่างที่ 6.4: $M_D + M_{SD} = -(33\,082 + 29\,431) = -62\,513$ กก.ม.

และจากรูปที่ 6.12 โมเมนต์บนคานสามช่วง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรกระทำเพียงสองช่วงติดกัน ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$M_L = -0.1167 w_L \ell^2 = -0.1167 w_L (19.5)^2 = -44.38 w_L$

หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ = + 60 กก./ซม.^{2} ที่กึ่งกลางช่วง และ = + 30 กก./ซม.^{2} ที่ฐานรองรับ

$$f_T' = +30 = -\frac{230\,766}{3613}\left[1 - \frac{(-47)(61.83)}{1445}\right] + \frac{62\,513(100)}{83\,082} + \frac{44.38 w_L (100)}{365\,854}$$

ได้ w_L = 12 125 กก./ม.

(ii) หน้าตัดกลางช่วง E_1

จากขั้นตอนที่ 3 ในตัวอย่างที่ 4 สำหรับ w_D = 870 กก./ม. ได้โมเมนต์กลางช่วง M_D = 26 465.4 กก.ม.

ดังนั้น สำหรับ w_{SD} = 774 กก./ม. (จากขั้นตอนที่ 4 ในตัวอย่างที่ 4) จะได้โมเมนต์กลางช่วง

$M_{SD} = 26\,465.4(774/870) = 23\,545.08$ กก.ม.

$M_D + M_{SD} = 26\,465.4 + 23\,545.08 = 50\,010.48$ กก.ม.

และในทำนองเดียวกัน จะได้ $M_L = 26\,465.4\,(w_L/870) = 30.42 w_L$ กก.ม.

$$f_T' = -157.5 = -\frac{230\,766}{3613}\left[1 - \frac{23.5(61.83)}{1445}\right] - \frac{50\,010.48(100)}{83\,082} - \frac{30.42 w_L (100)}{365\,854}$$

$$\frac{30.42 w_L (100)}{365\,854} = 0.35 - 60.19 + 157.5$$

ได้ w_L = 11 745.33 กก./ม.

$$f_{bT} = +60 = -\frac{230\,766}{3613}\left[1 + \frac{23.5(50.67)}{1445}\right] + \frac{50\,010.48(100)}{101\,370} + \frac{30.42 w_L (100)}{156\,072}$$

$$\frac{30.42 w_L (100)}{156\,072} = 60 + 116.5 - 49.33$$

ได้ w_L = 6524.55 กก./ม.

ดังนั้นจะใช้ w_L = 6524.55 กก./ม. เป็นน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน แต่จะต้องตรวจสอบต่อไปด้วยวิธีกำลัง

4. กำลังโมเมนต์ระบุ

$A_{ps} = 22(0.987) = 21.7$ ซม.^{2}

d_p เหนือฐานรองรับภายใน = $c_b + e_B = 50.67 + 28 = 78.67$ ซม. วัดจากขอบล่าง

สมมติให้เปลี่ยนเหล็กเสริมที่ฐานรองรับ B และ C เป็นขนาด 25 มม. จำนวน 4 เส้น เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกจรที่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้น $A_s = 4(4.91) = 19.64$ ซม.^{2} และใช้เหล็กเสริมรับแรงอัดเป็น 2-DB25 ที่ด้านล่างของคาน จะได้

$$\omega = \frac{19.64}{55(121.7)} \cdot \frac{4000}{350} = 0.0335, \quad \omega' = \frac{9.82}{55(121.7)} \cdot \frac{4000}{350} = 0.0168$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_p เหนือฐานรองรับภายใน = $c_b + e_B$ = 50.67 + 28 = 78.67 ซม. วัดจากขอบล่าง

$$\omega_p = \frac{A_{ps} f_{ps}}{b d_p f_c'} = \frac{21.7(17\,350.72)}{55(78.67)(350)} = 0.249$$

$$\omega_p + \frac{d}{d_p}\left(\omega - \omega'\right) = 0.249 + \frac{121.7}{78.67}(0.0335 - 0.0168) = 0.275 > 0.24\beta_1 = 0.19$$

ดังนั้น ไม่อนุญาตให้กระจายโมเมนต์ซ้ำจากฐานรองรับไปยังกลางช่วง

จากขั้นตอนที่ 1: M_2 = 43 845.36 กก.ม.

และจากขั้นตอนที่ 6(b) ในตัวอย่างที่ 6.4: $M_D + M_{SD}$ = 62 513 กก.ม. จะได้

$M_u = 1.4(M_D + M_{SD}) + 1.7M_L - M_2 = 1.4(62\,513) + 1.7M_L - 43\,845.36 = 43\,672.84 + 1.7M_L$

ถ้าให้ A_s' คราก จะได้ $f_s' = f_y$ = 4000 กก./ซม.^{2} ดังนั้น

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y}{0.85 f_c' b} = \frac{21.7(17\,350.72) + (19.64 - 9.82)(4000)}{0.85(350)(55)} = 25.41 \quad \text{ซม.}$$

ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของความลึกของปีก 26.875 ซม. ดังนั้นแกนสะเทินอยู่ภายในปีก และหน้าตัดจะมีพฤติกรรมเหมือนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจะได้

$$M_n = A_{ps} f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' f_y\left(\frac{a}{2} - d'\right)$$

$$= 21.7(17\,350.72)\left(78.67 - \frac{25.41}{2}\right) + 19.64(4000)\left(121.7 - \frac{25.41}{2}\right) + 9.82(4000)\left(\frac{25.41}{2} - 6.45\right)$$

= 248 365.23 + 85 626.47 + 2456.96 = 336 448.66 กก.ม.

$\phi M_n = 0.9(336\,448.66) = 302\,803.79 = M_u = 43\,672.84 + 1.7M_L$ กก.ม.

ได้ $M_L = (302\,803.79 - 43\,672.84)/1.7 = 152\,429.97$ กก.ม.

ถ้า $M_L = 0.1167 w_L \ell^2 = 0.1167 w_L (19.5)^2$ ดังนั้น

$0.1167 w_L (19.5)^2 = 152\,429.97$

ได้ w_L = 3435.03 กก./ม. < 6524.55 กก./ม. จากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน

ดังนั้นใช้ w_L = 3435 กก./ม. คิดเป็นร้อยละเพิ่มจากน้ำหนักบรรทุกจรเดิม

= 100(3435 – 2250)/2250 = 53.67 ≈ 50% ใช้ได้

ดังนั้น ใช้แนวเหล็กเสริมอัดแรงตามรูปแบบใหม่ และเสริมเหล็กธรรมดาขนาด 25 มม. จำนวน 4 เส้นในแผ่นพื้นหล่อในที่เหนือฐานรองรับ และเสริมเหล็กธรรมดาขนาด 25 มม. จำนวน 2 เส้นที่ด้านล่างของคานสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 6.6 - การออกแบบคานต่อเนื่องโดยใช้เหล็กเสริมธรรมดาที่ฐานรองรับ

ออกแบบคานในตัวอย่างที่ 6.5 โดยใช้หน้าตัดและแนวเหล็กเสริมอัดแรงของคานสะพาน AASHTO ชนิด III ตามที่ใช้ในตัวอย่างที่ 4.7 ทำให้เป็นคานต่อเนื่องโดยใช้เหล็กเสริมธรรมดา เพื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม w_{SD} = 750 กก./ม. และน้ำหนักบรรทุกจร w_L = 3400 กก./ม. ใช้แนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานช่วงเดี่ยวเหมือนในตัวอย่างที่ 4.7 โดยมีระยะเยื้องศูนย์ที่กลางช่วง e_c = 41.3 ซม. และระยะเยื้องศูนย์ที่ปลายช่วง e_e = 25.0 ซม. วาดรายละเอียดของแนวเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมธรรมดา ถ้าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่ยอมให้ในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน f_c = 157.5 กก./ซม.^{2}

---

1. ข้อมูลสำหรับการออกแบบโดยวิธีกำลังที่ฐานรองรับ

เพราะว่าความต่อเนื่องในกรณีนี้จะได้มาจากการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กที่บริเวณฐานรองรับ ดังนั้นจะใช้คอนกรีตทับหน้าซึ่งมี f_c' = 350 กก./ซม.^{2} ด้วย ดังนั้นจะใช้

f_c' = 350 กก./ซม.^{2} และใช้คอนกรีตน้ำหนักปกติ

f_y = 4000 กก./ซม.^{2}

จะออกแบบความต่อเนื่องให้รับเพียงน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจร โดยไม่รวมน้ำหนักของคาน

d = 127.5 – (ความหนาคอนกรีตหุ้ม 4 ซม. + เหล็กปลอก 1.2 ซม. + รัศมีเหล็กเสริมหลัก 2.5/2 ซม.)

= 121.05 ซม.

ที่ขอบล่าง: b_b = 55 ซม., ที่ขอบบน b_t = 215 ซม. (ความกว้างประสิทธิผล b_m = 165 ซม.)

2. กำลังโมเมนต์ระบุ

จากตัวอย่างที่ 6.5 กำลังรับโมเมนต์ที่ต้องการ เนื่องจาก w_{SD} + w_L ที่ฐานรองรับ B คือ

M_n = 1.4(29 431) + 1.7(152 430) = 300 334 กก.ม.

เหล็กเสริมอัดแรงจะไม่มีการยึดเหนี่ยวที่ฐานรองรับ ดังนั้นใช้ ω_p = 0 ในการหาสัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนต์ซ้ำ

สมมติ A_s = 58.92 ซม.^{2} (12-DB25) และ A_s' = 2.26 ซม.^{2} (2-DB12)

$$\omega = \frac{58.92}{55(121.05)} \cdot \frac{4000}{350} = 0.1011$$

และ $$\omega' = \frac{2.26}{55(121.05)} \cdot \frac{4000}{350} = 0.0039$$

จากตัวอย่างที่ 6.4: d_p = 88.67 ซม., d = 121.05 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_p + \frac{d}{d_p}\left(\omega - \omega'\right) = 0 + \frac{121.05}{88.67}(0.1011 - 0.0039) = 0.1327$$

และ $0.24\beta_1 = 0.19 > 0.1332$ ดังนั้นยอมให้มีการกระจายโมเมนต์ซ้ำ และร้อยละของการกระจายโมเมนต์ซ้ำคือ

$$p_d = 20\left[1 - \frac{\omega_p + d/d_p\left(\omega - \omega'\right)}{0.36\beta_1}\right] = 20\left[1 - \frac{0.1327}{0.36(0.80)}\right] = 10.78\ \%$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การกระจายซ้ำ = 0.10 :

$M_n = (1 - 0.10)(304\ 871.53) = 271\ 684.38 = A_s f_y(\ d - a/2)$ กก.ม.

ลองครั้งแรกให้ $d - a/2 = 0.9d$ ดังนั้น

$$270\,300.92 = A_s(4000)(0.9)(121.05)$$

$$A_s = \frac{270\,300.92(100)}{4000(0.9)(121.05)} = 62.03 \text{ ซม.}^2$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} = \frac{62.03(4000)}{0.85(350)(55)} = 15.16 \text{ ซม.}$$

ความลึกเฉลี่ยของปีกคาน = 15 + 17.5 + (11.25/2)

สำหรับ AASHTO type-III = 38.13 ซม. > 15.16/0.9 = 16.84 ซม. ดังนั้นแกนสะเทินอยู่ภายในปีก และหน้าตัดจะมีพฤติกรรมเหมือน หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้

$$A_s = \frac{M_n}{f_y\left(d - \frac{a}{2}\right)} = \frac{270\,300.92(100)}{4000\left(121.05 - \frac{15.16}{2}\right)} = 59.55 \text{ ซม.}^2$$

เนื่องจาก สมมติให้ A_s = 58.92 ซม.^{2} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 59.55 ซม.^{2} ดังนั้นสัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนต์ซ้ำจึงมีค่าพอเพียง

จะต้องกระจายเหล็กเสริมนี้ไปทั่วความกว้างทั้งหมดของปีก 215 ซม.

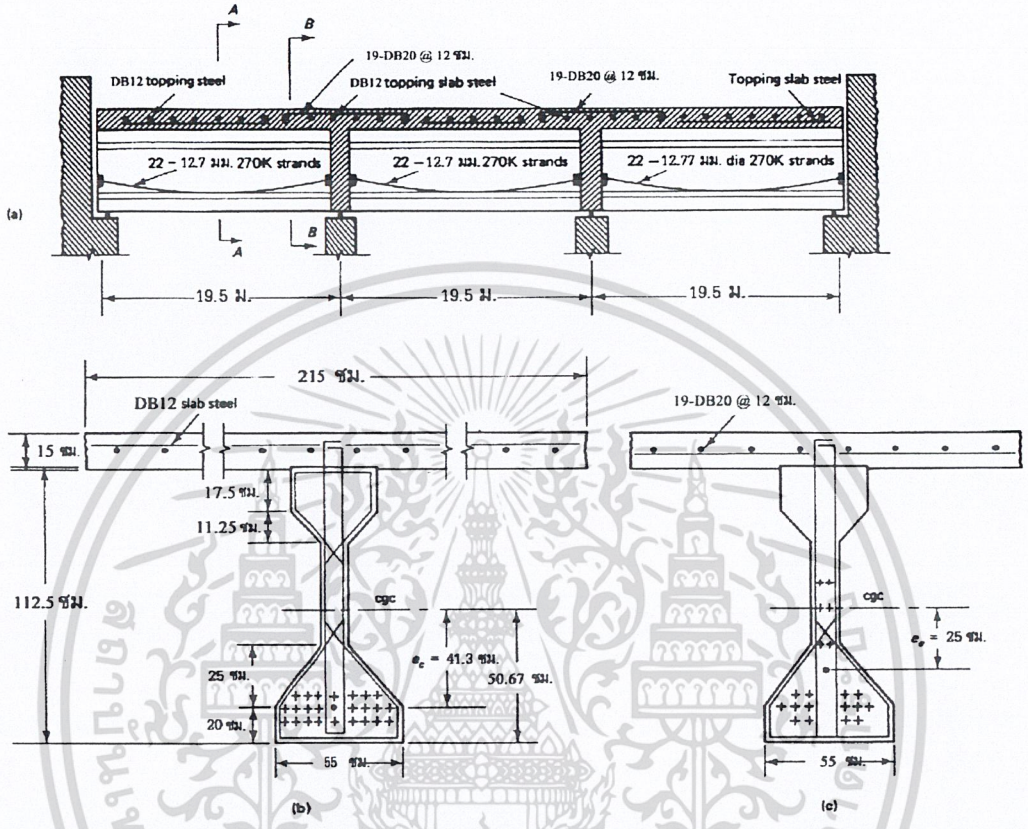
ถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด 20 มม. A_s ต่อเส้น = 3.14 ซม.^{2} จะต้องใช้จำนวน 59.55/3.14 = 19 เส้น (A_s = 19x3.14 = 59.66 ซม.^{2}) ได้ระยะเรียงเป็น 215/(19 – 1) = 11.94 ≈12 ซม.

การออกแบบที่สมบูรณ์ จะต้องรวมการออกแบบเหล็กเดือยเพื่อรับพฤติกรรมเชิงประกอบ เหล็กลูกตั้งเพื่อรับแรงเฉือนในแกนคาน เหล็กเสริมบริเวณสมอยึด รวมไปถึงต้องตรวจสอบข้อกำหนดในด้านการงานอันได้แก่ การแอ่นตัวและการควบคุมรอยแตกร้าว ในตัวอย่างนี้ จะเห็นว่า เมื่อมีความต่อเนื่องสามช่วง และเมื่อใช้เหล็กเสริมธรรมดาเพียงที่บริเวณเหนือฐานรองรับ จะทำให้คานรับน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มได้อีกร้อยละ 50 จาก 2250 กก./ม. เป็น 3490.68 กก./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รายละเอียดของคาน

รูปที่ 6.21 แสดงการเสริมเหล็ก และรายละเอียดของแนวเหล็กอัดแรงของคานต่อเนื่อง



รูป 6.21 - รายละเอียดของคานต่อเนื่อง (a) รูปด้าน (b) หน้าตัดที่กึ่งกลางคาน A-A (c) หน้าตัดที่ฐานรองรับ B-B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7

การยกตัวและการแอ่นตัว

7.1 คำนำ

ในสภาวะใช้งานองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง การแอ่นตัวและพฤติกรรมของการแตกร้าวมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยเหตุที่องค์อาคารคอนกรีตอัดแรงมักจะบางกว่าองค์คอนกรีตเสริมเหล็ก การควบคุมการแตกร้าวและการแอ่นตัวจึงเป็นสิ่งที่วิกฤตยิ่งกว่าในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนสำคัญของการออกแบบ ได้แก่ การเลือกขนาดขององค์อาคารให้ผ่านข้อกำหนดของหน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน และให้สามารถรับแรงดัด แรงเฉือน แรงบิด ที่ขอบเขตของสภาวะวิบัติ รวมไปถึงกำลังต้านหน่วยแรงบริเวณสมอยึด การออกแบบดังกล่าวจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อการแอ่นตัวในระยะยาว การยกตัว และความกว้างรอยแตกร้าว ขององค์อาคารที่เลือกมาอยู่ภายใต้พิกัดที่ยอมให้ได้

การอัดแรงจะทำให้องค์อาคารอยู่ภายใต้แรงอัดซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ตลอดเวลา แรงอัดต่อเนื่องนี้มีผลอย่างมากต่อการคืบในระยะยาว ถ้าไม่สามารถควบคุมผลของการคืบที่มีต่อการแอ่นตัวได้ อาจจะส่งผลให้เกิดการยกตัวขององค์อาคาร เกิดผลเสียต่อการระบายน้ำบนหลังคา ความไม่สะดวกสบายในการสัญจรบนสะพาน เกิดการไหลไม่สะดวกในทางระบายน้ำ และเกิดการแตกร้าวขึ้นในผนังของอาคาร รวมไปถึงการเสียศูนย์ของประตูและหน้าต่าง

ความยุ่งยากในการหาการเสื่อมลดในระยะยาวของการอัดแรง ส่งผลให้การหาระยะยกตัวที่แน่นอนเป็นสิ่งที่ลำบาก และยิ่งลำบากมากขึ้นในระบบอัดแรงบางส่วน ซึ่งยอมให้เกิดการแตกร้าวได้บ้างและใช้เหล็กเสริมธรรมดาเป็นตัวควบคุม หน่วยการคืบในคอนกรีตทำให้ระยะยกตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คานโก่งตัวขึ้น ซึ่งถึงแม้ว่าระยะยกตัวจะลดลงหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรงเนื่องจากการคืบ การหดตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้น และการคลายหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง แต่การลดระยะยกตัวเนื่องจากการเสื่อมลดของแรงอัด ก็ยังมีน้อยกว่าผลของหน่วยการคืบ การหาค่าการยกตัวได้ใกล้เคียงกับของจริงจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ การจำกัดอัตราส่วนระยะช่วงคานต่อความลึกคาน และการเลือกโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต E_c ที่ถูกต้อง การหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และระยะแอ่นตัวที่สภาวะน้ำหนักต่าง ๆ ไปจนถึงขอบเขตของสภาวะวิบัติ จะช่วยให้มองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับระยะแอ่นตัวอย่างชัดเจน

พฤติกรรมของการแตกร้าวในคอนกรีตอัดแรงก็เป็นสิ่งที่วิกฤตอีกอย่างต่อการใช้งาน การยอมให้เกิดการแตกร้าวและควบคุมโดยเหล็กเสริมธรรมดาในระบบอัดแรงบางส่วนเป็นสิ่งที่ยอมรับกันทั่วไป แต่เนื่องจากระดับหน่วยแรงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงมากในเหล็กเสริมอัดแรง การกัดกร่อนผ่านรอยแตกร้าวจะทำให้เกิดผลร้ายต่ออายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้นจะต้องจำกัดความกว้างและระยะห่างของรอยแตกร้าว พร้อมกับต้องคำนวณหาความกว้างของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง

7.2 สมมุติฐานเบื้องต้นในการหาระยะแอ่นตัว

จะหาแอ่นตัวได้จากแผนภาพโมเมนต์จากการอัดแรงและจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก หรืออาจจะหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และการแอ่นตัว ทั้งสองวิธีจะใช้สมมุติฐานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

1. การใช้พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตจะให้ความละเอียดเพียงพอในการหาโมเมนต์ความเฉื่อย ยกเว้นก็ต่อเมื่อมีความจำเป็นที่จะใช้ความละเอียดสูงในการคำนวณ
2. ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_c = 4270w^{1.5}\sqrt{f_c'}$ โดยที่ f_c' เป็นกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุเมื่อต้องการหา E_c
3. ใช้หลักของ superposition ในการหาระยะแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก และระยะยกตัวเนื่องจากการอัดแรง
4. ในการคำนวณจะใช้การรวมเหล็กเสริมอัดแรงทุกเส้นเป็นเหล็กเส้นเดียว และมีแนวศูนย์ถ่วงอยู่ที่แนวศูนย์ถ่วงของกลุ่มเหล็กเสริมอัดแรง (cgs)
5. จะไม่รวมการแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือน
6. จะถือว่าหน้าตัดมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น จนถึงน้ำหนักบรรทุก*คลายแรงอัด* หลังจากนั้นจะใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว I_{cr} ในการหาระยะแอ่นตัวและระยะยกตัว

7.3 การแอ่นตัวเบื้องต้น (ทันทีทันใด) ขององค์อาคารทั้งแตกร้าวและไม่แตกร้าว

7.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว

การหาระยะแอ่นตัวเบื้องต้นขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงจะใช้สมมุติฐานที่ว่า หน้าตัดทำด้วยวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง และมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยยืดหดตัวเป็นเชิงเส้น สมมุติฐานนี้เป็นเพียงการประมาณของพฤติกรรมจริง เพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะแปรเปลี่ยนตามอายุ และโมเมนต์ความเฉื่อยก็แปรเปลี่ยนตามสภาวะของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวหรือไม่แตกร้าว

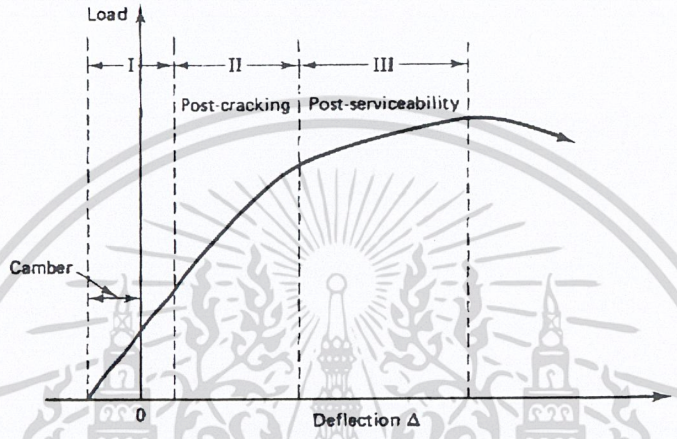
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวตามทฤษฎี ซึ่งจะแบ่งเป็นเส้นตรง 3 ช่วงก่อนการวิบัติ ดังต่อไปนี้:

บริเวณที่ I สภาวะก่อนการแตกร้าว

บริเวณที่ II สภาวะหลังการแตกร้าว รอยร้าวจะมีความกว้างและการกระจายในปริมาณที่ยอมรับได้

บริเวณที่ III สภาวะแตกร้าวหลังจากการใช้งาน ซึ่งหน่วยแรงในเหล็กเสริมจะถึงจุดคราก



รูปที่ 7.1-ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวในคาน โดยบริเวณ 1 เป็นสภาวะก่อนการแตกร้าว บริเวณ 2 สภาวะหลังการแตกร้าว บริเวณ 3 เป็นสภาวะหลังการใช้งาน

7.3.1.1 สภาวะก่อนการแตกร้าว: บริเวณ I

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะแอ่นตัวในช่วงก่อนการแตกร้าวจะเป็นเชิงเส้นตรง ดังในรูปที่ 7.1 หน่วยแรงดึงสูงสุดในคานจะน้อยกว่าโมดูลัสแตกร้าว f_r ของคอนกรีต จะหาค่าสติฟเนส EI ของคานได้จากโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและโมเมนต์ความเฉื่อยของของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมด พฤติกรรมการแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวในคอนกรีต ตามที่แสดงในรูปที่ 7.2

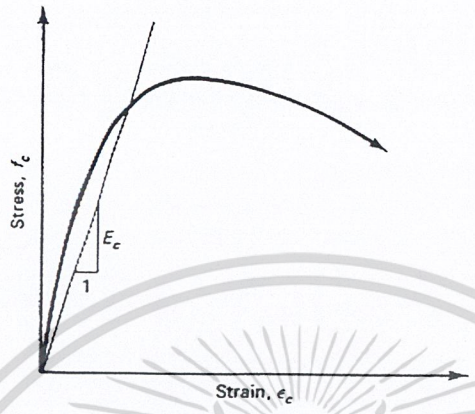
จะหาค่า E_c ได้จากสมการของ ACI ซึ่งเป็นผลมาจากการทดลอง

$$E_c = 4270w^{1.5}\sqrt{f'_c} \qquad (7.1a)$$

และ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ $E_c = 15\,100\sqrt{f'_c}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อมีการแตกร้าวเริ่มขึ้น โดยที่หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับโมดูลัสแตกร้าว f_r เช่นเดียวกับกำลังรับแรงดึงผ่าซีกของคอนกรีต โมดูลัสแตกร้าวในคอนกรีตจะแปรเปลี่ยนตามกรณ์ที่ 2 ของกำลังอัดของคอนกรีต ในการออกแบบจะใช้โมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ



รูปที่ 7.2-แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีต

$$f_r = 2.0\lambda\sqrt{f_c'} \tag{7.1b}$$

โดยที่ $\lambda = 1.0$ สำหรับ คอนกรีตน้ำหนักปกติ

$\lambda = 0.75$ สำหรับ คอนกรีตน้ำหนักเบา

$\lambda = 0.85$ สำหรับ คอนกรีตน้ำหนักเบาที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม

ถ้าให้โมดูลัสแตกร้าว f_r มีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} (โมเมนต์สลายแรงอัด) จะได้

$$f_b = f_r = -\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+\frac{M_{cr}}{S_b} \tag{7.2a}$$

โดยที่ตัวห้อย b แสดงว่าเป็นตำแหน่งที่ผิวล่างของหน้าตัดกลางช่วงของคานช่วงเดี่ยว ถ้าระยะที่ผิวด้านรับแรงดึงถึงจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีตเป็น y_t จะได้โมเมนต์แตกร้าวมีค่าเป็น

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y_t}\left[\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)+2.0\lambda\sqrt{f_c'}\right] \tag{7.2b}$$

หรือ

$$M_{cr} = S_b\left[2.0\lambda\sqrt{f_c'}+\frac{P_e}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right)\right] \tag{7.2c}$$

โดยที่ S_b เป็นโมดูลัสหน้าตัดที่ผิวล่าง หรือถ้าจะให้ปลอดภัยมากขึ้น อาจจะใช้สมการที่ 5.12 ซึ่งให้ค่าโมเมนต์แตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรเป็น

$$M_b = S_b\left[1.6\lambda\sqrt{f_c'}+f_{ce}-f_d\right] \tag{7.3a}$$

โดยที่ f_{ce} = หน่วยแรงอัดที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคอนกรีตเนื่องจากแรงดึงประสิทธิผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_d = หน่วยแรงในผิวคอนกรีตด้านรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน

แต่เมื่อใช้ในการหาระยะแอ่นตัว อาจจะใช้ตัวคูณ 2.0 แทนที่ 1.6 ในสมการข้างบน อาจจะจัดรูปแบบของสมการที่ 7.3a ได้ใหม่เป็น

$$\frac{M_{cr}}{M_a} = 1 - \left(\frac{f_{tl} - f_r}{f_L} \right) \qquad (7.3b)$$

โดยที่ M_a = โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน

f_{tl} = หน่วยแรงสุดท้ายบนผิวของคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานทั้งหมด

f_L = หน่วยแรงบนผิวของคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน

f_r = โมดูลัสแตกร้าว

<u>ตัวอย่างที่ 7.1</u> – โมเมนต์แตกร้าว M_{cr}

หาโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} ของคานคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง b = 30 ซม. และความลึกทั้งหมด h = 60 ซม. ให้ f_c' = 280 กก./ซม.^{2} หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากการอัดแรงเยื้องศูนย์ f_b = 130 กก./ซม.^{2} และโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ $2.0\sqrt{f_c'}$

โมดูลัสแตกร้าว $f_r = 2.0\sqrt{f_c'} = 2\sqrt{280} = 33.47$ กก./ซม.^{2}

โมเมนต์ความเฉื่อย $I_g = bh^3/12 = 30(60)_3/12 = 540\ 000$ ซม.^{4}

ระยะจากแนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวรับแรงดึง $y_t = 60/2 = 30$ ซม. และ $S_b = I_g/y_t = 18\ 000$ ซม.^{3}

ดังนั้น
$$M_{cr} = S_b \left[2.0\lambda\sqrt{f_c'} + \frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2} \right) \right] = 18\ 000\left[33.47 + 130 \right]/100$$

$$= 29\ 424 \quad \text{กก.ม.}$$

ถ้าไม่มีการอัดแรง โมเมนต์แตกร้าว $M_{cr} = f_r I_g/y_t = f_r S_b = 33.47(18\ 000)/100 = 6025$ กก.ม.

7.3.1.2 สภาวะหลังการแตกร้าวช่วงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน: บริเวณ II

จุดเริ่มของการแตกร้าวแสดงการสิ้นสุดของช่วง 1 และนำเข้าสู่บริเวณ II ของแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวในรูปที่ 7.1 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน คานส่วนมากจะมีพฤติกรรมอยู่ในบริเวณนี้ การแตกร้าวจะแปรเปลี่ยนไปตามหน่วยแรงและระยะแอ่นตัวบนตำแหน่งต่าง ๆ ของคาน ยกตัวอย่าง เช่น ที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยวรอยแตกร้าวจะลึกและกว้าง ในระหว่างที่บริเวณฐานรองรับรอยแตกร้าวจะตื้นและแคบกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทันทีที่เกิดการแตกร้าว พื้นที่รับแรงดึงในคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้สติฟเนสของหน้าตัดลดลง ส่งผลให้ความลาดของเส้นตรงความสัมพันธ์ในบริเวณนี้ลดลง เมื่อการแตกร้าวยิ่งเพิ่มขึ้น สติฟเนสก็ยิ่งลดลงจนถึงขอบเขตต่ำสุดของโมเมนต์ความเฉื่อย ซึ่งเรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว (I_{cr})

7.3.1.3 สภาวะแตกร้าวหลังช่วงการใช้งานและขอบเขตของพฤติกรรมของการแอ่นตัว ณ จุดวิบัติ: บริเวณ III

ความลาดของเส้นตรงความสัมพันธ์ในบริเวณนี้จากรูปที่ 7.1 จะลดน้อยลงจากบริเวณก่อนนี้ เนื่องจากการสูญเสียสติฟเนสหน้าตัด ซึ่งเป็นผลมาจากรอยแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นและการขยายกว้างของรอยแตกร้าวที่เกิดก่อนหน้านี้ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเข้าไป หน่วยการยืดตัว ϵ_s ของเหล็กรับแรงดึงก็จะเพิ่มขึ้น จะกระทั่งมีค่าเกินหน่วยการยืดตัวที่จุดคราก ϵ_y โดยที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมจะไม่เพิ่มอีกต่อไป ที่สภาวะนี้ จะถือว่าคานถึงจุดวิบัติด้วยการครากของเหล็กเสริม คานจะแอ่นตัวอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะขยายตัวมากขึ้นและยาวขึ้น แกนสะเทินจะเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องเข้าหาผิวด้านรับแรงอัด ทำให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงอัด นำไปสู่การอัดแตกของคอนกรีตในบริเวณโมเมนต์สูงสุด

7.3.2 หน้าตัดไม่แตกร้าว

7.3.2.1 การหาระยะแอ่นตัว

จะหาระยะแอ่นตัวในหน้าตัดอัดแรงไม่แตกร้าวได้แม่นยำกว่าในหน้าตัดแตกร้าว เพราะถือว่าหน้าตัดที่ไม่แตกร้าวมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น การใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดก็ให้ผลที่ไม่แตกต่างจากการใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง (แปลงพื้นที่เหล็กเสริมให้เป็นพื้นที่คอนกรีตด้วยอัตราส่วนโมดูลัส)

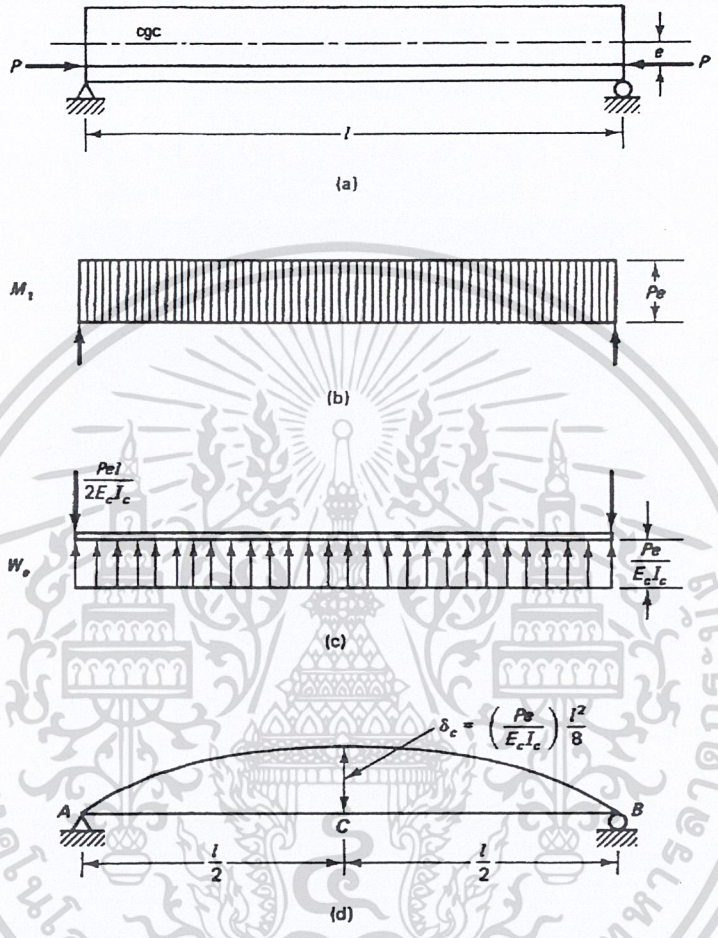
รูปที่ 7.3 แสดงคานอัดแรงด้วยแรง P มีระยะเยื้องศูนย์คงที่ e วาดแผนภาพโมเมนต์หลักบนด้านรับแรงดึงของคาน จะได้โมเมนต์คงที่ตลอดทั้งคาน $M_1 = Pe$ ใช้วิธีคานร่วม (conjugate beam method) จะได้ระยะแอ่นตัวที่กลางคาน มีค่าเท่ากับโมเมนต์ที่กลางคานร่วมเมื่อใช้แผนภาพ M_1/EI เป็นน้ำหนักบรรทุกบนคานร่วม

$$\delta_c = \frac{Pe\ell}{2E_cI_c}\left(\frac{\ell}{2}\right) - \frac{Pe}{E_cI_c}\left(\frac{\ell}{2}\times\frac{\ell}{4}\right) = \frac{Pe\ell^2}{8E_cI_c} \qquad (7.4)$$

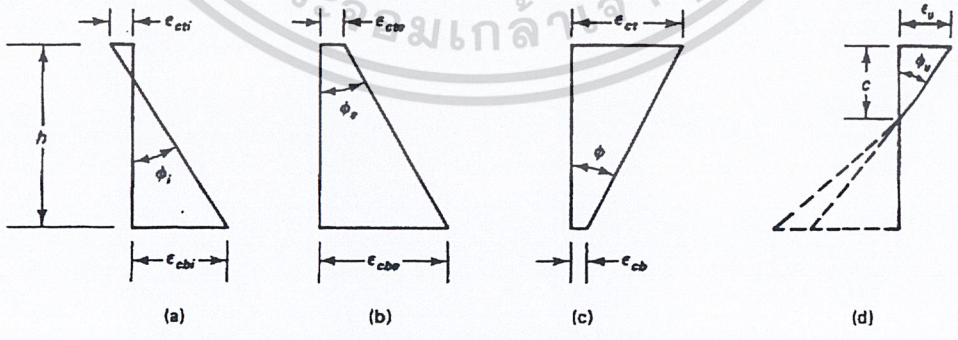
จะเห็นว่าแผนภาพการแอ่นตัวในรูปที่ 7.3(d) อยู่*เหนือ*เส้นอ้างอิงแสดงว่าการอัดแรงทำให้คานยกตัวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้หลักการเดียวกันนี้ไม่ว่าแนวเหล็กเสริมอัดแรงและน้ำหนักบรรทุกจะอยู่ในรูปแบบใด การยกตัวหรือการแอ่นตัวสุดท้ายจะเป็นผลรวมของการยกตัวเนื่องจากการอัดแรงและการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก



รูปที่ 7.3 - การหาระยะแอ่นตัว (a) แรงดึงเหล็ก (b) โมเมนต์หลัก M_1 (c) คานร่วม (d) การแอ่นตัว



รูปที่ 7.4 – การกระจายหน่วยการยืดหดตัวและความโค้งที่สภาวะต่าง ๆ (a) ขณะอัดแรง, $\phi_i = (\epsilon_{cbi} - \epsilon_{cti})/h$

(b) แรงดึงประสิทธิผลหลังการเสื่อมลด, $\phi_e = (\epsilon_{cbe} - \epsilon_{cte})/h$

(c) น้ำหนักบรรทุกใช้งาน $\phi = (\epsilon_{cb} - \epsilon_{ct})/h$ (d) จุดวิบัติ$\phi_u = \epsilon_u/c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2.2 การหาหน่วยการยืดหดตัวและความโค้ง

การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวตามความลึกของหน้าตัดจะเป็นเส้นตรงเสมอ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.4 โดยที่มุมของความโค้งจะขึ้นอยู่กับหน่วยการยืดหดตัวที่ผิวบน ϵ_{ct} และที่ผิวล่าง ϵ_{cb} ดังนั้นจะหาความโค้งที่สภาวะรับน้ำหนักต่าง ๆ จากการกระจายหน่วยการยืดหดตัว ได้ดังต่อไปนี้

(1) ขณะถ่ายแรง: $\phi_i = (\epsilon_{cbi} - \epsilon_{cti})/h$ (7.5a)

(2) แรงประสิทธิผลหลังการเสื่อมลด: $\phi_e = (\epsilon_{cbe} - \epsilon_{cte})/h$ (7.5b)

(3) น้ำหนักบรรทุกใช้งาน: $\phi = (\epsilon_{cb} - \epsilon_{ct})/h$ (7.5c)

(4) จุดวิบัติ: $\phi_u = \epsilon_u/c$ (7.5d)

ใช้เครื่องหมาย (+) สำหรับหน่วยการยืดตัวและ (-) สำหรับหน่วยการหดตัว รูปที่ 7.4(c) แสดงการกระจายหน่วยการยืดหดตัวในหน้าตัดที่ไม่แตกร้าว จะต้องปรับแก้เพื่อแสดงหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างถ้าหน้าตัดเกิดการแตกร้าว

ความโค้งประสิทธิผลหลังการเสื่อมลด ϕ_e ในรูปที่ 7.4(b) เป็นผลรวมตามเครื่องหมายของความโค้งเบื้องต้น ϕ_i กับการเปลี่ยนของความโค้ง $d\phi_1$ อันเป็นผลมาจากการเสื่อมลดเนื่องจากการคืบ การคลายหน่วยแรง และการสูญเสียความชื้น กับการเปลี่ยนแปลงความโค้ง $d\phi_2$ อันเป็นผลมาจากการคืบของคอนกรีตภายใต้แรงดึงคงค้างของเหล็กเสริมอัดแรง ดังนั้น

$$\phi_e = \phi_i + d\phi_1 + d\phi_2 \quad (7.6)$$

ซึ่งจากพื้นฐานกลศาสตร์ของวัสดุ $$\phi = \frac{M}{E_c I_c} \quad (7.7a)$$

ดังนั้นสำหรับโมเมนต์หลัก $M_1 = P_e e$ จะได้ $$\phi = \frac{P_e e}{E_c I_c} \quad (7.7b)$$

แทนค่าในสมการที่ 7.4 สำหรับคานช่วงเดี่ยวมีระยะเยื้องศูนย์คงที่ จะได้

$$\delta_c = \frac{\phi \ell^2}{8} \quad (7.8)$$

ดังนั้น จะได้สมการทั่วไปของการแอ่นตัวในรูปของความโค้ง เป็น

$$\delta = \phi_c \frac{\ell^2}{8} - (\phi_e - \phi_c)\frac{a^2}{6} \quad (7.9)$$

โดยที่ ϕ_c = ความโค้งที่กลางช่วง

ϕ_e = ความโค้งที่ฐานรองรับ

a = ตัวแปรความยาวขึ้นอยู่กับแนวของเหล็กเสริมอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 7.2</u> – การแอ่นตัวเบื้องต้นของคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดี่ยวที่มีแนวเหล็กอัดแรงเป็นรูปพาราโบล่า

จงหาระยะแอ่นตัวเบื้องต้นของคานในรูปที่ 7.5 ซึ่งมีแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นแบบพาราโบล่าโดยมีระยะเยื้องศูนย์สูงสุดที่กลางช่วงเท่ากับ e และมีแรงดึงประสิทธิผลเท่ากับ P_e มีความยาวช่วงเป็น ℓ ม. และสติฟเนสเป็น E_cI_c

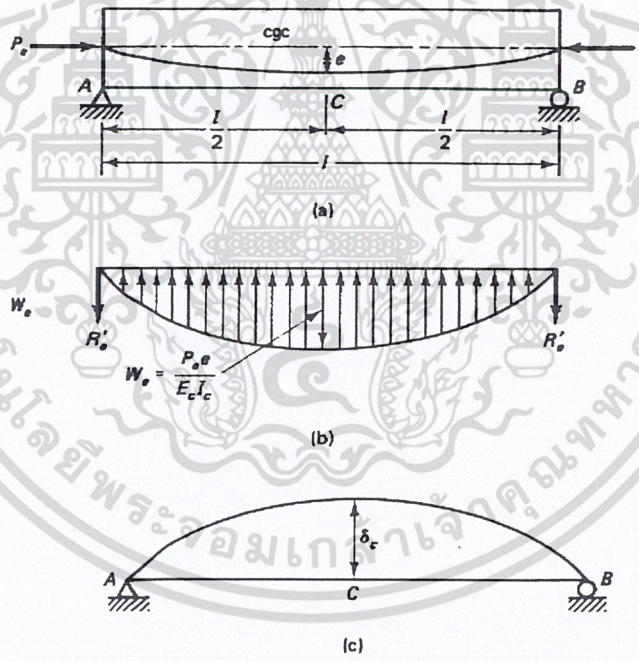
(1) วิธี Conjugate Beam

จากรูปที่ 7.5(b) $R'_e = \frac{1}{2}\frac{P_e e\ell}{E_c I_c}(\frac{2}{3}) = \frac{P_e e\ell}{3E_c I_c}$

โมเมนต์ที่กลางช่วงของ Conjugate Beam

$$M_c = \delta_c = R'_e\left(\frac{1}{2}\right) - \left[\frac{P_e e\ell}{E_c I_c}\times\frac{2}{6}\left(\frac{3}{8}\times\frac{\ell}{2}\right)\right] = \frac{1}{E_c I_c}\left(\frac{P_e e\ell^2}{6} - \frac{3P_e e\ell^2}{48}\right) = \frac{5P_e e\ell^2}{48E_c I_c}$$

ได้ $$\delta_c = \frac{5}{48}\frac{P_e e\ell^2}{E_c I_c}$$



รูปที่ 7.5-การแอ่นตัวของคาน (a) แนวเหล็กเสริมอัดแรง (b) Conjugate Beam (c) การแอ่นตัว

(2) วิธีน้ำหนักเทียบเท่า

จากบทที่ 1 แรงพยุงเทียบเท่า w ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันของเหล็กเสริมอัดแรงแนวพาราโบล่าบนเนื้อคอนกรีต $$w = \frac{8P_e e}{\ell^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากพื้นฐานของกลศาสตร์ของวัสดุ ระยะแอ่นตัวกลางช่วงคานช่วงเดียวภายใต้น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายคงที่มีค่าเป็น $\delta_c = \frac{5}{384}\frac{w\ell^4}{E_c I_c}$

แทนค่าน้ำหนักบรรทุก w ลงในสมการข้างบน จะได้ $\delta = \frac{5}{48}\frac{P_e e\ell^2}{E_c I_c}$

จะเห็นว่าจากทั้งสองวิธี จะได้ระยะแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากัน

รูปที่ 7.6 แสดงสมการสำหรับระยะแอ่นตัวที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยวภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ซึ่งจะนำไปใช้ร่วมได้กับสมการของแรงเฉือนและโมเมนต์สำหรับคานต่อเนื่องในรูปที่ 6.12

7.3.3 หน้าตัดแตกร้าว

7.3.3.1 วิธีโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล

ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเกินหรือในกรณีของการอัดแรงบางส่วนที่ยอมให้เกิดแตกร้าวได้ การใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมด I_g จะให้ค่าการยกตัวและแอ่นตัวต่ำกว่าความเป็นจริง ตามทฤษฎีแล้ว ควรจะใช้ค่าโมเมนต์แตกร้าว I_{cr} บนหน้าตัดส่วนที่เกิดรอยแตกร้าว และในหน้าตัดระหว่างรอยแตกร้าวก็ให้ใช้ I_g เหมือนเดิม ซึ่งก็จะทำให้การคำนวณยุ่งยากเกินความจำเป็น ดังนั้นจะใช้ค่าโมเมนต์ประสิทธิผล I_e เสมือนกับเป็นค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ความเฉื่อยตลอดช่วงของคานช่วงเดี่ยวอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยว ดังต่อไปนี้

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \left(I_g - I_{cr}\right) \le I_g \qquad (7.10a)$$

ซึ่งอาจจะเขียนได้อีกรูปแบบ

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g \qquad (7.10b)$$

โดยที่อัตราส่วน M_{cr}/M_a จะหาได้จากสมการที่ 7.3b และ I_{cr} = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว หาได้จากสมการที่ 7.13

จะเห็นว่าทั้ง M_{cr} และ M_a เป็นโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานแต่อย่างเดียว โดยที่จะถือว่า M_{cr} เป็นส่วนของโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานซึ่งทำให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล I_e ในสมการที่ 7.10a และ b จะขึ้นอยู่กับโมเมนต์สูงสุด M_a บนช่วงคานและกำลังต้านโมเมนต์แตกร้าว M_{cr} ของหน้าตัด

ในกรณีของคานที่มีปลายต่อเนื่องทั้งสองด้านและไม่แตกร้าว

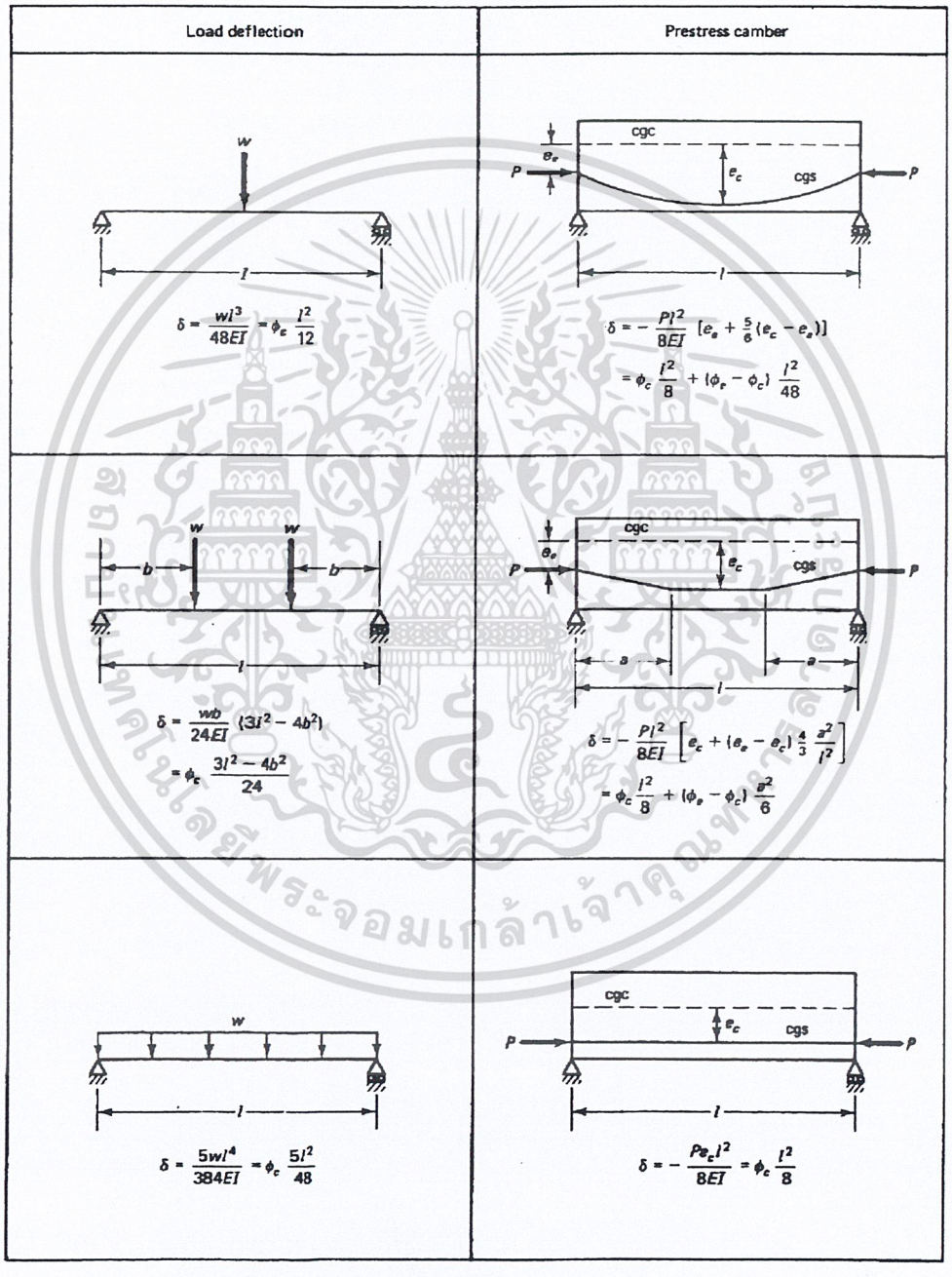
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_e \text{ เฉลี่ย} = 0.70I_m + 0.15(I_{e1} + I_{e2}) \qquad (7.11)$$

และในกรณีของคานที่มีปลายต่อเนื่องข้างเดียวและไม่แตกร้าว

$$I_e \text{ เฉลี่ย} = 0.85I_m + 0.15I_{\text{ด้านต่อเนื่อง}}$$

โดยที่ I_m เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยที่กลางช่วง และ I_{e1}, I_{e2} เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยที่ปลายคาน



รูปที่ 7.6 - การแอ่นตัวเบื้องต้นในคานคอนกรีตอัดแรง สัญลักษณ์ c แทนที่กลางช่วง และ e แทนที่ฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.3.2 วิธีเชิงเส้นคู่ (Bilinear computation Method)

หัวข้อที่ 7.3.1 แบ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอ่นตัวออกเป็นเส้นตรงสามเส้น ซึ่งสองช่วงแรกสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI ซึ่งระบุความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานและระยะแอ่นตัวไว้ตามรูปที่ 7.7 โดยแบ่งความสัมพันธ์ออกแบบเส้นตรงสองเส้นในช่วงของ I_g และช่วงของ I_{cr} การใช้โมเมนต์ประสิทธิผล I_e จึงให้ค่าเฉลี่ยของระยะแอ่นตัวในสองช่วงนี้ $\delta_{tot} = \delta_e + \delta_{cr}$ ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว

มาตรฐาน ACI ระบุว่าในการหาระยะแอ่นตัวในช่วงที่เกิดการแตกร้าวในคานอัดแรงชนิดมีการยึดเหนี่ยว จะต้องใช้หน้าตัดแปลง เมื่อหน่วยแรงดึง f_t ในคอนกรีตมีค่าเกิน $1.60\sqrt{f'_c}$ ดังนั้นจะหา δ_{cr} ในรูปที่ 7.7 ได้ด้วยการใช้ I_{cr} ซึ่งรวมผลของเหล็กเสริมไว้ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อย

สำหรับองค์อาคารอัดแรงเต็มที่ จะหาโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวได้จาก

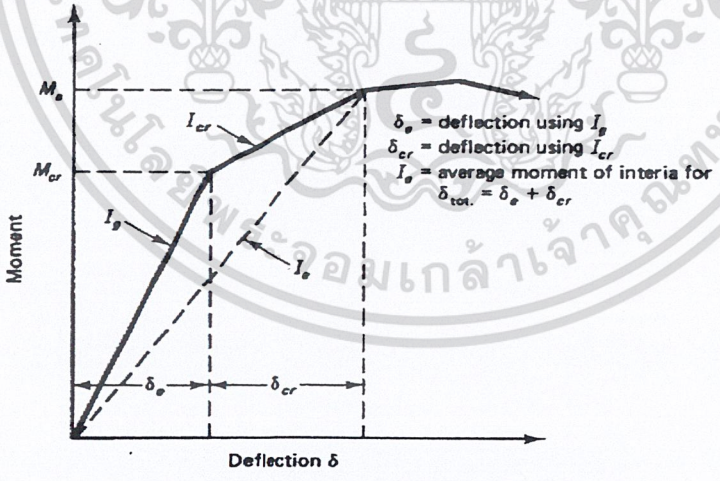
$$I_{cr} = n_p A_{ps} d_p^2 \left(1 - 1.6\sqrt{n_p \rho_p}\right) \qquad (7.13a)$$

โดยที่ $n_p = E_{ps}/E_c$

สำหรับองค์อาคารอัดแรงบางส่วน ซึ่งใช้เหล็กเสริมธรรมดารับหน่วยแรงดึง จะปรับสมการข้างบนเป็น

$$I_{cr} = \left(n_p A_{ps} d_p^2 + n_s A_s d^2\right)\left(1 - 1.6\sqrt{n_p \rho_p + n_s \rho}\right) \qquad (7.13b)$$

โดยที่ $n_s = E_s/E_c$ สำหรับเหล็กเสริมธรรมดา



รูปที่ 7.7 - ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการแอ่นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.3.3 วิธีเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง

(Incremental moment-curvature method)

จะหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวได้ละเอียดมากขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งตลอดความยาวคาน และจากหน่วยแรงซึ่งได้มาจากการกระจายหน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดวิกฤต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.4(d) สำหรับหน่วยการยืดหดตัว $\in_{cr}$ ที่เกิดการแตกร้าวครั้งแรก

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{c} = \frac{M}{E_c I_{cr}} \tag{7.14}$$

โดยที่ $\in_{cr}$ เป็นหน่วยการยืดหดตัวที่ผิวคอนกรีตแรงอัดและ M เป็นโมเมนต์ทั้งหมดรอบศูนย์ถ่วง cgc ของหน้าตัด ซึ่งรวมโมเมนต์หลัก M_1 ด้วย ดังนั้นจะเขียนสมการที่ 7.14 ใหม่ได้เป็น

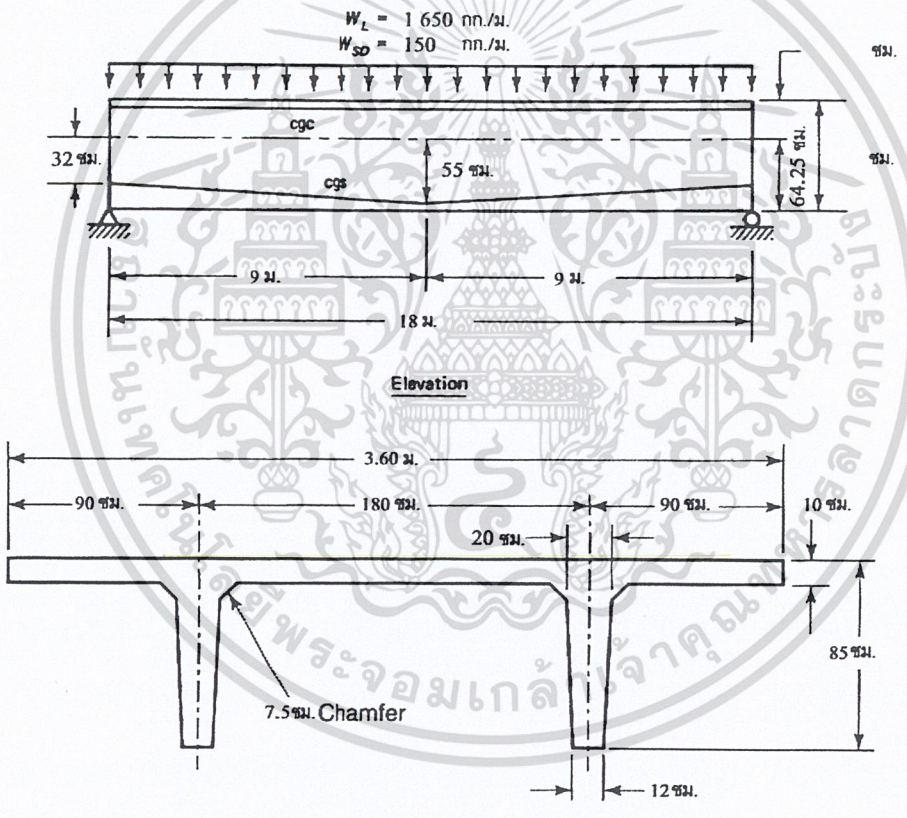
$$I_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c \varepsilon_{cr}} = \frac{Mc}{f} \tag{7.15}$$

โดยที่ f เป็นหน่วยแรงที่ผิวคอนกรีตรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 7.3 – การแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวทีคู่ ถ้าไม่มีการแตกร้าว

หาระยะแอ่นตัวเบื้องต้นของคานในตัวอย่างที่ 4.1(รูปที่ 7.9) โดยใช้ (a) การใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย I_g หรือ I_c ที่เหมาะสม และ (b) เพิ่มความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง ให้คานรับน้ำหนักบรรทุกจรทั้งหมดเป็น 1650 กก./ม. และน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดไม่รวมน้ำหนักของคานเป็น 150 กก./ม. เป็นคานอัดแรงชนิดดึงก่อนและเป็นแบบมีแรงยึดเหนี่ยว โดยมี A_{ps} = 15.8 ซม.^{2} (ลวดตีเกลียวคลายหน่วยแรงชนิด 7 เส้นเกรด 1860 ขนาด 12.7 มม. จำนวน 16 เส้น (f_{pu} = 18 980 กก./ซม.^{2}) ไม่ต้องรวมเหล็กเสริมธรรมดาในการหาโมเมนต์ความเฉื่อย สมมุติให้ดึงลวดที่ 0.70 f_{pu} ทำให้เกิดแรงดึงเบื้องต้น P_i = 209 919 กก. หลังจากติดตั้งแล้ว 30 วัน จึงเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกภายนอก ซึ่งในตอนนั้นให้แรงดึงประสิทธิผล P_e = 172 141 กก. โดยไม่รวมการเสื่อมลดที่ขึ้นอยู่กับเวลา



รูปที่ 7.9 - คานในตัวอย่างที่ 4.1

(a) คุณสมบัติของหน้าตัด

A_c = 6000 ซม.^{2}, I_c = 3.68(10)^6 ซม.^{4}, S_b = 57 379 ซม.^{3}, S^t = 177 669 ซม.^{3}, c_b = 64.25 ซม.

c_t = 20.75 ซม., w_D = 1440 กก./ม., w_{SD} = 150 กก./ม., w_L = 1650 กก./ม.

e_c = 55 ซม., e_e = 32 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) คุณสมบัติของวัสดุ

V/S = 5.8 ซม., RH = 70 %, f_c' = 380 กก./ซม.^{2}, f_{ci}' = 285 กก./ซม.^{2}

f_{pu} = 18 980 กก./ซม.^{2}, f_{pi} = 13 286 กก./ซม.^{2}, f_{pe} = 10 895 กก./ซม.^{2}, E_{ps} = 1.97(10)^6 กก./ซม.^{2}

(c) หน่วยแรงที่ยอมให้

$f_{ci} = f_c$ = 171 กก./ซม.^{2}

ที่กลางช่วง f_{ti} = 13.50 กก./ซม.^{2}, f_t = 31.19 กก./ซม.^{2}

<u>วิธีใช้โมเมนต์ความเฉื่อยที่เหมาะสม</u>

1. <u>*หน่วยแรงที่หน้าตัดกลางช่วง*</u>

ที่กลางช่วง e_c = 55 ซม.

โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากน้ำหนักคาน

$$M_D = 1440(18)^2/8 = 58\ 320 \text{ กก.ม.}$$

(a) ขณะถ่ายแรง หาหน่วยแรงที่ขอบบนและล่างจากสมการที่ 4.1a

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c}\left(1-\frac{e_c c_t}{r^2}\right)-\frac{M_D}{S^t}$$

$$= -\frac{209\ 919}{6\ 000}\left(1-\frac{55\times 20.75}{613.33}\right)-\frac{58\ 320\times 100}{177\ 669} = 34.4 - 32.82$$

$$= 1.58 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (แรงดึง)} < f_{ti} = 13.62 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ <u>ใช้ได้</u>}$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c}\left(1+\frac{e_c c_b}{r^2}\right)+\frac{M_D}{S_b}$$

$$= -\frac{209\ 919}{6\ 000}\left(1+\frac{55\times 64.25}{613.33}\right)+\frac{58\ 320\times 100}{57\ 379} = -270.22 + 101.64$$

$$= -168.58 \text{กก./ซม.}^2 \text{(แรงอัด)} < f_{ci} = 171 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ <u>ใช้ได้</u>}$$

(b) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

M_{SD} = 150(18)^2/8 = 2025 กก.ม., M_L = 1650(18)^2/8 = 66 825 กก.ม.

หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร, f^t = 60 825(100)/177 669 = - 37.61 กก./ซม.^{2}

f_b = 60 825(100)/57 379 = 116.46 กก./ซม.^{2}

โมเมนต์รวมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$M_T = M_D + M_{SD} + M_L = 58\ 320 + 2025 + 66\ 825 = 127\ 170$ กก.ม.

จากสมการที่ 4.3a

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right)-\frac{M_T}{S^t}$$

$$= -\frac{172\ 141}{6\ 000}\left(1-\frac{55\times 20.75}{613.33}\right)-\frac{127\ 170\times 100}{177\ 669} = 27.52 - 71.57$$

$= -44.05$ กก./ซม.^{2} $< f_c = -171$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

จากสมการที่ 4.3b

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1-\frac{ec_b}{r^2}\right)-\frac{M_T}{S_b}$$

$$= -\frac{172\ 141}{6\ 000}\left(1+\frac{55\times 64.25}{613.33}\right)+\frac{127\ 170\times 100}{57\ 379} = -216.17 + 221.63$$

$= 5.46$ กก./ซม.^{2} $< f_t = 31.19$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

จะเห็นว่าหน้าตัดยังไม่แตกร้าว ดังนั้นจะใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมด I_g ในการหาระยะแอ่นตัว ซึ่งในกรณีนี้โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล I_e มีค่าเท่ากับ I_g

2. *หน่วยแรงที่หน้าตัดเหนือฐานรองรับ*

$$f_{ti} = 0.8\sqrt{f'_{ci}} = 0.8\sqrt{285} = 13.50 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_t = 1.6\sqrt{f'_c} = 1.6\sqrt{380} = 31.19 \text{ กก./ซม.}^2$$

เหนือฐานรองรับ $e_e = 32$ ซม.

ใช้ขั้นตอนเดียวกับหัวข้อที่แล้ว แต่มีโมเมนต์ M = 0 จะได้หน่วยแรงที่ฐานรองรับตามตารางข้างล่างซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมให้เช่นกัน

	ที่กลางช่วงคาน		ที่ฐานรองรับ	
	f^t	f_b	f^t	f_b
แรงอัด P_i อย่างเดียว .	34.40	-270.22	3.30	-173.92
ขณะถ่ายแรงภายใต้ w_D	1.58	-168.58	3.30	-173.92
ภายใต้น้ำหนักบรรทุกจร w_L	-37.61	116.46	0	0
ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน	-44.05	5.46	2.64	-139.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. <u>*ระยะแอ่นตัวและยกตัวขณะถ่ายแรง*</u>

จากรูปที่ 7.6 สำหรับ a = L/2 การยกตัวที่กลางช่วงเนื่องจากมีการหักงอลวดอัดแรง 1 ตำแหน่งเป็น

$$E_{ci} = 15\ 100\sqrt{f'_{ci}} = 15\ 100\sqrt{285} = 254\ 917 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\delta = -\frac{Pe_c\ell^2}{8EI} - \frac{P(e_e - e_c)\ell^2}{24EI}$$

$$\delta_{pi} = -\frac{202\,919(55)(1800)^2}{8(254\ 917)(3.68\times10^6)} - \frac{202\,919(32-55)(1800)^2}{24(254\ 917)(3.68\times10^6)}$$

$$= -4.82 + 0.67 = -4.15 \text{ ซม.} = 4.15 \text{ ซม.} \uparrow$$

การยกตัวนี้เป็นผลของการอัดแรงแต่อย่างเดียว แต่ขณะถ่ายแรงจะเกิดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักของคาน ด้วย $\delta_D = \frac{5w\ell^4}{384EI} = \frac{5(1440)(18)^4}{384(254\,917)(3.68)(10)^6}(10)^6 = 2.10$ ซม. ↓

ดังนั้นการยกตัวสุทธิขณะถ่ายแรง = - 4.15 + 2.10 = - 2.05 = 2.05 ซม.↑

4. *การแอ่นตัวทั้งหมดที่กลางช่วงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานของคาน เมื่อไม่เกิดการแตกร้าว*

(a) การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม

$$E_c = 15\ 100\sqrt{f'_c} = 15\ 100\sqrt{380} = 294\ 353 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\delta_{SD} = \frac{E_{ci}}{E_c}\left(\frac{w_{SD}}{w_D}\right)\delta_D = \frac{w_{SD}}{w_D}\sqrt{\frac{f'_{ci}}{f'_c}}\delta_D = \frac{150}{1440}\sqrt{0.75}(2.10) = 0.19 \text{ ซม.} \downarrow$$

(b) การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$$\delta_L = \left(\frac{w_L}{w_{SD}}\right)\delta_{SD} = 0.19(1650)/150 = 2.08 \text{ ซม.} \downarrow$$

สรุปการยกตัวและแอ่นตัวเบื้องต้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

การยกตัวเนื่องจากการอัดแรงเบื้องต้น	= - 4.15 ซม. ↑
การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักของคาน	= 2.10 ซม. ↓
การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม	= 0.19 ซม. ↓
การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร	= 2.08 ซม. ↓

การแอ่นตัวสุทธิขณะถ่ายแรง = - 4.15 + 2.10 = - 2.05 = 2.05 ซม.↑

ถ้าจะคิดถึงการเสื่อมลดของการอัดแรงในเวลา 30 วันจากการถ่ายแรงถึงเวลาติดตั้งเรียบร้อย การยกตัวจะลดลง $= 4.15\left(\frac{202\,919 - 172\,141}{202\,919}\right) = 0.63$ ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วิธีใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง (Incremental Moment Curvature Method)</u>

หน่วยการยืดหดตัวขณะถ่ายแรงเนื่องจากการดึงเหล็ก

$E_{ci} = 15\ 100\sqrt{f'_{ci}} = 15\ 100\sqrt{285} = 254\ 917$ กก./ซม.^{2}

(i) เนื่องจากแรงดึงเบื้องต้น P_i

ที่กลางช่วง:

f^t = + 34.40 กก./ซม.^{2} , $\epsilon_c{}^t$ = 34.40/254 917 = 96.96 x 10^{-6} ซม./ซม.

f_b = - 270.22 กก./ซม.^{2} , ϵ_{cb} = - 270.22/254 917 = - 1060 x 10^{-6} ซม./ซม.

ที่ฐานรองรับ:

f^t = + 3.30 กก./ซม.^{2} , $\epsilon_c{}^t$ = 3.30/254 917 = 12.95 x 10^{-6} ซม./ซม.

f_b = - 173.92 กก./ซม.^{2} , ϵ_{cb} = - 173.92/254 917 = - 682.26 x 10^{-6} ซม./ซม.

(ii) เนื่องจากแรงดึงเบื้องต้นและน้ำหนักของคาน, $P_i + w_D$

ที่กลางช่วง:

f^t = + 1.58 กก./ซม.^{2} , $\epsilon_c{}^t$ = 1.58/254 917 = 6.20 x 10^{-6} ซม./ซม.

f_b = - 168.58 กก./ซม.^{2} , ϵ_{cb} = - 168.58/254 917 = - 661.31 x 10^{-6} ซม./ซม.

ที่ฐานรองรับ: เหมือนในข้อ (i)

หลังจากถ่ายแรง 30 วัน เหลือแรงดึงประสิทธิผล P_e = 172 141 กก. ดังนั้นการเสื่อมลดที่ 30 วัน

$\Delta P = P_i - P_e$ = 202 919 – 172 141 = 30 778 กก.

การเปลี่ยนแปลงหน่วยการยืดหดตัวเนื่องจากการเสื่อมลดของแรงดึง

ที่กลางช่วง:

$$\Delta f^t = -\frac{(-\Delta P)}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right) = +\frac{30\ 778}{6000}\left(1-\frac{55\times 20.75}{613.33}\right) = -4.41 \text{ กก./ซม.}^2$$

$\Delta\epsilon_c{}^t$ = - 4.41/254 917 = - 17.32 x 10^{-6} ซม./ซม.

$$\Delta f_b = -\frac{(-\Delta P)}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right) = +\frac{30\ 778}{6000}\left(1+\frac{55\times 64.25}{613.33}\right) = 34.68 \text{ กก./ซม.}^2$$

$\Delta\epsilon_{cb}$ = 34.68/254 917 = 136.06 x 10^{-6} ซม./ซม.

ที่ฐานรองรับ:

$$\Delta f^t = -\frac{(-\Delta P)}{A_c}\left(1-\frac{ec_t}{r^2}\right) = +\frac{30\ 778}{6000}\left(1-\frac{32\times 20.75}{613.33}\right) = -0.42 \text{ กก./ซม.}^2$$

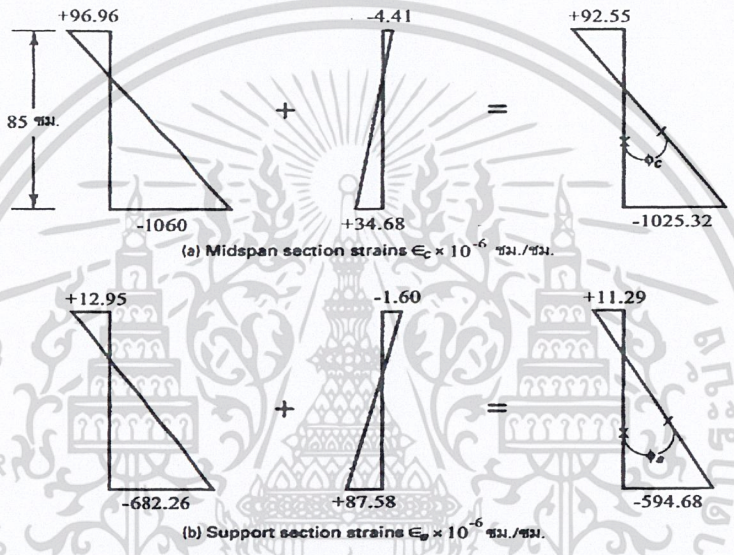
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta\epsilon_e^t$ = - 0.42/254 917 = - 1.66 x 10^{-6} ซม./ซม.

$$\Delta f_b = -\frac{(-\Delta P)}{A_c}\left(1+\frac{ec_b}{r^2}\right) = +\frac{30\,778}{6000}\left(1+\frac{32\times 64.25}{613.33}\right) = 22.32 \text{ กก./ซม.}^2$$

$\Delta\epsilon_{eb}$ = 22.32/254 917 = 87.58 x 10^{-6} ซม./ซม.

รวมหน่วยการยืดหดตัวขณะถ่ายแรงเข้ากับหน่วยการยืดหดตัวเนื่องจากการเสื่อมลดของแรงดึง จะได้การกระจายหน่วยการยืดหดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานเนื่องจากการอัดแรงแต่อย่างเดียวตามที่แสดงในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10-การกระจายหน่วยการยืดหดตัวตลอดความลึกของหน้าตัดขณะถ่ายแรง

ความโค้งที่กลางช่วง: ϕ_c = (-923.94 – 79.64)(10^{-6})/85 = - 11.80 x 10^{-6} เรเดียน/ซม.

ความโค้งที่ฐานรองรับ: ϕ_e = (-594.68 – 11.29)(10^{-6})/85 = - 7.13 x 10^{-6} เรเดียน/ซม.

จากรูปที่ 7.6 ที่ a = L/2 การยกตัวของคานเนื่องจากแรงดึงประสิทธิผล P_e มีค่าเท่ากับ

$$\delta_e = \phi_c\frac{\ell^2}{8}+(\phi_e-\phi_c)\frac{\ell^2}{24} = -11.80\times10^{-6}\frac{(1800)^2}{8}+(-7.13+11.80)\times10^{-6}\frac{(1800)^2}{24}$$

$$= -4.78 + 0.63 = -4.15 = 4.15 \text{ ซม.} \uparrow$$

สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ ระยะแอ่นตัวที่คำนวณได้อาจแตกต่างจากค่าจริงถึงร้อยละ 20 ถึง 40 ซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อค่าโมดูลัสของคอนกรีต ดังนั้นการคำนวณในแต่ละขั้นตอนอาจจะใช้เลขนัยสำคัญเพียงแค่ 3 หลักก็จะไม่ส่งผลแตกต่างต่อคำตอบสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 7.4</u> – การแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวทีคู่ ถ้าเกิดการแตกร้าว

ทำตัวอย่างที่ 7.3 โดยวิธี (a) เชิงเส้นคู่ และ (b) โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล ให้ถือว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานทำให้เกิดหน่วยแรงดึงบนผิวล่างที่หน้าตัดกลางช่วงของคาน f_b = 53 กก./ซม.^{2} ซึ่งสูงกว่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต f_r = $2.0\sqrt{f'_c}$ = 39 กก./ซม.^{2} และให้การยกตัวสุทธิเนื่องจากการอัดแรงและน้ำหนักของคานเป็น 2.4 ซม.

หน่วยแรงดึงสุทธิที่สูงเกินหน่วยแรงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวครั้งแรก (โมดูลัสแตกร้าว)

$f_{net} = f_b - f_r = 53 - 39 = +\ 14$ กก./ซม.^{2} (แรงดึง)

จากตัวอย่างที่ 7.3 หน่วยแรงดึงที่ผิวล่างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรมีค่าเป็น 116.46 กก./ซม.^{2} ซึ่งเป็นผลมาจาก w_L = 1650 กก./ม. ดังนั้นส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่ไม่มีผลต่อหน่วยแรงดึงที่ผิวล่าง

$$w_1 = \frac{(116.46-14)}{(116.46)} \times (1\,650) = 1\,452 \text{ กก./ม.}$$

ซึ่งทำให้เกิดการแอ่นตัวซึ่งหาได้จากหน้าตัดที่ไม่แตกร้าวมีค่าเป็น

$$\delta_g = \frac{5w_1\ell^4}{384E_cI_c} = \frac{5(1452)(18\times100)^4(10^{-2})}{384(294\,353)(7\,035\,144)} = 0.96 \text{ ซม.} \downarrow$$

(a) **<u>วิธีเชิงเส้นคู่</u>**

$$n_p = \frac{E_{ps}}{E_c} = \frac{1.97\times10^6}{294\,353} = 6.69$$

$d_p = e_c + c_t = 55 + 20.75 = 75.75 > 0.8h = 68$ ซม. ดังนั้นใช้ d_p = 75.75 ซม.

และเมื่อใช้ A_{ps} = 15.8 ซม.^{2} จะได้ $\rho_P = \frac{A_{ps}}{bd_p} = \frac{15.8}{360(75.75)} = 0.00058$

$$I_{cr} = n_pA_{ps}d_p^2\left(1-1.6\sqrt{n_p\rho_p}\right) = 6.69\times15.8\times(75.75)^2\left(1-1.6\sqrt{6.69\times0.00058}\right)$$

$$= 546\,075 \text{ ซม.}^4$$

น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในหน้าตัดมีค่าเท่ากับ

$w_2 = 1650 - 1452 = 198$กก./ม.

$$\delta_{cr} = \frac{5w_2\ell^4}{384E_cI_{cr}} = \frac{5(198)(18\times100)^4(10^{-2})}{384(294\,353)(546\,075)} = 1.68 \text{ ซม.} \downarrow$$

ดังนั้นการแอ่นตัวทั้งหมดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$\delta_L = 0.96 + 1.68 = 2.64$ ซม. ↓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) วิธีโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล I_e

จากสมการที่ 7.3b

$$\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) = 1 - \left(\frac{f_{ti} - f_r}{f_L}\right)$$

โดยที่ f_{ti} = หน่วยแรงสุดท้ายทั้งหมด = 53 กก./ซม.^{2}

f_r =โมดูลัสแตกร้าว = 39 กก./ซม.^{2}

f_L = หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร = 116.46 กก./ซม.^{2}

$$\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) = 1 - \left(\frac{53-39}{116.46}\right) = 1 - 0.12 = 0.88$$

$$\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 = 0.68$$

จากสมการที่ 7.10b

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g$$

$$= 0.68(3.68)(10^6) + (1 - 0.68)(546\ 075) = 2.68(10^6) \text{ ซม.}^4$$

ดังนั้นการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร =1650 กก./ม.

$$\delta_L = \frac{5(1650)(18\times 100)^4\ (10^{-2})}{384(294\ 353)(2.68\times 10^6)} = 2.86 \text{ ซม.}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากข้อ (a) = 2.64 ซม. เลือกใช้ δ_L = 2.86 ซม. ↓ เพื่อนำไปหาการแอ่นตัวในระยะยาวหลังการเสื่อมลดต่อไปตามที่แสดงในตัวอย่างที่ 7.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การแอ่นตัวและการยกตัวระยะยาว

มาตรฐานการออกแบบ ACI ได้ให้สมการสำหรับการประมาณตัวคูณที่ขึ้นกับเวลา สำหรับการแอ่นตัวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} \tag{7.16}$$

โดยที่ ξ = ตัวคูณที่ขึ้นกับระยะเวลาสำหรับน้ำหนักบรรทุกค้าง

ρ' = อัตราส่วนของเสริมเหล็กรับแรงอัด = A_s'/bd

λ = ตัวคูณสำหรับระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา

ในทำนองเดียวกัน PCI ได้ให้ตัวคูณ C_1 ซึ่งรวมผลกระทบต่าง ๆ ในระยะยาวในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง ตัวคูณ C_1 จะต่างจาก λ ในสมการที่ 7.16 เพราะการหาระยะแอ่นตัวและยกตัวตามเวลาในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงจะซับซ้อนมากกว่าในคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากปัจจัยต่อไปนี้

1. ผลกระทบในระยะยาวของแรงอัด และการเสื่อมลดแรงอัด
2. การที่กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น หลังจากการเสื่อมลดของแรงอัด
3. ผลของการยกตัวและแอ่นตัว ในระหว่างการติดตั้ง

เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ ทำให้นำสมการที่ 7.16 มาใช้ไม่ได้

ตารางที่ 7.1 แสดงตัวคูณสำหรับระยะแอ่นตัวและยกตัวที่เพิ่มขึ้น โดยที่จะต้องแยกการยกตัวและแอ่นตัวเบื้องต้นออกจากกันอย่างชัดเจน เพื่อจะได้รวมผลของการเสื่อมลดของแรงอัดที่มีต่อการยกตัวแต่อย่างเดียว Shaikh และ Branson พบว่าการยกตัวในระยะยาวจะลดลงได้มากถ้ามีการเพิ่มเหล็กเสริมธรรมดา เนื่องจากเหล็กเสริมธรรมดาจะควบคุมการเพิ่มและการขยายของรอยแตกร้าว ส่งผลให้สติฟเนสของหน้าตัดเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ ตัวคูณจะลดลงเป็น C_2 ซึ่งหาได้จากสมการข้างล่าง

$$C_2 = \frac{C_1 + A_s / A_{ps}}{1 + A_s / A_{ps}} \tag{7.17}$$

โดยที่ C_1 = ตัวคูณ จากตารางที่ 7.1

A_s = พื้นที่ของเหล็กเสริมธรรมดา

A_{ps} = พื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 - ตัวคูณ C_1 สำหรับการแอ่นตัวและยกตัวในระยะยาว

	ไม่มีทับหน้าเชิงประกอบ	มีทับหน้าเชิงประกอบ
ขณะติดตั้ง :		
(1) ระยะยกตัว – เนื่องจากแรงอัดขณะถ่ายแรง	1.85	1.85
(2) ระยะยกตัว – เนื่องจากแรงอัดขณะถ่ายแรง	1.80	1.80
เมื่อใช้งาน :		
(3) ระยะแอ่นตัว – เนื่องจากน้ำหนักขององค์อาคารขณะถ่ายแรง	2.70	2.40
(4) ระยะยกตัว – เนื่องจากแรงอัดขณะถ่ายแรง	2.45	2.20
(5) ระยะแอ่นตัว – เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม	3.00	3.00
(6) ระยะแอ่นตัว – เนื่องจากน้ำหนักของทับหน้าเชิงประกอบ	-	2.30

7.5 พิกัดของระยะแอ่นตัว

มาตรฐานการออกแบบ ACI ระบุว่าระยะแอ่นตัวที่หามาได้จะต้องผ่านข้อกำหนดในด้านการใช้งานภายใต้สภาวะต่าง ๆ ขององค์อาคาร ตามระยะแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ในตารางที่ 7.3 การหาระยะแอ่นตัวและยกตัวในระยะยาวเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง เพราะการที่ระยะทั้งสองนี้เพิ่มขึ้นส่งผลให้หน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมสูงเกินพิกัดที่ยอมให้

AASHTO ได้กำหนดระยะแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ไว้ในตารางที่ 7.2 ซึ่งพิกัดนี้จะเข้มงวดมากกว่า ACI เพราะน้ำหนักบรรทุกที่เคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงกระแทกบนสะพาน

ตารางที่ 7.2 – ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นตัวที่คำนวณได้ (ℓ = ความยาวของช่วงที่ยาวกว่า)

ชนิดของสะพาน	ระยะแอ่นตัว	ยานพาหนะเท่านั้น	ยานพาหนะและคนเดินเท้า
ช่วงเดี่ยวหรือต่อเนื่อง	เบื้องต้น เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรและแรงกระแทก	$\frac{\ell}{800}$	$\frac{\ell}{1000}$
สะพานยื่น		$\frac{\ell}{300}$	$\frac{\ell}{375}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.3 – ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นตัวที่คำนวณได้ [วสท. ตาราง 4205(ข)]

ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแอ่นที่พิจารณา	พิกัดระยะแอ่น
หลังคาราบซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell}{180}$ *
พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell}{360}$
หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะ***เกิด***ความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (เป็นผลรวมของระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้างทั้งหมดและระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)***	$\frac{\ell}{480}$ **
หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะ***ไม่เกิด***ความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก		$\frac{\ell}{240}$ ****

* *พิกัดนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัว ดังนั้นจึงควรตรวจสอบการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัวด้วยวิธีการคำนวณที่เหมาะสม โดยให้รวมระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในแอ่ง ผลของน้ำหนักบรรทุกค้าง ระยะยกตัว รวมถึงความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างและข้อกำหนดสำหรับการระบายน้ำ*

** *พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ ถ้ามีมาตรการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ยึดติดหรือรองรับโดยโครงสร้าง*

*** *จะต้องหาระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลาตามข้อกำหนดใน วสท. 4205(ข)5 แต่อาจจะลดได้ด้วยระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งค่านี้จะต้องคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลทางวิศวกรรมที่ยอมรับ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของการแอ่นตัวตามเวลาขององค์อาคารที่คล้ายคลึงกับองค์อาคารที่พิจารณา*

**** *ต้องไม่มากกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ถ้ามีการเผื่อระยะยกตัว ทำให้ระยะแอ่นตัวทั้งหมดลบด้วยระยะยกตัวแล้วต้องไม่เกินค่าพิกัดในตาราง*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 7.5 – การแอ่นตัวและยกตัวระยะยาวโดยการใช้ตัวคูณของ PCI

กำหนดให้ f_{pi} = 13 286 กก./ซม.^{2} จงหาระยะยกตัวและแอ่นตัวในระยะยาวของคานรูปตัวที ในตัวอย่างที่ 7.3 โดยวิธีตัวคูณของ PCI และตรวจสอบว่าค่าที่ได้อยู่ภายในพิกัดของ ACI หรือไม่ ถ้าใช้การอัดแรงแบบดึงทีหลัง ให้ถือว่า f_{pi} = 13 286 กก./ซม.^{2} หลังจากการเข้าที่ของสมอยึดและหลังจากการกำจัดการเสื่อมลดเนื่องจากแรงเสียดทานด้วยการดึงลวดที่ปลายทั้งสองข้างของคานและดึงซ้ำเพื่อให้ได้แรงดึงสุทธิ f_{pi} = 13 286 กก./ซม.^{2} ก่อนการติดตั้ง และให้สมมติว่าชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างจะไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัว และให้ถือว่าน้ำหนักบรรทุกจรกระทำชั่วคราว ใช้ E_c = 294 353 กก./ซม.^{2} ในทุกขั้นตอน

$I_g = 3.68(10)^6$ ซม.^{4}

$w_D = 1440$ กก./ม.

$$\delta_D = \frac{5w\ell^4}{384E_{ci}I_g} = \frac{5(1440)(18)^4}{384(254\,917)(3.68)(10)^6}10^6 = 2.10 \text{ ซม.} \downarrow$$

$w_{SD} = 150$ กก./ม.

$$\delta_{SD} = \frac{5w\ell^4}{384E_cI_g} = \frac{5(150)(18)^4}{384(294\,353)(3.68)(10)^6}10^6 = 0.19 \text{ ซม.} \downarrow$$

$w_L = 1650$ กก./ม.

จากตัวอย่างที่ 7.3 จะเห็นว่าหน้าตัดไม่เกิดการแตกร้าว (f_t สูงสุด < f_r = 39 กก./ซม.^{2}) ดังนั้นใช้ $I_e = I_g$ จะได้

$$\delta_L = \frac{5w_L\ell^4}{384E_cI_g} = \frac{5(1650)(18)^4}{384(294\,353)(3.68)(10)^6}10^6 = 2.08 \text{ ซม.} \downarrow$$

ถ้าหน้าตัดเกิดการแตกร้าว จะต้องใช้โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล I_e แทน I_g

ใช้วิธีตัวคูณของ PCI หาระยะแอ่นตัว ณ เวลาติดตั้ง (30 วัน) และ ณ สภาวะการใช้งานระยะสุดท้าย (5 ปี) ตารางข้างล่างแสดงค่าเหล่านี้ซึ่งได้มาจากการใช้ตัวคูณในตารางที่ 7.1 ถ้าหน้าตัดมีพฤติกรรมเป็นเชิงประกอบหลังจากการติดตั้งและมีการค้ำยันระหว่างการเทคอนกรีตทับหน้า จะต้องโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบในการหาระยะแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจร ถ้ามีเหล็กเสริมธรรมดา As ในคานอัดแรงนี้ จะต้องใช้ตัวคูณ C_2 ที่ปรับลดค่าลงมาจาก C_1 ด้วยสมการ

$$C_2 = \frac{C_1 + A_s / A_{ps}}{1 + A_s / A_{ps}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.4 – ระยะแอ่นตัวและยกตัวตามเวลา โดยวิธีตัวคูณ PCI

น้ำหนักกระทำ	ขณะถ่ายแรง δ_p	C_1	ขณะติดตั้ง δ_{er}	C_1	ระยะสุดท้าย δ_{net}
	(1)		(2)		(3)
การอัดแรง	4.15 ซม. ↑	1.80	7.47 ซม. ↑	2.45	10.17 ซม. ↑
w_D	2.10 ซม. ↓	1.85	3.89 ซม. ↓	2.70	5.67 ซม. ↓
รวม	2.05 ซม. ↑		3.58 ซม. ↑		4.50 ซม. ↑
w_{SD}			0.19 ซม. ↓	3.00	0.57 ซม. ↓
รวม			3.39 ซม. ↑		3.93 ซม. ↑
w_L					2.08 ซม. ↓
รวมทั้งหมด	2.05 ซม. ↑		3.39 ซม. ↑		1.85 ซม. ↑

ในตัวอย่างนี้ ถ้าสมมติให้ใช้เหล็กเสริมธรรมดาขนาด 16 มม. จำนวน 3 เส้น จะได้

$A_s/A_{ps} = 3(2.01)/15.8 = 0.38$ และ $C_2 = \frac{2.45+0.38}{1+0.38} = 2.05$

ซึ่งจะทำให้ได้ระยะยกตัวหลังจาก 5 ปีเท่ากับ 4.15(2.05) = 8.51 ซม. แทนที่จะเป็น 4.15(2.45) = 10.17 ซม. การปรับค่าอื่น ๆ ก็จะทำได้โดยวิธีเดียวกัน

จากตารางข้างบน จะเห็นว่าระยะยกตัวหลังจากการติดตั้งและภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม ที่ 30 วัน = 3.39 ซม. และหลังจาก 5 ปี = 1.85 ซม. โดยมีระยะแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร = 2.08 ซม.

พิกัดของระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ = $\frac{\ell}{240}$ = 18(100)/240 = 7.5 ซม. > 1.85 ซม. ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8

ระบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสองทาง

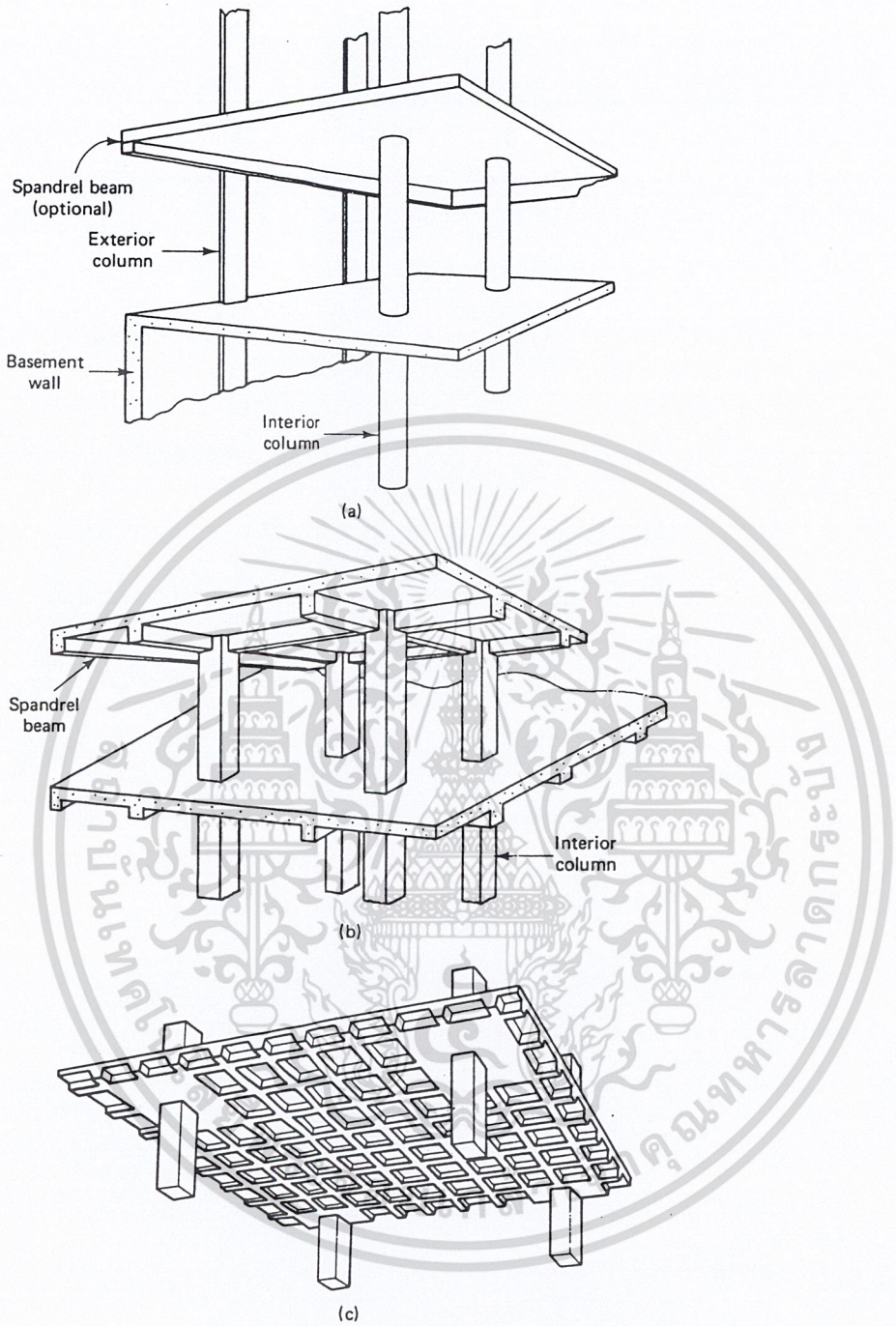
8.1 คำนำ

โดยทั่วไประบบแผ่นพื้นมักจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ จะจัดว่าเป็นระบบสองทางเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของแผ่นพื้นน้อยกว่าสอง รูปที่ 8.1 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของระบบแผ่นพื้นซึ่งประกอบด้วย (a) แผ่นพื้นไร้คาน ซึ่งจะใช้เสารองรับแผ่นพื้นโดยตรง (b) แผ่นพื้นรองรับด้วยคานทุกแนว และ (c) ระบบแผ่นพื้นแบบกระทง การวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นเหล่านี้ ประกอบด้วยการหา (1) กำลังรับโมเมนต์ (2) กำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อระหว่างแผ่นพื้นและเสา และ (3) พฤติกรรมระหว่างใช้งาน ซึ่งจะอยู่ในรูปของการควบคุมระยะแอ่นตัวและการแตกร้าว

การออกแบบระบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบต่อเนื่องสองทางจะใช้หลักการเดียวกับที่ใช้ในการออกแบบระบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก จะแตกต่างกันก็ตรงวิธีในการก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งจะใช้การหล่อแผ่นพื้นก่อนและจึงอัดแรงทีหลัง ทำให้พอจะมองเห็นได้ว่า แผ่นพื้นในรูปที่ 8.1(b) และ 8.1(c) คงจะไม่เหมาะสมกับคอนกรีตอัดแรง บางครั้งอาจจะใช้พื้นสำเร็จสองทางหล่อที่หน้างาน ซึ่งเรียกว่า *ระบบยกตั้ง (lift slabs)* ระบบนี้จะก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและประหยัดกว่าระบบหล่อในที่แล้วอัดแรงทีหลัง แต่ก็ต้องใช้ความชำนาญในการก่อสร้างมิฉะนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายได้

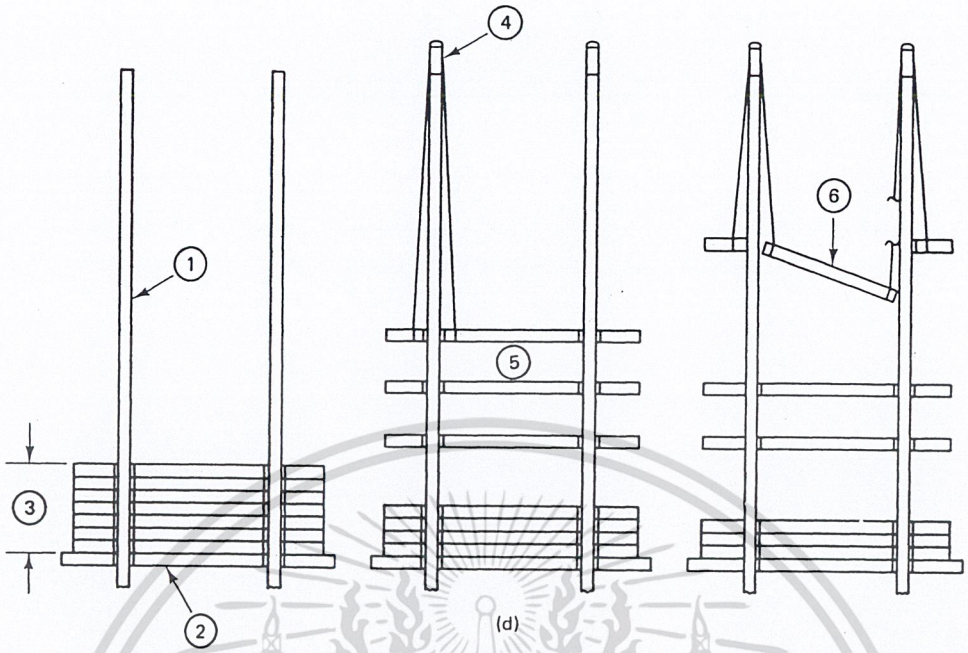
ขั้นตอนในการก่อสร้างแผ่นพื้นระบบยกตั้ง ประกอบด้วยการหล่อแผ่นพื้นที่ระดับพื้น โดยหล่อทับกันทำให้แผ่นพื้นชั้นล่างทำหน้าที่เป็นไม้แบบสำหรับแผ่นพื้นชั้นถัดขึ้นมา จะแยกการหล่อแต่ละชั้นด้วยแผ่นพลาสติกหรือพ่นด้วยสารเคมี เสาซึ่งอาจจะเป็นเหล็กหรือคอนกรีตจะถูกติดตั้งก่อนการเทแผ่นพื้น โดยเสาจะยาวจนถึงความสูงของอาคาร แผ่นพื้นจะมีแถบเหล็กล้อมรอบเพื่อใช้ในการยก จะวางแม่แรงบนยอดเสาแล้วห้อยลวดสลิงลงมาตามขอบเสาจนมายึดติดกับแถบเหล็กที่ฝังในแผ่นพื้น การยกจะต้องพยายามให้แผ่นพื้นในแนวนอนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการสูญเสียความสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.1 – ระบบแผ่นพื้นสองทาง (a) แผ่นพื้นไร้คาน (b) แผ่นพื้นรองรับด้วยคานรอบ (c) แผ่นพื้นแบบกระทง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.1(ต่อ) – ระบบแผ่นพื้นยกตั้ง

8.2 พฤติกรรมของแผ่นพื้นสองทางภายใต้แรงดัด

รูปที่ 8.2 แสดงแผ่นพื้นไม่ต่อเนื่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารองรับทั้งสี่ด้านด้วยฐานรองรับที่คงรูป เช่น ผนังรับแรงเฉือนหรือคานที่มีสติฟเนสสูงมาก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกโน้มถ่วง แผ่นพื้นจะแอ่นตัวเป็นรูปเหมือนจาน และมุมจะกระดกขึ้นถ้าไม่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับฐานรองรับ เส้นระดับของการแอ่นตัวในรูปที่ 8.2(a) แสดงให้เห็นว่าโมเมนต์ในส่วนกลาง C จะมีค่าในแนวสั้น y สูงกว่าในแนวยาว x

การหาสัดส่วนของโมเมนต์ในแนวสั้นและแนวยาวจะเป็นไปได้ยากมาก เพราะพฤติกรรมของแผ่นพื้นจะเป็นในแบบอินดีเทอมิเนตหลายขั้น วิธีที่ง่ายก็คือการพิจารณาแถบ AB และ DE ที่กลางช่วง ตามที่แสดงในรูปที่ 8.2(b) ซึ่งจะเห็นว่าระยะแอ่นตัวที่จุดกลาง C ของทั้งสองแถบต้องเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะแอ่นตัวที่กลางช่วงของคานช่วงเดี่ยวภายใต้น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายคงที่เท่ากับ $5w\ell^4/384EI$ หรือในรูปแบบที่ง่าย $\Delta = kw\ell^4$ โดยที่ k เป็นค่าคงที่ ถ้าแถบกลางทั้งสองในรูปที่ 8.2(b) หนาเท่ากัน ระยะแอ่นตัวของแถบ AB จะเท่ากับ $kw_{AB}L^4$ และของแถบ DE เท่ากับ $kw_{DE}\ S^4$ โดยที่ w_{AB} และ w_{DE} เป็นส่วนของน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายที่กระทำบนแถบ AB และแถบ DE โดยที่ $w = w_{AB} + w_{DE}$ ให้ระยะแอ่นตัวจากทั้งสองแถบนั้นเท่ากันจะได้

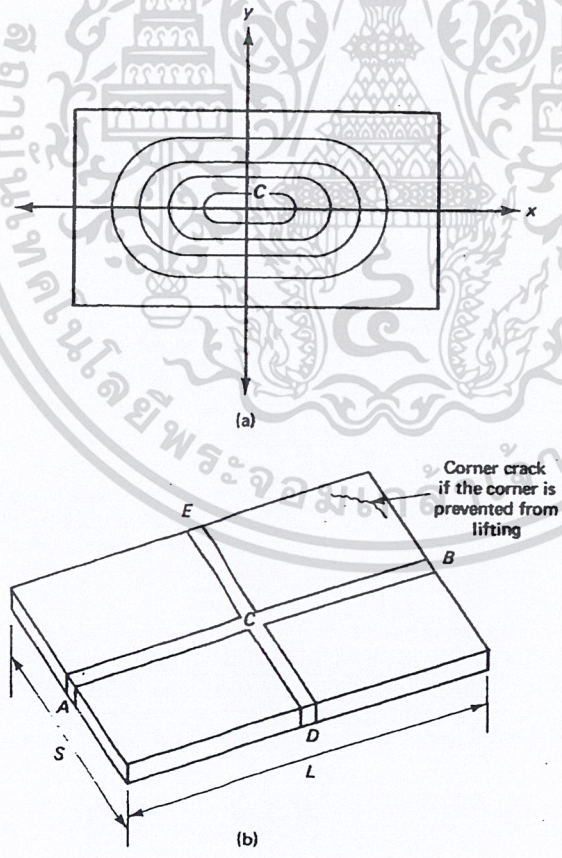
$$w_{AB} = \frac{wS^4}{L^4 + S^4} \tag{9.1a}$$

และ

$$w_{DE} = \frac{wL^4}{L^4 + S^4} \tag{9.1b}$$

จะเห็นว่าด้านสั้น S ของแถบ DE จะต้องรับน้ำหนักในส่วนที่มากกว่า ดังนั้นด้านสั้นของแผ่นพื้นที่รองรับด้วยฐานที่คงรูปจะต้องรับโมเมนต์สูงกว่าด้านยาว

แต่ในความเป็นจริงแล้ว ฐานรองรับที่คงรูปจะหาได้ยาก ส่วนมากแผ่นพื้นจะรองรับด้วยคานหรือเสาซึ่งมีความยืดหยุ่น อัตราส่วนของสติฟเนสของคานต่อสติฟเนสของแผ่นพื้นจะส่งผลให้เกิดการกระจายโมเมนต์ซ้ำ ทำให้อัตราส่วนของโมเมนต์ที่รับโดยแผ่นพื้นด้านสั้นต่อด้านยาวเปลี่ยนแปลงไปบ้างจากสมมติฐานข้างบน

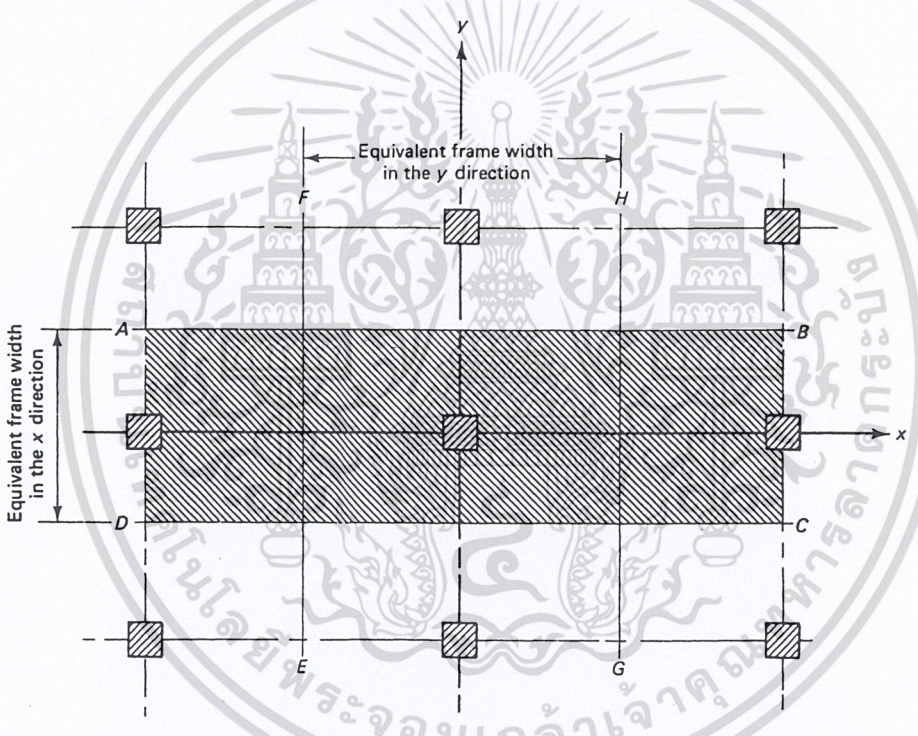


รูปที่ 8.2 – การแอ่นตัวของแผ่นพื้นและแถบ (a) เส้นระดับของระยะแอ่นตัว (b) แถบกลางในแผ่นพื้นสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า

มาตรฐานการออกแบบสมมติให้ใช้ระนาบดิ่งตัดผ่านโครงสร้างระหว่างช่วงเสาตามแนว AB และ CD ในรูปที่ 8.3 ทำให้ได้โครงข้อแข็งสองมิติตามแนว x ในทำนองเดียวกันระนาบดิ่งตามแนว EF และ HG ก็จะทำให้ได้โครงข้อแข็งสองมิติตามแนว y โครงข้อแข็งเทียบเท่าจะประกอบด้วยคานในแนวนอนหรือแผ่นพื้นเทียบเท่าและเสา ทำให้ออกแบบแผ่นพื้นได้เสมือนกับเป็นคานซึ่งเป็นส่วนของโครงข้อแข็ง วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่าจะใช้การวิเคราะห์โครงทั้งตัวด้วยวิธีการกระจายโมเมนต์ซ้ำหลายขั้นตอนทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีคำนวณออกแบบโดยตรงซึ่งจะใช้การกระจายโมเมนต์เพียงขั้นตอนเดียว และข้อจำกัดทั้งหลายก็มีน้อยกว่าวิธีคำนวณออกแบบโดยตรงตามที่แสดงข้างล่าง



รูปที่ 8.3 – แปลนของโครงข้อแข็งเทียบเท่า (พื้นที่แรเงาแสดงโครงเทียบเท่าในแนว x)

8.3.1 ข้อจำกัดของวิธีออกแบบโดยตรง

ระบบแผ่นพื้นที่อยู่ในข้อจำกัดดังต่อไปนี้ อาจใช้วิธีคำนวณออกแบบโดยตรงได้

1. ต้องมีช่วงอย่างน้อยสามช่วงต่อเนื่องกันในแต่ละทิศทาง
2. แผงพื้นต้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนของช่วงที่ยาวกว่าต่อช่วงที่สั้นกว่าโดยวัดจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของที่รองรับที่อยู่ภายในแผงไม่มากกว่า 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความยาวช่วงของแผ่นพื้นที่อยู่ติดกันวัดจากศูนย์กลางของที่รองรับในแต่ละทิศทางต่างกันได้ไม่เกิน 1/3 ของช่วงที่ยาวกว่า

4. ตำแหน่งของเสาอาจเยื้องกันได้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 10 ของช่วงในทิศทางที่เยื้องนั้นในแต่ละแกน โดยวัดจากเส้นแกนที่ลากระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาที่อยู่ติดกัน

5. น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดต้องเป็นน้ำหนักในแนวดิ่งเท่านั้น และต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผงพื้น และน้ำหนักบรรทุกจรต้องไม่เกิน 3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่

6. สำหรับแผงพื้นที่มีคานอยู่ระหว่างที่รองรับทุกด้าน ค่าสติฟเนสสัมพัทธ์ของคานในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน $\alpha_1\ell_2^2/\alpha_2\ell_1^2$ ต้องไม่น้อยกว่า 2.0 และต้องไม่มากกว่า 5.0 โดยที่ α_1 เป็นอัตราส่วนของสติฟเนสของหน้าตัดคานต่อสติฟเนสของหน้าตัดแผ่นพื้น ซึ่งมีความกว้างเท่ากับระยะระหว่างเส้นกึ่งกลางของแผงพื้นที่อยู่ติดกัน (ถ้ามี) ในแต่ละข้างของคาน = $E_{cb}I_b/E_{cs}I_s$ ในทิศทางของ ℓ_1 โดยที่ตัวห้อย b ใช้แทนคานและ s ใช้แทนแผ่นพื้น

จากข้อจำกัดข้างบน จะเห็นว่าควรจะใช้วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่าในการวิเคราะห์แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

8.3.2 การหาโมเมนต์สถิต M_o

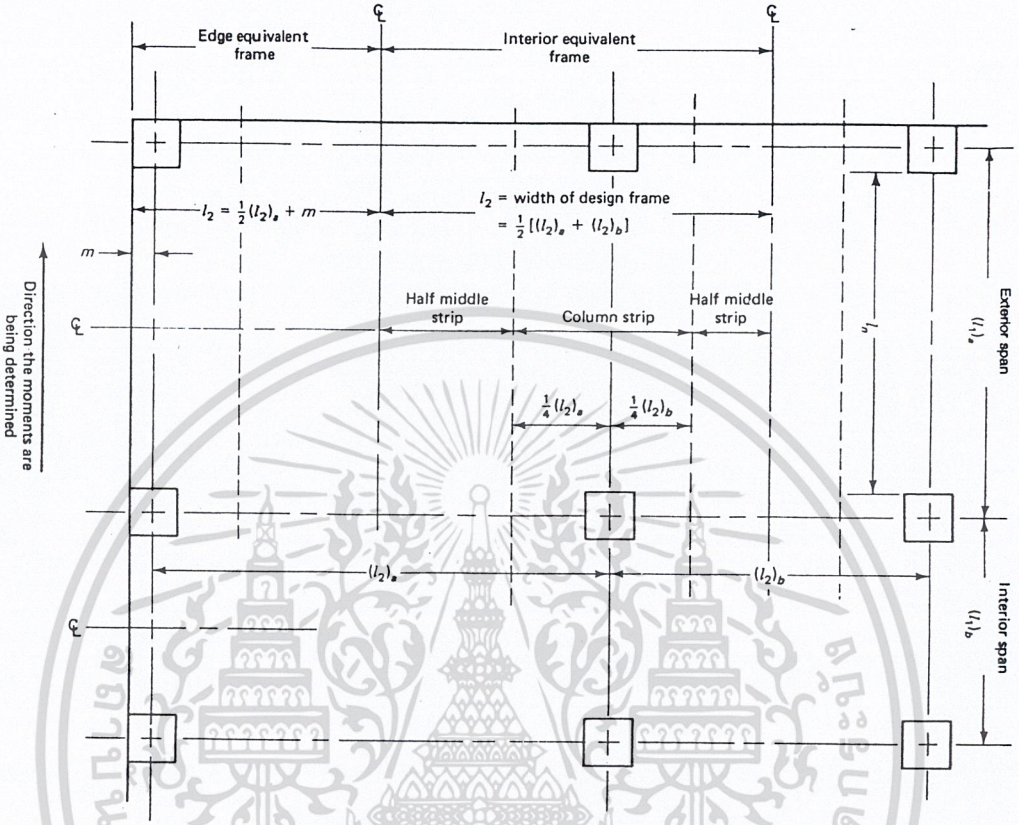
การออกแบบแผ่นพื้นแบ่งเป็นสี่ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

1. หาโมเมนต์สถิตทั้งหมดในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน
2. กระจายโมเมนต์สถิตทั้งหมดออกเป็นโมเมนต์ลบและบวก
3. กระจายโมเมนต์ลบและบวกไปยังแถบเสา แถบกลาง และคาน แถบเสามีความกว้างเป็นร้อยละ 25 ของความกว้างของโครงข้อแข็งเทียบเท่าบนแต่ละด้านของแนวเสา และแถบกลางเป็นส่วนที่เหลือ
4. หาปริมาณเหล็กเสริมและจัดเหล็กเสริมในแนวของสองทิศทางตามข้อ 1

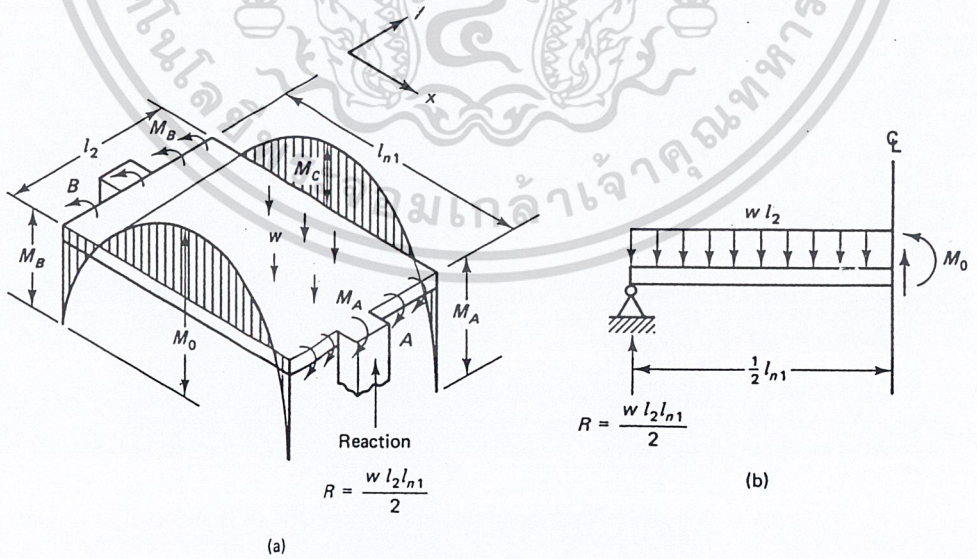
จากขั้นตอนข้างบน จะเห็นว่าจุดประสงค์หลักก็คือการหาค่าโมเมนต์ที่กระจายออกไป ถ้าพิจารณาแผ่นพื้นภายในจากรูปที่ 8.4 ซึ่งมีความยาวช่วง ℓ_1 ในทิศทางที่จะหาโมเมนต์ และ ℓ_2 ในทิศทางตั้งฉากกับ ℓ_1 ความยาวช่วงว่าง ℓ_n เป็นความยาวช่วงในทิศทางที่ใช้หาโมเมนต์วัดจากขอบถึงขอบของเสา หมวกหัวเสา หรือผนัง ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.65\ell_1$ และถ้าฐานรองรับเป็นทรงกลมก็จะต้องแปลงให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่เท่ากัน ในคานช่วงเดี่ยวรองรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายคงที่ โมเมนต์สถิตทั้งหมด $M_o = w\ell_1^2/8$ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงระบบแผ่นพื้นสองทางเป็นโครงข้อแข็งเทียบเท่า ทำให้สามารถหา M_o ได้ในแนว x และหา M_o ได้อีกค่าในแนวตั้งฉาก y



รูปที่ 8.4 – เสาและแถบกลางของโครงข้อแข็งเทียบเท่า



รูปที่ 8.5 – พื้นภายในระบบแผ่นพื้นสองทาง (a) โมเมนต์ในแนว x. (b) Free-body diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณา free-body diagram ของแผ่นพื้นภายในตามที่แสดงในรูปที่ 8.5(a) ความสมมาตรจะทำให้แรงเฉือนและแรงบิดลดลงจนเป็นศูนย์ตามสองข้างของแนวตัด ถ้าไม่มีความต่อเนื่องที่ปลาย A และ B จะจัดได้ว่าเป็นแผ่นพื้นช่วงเดี่ยวทางเดียว มีความยาวช่วงว่างเป็น ℓ_n ถ้าตัดหน้าตัดผ่านกลางแผ่นพื้นตามรูปที่ 8.5(b) จะได้โมเมนต์ M_o ที่กลางช่วงเป็น

$$M_o = \frac{w\ell_2\ell_{n1}}{2}\frac{\ell_{n1}}{2} - \frac{w\ell_2\ell_{n1}}{2}\frac{\ell_{n1}}{4} = \frac{w\ell_2(\ell_{n1})^2}{8} \qquad (8.3)$$

แต่เนื่องจากมีความต่อเนื่องที่ฐานรองรับ จะต้องกระจาย M_o ในแนว x ไปยังฐานรองรับและกลางช่วง ทำให้ได้

$$M_o = M_c + \frac{1}{2}(M_A + M_B) \qquad (8.4a)$$

ค่าของการกระจายจะขึ้นอยู่กับสติฟเนสของฐานรองรับ ในทำนองเดียวกัน M_o ในแนว y ก็จะเป็นผลรวมของโมเมนต์ที่กลางช่วงบวกกับค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ที่ฐานรองรับในทิศทางนั้น

ดังนั้นในทิศทางที่ตั้งฉาก สมการที่ 8.4a จะกลายเป็น

$$M_o' = M_c' + \frac{1}{2}(M_A' + M_B') \qquad (8.4b)$$

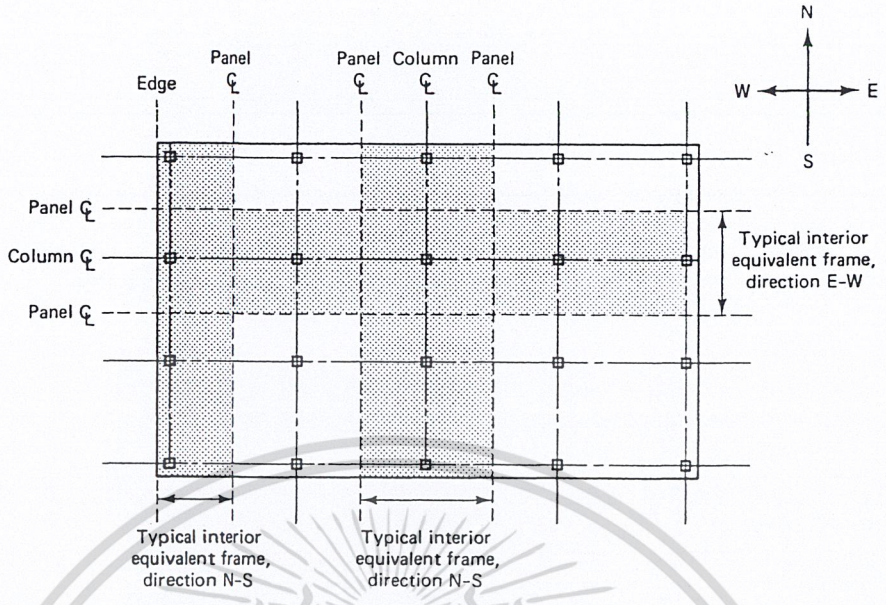
โดยที่ M_o', M_A', M_B' และ M_C' จะมีทิศทางตั้งฉากกับ M_o, M_A, M_B และ M_C ตามลำดับ และจากสมการที่ 8.3 จะได้

$$M_o' = \frac{w\ell_1(\ell_{n2})^2}{8} \qquad (8.5)$$

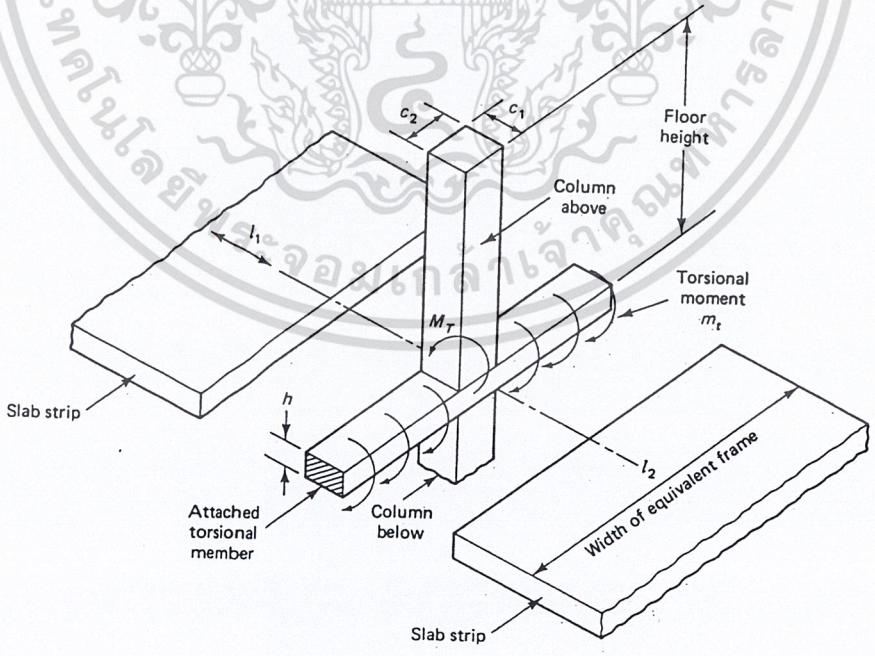
8.3.3 การวิเคราะห์โดยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า

จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นโครงข้อแข็งต่อเนื่องได้ในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันตามที่แสดงในรูปที่ 8.6 โครงข้อแข็งจะประกอบด้วยแถวของเสาและคานกว้างต่อเนื่อง (แผ่นพื้น) ABCDE เพื่อรับน้ำหนักโน้มถ่วง จะวิเคราะห์โครงแต่ละชั้นแยกจากกัน โดยยึดปลายเสาแน่นที่ชั้นบนและชั้นล่างถัดไป จะต้องตรวจสอบโครงทุกตัวภายใต้สภาวะวิกฤติอันอาจจะเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด หรือภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรกระทำสลับช่วง จะต้องรวมผลของความต้านทานต่อการหมุนของเสาในการกระจายโมเมนต์ ยกเว้นในกรณีที่เสามีความชะลูดมากจนถือว่ามีสติฟเนสน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับสติฟเนสของแผ่นพื้น เช่น ในกรณีของระบบแผ่นพื้นยกตั้ง จะไม่รวมเสาในการวิเคราะห์ จะถือว่าโครงเทียบเท่าเป็นคานต่อเนื่องอย่างเดียว รูปที่ 8.7 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงข้อแข็งเทียบเท่า แผ่นพื้นในแนวขวางที่เสาจะรับแรงบิด M_T และแนวริมของแถบแผ่นพื้นจะหมุนตัวมากกว่าบริเวณกลางเนื่องจากการบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 – การแบ่งโครงข้อแข็งเทียบเท่าจากโครงสร้างจริง (a) แปลน (b) รูปตัดในแนว E-W



รูปที่ 8.7 – องค์ประกอบของโครงข้อแข็งเทียบเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อรวมผลของการหมุนตัวและการบิดนี้ จะแทนที่เสาจริงและแผ่นพื้นในเสาเทียบเท่า โดยให้ flexibility ของเสาเทียบเท่าเท่ากับผลรวมของ flexibility ของเสาจริงและแผ่นพื้นในแนวขวาง ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_{ec}} = \frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t} \tag{8.6}$$

โดยที่ K_{ec} = สติฟเนสของเสาเทียบเท่า

$\sum K_c$ = ผลรวมของเสาด้านบนและด้านล่างของข้อต่อ

K_t = สติฟเนสต้านแรงบิดของแผ่นพื้นในแนวเสา

ซึ่งจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$K_{ec} = \frac{\sum K_c}{1 + \frac{\sum K_c}{K_t}} \tag{8.7}$$

และจะหาสติฟเนสของเสาในโครงข้อแข็งเทียบเท่าได้จาก

$$K_c = \frac{EI}{\ell'}\left[1 + 3\left(\frac{L}{L'}\right)^2\right] \tag{8.8}$$

โดยที่ I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของเสา L เป็นความยาวช่วง และ L' เป็นช่วงว่างของคานเทียบเท่า carryover factor จะใช้ค่าประมาณเป็น $-\frac{1}{2}(1 + 3h/L)$

อาจจะแทนสมการที่ 8.8 ด้วยสมการที่ง่ายกว่าและให้ผลแตกต่างไม่เกินร้อยละ 5 ตามข้างล่าง

$$K_c = \frac{4EI}{H - 2h} \tag{8.9}$$

และจะหาสติฟเนสต้านแรงบิดของแผ่นพื้นในระนาบของเสาได้จาก

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{L_2\left(1 - \frac{c_2}{L_2}\right)^3} \tag{8.10a}$$

โดยที่ L_2 = ความกว้างของแถบออกแบบ, H = ความสูงของเสา, c_2 = ขนาดของเสาในทิศทางขนานกับคานรับแรงบิด และค่าคงที่ของแรงบิด C หาได้จากสมการข้างล่าง

$$C = \sum (1 - 0.63\frac{x}{y})\frac{x^3 y}{3} \tag{8.10b}$$

โดยที่ x = มิติของด้านที่สั้นกว่าของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยของหน้าตัดมี่ข้อต่อของเสา (เช่น ความหนาของแผ่นพื้น)

y = มิติของด้านที่ยาวกว่าของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยของหน้าตัดที่ข้อต่อของเสา (เช่น ความกว้างของเสา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะหาสติฟเนสของแผ่นพื้นได้จาก

$$K_s = \frac{4E_{cs}I_s}{L_1 - \frac{c_1}{2}} \tag{8.11}$$

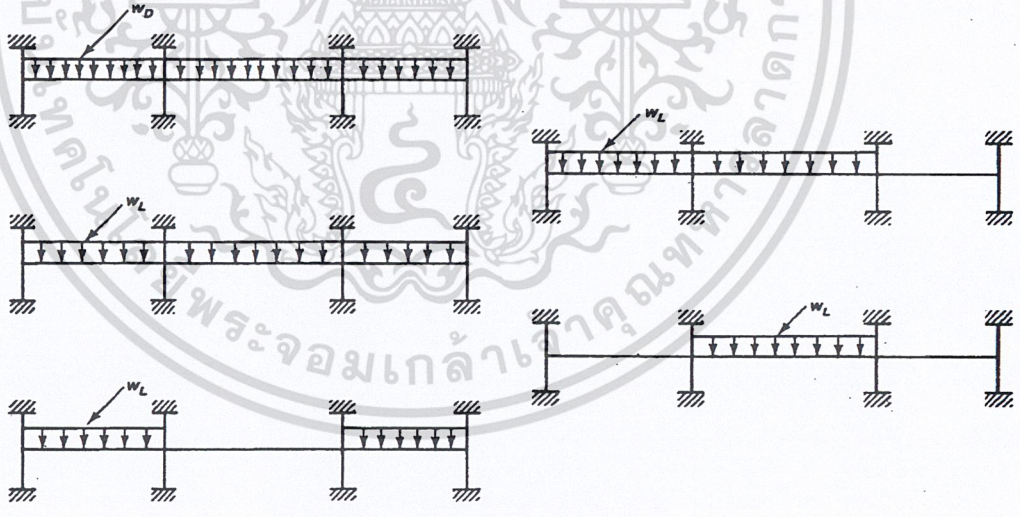
หลังจากที่หาสติฟเนสของเสาเทียบเท่าและสติฟเนสของแผ่นพื้นได้แล้ว ก็จะทำการวิเคราะห์โครงข้อแข็งเทียบเท่าด้วยวิธีกระจายโมเมนต์ โดยใช้ตัวคูณการกระจายสำหรับโมเมนต์ที่ปลายยึดแน่น FEM เป็น

$$DF = \frac{K_s}{\sum K} \tag{8.12}$$

โดยที่ $\sum K = K_{ec} + K_{s(left)} + K_{s(right)}$ และใช้ COF ≈ ½ โมเมนต์ที่ปลายยึดแน่นเหนือฐานรองรับ FEM ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายคงที่ มีค่าเท่ากับ $w\ell_2\ell_n^2/12$ และหลังจากสิ้นสุดการกระจายโมเมนต์ ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์เหนือฐานรองรับและที่กลางช่วงจะต้องรวมกันเท่ากับโมเมนต์สถิต $M_o = w\ell_2\ell_n^2/8$ เสมอ

8.3.4 การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร

การวางน้ำหนักบรรทุกบนช่วงพร้อมกัน อาจจะไม่ทำให้เกิดโมเมนต์บวกหรือโมเมนต์ลบสูงสุดก็ได้ ดังนั้นจะต้องวิเคราะห์โครงซึ่งมีหลายช่วงด้วยการวางน้ำหนักบรรทุกจรช่วงเว้นช่วงตามที่แสดงในรูปข้างล่าง แล้วตรวจสอบหากรณีของการกระทำร่วมกับน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่วิกฤตที่สุด



รูปที่ 8.8 – การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร

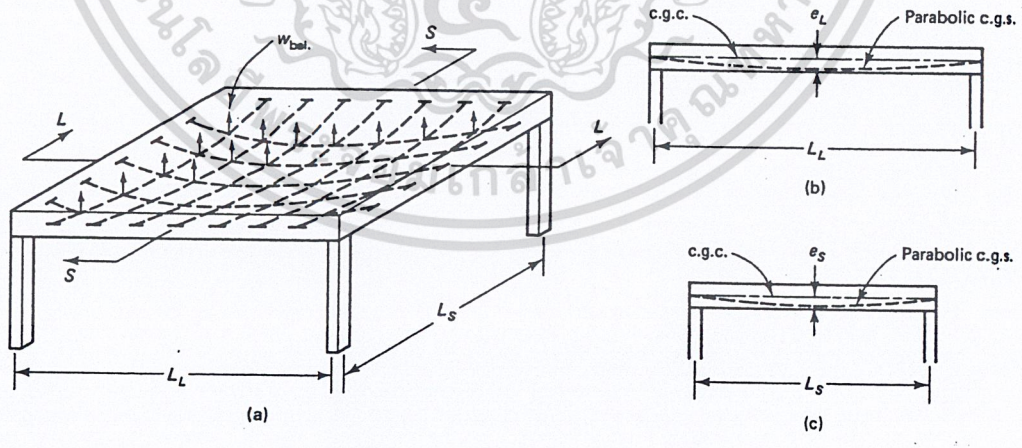
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 แรงพยุงสองทิศทาง

ตามที่กล่าวในบทที่ 1 ว่า แรงพยุงซึ่งเป็นองค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงแบบหักงอหรือพาราโบล่า จะต้านน้ำหนักบรรทุกกระทำในแนวโน้มถ่วง ในสมการที่ 8.3 ถึง 8.5 หน่วยน้ำหนัก w เป็นหน่วยน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำในแนวดิ่งซึ่งอาจจะเป็นน้ำหนักบรรทุกใช้งาน w_w หรือน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว w_u แล้วแต่ในกรณีของการวิเคราะห์ หน่วยแรงพยุงในแผ่นพื้นเนื่องจากการอัดแรงจะต้านผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก และถ้าจัดได้ลงตัวก็จะต้านน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้พอดี ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดทั้งแรงอัดและแรงบิดในระบบแผ่นพื้นสองทางภายใต้สภาวะนี้

แรงพยุงสองในแผ่นพื้นสองทางจะแตกต่างจากแรงพยุงในแนวเดียวของคาน แรงพยุงเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงในทิศทางหนึ่งอาจจะทำให้แรงพยุงเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงในทิศทางตั้งฉากเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งก็หมายความว่าผลของแรงอัดและแนวของเหล็กเสริมอัดแรงในแต่ละแนวมีผลต่อกัน ดังนั้นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพที่สุดก็คือการทำให้องค์ประกอบในแนวดิ่งของเหล็กเสริมอัดแรงต้านน้ำหนักบรรทุกได้พอดี ซึ่งจะเรียกการออกแบบในกรณีนี้ว่า *การออกแบบสมดุล*

รูปที่ 8.9 แสดงระบบแผ่นพื้นอัดแรงสองทางรองรับด้วยฐานรองรับซึ่งมีสติฟเนสสูง เช่น ผนัง ความยาวช่วงในด้านสั้นเป็น S และด้านยาวเป็น L หน่วยแรงพยุงที่จะทำให้เกิดสภาวะสมดุลตามที่หามาจากสมการที่ 1.15a จะได้เป็น



รูปที่ 8.9 – แรงพยุงในแผ่นพื้นอัดแรงสองทาง (a) ภาพแสดงแผ่นพื้น (b) รูปตัด L-L ในแนวยาว (c) รูปตัด S-S ในแนวสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w_{bal(s)} = \frac{8P_s e_s}{S^2} \qquad (8.13a)$$

และ $$w_{bal(L)} = \frac{8P_L e_L}{L^2} \qquad (8.13b)$$

โดยที่ P_S และ P_L เป็นแรงดึงประสิทธิผลต่อหน่วยความกว้างของแผ่นพื้นหลังจากการเสื่อมลดทั้งหมดในทิศทาง S และ L โดยมีระยะเยื้องศูนย์สูงสุดของแนวเหล็กเสริมอัดแรงในทิศทางทั้งสองเป็น e_S และ e_L

ดังนั้นจะได้แรงพยุงต่อหน่วยความกว้างรวมเป็น

$$w_{bal} = w_{bal(s)} + w_{bal(L)} = \frac{8P_s e_s}{S^2} + \frac{8P_L e_L}{L^2} \qquad (8.14)$$

ถ้าแผ่นพื้นรองรับด้วยคานหรือผนัง จะประหยัดที่สุดถ้าให้ด้านสั้นรับน้ำหนักแต่ด้านเดียว หรือถ้าเป็นแผ่นพื้นจัตุรัส ก็จะได้ w/2 ถ่ายลงแต่ละด้าน แผ่นพื้นหนา h ซึ่งอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุก w_{bal} และอัดแรงด้วยแรง P_S และ P_L จะอยู่ภายใต้หน่วยแรงคงที่ P_S/h และ P_L/h ในแต่ละทิศทาง ในกรณีนี้จะไม่เกิดการยกตัวหรือการแอ่นตัว

แผ่นพื้นอัดแรงสองทาง มักจะเป็นแผ่นพื้นไร้คานที่รองรับด้วยเสา น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจะถูกรับในสองทิศทางด้วยเหล็กเสริมอัดแรงเป็นแถบ (banded tendons) โดยจะมีเหล็กเสริมหนาแน่นในบริเวณแถบเสา

ถ้าจะพยายามให้ไม่เกิดการแอ่นตัวหรือยกตัวและให้ได้หน่วยแรงคงที่ จะได้แรงอัดที่ไม่ประหยัดนัก ดังนั้นผู้ออกแบบมักจะออกแบบให้ได้แรงพยุง $w_{bal} < w_D + w_L$ สำหรับระบบแผ่นพื้นต่อเนื่อง ตามที่แสดงในตัวอย่างที่ 8.2 ถ้าหน่วยแรง $w_w = w_D + w_L$ มากกว่า w_{bal} จากสมการที่ 8.14 จะทำให้เกิดหน่วยโมเมนต์ M_S และ M_L ขึ้นในสองทิศทาง

จะหาหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักที่ไม่สมดุลทั้งในแนวสั้นและแนวยาว ได้จากการรวมหน่วยแรงอัดคงที่เนื่องจากน้ำหนักที่สมดุลกับหน่วยแรงดัดในคอนกรีตเนื่องจากโมเมนต์ M_S และ M_L ที่เกิดจากน้ำหนักที่ไม่สมดุล ทำให้ได้หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนและล่างในแต่ละทิศทางดังต่อไปนี้

- ด้านสั้น

$$f^t = -\frac{P_S}{bh} - \frac{M_s c}{I_s} \qquad (8.15a)$$

$$f_b = -\frac{P_S}{bh} + \frac{M_s c}{I_s} \qquad (8.15b)$$

- ด้านยาว

$$f^t = -\frac{P_L}{bh} - \frac{M_L c}{I_L} \qquad (8.16a)$$

$$f_b = -\frac{P_L}{bh} + \frac{M_L c}{I_L} \qquad (8.16b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ c = h/2 ความกว้าง b = 100 ซม. และหน่วยแรงอัด P_S = (P_S ทั้งหมด)/L และ P_L = (P_L ทั้งหมด)/S

สัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่ใช้ในการหา M_S และ M_L ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน จะหาได้จากแผนภาพในรูปที่ 8.10 ซึ่งจะให้ค่าโมเมนต์บวกและลบสูงสุด โดยที่ βx_2 และ βx_2' ใช้กับ +M และ –M ในด้านสั้น L_x ในทำนองเดียวกัน βy_2 และ βy_2' ใช้กับ +M และ –M ในด้านยาว L_y แผนภาพในรูปที่ 8.11 ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ในแผ่นพื้นสองทางต่อเนื่อง

8.5 กำลังดัดของแผ่นพื้นอัดแรง

โมเมนต์ที่ใช้การออกแบบสำหรับองค์อาคารอัดแรงแบบมีการยึดเหนี่ยว จะหาได้จากการรวมโมเมนต์จากการกระจายโมเมนต์ M_u เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว กับโมเมนต์รอง M_s เนื่องจากแรงอัดจากเหล็กเสริมอัดแรง วิธีแรงพยุงในบทที่แล้วจะรวมทั้งโมเมนต์หลัก M_1 และโมเมนต์รอง M_s ดังนั้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน จะใช้เพียงน้ำหนักสุทธิ M_{net} ในการหาโมเมนต์ที่ปลายยึดแน่น ในระหว่างที่จะใช้ w_{bal} ในการวิเคราะห์หากำลังอัด

ถ้าให้ $M_1 = P_e e = Fe$ เป็นโมเมนต์หลัก, M_{bal} เป็นโมเมนต์สมดุลเนื่องจาก w_{bal}, M_s เป็นโมเมนต์รอง = M_{bal} - M_1 และ $\overline{M}_u$ เป็นโมเมนต์ที่ปลายยึดแน่นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณแล้ว w_u ดังนั้นโมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบ M_u จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าผลต่างของ $\overline{M}_u$ หลังจากการกระจายแล้วกับ M_s

$$M_u = \overline{M}_u \text{ หลังจากการกระจายแล้ว} - M_s \qquad (8.17)$$

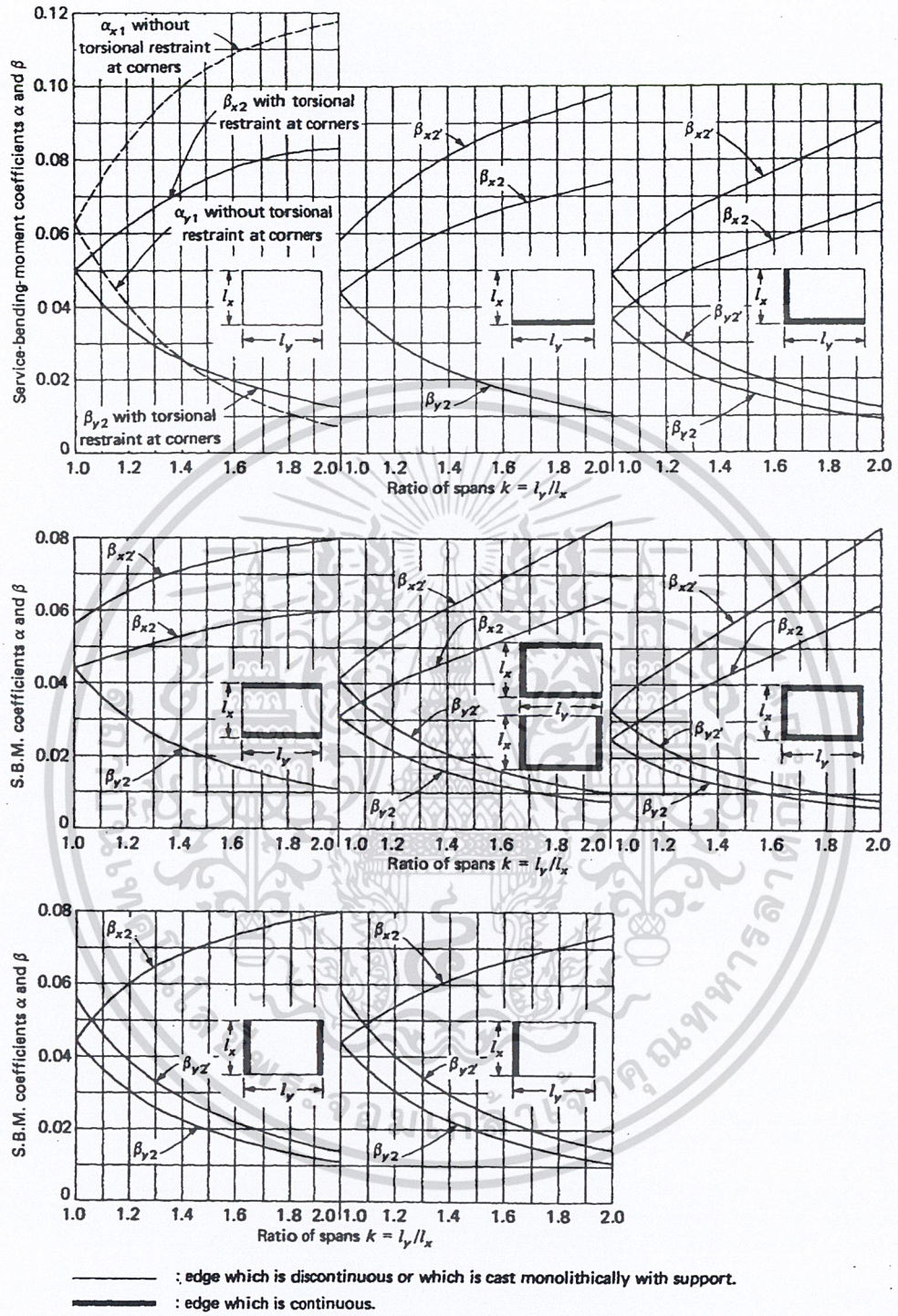
ทำให้ได้กำลังระบุ $M_n = M_u/\phi$

เนื่องจากความต่อเนื่อง จะหา M_n ที่กลางช่วงได้ โดยใช้การกระจายซ้ำของ M_n ที่ฐานรองรับซึ่งได้หามาจากกระจายโมเมนต์ ถ้ามีปริมาณเหล็กเสริมเพื่อการยึดเหนี่ยวที่ฐานรองรับไม่น้อยกว่าปริมาณน้อยสุดที่ต้องมีตามสมการที่ 8.19 และ 8.20 จะยอมให้กระจายซ้ำโมเมนต์ลบที่หามาได้จากการวิเคราะห์ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ไม่เกินปริมาณที่กำหนดให้ในสมการข้างล่าง

$$\rho_D = 20\left[1 - \frac{\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')}{0.36\beta_1}\right], \% \qquad (8.18)$$

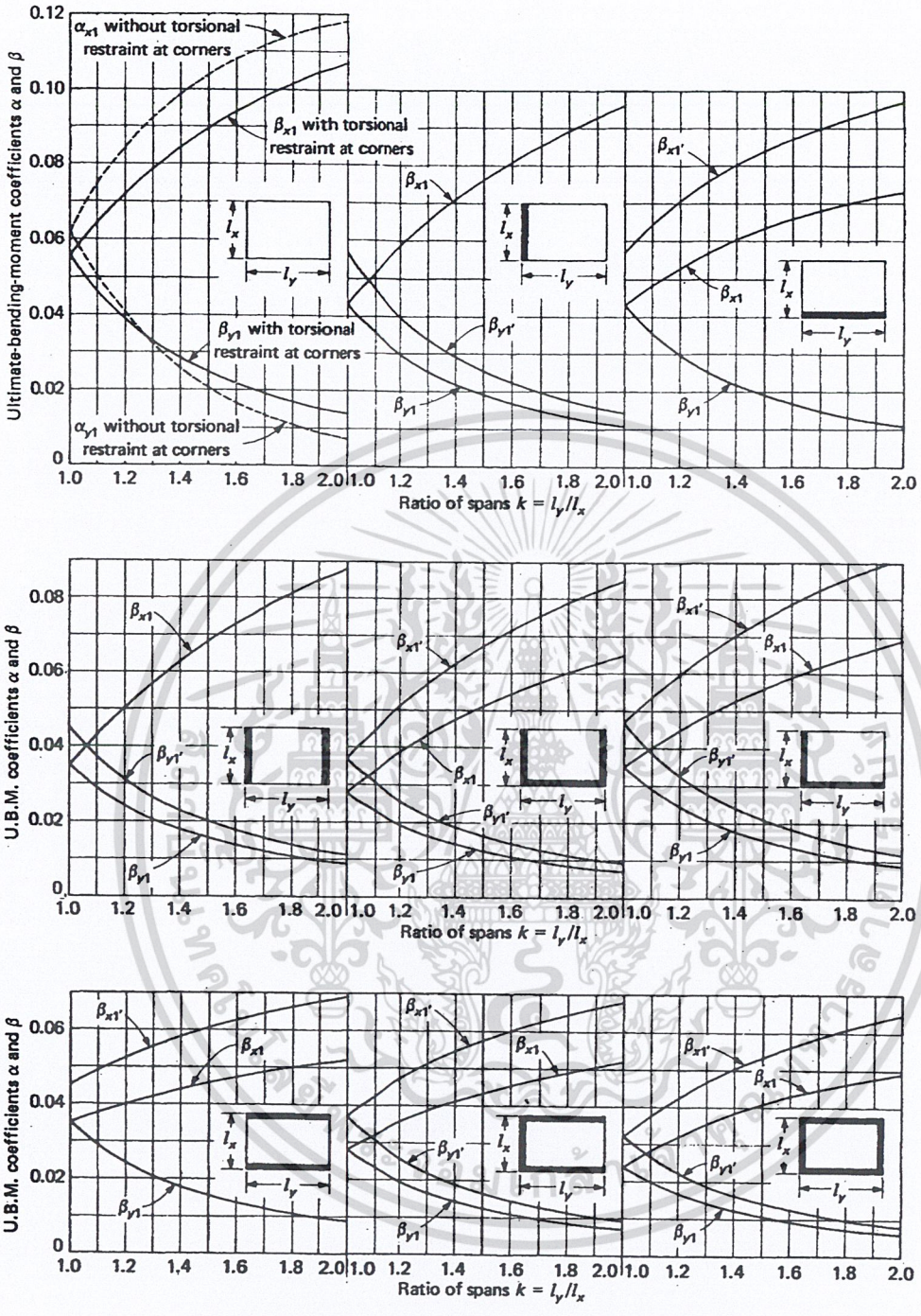
โดยที่ ω_p หรือ $\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')$ ต้องมีค่าไม่เกิน $0.24\beta_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.10 – สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกใช้งานในแผ่นพื้นสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.11 – สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกประลัยในแผ่นพื้นสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6 แถบของเหล็กเสริมอัดแรงและพิกัดของหน่วยแรงในคอนกรีต

8.6.1 การกระจายเหล็กเสริมอัดแรง

จะถือว่าแผ่นพื้นทุกแผงถูกรองรับอย่างต่อเนื่องตามแนวศูนย์กลางของเสา และจะถือว่าแผ่นพื้นมีพฤติกรรมเสมือนกับคานกว้างในสองทิศทาง โดยมีความกว้างเท่ากับความกว้างของแผ่นพื้นและรองรับด้วยเสา โดยที่คานในสองแนวนี้จะรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

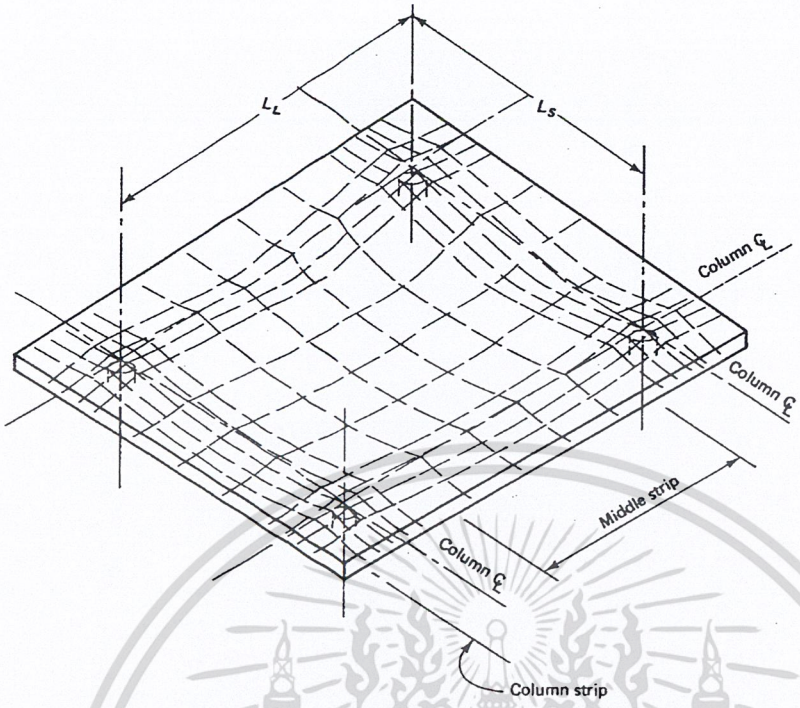
การกระจายของโมเมนต์ในแนวขวางจะไม่คงที่ตลอดความกว้างของแผ่นพื้น แต่จะมีค่ามากในบริเวณแถบเสา ดังนั้น ดังนั้นจะใช้เหล็กเสริมอัดแรงหนาแน่นในแถบนี้ และกระจายส่วนที่เหลือไปในแถบกลาง ในแผ่นพื้นต่อเนื่อง ประมาณร้อยละ 65 ถึง 75 ของโมเมนต์ในแต่ละทิศทางจะรองรับโดยแถบเสา

ความกว้างของครึ่งหนึ่งของแถบเสาบนแต่ละข้างของเสามีค่าเท่ากับหนึ่งในสี่ของด้านที่สั้นกว่าของแผ่นพื้น แถบกลางเป็นแผ่นพื้นที่อยู่ระหว่างแถบเสา การกระจายเหล็กเสริมอัดแรงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการกระจายโมเมนต์ระหว่างแถบเสาและแถบกลาง ถ้าร้อยละ 70 ของเหล็กเสริมทั้งหมดวางอยู่ในแถบเสา ก็หมายความว่าแถบเสารับร้อยละ 70 ของโมเมนต์ทั้งหมด ในระหว่างที่ส่วนที่เหลือร้อยละ 30 รับโดยแถบกลาง

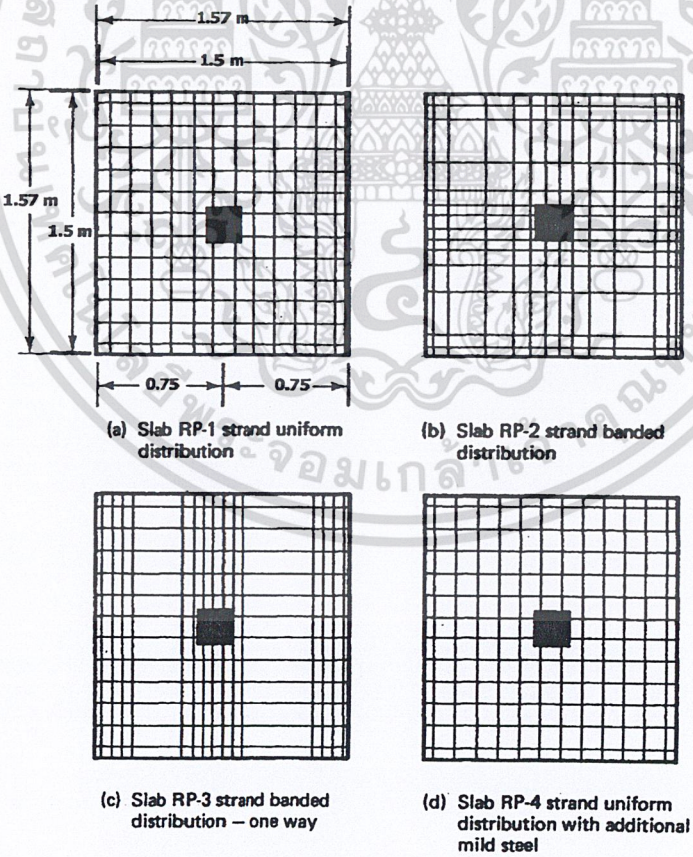
รูปที่ 8.12 แสดงการกระจายเหล็กเสริมอัดแรงในสองทิศทาง โดยทั่วไปจะใช้ระยะเรียงในแถบเสาประมาณ 3 ถึง 4 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น ในระหว่างที่ระยะเรียงห่างสุดในแถบกลางจะต้องไม่เกิน 6 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น หน่วยแรงอัดเฉลี่ยในเนื้อคอนกรีตในแต่ละทิศทางไม่ควรจะน้อยกว่า 9 กก./ซม.^{2}

รูปที่ 8.13 เปรียบเทียบการกระจายเหล็กเสริมอัดแรงในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้แสดงว่าไม่มีความแตกต่างในด้านของการแอ่นตัวหรือกำลังเมื่อใช้ปริมาณเหล็กเสริมเท่ากัน การจัดเหล็กเสริมตามรูป b ซึ่งมีเหล็กเสริมประมาณร้อยละ 65 ถึง 75 อยู่ในแถบเสา เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการช่วยเสริมการส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์ที่บริเวณเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.12 – การกระจายเหล็กเสริมอัดแรงในแผ่นพื้นสองทาง



รูปที่ 8.13 – การกระจายเหล็กเสริมอัดแรงในรูปแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6.2 พิกัดของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

8.6.2.1 แรงดัด

มาตรฐานการออกแบบ ACI 318 จำกัดหน่วยแรงดึงในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง เพื่อควบคุมการแตกร้าว ค่าข้างล่างเป็นหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้สำหรับพื้นที่รับโมเมนต์ต่าง ๆ

1.	บริเวณรับโมเมนต์ลบซึ่งมีเหล็กเสริมธรรมดาด้วย	$1.6\sqrt{f_c'}$
2.	บริเวณรับโมเมนต์ลบซึ่งไม่มีเหล็กเสริมธรรมดา	0
3.	บริเวณรับโมเมนต์บวกซึ่งมีเหล็กเสริมธรรมดาด้วย	$0.53\sqrt{f_c'}$
4.	บริเวณรับโมเมนต์บวกซึ่งไม่มีเหล็กเสริมธรรมดา	0
5.	หน่วยแรงอัดในคอนกรีต	$0.45f_c'$ (ในบางกรณียอมให้ใช้ $0.6f_c'$)

8.6.2.2 เหล็กเสริม

สำหรับโครงสร้างที่ไม่ใช่แผ่นพื้นไร้คาน ให้ใส่เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวไม่น้อยกว่า

$$A_s = 0.004A \qquad (8.19a)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่ของหน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดทั้งหมด จนถึงผิวด้านที่อาจจะเกิดหน่วยแรงดึงเนื่องจากโมเมนต์

สำหรับบริเวณที่เกิดโมเมนต์บวก ถ้าหน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานสูงกว่า $0.53\sqrt{f_c'}$ จะต้องให้มีเหล็กเสริมยึดเหนี่ยวอย่างน้อยที่สุดดังนี้

$$A_s = \frac{N_c}{0.5f_y} \qquad (8.19b)$$

โดยที่ N_c เป็นแรงดึงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของคอนกรีตบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึง ทั้งนี้ให้คำนวณจากหน้าตัดไม่แตกร้าว และ f_y จะต้องไม่เกิน 4200 กก./ซม.^{2}

สำหรับบริเวณเสาที่เกิดโมเมนต์ลบ จะต้องมีเหล็กเสริมในแต่ละทิศทางไม่น้อยกว่า

$$A_s = 0.00075hL \qquad (8.20)$$

โดยที่ L = ความยาวของช่วงเสาในทิศทางตามแนวการเสริมเหล็ก

h = ความหนาของแผ่นพื้น

เหล็กเสริมนี้จะต้องจัดเรียงให้ใกล้แนวศูนย์กลางของเสามากที่สุด โดยห่างไม่เกิน 1.5h จากขอบเสาในแต่ละทิศทาง และต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่าสี่เส้นในแต่ละทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของเหล็กเสริมยึดเหนี่ยวสำหรับโมเมนต์บวก ต้องไม่น้อยกว่า 1/3 ของช่วงว่าง และต้องจัดให้อยู่ในบริเวณศูนย์กลางของบริเวณโมเมนต์บวก

เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวสำหรับโมเมนต์ลบ จะต้องยื่นออกจากแต่ละด้านของเสาเป็นระยะไม่น้อยกว่า 1/6 ของช่วงว่างในแต่ละด้าน และต้องวางใกล้ผิวนอกสุดด้านรับแรงดึงเท่าที่จะปฏิบัติได้

หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่กำลังระบุ f_{ps} ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

a. เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1-\frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p\frac{f_{pu}}{f'_c}+\frac{d}{d_p}(\omega-\omega')\right]\right) \qquad (8.21)$$

โดยที่ ω' = $\rho'(f_y/f_c')$ ถ้ารวมเหล็กเสริมรับแรงอัดในการหา f_{ps} จากสมการที่ 8.21 พจน์ $\left[\rho_p\frac{f_{pu}}{f'_c}+\frac{d}{d_p}(\omega-\omega')\right]$ ต้องไม่น้อยกว่า 0.17 และ d' ต้องไม่มากกว่า $0.15d_p$ และ

γ_p = 0.55 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.80

= 0.40 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.85

= 0.28 เมื่อ f_{py}/f_{pu} มีค่าไม่น้อยกว่า 0.90

ค่าของ γ_p ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่ว่า $f_{py} = 0.80f_{pu}$ สำหรับเหล็กเส้นอัดแรงกำลังสูง 0.85 สำหรับลวดตีเกลียวคลายหน่วยแรง และ 0.9 สำหรับลวดตีเกลียวคลายแรงดึงต่ำ

b. เหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว

สำหรับอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{pe}+700+\frac{f'_c}{100\rho_p} \qquad (8.22)$$

โดยที่ $f_{ps} \le f_{py} \le f_{pe}$ + 4000 กก./ซม.^{2}

สำหรับอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกิน 35

$$f_{ps} = f_{pe}+700+\frac{f'_c}{300\rho_p} \qquad (8.23)$$

โดยที่ $f_{ps} \le f_{py} \le f_{pe}$ + 2000 กก./ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6.2.3 แรงเฉือน

a. บริเวณเสาในแผ่นพื้นไร้คาน

กำลังระบุรับแรงเฉือนของคอนกรีตในบริเวณเสา มีค่าดังต่อไปนี้

$$V_c = (0.27\beta_p \sqrt{f_c'} + 0.021 f_{pc}) b_o d + V_p \qquad (8.24)$$

โดยที่ b_o = เส้นรอบรูปของหน้าตัดแรงเฉือนวิกฤตที่ระยะ d/2 จากขอบของฐานรองรับ

f_{pc} = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัดประสิทธิผลทั้งสองทิศทางในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก คิดที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดหลังจากการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงแล้ว ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 9 กก./ซม.^{2} และต้องไม่มากกว่า 35 กก./ซม.^{2}

V_p = องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงดึงประสิทธิผลที่หน้าตัดวิกฤติ

β_p = ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 3.5 และ $(\alpha_s d/b_o + 1.5)$ โดยที่ α_s มีค่าเป็น 40, 30 และ 20 สำหรับเสาภายใน เสาริม และเสามุม ตามลำดับ

ถ้าไม่ผ่านข้อกำหนดตามข้างบน อาจจะใช้ V_c ให้เป็นค่าที่น้อยสุดจากสมการต่อไปนี้

(i) $$V_c = 0.27\left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right)\sqrt{f_c'} b_o d \qquad (8.25a)$$

(ii) $$V_c = 0.27\left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o}\right)\sqrt{f_c'} b_o d \qquad (8.25b)$$

(iii) $$V_c = 1.06\sqrt{f_c'} b_o d \qquad (8.25c)$$

โดยที่ β_c เป็นอัตราส่วนของด้านยาวต่อด้านสั้นของเสาหรือพื้นที่ของน้ำหนักกระทำเป็นจุด

สมการที่ 8.25a และ 8.25b เป็นผลมาจากการทดลองซึ่งระบุว่ากำลังระบุรับแรงเฉือนจะลดลงถ้าอัตราส่วนของ b_o/d เพิ่มขึ้น

(b) บริเวณฐานรองรับอย่างต่อเนื่องที่ขอบ

สำหรับแผ่นพื้นที่มีคานหรือผนังรองรับที่ขอบอย่างต่อเนื่อง และมีแรงดึงประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของกำลังดึงประลัยของเหล็ก กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

$$V_c = \left[0.16\sqrt{f_c'} + 49\frac{V_u d}{M_u}\right] b_w d_p \qquad \geq 0.53\sqrt{f_c'}\, b_w d$$

$$< 1.33\sqrt{f_c'}\, b_w d \qquad (8.26)$$

โดยที่ b_w เป็นความกว้างของแถบ, $d_p \geq 0.80h$ และ $V_u d/M_u$ เป็นค่าที่ระยะ $d_p/2$ จากขอบของที่รองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c) สัมประสิทธิ์แรงเฉือน

แรงเฉือนสูงสุดที่ขอบของแผ่นพื้นสองทางรองรับตามยาวของเส้นรอบรูป และอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายคงที่ จะประมาณค่าได้ดังต่อไปนี้

ในด้านสั้น $$V = \frac{wS}{3} \qquad (8.27a)$$

ในด้านยาว $$V = \frac{kwS}{2k+1} \qquad (8.27b)$$

โดยที่ k เป็นอัตราส่วนด้านยาว L ต่อด้านสั้น S ของแผ่นพื้น

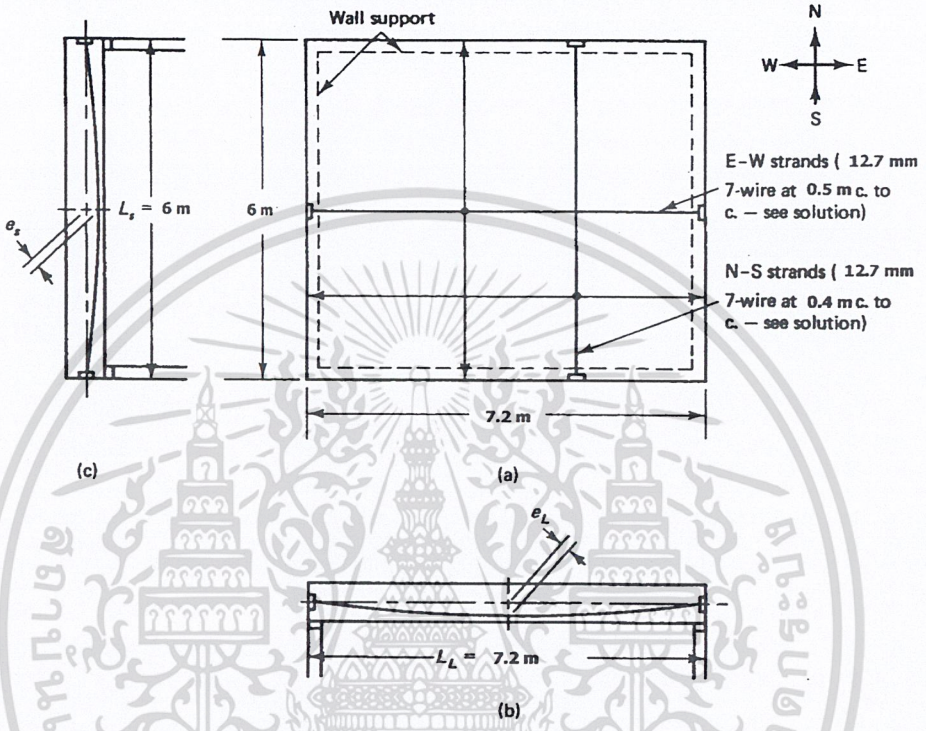
8.7 ระบบแผ่นพื้นทางเดียว

แผ่นพื้นทางเดียวเป็นแผ่นพื้นที่มีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความกว้างไม่น้อยกว่า 2 แผ่นพื้นทางเดียวจะมีพฤติกรรมเหมือนคานทุกประการไม่ว่าเป็นช่วงเดี่ยวหรือต่อเนื่อง ดังนั้นจะออกแบบแผ่นพื้นทางเดียวเสมือนกับเป็นคานซึ่งมีความกว้างเป็น 1 ม. โดยวางเหล็กเสริมอัดแรงตามแนวที่วางพาดเหนือฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 9.1 – การออกแบบแรงพยุงในแผ่นพื้นสองทางเดี่ยว

รูปข้างล่างแสดงแผ่นพื้นเดี่ยวสองทางเป็นแผ่นพื้นแบบยกตั้งในคลังสินค้า รองรับแบบช่วงเดี่ยวด้วยผนังอิฐก่อในทุกด้าน แต่ยึดแน่นที่มุมทุกมุม นอกเหนือจากน้ำหนักของแผ่นพื้นเอง แผ่นพื้นยังต้องรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งานเพิ่มเติม 70 กก./ม.^{2} และน้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน 400 กก./ม.^{2} แผ่นพื้นจะต้องไม่แอ่นตัวภายใต้น้ำหนักของตัวเอง



ออกแบบเป็นแผ่นพื้นอัดแรงแบบดึงที่หลังแบบไม่มีการยึดเหนี่ยว โดยใช้ลวดตีเกลียวแบบเจ็ดเส้น เกรด 270 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. และกำหนดให้

f_c' = 350 กก./ซม.^{2} (คอนกรีตน้ำหนักปกติ), f_{ci}' = 262.5 กก./ซม.^{2}, $E_c = 15\,200\sqrt{f_c'}$ = 284 366 กก./ซม.^{2}

f_c สูงสุดเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผล = 14 กก./ซม.^{2} ในแนว E-W และ = 24.5 กก./ซม.^{2} ในแนว N-S

f_c สูงสุดเนื่องจากหน่วยแรงกระทำร่วม = $0.45f_c'$

$f_{ps} \le 0.70f_{pu}$ = 13 230 กก./ซม.^{2}, f_{py} = 16 800 กก./ซม.^{2}, f_{pe} = 11 130 กก./ซม.^{2}, f_y = 4000 กก./ซม.^{2},

$E_{ps} = E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ซม.^{2}

เลือกความหนาแผ่นพื้นเบื้องต้น โดยให้มีอัตราส่วนช่วงเฉลี่ยต่อความหนาเป็น 45 หรือเท่ากับ เส้นรอบรูปแผ่นพื้น/180

$$h = \frac{(6+7.2)(100)}{2} \times \frac{1}{45} = 14.7 \text{ ซม.}$$

ลองใช้แผ่นพื้นหนา 15 ซม. ใช้ท่อร้อยขนาด 2 ซม. และระยะหุ้มคอนกรีต 1.5 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความลึกประสิทธิผล $d_p = 15 - (2/2 + 1.5) = 12.5$ ซม. และ $e_S = e_L = 15/2 - 2.5 = 5$ ซม.

1. แรงพยุง

$w_D = 70 + 0.15(2400) = 430$ กก./ม.^{2}

เนื่องจากจะต้องไม่เกิดการแอ่นตัวหรือยกตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ ดังนั้นจะสมมติให้ $w_{bal} = w_D = 430$ กก./ม.^{2} และเนื่องจาก f_c สูงสุดเนื่องจากแรงอัดประสิทธิผล = 14 กก./ซม.^{2} ในแนว E-W ดังนั้นจะได้แรงอัดประสิทธิผลในแนว E-W, $P_L = 14(15)(100) = 21\,000$ กก./ม. และจากสมการที่ 8.13b

$$w_{bal(L)} = \frac{8P_L e_L}{L^2} = \frac{8(21\,000)(0.05)}{7.2^2} = 162 \text{ กก./ม.}^2$$

แรงพยุงซึ่งจะได้จากเหล็กเสริมอัดแรงในด้านสั้น (ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องการให้ด้านสั้นเป็นด้านหลักในการรับแรง) $w_{bal(s)} = w_D - w_{bal(L)} = 430 - 162 = 268$ กก./ม.^{2} ดังนั้น จากสมการที่ 8.13a

$$P_S = \frac{w_{bal(S)} L_S^2}{8e_S} = \frac{268(6)^2}{8(0.05)} = 24\,120 \text{ กก./ม.}$$ หลังจากการเสื่อมลด

และจะได้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตในแนว N-S เป็น

$$f_c = \frac{P_S}{bh} = \frac{24\,120}{(100)(15)} = 16.08 \text{ กก./ซม.}^2 < 24.5 \text{ กก./ซม.}^2$$ ซึ่งเป็นตามข้อกำหนด

ดังนั้นใช้ลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. ซึ่งจะได้แรงดึงประสิทธิผล $P_e = 11\,130(0.99) = 11\,019$ กก./เส้น

ดังนั้นในแนว N-S จะต้องใช้ระยะเรียง = 11 019/24 120 = 0.46 ม. ใช้ 0.42 ม.

และ ในแนว E-W จะต้องใช้ระยะเรียง = 11 019/21 000 = 0.52 ม. ใช้ 0.50 ม.

จะเห็นว่าระยะเรียงใกล้เคียงกับระยะเรียงตามมาตรฐานการออกแบบประมาณ 3 ถึง 5 เท่าของความหนาแผ่นพื้น และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตในบริเวณสมอยึดที่ผนัง จะเพิ่มเหล็กเสริมธรรมดาขนาด 12 มม. สองเส้นวิ่งรอบเส้นรอบรูปของแผ่นพื้น

2. หน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

จากรูปที่ 8.10 เมื่อ $k = L_L/L_S = 7.2/6 = 1.2$ และเมื่อมีการยึดรั้งต้านแรงบิดที่มุม จะได้สัมประสิทธิ์โมเมนต์สำหรับโมเมนต์กลางช่วงสูงสุดในด้านสั้นและด้านยาว $\beta_{N\text{-}S} = 0.062$ และ $\beta_{E\text{-}W} = 0.035$ ตามลำดับ

ถ้าสมมติให้ความยาวช่วงว่าง $L_S = 5.85$ ม. และ $L_L = 7.05$ ม. จะได้โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

$M_S = 0.062(400)(5.85)^2 = 848.7$ กก.ม./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $M_L = 0.035(400)(7.05)^2 = 695.8$ กก.ม./ม.

โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นพื้น $I_s = 100(15)^3/12 = 28\ 125$ ซม.^{4}

หน่วยแรงในแผ่นพื้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

ในด้านสั้น $f = Mc/I_s = 848.7(100)(7.5)/28\ 125 = 22.63$ กก./ซม.^{2}

ในด้านยาว $f = Mc/I_L = 695.8(100)(7.5)/28\ 125 = 18.55$ กก./ซม.^{2}

หน่วยแรงตามแกนเนื่องจากแรงพยุงและโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

ในด้านสั้น (N-S) $f^t = -\frac{P_S}{bh} - \frac{M_s c}{I_s} = -16.08 - 22.63 = -38.71$ กก./ซม.^{2}

และ $f_b = -16.08 + 22.63 = 6.55$ กก./ซม.^{2}

และในด้านยาว (E-W) $f^t = -14 - 18.55 = -32.55$ กก./ซม.^{2}

และ $f_b = -14 + 18.55 = 4.55$ กก./ซม.^{2}

มาตรฐานการออกแบบยอมให้หน่วยแรงอัดสูงสุด $f_c = 0.45(350) = 157.5$ กก./ซม.^{2} ซึ่งสูงกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างต่ำทำให้เราอาจจะเลือกความหนาของแผ่นพื้นน้อยกว่า 15 ซม.ได้ โดยที่ระยะแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานจะต้องอยู่ภายใต้พิกัดที่ยอมให้

3. **<u>ตรวจสอบระยะแอ่นตัว</u>**

จะตรวจสอบระยะแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรอย่างเดียว จากทฤษฎีกำลังของวัสดุ จะได้

$\Delta = \frac{5}{48}\frac{ML^2}{E_c I_s}$ โดยที่ $I_s = 28\ 125$ ซม.^{4}, $E_c = 284\ 366$ กก./ซม.^{2}

$\Delta_{E-W} = \frac{5}{48}\frac{695.8(7.2)^2(10)^6}{284\,366(28\,125)} = 0.47$ ซม.

$\Delta_{N-S} = \frac{5}{48}\frac{848.7(6)^2(10)^6}{284\,366(28\,125)} = 0.40$ ซม.

ได้ระยะแอ่นตัวเฉลี่ยที่กลางช่วง = (0.47 + 0.40)/2 = 0.43 ซม.

ระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ = $L_S/360 = 600/360 = 1.67$ ซม. > 0.43 ซม.

4. **<u>กำลังระบุรับโมเมนต์</u>**

$w_u = 1.4(430) + 1.7(400) = 1282$ กก./ม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 8.11 เมื่อ k = L_L/L_S = 7.2/6 = 1.2 และเมื่อมีการยึดรั้งต้านแรงบิดที่มุม จะได้สัมประสิทธิ์โมเมนต์สำหรับโมเมนต์กลางช่วงสูงสุดในด้านสั้นและด้านยาว $\beta_{N\text{-}S}$ = 0.072 และ $\beta_{E\text{-}W}$ = 0.038 ตามลำดับ

ถ้าสมมติให้ความยาวช่วงว่าง Ls = 5.85 ม. และ L_L = 7.05 ม. จะได้โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว

a. ***ในแนว N-S***

$M_u = 0.072(1282)(5.85)^2 = 3159$ กก.ม./ม.

จะสังเกตได้ว่าการอัดแรงในโครงสร้างนี้ไม่ทำให้เกิดโมเมนต์รอง M_s เนื่องจากไม่มีความต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นพื้น

จากขั้นตอนที่ 1 ได้ระยะเรียงของลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. เป็น 0.45 ม. คิดเป็น

$A_{ps} = 0.99/0.42 = 2.36$ ซม.^{2}/ม. โดยมี f_{pe} = 11 130 กก./ซม.^{2}

จะได้ $\rho_{N\text{-}S} = 2.36/(100 \times 12.5) = 0.0019$

และอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้น = 600/15 = 40 > 35

ดังนั้นจากสมการที่ 8.23 ได้ $f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} \le f_{py} \le f_{pe} + 2000$ กก./ซม.^{2}

$$f_{ps} = 11130 + 700 + \frac{350}{300(0.0019)} = 11\,130 + 1319 = 12\,449 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$< f_{py} = 16\,800 < f_{pe} + 2000 = 13\,130 \text{ กก./ซม.}^2$$

และน้อยกว่าค่ากำหนดของ $f_{ps} \le 0.70 f_{pu}$ = 13 230 กก./ซม.^{2}

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c' b} = \frac{2.36(12\,449)}{0.85(350)(100)} = 0.986 \text{ ซม.}$$

ดังนั้นกำลังระบุของแผ่นพื้น $M_n = A_{ps} f_{ps}(d - \frac{a}{2}) = 2.36(12\,449)(12.5 - \frac{0.986}{2})/100$

$$= 3523 \text{ กก.ม./ม.}$$

$\phi M_n = 0.9(3523) = 3171$ กก.ม./ม. > 3159 กก.ม./ม.

b. ***ในแนว E-W***

$M_u = 0.038(1282)(7.05)^2 = 2421$ กก.ม./ม.

จากขั้นตอนที่ 1 ได้ระยะเรียงของลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. เป็น 0.50 ม. คิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_{ps} = 0.99/0.5 = 1.98 ซม.^{2}/ม.

จะได้ $\rho_{E\text{-}W}$ = 1.98/(100 x 12.5) = 0.0016

และอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้น = 720/15 = 48 > 35

ดังนั้นจากสมการที่ 8.23 ได้ $f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} \le f_{py} \le f_{pe} + 2000$ กก./ซม.^{2}

$$f_{ps} = 11\,130 + 700 + \frac{350}{300(0.0016)} = 11\,130 + 1437 = 12\,567 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$< f_{py} = 16\,800 < f_{pe} + 2000 = 13\,130 \text{ กก./ซม.}^2$$

และน้อยกว่าค่ากำหนดของ $f_{ps} \le 0.70 f_{pu}$ = 13 230 กก./ซม.^{2}

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c' b} = \frac{1.98(12\,567)}{0.85(350)(100)} = 0.836 \text{ ซม.}$$

ดังนั้นกำลังระบุของแผ่นพื้น $M_n = A_{ps} f_{ps} (d - \frac{a}{2}) = 1.98(12\,567)(12.5 - \frac{0.836}{2})/100$

$$= 3006 \text{ กก.ม./ม.}$$

ϕM_n = 0.9(3006) = 2705 กก.ม./ม. > 2421 กก.ม./ม.

5. **<u>กำลังรับแรงเฉือน</u>** $k = L_L/L_S = 7.2/6 = 1.2$ จะได้

ในด้านสั้น (N-S): $V_u = \frac{w_u S}{3} = \frac{1282(5.85)}{3} = 2500$ กก./ม. (9.27a)

ในด้านยาว (E-W): $V_u = \frac{k w_u S}{2k+1} = \frac{1.2(1282)(5.85)}{2(1.2)+1} = 2647$ กก./ม. (9.27b)

$$0.53\sqrt{f_c'}\, b_w d \le V_c = \left[0.16\sqrt{f_c'} + 49\frac{V_u d}{M_u}\right] b_w d_p < 1.33\sqrt{f_c'}\, b_w d \qquad (8.26)$$

ถ้าให้ที่ขอบของแผ่นพื้นรองรับด้วยผนังมีค่า $49 V_u d/M_u \approx 0$ จะได้

$V_c = 0.16\sqrt{f_c'}\, b_w d_p = 0.16\sqrt{350}\,(100)(12.5)$ = 3742 กก./ม. > 2647 กก./ม.

ดังนั้นใช้แผ่นพื้นหนา 15 ซม. มีระยะ d_p = 12.5 ซม. อัดแรงด้วยลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. มีระยะเรียงเป็น 42 ซม. ตามแนวเหนือใต้ และ 50 ซม. ตามแนวตะวันออกตะวันตก และเสริมเหล็กขนาด 12 มม. สองเส้นในบริเวณสมอยึดตามแนวเส้นรอบรูปของแผ่นพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.8 การถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนจากแผ่นพื้นสู่เสา

8.8.1 กำลังรับแรงเฉือน

พฤติกรรมภายใต้แรงเฉือนของแผ่นพื้นสองทางค่อนข้างจะซับซ้อน เพราะประกอบหน่วยแรงสามมิติ หน้าตัดวิกฤตของการวิบัติด้วยแรงเฉือนจะเป็นแนวรอบรูปของพื้นที่ของฐานรองรับ ซึ่งผลจากห้องปฏิบัติการระบุว่าอยู่ที่ระยะไม่น้อยกว่า d/2 จากขอบของฐานรองรับ

ถ้าไม่มีการเสริมเหล็กช่วยรับแรงเฉือน จะหากำลังเฉือนระบุของคอนกรีต V_c ได้จากสมการที่ 8.24, 8.25 และ 8.26 ส่วนแรงเฉือนในแผ่นพื้นสองทางเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก จะหาได้จากค่าประมาณในสมการที่ 8.27

8.8.2 การส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์

การส่งถ่ายโมเมนต์จากแผ่นพื้นไร้คานลงสู่เสาเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบแผ่นพื้นไร้คาน การส่งถ่ายโมเมนต์ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกเป็นการส่งถ่ายด้วยแรงดัดรอบเส้นรอบรูปของเสา และส่วนที่สองเป็นการส่งถ่ายด้วยการเยื้องศูนย์ของแรงเฉือน โดยทั่วไป ร้อยละ 60 จะเป็นการส่งถ่ายในส่วนแรก และร้อยละ 40 ในส่วนที่สอง

ส่วนของโมเมนต์ที่ส่งถ่ายโดยการเยื้องศูนย์ของแรงเฉือนจะแปรผกผันกับความกว้างของหน้าตัดวิกฤตรับโมเมนต์ โดยที่ค่าเศษส่วนซึ่งส่งถ่ายโดยแรงเฉือน

$$\gamma_v = 1 - \gamma_f \qquad (8\text{-}28)$$

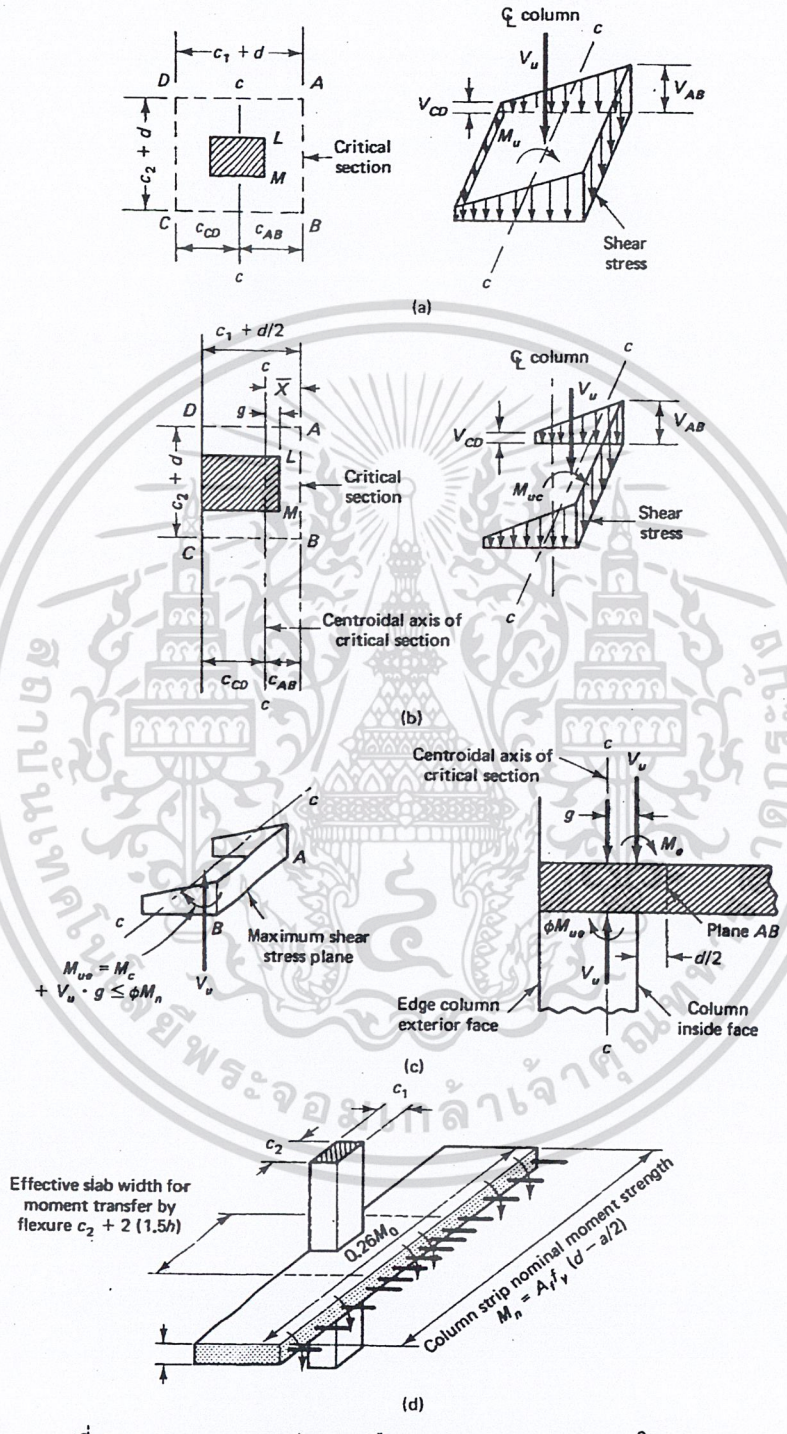
และส่วนของโมเมนต์ที่เหลือจะส่งถ่ายโดยแรงดัดบนความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นระหว่างแนว 1.5h จากขอบเสาทั้งสองด้าน โดยที่เศษส่วนซึ่งส่งถ่ายโดยแรงดัดมีค่าเท่ากับ

$$\gamma_f = \frac{1}{1 + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} \qquad (8\text{-}29)$$

โดยที่ $b_2 = c_2 + d$ เป็นความกว้างของหน้าตัดวิกฤตด้านโมเมนต์ และ $b_1 = c_1 + d$ เป็นความกว้างของหน้าตัดวิกฤตที่วัดในทิศทางของช่วงที่ใช้หาโมเมนต์ในทิศทางตั้งฉากกับ b_2 สำหรับเสารอบนอก $b_1 = c_1 + d/2$ จะใช้ค่า $\gamma_f = 1$ ในกรณีที่ $V_u < 0.75\phi V_c$ และจะเพิ่มค่า γ_f ได้อีกร้อยละ 25 สำหรับเสาภายใน ในกรณีที่ $V_u \le 0.4\phi V_c$ และ $\rho \le 0.375\rho_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.14 แสดงการกระจายหน่วยแรงเฉือนรอบขอบเสา ซึ่งจะถือว่าแปรเป็นเชิงเส้นรอบจุดศูนย์ถ่วงของหน้าติดวิกฤต



รูปที่ 8.14 – การกระจายหน่วยแรงเฉือนรอบขอบเสา (a) เสาภายใน (b) เสาริม (c) หน้าตัดวิกฤต (d) กำลังรับการส่งถ่ายโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสมมติให้แรงเฉือน V_u และโมเมนต์ M_u กระทำที่ขอบเสา ดังนั้นจะต้องส่งถ่ายไปยังแกนศูนย์ถ่วง c-c ของหน้าตัดวิกฤต ซึ่งเป็นระยะเพื่อการส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์ g (ระยะจากขอบเสาไปยังแกนศูนย์ถ่วง) ในการหาหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดในแผ่นพื้นที่บริเวณเสารอบนอก มาตรฐาน ACI กำหนดให้ใช้โมเมนต์ทั้งหมดที่เกิดในแถบเสาคูณด้วย γ_v ในสมการที่ 9.30

โมเมนต์ที่ไม่สมดุล (ส่วนต่างของโมเมนต์ในแผ่นพื้นบนสองด้านของเสา) จะประกอบด้วยโมเมนต์ลบในแผ่นพื้นช่วงปลาย M_{ue} ที่ขอบเสา และโมเมนต์ $V_u g$ เนื่องจากแรงเฉือนเยื้องศูนย์ V_u ค่าของหน่วยแรงเฉือนจะหาได้จากสมการข้างล่าง

$$v_{u(AB)} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_{ue} c_{AB}}{J_c} \qquad (9.30a)$$

$$v_{u(CD)} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v M_{ue} c_{CD}}{J_c} \qquad (9.30b)$$

โดยที่ A_c = พื้นที่ของคอนกรีตในหน้าตัดวิกฤต = $2d(c_1 + c_2 + 2d)$ สำหรับเสาภายใน

J_c = โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัดวิกฤต

$$= \frac{d(c_1+d)^3}{6} + \frac{d^3(c_1+d)}{6} + \frac{d(c_2+d)(c_1+d)^2}{2} \quad \text{สำหรับเสาภายใน}$$

$$= \frac{(c_1+d/2)d^3}{6} + \frac{2d}{3}(c_{AB}^3 + c_{CD}^3) + d(c_2+d)c_{AB}^2$$

สำหรับเสาภายนอกรับโมเมนต์ในแนวขนานกับขอบ

จากสมการพื้นฐานของวิชากำลังของวัสดุ จะได้หน่วยแรงเฉือน

$$v_u = \frac{V_u}{A} + \gamma_v \frac{Mc}{J}$$

โดยที่พจน์ที่สองในด้านขวาของสมการเป็นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากแรงบิดที่ขอบเสา

หน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูป v_u อาจจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 9.30a และ b ถ้าช่วงของแผ่นพื้นที่ต่อเนื่องไม่เท่ากัน หรือน้ำหนักบรรทุกบนช่วงต่อเนื่องไม่เท่ากัน มาตรฐาน ACI กำหนดให้เสาหรือกำแพงที่รองรับแผ่นพื้นจะต้องรับโมเมนต์เท่ากับ

$$M' = 0.07[(w_d + 0.5w_\ell)\ell_2\ell_n^2 - w_d'\ell_2'(\ell_n')^2] \qquad (8.31)$$

โดยที่ w_d, w_ℓ = น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่คูณด้วยตัวคูณแล้ว

ℓ_2 = ความยาวช่วงในทิศตั้งฉากกับ ℓ_n. ℓ_n = ความยาวช่วงว่างในทิศทางที่วิเคราะห์

w_d', ℓ_2', ℓ_n' มีความหมายเหมือนข้างบนแต่เป็นค่าสำหรับช่วงสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะมีพจน์เพิ่มขึ้นในสมการที่ 9.30a และ b

$$v_u = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_u c_{AB}}{J_c} + \frac{\gamma_v M' c}{J_c'} \qquad (8.32)$$

โดยที่ J_c' เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของหน้าตัดวิกฤตในแนวตั้งฉากกับ J_c

8.8.3 ความหนาน้อยสุดตามข้อกำหนดของระยะแอ่นตัว

การออกแบบระบบแผ่นพื้นสองทาง จะเริ่มต้นด้วยการหาความหนาของแผ่นพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงมักจะสูงกว่าแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการหาระยะแอ่นตัวของแผ่นพื้นจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานแต่อย่างเดียว แรงพยุงเนื่องจากการอัดแรงจะต้านการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ หรืออาจจะทำให้เกิดการยกตัวเบื้องต้นในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกจรมีค่ามาก อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาที่แนะนำโดยทั่วไปได้แก่

- 16 – 25 สำหรับแผ่นพื้นตันยื่น
- 40 – 50 สำหรับแผ่นพื้นสองทางต่อเนื่อง
- 35 – 40 สำหรับแผ่นพื้นแบบกระทง

มาตรฐาน ACI กำหนดอัตราส่วนของความยาวช่วงต่อระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ตามชนิดและสภาวะของน้ำหนักบรรทุกตามที่แสดงในตารางที่ 8.1 พิกัดนี้ถูกกำหนดมาเพื่อป้องกันการแตกร้าวของปูนฉาบในฝ้าและความเสียหายต่อองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น การแตกร้าวในผนังและการเกิดแอ่งน้ำในหลังคา

หัวข้อที่ 8.10 แสดงวิธีละเอียดในการหาระยะแอ่นตัวและการยกตัวของแผ่นพื้นสองทาง ด้วยการใช้สติฟเนสขององค์อาคารต่อเนื่อง และหาระยะแอ่นตัวด้วยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า วิธีนี้ค่อนข้างง่าย เพราะค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในวิธีนี้ได้หามาเรียบร้อยแล้วจากการวิเคราะห์ออกแบบแผ่นพื้นในเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 – ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นตัวที่คำนวณได้ [วสท. ตาราง 4205(ข)]

ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแอ่นที่พิจารณา	พิกัดระยะแอ่น
หลังคาราบซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell}{180}$ *
พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่อ จากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell}{360}$
หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่า**จะเกิด**ความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (เป็นผลรวมของระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้างทั้งหมดและระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น)***	$\frac{\ell}{480}$ **
หลังคาหรือพื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะ***ไม่เกิด***ความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก		$\frac{\ell}{240}$ ****

* *พิกัดนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัว ดังนั้นจึงควรตรวจสอบการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัวด้วยวิธีการคำนวณที่เหมาะสม โดยให้รวมระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในแอ่ง ผลของน้ำหนักบรรทุกค้าง ระยะยกตัว รวมถึงความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้างและข้อกำหนดสำหรับการระบายน้ำ*

** *พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ ถ้ามีมาตรการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนที่ยึดติดหรือรองรับโดยโครงสร้าง*

*** *จะต้องหาระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลาตามข้อกำหนดใน วสท. 4205(ข)5 แต่อาจจะลดได้ด้วยระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งค่านี้จะต้องคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลทางวิศวกรรมที่ยอมรับ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของการแอ่นตัวตามเวลาขององค์อาคารที่คล้ายคลึงกับองค์อาคารที่พิจารณา*

**** *ต้องไม่มากกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ถ้ามีการเผื่อระยะยกตัว ทำให้ระยะแอ่นตัวทั้งหมดลบด้วยระยะยกตัวแล้วต้องไม่เกินค่าพิกัดในตาราง*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.9 ขั้นตอนในการออกแบบระบบแผ่นพื้นอัดแรงสองทาง

1. ตรวจสอบว่ารูปแบบของแผ่นพื้นและน้ำหนักบรรทุกเข้าข่ายในการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า

2. เลือกความหนาเบื้องต้นของแผ่นพื้น h = L/45 หาน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ทั้งในสภาวะใช้งานและคูณตัวคูณเพิ่มแล้ว

3. สมมติแนวของเหล็กเสริมอัดแรงทั้งสองทิศทาง และหาแรงอัด F หน่วยแรงอัดในคอนกรีต f_c = F/A_c และจำนวนเหล็กเสริมที่ต้องใช้ในหนึ่งช่วง หาหน่วยแรงพยุง $w_{bal} = 8Fa/L^2$ และหน่วยแรงสุทธิ $w_{net\downarrow} = w_{w\downarrow} - w_{bal\uparrow}$

4. หาค่าต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า

สติฟเนสของเสา
$$K_c = \frac{4EI}{H-2h} \tag{8.9}$$

สติฟเนสต้านแรงบิดของแผ่นพื้นในระนาบของเสาได้จาก

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{L_2\left(1-\frac{c_2}{L_2}\right)^3} \tag{8.10a}$$

โดยที่ค่าคงที่ของแรงบิด
$$C = \sum (1-0.63\frac{x}{y})\frac{x^3 y}{3} \tag{8.10b}$$

สติฟเนสของเสาเทียบเท่า
$$K_{ec} = (\frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t})^{-1} \tag{8.6}$$

สติฟเนสของแผ่นพื้น
$$K_s = \frac{4E_{cs}I_s}{L_1 - \frac{c_1}{2}} \tag{8.11}$$

5. หาสัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนต์ที่ทุกข้อต่อ

$$DF = \frac{K_s}{\sum K} \tag{8.12}$$

โดยที่ $\sum K = K_{ec} + K_{s(left)} + K_{s(right)}$ และใช้ COF ≈ ½ และหาโมเมนต์ปลายยึดแน่นเหนือฐานรองรับ FEM ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสุทธิ มีค่าเท่ากับ $w\ell_2\ell_n^2/12$

6. ทำการกระจายโมเมนต์สำหรับโมเมนต์สุทธิ M_{net} หาโมเมนต์ที่กลางช่วงแล้วคำนวณหาโมเมนต์ที่ขอบของฐานรองรับจากสมการ $M_n = M_n$(กลางช่วง) – Vc/3 และตรวจสอบหน่วยแรงในคอนกรีต

$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{M_{net}}{S} \le 0.53\sqrt{f_c'}$ ที่กลางช่วง และ $1.6\sqrt{f_c'}$ เหนือฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. หาโมเมนต์ปลายยึดแน่นสำหรับหน่วยแรงพยุง ทำการกระจายโมเมนต์ และหาโมเมนต์หลัก $M_1 = P_e e$ และโมเมนต์รอง M_s = ผลต่างของโมเมนต์ที่กระจายแล้วระหว่าง M_{bal} และ M_1

8. หาโมเมนต์ปลายยึดแน่นสำหรับน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้ว ทำการกระจายโมเมนต์ และหาโมเมนต์ที่ต้องการ M_u = ผลต่างของโมเมนต์ที่กระจายแล้วระหว่าง M_u และ M_s ที่ทุกข้อต่อและกลางช่วง

9. ตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ของแผ่นพื้นและการอัดแรงว่าเพียงพอที่จะรับโมเมนต์จากขั้นตอนที่ 8 ทำการกระจายโมเมนต์ซ้ำ ได้ $\Delta M_R = \rho_D(M_u$ ที่ฐานรองรับ) โดยที่

$$\rho_D = 20\left[1-\frac{\omega_p+(d/d_p)(\omega-\omega')}{0.36\beta_1}\right], \% \qquad (8.18)$$

เสริมเหล็กธรรมดาเพื่อการยึดเหนี่ยวตามข้อกำหนดที่กลางช่วงและเหนือฐานรองรับ โดยจะต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่า 0.00075hL

10. ตรวจสอบกำลังเฉือนของแผ่นพื้นที่ฐานรองรับทั้งภายในและภายนอก และหาการส่งถ่ายโมเมนต์ด้วยแรงดัดและด้วยแรงเฉือนลงสู่เสา โดยที่ค่าเศษส่วนของโมเมนต์ซึ่งส่งถ่ายโดยแรงเฉือน

$$\gamma_v = 1-\gamma_f \qquad (8\text{-}28)$$

และส่วนของโมเมนต์ที่เหลือจะส่งถ่ายโดยแรงดัดบนความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นระหว่างแนว 1.5h จากขอบเสาทั้งสองด้าน โดยที่เศษส่วนซึ่งส่งถ่ายโดยแรงดัดมีค่าเท่ากับ

$$\gamma_f = \frac{1}{1+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} \qquad (8\text{-}29)$$

โดยที่ $b_2 = c_2 + d$ เป็นความกว้างของหน้าตัดวิกฤตด้านโมเมนต์ และ $b_1 = c_1 + d$ เป็นความกว้างของหน้าตัดวิกฤตที่วัดในทิศทางของช่วงที่ใช้หาโมเมนต์ในทิศทางตั้งฉากกับ b_2 สำหรับเสารอบนอก $b_1 = c_1 + d/2$

11. หาหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดจากแรงเฉือนรอบพื้นที่และผลของการส่งถ่ายโมเมนต์

$v_n = \frac{V_u}{\phi A_c} + \frac{\gamma_v c_{AB} M_n}{J_c}$ ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามข้างล่าง

$$v_c = 0.27\beta_p\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc} + V_p/b_o d \qquad (8.24)$$

โดยที่ b_o = เส้นรอบรูปของหน้าตัดแรงเฉือนวิกฤตที่ระยะ d/2 จากขอบของฐานรองรับ

f_{pc} = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัดประสิทธิผลทั้งสองทิศทางในคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก คิดที่แนวศูนย์ถ่วงของหน้าตัดหลังจากการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงแล้ว ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 9 กก./ซม.^{2} และต้องไม่มากกว่า 35 กก./ซม.^{2}

V_p = องค์ประกอบในแนวดิ่งของแรงดึงประสิทธิผลที่หน้าตัดวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β_p = ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 3.5 และ ($\alpha_s d/b_o + 1.5$) โดยที่ α_s มีค่าเป็น 40, 30 และ 20

สำหรับเสาภายใน เสาริม และเสามุม ตามลำดับ

ถ้าไม่ผ่านข้อกำหนดตามข้างบน อาจจะใช้ v_c ให้เป็นค่าที่น้อยสุดจากสมการต่อไปนี้

$$v_c = 0.27\left(2+\frac{4}{\beta_c}\right)\sqrt{f_c'}\ ,\ v_c = 0.27\left(2+\frac{\alpha_s d}{b_o}\right)\sqrt{f_c'}\ ,\quad v_c = 1.06\sqrt{f_c'}$$

12. ตรวจสอบ $\gamma_f M_n$ กับกำลังรับโมเมนต์ของแผ่นพื้น จัดเหล็กเสริมให้หนาแน่นอยู่ในบริเวณแถบเสา [c + 2(1.5h)]

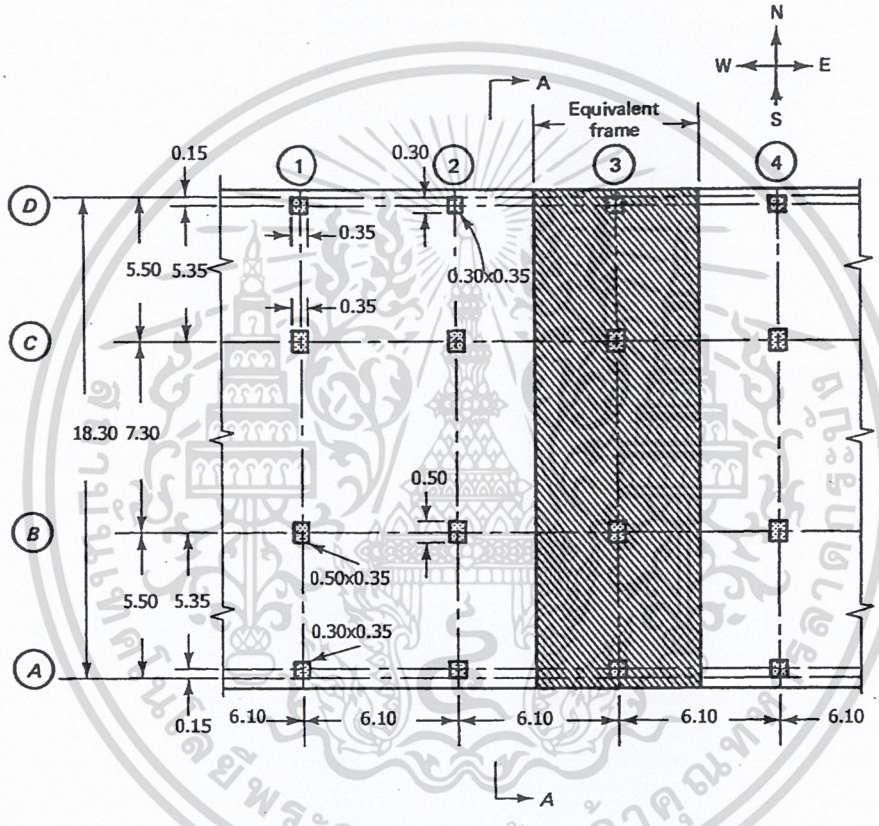
13. ตรวจสอบระยะแอ่นตัวและยกตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานบนแผงพื้นที่วิกฤต



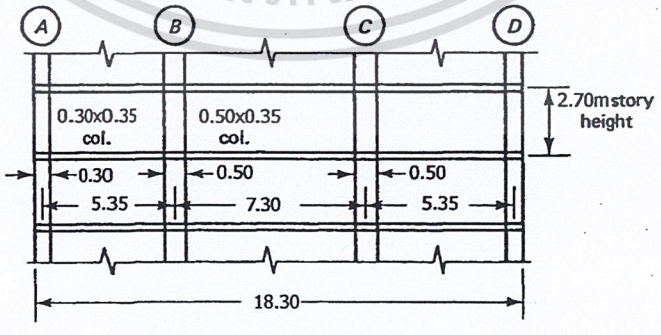
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 8.2</u> - ระบบแผ่นพื้นไร้คานอัดแรงแบบดึงทีหลัง

รูปข้างล่างแสดงแปลนของอาคารชุดพักอาศัย เป็นระบบแผ่นพื้นไร้คานอัดแรงแบบดึงทีหลังและไม่มีการยึดเหนี่ยว แผ่นพื้นริมมีขนาด 5.5-ม. x 6.1-ม. และแผ่นพื้นภายในมีขนาด 7.3-ม. x 6.1-ม. วัดจากศูนย์กลางของเสา มีความสูงชั้นถึงชั้นเป็น 2.7 ม. ใช้วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่าออกแบบแผ่นพื้นให้รับน้ำหนักบรรทุกจร = 200 กก./ม.^{2} และน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเนื่องจากผนังและวัสดุปูพื้น = 100 กก./ม.^{2} และตรวจสอบกำลังรับการส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์ที่บริเวณเสาด้วย สมมติให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนทุกแผงพื้นพร้อมกัน ใช้ลวดตีเกลียวแบบ 7 เส้นขนาด 12.7 มม.



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้: f_c' = 280 กก./ซม.^{2} (คอนกรีตน้ำหนักปกติ) ในทุกองค์อาคาร, f_{ci}' = 210 กก./ซม.^{2},

$f_t = 1.6\sqrt{f_c'}$ = 26.8 กก./ซม.^{2} เหนือฐานรองรับ และ = $0.53\sqrt{f_c'}$ = 8.9 กก./ซม.^{2} ที่กลางช่วง

f_{pu} = 19 000 กก./ซม.^{2}, $f_{ps} \leq$ = 13 010 กก./ซม.^{2}, f_{py} = 17 010 กก./ซม.^{2} f_{pe} = 11 130 กก./ซม.^{2}

f_y = 4000 กก./ซม.^{2}, $E_{ps} = E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ซม.^{2}

<u>แนว N-S</u>

I. <u>ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน</u>

1. น้ำหนักบรรทุก

เพื่อควบคุมระยะแอ่นตัว จะสมมติให้แผ่นพื้นมีความหนา h = L/45 ดังนั้นตามแนวยาว h = 730/45 = 16.2 ซม. และตามแนวขวาง h = 610/45 = 13.6 ซม. ลองใช้ h = 16.5 ซม. หนัก = 0.165(2400) = 396 กก./ม.^{2}

จะได้ w_D = 396 +100 = 496 กก./ม.^{2}, w_L = 200 กก./ม.^{2},

น้ำหนักบรรทุกใช้งาน $w_w = w_{D+L}$ = 696 กก./ม.^{2} และ w_u = 1.4(496) + 1.7(200) = 1034.4 กก./ม.^{2}

L_1 = ความยาวช่วงตามแนว N-S

L_2 = ความกว้างของแถบออกแบบ (ตามแนว E-W) = 6.10 ม.

2. แรงพยุงและแนวลวดอัดแรง

เพื่อที่จะประมาณแรงพยุงเบื้องต้น จะสมมติให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตเนื่องจากแรงพยุง f_c = 12 กก./ซม.^{2}

จะได้แรง F = 12(16.5)(100) = 19 800 กก./ม.

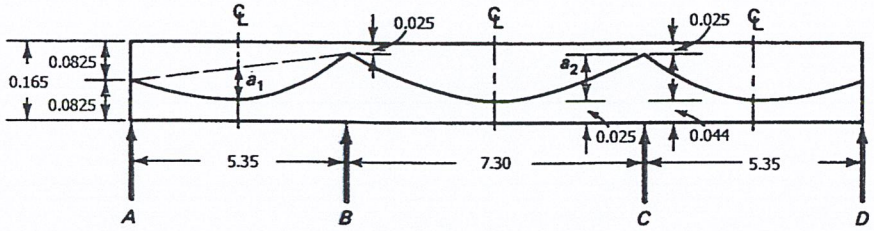
และในแถบกว้าง 6.1 ม. จะเกิดแรงทั้งหมด Fe = FL = 19 800(6.1) = 120 780 กก.

สำหรับลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. จะได้แรงอัดประสิทธิผลต่อเส้น $P_e = A_{ps}f_{pe}$ = 0.99(11 130) = 11 019 กก. ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณลวด = 120 780/11 019 = 11 เส้นต่อแถบออกแบบ

ซึ่งจะได้แรงอัดจริง $P_e = F_e$ = 11 019(11) = 121 206 กก. และแรง F จริง = 121 206/6.1 = 19 870 กก./ม. และได้หน่วยแรงอัดจริง f_c = 19 870/(16.5 x 100) = 12.04 กก./ซม.^{2} ซึ่งถือว่าใช้ได้

ดังนั้น จะใช้ f_c = 12.04 กก./ซม.^{2} เนื่องจากแรงพยุง และสมมติแนวลวดอัดแรงตามรูปข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่กึ่งกลางของช่วงปลาย AB และ CD

$a_1 = (8.25 + 14)/2 - 4.4 = 6.725$ ซม.

จากสมการที่ 1.16 สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมแบบพาราโบล่า, $w = 8Fa/L^2$ ดังนั้น

$w_{bal} = 8(19\ 870)(0.06725)/(5.35)^2 = 373.5$ กก./ม.^{2}

จะเหลือน้ำหนักสุทธิที่จะทำให้เกิดโมเมนต์ $w_{net} = w_w - w_{bal} = 696 - 373.5 = 322.5$ กก./ม.^{2}

สำหรับช่วงใน BC

$a_2 = 16.5 - 2.5 - 2.5 = 11.5$ ซม.

$w_{bal} = 8(19\ 870)(0.115)/(7.3)^2 = 343.0$ กก./ม.^{2}

$w_{net} = 696 - 343 = 353$ กก./ม.^{2}

3. คุณสมบัติของโครงข้อแข็งเทียบเท่า

ใช้โครงข้อแข็งเทียบเท่าตามแนว N-S ตามรูปแรเงาที่แสดงในแปลน ค่าสติฟเนสโดยประมาณของเสาที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นพื้น จะหาได้จากสมการข้างล่าง

$$K_c = \frac{4EI}{H - 2h}$$ โดยที่ H เป็นความสูงของชั้น = 2.70 ม.

และเนื่องจากใช้คอนกรีตกำลังอัดเดียวกันทั้งในเสาและแผ่นพื้น ดังนั้นจะให้ $E_{cc} = E_{cs} = E$

(a) *เสาภายนอก (35 ซม. x 30 ซม.)*

b = 35 ซม. จะได้ $I_c = 35(30)^3/12 = 78\ 750$ ซม.^{4}

$K_c = 4E(78\ 750)/(270 - 2x16.5) = 1329.1E$ กก.ซม.

และถ้ารวมเสาทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นพื้นจะได้ $K_c = 2(1329.1E) = 2658.2E$ กก.ซม.

จากสมการที่ 8.10b ค่าคงที่ของแรงบิด

$$C = \sum(1 - 0.63\frac{x}{y})\frac{x^3 y}{3} = (1 - 0.63\frac{16.5}{30})\frac{(16.5)^3(30)}{3} = 29\ 356$$

ดังนั้นสติฟเนสต้านแรงบิดของแผ่นพื้นตามแนวขวางของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{L_2\left(1-\frac{c_2}{L_2}\right)^3} = \frac{9E(29\,356)}{610\left(1-\frac{35}{610}\right)^3} = 517.1E \quad \text{กก.ซม.}$$

และถ้ารวมแผ่นพื้นทั้งสองข้างของเสาจะได้ $K_t = 2(517.1E) = 1034.2E$ กก.ซม.

จากสมการที่ 8.7 สติฟเนสของเสาเทียบเท่า

$$K_{ec} = (\frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t})^{-1} = \frac{1}{E}(\frac{1}{2658.2} + \frac{1}{1034.2})^{-1} = 744.6E \quad \text{กก.ซม.}$$

(b) *เสาภายใน (35 ซม. x 50 ซม.)*

b = 35 ซม. จะได้ $I_c = 35(50)^3/12 = 364\,583$ ซม.^{4}

K_c รวมด้านบนและล่าง $= 2[4E(364\,583)/(270 - 2x16.5)] = 12\,306.6\,E$ กก.ซม.

$$C = \sum (1-0.63\frac{x}{y})\frac{x^3 y}{3} = (1-0.63\frac{16.5}{50})\frac{(16.5)^3(50)}{3} = 59\,304$$

รวมแผ่นพื้นตามแนวขวางทั้งสองด้านของเสา

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{L_2\left(1-\frac{c_2}{L_2}\right)^3} = (2)\frac{9E(59\,304)}{610\left(1-\frac{35}{610}\right)^3} = 2089.3E \quad \text{กก.ซม.}$$

$$K_{ec} = (\frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t})^{-1} = \frac{1}{E}(\frac{1}{12\,306.6} + \frac{1}{2089.3})^{-1} = 1786.1E \quad \text{กก.ซม.}$$

(c) แผ่นพื้น

ความกว้างของแถบออกแบบ = 6.10 ม. ดังนั้น $I_s = 610(16.5)^3/12 = 228\,350$ ซม.^{4}

$$K_s = \frac{4E_{cs}I_s}{L_1 - \frac{c_1}{2}} = 4E(228\,350)/(L_1 - c_1/2) = 913\,399E/(L_1 - c_1/2)$$

สำหรับแผ่นพื้นด้านขวาของเสาแนว A: $L_1 = 535$, $c_1 = 30$; $K_s = 1756.5E$ กก.ซม.

แผ่นพื้นด้านซ้ายของเสาแนว B: $L_1 = 535$, $c_1 = 50$; $K_s = 1791E$ กก.ซม.

และแผ่นพื้นด้านขวาของเสาแนว B: $L_1 = 730$, $c_1 = 50$; $K_s = 1295.6E$ กก.ซม.

จากสมการที่ 8.12: $DF = \frac{K_s}{\sum K}$ โดยที่ $\sum K = K_{ec} + K_{s(left)} + K_{s(right)}$ ดังนั้น

ที่จุด A: $DF_{AB} = 1756.5/(1756.5 + 744.6) = 0.702$

ที่จุด B: $DF_{BA} = 1791/(1791 + 1295.6 + 1786.1) = 0.367$

$DF_{BC} = 1295.6/(1791 + 1295.6 + 1786.1) = 0.266$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. *โมเมนต์และหน่วยแรงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน*

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกสุทธิ

สำหรับช่วงปลาย AB และ CD, w_{net} = 322.5 กก./ม.^{2}

ได้ FEM = $wL_n^2/12 = 322.5(5.35)^2/12 = 769.23$ กก.ม.

สำหรับช่วงใน BC, w_{net} = 353 กก./ม.^{2} ได้ FEM = $353(7.3)^2/12 = 1567.61$ กก.ม.

Joint	A	B		C		D
Member	A-B	B-A	B-C	C-B	C-D	D-C
DF	0.702	0.367	0.266	0.266	0.367	0.702
COF	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
FEM	-769.23	769.23	-1567.61	1567.61	-769.23	769.23
	540.00	270.00			-270.00	-540.00
	96.96	193.92	140.55	-140.55	-193.92	-96.96
	-68.06	-34.03	-70.28	70.28	34.03	68.06
		38.28	27.75	-27.75	-38.28	
Final M	**-200.33**	**1237.40**	**-1469.59**	1469.59	-1237.40	200.33

ในโครงที่มีช่วงมากกว่านี้ จะสมมติให้ฐานรองรับอีกสองช่วงจากจุด C เป็นฐานยึดแน่น

หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่เสา

โมเมนต์สุทธิที่ขอบในของเสา B มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างโมเมนต์ที่กลางเสากับ Vc/3 ดังนั้น

$$M_{net,max} = 1469.59 - \frac{353(7.3)}{2}\frac{(0.5)}{3} = 1254.85 \quad \text{กก.ม.}$$

โมดูลัสหน้าตัดของแผ่นพื้น $S = bh^2/6 = 100(16.5)^2/6 = 4537.5$ ซม.^{3} ได้หน่วยแรงในคอนกรีต

$$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{M}{S} = -12.04 + \frac{1254.85(100)}{4537.5} = +15.62 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ $f_t = 1.6\sqrt{f_c'} = 26.8$ กก./ซม.^{2} > 15.62 กก./ซม.^{2} ใช้ได้

หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่กลางช่วง

โมเมนต์สุทธิที่กลางช่วง มีค่าเท่ากับ $wL^2/8$ – ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ที่เสาสองข้าง ดังนั้น

$M_{net,max} = 353(7.3)^2/8 - 1469.59 = 881.83$ กก.ม.

$$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{M}{S} = -12.04 + \frac{881.83(100)}{4537.5} = +7.39 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงที่ยอมให้ $f_t = 0.53\sqrt{f'_c}$ = 8.9 กก./ซม.^{2} > 7.39 กก./ซม.^{2} ใช้ได้

ถ้าหน่วยแรงดึงสูงกว่าค่าที่ยอมให้ จะต้องใช้เหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึงทั้งหมดโดยใช้ $f_s = f_y/2$

II. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกวิบัติ

1. โมเมนต์เนื่องจากแรงพยุง M_{bal}

โมเมนต์รอง $M_s = M_{bal} - M_1$ โดยที่ M_{bal} เป็นโมเมนต์เนื่องจากแรงพยุง และ M_1 เป็นโมเมนต์หลัก = $P_e e$ = Fe

สำหรับช่วง AB และ CD: w_{bal} = 373.5 กก./ม.^{2} ได้ $FEM_{bal} = 373.5((5.35)^2/12 = 890.88$ กก.ม./ม.

สำหรับช่วงใน BC, w_{bal} = 343 กก./ม.^{2} ได้ $FEM_{bal} = 343(7.3)^2/12 = 1523.20$ กก.ม./ม.

ทำการกระจายโมเมนต์เพื่อหา M_{bal} สูงสุดในเสาด้านนอก

Joint	A	B		C		D
Member	A-B	B-A	B-C	C-B	C-D	D-C
DF	0.702	0.367	0.266	0.266	0.367	0.702
COF	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
FEM	-890.88	890.88	-1523.20	1523.20	-890.88	890.88
	625.40	312.70			-312.70	-625.40
	58.65	117.30	85.02	-85.02	-117.30	-58.65
	-41.17	-20.59	-42.51	42.51	20.59	41.17
		23.16	16.78	-16.78	-23.16	
Final M	**-248.00**	**1323.45**	**-1463.91**	1463.91	-1323.45	248.00

2. โมเมนต์รอง M_s และโมเมนต์ที่ต้องการ M_u

ช่วง AB: ที่จุด A: e = 0, โมเมนต์หลักที่ A = $P_e e$ = 0

จากตารางข้างบน M_{bal} = 248 กก.ม./ม. ได้ $M_s = M_{bal} - M_1 = 248 - 0 = 248$ กก.ม./ม.

$FEM_u = w_u L^2/12 = 1034.4(5.35)^2/12 = 2467.26$ กก.ม. /ม.

ช่วง BA: ที่จุด B: e = 8.25 – 2.5 = 5.75 ซม., โมเมนต์หลักที่ A = 19 870(0.0575) = 1142.52 กก.ม./ม.

จากตารางข้างบน M_{bal} = 1323.45 กก.ม. /ม. ได้ $M_s = 1323.45 - 1142.52 = 180.93$ กก.ม./ม.

$FEM_u = w_u L^2/12 = 1034.4(5.35)^2/12 = 2467.26$ กก.ม. /ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง BC: ที่จุด B: e = 8.25 – 2.5 = 5.75 ซม., โมเมนต์หลักที่ A = 19 870(0.0575) = 1142.52 กก.ม./ม.

จากตารางข้างบน M_{bal} = 1463.91 กก.ม. ได้ M_s = 1463.91 – 1142.52 = 321.39 กก.ม./ม.

$FEM_u = w_uL^2/12 = 1034.4(7.3)^2/12 = 4593.6$กก.ม. /ม.

ทำการกระจายโมเมนต์ที่ต้องการ อาจจะต้องเลือกวางน้ำหนักบรรทุกช่วงเว้นช่วงเพื่อหากรณีวิกฤตของน้ำหนักบรรทุกใช้งานและน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณแล้ว

Joint	A	B		C		D
Member	A-B	B-A	B-C	C-B	C-D	D-C
DF	0.702	0.367	0.266	0.266	0.367	0.702
COF	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
FEM	-2467.26	2467.26	-4593.6	4593.6	-2467.26	2467.26
	1732.02	866.01			-866.01	-1732.02
	231.27	462.54	335.25	-335.25	-462.54	-231.27
	-162.35	-81.18	-167.63	167.63	81.18	162.35
		91.31	66.18	-66.18	-91.31	
Final M	**-666.32**	**3805.94**	**-4359.80**	4359.80	-3805.94	666.32

3. *กำลังรับโมเมนต์ที่ต้องการ M_u*

โมเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบ เป็นผลต่างระหว่างโมเมนต์ที่ต้องการ (เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณเพิ่ม) และโมเมนต์รอง ดังนั้น $M_u = M_u^- - M_s$

จุด *A* : M_u = 666.32 – 248 = 418.32 กก.ม./ม.

$$V_{AB} = \frac{w_u L}{2} - \frac{M^-_{u@B} - M^-_{u@A}}{L} = \frac{1034.4(5.35)}{2} - \frac{3805.94 - 666.32}{5.35}$$

$$= 2767.02 - 586.84 = 2180.18 \text{กก./ม.}$$

โมเมนต์ที่ขอบเสา มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างโมเมนต์ที่กลางเสากับ Vc/3 ดังนั้นที่ขอบเสา

M_u = 418.32 – 2180.18(0.3)/3 = 200.30 กก.ม./ม.

จุด *B (ช่วง BA)*: M_u = 3805.94 – 180.93 = 3625.01 กก.ม./ม.

$$V_{BA} = \frac{w_u L}{2} + \frac{M^-_{u@B} - M^-_{u@A}}{L} = 2767.02 + 586.84 = 3353.86 \text{ กก./ม.}$$

โมเมนต์ที่ขอบเสา M_u = 3625.01 – 3353.86(0.5)/3 = 3066.03 กก.ม./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุด *B (ช่วง BC)*: $M_u = 4359.80 - 321.39 = 4038.41$ กก.ม./ม.

$$V_{BC} = \frac{w_u L}{2} + \frac{M^-_{u@B} - M^-_{u@A}}{L} = 1034.4(7.3)/2 + 0 = 3775.56$$ กก./ม.

โมเมนต์ที่ขอบเสา $M_u = 4038.41 - 3775.56(0.5)/3 = 3409.15$ กก.ม./ม.

โมเมนต์บวกสูงสุดที่กลางช่วง AB

ตำแหน่งโมเมนต์บวกสูงสุดคือตำแหน่งที่แรงเฉือนเป็นศูนย์ซึ่งห่างจากจุด A

$= V_{AB}/w_u = 2180.18/1034.4 = 2.11$ ม.

ที่ A: $M_u^- = 666.32$ กก.ม./ม. และที่กลางช่วง $M_s = (248 + 180.93)/2 = 214.46$ กก.ม./ม.

$$+M_{u,max} = V_{AB}x - \frac{w_u x^2}{2} - M_u^- + M_s = 2180.18(2.11) - \frac{1034.4(2.11)^2}{2} - 666.32 + 214.46$$

$= 4600.18 - 2302.63 - 666.32 + 214.46 = 1845.69$ กก.ม./ม.

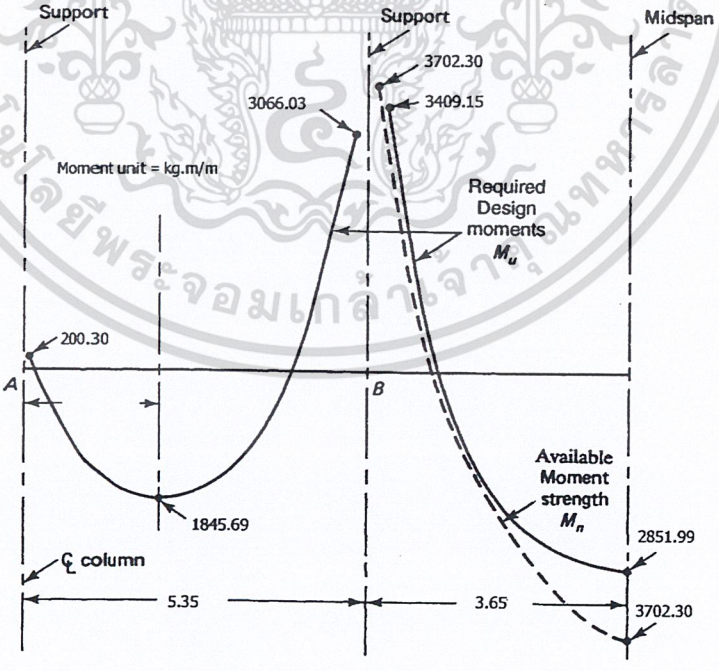
โมเมนต์บวกสูงสุดที่กลางช่วง BC

ตำแหน่งโมเมนต์บวกสูงสุดเกิดที่กลางช่วง เนื่องจากโมเมนต์ลบที่ปลายทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน

$M_u^- = 4359.8$ กก.ม./ม. และที่กลางช่วง $M_s = 321.39$ กก.ม./ม.

$+M_{u,max} = w_u L^2/8 - M_u^- + M_s = 1034.4(7.3)^2/8 - 4359.8 + 321.39 = 2851.99$ กก.ม./ม.

รูปข้างล่างแสดงโมเมนต์ที่ต้องการ M_u ที่ตำแหน่งต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III กำลังระบุรับโมเมนต์ Mn

1. เสาภายในที่ B

กำลังระบุรับโมเมนต์ที่ตำแหน่งนี้ $M_n = M_u/\phi = 3409.15/0.9 = 3787.94$ กก.ม./ม.

ปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาน้อยสุดที่ต้องมี $A_s = 0.00075hL = 0.00075(16.5)(535 + 730)/2 = 7.83$ ซม.^{2}

ลอง DB12 จำนวน 7.83/1.13 = 7 เส้น ยาวเส้นละ 3.35 ม. วางเหนือเสาในบริเวณกว้างเท่ากับความกว้างของเสาบวกกับหนึ่งเท่าครึ่งของความหนาของแผ่นพื้นออกไปแต่ละด้านของเสา = 35 + 2(1.5)(16.5) = 84.5 ซม. ได้ระยะเรียง = 84.5/7 = 12 ซม.

จากขั้นตอนที่ I.2 ในแถบออกแบบซึ่งกว้าง 6.1 ม. ใช้ลวดตีเกลียวขนาด 12.7 มม. จำนวน 11 เส้น ได้ให้เหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมวางอยู่ที่ระดับเดียวกัน มี d = 16.5 – 2.5 = 14 ซม. ดังนั้น

$\rho_p = A_{ps}/bd = 11(0.99)/(610x14) = 0.0013$

$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p}$ = 11 130 + 700 + 280/(300x0.0013) = 12 548 กก./ซม.^{2}

$F_{ps} = A_{ps}f_{ps}/L_2 = 12\,548(11)(0.99)/6.1 = 22\,401$ กก./ม.

$F_s = A_sf_y/L_2 = 7(1.13)(4000)/6.1 = 5186.9$ กก./ม.

ดังนั้นรวมแรงทั้งหมด $F = 22\,401 + 5186.9 = 27\,587.9$ กก./ม. และได้

$$a = \frac{A_s f_y + A_{ps} f_{ps}}{0.85 f'_c b} = \frac{27\,587.9}{0.85(280)(100)} = 1.16 \text{ ซม.}$$

$M_n = (A_sf_y + A_{ps}f_{ps})(d - a/2) = 27\,587.9(14 - 1.16/2)/100 = 3702.3$ กก.ม./ม. < 3787.94 กก.ม./ม.

แสดงว่ากำลังไม่เพียงพอ ต้องการเพิ่มอีก $\Delta M_n = 3787.94 - 3702.3 = 85.64$ กก.ม./ม.

แต่อาจจะลดค่าโมเมนต์ลบที่ต้องการด้วยการกระจายโมเมนต์ซ้ำ

2. ที่กลางช่วง BC

กำลังระบุรับโมเมนต์ที่ตำแหน่งนี้ $M_n = M_u/\phi = 2851.99/0.9 = 3168.9$ กก.ม./ม.

พิจารณาเฉพาะเหล็กเสริมอัดแรงอย่างเดียว $a = \frac{A_{ps}f_{ps}}{0.85f'_cb} = \frac{22\,401}{0.85(280)(100)} = 0.94$ ซม.

$M_n = A_{ps}f_{ps}(d - a/2) = 22\,401(14 - 0.94/2)/100 = 3030.8$ กก.ม./ม. < 3168.9 กก.ม./ม. ใช้ไม่ได้

ถ้าลองเพิ่มเหล็กเสริมธรรมดา DB12 จำนวนสองเส้นในแถบออกแบบ 6.1 ม. จะได้ $A_s = 2(1.13) = 2.26$ ซม.^{2}

$F_s = A_sf_y/L_2 = 2(1.13)(4000)/6.1 = 1482$ กก./ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรวมแรงทั้งหมด F = 22 401 + 1482 = 23 883 กก./ม. และได้

$$a = \frac{A_s f_y + A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c' b} = \frac{23\,883}{0.85(280)(100)} = 1.00 \quad \text{ซม.}$$

$M_n = (A_s f_y + A_p f_{ps})(d - a/2) = 23\,883(14 - 1.00/2)/100 = 3224.2$ กก.ม./ม. > 3168.9 กก.ม./ม. ใช้ได้ และเหลือ $\Delta M_R = 3224.2 - 3168.9 = 55.31$ กก.ม./ม. เพื่อรับการกระจายซ้ำของโมเมนต์

3. ***การกระจายซ้ำของโมเมนต์ที่ยอมให้ ΔM_R จากเสาสู่กลางช่วง***

$\omega_p = \rho_p f_{ps}/f_c' = 0.0013(12\,548)/280 = 0.0583$

$d = d_p = 14$ ซม., $\omega = \omega' = 0$, $\beta_1 = 0.85$, $0.24\beta_1 = 0.204 > \omega_p$

$$\rho_D = 20\left[1 - \frac{\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')}{0.36\beta_1}\right] = 20[1 - 0.0583/(0.36x0.85)] = 16.2\%$$

ดังนั้นใช้สัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนต์ซ้ำเป็น 12%

$\Delta M_R = 0.12(3702.3) = 444.3$ กก.ม./ม. > ΔM_R ที่มีอยู่ = 55.31 กก.ม./ม. ใช้ได้

ดังนั้นเพิ่ม DB12 จำนวน 5 เส้นรวมเป็น 7 เส้นที่กลางช่วง จะได้กำลังโมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้หน้าตัดที่เสา = 3702.3 กก.ม./ม. เหลือ $\Delta M_n = 3702.3 - 3168.9 = 533.4$ กก.ม./ม. > $\Delta M_R = 444.3$ กก.ม./ม. ซึ่งเพียงพอต่อการกระจายซ้ำไปยังเหนือเสา

สรุป

หลังจากการกระจายซ้ำ

จะได้ – $M_n = 3787.94 - 533.4 = 3254.5$ กก.ม./ม. ซึ่งน้อยกว่ากำลังที่หน้าตัดรับได้ = 3702.3 กก.ม./ม.

และ + $M_n = 3168.9 + 533.4 = 3702.3$ กก.ม./ม. ซึ่งเท่ากับกำลังที่หน้าตัดรับได้

ดังนั้นนอกเหนือไปจากเหล็กเสริมอัดแรงที่วิ่งยาวตลอดในแถบออกแบบกว้าง 6.1 ม. จะต้องเสริมเหล็กเสริมธรรมดา ขนาด 12 มม จำนวน 7 เส้นที่ด้านล่างที่กลางช่วง และด้านบนที่หัวเสา โดยที่หัวเสาให้มีระยะเรียงเป็น 12 ซม.

หน้าตัดที่กลางช่วง AB และ CD มีกำลังรับโมเมนต์บวกเพียงพอ ในระหว่างที่กำลังของหน้าตัดที่เสานอก A และ D จะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงที่เกิดจากการส่งถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การจัดเหล็กเสริมในแถบเสา

ความกว้างของแถบเสา = 6.1/2 = 3.05 ม. ถ้าสมมติว่าจะวางร้อยละ 70 ของลวดอัดแรงทั้งหมดลงในแถบเสา จะได้จำนวน 0.7(11) = 7.7 เส้น ดังนั้นจะเลือกวางเจ็ดเส้นในแถบเสา โดยให้จำนวนสามเส้นผ่านไปบนหัวเสา ดังนั้นจะเหลือจำนวนสี่เส้นในแถบกลาง

การจัดวางเหล็กเสริมแบบนี้ มาจากสมมติฐานของการแบ่งโมเมนต์ลงแถบเสาและแถบกลางดังนี้

อัตราส่วนของโมเมนต์ที่ถ่ายลงแถบเสา = 7/11 = 0.64

อัตราส่วนของโมเมนต์ที่ถ่ายลงแถบกลาง = 0.36

โดยที่ โมเมนต์ลบสูงสุดที่ขอบเสา B = 1254.85 กก.ม./ม. และโมเมนต์บวกสูงสุดที่กลางช่วง = 881.83 กก.ม./ม. (จากขั้นตอนที่ I.4)

IV. <u>กำลังรับแรงเฉือน</u>

I. เสานอก A และ D

(a) น้ำหนักบรรทุก

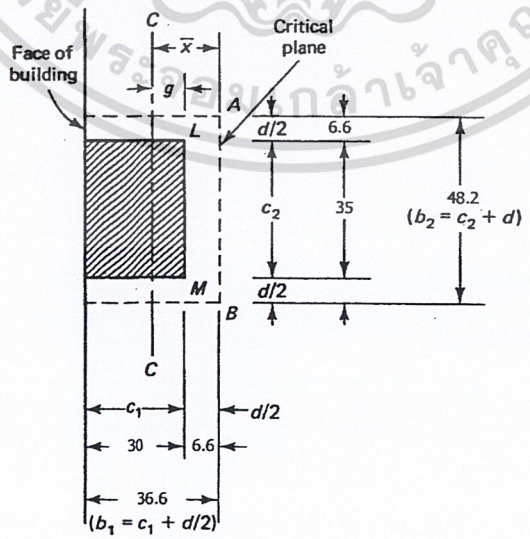
จากขั้นตอน II.3, V_{AB} = 2180.18 กก./ม. หรือเป็นแรงเฉือนทั้งหมด = 2180.18(6.1) = 13 299.1 กก.

และถ้าสมมติให้ผนังภายนอกรวมกระจกหนัก = 750 กก./ม.

จะได้แรงเฉือน V_u = 1.4(750)(6.1) = 6405 กก.

รวมเป็นแรงเฉือนทั้งหมด, V_{uA} = 13 299.1 + 6405 = 19 704.1 กก.

หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ระยะ d/2 จากขอบเสาตามที่แสดงในรูปข้างล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$d = 16.5 - 2.5 = 14$ ซม.

d_p มากสุดที่ยอมให้ $= d_v = 0.8h = 0.8(16.5) = 13.2$ ซม.

$c_1 = 30$ ซม., $b_1 = c_1 + d/2 = 30 + 13.2/2 = 36.6$ ซม.

$c_2 = 35$ ซม., $b_2 = c_2 + d = 35 + 13.2 = 48.2$ ซม.

$A_c = b_o d = [2(36.6) + 48.2](13.2) = 121.4(13.2) = 1602.5$ ซม.^{2}

จากรูปข้างบน รวมโมเมนต์ของเส้นรอบรูปวิกฤตรอบ AB จะได้

$d(2b_1 + b_2)\bar{x} = d(2b_1)(b_1/2)$

$\bar{x} = c_{AB} = b_1^2/(2b_1 + b_2) = 36.6^2/(2 \times 36.6 + 48.2) = 11.03$ ซม.

$c_{CD} = b_1 - c_{AB} = 36.6 - 11.03 = 25.57$ ซม.

$g = \bar{x} - d/2 = 11.03 - 13.2/2 = 4.43$ ซม.

$$\gamma_f = \frac{1}{1+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} = \frac{1}{1+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{36.6}{48.2}}} = 0.63, \qquad \gamma_v = 1-\gamma_f = 0.37$$

$$J_c = \frac{b_1 d^3}{6} + \frac{2d}{3}(c_{AB}^3 + c_{CD}^3) + b_2 d c_{AB}^2$$

$$= \frac{36.6(13.2)^3}{6} + \frac{2(13.2)}{3}(11.03^3 + 25.57^3) + 48.2(13.2)(11.03)^2$$

$= 14\,029.8 + 158\,930 + 77\,405.5 = 250\,365$ ซม.^{4}

จากขั้นตอนที่ II.3 โมเมนต์ที่กลางเสา $M_u = -418.32$ กก.ม./ม.

ดังนั้น โมเมนต์ทั้งหมดในแถบเสา $= -418.32(6.1) = -2551.75$ กก.ม.

และถ้าถือว่าแรงเฉือน V_u กระทำที่ขอบเสาสำหรับการส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์ จะได้โมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ของแรงเฉือนเป็น $V_u g = 13\,299.1(0.0443) = 589.15$ กก.ม.

รวมเป็นโมเมนต์ทั้งหมด $M_{uc} = -(2551.75 + 589.15) = 3140.9$ กก.ม.

ดังนั้นกำลังระบุรับโมเมนต์ $M_n = M_{uc}/\phi = 3140.9/0.9 = 3489.9$ กก.ม.

(b) *การส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์*

ส่วนของโมเมนต์ที่จะส่งถ่ายด้วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ $\gamma_v M_n = 0.37(3489.9) = 1291.3$ กก.ม.

จะได้หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากแรงเฉือนบนเส้นรอบรูป ผลของ $\gamma_v M_n$ และน้ำหนักของผนังเป็น

$$v_n = \frac{V_u}{\phi A_c} + \frac{\gamma_v c_{AB} M_n}{J_c} = \frac{19\,704.1}{0.85(1602.5)} + \frac{11.03(1291.3)(100)}{250\,365}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= 14.46 + 5.69 = 20.15$ กก./ซม.^{2}

จากขั้นตอน I.2 ได้หน่วยแรงอัดเฉลี่ยในคอนกรีตเนื่องการอัดแรง P_e, $f_{pc} = P_e/A_c = 12.04$ กก./ซม.^{2}

$$v_c = 0.27\beta_p\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc} + V_p/\, b_o d \qquad (8.24)$$

โดยที่ β_p = ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง 3.5 และ $(\alpha_s d/b_o + 1.5)$ โดยที่ α_s มีค่าเป็น 40, 30 และ 20 สำหรับเสาภายใน เสาริม และเสามุม ตามลำดับ

$\alpha_s d/b_o + 1.5 = 30(14)/121.4 + 1.5 = 4.96 > 3.5$ ใช้ $\beta_p = 3.5$

และถ้าไม่รวมองค์ประกอบในแนวดิ่ง V_p ของแรงดึงในลวดอัดแรง จะได้กำลังเฉือนของคอนกรีต

$v_c = 0.27(3.5)\sqrt{280} + 0.3(12.04) = 15.81 + 3.61 = 19.42$ กก./ซม.$^2 \approx 20.15$กก./ซม.^{2}

ซึ่งถ้ารวม V_p ด้วย ก็จะได้กำลังเฉือนของคอนกรีตสูงขึ้น

(c) *การส่งถ่ายโมเมนต์ด้วยแรงดัด*

ส่วนของโมเมนต์ที่จะส่งถ่ายด้วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ $\gamma_f M_n = 0.63(3489.9) = 2198.6$ กก.ม.

จากสมการที่ 8.20: $\min A_s = 0.00075hL = 0.00075(16.5)(535) = 6.62$ ซม.^{2}

ใช้ 6-DB12 ยาวเส้นละ 1.8 ม. งอปลายตามมาตรฐาน ได้ $A_s = 6(1.13) = 6.78$ ซม.^{2}

จะหาหน่วยแรงในลวดอัดแรงได้จากสมการที่ 8.23 โดยสมมติให้ลวดสามเส้นผ่านหัวเสาที่เสาริม ทำให้ได้ e = 0 และ d = 16.5/2 = 8.25 ซม.

และความกว้างประสิทธิผลเหนือเสา $b = c_2 + 3h = 35 + 3(16.5) = 84.5$ ซม.

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd_p} = \frac{3(0.99)}{68(8.25)} = 0.0053$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} = 11\,130 + 700 + 280/(300\text{x}0.0053) = 12\,006 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$a = \frac{A_s f_y + A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c' b} = \frac{6.78(4000) + 3(0.99)(12\,006)}{0.85(280)(68)} = 3.88 \text{ ซม.}$$

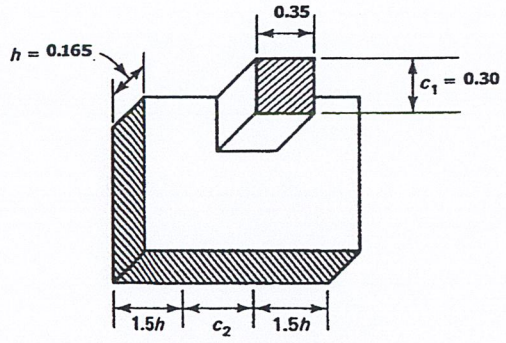
$M_n = A_s f_y(d - a/2) + A_{ps} f_{ps}(d_p - a/2)$

$= [6.78(4000)(14 - 3.88/2) + 3(0.99)(12\,006)(8.25 - 3.88/2)]/100$

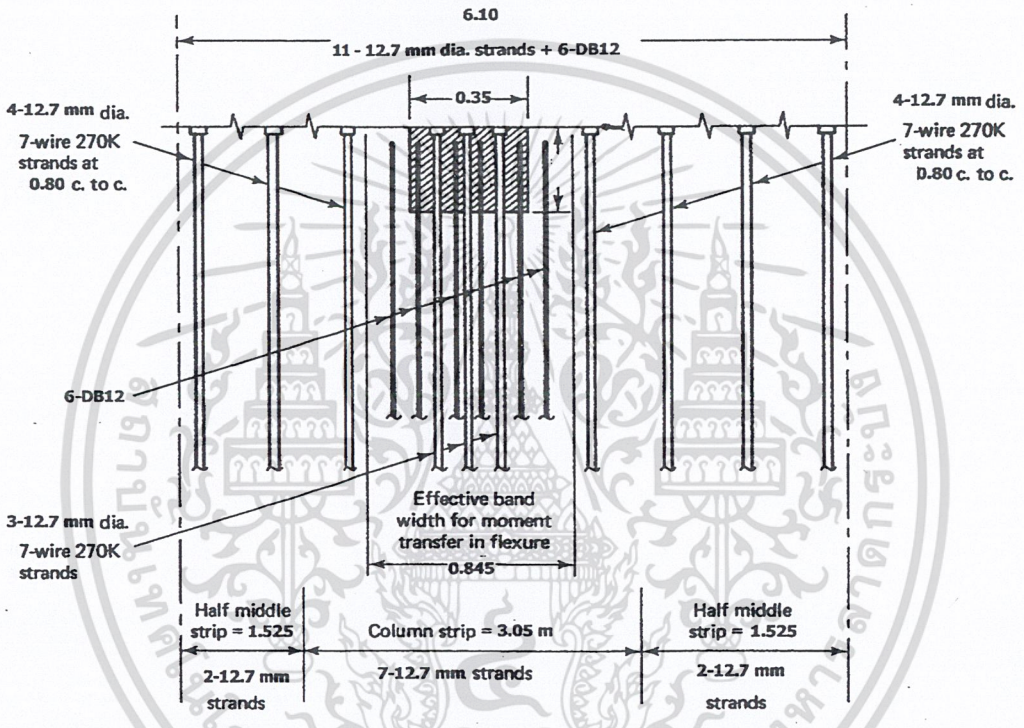
$= 3270.7 + 2250.0 = 5520.7$ กก.ม. >> $\gamma_f M_n = 0.63(3489.9) = 2198.6$ กก.ม.

รูปข้างล่างแสดงการจัดเหล็กเสริมเพื่อการถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์ที่บริเวณเสาภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

2. เสาภายใน B และ C

(a) น้ำหนักบรรทุก

จากขั้นตอน II.3, $V_{AB} + V_{BC}$ = 3353.86 + 3775.56 = 7129.42 กก./ม.

หรือเป็นแรงเฉือนทั้งหมด = 7129.42(6.1) = 43 489.5 กก.

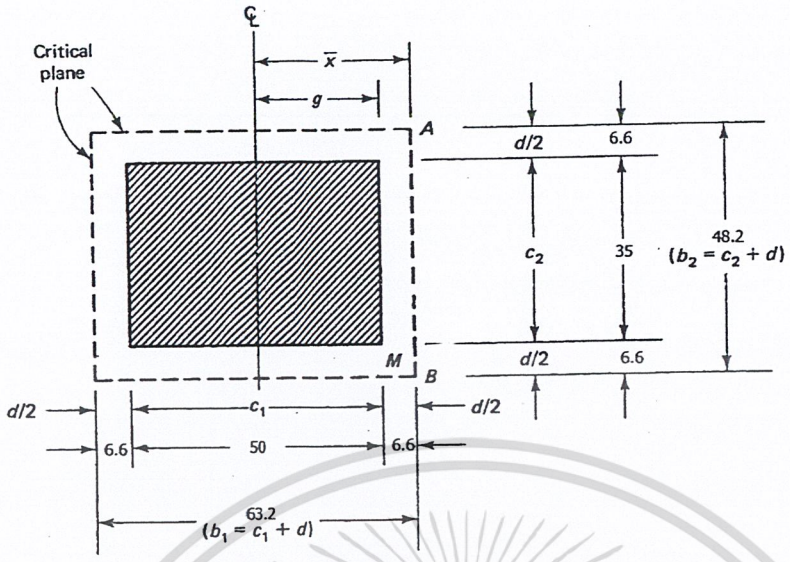
d = 16.5 – 2.5 = 14 ซม.

d_p มากสุดที่ยอมให้ = d_v = 0.8h = 0.8(16.5) = 13.2 ซม.

c_1 = 50 ซม., $b_1 = c_1 + d$ = 50 + 13.2 = 63.2 ซม., $g = c_{AB} = c_1/2$ = 25 ซม.

c_2 = 35 ซม., $b_2 = c_2 + d$ = 35 + 13.2 = 48.2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$A_c = b_o d = 2[63.2 + 48.2](13.2) = 222.8(13.2) = 2940.96$ ซม.^{2}

$$J_c = \frac{db_1^3}{6} + \frac{b_1 d^3}{6} + \frac{db_2 b_1^2}{2} = \frac{13.2(63.2)^3}{6} + \frac{63.2(13.2)^3}{6} + \frac{13.2(48.2)(63.2)^2}{2}$$

$= 555\,359 + 24\,226 + 1\,270\,648 = 1\,850\,233$ ซม.^{4}

$$\gamma_f = \frac{1}{1+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} = \frac{1}{1+\frac{2}{3}\sqrt{\frac{63.2}{48.2}}} = 0.567, \quad \gamma_v = 1-\gamma_f = 0.433$$

จากขั้นตอนที่ II.3: $M_{BA} = -3066.03$, $M_{BC} = -3409.15$ กก.ม./ม.

$V_{BA} = 3353.86$ และ $V_{BC} = 3775.56$ กก./ม.

ดังนั้น M_u ที่ถ่ายลงเสา = $M_{BC} - M_{BA} = -343.12$ กก.ม./ม.

และโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ของแรงเฉือน = $V_u g = (3775.56 - 3353.86)(0.25) = 105.4$ กก.ม.

รวมเป็นโมเมนต์ทั้งหมด $M_{ue} = 343.12(6.1) + 105.4 = 2198.5$ กก.ม.

ดังนั้นกำลังระบุรับโมเมนต์ $M_n = M_{ue}/\phi = 2198.5/0.9 = 2442.7$ กก.ม.

(b) การส่งถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์

ส่วนของโมเมนต์ที่จะส่งถ่ายด้วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ $\gamma_v M_n = 0.433(2442.7) = 1057.7$ กก.ม.

$$v_n = \frac{V_u}{\phi A_c} + \frac{\gamma_v c_{AB} M_n}{J_c} = \frac{43\,489.5}{0.85(2940.96)} + \frac{25(1057.7)(100)}{1\,850\,233}$$

$= 17.40 + 1.43 = 18.83$ กก./ซม.^{2} $< v_c = 19.42$ กก./ซม.^{2} ใช้ได้

(c) การส่งถ่ายโมเมนต์ด้วยแรงดัด

ส่วนของโมเมนต์ที่จะส่งถ่ายด้วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับ $\gamma_f M_n = 0.567(2442.7) = 1385.01$ กก.ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างประสิทธิผลเหนือเสา $b = c_2 + 3h = 35 + 3(16.5) = 84.5$ ซม. และสมมติให้ลวดสามเส้นผ่านหัวเสาที่เสาภายในที่ B และ C ทำให้ได้ $d_p = 16.5 - 2.5 = 14$ ซม.

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd_p} = \frac{3(0.99)}{68(14)} = 0.0031$$

$$f_{ps} = f_{pe} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} = 11\,130 + 700 + 280/(300\text{x}0.0031) = 12\,129 \text{ กก./ซม.}^2$$

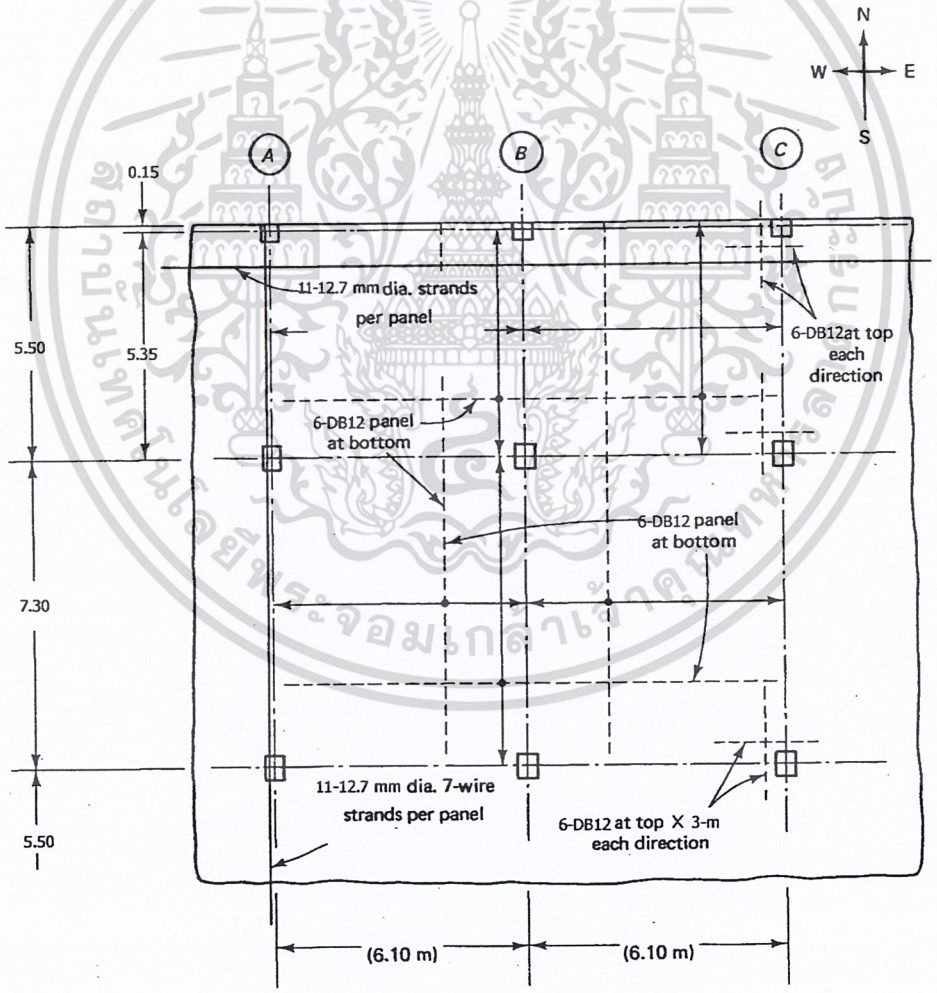
และถ้าเสริม 6-DB12 x 3.6-ม. เป็นปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาน้อยสุดที่ต้องมี จะได้

$$a = \frac{A_s f_y + A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c' b} = \frac{6.78(4000) + 3(0.99)(12\,129)}{0.85(280)(68)} = 3.90 \quad \text{ซม.}$$

$M_n = A_s f_y(d - a/2) + A_{ps} f_{ps}(d_p - a/2)$

$= [6.78(4000)(14 - 3.9/2) + 3(0.99)(12\,129)(14 - 3.9/2)]/100$

$= 3268 + 4341 = 7609$ กก.ม. >> $\gamma_f M_n = 1385.01$ กก.ม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9

ข้อต่อในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

9.1 คำนำ

ข้อต่อมีหน้าที่ในการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกและหน่วยแรงจากส่วนหนึ่งของโครงสร้างไปยังส่วนอื่นที่อยู่ติดกันได้อย่างประหยัด และยังทำให้เกิดเสถียรภาพขึ้นในระบบโครงสร้าง แรงที่กระทำบนข้อต่อไม่จำกัดแค่น้ำหนักโน้มถ่วงแต่ยังรวมถึงแรงลม แผ่นดินไหว การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการคืบและการหดตัว ความแตกต่างในการเคลื่อนตัวของแต่ละองค์อาคาร และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ดังนั้นข้อต่อจึงเป็นจุดด้อยที่สุดในระบบโครงสร้างทั้งหมด ทำให้ต้องออกแบบข้อต่อให้มีกำลังระบุสูงกว่าองค์อาคารที่เชื่อมด้วยข้อต่อนี้ ซึ่งจะทำได้โดยการเพิ่มตัวคูณน้ำหนักบรรทุกอีกอย่างน้อย 1.3 เท่าในการออกแบบข้อต่อ ยกเว้นในข้อต่อที่รับการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุกได้มาก เช่น แผ่นรองรับที่ฐานของเสา ซึ่งในการออกแบบแผ่นรองรับนี้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มตัวคูณน้ำหนักบรรทุก และจะต้องออกแบบทุกข้อต่อให้รับแรงดึงในแนวนอนได้อย่างน้อย 0.2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ในแนวดิ่ง

ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบการรับกำลังของข้อต่อมีดังนี้

1. รูปแบบของการถ่ายน้ำหนักบรรทุก
2. ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
3. การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
4. ความเหนียว
5. ความคงทน
6. ความต้านทานไฟ
7. ความคลาดเคลื่อนและช่องว่างที่ต้องการ
8. ข้อพิจารณาในการติดตั้ง
9. ข้อพิจารณาในสภาพอากาศ (ร้อนและเย็น)
10. ความประหยัดในรายละเอียดของข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

ช่องว่างระหว่างแต่ละชิ้นส่วนจะต้องกำหนดจากความเป็นไปได้ ในกรณีที่ยอมให้มีความคลาดเคลื่อนมากในโครงสร้างฐานรองรับ หรือในกรณีที่ไม่ได้ระบุความคลาดเคลื่อนไว้ ก็จะต้องกำหนดช่องว่างให้มีขนาดเพิ่มขึ้นตามกรณี คณะกรรมการรายละเอียดข้อต่อของ PCI ได้กำหนดความคลาดเคลื่อนจากมิติในแบบของคาน เสา และ แผ่นพื้นที่มีคานขอบ ดังต่อไปนี้

1. ความเบี่ยงเบนจากตำแหน่งในแปลนของเสาหรือคานใด ๆ : ± 1.25 ซม.
2. ความเบี่ยงเบนของเส้นตรงที่ใช้ก่อสร้างที่ขนานกับเส้นตรงในแบบ : 0.2 ซม. ต่อเมตร สำหรับคานที่มีความยาวน้อยกว่า 6 ม. และเสาซึ่งห่างกันน้อยกว่า 6 ม. : 1.25 ซม.
3. ความเบี่ยงเบนของแนวเสาที่อยู่ใกล้กันบนแต่ละชั้น : 1.25 ซม.
4. ความเบี่ยงเบนในแนวดิ่ง : 0.625 ซม. สำหรับความสูงทุกๆ 3 ม. แต่ต้องไม่เกิน 2.5 ซม. สำหรับความสูงทั้งหมด
5. ความเบี่ยงเบนของระดับของพื้นที่รับแรงแบกทานในคานหรือเสาที่ตำแหน่งใดก็ตาม : ± 1.25 ซม.
6. ความเบี่ยงเบนของระดับผิวบนของคานขอบ : 1.25 ซม.
7. ความเบี่ยงเบนของระดับของพื้นที่รับแรงแบกทานจากเส้นลากขนานกับเส้นระดับในแบบ: 0.625 ซม.ต่อเมตร, สำหรับคานที่มีความยาวน้อยกว่า 6 ม. และเสาซึ่งห่างกันน้อยกว่า 6 ม. : 1.25 ซม.
8. ความเบี่ยงเบนของระยะความยาวรับแรงแบกทานบนฐานรองรับ : ± 2.0 ซม.
9. ความเบี่ยงเบนของระยะความกว้างรับแรงแบกทานบนฐานรองรับ : ± 1.25 ซม.
10. ความเบี่ยงเบนของแนวที่มาพบกัน : 0.625 ซม.

ตารางที่ 9.1 แสดงความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในข้อต่อ

9.3 องค์อาคารเชิงประกอบ

หัวข้อที่ 5.7 ถึง 5.11ในบทที่ 5 ระบุว่าจะต้องมีการส่งถ่ายแรงเฉือนในแนวนอนอย่างเต็มที่ระหว่างผิวสัมผัสขององค์อาคารหล่อสำเร็จและคอนกรีตทับหน้าหล่อในที่ รูปที่ 5.14 แสดงแรงที่ผิวสัมผัส และหัวข้อที่ 5.8 แสดงวิธีการออกแบบทีละขั้นตอนและสมการที่ใช้ในการออกแบบ ตัวอย่างที่ 5.3 แสดงการหาขนาดและระยะเรียงของเหล็กเดือยที่ต้องใช้ในการส่งถ่ายแรงเฉือนในแนวนอนระหว่างองค์อาคารที่มาเชื่อมต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

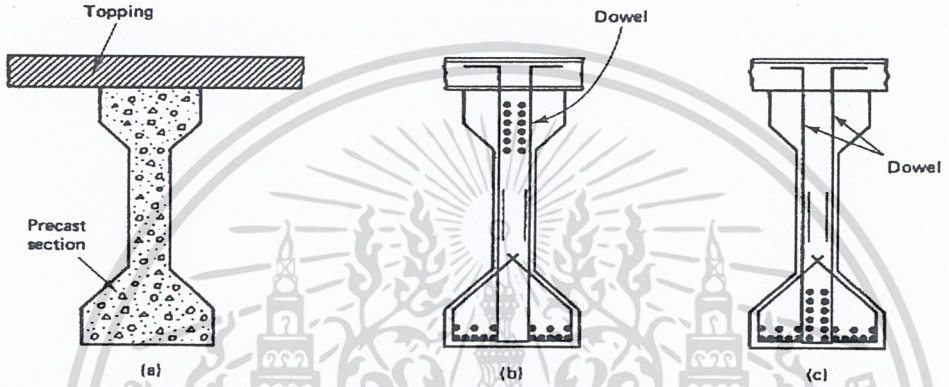
ตารางที่ 9.1 - ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในข้อต่อ

รายการ	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (ซม.)
สลักยึดวางหน้างาน	± 1.25
ระดับของฐานรากและตอม่อหล่อในที่	± 2.5
คอนกรีตหล่อสำเร็จเพื่องานโครงสร้าง	
ตำแหน่งของแผ่นเหล็กต่าง ๆ	± 2.5
ตำแหน่งของแผ่นรองรับแรงแบกทาน	± 2.0
ตำแหน่งของช่องเปิด	± 1.25
ความยาว	± 2.0
ความลึกทั้งหมด	± 0.63
ความกว้างของแกนคาน	± 0.32
ความกว้างทั้งหมด	± 0.63
การเบี่ยงเบนทางแนวราบของแนวฉากจากปลายทั้งสองข้าง	± 1.25
การเบี่ยงเบนทางแนวดิ่งของแนวฉากจากขอบบนและล่าง	± 1.0 ต่อเมตรของความสูง
ความเบี่ยงเบนของผิวรับแรงแบกทานจากระนาบ	± 0.5
ตำแหน่งท่อร้อยลวดในชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงแบบดึงทีหลัง	± 1.25
คอนกรีตหล่อสำเร็จเพื่องานสถาปัตยกรรม	
ความยาวหรือความกว้าง	± 0.16 ต่อ 3 ม.แต่ไม่น้อยกว่า ± 0.32
ความหนา	+ 0.63 - 0.32
ตำแหน่งของช่องเปิด	± 1.25
ตำแหน่งของตัวยึด	± 1.0
การบิดหรือการได้ฉาก	± 0.20 ใน 1.0 ม.
ความกว้างของรอยต่อ	
- ระบุ	1.0 - 1.6
- พิกัด	0.63 และ 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.4 แรงแบกทานของคอนกรีตในองค์อาคารเชิงประกอบ

รูปที่ 9.1 แสดงแบบมาตรฐานของการเสริมเหล็กเดือย แต่เพื่อป้องกันการวิบัติโดยการอัดแตกของเนื้อคอนกรีตที่รับแรงแบกทานโดยตรงจากเหล็กเดือย น้ำหนักบรรทุกภายนอกจะต้องกระทำบนพื้นที่รับแรงแบกทานที่มีขนาดเพียงพอที่จะลดหน่วยแรงลงมาให้ต่ำกว่ากำลังอัดที่กำหนดของคอนกรีต จะหากำลังรับแรงแบกทานระบุของคอนกรีตได้จากสมการข้างล่าง



รูปที่ 9.1 – รูปแบบมาตรฐานของการเสริมเหล็กเดือย (a) คอนกรีตทับหน้าบนคานสำเร็จรูป (b) หน้าตัดที่ฐานรองรับ (c) หน้าตัดที่กลางช่วง

$$V_n = C_r(0.85f_c'A_1)\sqrt{A_2/A_1} \le 1.2f_c'A_1 \qquad (9.1)$$

โดยที่ C_r = 1.0 เมื่อวางเหล็กเสริมในแนวของแรงเสียดทานตามแนวนอน N_u ดังแสดงในรูปที่ 9.2 หรือเมื่อ N_u มีค่าเป็นศูนย์

A_1 = พื้นที่รับแรงแบกทานโดยตรง

A_2 = พื้นที่มากสุดวัดจากพื้นที่รับแรงแบกทานโดยตรงโดยให้แผ่กระจายลงไปโดยมีอัตราส่วนของระยะในแนวดิ่งต่อแนวนอนเป็น 1:2 ตามที่แสดงในรูปที่ 9.3

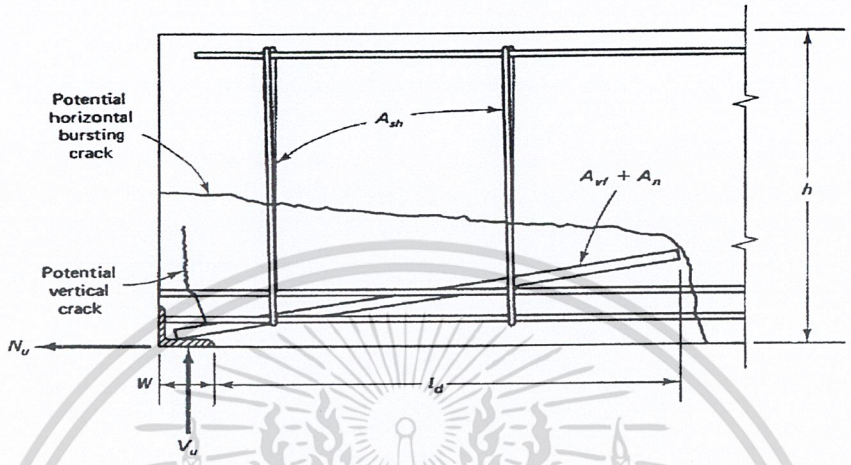
กำลังรับแรงแบกทานที่ใช้ออกแบบ, $V_u = \phi V_n$ โดยที่ $\phi = 0.70$

เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าวหรือการแตกบริเวณที่ปลายขององค์อาคารที่มีแกนบาง ซึ่งมีพื้นที่รับแรงแบกทานน้อยกว่า 13 ซม.^{2} จะต้องเสริมเหล็กอย่างน้อยมีค่าเท่ากับ $N_u/\phi f_y$ และด้วยขนาดไม่เล็กกว่า 10 มม.

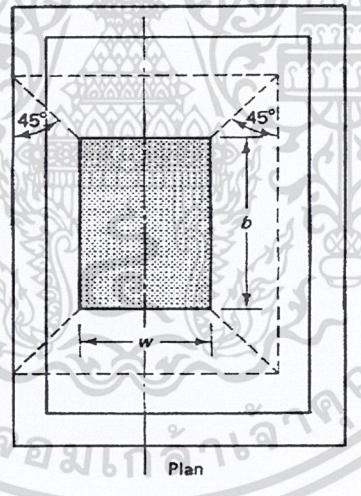
ถ้าแรงแบกทานที่ต้องการ $V_u > \phi V_n$ จะต้องเสริมเหล็กในบริเวณพื้นที่รับแรงแบกทาน โดยจะหาปริมาณเหล็กเสริมได้จากทฤษฎีแรงเฉือน-แรงเสียดทานที่แสดงไว้ในบทที่ 5 ควรออกแบบให้ทุกองค์อาคารหล่อสำเร็จมีเหล็กเสริมรับแรงแบกทานยกเว้นในแผ่นพื้นตันและแผ่นพื้นกลวง (hollow-core) เพื่อป้องกันการแตกร้าวทั้งในแนวนอน

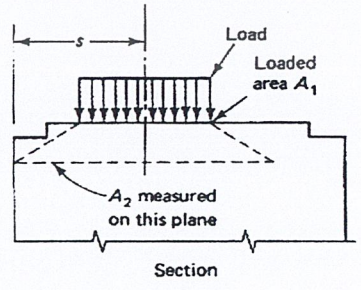
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแนวดิ่งเมื่อยึดเข้ากับฐานรองรับ รอยแตกร้าวที่ปลายคานจะมีความลาดประมาณ 20 องศา ตามที่แสดงในรูปที่ 9.2 และจะต้องจำกัดแรงเฉือนตามแนวของการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่คูณตัวแล้ว V_u ให้ไม่เกินค่าที่ให้ไว้ในตารางที่ 9.2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือน-แรงเสียดทานประสิทธิผลสูงสุด μ_e



รูปที่ 9.2 – การเสริมเหล็กรับแรงแบกทานที่ปลายคาน





รูปที่ 9.3 – พื้นที่รับแรงแบกทานบนฐานคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 - V_u สูงสุด

ผิวสัมผัส	μ แนะนำ	μ_e สูงสุด	V_u สูงสุด, กก.
คอนกรีตที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน	1.4λ	3.4	$0.30\lambda^2 f_c' A_{cr} \le 1000\lambda^2 A_{cr}$
คอนกรีตหล่อบนคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีผิวหยาบ	1.0λ	2.9	$0.25\lambda^2 f_c' A_{cr} \le 1000\lambda^2 A_{cr}$
คอนกรีตหล่อบนคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	0.6λ	2.2	$0.20\lambda^2 f_c' A_{cr} \le 800\lambda^2 A_{cr}$
คอนกรีตสัมผัสเหล็ก	0.7λ	2.4	$0.20\lambda^2 f_c' A_{cr} \le 800\lambda^2 A_{cr}$

จะหาพื้นที่ของเหล็กเสริมในแนวตั้งฉากกับระนาบของการแตกร้าวได้จาก

$$A_{vf} = \frac{V_{up}}{\phi \mu_e f_y} \qquad (9.2)$$

โดยที่ V_u/ϕ = กำลังระบุ V_n

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม A_{vf} , กก./ซม.^{2}

V_{up} = กำลังเฉือนที่ต้องการ ต้องมีค่าไม่เกินค่าในตารางที่ 9.2 และ

$$\mu_e = \frac{70\lambda A_{cr} \mu}{V_{up}} \qquad (9.3)$$

โดยที่ λ = 1.0 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ 0.85 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาที่มีทรายเป็นส่วนผสม และ 0.75 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบาที่มีมาลเบาล้วน

A_{cr} = พื้นที่ของระนาบผิวสัมผัสแตกร้าว (ซม.^{2}) ซึ่งสามารถหาได้จาก $l_d b$ ซึ่ง l_d คือระยะฝังเพิ่มของเหล็ก A_{vf} (ซม.) ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 9.3 และ b คือความกว้างเฉลี่ยขององค์อาคาร (ซม.)

เหล็กลูกตั้ง A_{sh} ตัดระนาบของรอยแตกร้าวในแนวนอนจะหาได้จาก

$$A_{sh} = \frac{(A_{vf} + A_n) f_y}{\mu_e' f_{ys}} \qquad (9.4)$$

โดยที่

$$\mu_e' = \frac{70\lambda A_{cr} \mu}{(A_{vf} + A_n) f_y} \qquad (9.5)$$

และ f_{ys} = กำลังครากของเหล็ก A_{sh} , กก./ซม.^{2}

A_n= พื้นที่ของเหล็กเสริมต้านแรงดึงตามแนวแกน N_u ในรูปที่ 9.2 หาได้จาก

$$A_n = N_u/(\phi f_y) \qquad (9.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_u = แรงดึงในแนวนอนซึ่งตั้งฉากกับระนาบสมมุติของการแตกร้าว

ϕ = ตัวคูณลดกำลัง = 0.85

จะต้องยึดเหล็กเสริมในแต่ละด้านของระนาบสมมติของการแตกร้าวให้เกิดแรงต้านตามที่ออกแบบได้ ด้วยระยะฝังเพิ่ม ทำข้องอ หรือด้วยการเชื่อมติดกับเหล็กฉากหรือแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 9.๖ – ระยะฝังเพิ่มภายใต้แรงดึงของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ในคอนกรีตซึ่งมี f_c' = 280 กก./ซม.^{2}
(α, β, λ = 1.0; γ = 0.8 สำหรับเหล็กขนาดไม่เกิน 20 มม. และ = 1.0 สำหรับเหล็กขนาดไม่เล็กกว่า 25 มม.)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่ (ซม.^{2})	ระยะฝังเพิ่ม, l_d (ซม.)	
		$s \geq 2d_b$ หรือ d_b	อื่น ๆ
		$\leq DB20 : \ell_d = 38d_b$	$\geq DB20 : \ell_d = 57d_b$
		$\geq DB25 : \ell_d = 48d_b$	$\geq DB25 : \ell_d = 72d_b$
10	0.78	38	57
12	1.13	46	69
16	2.01	61	92
20	3.14	76	114
25	4.91	120	180
28	6.16	135	202
32	8.04	154	231

สำหรับ f_c' อื่น ๆ ให้คูณค่าในตารางด้วย $\left(\sqrt{280/f_c'}\right)$

สำหรับเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD30 ให้คูณค่าในตารางด้วยด้วย 2/3

สำหรับระยะฝังเพิ่มภายใต้แรงอัด $\ell_d = \lambda \ell_{db}$ โดยที่ $\ell_{db} = 0.075 d_b f_y / \sqrt{f_c'} \geq 0.0043 d_b f_y$ และ

λ_s = A_s ที่ต้องการ/A_s ที่ใช้จริง หรือ λ_{sl} = 0.75 สำหรับเหล็กเสริมที่รัดรอบด้วยเหล็กปลอกเกลียว

คูณค่าในตารางด้วย

α = 1.3 สำหรับเหล็กเสริมชั้นบน

λ = 1.3 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา

β = 1.5 สำหรับเหล็กเส้นเคลือบอีพ็อกซี่ ซึ่งมีคอนกรีตหุ้มน้อยกว่า $3d_b$ หรือระยะช่องว่างน้อยกว่า $6d_b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 9.1</u> - ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงแบกทาน

คานคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (b = 40 ซม., h = 70 ซม.) รับแรงเฉือน V_u = 40 000 กก. และแรงดึงตามแนวนอน N_u = 9500 กก. ที่ปลายคานถูกรองรับด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ขนาด 10 ซม. x 10 ซม. จงออกแบบเหล็กเสริมที่ปลายคานเพื่อกันรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงแบกทานทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ กำหนดให้ ใช้คอนกรีตน้ำหนักธรรมดา f_c' =350 กก./ซม.^{2}, f_y = 4000 กก./ซม.^{2}

1. เหล็กเสริมในแนวนอน ($A_{vf}+A_n$) ลองใช้เหล็ก DB20

จากตารางที่ 9.3, l_d = 76 ซม., $A_{cr} = l_d b = 76(40) = 3040$ ซม.^{2}

จากตารางที่ 9.2, μ = 1.4 และจากสมการที่ 9.3

$$\mu_e = \frac{70\lambda A_{cr}\mu}{V_{up}} = \frac{70(1.0)(3040)(1.4)}{40\ 000} = 7.45 >$$ ค่าสูงสุดที่ยอมให้ = 3.4 ดังนั้นใช้ μ_e = 3.4

จากสมการที่ 9.2

$$A_{vf} = \frac{V_{up}}{\phi f_y \mu_e} = \frac{40\ 000}{0.85(4000)(3.4)} = 3.46 \text{ ซม.}^2$$

จะต้องออกแบบทุกข้อต่อให้รับได้อย่างน้อย $N_u = 0.2V_u = 0.2(40\ 000) = 8000$ กก. < 9500 กก.

ดังนั้นใช้ N_u = 9500 กก.

จากสมการที่ 9.6: $A_n = N_u/(\phi f_y) = 9500/(0.85 \times 4000) = 2.79$ ซม.^{2}

ดังนั้นเหล็กเสริมทั้งหมด: $A_v = A_{vf} + A_n = 3.46 + 2.79 = 6.25$ ซม.^{2}

ดังนั้นใช้ 3-DB20 = 9.42 ซม.^{2}

2. เหล็กลูกตั้ง (A_{sh})

จากตารางที่ 9.3: l_d = ระยะฝังเพิ่มของ DB20 = 76 ซม. และ $A_{cr} = l_d b = 76(40) = 3040$ ซม.^{2}

จากสมการที่ 9.5

$$\mu_e' = \frac{70\lambda A_{cr}\mu}{\left(A_{vf}+A_n\right)f_y} = \frac{70(1.0)(3040)(1.4)}{6.25(4000)} = 11.92 >$$ ค่าสูงสุดที่ยอมให้ = 3.4 ดังนั้นใช้ μ_e' = 3.4

จากสมการที่ 9.4

$$A_{sh} = \frac{\left(A_{vf}+A_n\right)f_y}{\mu_e' f_{ys}} = \frac{6.25(4000)}{3.4(4000)} = 1.84 \text{ ซม.}^2$$

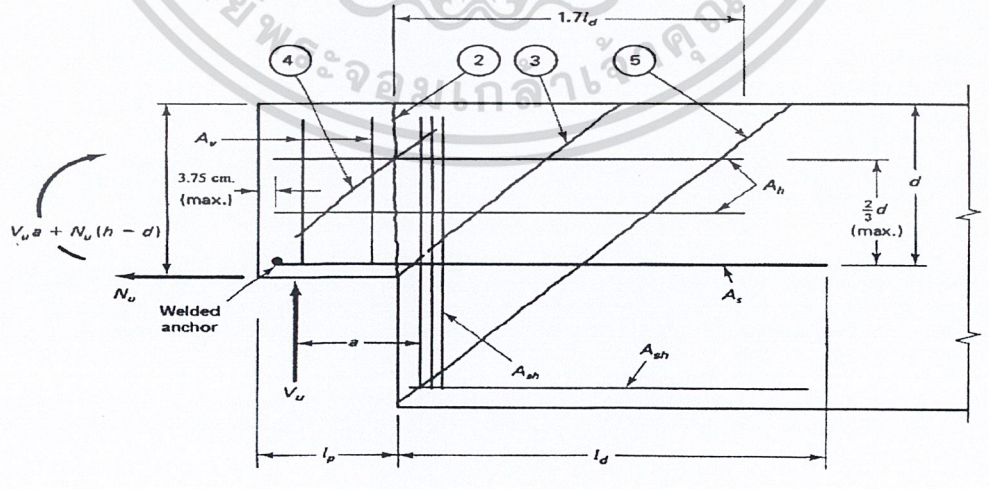
ดังนั้นใช้เหล็กลูกตั้ง 3-DB10 = 2.34 ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.5 ข้อต่อที่ปลายคานที่ปลายเป็นแบบมีบ่าตื้น (Dapped-End Beam Connections)

คานที่มีปลายแบบ Dapped เป็นคานซึ่งมีความลึกที่ปลายลดลงอย่างทันที เพื่อที่จะนำไปวางบนเชิงยื่นหรือหูช้างได้โดยไม่เพิ่มความสูงระหว่างชั้น การลดความลึกทันทีทำให้ปลายมีลักษณะเหมือนบ่าแขนเสื้อเมื่อเทียบกับตัวคาน ดังนั้นต่อไปนี้ จะเรียกคานประเภทนี้ว่า "คานที่มีปลายแบบบ่าตื้น" ตามที่แสดงในในรูปที่ 9.4 การแตกร้าวในคานประเภทนี้จะเกิดในสองลักษณะ ได้แก่ การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนโดยตรง (แบบ 2 ในรูปที่ 9.4) และการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยงซึ่งเกิดจากการกระทำร่วมของแรงดึงตามแกนและแรงดัด (แบบ 3 ,4 และ 5 ในรูปที่ 9.4) แบบ 4 เกิดจากความลึกที่ลดลงในบ่า ในระหว่างที่แบบ 3 และ 5 เกิดจากหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นบริเวณมุมของคานที่มีการเปลี่ยนความลึก ดังนั้นจะต้องมีเหล็กเสริมต้านการแตกร้าวเหล่านี้

1. เหล็กเสริมรับแรงดัด A_f ร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงดึงตามแนวแกน A_n ได้ $A_s = A_f + A_n$ ร่วมกันต้านหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากบ่าเป็นเสมือนปลายยื่นออกจากตัวคาน
2. เหล็กเสริมรับแรงเฉือน-ความเสียดทาน $A_f + A_n$ พร้อมกับเหล็กเสริมรับแรงดึง A_n เพื่อต้านแรงเฉือนในแนวดิ่งที่จุดต่อระหว่างบ่ากับตัวคาน เพื่อต้านการแตกร้าวแบบ 2
3. เหล็กเสริมรับแรงเฉือน A_{sh} เพื่อต้านแรงดึงในแนวทแยงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแบบ 3 ขึ้นที่มุมของจุดต่อระหว่างบ่ากับตัวคาน
4. เหล็กเสริม $A_h + A_v$ เพื่อต้านแรงดึงในแนวทแยงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแบบ 4 ขึ้นในบริเวณบ่าของคาน
5. ระยะฝังเพิ่มของเหล็ก $A_s = A_f + A_n$ เพื่อต้านแรงดึงในแนวทแยงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแบบ 5 ขึ้นในตัวคาน



รูปที่ 9.4 - การแตกร้าวและเหล็กเสริมในข้อต่อปลายคานแบบมีบ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดในการหาปริมาณของเหล็กเสริมเหล่านี้ มีแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

9.5.1 เหล็กเสริมรับแรงดัดและแรงดึงตามแกน

เนื่องจากความสมดุลของโมเมนต์ในรูปที่ 9.4 จะได้โมเมนต์ที่กระทำบนส่วนยื่นของบ่าที่ระนาบของเหล็ก A_s มีค่าเป็น

$$M_u = V_u a + N_u(h - d) \tag{9.7a}$$

โดยที่ h = ความลึกของบ่า

d = ความลึกประสิทธิผลของบ่าไปยังศูนย์กลางของเหล็กเสริม

a = ช่วงความยาวแรงเฉือน

กำลังรับโมเมนต์ระบุ $M_n = M_u/\phi = \dfrac{V_u a + N_u(h-d)}{\phi}$ (9.7b)

สมมุติให้แขนโมเมนต์ $jd \cong 0.9d$ จะได้

$$F_n = \frac{V_u a + N_u(h-d)}{0.9\phi d} \tag{9.8}$$

โดยที่ $\phi = 0.90$ สำหรับแรงดัด ทำให้ได้ $0.9\phi = 0.81$ ดังนั้นเพื่อความสะดวก ถ้าใช้ค่า $\phi = 0.85$ ในสมการที่ 9.8 จะได้

$$F_n = \frac{V_u a + N_u(h-d)}{\phi d} = \frac{V_u}{\phi}\left(\frac{a}{d}\right) + \frac{N_u}{\phi}\left(\frac{h-d}{d}\right) \tag{9.9}$$

จะได้เหล็กเสริมรับแรงดัด

$$A_f = \frac{F_n}{f_y} = \frac{V_u a + N_u(h-d)}{\phi f_y d} \tag{9.10}$$

และเหล็กเสริมรับแรงดึงโดยตรงเนื่องจากแรงดึง N_u มีค่าเป็น

$$A_n = \frac{N_u}{\phi f_y} \tag{9.11}$$

ดังนั้นพื้นที่ทั้งหมดของเหล็กเสริมรับแรงดัดและแรงดึงจะได้จากสมการที่ 9.10 และ 9.11

$$A_s = A_f + A_n = \frac{1}{\phi f_y}\left[V_u\left(\frac{a}{d}\right) + N_u\left(\frac{h}{d}\right)\right] \tag{9.12}$$

โดยใช้ $\phi = 0.85$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.5.2 เหล็กลูกตั้งรับแรงเฉือนในแนวดิ่ง

รอยแตกร้าว 2 เนื่องจากแรงเฉือนโดยตรง จะรับโดยผลร่วมของ A_s และ A_h ตามที่แสดงในรูปที่ 9.4 ปริมาณของเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนในแนวนอน A_h จะหาได้จาก

$$A_h = 0.5(A_s - A_n) \tag{9.13}$$

โดยที่

$$A_s = \frac{2V_u}{3\phi f_y \mu_e} + A_n \tag{9.14a}$$

$$A_n = \frac{N_u}{\phi F_y} \tag{9.14b}$$

$$\mu_e = \frac{70\lambda bh\mu}{V_u} \tag{9.14c}$$

ใช้ $\phi = 0.85$ และ μ_e จากสมการที่ 9.3 จะได้

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y}\left(\frac{2V_u}{3\mu_e} + N_u\right) \tag{9.15}$$

ค่า A_s ที่ใช้ในสมการที่ 9.13 จะต้องเป็นค่าที่มากกว่าระหว่างสองค่าจากสมการที่ 9.12 และ 9.15 จะต้องยื่นเหล็กเสริม A_s และ A_h เข้ามาในตัวคานอย่างน้อยเท่ากับ $1.7l_d$ หรือเท่ากับ l_d ผ่านรอยแตกร้าว 5 และยึดที่ปลายคานโดยเชื่อมติดกับเหล็กเส้นแนวขวาง เหล็กฉาก หรือแผ่นเหล็ก และควรจะยึดเหล็กเสริมในแนวดิ่ง A_{sh} และเหล็กเส้นแนวเอียง A_v ด้วยการงอขอตามมาตรฐาน ACI

กำลังรับแรงเฉือนระบุของปลายบ่าสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ จะต้องไม่มากกว่า

$$V_n \le 0.30 f_c' bd \le 70bd \tag{9.16a}$$

สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา จะต้องเท่ากับค่าที่น้อยกว่าของสองสมการข้างล่าง

$$V_n \le \left(0.20 - \frac{0.07a}{d}\right) f_c' bd \tag{9.16b}$$

หรือ

$$V_n \le \left(56 - \frac{20a}{d}\right) bd \tag{9.16c}$$

โดยที่ a คือช่วงความยาวแรงเฉือนและ d คือความลึกประสิทธิผลของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.5.3 เหล็กเสริมรับแรงดึงทแยงที่มุม

เหล็กเสริมต้านการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยง ซึ่งเริ่มจากมุมของการลดความลึกและขยายเข้าสู่ตัวคาน จะหาได้จาก

$$A_{sh} = \frac{V_u}{\phi f_y} \tag{9.17}$$

โดยที่ $\phi = 0.85$ และ f_y เป็นกำลังครากของเหล็กเสริม A_{sh}

9.5.4 เหล็กเสริมรับแรงดึงทแยงในบ่า

เพื่อที่จะต้านการแตกร้าวในแนวทแยงแบบที่ 4 ในบ่า จะต้องเพิ่มเหล็กเสริม A_v ในปริมาณที่จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนระบุทั้งหมดผ่านข้อกำหนดข้างล่าง

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} = A_v f_y + A_h f_y + 0.53bd\sqrt{f_c'} \tag{9.18}$$

โดยที่จะต้องเสริมเหล็กอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของปริมาณนี้ในแนวตั้ง ดังนั้นจากสมการ 9.18 จะได้

$$\min\ A_v = \frac{1}{2f_y}\left(\frac{V_u}{\phi} - 0.53bd\sqrt{f_c'}\right) \tag{9.19}$$

นอกเหนือจากปริมาณเหล็กเสริมตามข้างบนแล้ว ยังมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. ความลึกของบ่าจะต้องไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความลึกของคาน ยกเว้นแต่ถ้าคานมีความลึกมากเพื่อจุดประสงค์อย่างอื่นนอกเหนือไปจากการรับน้ำหนักบรรทุก
2. ถ้าหน่วยแรงดัดในคานที่บริเวณติดกับบ่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณแล้วและใช้คุณสมบัติของหน้าตัดแบบไม่แตกร้าว มีค่าเกิน $1.6\sqrt{f_c'}$ จะต้องเสริมเหล็กตามแนวนอนเพิ่มเติมในคาน เพื่อให้รับโมเมนต์ได้ตามต้องการ
3. จะต้องวางเหล็กเสริมรับแรงดึงในแนวทแยง A_{sh} ให้ใกล้กับบ่าเท่าที่จะทำได้ เหล็กเสริมนี้เป็นปริมาณนอกเหนือไปจากเหล็กลูกตั้งที่ต้องมีเพื่อรับแรงเฉือนในคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 9.2 – การออกแบบข้อต่อของคานที่มีปลายแบบบ่า

คานคอนกรีตอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (b = 40 ซม., h = 70 ซม.) มีปลายทำบ่าลดความลึกเพื่อวางบนหูช้างในเสา รับแรงเฉือนที่ปลาย V_u = 49 900 กก. และแรงดึงตามแนวนอน N_u = 9070 กก. จงออกแบบเหล็กเสริมรับแรงดัด รับแรงเฉือนโดยตรง และรับแรงดึงในแนวทแยง A_s, A_h, A_{sh} และ A_v เพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากลดความลึกทำบ่าที่ปลายคาน กำหนดให้ f_c'= 350 กก./ซม.^{2} และ f_y = 4000 กก./ซม.^{2}

สมมติว่าความยาวช่วงแรงเฉือน a = 15 ซม. ความหนาของบ่า h = 45 ซม. และความลึกประสิทธิผลของบ่า d = 40 ซม.

1. เหล็กเสริมรับแรงดัด และแรงดึงตามแกน A_s

$$\frac{N_u}{V_u} = \frac{9070}{49\ 900} = 0.18 < 0.20$$

ดังนั้นใช้ $N_u = 0.20(49\ 900) = 9980$ กก.

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y}\left[V_u\left(\frac{a}{d}\right) + N_u\left(\frac{h}{d}\right)\right] = \frac{1}{0.85(4000)}\left[49\ 900(\frac{15}{40}) + 9980(\frac{45}{40})\right] = 8.80 \text{ ซม.}^2$$

2. เหล็กเสริมรับแรงเฉือนโดยตรง A_s และ A_h

จากตาราง 9.2: $\mu = 1.4\lambda$ โดยที่ $\lambda = 1$ ดังนั้น จากสมการ 9.14c

$$\mu_e = \frac{70bh\mu}{V_u} = \frac{70(40)(45)(1.4)}{49\ 900} = 3.54 > \text{ค่ามากสุดที่ยอมให้ของ } \mu_e = 3.4$$

ดังนั้น ใช้ μ_e = 3.4 จากสมการที่ 19.5

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y}\left[\frac{2V_u}{3\mu_e} + N_u\right] = \frac{1}{0.85(4000)}\left[\frac{2(49\ 900)}{3(3.4)} + 9980\right] = 5.81 \text{ ซม.}^2 < A_s = 8.80 \text{ ซม.}^2$$

ดังนั้นใช้ A_s = 8.80 ซม.^{2} เลือก 3DB20 (A_s = 9.42 ซม.^{2})

จากสมการที่ 9.4b: $$A_n = \frac{N_u}{\phi f_y} = \frac{9980}{0.85(4000)} = 2.93 \text{ ซม.}^2$$

จากสมการที่ 9.13 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนตามความลึกของคาน

$A_h = 0.5(A_s - A_n) = 0.5(8.80 - 2.93) = 2.94$ ซม.^{2}

ลองใช้ 2DB10 วิ่งสองแนวทั้งสองด้านของคานเป็นรูปตัวยู ได้ $A_h = 2(2x0.78) = 3.12$ ซม.^{2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบความถูกต้อง โดยพิจารณาจากกำลังระบุรับแรงเฉือนจากสมการ 9.16a คือ

$V_n = 70bd = 70(40)(40) = 112\ 000$ กก.

$\phi V_n = 0.85(112\ 000) = 95\ 200$ กก. $> V_u = 49\ 900$ กก. ใช้ได้

3. เหล็กลูกตั้งรับแรงดึงทแยงที่มุมต่อของบ่ากับคาน

จากสมการที่ 9.17: $A_{sh} = \dfrac{V_u}{\phi f_y} = \dfrac{49\ 900}{0.85(4000)} = 14.68$ ซม.^{2}

ลองใช้เหล็กลูกตั้งสองขาขนาด 12 มม. จะมีพื้นที่ = 2(1.13) = 2.26 ซม.^{2}

ดังนั้นจะต้องใช้เหล็กลูกตั้งขนาด 12 มม. จำนวน = 14.68/2.26 = 6.50 ≅ 7 เส้น วางชิดบ่า

4. เหล็กเสริมรับแรงดึงทแยงในบ่า A_v

จากสมการที่ 9.19: $A_v = \dfrac{1}{2f_y}\left(\dfrac{V_u}{\phi} - 0.53bd\sqrt{f_c'}\right)$

กำลังระบุรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$0.53bd\sqrt{f_c'} = 0.53(40)(40)\sqrt{350} = 15\ 864.63$ กก.

ดังนั้น $A_v = \dfrac{1}{2(4000)}\left(\dfrac{49\ 900}{0.85} - 15\ 864.63\right) = 5.35$ ซม.^{2}

ลองใช้เหล็กลูกตั้งสองขาขนาด 12 มม. จำนวน 3 เส้น ได้ $A_v = 3(2.26) = 6.78$ ซม.^{2}

จากขั้นตอนที่ 2 ได้ $A_h = 3.12$ ซม.^{2} ดังนั้นกำลังระบุรับแรงเฉือนทั้งหมดของหน้าตัดจากสมการ 9.18 คือ

$V_n = A_v f_y + A_h f_y + 0.53bd\sqrt{f_c'} = 6.78(4000) + 3.12(4000) + 15\ 864.63 = 55\ 465$ กก.

$\phi V_n = 0.85(55\ 465) = 47\ 145$ กก. $< V_u = 49\ 900$ กก. ใช้ไม่ได้

ลองเปลี่ยนขนาด A_h จาก 10 มม. เป็น 12 มม. จะได้ $A_h = 2(2.26) = 4.52$ ซม.^{2} ได้

$\phi V_n = 0.85[55\ 465 + 4000(4.52 - 3.12)] = 51\ 905$ กก. $< V_u = 49\ 900$ กก. ใช้ได้

5. ตรวจสอบระยะฝังเพิ่มเพื่อการยึดรั้ง

A_s = 3DB20

จากตารางที่ 9.3 สำหรับ $f_y = 4000$ กก./ซม.^{2} และ $f_c' = 350$ กก./ซม.^{2}

$\ell_d = 38d_b\sqrt{280/350} = 62.6$ ซม.

ความลึกของคาน = 70 ซม.

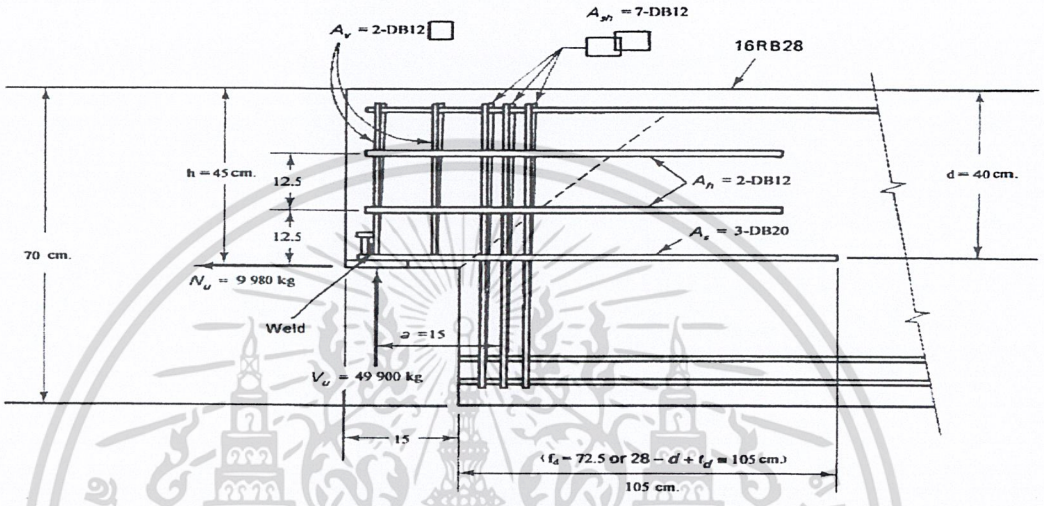
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระยะฝังเพิ่ม = 70 – d + ℓ_d = 70 – 40 + 62.6 = 92.6 ซม.

เนื่องจาก ℓ_d น้อยสุดมีค่าเท่ากับ 62.6 ซม. ดังนั้นใช้ระยะฝังเพิ่ม 93 ซม.

A_h = 2DB12 - ℓ_d = $38d_b\sqrt{280/350}$ = 41 ซม. จากจุดต่อระหว่างคานกับบ่า

รายละเอียดของการเสริมเหล็กสำหรับรอยต่อระหว่างคานกับบ่ามีแสดงไว้ในรูปข้างล่าง

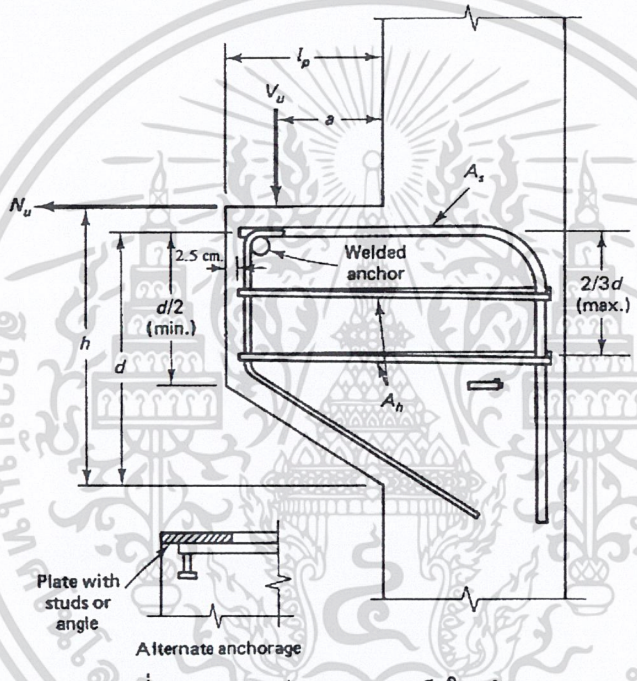


รูปที่ 9.5 – รายละเอียดการเสริมเหล็กที่ข้อต่อระหว่างคานกับบ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6 เท้าแขน (Brackets) และแป้นหูช้าง (Corbels)

แป้นหูช้างเป็นคานยื่นอย่างสั้น ซึ่งอัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึก a/d มีค่าไม่เกิน 1 น้ำหนักที่กระทำบนหูช้างได้แก่ แรงเฉือนโดยตรง V_u และแรงดึงตามแกน N_u การออกแบบหูช้างจะใช้ทฤษฎีแรงเฉือน-ความเสียดทาน ซึ่งรายละเอียดจะหาได้จากหนังสือคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป รายละเอียดการเสริมเหล็กที่ข้อต่อเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบหูช้าง เพราะจะเป็นสิ่งที่ระบุถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่าง ตัวอย่างของรายละเอียดการเสริมเหล็กในหูช้างมีแสดงไว้ในรูปที่ 9.6

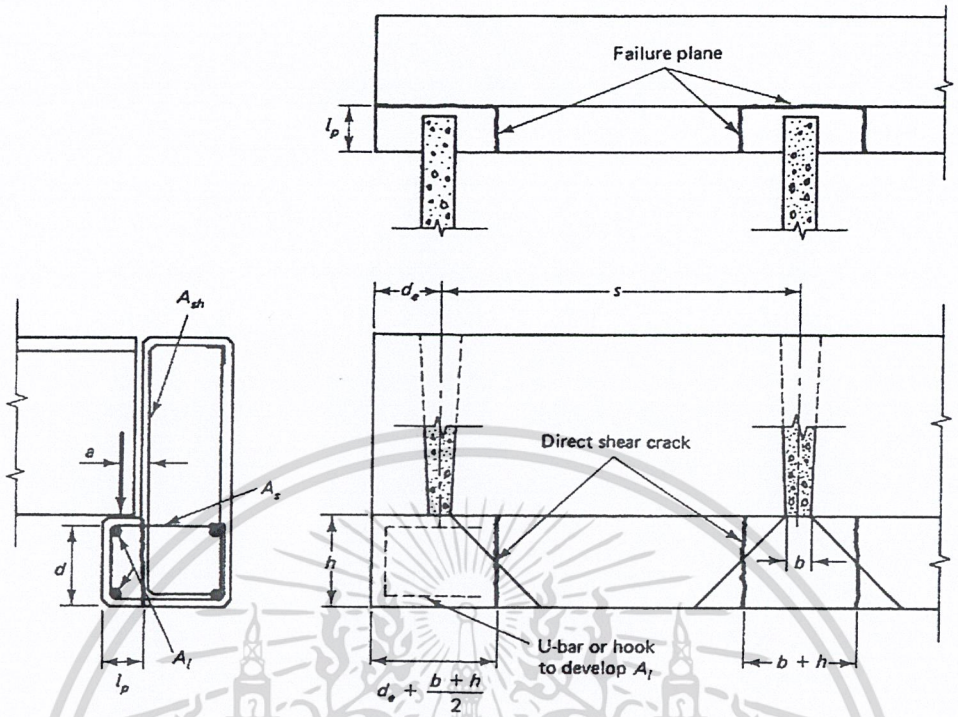


รูปที่ 9.6 - รายละเอียดการเสริมเหล็กในหูช้าง

9.7 เชิงยื่น (Beam Ledges)

เชิงยื่นเป็นส่วนยื่นด้านข้างของคานซึ่งใช้รองรับคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วางพาดในแนวขวาง ดังนั้นน้ำหนักของคานพาดจะถ่ายลงบนเชิงยื่นในลักษณะของน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุดเหมือนกับในหูช้าง แรงเฉือนโดยตรงที่กระทำบนเชิงยื่น จะทำให้เกิดการแตกร้าวในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 9.7 ถ้าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำไม่มีความต่อเนื่องและกระทำบนด้านเดียว คานจะมีเชิงยื่นเพียงด้านเดียวมีรูปร่างเป็นรูปตัว L ทำให้คานนี้มีพฤติกรรมเหมือนคานขอบซึ่งนอกเหนือไปจากการรับแรงเฉือนแล้ว จะต้องรับแรงบิดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.7 – การออกแบบข้อต่อของเชิงยื่น (a) รูปตัดของเชิงยื่น (b) แปลนและรูปด้าน

โดยทั่วไป เชิงยื่นมักจะมีอัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึก l_p/d ไม่เกิน 1/2

กำลังระบุรับแรงเฉือนของเชิงยื่นที่มุมของข้อต่อ จะหาได้จากค่าน้อยกว่าจากแต่ละสภาวะตามข้างล่าง

1. s > b + h

$$V_n = 0.8h\sqrt{f_c'}\left(2l_p + b + h\right) \tag{9.20a}$$

$$V_n = 0.27h\sqrt{f_c'}\left(2l_p + b + h + 2d_e\right) \tag{9.20b}$$

2. s < b + h และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นจุดมีค่าเท่ากัน

$$V_n = 0.4h\sqrt{f_c'}\left(2l_p + b + h + s\right) \tag{9.21a}$$

$$V_n = 0.27h\sqrt{f_c'}\left(l_p + \frac{b+h}{2} + d_e + s\right) \tag{9.21b}$$

โดยที่ l_p = ความกว้างของเชิงยื่น (ซม.)

b = ความกว้างของพื้นที่รับแรงแบกทาน (ซม.)

h = ความลึกของเชิงยื่น (ซม.)

s = ระยะห่างของน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด (ซม.)

d_e = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุกถึงปลายคาน (ซม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เชิงยื่นรองรับน้ำหนักบรรทุกต่อเนื่องหรือรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุดซึ่งกระทำใกล้กันมาก จะหากำลังระบุรับแรงเฉือนเชิงยื่นได้จาก

$$V_n = 6.4h\sqrt{f_c'} \qquad (9.22)$$

โดยที่ V_n มีหน่วยเป็น กก./ซม.ต่อความยาว กำลังใช้คำนวณออกแบบ ϕV_n จะต้องไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ V_u โดยที่ $\phi = 0.85$ แต่ถ้า $V_u > \phi V_n$ จะต้องออกแบบเหล็กเสริมในวิธีเดียวกับการออกแบบในคานแบบที่ปลายเป็นบ่า ในหัวข้อที่ 9.5 ในกรณีนี้ จะหาเหล็กเสริมรับแรงดัด A_s ได้จากสมการที่ 9.12 เหล็กลูกตั้งรับแรงดึงทแยง A_{sh} จากสมการที่ 9.17 A_{sh} ในเชิงยื่นจะทำหน้าที่เป็นเหล็กห้อยรับเชิงยื่นไว้กับคานหลักด้วย (hanger) และเหล็กเสริมตามความยาวที่ขอบบนและล่างของเชิงยื่น A_l จาก

$$A_l = \frac{14\ell_p d}{f_y} \qquad (9.23)$$

อาจจะกระจายเหล็กเสริม A_{sh} ให้มีระยะเรียงเท่ากันบนความกว้าง 6h ในแต่ละด้านของน้ำหนักกระทำ แต่จะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของระยะถึงน้ำหนักบรรทุกอันถัดไป โดยที่ระยะเรียงจะต้องไม่เกินความลึกของเชิงยื่น h หรือ 45 ซม. แต่ถ้าปริมาณเหล็กเสริมเพื่อรับแรงเฉือนและแรงบิดในคานมากกว่า A_{sh} และผ่านข้อกำหนดในด้านระยะเรียง ก็จะใช้เหล็กเสริมเหล่านั้นได้เลย โดยไม่ต้องเพิ่ม A_{sh} เข้าไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 9.3</u> – การออกแบบข้อต่อเชิงยื่น

พื้นชั้นจอดรถประกอบด้วยคานรูปตัวทีคู่กว้าง 3 ม. รองรับที่ปลายด้านริมอาคารด้วยคานรูปตัว L น้ำหนักบรรทุกถ่ายจากคานรูปตัวทีคู่ซึ่งอาจจะวางบนตำแหน่งใดของคานรองรับรูปตัว L ก็ได้ ประกอบด้วย V_u = 10 900 กก./แกนคาน (T หนึ่งตัว) และ N_u = 2270 กก./แกนคาน หากำลังระบุรับแรงเฉือนของเชิงยื่น และออกแบบเหล็กเสริมถ้าจำเป็น กำหนดให้: b = 10 ซม., h = 30 ซม., d = 26.25 ซม., l_p = 15 ซม., s = 120 ซม.

f_c'= 350 กก./ซม.^{2} และ f_y = 4000 กก./ซม.^{2}

---

b + h = 10 + 30 = 40 ซม., d_e น้อยสุดที่ยอมให้ = b/2 = 5 ซม.

$2l_p$ + b + h = 2(15) + 10 + 30 = 70 ซม.

เนื่องจาก s > b + h และ $d_e < 2l_p + b + h$ จะใช้สมการ 9.20b

$$V_n = 0.27h\sqrt{f_c'}\left(2l_p + b + h + 2d_e\right) = 0.27(30)\sqrt{350}[2(15)+10+30+2(5)] = 12\ 123 \text{ กก.}$$

ϕV_n = 0.85(12 123) = 10 305 กก. < V_u = 10 900 กก.

ดังนั้นจะต้องออกแบบหาเหล็กเสริม

1. <u>เหล็กเสริมรับแรงดัด A_s</u>

ความยาวช่วงแรงเฉือน: $a \cong 3\ l_p/4 + 3.75 = 3(15)/4 + 3.75 = 15$ ซม.

เนื่องจาก N_u/V_u = 2270/10 900 = 0.21 > 0.20 ดังนั้นใช้ N_u = 2270 และจากสมการที่ 9.12

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y}\left[V_u\left(\frac{a}{d}\right) + N_u\left(\frac{h}{d}\right)\right] = \frac{1}{0.85(4000)}\left[10\,900\frac{15}{26.25} + 2270\frac{30}{26.25}\right] = 2.59 \text{ ซม.}^2$$

เนื่องจาก 6h = 6(30) = 180 > s/2 = 120/2 = 60 ซม.

ดังนั้นใช้ระยะเรียง = 60 ซม. ในแต่ละด้านของแกนคานทีคู่

ความกว้างของแถบที่จะวางเหล็กเสริมรับแรงดัด A_s = 2(60) = 120 ซม.

และระยะเรียงห่างสุด = h = 30ซม.

ดังนั้น ใช้ 4DB10, A_s = 3.12 ซม.^{2} > 2.59 ซม.^{2} บนแต่ละด้านของแกนคานทีคู่ และวางเหล็กสองเส้นไว้ที่ปลายคานเพื่อรับในกรณีที่วางแกนคานทีคู่ใกล้ปลายของคานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เหล็กลูกตั้งรับแรงดึงในแนวทแยง A_{sh}

จากสมการที่ 9.17: $A_{sh} = \frac{V_u}{\phi f_y} = \frac{10\,900}{0.85(4000)} = 3.20$ ซม.^{2}

ในความกว้าง 120 ซม. ดังนั้น A_{sh}/ซม. = 3.20/120 = 0.027 ซม.^{2}/ซม.

ถ้าเลือกใช้เหล็กเสริมขนาดเดียวกับ A_s คือ DB10 จะต้องใช้ระยะเรียง = 0.78/0.027 = 29 ซม. (ถึงแม้ว่าจะใช้ DB10 สองขาในตัวคาน แต่ที่ข้อต่อระหว่างเชิงยื่นกับตัวคานจะคิดแค่ขาเดียว) ดังนั้นจะต้องใช้ DB10 จำนวน 3.20/0.78 = 4.10 เส้น ดังนั้นใช้ 5DB10

ในทางปฏิบัติ จะใช้ A_s และ A_{sh} เท่ากัน ดังนั้นจะเพิ่ม A_s เป็น 5DB10 บนแต่ละด้านของแกนคานทีคู่

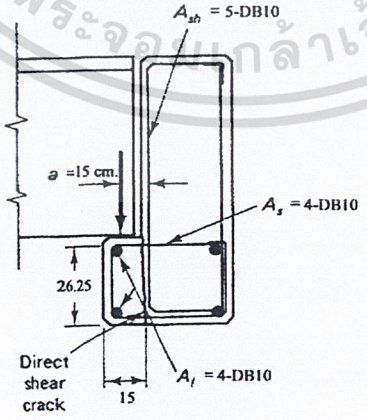
3. เหล็กเสริมตามแนวยาว A_l

จากสมการที่ 9.23: $A_l = \frac{14\ell_p d}{f_y} = \frac{14(15)(26.25)}{4000} = 1.38$ ซม.^{2}

เพื่อความสะดวกในการก่อสร้าง จะเลือกใช้ DB10 หนึ่งเส้นบนแต่ละมุมของเชิงยื่น ได้พื้นที่เป็น 4(0.78) = 3.12 ซม.^{2} > 1.38 ซม.^{2} ใช้ได้

การออกแบบโดยสมบูรณ์ของเชิงยื่น จะต้องรวมการออกแบบรับแรงเฉือนและแรงบิดของคานทั้งตัวซึ่งรวมเชิงยื่นด้วย เพื่อรับน้ำหนักที่ถ่ายมาจากแกนของคานรูปทีคู่ เหล็กเสริมที่ได้จากตัวอย่างนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของเหล็กเสริมทั้งหมดของคานรูปตัว L ทั้งตัว

รูปข้างล่างแสดงรายละเอียดของข้อต่อของเชิงยื่น แต่ไม่รวมถึงเหล็กเสริมรับแรงเฉือนและแรงบิดในคานทั้งตัว

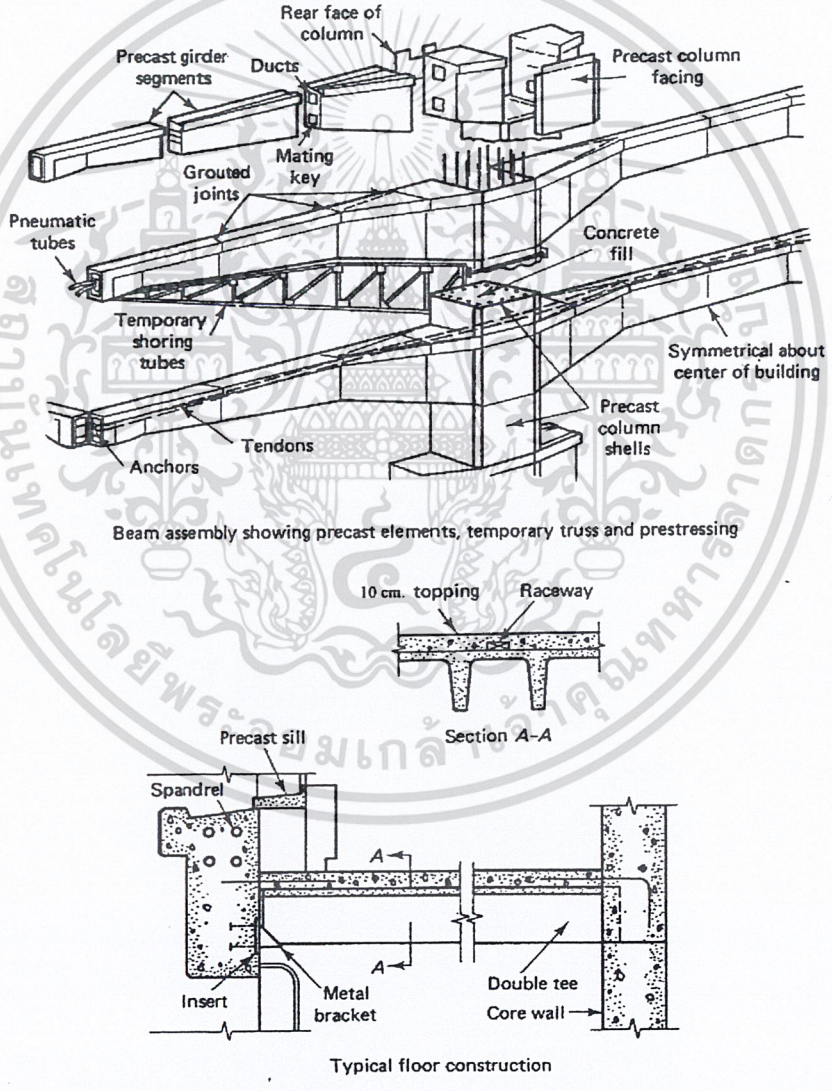


รูปที่ 9.8 – เหล็กเสริมในข้อต่อของเชิงยื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

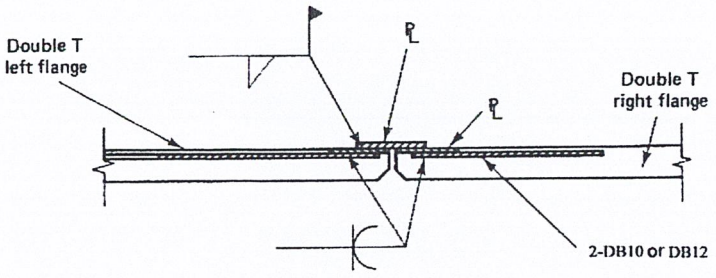
9.8 ตัวอย่างรายละเอียดของข้อต่อ

ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 9.1 ข้อต่อเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบของโครงสร้างทั้งหมด เป็นสิ่งที่จะกำหนดถึงความปลอดภัยและเสถียรภาพของโครงสร้าง ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องให้ความสำคัญในการออกแบบข้อต่อไม่น้อยไปกว่าการเลือกขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมในองค์อาคารต่าง ๆ รูปต่อไปนี้แสดงรายละเอียดของข้อต่อชนิดต่าง ๆ ที่มักจะพบในงานคอนกรีตอัดแรง

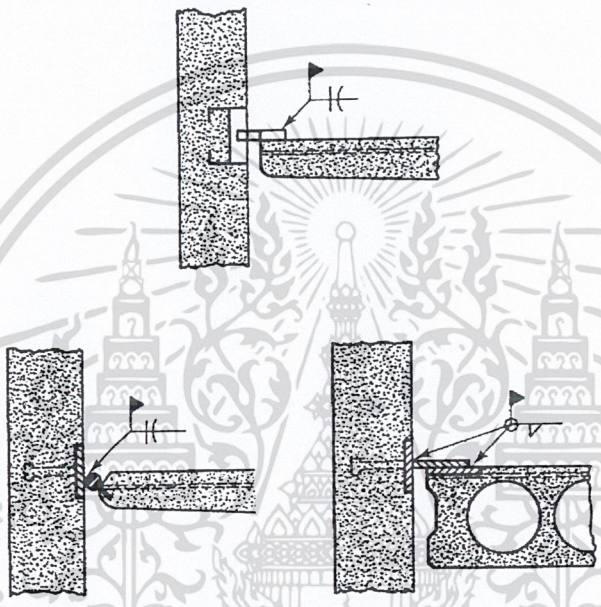


รูปที่ 9.9 – วิธีการก่อสร้างและรายละเอียดของข้อต่อในตึก Gulf Life, Jacksonville, Florida

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

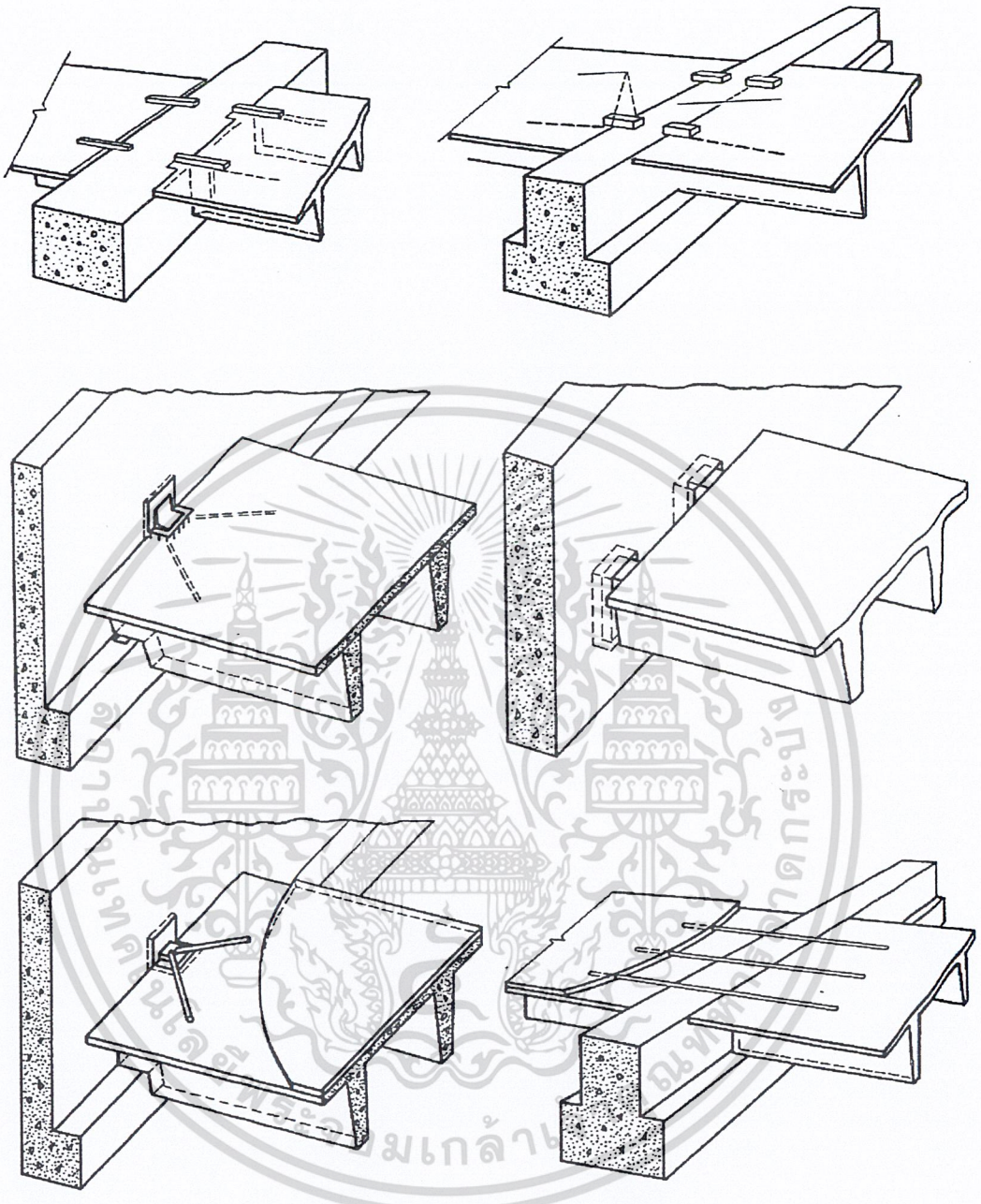


รูปที่ 9.10 – ข้อต่อของปีกของคานรูปตัวทีคู่ ในกรณีที่ไม่มีคอนกรีตทับหน้า



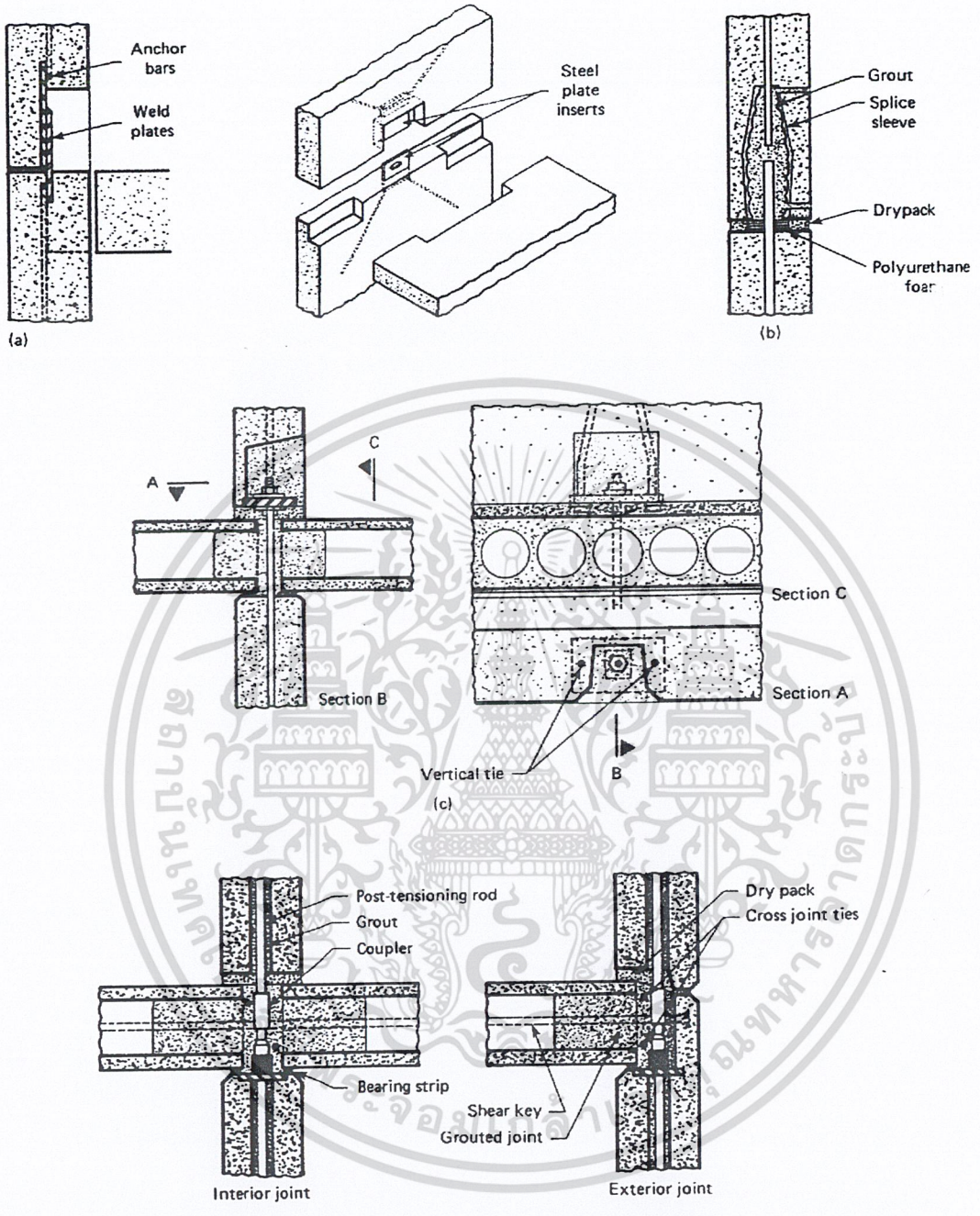
รูปที่ 9.11 - ข้อต่อระหว่างพื้นกับกำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



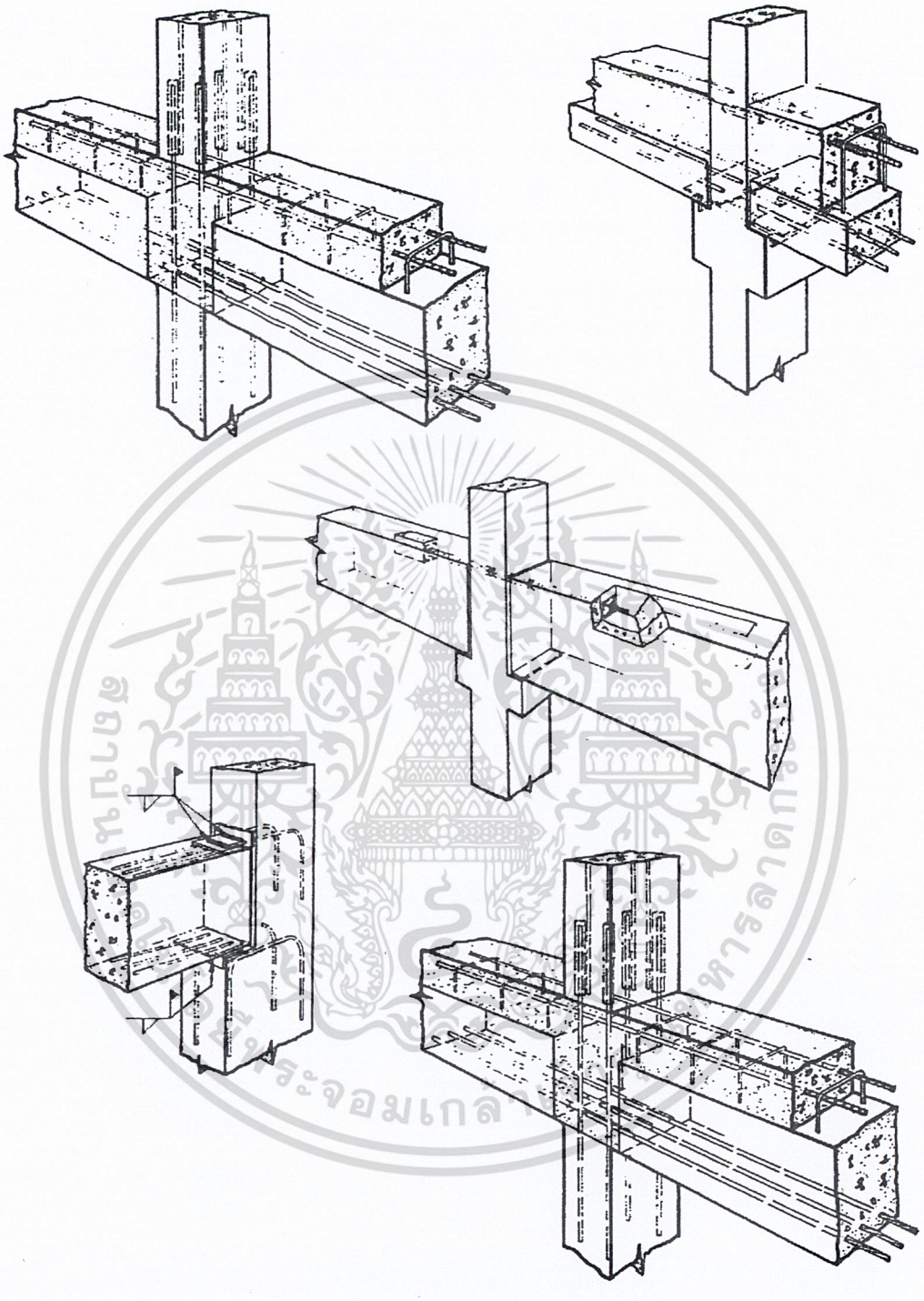
รูปที่ 9.12 – ข้อต่อมาตรฐานของคานทีคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



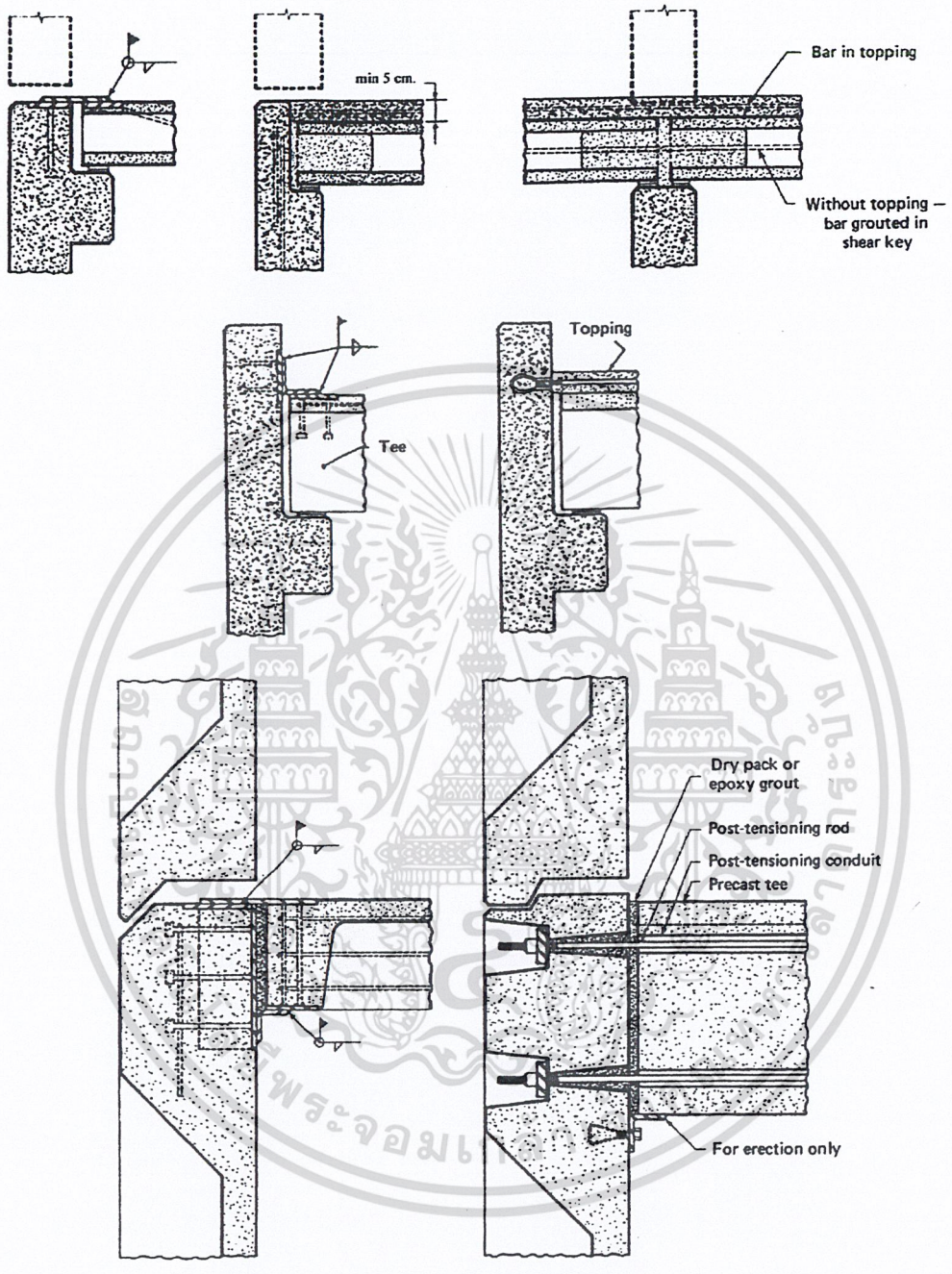
รูปที่ 9.13 – ข้อต่อในแนวนอน (a) ใช้การเชื่อมแผ่นเหล็ก (b) ใช้การอุดน้ำปูนในกระบอกสวม (c) ใช้การเชื่อมต่อด้วยแผ่นเหล็กและสลัก (d) การเชื่อมต่อในระบบดึงทีหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



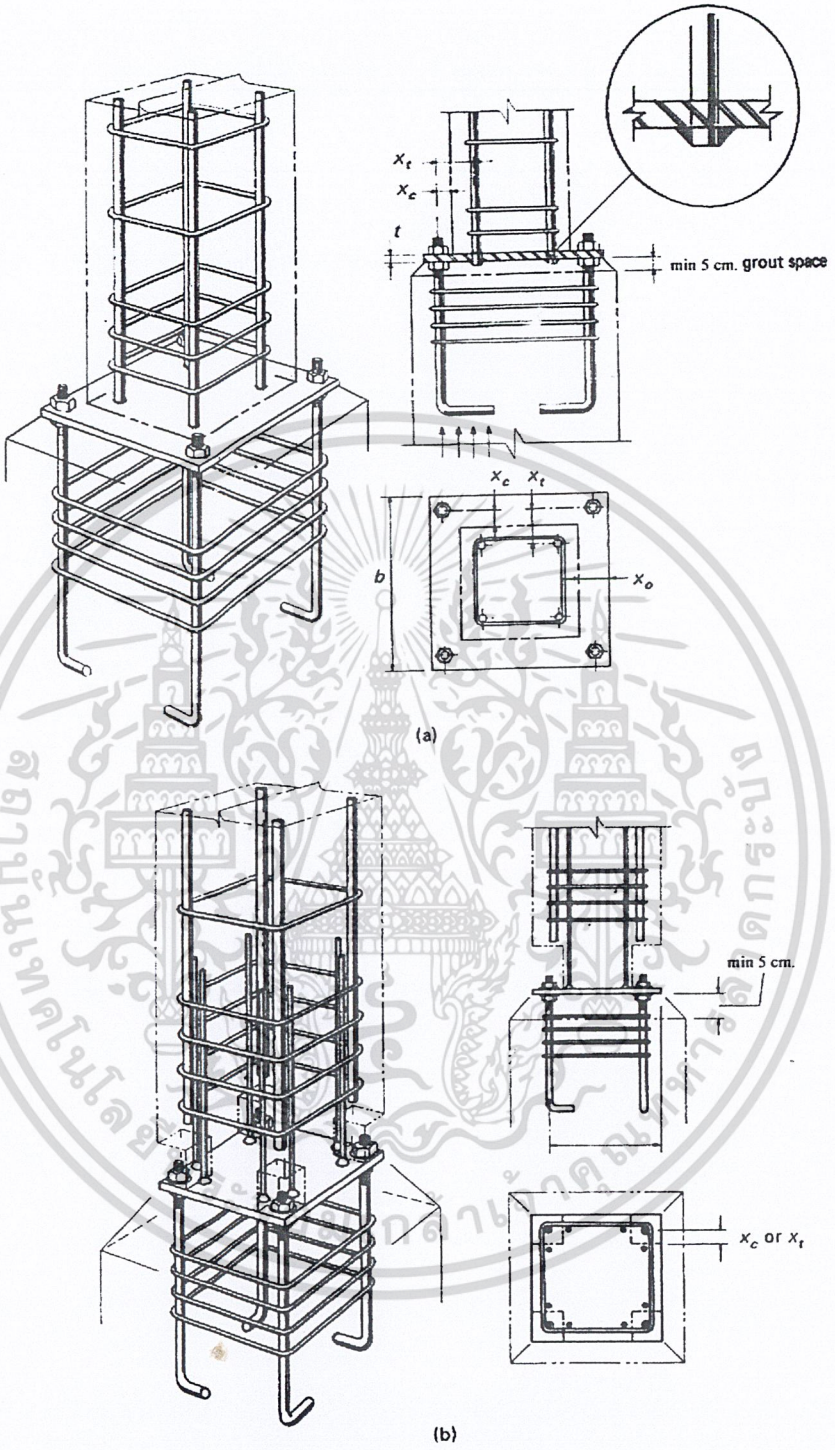
รูปที่ 9.14 - ข้อต่อรับโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.15 – ข้อต่อระหว่างพื้นกับผนังรับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.16 – ข้อต่อระหว่างเสากับแผ่นรองรับ (a) แผ่นรองรับใหญ่กว่าเสา (b) แผ่นรองรับมีขนาดเท่าเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

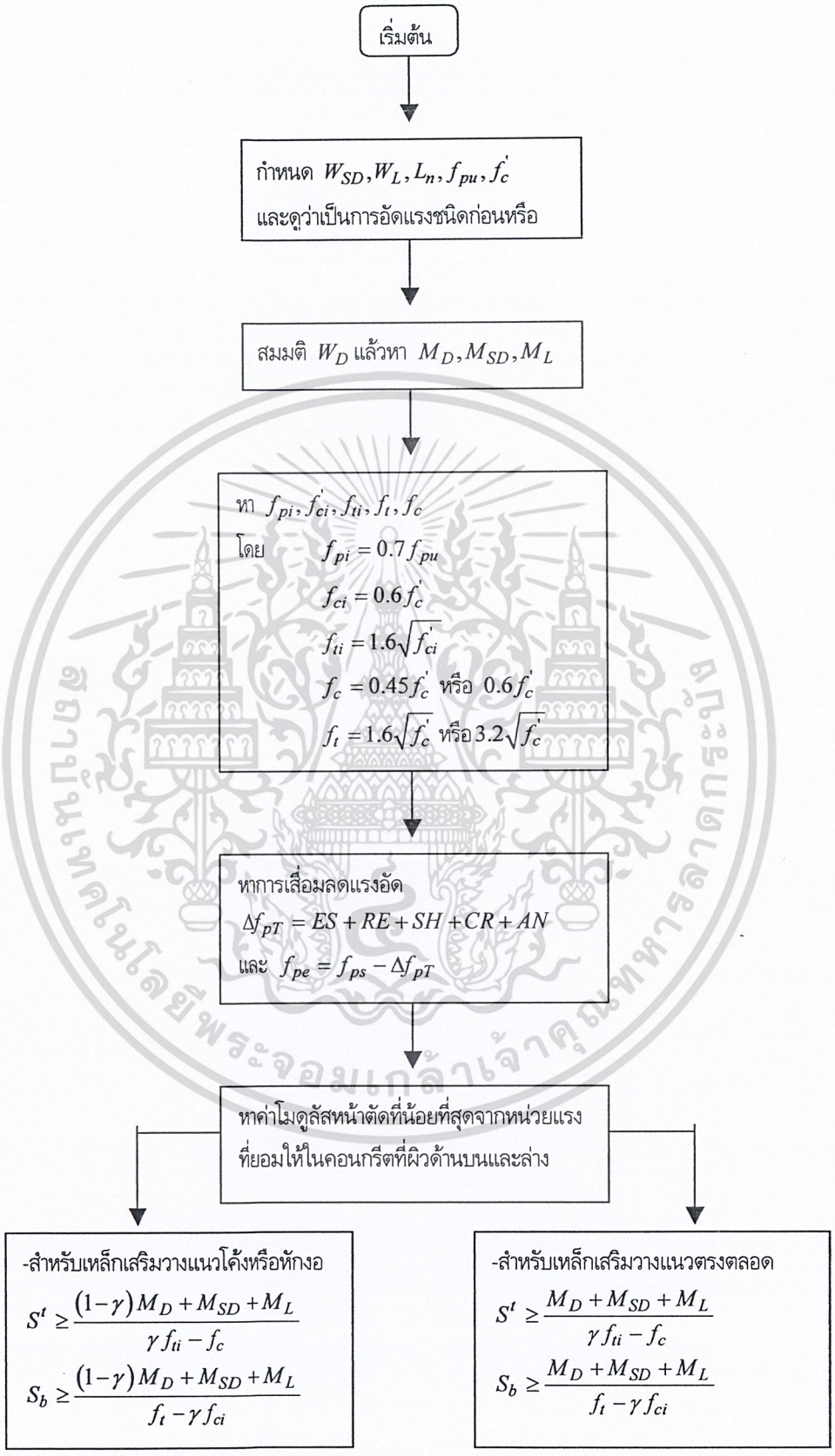
แผนผังขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

ผข2. แผนผังที่ 1 แสดงขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

ผข5. แผนผังที่ 2 แสดงขั้นตอนการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

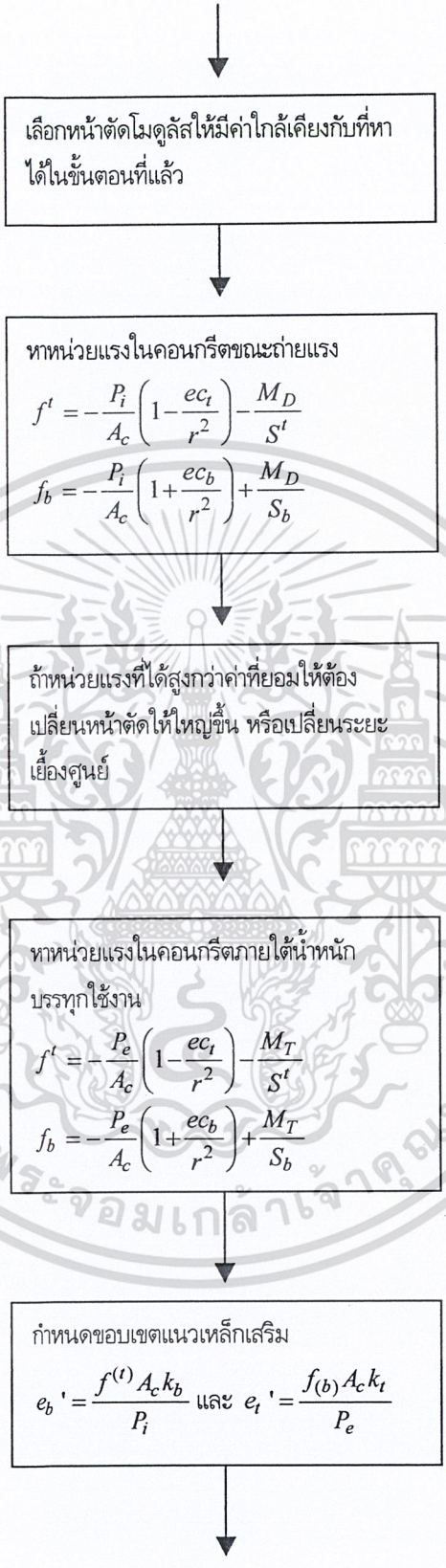
ผข8. แผนผังที่ 3 แสดงขั้นตอนการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสองทางแบบมีฐานรองรับที่ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนผังที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบองค์อาคารอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาระยะฝังน้อยสุดที่ต้องการ

$$l_d = \frac{1}{70}\left(f_{ps} - \frac{2}{3}f_{pe}\right)d_b$$

-คานอัดแรงแบบดึงทีหลังออกแบบเหล็กเสริมบริเวณแผ่นยึด โดยใช้วิธีโครงถักจำลอง แล้วนำไปออกแบบเหล็กลูกตั้ง

-คานอัดแรงแบบดึงก่อน หาเหล็กลูกตั้งจาก

$$A_t = 0.021\frac{P_i h}{f_s l_t}$$

หาหน่วยแรงในพฤติกรรมเชิงประกอบ โดยใช้ความกว้างประสิทธิผลดัดแปลง

$b_m = \left(E_{ct} / E_c\right)b$ สำหรับความกว้างปีกบน

-สำหรับแผ่นพื้นที่ไม่มีการค้ำยัน

ก่อนหล่อ

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_b}$$

หลังหล่อ

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D + M_{SD}}{S^t} - \frac{M_{CSD} + M_L}{S_c^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D + M_{SD}}{S_b} + \frac{M_{CSD} + M_L}{S_{cb}}$$

-สำหรับแผ่นพื้นที่มีการค้ำยัน

ก่อนหล่อ

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b}$$

หลังหล่อ

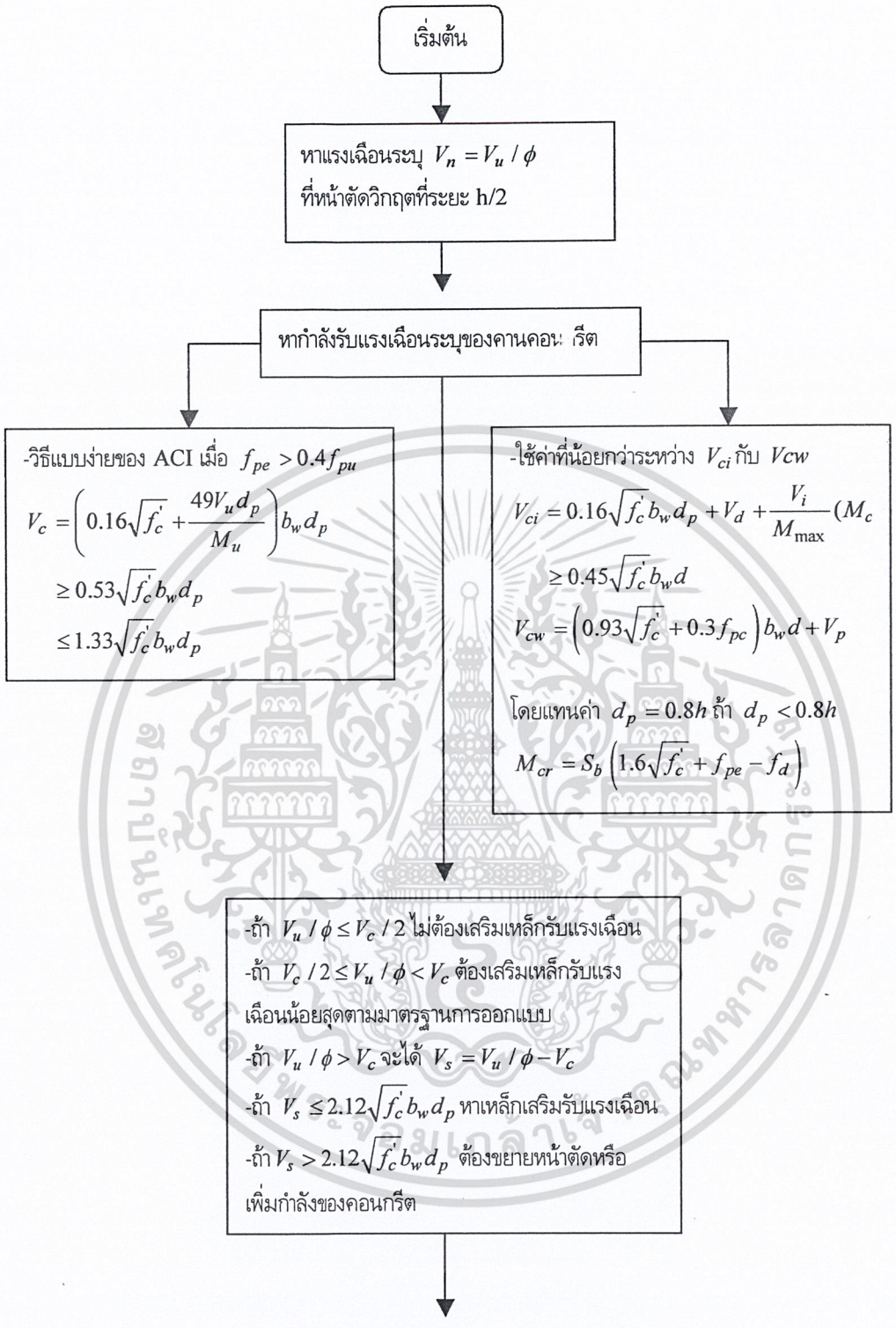
$$f^t = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} - \frac{M_{SD} + M_{CSD} + M_L}{S_c^t}$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c}\left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} + \frac{M_{SD} + M_{CSD} + M_L}{S_{cb}}$$

หากำลังรับแรงเฉือนและแรง

จบขั้นตอนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนผังที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยสุด

- $A_v = \frac{3.5 b_w s}{f_y}$ และระยะเรียงต้องไม่เกิน 0.75h หรือ 60 ซม.

ถ้า $f_{pe} \geq 0.40 f_{pu}$ ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างค่าข้างบนกับ

- $A_v = \frac{A_{ps} f_{pu}}{80 f_y} \frac{s}{d_p} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}}$

โดย $d_p \geq 0.8h$

หาขนาดและระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

-ถ้า $V_s \leq 1.06\sqrt{f'_c} b_w d_p, s = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$ แต่ไม่เกิน 0.75h หรือ 60 ซม.

-ถ้า $1.06\sqrt{f'_c} b_w d_p < V_s \leq 2.12\sqrt{f'_c} b_w d_p, s = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$ แต่ไม่เกิน 0.375h หรือ 30 ซม.

วาดแผนภาพขอบเขตแรงเฉือนตามความยาวคาน แรเงาบริเวณที่ต้องมีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

วาดการเสริมเหล็กตามความยาวของคาน ระบุขนาดและระยะเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบเหล็กเดือยในกรณีขององค์อาคารเชิงประกอบ

-เมื่อไม่มีการเสริมเหล็กเดือยหรือเหล็กลูกตั้ง มีการทำผิวสัมผัสให้หยาบ หรือผิวเรียบ ถ้ามีการเสริมเหล็กในปริมาณต่ำสุด

$V_{nh} \le 5.6 b_v d_{pc}$

-เมื่อเสริมเหล็กในปริมาณต่ำสุด และทำให้ผิวหยาบมีความขรุขระ

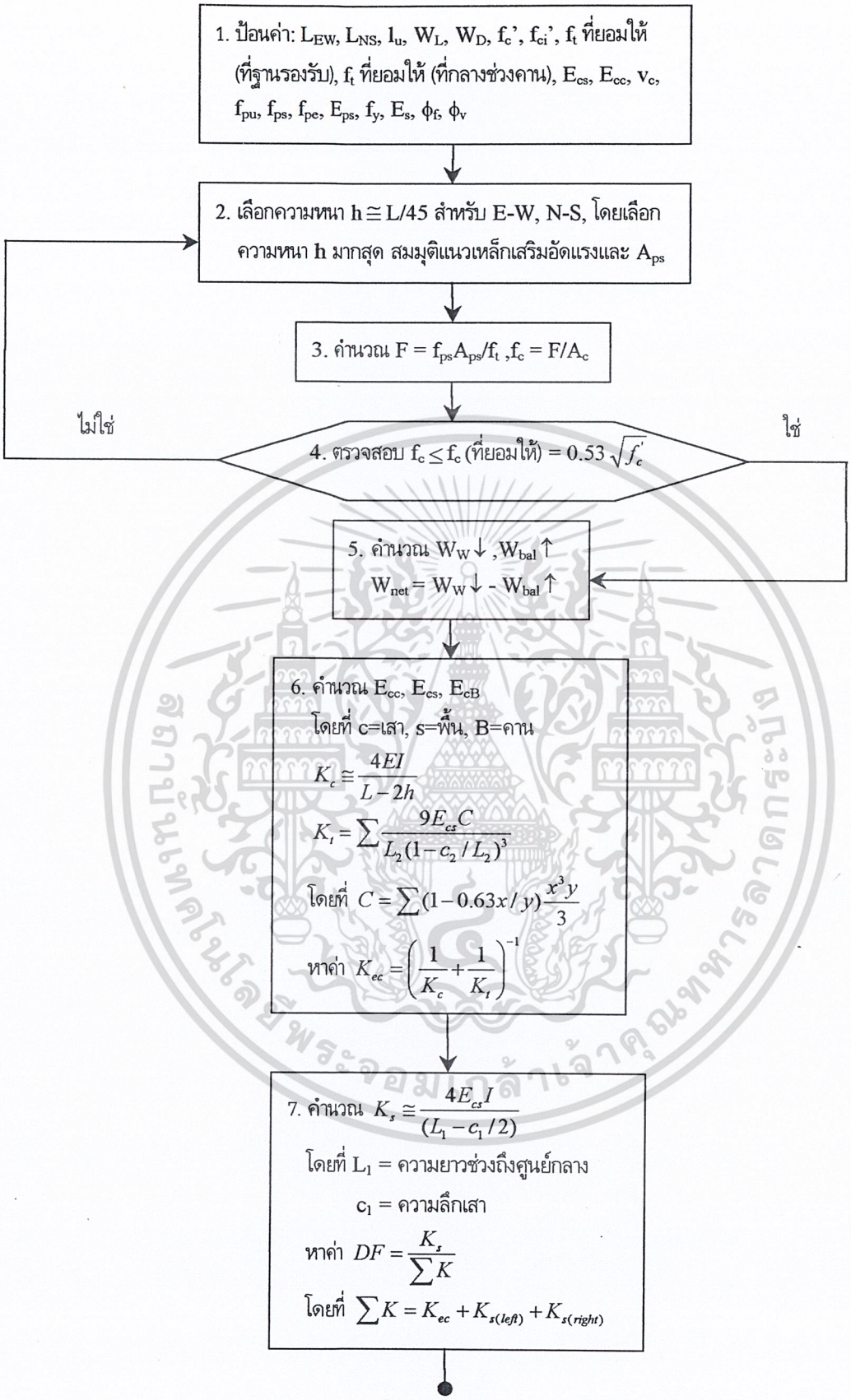
$V_{nh} \le 35 b_v d_{pc}$

-ถ้า $V_{nh} > 35 b_v d_{pc}$ ต้องออกแบบเหล็กเสริม โดยที่

$V_n = \mu A_{vf} f_y \le 0.2 f_c' A_c \le 5.6 A_c$

จบขั้นตอนการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนผังที่ 3 แสดงขั้นตอนการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสองทางแบบมีที่รองรับที่ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

คำนวณ FEM_{net} สำหรับ W_{net} และทำการกระจายโมเมนต์

โดยที่ $FEM_{net} = \pm\frac{W_{net}(L_n)^2}{12}$

ค่าการกระจายปรับแก้ M_{net} ที่ขอบฐานรองรับ

M_{net} = การกระจาย $(M_{net} - \frac{V_c}{3})$

คำนวณ $S = bh^2/6$, คำนวณ $f_t = -\frac{P}{A} + \frac{M_{net}}{S}$

ไปขั้นตอนที่2

เพิ่ม h

ไม่ใช่

9. ตรวจสอบหน่วยแรง

$f_t < f_t = 1.60\sqrt{f'_c}$ (ที่ฐานรองรับ)

$f_t < f_t = 0.53\sqrt{f'_c}$ (ที่กลางช่วง)

ใช่

10. ตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกประลัย

คำนวณ W_{bal} และ $FEM_{bal} = \frac{W_{bal}(L_n)^2}{8}$

ทำการกระจายและคำนวณโมเมนต์ $M = P_e e$

หาโมเมนต์รอง $M_s = (M_{bal} - M_1)$

11. หาค่า $W_u = 1.4W_D + 1.7W_L$

คำนวณ $FEM_{\bar{u}} = \frac{W_u(L_n)^2}{12}$

ทำการกระจายโมเมนต์ $M_{\bar{u}}$ และคำนวณกำลังโมเมนต์

ออกแบบที่ต้องการ $M_u = (M_{\bar{u}} - M_s)$

12. คำนวณ $M_n = M_u/\phi$

เลือก $A_s = 0.00075bhl$ และ หาค่าโมเมนต์

$M = A_s f_y(d-a/2) + A_{ps} f_{ps}(d_p - a/2)$

พิจารณาการกระจายโมเมนต์ในช่วงอินอิลาสติก ใช้ค่าตัวคูณ R

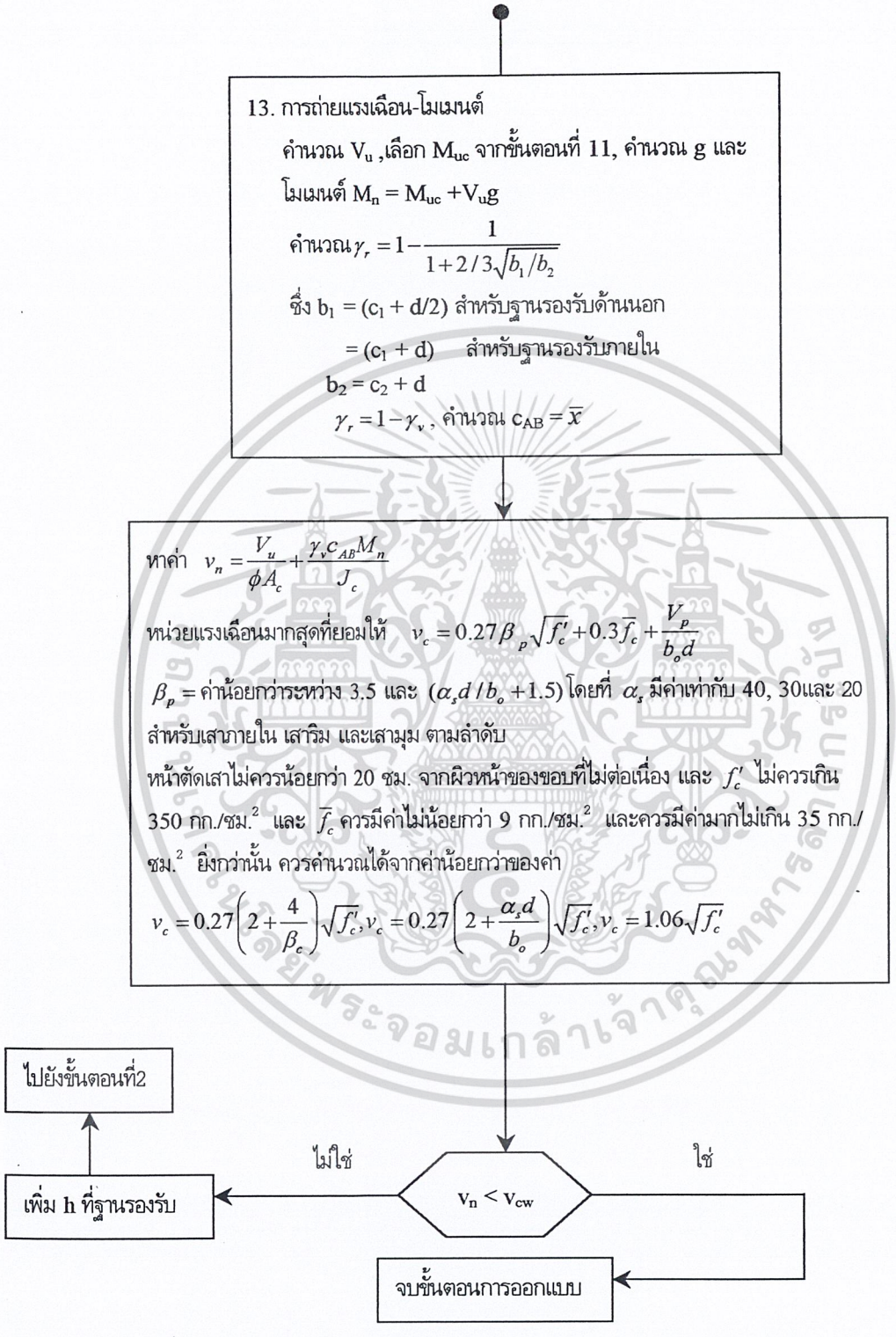
$$R = 20\left[1 - \frac{\omega_p + (d/d_p)(\omega - \omega')}{0.36\beta_1}\right]$$

ไม่ใช่

ตรวจสอบ $M_n < M_n$ ที่ต้องการ บริเวณที่รองรับและกลางช่วง

ใช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้