

การศึกษาออกแบบอาคารพักอาศัยโดยใช้โครงสร้าง เสา และคาน สำเร็จรูป
ระบบคอนกรีตอัดแรง

STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST COLUMN
AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาออกแบบอาคารพักอาศัยโดยใช้โครงสร้าง เสา และคาน สำเร็จรูป
ระบบคอนกรีตอัดแรง

STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST
COLUMN AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST
COLUMN AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM



Mr.Patchrapol

Jindanath

Mr.Pichitpol

Yooyen

Mr.Loephong

Phanklin

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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาออกแบบอาคารพักอาศัยโดยใช้โครงสร้าง เสา คาน สำเร็จรูป ระบบคอนกรีตอัดแรง
STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST COLUMN AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM

นักศึกษา นาย นายพัชรพล จินदानถ รหัสประจำตัว 53011087
นาย พิชิตพล อยู่เย็น รหัสประจำตัว 53011123
นาย เลอพงค์ พรรณกลีน รหัสประจำตัว 53011380

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

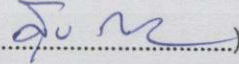
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์	
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
ผศ.สุพจน์ ศรีนิล	
อ.ทรงกลด แซ่อึ้ง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 31 มีนาคม 2557

สถานที่สอบ อาคาร CV ชั้น 2 ห้อง 202

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(..........)

รศ.สุพจน์ ศรีนิล

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 31 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาออกแบบอาคารพักอาศัยโดยใช้โครงสร้าง เสา และคาน
สำเร็จรูป ระบบคอนกรีตอัดแรง
STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST
COLUMN AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM

นักศึกษา นาย นายพัชรพล จินดานาด รหัสประจำตัว 53011087
นาย พิชิตพล อยู่เย็น รหัสประจำตัว 53011123
นาย เลอพงค์ พรรณกลั่น รหัสประจำตัว 53011380

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกฤษ์

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการก่อสร้างในประเทศไทยกำลังเจริญเติบโตไปได้มาก ระบบ Prestressed Concrete ได้เข้ามามีส่วนในการก่อสร้างในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากการก่อสร้างระบบ Prestressed Concrete เป็นการก่อสร้างที่รวดเร็ว ช่วยลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง อีกทั้งเป็นการตอบสนองต่องานก่อสร้างในปัจจุบัน เพราะมีปัญหาแรงงานก่อสร้างขาดแคลนและไร้ฝีมือ ดังนั้นอาชีพที่กำลังเป็นที่ต้องการในตลาดในตอนนี้คงจะหนีไม่พ้นวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีการก่อสร้างค่อนข้างมาก

ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาและออกแบบโปรแกรม Microsoft Excel ขึ้นมา เพื่อใช้ในการออกแบบหน้าตัดของโครงสร้าง เสา และคาน ระบบคอนกรีตอัดแรง เพื่อที่จะช่วยให้ผู้ที่นำไปใช้ประหยัดเวลาในการออกแบบ และยังคงความถูกต้องไว้ ทำให้งานก่อสร้างดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว

โครงการพิเศษนี้ที่ถูกทำขึ้นนอกจากจะทำให้ประหยัดเวลาในการออกแบบแล้วยังสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TITLE การศึกษาออกแบบอาคารพักอาศัยโดยใช้โครงสร้าง เสา และคาน สำเร็จรูป ระบบคอนกรีตอัดแรง
 STUDY DESIGN RESIDENTIAL STRUCTURES USING PRECAST COLUMN AND BEAM PRESTRESSED CONCRETE SYSTEM

NAME Mr.Patchrapol Jindanath ID 53011087
 Mr.Pichitpol Yooyen ID 53011123
 Mr.Loephong Phanklin ID 53011380

FIELD CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT CIVIL ENGINEERING
FACULTY ENGINEERING
ADVISOR ASSOC.PROF.SOMKIAT KHWANPRUK

ABSTRACT

Currently under construction in Thailand is growing very possible Prestressed Concrete Systems took part in the construction of the current population. Due to the construction of Prestressed Concrete construction is fast. Reduces the amount of material used in the construction. It is a response to current construction because of the labor shortage and unskilled construction. So civil engineering are needed now. Since there are quite a lot of construction.

The preparation has been studied and designed for use in Microsoft Excel, the cross-sectional design of the structural system of concrete columns and beams. In order to allow the user to use, save time in design. And still be saved. Make the construction process go quickly.

This special project was made in addition to the time savings in the design can also be used as a medium of instruction as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ คือ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาส ความเอาใจใส่ แนะนำ และให้ความช่วยเหลือเสมอมา อีกทั้ง โครงการก่อสร้างอาคารชุกพักอาศัย โครงการ IVY TOWN ที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่อนุญาตให้คณะผู้จัดทำเข้าไปศึกษาดูการก่อสร้างและสอบถาม วิศวกรผู้คุมงาน ซึ่งต้องขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา ครูบา อาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษา อย่างเต็มที่ เอาใจใส่เสมอมา ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ อีกทั้งเพื่อนๆ ที่ได้ทำให้กำลังใจ ข้าพเจ้าขอ ระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นายพัชรพล

นายพิชิตพล

นายเลอพงศ์

จินดานาด

อยู่เย็น

พรรณภักดิน

คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการดำเนินโครงการพิเศษ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	5
3.1 ข้อกำหนดของการออกแบบ	5
3.2 น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง	12
3.3 คุณสมบัติของคอนกรีต (Concrete Properties)	17
บทที่ 4 หลักการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตอัดแรง	19
4.1 หลักการรวมแรง	19
4.2 หลักการแรงคู่ควบภายใน (internal couple concept)	22
4.3 หลักการแรงพุงเพื่อด้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอก (load balancing concept)	24
บทที่ 5 การวิเคราะห์หน้าตัดภายใต้โมเมนต์ดัด	30
5.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต	30
5.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง	31
5.3 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (cracking moment)	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 จุดเคิร์นบนและล่าง (top and bottom kern point)	36
5.5 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง	40
5.6 การโก่งตัว (deflection)	47
บทที่ 6 การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด	52
6.1 การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก	52
6.2 แนวเหล็กเสริมอัดแรง	58
6.3 การออกแบบสำหรับกำลังประลัยของหน้าตัด	60
บทที่ 7 การออกแบบองค์อาคารรับแรงเฉือน	67
7.1 แรงเฉือน (shear) ในคอนกรีตอัดแรง	67
บทที่ 8 คอนกรีตรับแรงอัด	78
8.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงในช่วงใช้งานของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัด	80
8.2 กำลังที่สถานะประลัยของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัด	81
บทที่ 9 การต่อโครงสร้างโดยการเชื่อม	92
9.1 การต่อโครงสร้างโดยการเชื่อม (Welded Connection)	92
9.2 ประเภทของรอยต่อเชื่อม (Types of Weld)	94
9.3 การวิบัติของรอยต่อเชื่อม และเนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม	95
9.4 กำลังของรอยต่อเชื่อม – มาตรฐาน AISC	99
9.5 สัญลักษณ์มาตรฐานของการเชื่อม	109
9.6 การวิเคราะห์หาหน่วยแรงบนรอยต่อเชื่อม	110
9.7 การออกแบบรอยต่อเชื่อมรับแรงร่วมศูนย์	111
บทที่ 10 ผลการดำเนินงาน	113
10.1 การออกแบบคาน	113
10.2 การออกแบบเสา	119
10.3 การออกแบบรอยเชื่อมในคาน	123
10.4 การออกแบบรอยเชื่อมในเสา	126
บทที่ 11 สรุปผลการดำเนินงาน	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สรุปผลดำเนินงาน	128
ข้อเสนอแนะ	129
หนังสืออ้างอิง	130
บรรณานุกรม	131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	6
3.2	หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	8
3.3	ระยะการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	9
3.4	ค่าตัวคูนน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	10
3.5	ตารางแสดงค่าตัวคูนลดกำลังสำหรับกรณีต่างๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)	12
3.6	น้ำหนักบรรทุกทุกจรสำหรับอาคารประเภทต่างๆ	13
3.7	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421	14
3.8	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534	14
3.9	คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำ ตามมาตรฐาน มอก. 420-2534	15
3.10	คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายตัวต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM 416	15
3.11	คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง	16
3.12	ขนาดและคุณสมบัติของเหล็กเสริม	16
5.1	ค่าตัวคูนเพื่อคำนวณการโค้งตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว (จาก PCI design handbook)	50
9.1	สำหรับกำลังของชิ้นโลหะ (Base Metal) หรือของแผ่นโลหะประกบที่นำมาใช้เพื่อถ่ายแรง (connecting elements)	101
9.2	หน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยต่อเชื่อม – ตามวิธี ASD	102
9.3	หน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยต่อเชื่อม – ตามวิธี LRFD	104
9.4	ขนาดเล็กสุดของขาเชื่อมแบบฟิลเลท	106
9.5	ความหนาของประสิทธิผลต่ำสุดของรอยเชื่อมแบบบากร่องในร่องลึกเพียงบางส่วน	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
4.1	การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีต	19
4.2	คานคอนกรีตอัดแรงที่มีลักษณะของแนวเหล็กเสริมอัดแรงไม่เท่ากัน	22
4.3	แรงคู่ควบ C-T และแขนงของโมเมนต์ jd ในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (C และ T เปลี่ยนแปลงแต่ jd คงที่)	23
4.4	แรงคู่ควบ C-T และแขนงของโมเมนต์ z ในคอนกรีตอัดแรง (C และ T คงที่แต่ z เปลี่ยนแปลง)	24
4.5	แรงพุงของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมแรงหักมุมตรงกึ่งกลางช่วงคาน	25
4.6	แรงพุงของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นรูปโค้งพาราโบลา	27
4.7	แรงพุงและโมเมนต์ที่เกิดจากแนวเหล็กเสริมอัดแรงลักษณะต่างๆ	29
5.1	หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว	34
5.2	โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว	36
5.3	จุดเคิร์นบนและจุดเคิร์นล่างของคานคอนกรีตอัดแรง	37
5.4	หน่วยแรงในคอนกรีตกับตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C	39
5.5	k_t และ k_b ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	39
5.6	การกระจายของหน่วยยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย	42
5.7	ค่าการโก่งตัวของคานสำหรับแรงกระทำต่างๆ	48
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการโก่งตัว	49
6.1	หน่วยแรงในคอนกรีต	53
6.2	แผนภาพของแมกเนล	56
6.3	บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง	60
6.4	การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว	61
6.5	การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเสริมเหล็กทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด	64
7.1	ลักษณะการแตกร้าวในคานเนื่องจากแรงเฉือน	69
7.2	คานรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแม่	73
7.3	ค่า V_{ci} , V_{cw} ที่ระยะต่างๆ จากที่รองรับและบริเวณที่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแม่	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.4	คานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนวางเอียงแนวแกนของคาน	75
8.1	การโค้งตัวและโมเมนต์ของเสา	79
8.2	แผนผังกำลังของเสา	82
8.3	เสาคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย	83
8.4	แผนผังกำลังของเสาที่ใช้สำหรับการออกแบบ	86
8.5	แผนผังกำลังของเสายาว	88
8.6	ค่า k ตามทฤษฎีและค่า k สำหรับการออกแบบเสนอโดย ACI	89
9.1	ลักษณะการเชื่อมต่อแบบ SMAW และแบบ SAW	92
9.2	การจำแนกแบบรอยต่อของรอยเชื่อม	94
9.3	ประเภทของการต่อเชื่อม	95
9.4	ระนาบวิบัติจากการเฉือนของรอยเชื่อมต่อ	96
9.5	เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อมแบบฟิลเลท	98
9.6	ความหนาของประสิทธิผลของรอยเชื่อมแบบต่อชนหรือแบบบากร่อง	99
9.7	ขนาดขาฟิลเลท	107
9.8	สัญลักษณ์มาตรฐานของการเชื่อม	110
9.9	หน่วยแรงบนรอยเชื่อมประเภทต่างๆ	111
9.10	การออกแบบรอยเชื่อมสำหรับเหล็กฉาก	112
10.1	ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบคาน	113
10.2	แสดงข้อมูลหน้าตัด	113
10.3	แสดงข้อมูลของคอนกรีตและเหล็ก	114
10.4	แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้	114
10.5	แสดงข้อมูลของแรง และ โมเมนต์	115
10.6	แสดงจำนวนลวด และการสูญเสียแรง	116
10.7	แสดง Stress ที่ระยะต่างๆ	117
10.8	แสดงแรงเฉือนในคาน	117
10.9	แสดงการตรวจสอบโมเมนต์ และ แรงเฉือน	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
10.10 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบคาน	119
10.11 แสดงข้อมูลของคอนกรีต และ สวด	119
10.12 แสดงข้อมูลหน้าตัด	120
10.13 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้	120
10.14 แสดงแรง และ โมเมนต์	121
10.15 แสดงโมเมนต์แตกร้าว และ แรงที่เกิดขึ้น	121
10.16 แสดงการตรวจสอบโมเมนต์	122
10.17 แสดงการตรวจสอบโดยใช้ Stress	122
10.18 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบรอยเชื่อมในคาน	123
10.19 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้	123
10.20 แสดงแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงใน Dowel Bar	124
10.21 แสดงข้อมูลของคาน	124
10.22 แสดงข้อมูลรอยต่อคาน	125
10.23 แสดงการเลือกแผ่นเพลตข้างเสา	125
10.24 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบรอยเชื่อมในเสา	126
10.25 แสดงข้อมูลเสา และ การตรวจสอบความหนาของเสา	126
10.26 แสดงจำนวนของ Anchor Bolt	127
10.27 แสดงกำลังรอยเชื่อม และ การตรวจสอบ	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันการก่อสร้างในประเทศไทยมีจำนวนมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคต โดยอาคารก่อสร้างต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ต่างก็จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามความเจริญของเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรภายในประเทศไทย ซึ่งนับว่าปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา อาชีพที่กำลังเป็นที่ต้องการในตลาดในตอนนี้คงจะหนีไม่พ้นวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมีการก่อสร้างค่อนข้างมาก

การก่อสร้างระบบ Prestressed Concrete ได้เข้ามามีส่วนในการก่อสร้างในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากการก่อสร้างระบบ Prestressed Concrete เป็นการก่อสร้างที่รวดเร็ว และยังลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง อีกทั้งเป็นการตอบสนองต่องานก่อสร้างในปัจจุบัน เพราะมีปัญหาแรงงานก่อสร้างขาดแคลนและไร้ฝีมือ แต่การใช้ Prestressed Concrete มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงอันเนื่องมาจากการทำแบบหล่อ ซึ่งหากใช้สร้างบ้านในจำนวนน้อยๆจะทำให้ไม่คุ้มทุน ด้วยเหตุนี้การใช้ระบบ Prestressed Concrete จึงเหมาะสมกับการก่อสร้างโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น ทาวเฮาส์ หมู่บ้านจัดสรร เนื่องจากมีรูปแบบภายใน ภายนอก ที่เหมือนกันทำให้โครงสร้างที่ใช้มีขนาดเท่ากัน การใช้ระบบ Prestressed Concrete ยังทำให้โครงสร้างมีความมั่นคงปลอดภัย เพราะสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าโครงสร้างระบบหล่อในที่ การใช้โปรแกรมออกแบบโครงสร้างระบบ Prestressed Concrete นอกจากจะทำให้ประหยัดเวลาในการออกแบบแล้วยังสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาออกแบบโครงสร้าง เสา คาน Prestressed Concrete โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้
2. โปรแกรมที่ออกแบบสามารถนำไปใช้ได้จริงในการก่อสร้างได้
3. สามารถออกแบบโครงสร้าง เสา คาน Prestressed Concrete ได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เป็นสื่อการเรียนการสอนในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อให้ผู้เรียนมีความเข้าใจและสนใจมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษาโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้จะเป็นการศึกษา ออกแบบโครงสร้าง เสา คาน Prestressed Concrete โดยใช้โปรแกรม Excel ซึ่งจะเป็นกรณีศึกษาอาคารชุดพักอาศัยโครงการ IVY TOWN ที่ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ซึ่งขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ จะทำการศึกษาเสา คาน ที่ใช้ในการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างนี้

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1. ปริญญาบัตรและวิทยานิพนธ์ทั้งในและนอกสถาบัน
2. เอกสารและรูปภาพ ,ผ.ศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์ ผู้รวบรวม
3. หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง ,ดร.นเรศ พันธราธร
4. หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง ,ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย
5. หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง ,รศ.สมโพธิ วิวิธเกยูรวงศ์

หลักการและทฤษฎีที่ใช้

Reinforced Concrete Design (RC Design) โดยวิธี Strength Design

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบการก่อสร้างโครงสร้าง Prestressed Concrete
2. ศึกษาขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง Prestressed Concrete จากหนังสือ
3. วิเคราะห์แก้ไขปัญหา
4. เข้าพบกับอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อเคลียร์ปัญหา ข้อสงสัย
5. ทดลองสร้างโปรแกรมคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เข้าพบอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อนำเสนอโปรแกรมคำนวณ และขอคำแนะนำหากโปรแกรมคำนวณยังไม่ครบถ้วน
7. ทดลองนำไปใช้ในขอบเขตงาน
8. นำผลที่ได้ไปปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมคำนวณ และสรุปการทำงาน
9. เข้าพบอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อนำเสนอโปรแกรมคำนวณที่ผ่านการแก้ไขแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการดำเนินโครงการพิเศษ

1. ทำให้สะดวก รวดเร็ว ในการคำนวณ สามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน
2. เป็นแนวทางออกแบบคอนกรีตอัดแรงตามวิชาการและได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของ วสท.
3. ทำให้เข้าใจปัญหาและทำการวิเคราะห์ได้
4. สามารถใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

คอนกรีตกำลังสูง เป็นองค์ประกอบหลักๆขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง เพราะฉะนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมคุณภาพและต้องมีการตรวจสอบในด้านกำลังและความคงทนของคอนกรีตในระหว่างการผลิต มีเอกสารมากมายที่ครอบคลุมเนื้อหาในด้านการผลิตคอนกรีต การควบคุมคุณภาพ และมาตรฐานการออกแบบ ในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการเน้นในด้านของคอนกรีตในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง โดยถือว่าผู้อ่านมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็กมาแล้ว

2.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ดร.นเรศ พันธราธร (1) : ทฤษฎีที่นำมาใช้คือคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) หมายถึงการให้ความเค้น (Stress) แก่องค์อาคาร (Member) แม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) กับคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) คือ คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) จะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเพียงแต่วางเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบ แต่ในคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) คอนกรีตกับเหล็กเสริมจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้งๆที่ยังไม่มีแรงภายนอกมากระทำ โดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง สภาพเช่นนี้จะทำให้พฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้หน่วยแรงดึงสูงๆและคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุประรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนเท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งสิ่งที่เราจะทำการศึกษาจะเป็นการนำหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการกระทำกับตัวคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) ในสถานะต่างๆ มาทำการคำนวณ และหาค่าต่างๆนำไปเทียบกับมาตรฐานมอก. ถ้ามีมาตรฐานเป็นที่ยอมรับ ก็ถือว่าสามารถใช้ได้ ซึ่งค่าที่มีผลต่อคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) เช่น กำลังคราก, กำลังดึงประลัย, โมเมนต์ดัด, แรงเฉือน, แรงอัดตามแนวแกน, แรงกด, แรงบิด, การโก่งตัว ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อนำไปใช้ออกแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) ที่มีคุณภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

3.1 ข้อกำหนดของการออกแบบ

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง มีขั้นตอนมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากการที่มีขั้นตอนทำงานที่มากกว่า การออกแบบต้องครอบคลุมถึงความปลอดภัยของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุก และการเสียรูป (deformation) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างและการใช้งาน รวมทั้งต้องมีความคงทน (durability) เพียงพอตลอดอายุการใช้งานด้วย โดยปกติขั้นตอนการออกแบบ ต้องมีการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้าง ภายใต้สถานะ 2 ประเภทดังนี้

ก) สถานะการใช้งาน (service state)

ที่สถานะการณ์ใช้งาน โครงสร้างต้องมีความสามารถในการใช้งานได้ตามกำหนด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กจะต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การโก่งตัว การแตกร้าวและการกัดกร่อนต้องไม่มากเกินไปเกินข้อกำหนด

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างรับแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับ
อาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

<p>ก) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริมอัดแรง ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage) การคืบของคอนกรีต (creep) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation) ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้</p>	
<p>หน่วยแรงอัด</p>	
<p>- สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง เป็นรูปสามเหลี่ยม (triangular distribution of prestress)</p>	<p>$0.6 f'ci$</p>
<p>- สำหรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการอัดแรงเท่าๆกันตลอดหน้าตัดขององค์อาคาร (uniform distribution of prestress)</p>	<p>$0.45 f'ci$</p>
<p>หน่วยแรงดึง</p>	
<p>- สำหรับองค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กเสริมธรรมดาที่ยึดเหนี่ยว (bonded reinforcement) ในการช่วยรับแรงดึง</p>	<p>$0.08 \sqrt{f'ci}$ กก./ซม.²</p>
<p>- สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมธรรมดาที่ยึดเหนี่ยว ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กยึดเหนี่ยวให้สามารถรับแรงดึงทั้งหมดในส่วนของคอนกรีตที่เกิดหน่วยแรงดึง (tensile zone) โดยที่แรงดึงคำนวณจากสมมติฐานของหน้าตัดไม้แตกร้าว</p>	<p>$1.60 \sqrt{f'ci}$ กก./ซม.²</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ข) หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง) ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

หน่วยแรงอัด

- | | |
|--|------------|
| - กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงเนื่องจากแรงดัด | $0.45 f'c$ |
| - กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงอัดโดยตรง (direct compression) | $0.30 f'c$ |

หน่วยแรงดึง

- | | |
|--|---------------------------------------|
| - หน่วยแรงดึงในบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงมาก่อน (precompressed tensile zone) | $1.6 \sqrt{f'c}$ กก./ซม. ² |
| - สำหรับองค์อาคารซึ่งไม่ใช่ชนิดไม่ยึดเหนี่ยว หากค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าค่าที่กำหนดข้างต้นอาจจะใส่เหล็กเสริมธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยวให้เพียงพอเพื่อควบคุมความกว้างของรอยต่อแตกร้าวไม่ให้เกิน 0.2 มม. สำหรับองค์อาคารทั่วไป และไม่เกิน 0.1 มม. สำหรับองค์อาคารที่อาจได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (corrosive atmosphere) | |

โดยที่ $f'ci$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.²

$f'c$ คือ กำลังประลัยของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้	
- ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก	0.94 <i>fpy</i> แต่ไม่เกิน 0.80 <i>fpu</i> หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอยืด
- ทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร	0.70 <i>fpu</i>

โดยที่ *fpy* คือ กำลังคลาก (yield strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม.²
fpu คือ กำลังประลัย (breaking strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม.²

ข) สถานะประลัย (ultimate state)

เป็นสถานะที่โครงสร้างสิ้นสุดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์ที่สถานะนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (overload) ก่อนที่โครงสร้างจะพังลง ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีตัวคูณน้ำหนัก (load factor) ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมรับ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ
ว.ส.ท. ปี 2537)

ประเภทของชิ้นส่วน	การโก่งตัวที่พิจารณา	พิกัดการโก่งตัว
คานฟ้าเรียบไม่รองรับหรือเชื่อม ยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจ เสียหายจากการโก่งตัวมากได้	การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร	$\frac{L}{180}$
พื้นไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับ ชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจ เสียหายจากการโก่งตัวมากได้	การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร	$\frac{L}{360}$
พื้นและคานฟ้ารองรับหรือเชื่อม ยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัว มากได้	ส่วนของการโก่งตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้น หลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่ โครงสร้างแล้ว (ผลรวมของการโก่ง ตัวระยะยาวจากน้ำหนักบรรทุกคง ค้าง และการโก่งตัวทันทีจากน้ำหนัก บรรทุกใดๆที่เพิ่มขึ้น)	$\frac{L}{480}$
พื้นและคานฟ้ารองรับหรือเชื่อม ยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งไม่น่าจะเสียหายจากการโก่ง ตัวมาก		$\frac{L}{240}$

หมายเหตุ สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด ให้คำนวณการโก่งตัวทันทีโดยวิธีปกติ หรือใช้สูตรสำหรับการ
โก่งตัวอีลาสติก โดยสามารถใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดิมสำหรับหน้าตัดไม่
แตกร้าว

ในการคำนวณการโก่งตัวเพิ่มเติมในระยะยาวของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงให้คำนึงถึง
หน่วยแรงในคอนกรีตและในเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (sustained load) และ
ผลมาจากคืบตัว การหดตัวของคอนกรีตและการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัด
แรงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวคูณน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (3.1)$$

โดยที่	U	คือ	กำลังที่ต้องการ (required strength)
	D	คือ	ผลของน้ำหนักคงที่
	L	คือ	ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

ถ้ามีการพิจารณาผลรวมของแรงลมร่วมด้วย จะต้องหากำลังที่ต้องการ จากค่าสูงสุดของทั้งสามสมการ คือ 3.1-3.3

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad (3.2)$$

$$U = 0.9D + 1.4W \quad (3.3)$$

โดยที่ W คือ ผลของแรงลม

ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (required strength) โดยที่กำลังที่ออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (nominal strength) ด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง สำหรับกรณีต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

กำลังที่ต้องการ \leq กำลังที่ออกแบบ

$$M_u \leq \phi M_n$$

$$P_u \leq \phi P_n$$

$$V_u \leq \phi V_n$$

โดยที่ M_u, P_u, V_u คือ กำลังที่ต้องการของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
 $\phi M_n, \phi P_n, \phi V_n$ คือ กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
 M_n, P_n, V_n คือ กำลังระบุของโมเมนต์ แรงอัด และแรงเฉือนตามลำดับ
 ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับกรณีต่างๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต
อัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

	ϕ
- กรณีของแรงคัต อาจมีหรือไม่มีแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
- กรณีของแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
- กรณีของแรงอัด หรือ แรงอัดร่วมกับแรงคัต สำหรับชั้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเกลียว	0.75
สำหรับชั้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว	0.70
- กรณีของแรงเฉือนและแรงบิด	0.85
- กรณีของแรงกด	0.70

3.2 น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง

ในการออกแบบผู้ออกแบบจะต้องคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (live load) สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่สามารถคำนวณได้โดยปริมาตรของคอนกรีตและความหนาแน่นของคอนกรีตโดยความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,400 กก./ม.³ ส่วนการกำหนดน้ำหนักบรรทุก ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของโครงสร้างนั้นๆ ตารางที่ 3.6 แสดงน้ำหนักบรรทุกจรที่ระบุไว้ในข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารประเภทต่างๆ

ประเภทการใช้อาคาร	น้ำหนักบรรทุกเป็น กก./ม. ²
1. หลังคา	50
2. กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
3. ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	15
4. ห้องแถว ตึกแถว อาคารชุด หอพัก โรงแรม และห้อง คนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
5. สำนักงานธนาคาร	250
6. (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการ พาณิชย์ มหาวิทยาลัย โรงเรียน	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม โรงพยาบาล สำนักงาน และธนาคาร	300
7. (ก) ตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงแรมรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในหอสมุด ที่ จอดหรือเก็บรถยนต์นั่ง	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	400
8. (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑ์ อิมจันทร์ โรงงาน อุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงแรมรสพ ภัตตาคาร และหอสมุด	500
9. ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด	600
10. ที่จอดหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่นๆ	800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421					
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด มม. ²	กำลังดึงประลัยน้อยที่สุด กก./ชม. ²		กำลังคลากอย่างน้อยที่สุด กก./ชม. ²	
		ชนิดปลายยึด เป็นปม	ชนิดปลายยึด เป็นลิ่ม	ชนิดปลายยึด เป็นปม	ชนิดปลายยึด เป็นลิ่ม
		4.88	18.7	-	17580
4.98	19.48	16870	17580	13500	1460
6.35	31.67	16870	16870	13500	13500
7.01	38.59	-	16520	-	13220

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534			
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด มม. ²	กำลังดึงประลัย กก./ชม. ²	กำลังดึงที่จุดคราก กก./ชม. ²
4	12.57	17500	15000
5	19.64	17500	15000
7	38.48	16000	13500
9	63.62	14500	12500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำ ตาม
มาตรฐานมอก. 420-2534

คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำ ตามมาตรฐานมอก. 420-2534				
เกรด	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด มม. ²	แรงดึงที่จุดปล่อย กก.	แรงดึงที่จุดคราก กก.
1725	9.53	51.61	9070	8163
	12.70	92.90	16320	14688
	15.24	139.35	24490	22041
1860	9.53	54.84	10430	9387
	12.70	98.71	18730	16857
	15.24	140.00	26580	23922

ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายตัวต่ำ ตาม
มาตรฐาน ASTM 416

คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายตัวต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM 416				
เกรด	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง มม.	พื้นที่หน้าตัด มม. ²	แรงดึงที่จุด ปล่อย กก.	แรงดึงที่จุดคราก กก.
250	6.35	23.22	4080	3680
	7.94	37.42	6580	5930
	9.53	51.61	9070	8170
	11.11	69.68	12240	11020
	12.70	92.90	16320	14690
270	15.24	139.35	24490	22050
	9.53	54.84	10430	9390
	11.11	74.19	14060	12660
	12.70	98.71	18730	16850
	15.24	140.00	26580	23930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

ตารางคุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง			
ชนิดของเหล็กเสริม	เกรด	กำลังคราก กก./ชม. ²	กำลังดึงประลัย กก./ชม. ²
เหล็กกลม	SR24 Φ 6,9,12,15 มม.	2400	3900
เหล็กข้ออ้อย	SD30 Φ 12,16,20,25,28 มม.	3000	4900
	SD40 Φ 12,16,20,25,28,35 มม.	4000	5700
	SD50 Φ 32 มม.	5000	6300

ตารางที่ 3.12 ขนาดและคุณสมบัติของเหล็กเสริม

ตารางขนาดและคุณสมบัติของเหล็กเสริม			
ชนิด-ขนาดศูนย์กลาง มม.	น้ำหนัก กก./ม.	พื้นที่หน้าตัด ซม. ²	เส้นรอบวง ซม.
RB-6	0.222	0.283	1.884
RB-9	0.499	0.6336	2.826
DB-10	0.616	0.785	3.140
RB-12, DB-12	0.888	1.131	3.768
RB-15	1.387	1.767	4.710
DB-16	1.578	2.010	5.024
RB-19	2.226	2.835	5.966
DB-20	2.466	3.140	6.280
RB-25, DB-25	3.853	4.909	7.850
DB-28	4.834	6.160	8.792
DB-32	6.313	8.040	10.048
DB-36	7.990	10.180	11.304
DB-40	9.865	12.570	12.560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คุณสมบัติของคอนกรีต (Concrete Properties)

การพิจารณาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่สำคัญๆ จะแยกพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตใน 2 ลักษณะ คือ คอนกรีตในสภาพที่ยังเหลว และ คอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว

1. คอนกรีตในสภาพที่ยังเหลว มีคุณสมบัติอยู่ 2 ประการที่ควรพิจารณา คือ

1.1 ความสามารถเทได้ (Workability) ความสามารถเทได้ หรือ ความคล่องตัวในการเท คือ ผลรวมของพลังงานที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคส่วนผสมในคอนกรีต และแรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับแบบหล่อ และเหล็กเสริมคอนกรีต หากคอนกรีตมีความสามารถเทได้ดี คอนกรีตจะไหลได้เต็มแบบและหุ้มเหล็กเสริมได้ดี ทั้งยังสามารถทำให้แน่นได้โดยปราศจากการแยกตัว

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตได้แก่

1.1.1 ปริมาณน้ำในส่วนผสม น้ำมากจะช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้คอนกรีต แต่เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะมีช่องว่างในคอนกรีตมาก ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง

1.1.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และวัสดุผสมรวม

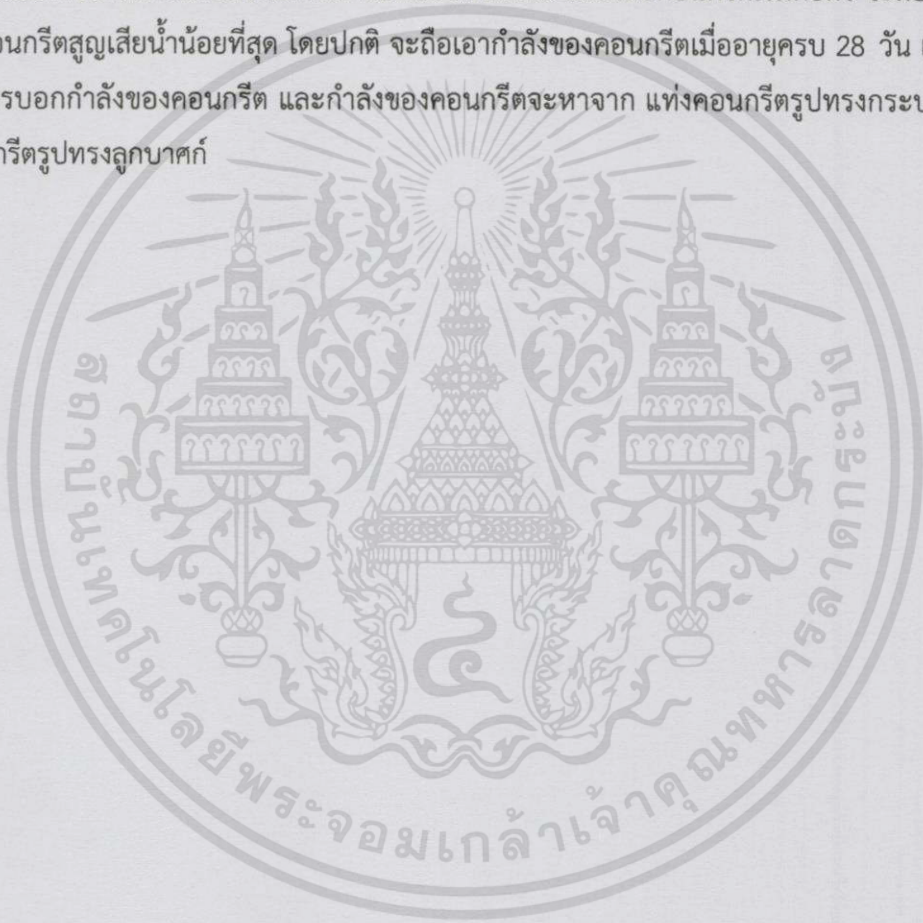
1.1.3 ส่วนผสมของคอนกรีต ถ้าใช้ทรายมากจะมีความสามารถการเทได้มากขึ้น แต่กำลังจะลดลง

1.1.4 สารผสมเพิ่ม

1.2 การอยู่ตัว (Soundness) การอยู่ตัวหรือความชื้นเหลว หมายถึงการที่คอนกรีตคงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตตลอดช่วงเวลาที่ใช้ หรือขนย้าย คอนกรีตที่มีการอยู่ตัวดี จะสามารถอัดแน่นในแบบหล่อได้ดีโดยไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) และไม่เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือวัดค่าการอยู่ตัวจะอาศัยการสังเกตเป็นหลัก

2. คอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มีหลายประการ แต่ในที่นี่จะขอกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่สุด คือ กำลังของคอนกรีต (Strength)

กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง คือ อัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์ (Water-Cement Ratio [w/c]) ถ้าใช้น้ำผสมคอนกรีตมาก กำลังของคอนกรีตจะน้อย การที่กำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นั้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ น้ำจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อกำลังของคอนกรีต ดังนั้น ในงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อผสมคอนกรีตจะต้องควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตให้ได้ตามที่ออกแบบส่วนผสม และเมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัว จะต้องคอยควบคุมให้คอนกรีตสูญเสียให้น้อยที่สุด โดยปกติ จะถือเอากำลังของคอนกรีตเมื่ออายุครบ 28 วัน เป็นมาตรฐานในการบอกกำลังของคอนกรีต และกำลังของคอนกรีตจะหาจาก แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก หรือแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

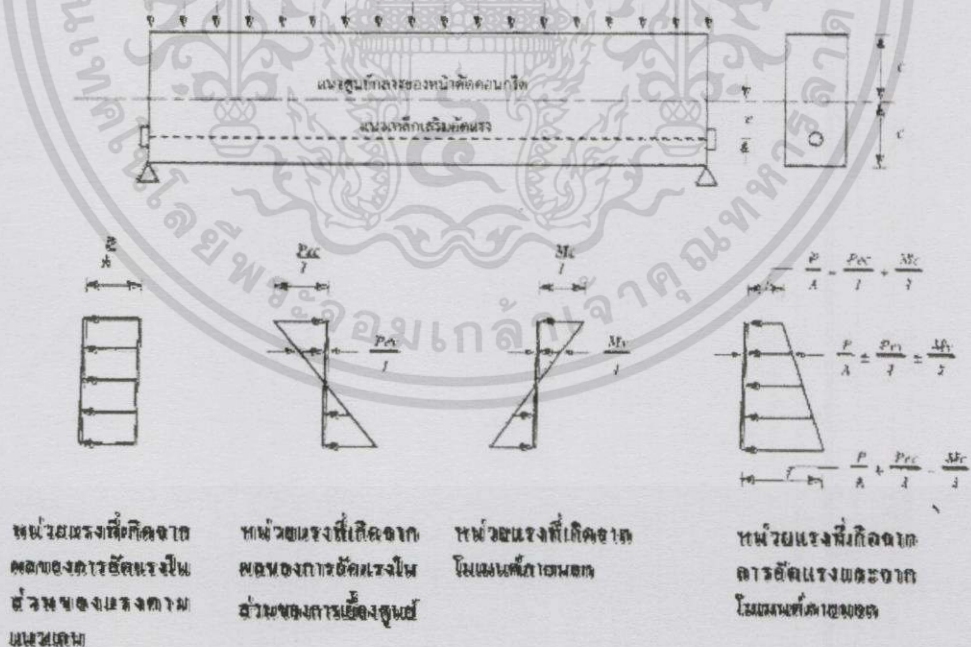
บทที่ 4

หลักการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตอัดแรง

มีหลักการ 3 แบบที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตอัดแรง หลักการแต่ละแบบ จะเหมาะกับการคำนวณแต่ละอย่าง ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจหลักการทั้งสาม เพื่อให้การวิเคราะห์ และออกแบบมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.1 หลักการรวมแรง

หลักการนี้จะใช้วิธีการคำนวณหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นบนคอนกรีต จากผลของแรงต่างๆ แยกกันอิสระ เช่น ค่าหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักตัวเอง หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก แล้วจึงนำหน่วยแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นมารวมกันโดยหลักการรวมแรง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานคอนกรีตมาจากแรงกระทำ 2 ส่วน คือ จากการอัดแรง และจากโมเมนต์ภายนอก โดยพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ส่วน ตามลำดับดังนี้

ก) หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรง

การอัดแรงที่เกิดขึ้นกระทำที่ตำแหน่งต่ำกว่าศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีต เป็นระยะเยื้องศูนย์กลาง e ดังนั้น การอัดแรงจะก่อให้เกิดหน่วยแรง 2 ส่วน คือ หน่วยแรงที่เกิดจากแรงตามแนวแกน (axial force, P) และหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์กลาง (Pe)

หน่วยแรงที่เกิดจากแรงตามแนวแกน มีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์กลาง (Pe)

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{Pe y}{I} \quad (4.2)$$

ดังนั้น หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงมีค่า

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe y}{I} \quad (4.3)$$

โดยที่	σ	คือ	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ
	P	คือ	แรงอัดประสิทธิผลของเหล็กเสริม
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของคาน
	e	คือ	ระยะเยื้องศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงจากแนวศูนย์กลางของหน้าตัดคาน
	y	คือ	ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวศูนย์กลางของหน้าตัด
	I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment inertia) ของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ภายนอก

ถ้ามีโมเมนต์ภายนอก M กระทำต่อหน้าตัดคานหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ มีค่า

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 ดังนั้น หน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ จึงมีค่า

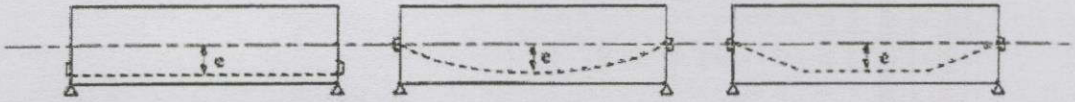
$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (4.5)$$

และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตที่ผิวบนสุด หรือ ล่างสุดของหน้าตัดคอนกรีตมีค่า

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pec}{I} \pm \frac{Mc}{I} \quad (4.6)$$

โดยที่ c คือ ระยะที่วัดจากศูนย์กลางของหน้าตัดถึงผิวบนหรือล่างสุดของคาน

ในกรณีของคานที่แนวเหล็กเสริมอัดแรงมีลักษณะต่างกัน แต่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง e ที่กึ่งกลางคาน เท่ากันดังตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ถ้าพิจารณาสมการที่ 4.3 หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงขึ้นอยู่กับขนาดของแรงอัดประสิทธิผล P และระยะเยื้องศูนย์กลาง e โดยมีได้สนใจเลยว่าแนวเหล็กเสริมอัดแรงจะเป็นอย่างไร นั้นหมายความว่า ถ้าคานหน้าตัดเหมือนกันมีแรงอัดประสิทธิผลและระยะเยื้องศูนย์กลางเท่ากัน จะมีหน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงเท่ากัน ถึงแม้ว่าแนวเหล็กเสริมอัดแรงจะมีลักษณะแตกต่างกัน เพราะฉะนั้นที่บริเวณกึ่งกลางช่วงคานของคานคอนกรีตอัดแรงแต่ละตัวในรูป 4.5 จะมีหน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงเท่าๆกัน แต่บริเวณอื่นๆ ที่ไม่ใช่กึ่งกลางช่วงคาน หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงไม่เท่ากัน (เพราะว่าระยะเยื้องศูนย์กลางไม่เท่ากันที่ตำแหน่งอื่นๆ)



รูปที่ 4.2 คานคอนกรีตอัดแรงที่มีลักษณะของแนวเหล็กเสริมอัดแรงไม่เท่ากัน

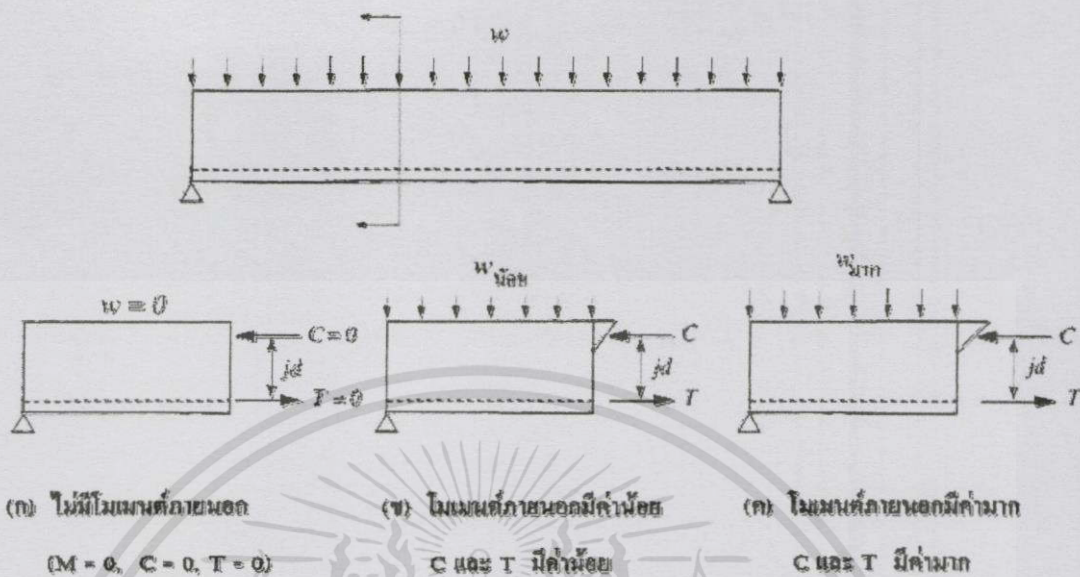
4.2 หลักการแรงคู่ควบภายใน (internal couple concept)

หลักการนี้เป็นหลักการที่ใช้ได้ทั้งในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปและคอนกรีตอัดแรง หลักการนี้คือ โมเมนต์ภายนอกทั้งหมด M (ทั้งจากน้ำหนักบรรทุกทุกและน้ำหนักตัวเอง) จะถูกต้านทานโดยโมเมนต์ภายใน ซึ่งเกิดจากแรงคู่ควบ C-T กระทำบนหน้าตัดคาน โดยที่ C คือ แรงอัดที่เกิดขึ้นบนคอนกรีต และ T คือ แรงดึงในเหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงอัดประสิทธิผล P นั้นเอง (บางที่เรียกปนกันระหว่างคำว่าแรงดึงกับแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงความหมายก็คือ แรงดึงเกิดในเหล็ก แต่กระทำต่อคอนกรีตในลักษณะแรงอัด) ถ้าให้ z คือ ระยะระหว่างแรงคู่ควบ C และ T

$$M = C \cdot z = T \cdot z = P \cdot z$$

แต่อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าหลักการนี้จะสามารถใช้ได้กับทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปและคอนกรีตอัดแรง แต่ก็มีมีความแตกต่างที่สำคัญอย่างหนึ่งระหว่างพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งสองกล่าวคือ

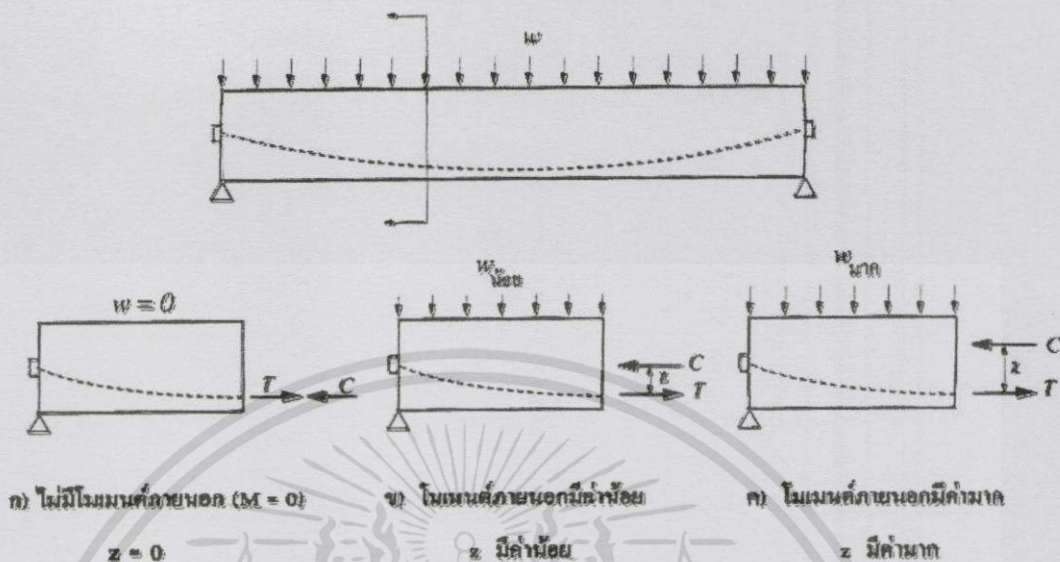
ในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ขณะที่ไม่มีโมเมนต์ภายนอกมากกระทำ แรงอัดในคอนกรีต C และแรงดึงในเหล็กเสริม T ก็จะไม่เกิดขึ้น ($M=0, C=0, T=0$) เมื่อมีโมเมนต์ภายนอกค่อยๆ เพิ่มขึ้น ค่า C และ T ก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยที่ระยะห่างระหว่าง C กับ T ไม่เปลี่ยนแปลง (แกนของแรงคู่ควบ คือ jd มีค่าคงที่) ดูรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แรงคู่ควบ C-T และแขนงของโมเมนต์ jd ในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (C และ T เปลี่ยนแปลงแต่ jd คงที่)

ในคอนกรีตอัดแรงดังรูปที่ 4.4 เหล็กเสริมอัดแรงได้ถูกติดตั้งตั้งแต่แรก แม้ยังไม่มีโมเมนต์ภายนอกมากกระทำ ดังนั้นแรงอัดในคอนกรีต C และแรงดึงในเหล็กเสริม T ก็มีค่าตั้งแต่แรก ($M=0, C \neq 0, T \neq 0$) แต่เนื่องจากโมเมนต์ภายในต้องมีค่าเท่ากับโมเมนต์ภายนอก ดังนั้นขณะที่ไม่มีโมเมนต์ภายนอก ระยะระหว่าง C กับ T จึงต้องเป็นศูนย์ ($z=0$) เพื่อให้โมเมนต์ภายในมีค่าเป็นศูนย์ด้วย เมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า z จะเพิ่มขึ้นตาม (ตำแหน่งของแรง C จะสูงขึ้น) โดยที่ค่า C กับ T จะโดยประมาณแล้วคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง (จริงๆแล้วมีการเปลี่ยนแปลงบ้างแต่น้อยมาก ไม่ต้องนำมาพิจารณาก็ได้)

ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยหลักการแรงคู่ควบภายในนี้ เมื่อรู้ค่า T ค่า z ก็จะสามารถคำนวณได้นั่นก็คือ ตำแหน่งของแรง C จะสามารถกำหนดได้ เมื่อรู้ขนาดและตำแหน่งของแรง C ก็สามารถหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดที่ตำแหน่งใดๆได้



รูปที่ 4.4 แรงคู่ควบ C-T และแกนของโมเมนต์ z ในคอนกรีตอัดแรง (C และ T คงที่แต่ z เปลี่ยนแปลง)

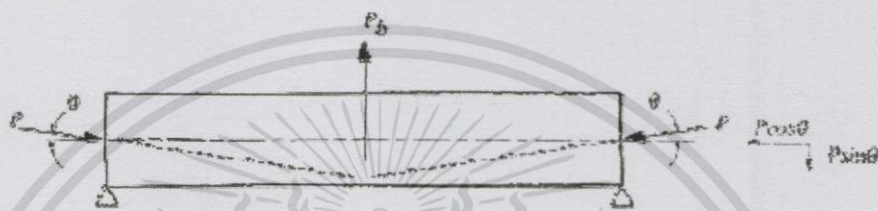
4.3 หลักการแรงพุงเพื่อดำเนินงานน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอก (load balancing concept)

หลักการนี้พิจารณาการอัดแรงเป็นการทำเพื่อผลการดำเนินงานน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกโดยพิจารณาจากแรงกระทำทั้งหมดของเหล็กเสริมอัดแรงต่อคานทั้งระบบ แรงกระทำที่เกิดจากเหล็กเสริมอัดแรงได้แก่ แรงกระทำที่ปลายคาน และนอกจากนี้ เหล็กเสริมอัดแรงที่ตำแหน่งใดมีการหักงอ ณ ตำแหน่งนั้นจะเกิดแรงแนวตั้งกระทำต่อคานด้วย ขอให้พิจารณารูปที่ 4.5

ผลของการหักงอของเหล็กเสริมอัดแรงจะก่อให้เกิดแรงพุงแนวตั้ง (balancing load) P_b ขึ้น ถ้ามองเสมือนว่า แรงพุงที่เกิดขึ้นและแรงกระทำที่ปลายคานเป็นแรงกระทำภายนอก ดังนั้น จากสมดุลของแรงจะได้ว่า P_b มีค่าเท่ากับ แรงแนวตั้งที่กระทำที่ปลายคานทั้งสองข้างรวมกัน



รูป 4.4 คานกอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมแรงหักมุมตรงกึ่งกลางช่วงคาน



รูป 4.5 แรงพยุ้งของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมแรงหักมุมตรงกึ่งกลางช่วงคาน

(ค) โมเมนต์ที่ขึ้นกับค่าความสูงของคาน (P_b) ของคานเหล็กเสริมหักมุมตรงกึ่งกลาง (ค) และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงพยุ้ง P ในรูป (ข)

รูปที่ 4.5 แรงพยุ้งของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมแรงหักมุมตรงกึ่งกลางช่วงคาน

$$P_b \equiv 2P \sin \theta = 2P \theta \quad (\text{เมื่อ } \theta \text{ เป็นมุมเล็กๆ}) \tag{4.7}$$

ที่บริเวณปลายคาน แรงที่เหล็กเสริมอัดแรงกระทำต่อคาน สามารถแตกแรงออกเป็นแรงแนวราบมีค่า $P \cos \theta$ หรือประมาณเท่ากับ P (θ เป็นมุมเล็กๆ ค่า $\cos \theta$ มีค่า ≈ 1) และแรงแนวตั้งมีค่า $P \sin \theta = P \theta$ หรือเท่ากับ $\frac{2Py}{L}$ (θ เป็นมุมเล็กๆ $\sin \theta = \tan \theta = \theta = \frac{y}{L/2}$)

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานเนื่องจากแรง P_b นี้ มีค่าเท่ากับ $\frac{P_b L}{4} = \frac{2P \sin \theta L}{4}$
 $= \frac{2P(2y/L)L}{4} = Py$ แผนภาพของโมเมนต์เนื่องจากแรง P_b จะมีลักษณะเหมือนรูป 4.5 (ค) ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

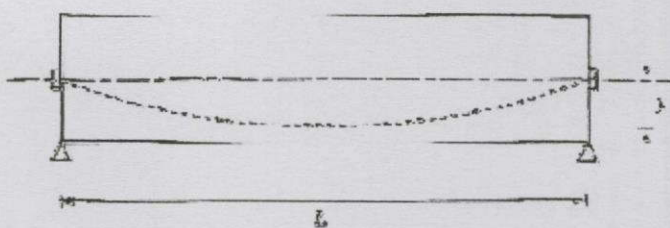
พิจารณาโมเมนต์เนื่องจากการเอียงศูนย์ (Pe) ค่าโมเมนต์เนื่องจากการเอียงศูนย์ที่ตำแหน่งใดๆ มีค่าเท่ากับแรง P คูณกับระยะเอียงศูนย์ e ณ ตำแหน่งนั้นๆ โมเมนต์เนื่องจากการเอียงศูนย์ที่ตำแหน่งใดๆ บนคานจึงมีลักษณะเหมือนรูปที่ 4.5 (ค) เช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถมองระบบอัดแรง ด้วยหลักการของแรงพยุ้งเพื่อดำเนินทานน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีของคานที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นรูปโค้งพาราโบลา ดังรูปที่ 4.6 (ก) โมเมนต์ที่เกิดจากการเอียงศูนย์ (Pe) จึงเป็นรูปทรงพาราโบลาด้วย ถ้าใช้หลักการที่ว่าโมเมนต์ที่เกิดจากแรงพยุ้ง (balancing load) ต้องเหมือนกับโมเมนต์เนื่องจากการเอียงศูนย์ (Pe) นั่นก็คือ โมเมนต์ที่เกิดจากแรงพยุ้งจึงควรเป็นรูปพาราโบลาด้วย ดังรูปที่ 4.6 (ค) ดังนั้นแรงพยุ้งจึงต้องมีลักษณะเป็นแรงพยุ้งชนิดแผ่ ดังรูปที่ 4.6 (ข) โดยค่าของ w_b หาได้จาก

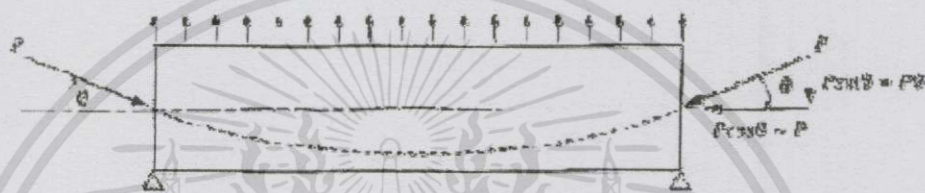
$$\text{โมเมนต์ที่กึ่งกลางช่วงคาน } M = Py = \frac{w_b L^2}{8} \quad (4.8)$$

$$w_b = \frac{8Py}{L^2} \quad (4.9)$$

ที่ปลายทั้งสองข้างของคานมีแรงกระทำแนวตั้งเนื่องจากการอัดแรง คือ $P \sin \theta$ ซึ่งแรง $P \sin \theta$ นี้จะถ่ายแรงโดยตรงลงสู่ที่รองรับตรงปลายคาน ดังนั้น $P \sin \theta$ จึงไม่ก่อให้เกิดแรงภายในและหน่วยแรงใดๆ ในคาน ในขณะที่แรงอีกส่วนหนึ่งคือ $P \cos \theta$ ก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดสม่ำเสมอ



(ต) ภาพของขั้วค้ำยันแรงเสียดทานที่ปลายค้ำยันเป็นรูปโค้งพาราโบลา



(ข) แรงกระทำบนคานเนื่องจากน้ำหนักเสียดทาน

$$M = Py = w_x L^2 / 8$$

(ค) โมเมนต์ขั้วค้ำยันเนื่องจากน้ำหนักเสียดทานเป็นรูปโค้งพาราโบลา

รูปที่ 4.6 แรงพยุ้งของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นรูปโค้งพาราโบลา

บนหน้าตัดตลอดทั้งคาน (ในรูปที่ 4.7 $P \sin \theta$ กระทำที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน) ถ้ามีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำกับคานด้วย จะสามารถคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคาน หรือการโก่งตัวที่จุดใดๆ จากระบบแรงทั้งหมดของ

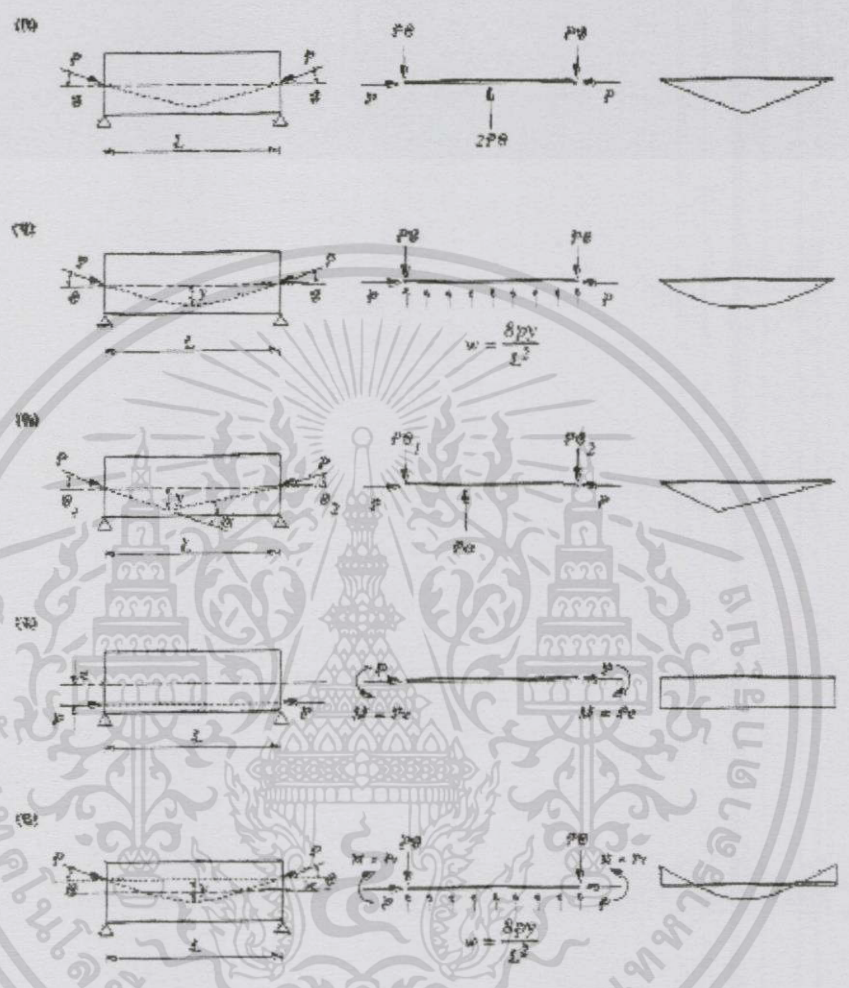
- 1) น้ำหนักบรรทุกภายนอก
- 2) แรงพยุ้ง
- 3) แรงที่ปลายคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่น้ำหนักรทุกภายนอก (รวมทั้งน้ำหนักของคาน) ถูกต้านโดยแรงพยางพืดและที่ปลายคานเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดคาน คานนั้นจะไม่มีภาระโก่งตัวเลยเพราะแรงกระทำแนวตั้งบนช่วงคานจะหักล้างกัน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจึงแต่ผลจากแรงอัดที่ปลายคาน $P \cos \theta$ ($\approx P$ สำหรับ θ เล็กๆ) ซึ่งเป็นหน่วยแรงอัดสม่ำเสมอมีค่าหน่วยแรงอัด $\sigma = \frac{A}{P}$ หลักการของแรงพยางเพื่อต้านทานน้ำหนักรทุกภายนอกนี้ จึงมีประโยชน์มากในการออกแบบเพื่อควบคุมการโก่งตัวขององค์อาคาร เพราะถ้าออกแบบให้แรงพยางมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับกับน้ำหนักรทุกภายนอก การโก่งตัวของคานก็จะมีค่าน้อยหรือไม่มีเลย

แรงพยางและแรงกระทำที่ปลายคาน เนื่องจากแนวเหล็กเสริมอัดแรงลักษณะต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ในรูปที่ 4.8 (ค) แนวเหล็กเสริมอัดแรงมีการหักมุม α ซึ่งจะทำให้เกิดแรงพยางในทิศขึ้นมีค่าเท่ากับ $P \alpha$ ในตำแหน่งที่มีการหักมุนั้น ในรูปที่ 4.8 (ง) ลักษณะแนวเหล็กเสริมอัดแรงเป็นเส้นตรงไม่มีการหักมุม จึงไม่มีแรงพยางเกิดขึ้นระหว่างช่วงคาน แต่มีแรงที่ปลายคาน คือ แรงอัด P และโมเมนต์ที่ปลายคานซึ่งมีค่าเท่ากับ Pe ส่วนในรูปที่ 4.8(จ) แนวเหล็กเสริมอัดแรงมีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลาคล้ายรูปที่ 4.8 (ข) ซึ่งมีระยะตกท้องข้าง (sag of parabola) y เท่ากัน แต่แนวเหล็กเสริมอัดแรงในรูปที่ 4.8 (จ) ยกสูงขึ้นแนวตั้งตลอดทั้งแนว โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางที่ปลายคาน = e ค่าแรงพยางที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงคานของรูปที่ 4.8 (ข) และ (จ) จะเท่ากัน แต่ในรูป 4.8 (จ) จะมีโมเมนต์ที่ปลายคาน $M = P \cos \theta \cdot e = Pe$ กระทำเพิ่มเติม

เปรียบเทียบโมเมนต์แรง
 แรงพยุลงระหว่างกลางและ
 โมเมนต์ที่เกิดจากการยึดแรง
 แรงกระทำที่ปลายตาม



รูปที่ 4.7 แรงพยุลงและโมเมนต์ที่เกิดจากแนวเหล็กเสริมอัดแรงลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์หน้าตัดภายใต้โมเมนต์ดัด

5.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยมีสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานะการใช้งาน ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ทฤษฎีอีลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานะการใช้งาน หน่วยแรงในคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการอัดแรง P มีค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง e และโมเมนต์ภายนอก M จะหาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (5.1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
 I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคอนกรีต
 y คือ ระยะระหว่างที่ตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้ เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตมักจะพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดเป็นหลัก ดังนั้นการคำนวณในหนังสือเล่มนี้จะใช้เครื่องหมาย (+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและใช้เครื่องหมายลบ (-) สำหรับหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานนี้ การวิเคราะห์ยังแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working stage)

ก) การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งแรงอัดที่ใช้คำนวณในขั้นตอนนี้จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กเสริมที่เกิดขึ้นทันทีทันใด P_i และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวเอง M_G เท่านั้น เพราะขณะที่ทำการถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกกระทำ ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ชั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e y}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \quad (5.2)$$

ข) การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก

ชั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขณะที่มีย้ำน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำ แรงอัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทั้งจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และที่เกิดขึ้นตามเวลา) P_e แรงนี้เรียกว่าแรงอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (รวมน้ำหนักตัวเองด้วย) M_T ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นในชั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e e y}{I} \pm \frac{M_T y}{I} \quad (5.3)$$

5.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง

การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรง กระทำขณะทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรง และหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริม เนื่องจากสาเหตุต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำเพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้นๆ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วยสถานะการใช้งานโดยที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

ก. สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรวมจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัด

แรง และการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต ที่อยู่โดยรวมเท่ากับการคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโค้งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอิลาสติคดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_s &= \Delta \varepsilon_c \\ \frac{\Delta \sigma_s}{E_s} &= \frac{\Delta \sigma_c}{E_c} \\ \Delta \sigma_s &= \frac{E_s}{E_c} \Delta \sigma_c = n \Delta \sigma_c = n \frac{My}{I}\end{aligned}\quad (5.4)$$

โดยที่ $\Delta \sigma_s$ คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโค้งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม
 M คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใดๆ
 n, I คือ อัตราส่วนโมดูลัส และโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด ตามลำดับ
 y คือ ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ e

จากสมการที่ 5.4 จะเห็นว่าหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ M สำหรับคานช่วงเดียวโมเมนต์ที่กึ่งกลางช่วงคานที่ค่ามากที่สุด ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะเปลี่ยนไปมากที่สุดที่กึ่งกลางช่วงคานและค่อยๆ เปลี่ยนแปลงน้อยลงจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยที่หน้าตัดบริเวณที่รองรับ

ข) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวแตกต่างไปจากระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบเนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง ดังนั้นสมการที่ 5.4 ไม่สามารถนำมาใช้กับการคำนวณหาหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว พิจารณาคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวของคานช่วยเดี่ยวดังรูปที่ 5.1 เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุก หน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่า ของคอนกรีตอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงระบบมีการยืดเหนียว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยแรงยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนียวนี้ก็จะกระจายไปตลอดคานเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนียวจะเฉลี่ยไปตลอดความยาวคาน ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กอัดแรง ΔL ก่อน โดยที่ ΔL นี้เท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน คือ

$$\Delta L = \int_0^L \epsilon_c dx = \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx$$

ค่าเฉลี่ยของหน่วยการยึดตัวหาได้จาก

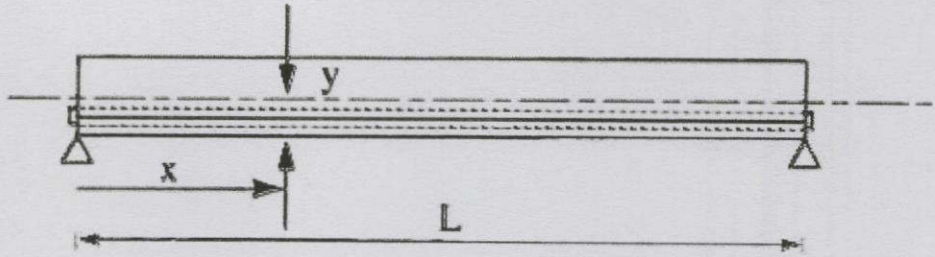
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{My}{E_{c0} I} dx$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหาได้จาก

$$\Delta \sigma_s = E_s \frac{\Delta L}{L} = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{My}{I} dx$$

(5.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ก่อนนำน้ำหนักบรรทุกกระทำ



(ข) หลังนำน้ำหนักบรรทุกกระทำ

รูปที่ 5.1 หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

5.3 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (cracking moment)

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุด เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าวก็คือ ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) จากสมการที่ 5.1 หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว หาได้จาก

$$\sigma_s = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I} \quad (5.6)$$

ถ้าคอนกรีตถูกพิจารณาเริ่มแตกร้าว จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-f_r = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{M_{cr}c_b}{I}$$

$$M_{cr} = Pe + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b} \quad (5.7)$$

โดยที่ M_{cr} คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว
 r คือ โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต

คราวนี้ขอให้พิจารณาอีกแง่หนึ่ง ถ้าให้ M_1 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่ 5.6 แทนค่า $\sigma_c = 0$ จะได้ว่า

$$0 = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{M_1 c_b}{I}$$

$$M_1 = Pe + \frac{PI}{Ac_b} = P\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \quad (5.8)$$

โดยที่ M_1 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์
 r คือ รัศมีจายเรชั่นของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ

คอนกรีตสามารถรับหน่วยแรงดึงเท่ากับ f_r ถ้าให้ M_2 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเป็น f_r โดยทฤษฎีอิลาสติกสามารถหาค่าโมเมนต์ M_2 ได้จาก

$$\sigma_c = \frac{M_2 c_b}{I}$$

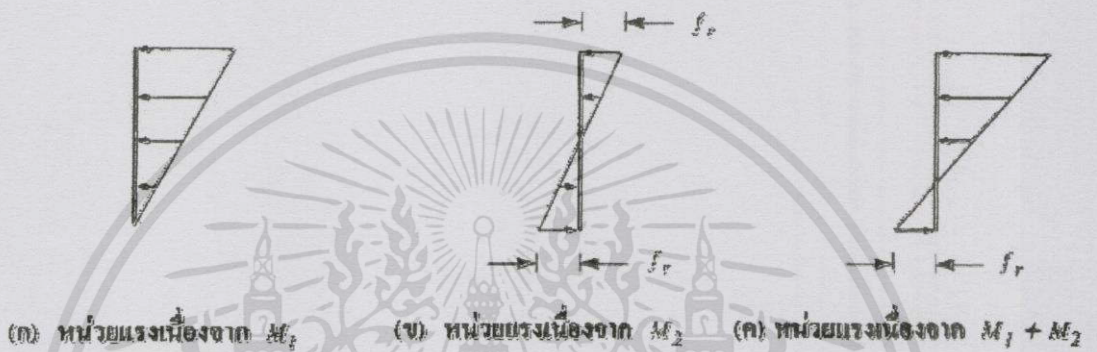
$$f_r = \frac{M_2 c_b}{I}$$

ดังนั้น $M_2 = \frac{f_r I}{c_b} \quad (5.9)$

โดยที่ M_2 คือ โมเมนต์ที่คอนกรีตคอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก f_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 5.7-5.9 จะได้ว่า $M_{cr} = M_1 + M_2$ โดยที่ M_1 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ที่กระทำมีค่าเท่ากับ M_1 สำหรับ M_2 คือ ค่าโมเมนต์ที่คานสามารถรับได้เพิ่มเติมเนื่องจากการที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับโมดูลัสของการแตกหักหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2

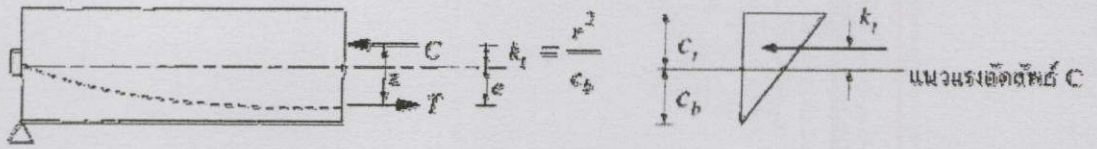


รูปที่ 5.2 โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

5.4 จุดเคิร์นบนและล่าง (top and bottom kern point)

เพื่อที่จะให้เกิดความเข้าใจในคอนกรีตอัดแรงมากยิ่งขึ้น จึงควรรู้จักตำแหน่งของจุดเคิร์นบน (top kern point) และจุดเคิร์นล่าง (bottom kern point) นิยามของจุดเคิร์นบนคือตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตที่ทำให้หน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีตเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างเป็นศูนย์ ส่วนจุดเคิร์นล่าง คือ ตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตที่ทำให้หน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีตเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งของแรงอัดสัณทึ C ที่จุดเคิร์มบน



(ข) ตำแหน่งของแรงอัดสัณทึ C ที่จุดเคิร์มล่าง

รูป 5.3 จุดเคิร์มบนและจุดเคิร์มล่างของคานคอนกรีตอัดแรง

ในหลักการแรงคู่ควบภายในซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 โมเมนต์ภายนอกจะถูกต้านทานโดยโมเมนต์ภายในซึ่งเกิดจากแรงคู่ควบ C-T ตำแหน่งของแรงอัดสัณทึ C ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างเป็นศูนย์ แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 (ก) และในทำนองเดียวกัน ตำแหน่งของแรงอัดสัณทึ C ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนเป็นศูนย์ แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 (ข) จากสมการที่ 5.1 และจากนิยามของจุดเคิร์มบน

หน่วยแรงที่ผิวล่างของคอนกรีต

$$0 = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I}$$

$$M = Pe + \frac{PI}{Ac_b} = P\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \quad (5.10)$$

เนื่องจากโมเมนต์ภายนอกจะถูกต้านโดยโมเมนต์ภายในเท่ากับ $C \cdot z = T \cdot z = P \cdot z$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P \cdot z = P \left(e + \frac{r^2}{c_b} \right)$$

แขนของโมเมนต์คู่ควบ $z_t = e + \frac{r^2}{c_b} = e + k_t$ (5.11)

โดยที่ k_t คือ ระยะเคิร์นบนซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานถึงจุดเคิร์นบน $= \frac{r^2}{c_b}$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 5.1 และจากนิยามของจุดเคิร์นล่าง

หน่วยแรงที่ผิวบนของคอนกรีต

$$0 = \frac{P}{A} - \frac{Pec_t}{I} + \frac{Mc_t}{I}$$

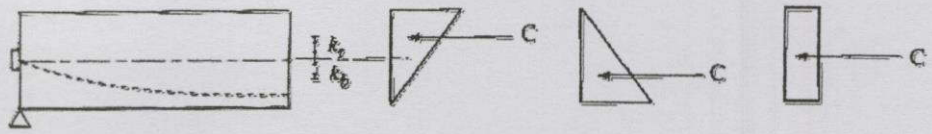
$$M = \frac{Pe - \frac{PI}{Ac_t}}{c_t} = P \left(e - \frac{r^2}{c_t} \right)$$
 (5.12)

แขนของโมเมนต์คู่ควบ $z_b = e + \frac{r^2}{c_t} = e + k_b$ (5.13)

โดยที่ k_b คือ ระยะเคิร์นล่างซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานถึงจุดเคิร์นล่าง $= \frac{r^2}{c_t}$

จากนิยามของจุดเคิร์นบนและจุดเคิร์นล่างสามารถอธิบายได้อีกความหมายหนึ่งคือ จุดเคิร์นบนและจุดเคิร์นล่าง คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามลำดับของแรงอัดลัพท์ C โดยที่ค่าแรงอัดลัพท์ C ยังอยู่ภายในขอบเขตนี้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตก็จะมีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นเลย ถ้าแรงอัดลัพท์ C อยู่สูงกว่าจุดเคิร์นบนก็จะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีตที่ผิวล่างและถ้าแรงอัดลัพท์ C อยู่ต่ำกว่าจุดเคิร์นล่าง ก็จะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน (ดูรูปที่ 5.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



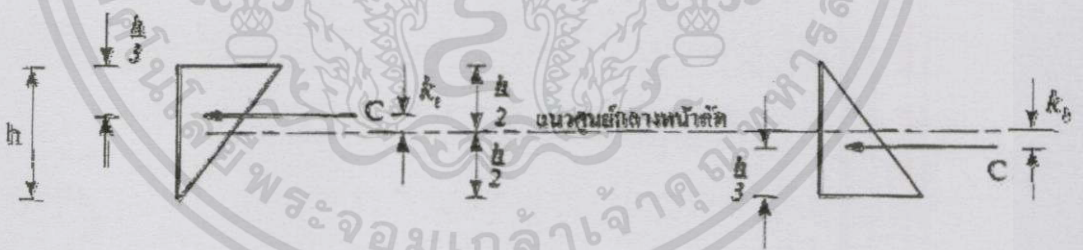
(ด) C อยู่ที่จุดเคิร์นบน (ข) C อยู่ที่จุดเคิร์นล่าง (ค) C อยู่ที่ศูนย์กลางหน้าตัด



(ง) C อยู่ต่ำกว่าจุดเคิร์นบนแต่สูงกว่าศูนย์กลางหน้าตัด (ข) C อยู่สูงกว่าจุดเคิร์นล่างแต่ต่ำกว่าศูนย์กลางหน้าตัด (ค) C อยู่สูงกว่าจุดเคิร์นบน (ข) C อยู่ต่ำกว่าจุดเคิร์นล่าง

รูปที่ 5.4 หน่วยแรงในคอนกรีตกับตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C

ในกรณีของคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จุดเคิร์นบนและจุดเคิร์นล่างสามารถหาได้จากตำแหน่งเซนทรอยด์ (centroid) ของสามเหลี่ยมเพราะตำแหน่งแรงอัดลัพท์ C ของหน่วยแรงรูปสามเหลี่ยมจะอยู่ที่เซนทรอยด์ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 k_a และ k_b ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากรูปที่ 4.8
$$k_a = k_b = \frac{h}{2} - \frac{h}{3} = \frac{h}{6} \tag{5.14}$$

จาก $k_a = k_b = \frac{r^2}{c} = \frac{I}{Ac} = \frac{\frac{1}{12}bh^3}{(bh)(h/2)} = \frac{h}{6}$ เท่ากับที่หาได้จากสมการที่ 5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง

สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่โครงสร้างสามารถรับได้จะต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าโครงสร้างเกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่ตามมาจะรุนแรงและค่าใช้จ่ายของความเสียหายก็สูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกันไปกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตาม

การออกแบบให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้ในสถานการณ์ใช้งานก็ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

5.5.1 สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ตัดประลัย

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ตัดประลัยขององค์อาคารที่ใ้ช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

ก. การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรงกล่าวคือ หน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแกนสะเทิน

ข. คอนกรีตไม่รับแรงดึง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาการคำนวณ

ค. ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปหลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กำลังอัดประลัยของคาน คือ หลักการแรงคู่ควบภายใน (ดูหัวข้อ 4.2) ในช่วงสถานการณ์ใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่ในคอนกรีตอัดแรง แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าคงที่แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น แต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามโมเมนต์ภายนอกที่เพิ่มขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนเลยช่วงสถานะใช้งาน การแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ตอนนี้แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไป แรงคู่ควบ C-T จะมีเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะเริ่มเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น จนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป จนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์ตัดประลัย คานก็ถึงจุดวิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด (Crushing) มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยการหัดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัยการวิบัติขององค์อาคารแบ่งเป็น 2 ประเภท คือการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (compress failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเริ่มต้นโดยการที่การยืดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (การคลากของเหล็กเกิดขึ้น) และวิบัติในที่สุดเมื่อคอนกรีตอัดระเบิด การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลง (under-reinforcement) ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะอัดระเบิด ขณะที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคลาก ดังนั้น การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักนี้ องค์อาคารจะวิบัติขณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมก็ยังยืดไม่มากการวิบัติชนิดนี้จึงมีลักษณะเปราะ (brittle) และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุลง (over-reinforcement)

5.5.2 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม (equivalent rectangular concrete stress distribution)

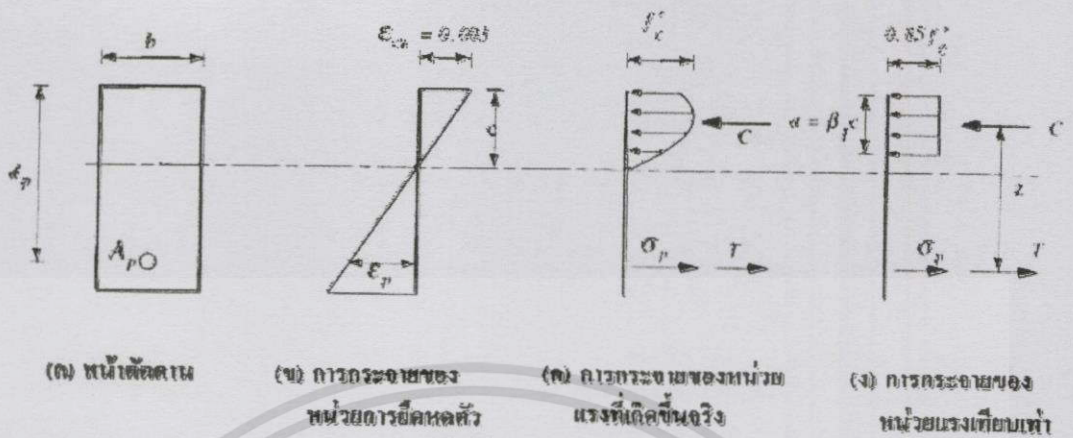
การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยแสดงไว้ในรูปที่ 5.6 ที่สถานะประลัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นเห็นได้ว่า

ในขณะที่การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทินดังรูป 5.6 (ข) การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่เหนือแกนสะเทินจะมีลักษณะเส้นโค้งดังรูป 5.6 (ค) เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้น การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งจึงถูกแทนที่โดยการกระจายของหน่วยแรงอัดเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูป 5.6 (ง) รูปสี่เหลี่ยมที่เทียบเท่านี้ ใช้หลักการของการที่แรงอัดลัพธ์ C ในคอนกรีตจะต้องมีค่าเท่าเดิม และตำแหน่งของแรงอัดลัพธ์ C คืออยู่ในตำแหน่งเดิม ดังนั้นพื้นที่ภายในรูปสี่เหลี่ยมของรูป 5.6 (ง) จึงต้องมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในรูปโค้งของรูป 5.6 (ค) และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ระดับเดียวกัน มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดให้ความกว้างของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่ามีค่าเท่ากับ $0.85f'_c$ และความสูงของรูปสี่เหลี่ยม a มีค่าเท่ากับ β_1c ดังรูป 5.6 (ง) โดยที่ c เป็นระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัดและค่า β_1 เป็นตัวแปรที่หาได้จาก

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{เมื่อ} \quad f'_c \leq 300 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (5.15)$$

$$\beta = 0.85 - 0.0008(f'_c - 300) \geq 0.65 \quad \text{เมื่อ} \quad f'_c \geq 300 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (5.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 การกระจายของหน่วยยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย

5.5.3 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย

การออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย ต้องออกแบบให้การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยืดตัวเกินจุดคานงไปแล้วองค์อาคารจะมีการโก่งตัวมาก่อนเกิดการวิบัติซึ่งการวิบัติลักษณะเช่นนี้มีความเหนียว (ductility) การออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีเกณฑ์สมมูลไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดคานงที่แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิภักของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล ไว้ดังต่อไปนี้

$$\omega_p$$

$$\omega_p + (\omega - \omega') \frac{d}{d_p} \leq 0.36\beta_1 \tag{5.17}$$

$$\omega_{pw} + (\omega_w - \omega'_w) \frac{d}{d_p}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	ω_p	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมอัดแรง	$= \rho_p f_{ps} / f'_c$
	ω	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง	$= \rho f_y / f'_c$
	ω'	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด	$= \rho' f_y / f'_c$
	ρ_p	คือ	อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง	$= A_{ps} / bd_p$
	ρ	คือ	อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง	$= A_s / bd$
	ρ'	คือ	อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด	$= A'_s / bd$
	d_p	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.	
	d	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.	
	b	คือ	ความกว้างของคาน, ซม.	
	A_{ps}	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม. ²	
	A_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม. ²	
	A'_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด, ซม. ²	
	f_{ps}	คือ	หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ, กก./ซม. ²	
	f_y	คือ	กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา, กก./ซม. ²	
$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$		คือ	ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีกเช่น รูปตัว T และ I คำนวณเช่นเดียวกับ ω_p, ω และ ω' ตามลำดับ แต่ความกว้าง b ที่ใช้เป็นความกว้างของตัวแกนและปริมาณเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น	

สำหรับค่า f_{ps} คือหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ณ สถานะประลัย โดย f_{ps} สามารถคำนวณได้โดยใช้พื้นฐานของความสอดคล้องของหน่วยการยึดหดตัว ในกรณีที่หน่วยแรงดึงประสิทธิผลมีค่าไม่น้อยกว่า $0.5 f_{pu}$ สามารถใช้ค่า f_{ps} โดยประมาณดังต่อไปนี้

ก) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon)

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (5.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ r_p คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังต่อไปนี้

0.40 เมื่อ $0.85 \leq f_{py} / f_{pu} < 0.90$

0.28 เมื่อ $f_{py} / f_{pu} \geq 0.90$

f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง , กก./ซม.²

เมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดในการคำนวณ f_{ps} ในสมการที่ 5.18 (หมายถึงถ้าการคำนวณสมการที่ 4.18 มีพจน์ของ ω' ร่วมอยู่ด้วย) ค่าต่อไปนี้จะต้องเป็นไปตามสมการที่ 5.19 และ 5.20

$$\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \geq 0.17 \quad (5.19)$$

และ $d' \leq 0.15d_p \quad (5.20)$

ถ้า $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] < 0.17$ การคำนวณหาค่า f_{ps} ในสมการที่ 5.18 ให้แทนค่า ω' ด้วยศูนย์

ข) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \quad (5.21)$$

โดยที่ f_{se} คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง , กก./ซม.²

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 5.21 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se} + 4000$ กก./ซม.²

ค) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยวและมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกินกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \quad (5.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 5.22 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se} + 2000$ กก./ซม.2

5.5.4 โมเมนต์ดัดประลัย

โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง หาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C-T ที่สถานะประลัย ซึ่งที่สถานะประลัยนี้แรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต C หาได้จากการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม และแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T หาได้จาก โดยที่ f_{py} หาได้จากสมการที่เสนอโดยมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.5.3 และปริมาณเหล็กเสริมจะต้องน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลกล่าวคือ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 5.17

$$\text{จากรูปที่ 5.9 จะได้ว่า } C = 0.85 f'_c ab \quad (5.23)$$

$$T = A_{ps} f_{ps}$$

เนื่องจากแรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต C จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T ดังนั้น

$$\begin{aligned} C &= T \\ 0.85 f'_c ab &= A_{ps} f_{ps} \\ a &= \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f'_c b} \end{aligned} \quad (5.24)$$

โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด หรือบางที่เรียกว่า กำลังระบุของโมเมนต์ (nominal strength) M_n สามารถหาได้จาก

$$M_n = C \cdot z = T \cdot z = C(d_p - \frac{a}{2}) = T(d_p - \frac{a}{2}) \quad (5.25)$$

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอตัวคูณกำลัง (strength reduction factor) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ (required strength) M_u ดังแสดงไว้ในสมการที่ 5.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi M_n \geq M_u \tag{5.26}$$

โดยที่ $\phi = 0.9$ (จากตารางที่ 3.5)

คอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) จะมีโมเมนต์ดัดประลัยน้อยกว่าในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon) เหตุผลหนึ่งที่สำคัญคือ ในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว เมื่อเกิดรอยแตกกว้างขึ้นจำนวนรอยแตกกว้างจะมีน้อยกว่าขนาดของรอยแตกกว้างจะใหม่กว่าในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว รอยแตกกว้างในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวมีการกระจายที่ดีกว่าทำให้รอยแตกกว้างมีขนาดเล็ก รอยแตกกว้างที่ใหญ่จะทำให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่ามาที่หน้าตัดที่เกิดรอบแตกกว้าง ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวจึงมีค่าลดลง

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดให้เพิ่มเหล็กเสริมธรรมดาสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยวไม่น้อยกว่า ค่าต่อไปนี้

$$A_s = 0.004A \tag{5.27}$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดา
 A คือ พื้นที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวด้านที่เกิดหน่วยแรงดึงเนื่องจากโมเมนต์ดัด

นอกจากนี้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. 2537 ได้กำหนดให้กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ ϕM_n ต้องน้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกกว้าง ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดหลังจากเกิดการแตกกว้าง เพราะการโก่งตัวขององค์อาคารจะเกิดมากขึ้นหลังจากมีการแตกกว้างเกิดขึ้น โดยปกติต้องออกแบบให้องค์อาคารโก่งตัวให้มากพอเพื่อเป็นสัญญาณเตือนให้รู้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยควรมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกกว้างให้เพียงพอ

$$\phi M_n \geq 1.2M_{cr} \tag{5.28}$$

โดยที่ M_{cr} คำนวณจากการให้โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

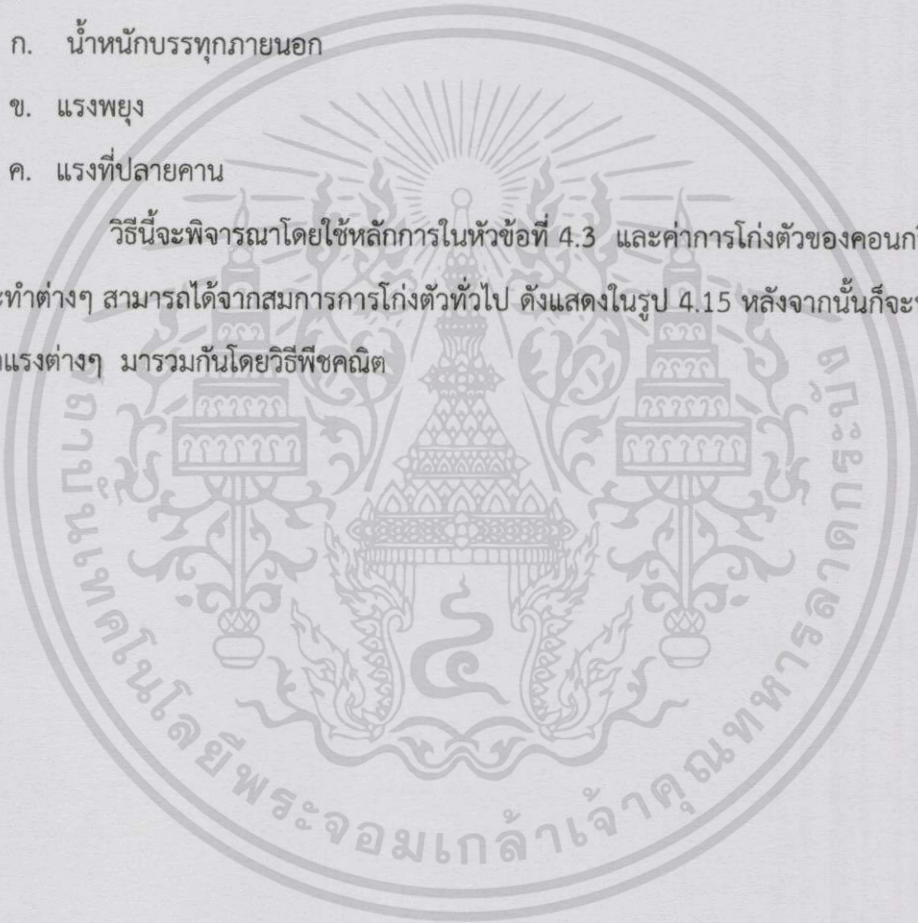
5.6 การโก่งตัว (deflection)

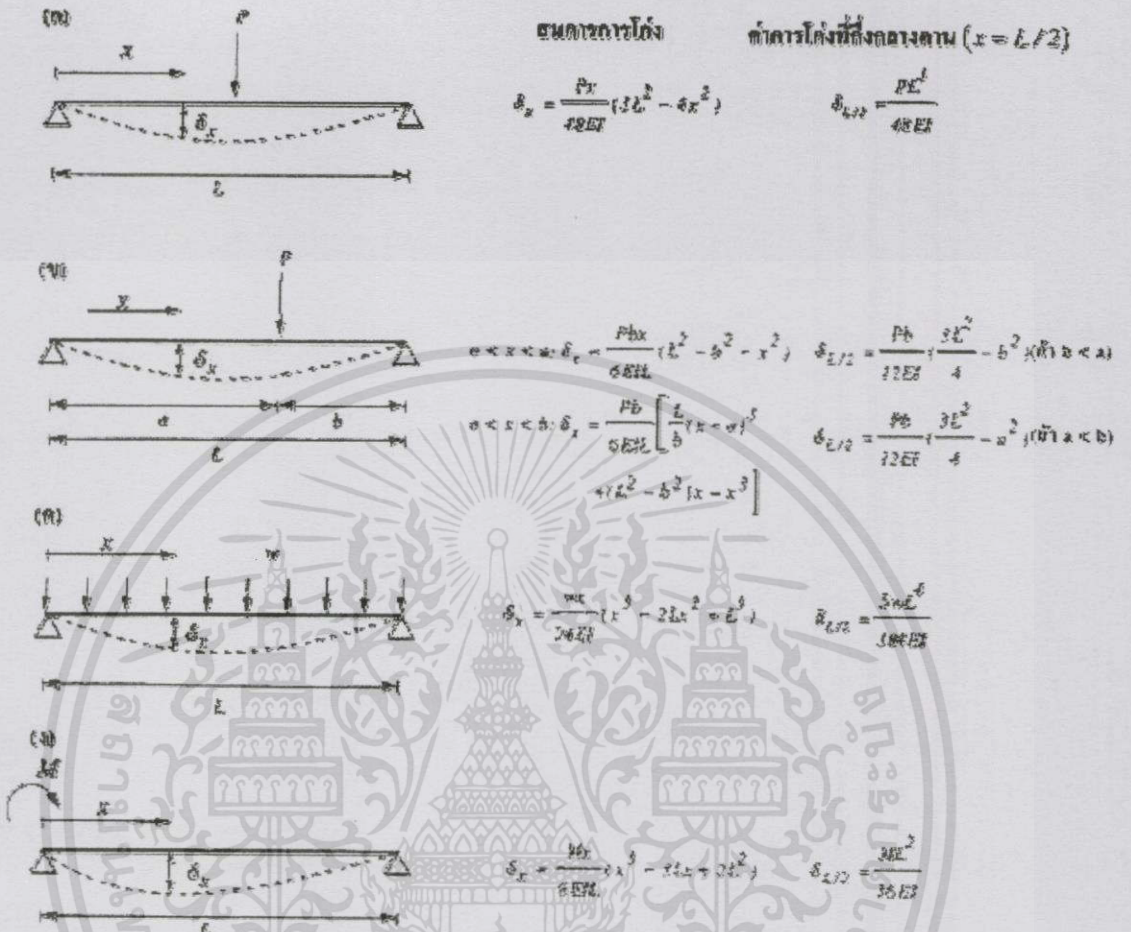
5.6.1 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นทันทีของหน้าตัดที่ไม่แตกร้าว

การคำนวณหาค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตอัดแรงสามารถทำได้โดยพิจารณาคอนกรีตเป็นแผนภาพอิสระ (freebody) แล้วพิจารณาค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากแรงต่างๆ ที่กระทำคอนกรีตซึ่งได้แก่

- ก. น้ำหนักบรรทุกทุกภายนอก
- ข. แรงพยุ่ง
- ค. แรงที่ปลายคาน

วิธีนี้จะพิจารณาโดยใช้หลักการในหัวข้อที่ 4.3 และค่าการโก่งตัวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำต่างๆ สามารถได้จากสมการการโก่งตัวทั่วไป ดังแสดงในรูป 4.15 หลังจากนั้นก็นำค่าการโก่งตัวจากแรงต่างๆ มารวมกันโดยวิธีพีชคณิต





รูปที่ 5.7 ค่าการโก่งตัวของคานสำหรับแรงกระทำต่างๆ

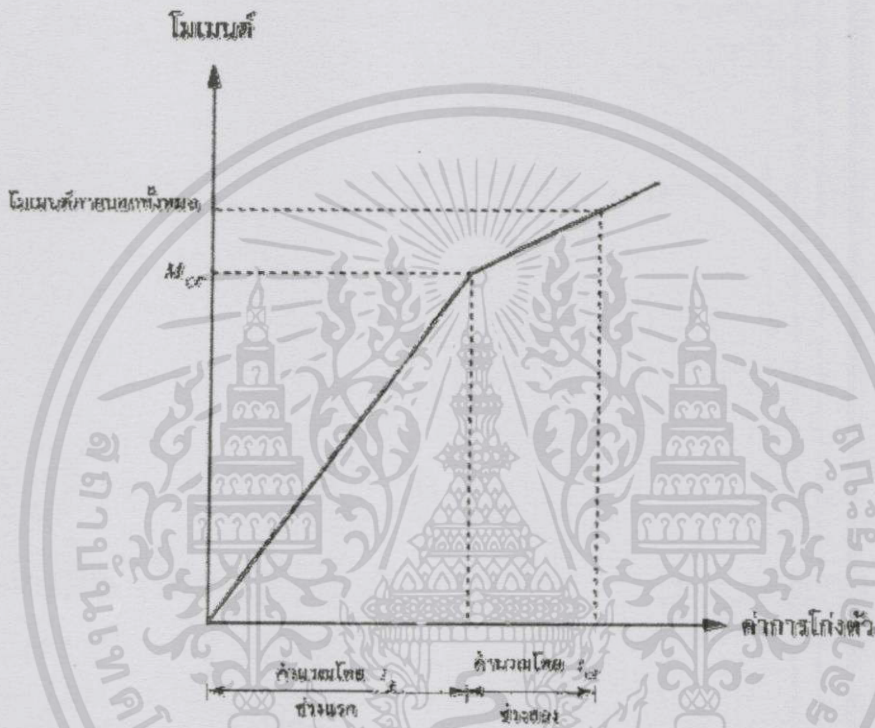
5.6.2 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นทันทีที่หน้าตัดที่แตกร้า

ในคอนกรีตอัดแรงเมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนหน่วยแรงดึงในคอนกรีตเกิดขึ้นเกิน $2.0\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.² การแตกร้าจะเกิดขึ้นในคอนกรีตค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคอนกรีตจะลดลง จากเดิมซึ่งใช้โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคานทั้งหมด I_g จะกลายเป็นโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดที่แตกร้า I_{cr} ดังนั้นค่าการโก่งตัวของคานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อการแตกร้าในคานเกิดขึ้น

การคำนวณค่าการโก่งตัวของหน้าตัดที่แตกร้า จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกคือ การคำนวณค่าการโก่งตัวก่อนที่หน้าตัดจะแตกร้า ในช่วงนี้ใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดคานทั้งหมด I_g ในการคำนวณ ช่วงที่สองคือ การคำนวณค่าการโก่งตัวเพิ่มเติมหลังจากการร้าวเกิดขึ้น เพื่อนำไปรวมกับค่าการโก่งตัวที่คำนวณได้จากช่วงแรก ในช่วงที่สองนี้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียที่ใช้ในการคำนวณ คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดที่แตกร้าว I_{cr} ดังรูปที่ 5.8 ค่า I_{cr} สามารถใช้สมการที่เสนอไว้ใน PCI design handbook ดังนี้



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการโก่งตัว

5.6.3 การโก่งตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าการโก่งตัวของคานเกิดขึ้นจากผลของการอัดแรง น้ำหนักของคาน น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม และน้ำหนักบรรทุกจร แรงที่กระทำต่อคานต่างๆ เหล่านี้ ยกเว้นน้ำหนักบรรทุกจรเป็นแรงกระทำถาวรที่กระทำต่อคาน ซึ่งทำให้เกิดการคืบในคอนกรีตมีผลทำให้เกิดการโก่งตัวมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงมีผลต่อแรงดึงในเหล็กเสริม ทำให้ลดแรงพุงลงไปอีก การโก่งตัวในระยะยาวจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้น้ำหนักบรรทุกภายนอกจะมีค่าคงที่ก็ตาม การคำนวณการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาวไม่สามารถ

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวคูณเพื่อคำนวณการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว (จาก PCI design handbook)

	ค่าตัวคูณ	
	พื้นที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน	พื้นที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน
หลังจากถ่ายแรงไประยะหนึ่งแต่ยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกภายนอก		
1. ส่วนการโก่งตัวลง เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (เอาค่าตัวคูณไปคูณกับการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเองขณะถ่ายแรง)	1.85	1.85
2. ส่วนของการโก่งขึ้น เนื่องจากการอัดแรง (เอาค่าตัวคูณไปคูณกับการโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรงขณะถ่ายแรง)	1.80	1.80
หลังจากรับน้ำหนักบรรทุกภายนอก		
3. ส่วนของการโก่งลง เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (เอาตัวคูณไปคูณกับค่าการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเองขณะถ่ายแรง)	2.70	2.40
4. ส่วนของการโก่งขึ้น เนื่องจากการอัดแรง (เอาค่าตัวคูณไปคูณกับค่าการโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรงขณะถ่ายแรง)	2.45	2.20
5. ส่วนของการโก่งลง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (เอาค่าตัวคูณไปคูณกับค่าการโก่งตัวเนื่องจากน้ำหนักคงที่เพิ่มเติมเท่านั้น)	3.00	3.00
6. ส่วนของการโก่งลงเนื่องจากพื้นที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับคาน (เอาค่าตัวคูณไปคูณกับค่าการโก่งตัวเนื่องจากพื้นที่หล่อเพิ่มเติมเท่านั้น)	-	2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำได้อย่างแม่นยำเพราะ การคืบของคอนกรีตและการคลายแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงสามารถ คำนวณได้เพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น

วิธีที่จะคำนวณการโก่งตัวที่เกิดขึ้นระยะยาว สามารถทำได้โดยประมาณโดยการใช้ตัวคูณซึ่งได้ พิจารณาผลของการคืบ การคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงและอื่นๆ ไว้แล้วที่ระยะเวลายาวช่วงหนึ่ง ค่าตัวคูณนี้แสดงไว้ใน PCI design handbook ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ค่าตัวคูณจะขึ้นอยู่กับชนิดของ แรงที่กระทำเกิดการโก่งตัวและขึ้นอยู่กับว่าเป็นช่วงติดตั้งหรือช่วงรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกนั้นอาจใช้ เวลาเป็นเดือน การโก่งตัวก็เปลี่ยนไปด้วยนอกจากนี้ค่าตัวคูณยังขึ้นอยู่กับพื้นที่อยู่เหนือคานหล่อเป็น เนื้อเดียวกับคานหรือไม่ เพราะพื้นที่ส่วนนี้จะช่วยในการรับแรงด้วยในลักษณะคอมโพสิต การคำนวณ จะต้องแยกค่าการโก่งตัวจากแรงที่กระทำแต่ละอย่างออกแล้วคูณด้วยค่าตัวคูณ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 หลังจากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดมารวมกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

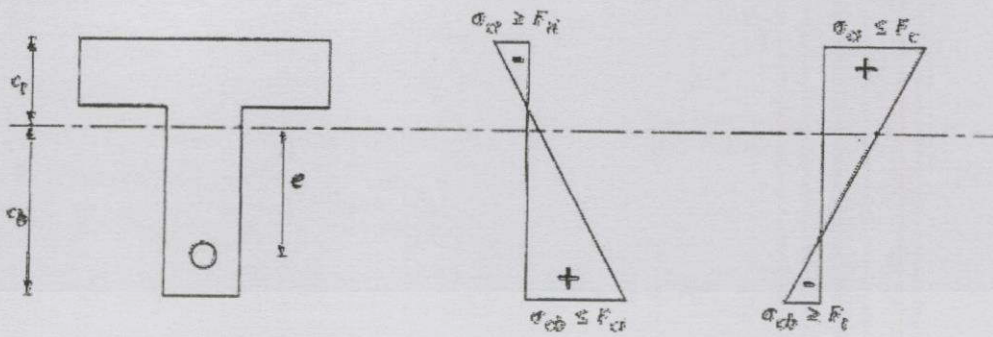
การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด

การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด สามารถออกแบบได้ 2 วิธี คือ การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก ซึ่งเป็นการออกแบบในสถานะใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ การออกแบบเน้นคุณสมบัติทางด้านการใช้งาน การออกแบบอีกวิธีหนึ่ง คือ การออกแบบโดยทฤษฎีกำลังประลัย ซึ่งเป็นการออกแบบที่จะป้องกันการวิบัติอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกมาเกินไป การออกแบบเน้นความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างโดยปกติถ้าเลือกวิธีการออกแบบในวิธีหนึ่ง ก็จะวิเคราะห์ตรวจสอบการยอมรับได้ของอีกวิธีหนึ่ง ที่ต้องทำอย่างนี้ก็เพราะว่า การออกแบบด้วยวิธีหนึ่งไม่ได้มีหลักประกันว่าตรวจสอบของอีกวิธีหนึ่งจะยอมรับได้เสมอไป เช่น ถ้าเลือกออกแบบโดยวิธีอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงในช่วงใช้งานจะยอมรับได้แต่ไม่ได้หมายความว่า เมื่อวิเคราะห์ตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัดนั้น จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเกินได้อย่างปลอดภัยเพียงพอ หรือในทางกลับกันถ้าเลือกออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยแล้ว ก็ไม่แน่ว่าหน่วยแรงที่สถานะใช้งานจะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

ในบทนี้เลือกวิธีการออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก หลังจากได้หน้าตัดและเหล็กเสริมอัดแรงแล้วก็ จะตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัด ถ้ากำลังของหน้าตัดมีค่ามากกว่ากำลังที่ต้องการหน้าตัดที่ออกแบบนั้นก็ได้ แต่ถ้าน้อยกว่าจะออกแบบเสริมเหล็กไม่อัดแรง (non-prestressed steel) เพิ่มเติมเข้าไปในหน้าตัดเพื่อเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัด

6.1 การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก

การออกแบบโดยวิธีนี้จะออกแบบไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ทั้งในขณะถ่ายแรงและขณะรับน้ำหนักบรรทุก



(ก) หน้าตัดคาน

(ข) หน่วยแรงขณะถ่ายแรง (ค) หน่วยแรงขณะรับน้ำหนักบรรทุก

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e y}{I} \pm \frac{M_G y}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{P e y}{I} \pm \frac{M_T y}{I}$$

รูปที่ 6.1 หน่วยแรงในคอนกรีต

ขณะถ่ายแรง

สำหรับคานช่วงเดียวโดยทั่วไปผลของแรงอัด P_i ขณะถ่ายแรงจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวล่างของคานมากกว่าผิวบน ซึ่งผิวบนหน่วยแรงอัดอาจจะน้อย หรือกลายเป็นหน่วยแรงดึงไปเลยดังรูปที่ 6.1 ข. แต่อย่างไรก็ดีขณะถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน σ_{ct} และล่าง σ_{cb} ต้องมีค่าไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ดังนั้นหน่วยแรงที่ผิวบนของคานจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ F_{ti} โดยที่ F_{ti} คือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (พิจารณาเครื่องหมายด้วยโดย F_{ti} มีเครื่องหมาย -) และในขณะเดียวกันหน่วยแรงที่ผิวล่างของคาน ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ F_{ci} โดยที่ F_{ci} คือ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (F_{ci} มีเครื่องหมาย +)

จากสมการ
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{P e y}{I} \pm \frac{M y}{I}$$

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบน
$$\sigma_{ct} = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e c_t}{I} \pm \frac{M_G c_t}{I} \geq F_{ti}$$

จัดรูปใหม่
$$F_{ti} = \frac{P_i}{A} \left(1 - \frac{A e}{Z_t} \right) + \frac{M_G}{Z_t} \tag{6.1}$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน

A คือ พื้นที่ของหน้าตัดคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_i คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจากถ่ายแรง
 e คือ ระยะเยื้องศูนย์กลาง
 M_G คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคาน
 Z_t คือ โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวบนสุดของคาน
 ในทำนองเดียวกัน หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างขณะถ่ายแรง

$$\sigma_{cb} = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e c_b}{I} \pm \frac{M_G c_b}{I} \leq F_{ci}$$

จัดรูปใหม่

$$F_{ci} = \frac{P_i}{A} \left(1 + \frac{Ae}{Z_t} \right) - \frac{M_G}{Z_t} \quad (6.2)$$

โดยที่ Z_b คือ โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวล่างสุดของคาน $= I/c_b$

ขณะรับน้ำหนักบรรทุก

ถ้าเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแก่คาน โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักคานรวมกับน้ำหนักบรรทุกจะทำให้ผิวบนของคานคอนกรีตเกิดหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันที่ผิวล่างของคาน หน่วยแรงอัดก็จะลดน้อยลง จนกระทั่งอาจกลายเป็นหน่วยแรงดึงได้ดังรูปที่ 6.1 (ค) แต่อย่างไรก็ดีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนของคานต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ F_c โดยที่ F_c คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก (F_c มีเครื่องหมาย +) และในขณะเดียวกัน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานต้องมากกว่าหรือเท่ากับ F_t โดยที่ F_t คือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก (F_t มีเครื่องหมาย -)

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบน

$$\sigma_{ct} = \frac{P_e}{A} - \frac{P_e e c_t}{I} + \frac{M_T c_t}{I} \leq F_c$$

จัดรูปใหม่

$$F_c \geq \frac{P_e}{A} \left(1 - \frac{Ae}{Z_t} \right) + \frac{M_T}{Z_t}$$

ถ้าให้ $P_e = RP_i$ จะได้ว่า

$$F_c \geq \frac{RP_i}{A} \left(1 - \frac{Ae}{Z_t} \right) + \frac{M_T}{Z_t} \quad (6.3)$$

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่าง

$$\sigma_{cb} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e e c_b}{I} - \frac{M_T c_b}{I} \geq F_t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{จัดรูปใหม่} \quad F_t &\leq \frac{P_e}{A} \left(1 + \frac{Ae}{Z_b} \right) - \frac{M_T}{Z_b} \\
 F_t &\leq \frac{RP_i}{A} \left(1 - \frac{Ae}{Z_b} \right) + \frac{M_T}{Z_b}
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

จากสมการที่ 6.1 จัดรูปอีกครั้งหนึ่งจะได้ $A \left(F_{ii} - \frac{M_G}{Z_i} \right) \leq P_i \left(1 - \frac{Ae}{Z_i} \right)$

$$\begin{aligned}
 \text{หรือ} \quad \frac{1}{P_i} &\geq \frac{1 - \frac{Ae}{Z_i}}{-AF_{ii} + \alpha_i M_G} \\
 \text{ถ้ากำหนดให้ } \alpha_i = \frac{A}{Z_i} \quad \text{จะได้} \quad \frac{1}{P_i} &\geq \frac{\alpha_i e - 1}{-AF_{ii} + \alpha_i M_G}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

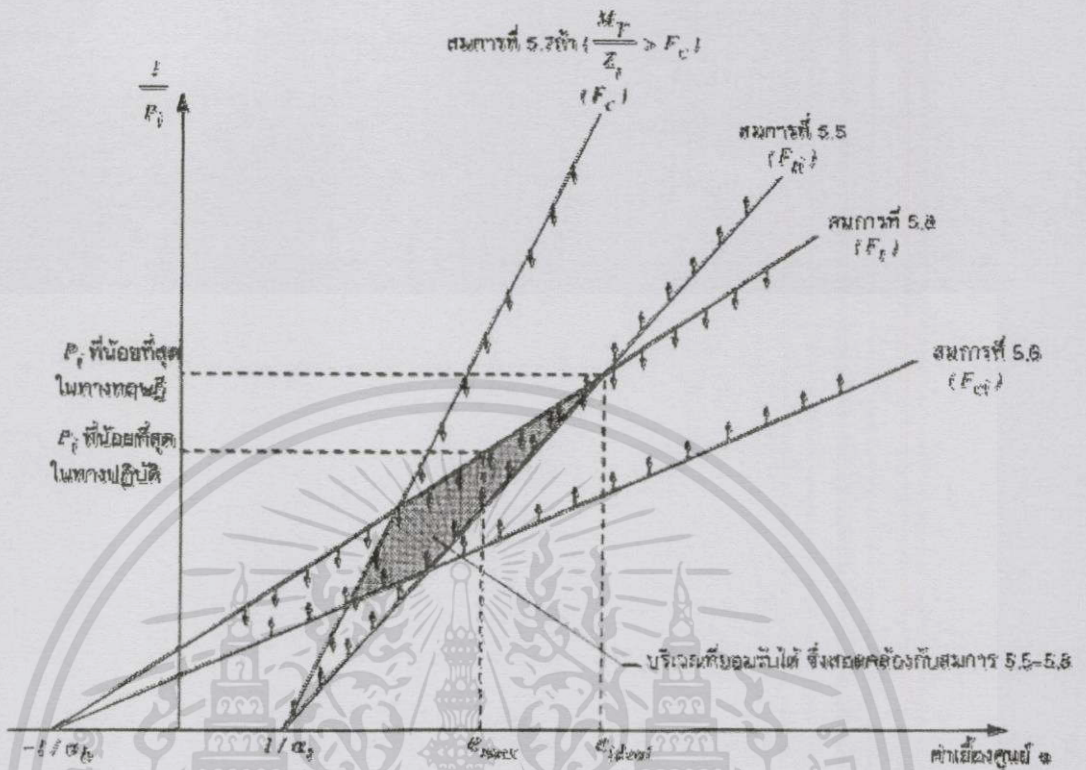
ในทำนองเดียวกัน จัดรูปสมการที่ 6.2-6.4 และกำหนดให้ $\alpha_b = A/Z_b$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{จากสมการที่ 6.2} \quad \frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_b e + 1}{AF_{ci} + \alpha_b M_G} \tag{6.6}$$

$$\text{จากสมการที่ 6.3} \quad \frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_b e - 1)}{-AF_{ci} + \alpha_b M_T} \quad \text{ถ้า } \frac{M_T}{Z_i} \geq F_c \tag{6.7.1}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{P_i} \geq \frac{R(\alpha_b e - 1)}{-AF_{ci} + \alpha_b M_T} \quad \text{ถ้า } \frac{M_T}{Z_i} \leq F_c \tag{6.7.2}$$

$$\text{จากสมการที่ 6.4} \quad \frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_b e - 1)}{AF_{ti} + \alpha_b M_T} \tag{6.8}$$



รูปที่ 6.2 แผนภาพของแมกเนล

สมการที่ 6.5-6.8 สามารถนำมาเขียนกราฟระหว่าง $1/P_i$ กับ e โดยให้ $1/P_i$ เป็นแกน y และ e เป็นแกน x ดังแสดงในรูปที่ 6.2 จุดตัดแกน x (แกน e) หาได้จากการแทนค่า $1/P_i = 0$ ลงในสมการแต่ละสมการ เมื่อ $1/P_i = 0$ จะได้ค่าเชิงศูนย์ เท่ากับ e เท่ากับ $1/\alpha_i$ สำหรับสมการที่ 6.5 และ 6.7 และเท่ากับ สำหรับสมการ 6.6 และ 6.8 แผนภาพนี้เสนอโดยแมกเนล (Magnel) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด

จุดบนเส้นตรงของสมการแต่ละเส้นคือ ค่าขอบเขตหน่วยแรงที่ยอมให้ ดังนั้นที่ บริเวณด้านหนึ่งของเส้นตรงแต่ละเส้นจะสอดคล้องกับสมการของตัวเองเช่น สมการที่ 6.5 $\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_i e - 1}{-AF_n + \alpha_i M_G}$ ด้านที่ลูกศรชี้จากเส้นตรงของสมการที่ 6.5 ในรูปที่ 6.2 จะสอดคล้องกับสมการที่ 6.5 ดังนั้นพื้นที่ที่ล้อมรอบโดยเส้นตรงทั้ง 4 เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับค่า P_i และ e ในการออกแบบเพราะจุดต่างๆ ในพื้นที่นี้จะสอดคล้องกับสมการ 6.5-6.8 ทั้งหมด

ถ้าจะออกแบบให้ประหยัด เมื่อกำหนดหน้าตัดคานมาให้ ต้องออกแบบให้ค่า P_i มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ซึ่งความหมายว่า จำนวนเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้จะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ดังนั้น ค่า P_i ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรได้มาจากจุดตัดของเส้นตรงของสมการ 6.5 และ 6.8 ดังแสดงในรูป 6.2 ที่จุดตัดนี้จะได้ค่า e_{ideal} และ $1/P_i$ ที่มากที่สุดซึ่งหมายถึงค่า P_i ที่น้อยที่สุดที่อยู่ในบริเวณที่ยอมรับได้แต่อย่างก็ตามค่า e_{ideal} ที่ได้นี้ บางครั้งอาจใช้ไม่ได้ เพราะค่า e จะถูกจำกัดโดยความลึกของหน้าตัดคานและระยะหุ้มของคอนกรีต ดังนั้น ในทางปฏิบัติ หากค่า e ที่มากที่สุดที่เป็นได้ e_{max} จากหน้าตัดคานแล้วจึงไปคำนวณหาค่า P_i ที่น้อยที่สุดซึ่งคำนวณได้จากการแทนค่า e_{max} ลงในสมการที่ 6.8 ดังแสดงในรูปที่ 6.2

ในบางกรณีถ้าหน้าตัดมีขนาดเล็กเกินไป เส้นตรงของสมการที่ 6.6 ในรูปที่ 6.2 อาจอยู่สูงกว่าเส้นตรงของสมการที่ 6.8 ซึ่งทำให้ไม่สามารถหาบริเวณที่ยอมรับได้เลย หรือในกรณีที่เส้นตรงของสมการที่ 6.5 อยู่เหนือเส้นตรงของสมการที่ 6.7 ก็เช่นเดียวกันจะไม่สามารถหาบริเวณที่ยอมรับได้ เพราะไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกับสมการที่ 6.5-6.8 ได้หมดพร้อมๆ กัน ในกรณีนี้ต้องขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามถ้าได้มุมระหว่างเส้นตรงของสมการที่ 6.6 กับ 6.8 กว้างๆ หรือมุมระหว่างเส้นตรงของสมการที่ 6.5 กับ 6.7 กว้างๆ แสดงว่าบริเวณที่ยอมรับได้มีพื้นที่มาก อาจลดขนาดของหน้าตัดคานลงเพื่อความประหยัดได้

ถ้าต้องการคำนวณหาขนาดหน้าตัดที่เล็กที่สุดที่ยังสอดคล้องกับสมการทั้ง 4 ได้ นั้น ก็คือจะต้องคำนวณ Z_b ที่น้อยที่สุด (Z_{bmin}) และ Z_t ที่น้อยที่สุด (Z_{tmin}) ถ้าใช้หน้าตัดที่มี Z_b เท่ากับ (Z_{bmin}) เส้นตรงของสมการที่ 6.6 ในรูป 6.2 จะมาซ้อนกับเส้นตรงของสมการที่ 6.8 ค่า (Z_{bmin}) สามารถหาได้จากการทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสมการที่ 6.6 (หรือสมการที่ 6.2) และสมการที่ 6.8 (หรือสมการที่ 6.4) เท่ากับหน่วยแรงที่ยอมรับให้กล่าวคือ

$$\text{จากสมการที่ 6.2 จะได้} \quad F_{ct} + \frac{M_G}{Z_{bmin}} = \frac{P_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min} e}{Z_{bmin}} \right) \quad (6.9)$$

$$\text{จากสมการที่ 6.4 จะได้} \quad F_t + \frac{M_T}{Z_{bmin}} = \frac{RP_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min} e}{Z_{bmin}} \right)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{F_t}{R} + \frac{M_G}{RZ_{bmin}} = \frac{P_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min} e}{Z_{bmin}} \right) \quad (6.10)$$

จากสมการที่ 6.9 และสมการที่ 6.10 จะได้

$$Z_{bmin} = \frac{M_T - RM_G}{RF_{ct} - F_t} \quad (6.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันค่า $(Z_b)_{\min}$ หาได้จากการทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสมการที่ 6.5 (หรือสมการที่ 6.1) และสมการที่ 6.7 (หรือสมการที่ 6.3) เท่ากับหน่วยแรงที่ยอมให้ซึ่งจะได้

$$Z_{t \min} = \frac{M_T - RM_G}{F_c - RF_H} \quad (6.12)$$

ค่า $(Z_b)_{\min}$ ในสมการที่ 6.11 จะมากกว่า $(Z_b)_{\min}$ ในสมการที่ 6.12 เสมอ ดังนั้นในกรณีที่ ออกแบบหน้าตัดคานรูปสมมาตรระหว่างบนและล่างของแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เช่น หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือหน้าตัดรูปตัว I สมมาตรซึ่งค่า $Z_t = Z_b = Z$ จึงพิจารณาเพียงแต่ออกแบบให้ Z_b มากกว่า $(Z_b)_{\min}$ ก็พอเพราะ Z_t จะมากกว่า $(Z_t)_{\min}$ ตามไปด้วยสำหรับในกรณีที่ออกแบบหน้าตัดคานรูปไม่สมมาตรเช่น คานรูปตัว T ค่า $Z_t = I/c_t$ จะมากกว่า ค่า $Z_b = I/c_b$ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า ถ้า Z_b มากกว่า $(Z_b)_{\min}$ แล้ว Z_t จะมากกว่า $(Z_t)_{\min}$ ด้วยแน่นอนหมายความว่า ถ้าออกแบบให้ค่า Z_b มากกว่า $(Z_b)_{\min}$ แล้วค่า ของหน้าตัดนั้นจะมากกว่า โดยทันทีที่ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่ต้องคำนึงถึงการออกแบบให้ Z_t มากกว่า $(Z_t)_{\min}$ ก็ได้ ไม่ว่าหน้าตัดนั้นสมมาตรหรือไม่ก็ตาม

ในการออกแบบหน้าตัดให้เหมาะสมในบางกรณี ค่าอัตราส่วน R ซึ่งคืออัตราส่วนของแรงดึงประสิทธิผลต่อแรงดึงทันทีหลังจากถ่ายแรงดึงทันทีหลังจากถ่ายแรงต้องมีประมาณก่อน โดยปกติใช้ค่า R อยู่ในช่วง 0.75-0.85 ในกรณีของคานที่มีการอัดแรงไม่มากอาจใช้ค่า R เท่ากับ 0.85 แต่ถ้าในกรณีของคานที่มีการอัดแรงมากควรใช้ค่า R เท่ากับ 0.75 เพราะว่า ในกรณีที่มีการอัดแรงมาก ผลของการสืบต่อการสูญเสียแรงดึงจะมีผลมาก แต่อย่างไรก็ดีหลังจากออกแบบหน้าตัดและเหล็กเสริมอัดแรงแล้วควรมีการตรวจสอบค่า R ที่ใช้ในตอนแรกอีกครั้งหนึ่ง การคำนวณการสูญเสียแรงดึงได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

6.2 แนวเหล็กเสริมอัดแรง

โดยปกติเมื่อออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง จะเริ่มต้นโดยการคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงและระยะเยื้องศูนย์กลางที่ต้องการจากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุด หลังจากนั้นจะกำหนดตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดต่างๆ ตลอดความยาวคาน โดยตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่ทุกหน้าตัดจะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 6.1-6.4 กล่าวคือ หลังจากได้ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงก็จะรู้ค่าแรงอัดสำหรับหน้าตัดต่างๆ จากนั้นคำนวณหาค่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่หน้าตัดต่างๆ โดยให้สอดคล้องกับสมการที่ 6.1-6.4 ซึ่งสมการเหล่านี้จะให้คำตอบของค่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งคำตอบนี้เป็นช่วงของระยะเยื้องศูนย์กลางที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จากสมการที่ 6.1} \quad \frac{P_i}{A} - \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_i} \right) \geq F_u \quad (6.13)$$

$$\text{จากสมการที่ 6.2} \quad \frac{P_i}{A} + \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_b} \right) \leq F_{ci} \quad (6.14)$$

$$\text{จากสมการที่ 6.3} \quad \frac{P_e}{A} - \left(\frac{P_e e - M_T}{Z_i} \right) \leq F_c \quad (6.15)$$

$$\text{จากสมการที่ 6.4} \quad \frac{P_e}{A} + \left(\frac{P_e e - M_T}{Z_b} \right) \geq F_t \quad (6.16)$$

จัดรูปสมการใหม่ เพื่อหาขอบเขตของค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง e จะได้

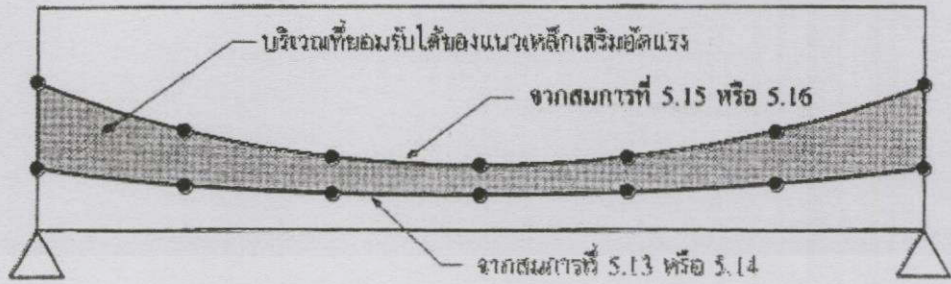
$$e \leq \frac{1}{P_i} \left[M_G - Z_i \left(F_u - \frac{P_i}{A} \right) \right]$$

$$e \leq \frac{1}{P_i} \left[M_G + Z_b \left(F_{ci} - \frac{P_i}{A} \right) \right]$$

$$e \geq \frac{1}{P_e} \left[M_T - Z_i \left(F_c - \frac{P_e}{A} \right) \right]$$

$$e \geq \frac{1}{P_e} \left[M_T - Z_b \left(F_t - \frac{P_e}{A} \right) \right]$$

หลังจากได้ค่า P_i และ P_e จากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุดก็จะหาค่า P_i และ P_e ที่หน้าตัดใดๆ จากการคำนวณเรื่องการสูญเสียแรงดึง นำค่า และค่าต่างๆ แทนลงในสมการที่ 6.13-6.16 ก็จะได้ช่วงที่ยอมรับได้ของค่า e ที่หน้าตัดต่างๆ โดยค่า e ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ขณะถ่ายแรงหาได้จากสมการ 6.13 หรือ 6.14 และค่า e ที่น้อยที่สุดที่ต้องการใช้ในเชิงรับน้ำหนักบรรทุกทุกหาได้จากสมการ 6.15 หรือ 6.16 ดังนั้นจะได้ช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของแนวเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงในรูปที่ 6.12 โดยหน้าตัดที่จะคำนวณหาช่วงยอมรับได้ของค่า e อาจเลือกมาเพียงบางหน้าตัด

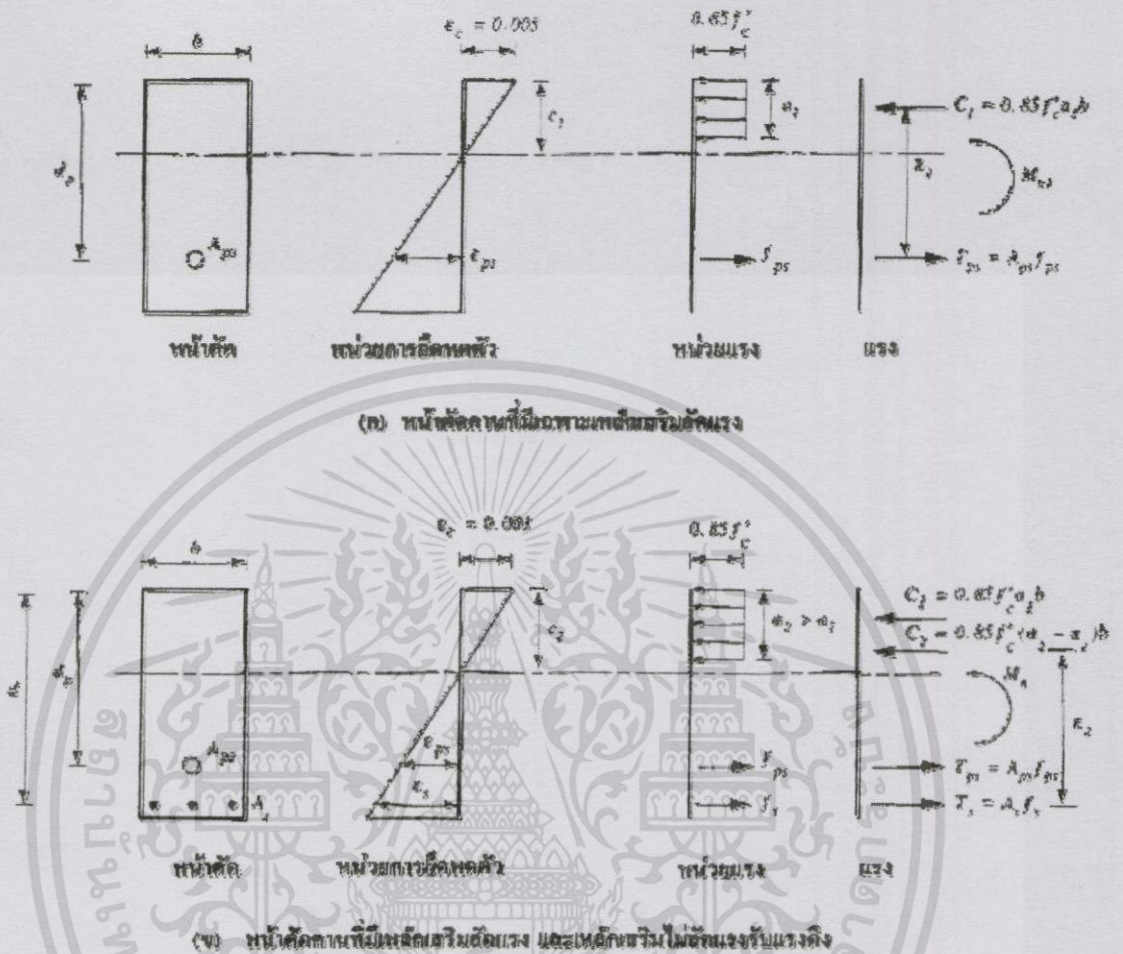


รูปที่ 6.3 บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง

6.3 การออกแบบสำหรับกำลังประลัยของหน้าตัด

เมื่อออกแบบหน้าตัดโดยทฤษฎีอีลาสติก โดยปกติจะได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดคาน A ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง A_{ps} และระยะเยื้องศูนย์กลาง e หลังจากนั้นจะต้องตรวจสอบกำลังของหน้าตัด ϕM_n ว่ามากกว่ากำลังที่ต้องการ M_u หรือไม่ ถ้า ϕM_n มากกว่า M_u หน้าตัดก็ใช้ได้ แต่ถ้า ϕM_n น้อยกว่า M_u จะต้องเพิ่มค่า ϕM_n โดยการเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงลงในหน้าตัดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

6.3.1 การเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

พิจารณาหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมอัดแรงในรูปที่ 6.14 (ก) สมมติว่าหน้าตัดคานมีปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง A_{ps} และระยะเยื้องศูนย์กลาง e ซึ่งได้ถูกออกแบบมาโดยทฤษฎี อีลาสติกแล้วจากหน้าตัดที่ได้สามารถคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดได้จากสมการ 5.25

$$\begin{aligned}
 M_m &= T_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \\
 &= A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำลังของหน้าตัด ϕM_{n1} มากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ M_u ก็ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กใดๆ เพิ่มเติม เพราะกำลังของหน้าตัดมีเพียงพอ แต่ถ้า ϕM_{n1} น้อยกว่า M_u หมายถึงกำลังของหน้าตัดไม่พอเพียงต้องเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพิ่มเติม

นอกเหนือจากการที่จะต้องทำให้เกิดของหน้าตัดเพียงพอ ต้องตรวจสอบความเหนียวของหน้าตัดนั้นด้วย การเสริมเหล็กรับแรงดึงเพิ่มเติมที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงเกินปริมาณเหล็กที่เกณฑ์สมดุล (balanced condition) ซึ่งการวิบัติชนิดแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) อาจเกิดขึ้นได้ ทำให้องค์อาคารนั้นเปราะ ดังนั้นการเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงดึงจะต้องตรวจสอบไม่ให้ปริมาณเหล็กมีมากเกินไป ซึ่งใช้สมการที่ 5.17 มาตรวจสอบจากสมการที่ 5.17

$$\frac{\omega_p}{\omega_p + (\omega - \omega') \frac{d}{d_p}} \leq 0.36\beta_1$$

$$\frac{\omega_{pw}}{\omega_{pw} + (\omega_w - \omega'_w) \frac{d}{d_p}}$$

การเพิ่มเหล็กเสริมรับแรง ทำให้ค่า ω เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้ค่าทางซ้ายของสมการที่ 4.17 เกินค่า $0.36\beta_1$ ดังนั้นในบางครั้งการที่จะเพิ่มกำลังของหน้าตัด ϕM_n อาจต้องเพิ่มทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงอัดลงไปพร้อมกันเพื่อมีให้ค่าทางซ้ายของสมการที่ 5.17 เกิน $0.36\beta_1$ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 6.3.2

สำหรับกรณีที่มี ϕM_{n1} มีค่าน้อยกว่า M_u และปริมาณเหล็กเสริมไม่มีปัญหาเกี่ยวกับความเหนียว (หมายถึง ค่าทางซ้ายมือของสมการที่ 5.17 ยังน้อยกว่า $0.36\beta_1$ มาก) อาจเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงดึง A_s เพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มค่า ϕM_n ในรูปที่ 6.14 แสดงถึงการเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มค่า ϕM_n โดยปกติที่สถานะประลัยหน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่เพิ่มเติมมานั้น จะมากกว่าหน่วยการยึดตัวที่จุดกลาง ($\epsilon_s > \epsilon_y$) นั่นคือหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมไม่อัดแรงมีค่าเท่ากับกำลังกลาง ($\sigma_s = f_y$) เหล็กเสริมไม่อัดแรงที่เพิ่มเข้ามานั้นทำให้แรงดิ่งลัพท์ของหน้าตัดมากขึ้น ($T_{ps} + T_s$) และดังนั้นเพิ่มแรงอัดลัพท์ด้วย ($C = T_{ps} + T_s$) การที่แรงอัดลัพท์จะเพิ่มขึ้นได้นั้น หมายความว่าค่าความลึก a จะต้องเพิ่มขึ้น ($a_2 > a_1$) และค่าความลึกของแกนสะเทิน c เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าหน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยลดลง (ϵ_{ps} ลดลง) ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยจึงลดลงด้วย (f_{ps} ลดลง) แต่อย่างไรก็ดีการลดลงของค่า f_{ps} ค่อนข้างน้อยมาก ถ้าค่าทางซ้ายของสมการที่ 5.17 น้อยกว่า $0.36\beta_1$ ดังนั้นอาจใช้ค่า f_{ps} เท่าเดิมในการคำนวณได้ ถ้าให้โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงดึงเท่ากับ M_{n2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} M_{n2} &= M_n - M_{n1} \\ &= \frac{M_u}{\phi} - M_{n1} \end{aligned} \quad (6.17)$$

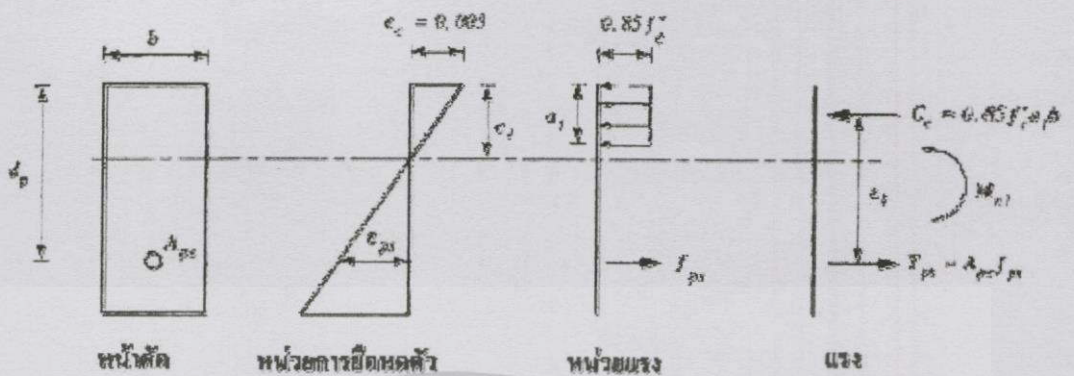
โดยที่ M_{n2} หาได้จาก $M_{n2} = T_s z_2 = A_s f_y z_2$ (6.18)

จากสมการที่ 6.17 และ 6.18 $A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - M_{n1}}{f_y z_2}$ (6.19)

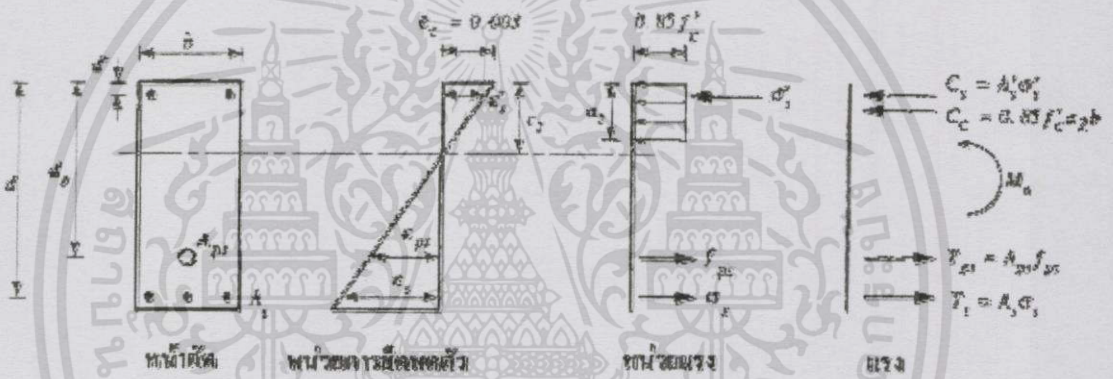
โดยที่ A_s	คือ	ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงที่เพิ่มเข้าไปในหน้าตัดสำหรับการเพิ่มกำลังของหน้าตัด
M_{n1}	คือ	กำลังในการรับโมเมนต์ของหน้าตัด ก่อนที่จะเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึง
M_u	คือ	กำลังที่ต้องการหน้าตัด
ϕ	คือ	ตัวคูณการลดกำลังของหน้าตัดที่ค่าเท่ากับ 0.9
z_2	คือ	แขนของโมเมนต์คู่ควบ ของ C_2 และ T_s ที่เกิดจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงซึ่งอาจหาค่าได้โดยประมาณเท่ากับ $0.9(d-a_1)$

6.3.2 การเพิ่มทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด

ในการเสริมเหล็กไม่อัดแรงบนหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง เพื่อเพิ่มกำลังประลัยของ หน้าตัด นั้น บางครั้งถ้าเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว ดังในหัวข้อ 6.3.1 อาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับ ความเหนียวของหน้าตัดได้ พิจารณาสมการที่ 5.17 ถ้าหน้าตัดใดที่ออกแบบมาโดยทฤษฎีอัสติกแล้ว ปรากฏว่า ω_p ไกล่เคียงค่า $0.36\beta_1$ การเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัดต้องเพิ่มทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงอัดลงไปพร้อมกัน เพื่อมิให้ค่าทางซ้ายมือของสมการที่ 5.17 เกิน $0.36\beta_1$ หน้าตัดจะมีความเหนียวเพียงพอ



(ก) หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึง



(ข) หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึง และเหล็กเสริมไม่ยึดแน่นรับแรงดึงและแรงอัด

รูป 6.5 การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเสริมเหล็กทั้งเหล็กเสริมไม่ยึดแน่นรับแรงดึงและเหล็กเสริมไม่ยึดแน่นรับแรงอัด

ในการออกแบบเหล็กเสริมไม่ยึดแน่นรับแรงดึงและแรงดัดเพื่อเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัด จะสมมติว่าการเสริมเหล็กไม่ยึดแน่นนี้ไม่ทำให้ค่าความลึกของแกนสะเทิน c เปลี่ยนไป ($c_2 = c_1$) ดังนั้น ค่า a จึงไม่เปลี่ยนไป ($a_2 = a_1$) เนื่องจากค่า a ไม่เปลี่ยนจะได้ว่า ค่าแรง C_c (แรงอัดที่รับโดยคอนกรีต) ก็จะเท่ากันระหว่างรูปที่ 6.17 ก. และ 6.17 ข. และเนื่องจากค่า C_c และ T (แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมยึดแน่น) เท่ากัน ดังนั้นจะได้ว่า T_{ps} ในรูปที่ 6.17 ก. เท่ากับรูปที่ 6.17 ข. กล่าวอีกทางหนึ่งก็คือ การเพิ่มเหล็กเสริมไม่ยึดแน่นทั้งเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึงลงไปในหน้าตัดจะไม่ทำให้การกระจายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยการยืดหดตัวเปลี่ยนไป และจากรูป 6.17 ข. สามารถหาค่าหน่วยการหดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด ε'_s และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงดึง ε_s ได้จาก

$$\varepsilon'_s = 0.003 \left(\frac{c_2 - d'}{c_2} \right) = 0.003 \left(\frac{c_1 - d'}{c_1} \right) \quad (6.22)$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \left(\frac{d - c_2}{c_2} \right) = 0.003 \left(\frac{d - c_1}{c_1} \right) \quad (6.23)$$

ถ้าให้หน่วยการยืดหดตัวที่คลากเท่ากับ ε_y ดังนั้น ค่าหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงอัด σ'_s และค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงดึง σ_s สามารถหาได้จาก

$$\sigma'_s = \begin{cases} E_s \varepsilon'_s & \text{ถ้า } \varepsilon'_s < \varepsilon_y \\ f_y & \text{ถ้า } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (6.22)$$

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \text{ถ้า } \varepsilon_s < \varepsilon_y \\ f_y & \text{ถ้า } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (6.23)$$

โดยที่ f_y คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

ถ้าให้โมเมนต์ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงอัดและเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเท่ากับ M_{n2} ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 M_{n2} &= M_n - M_{n1} \\
 &= \frac{M_u}{\phi} - M_{n1}
 \end{aligned} \tag{6.24}$$

โดยที่ M_{n2} หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 M_{n2} &= C_s(d-d') = T_s(d-d') \\
 &= A'_s \sigma'_s (d-d') = A_s \sigma_s (d-d')
 \end{aligned} \tag{6.25}$$

จากสมการที่ 6.24 และ 6.25 จะได้ว่า

$$A'_s = \frac{M_u / \phi - M_{n1}}{\sigma'_s (d-d')} \tag{6.26}$$

$$A_s = \frac{M_u / \phi - M_{n1}}{\sigma_s (d-d')} \tag{6.27}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การออกแบบองค์อาคารรับแรงเฉือน

7.1 แรงเฉือน (shear) ในคอนกรีตอัดแรง

ในบทที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์และออกแบบหน้าตัดคานในการรับโมเมนต์ดัดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมการรับกำลังของคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้โมเมนต์ดัดค่อนข้างชัดเจนแต่อย่างไรก็ตามในเรื่องของพฤติกรรมในการรับกำลังใต้แรงเฉือน ซึ่งโดยปกติเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างแรงเฉือนกับโมเมนต์ดัด ยังไม่สามารถทำนายได้แม่นยำเหมือนพฤติกรรมในการรับกำลังภายใต้โมเมนต์ดัดอย่างเดียว การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบกะทันหันซึ่งเป็นการวิบัติที่ประาะ ดังนั้นในการออกแบบองค์อาคารใดๆ องค์อาคารนั้นจะต้องไม่วิบัติโดยแรงเฉือน

ดังที่กล่าวมาแล้ว การพูดถึงการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในนั้น ในความเป็นจริงไม่ใช่ผลของแรงเฉือนในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว เพราะกำลังในการรับแรงเฉือนในแนวตั้งเพียงอย่างเดียวหน้าตัดคานนั้นสูงมาก แต่เมื่อแรงเฉือนเกิดร่วมกับโมเมนต์ดัดจะก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงตามแนวทแยง (diagonal tensile stress) เนื่องจากกำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำมากดังนั้นเมื่อเกิดหน่วยแรงดึงตามแนวทแยงจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวตามแนวทแยง (diagonal cracking หรือ inclined cracking) การออกแบบหน้าตัดคานในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตอัดแรงจะคล้ายๆ กับในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป กล่าวคือจะใช้เหล็กปลอกในการช่วยเสริมกำลังในการรับแรงเฉือนของหน้าตัด (เหล็กปลอกนี้ช่วยรับหน่วยแรงดึงตามแนวทแยงขณะเกิดรอยแตกตามแนวทแยง) และปริมาณเหล็กปลอกต้องออกแบบให้เพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะไม่เกิดขึ้น โดยให้คานนั้นวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดแทน เพราะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดสามารถทำนายได้ถูกต้องแม่นยำและยังออกแบบให้เป็นการวิบัติที่เหนียวได้

7.1.1 การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking)

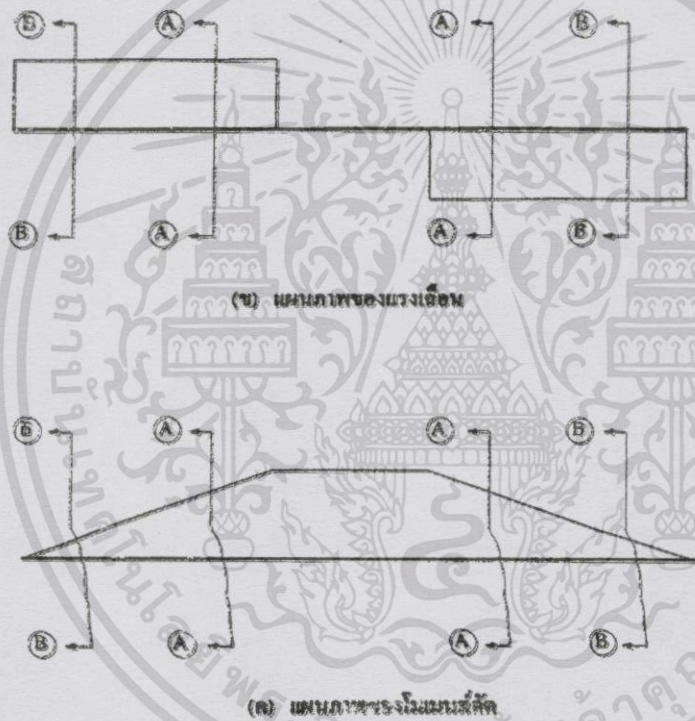
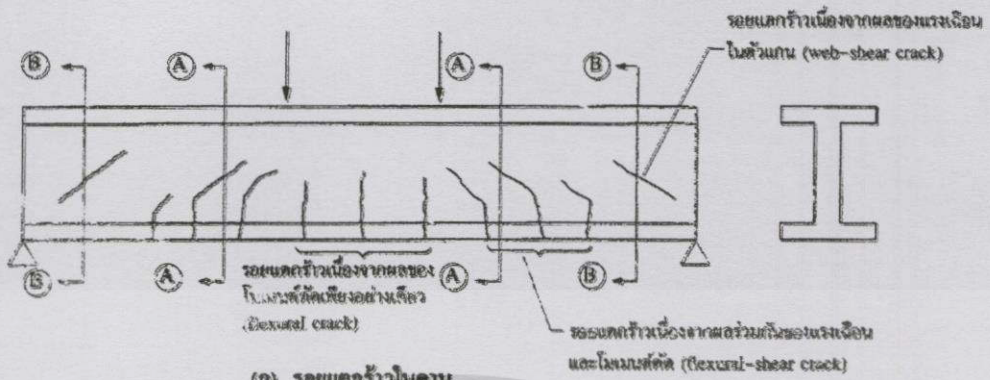
ลักษณะการแตกร้าวเนื่องแรงเฉือน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (flexural-shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web-shear cracking)

ก. การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมนกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่กระทำต่อคานมีค่ามากทั้งคู่ การแตกร้าวลักษณะนี้เริ่มจากการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ก่อน (flexural cracking) โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มที่ผิวล่างสุดของคานและรอยแตกร้าวอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนในช่วงแรก เมื่อผนวกกับผลของแรงเฉือน รอยแตกร้าวจะแตกสีกต่อไปในแนวทแยง (บริเวณหน้าตัด A-A ในรูป 7.1 ก. ถ้าไม่ได้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้เพียงพอรอยแตกร้าวนี้จะแตกสีกเข้าไปในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงอัด (compression zone) พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่รับแรงอัดบริเวณปลายบนของรอยแตกร้าวจึงลดลง ทำให้หน้าตัดคานบริเวณนี้ไม่สามารถรับแรงอัดในคอนกรีตอันเกิดมาจากผลของโมเมนต์ได้อย่างเพียงพอการวิบัติจึงเกิดขึ้น การวิบัติชนิดนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากผลของแรงเฉือนและแรงอัด (shear-compression failure)

ข. การแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่แรงเฉือนมีค่าสูงมากและโมเมนต์มีค่าน้อย การแตกร้าวชนิดนี้มักจะพบบริเวณใกล้ๆ กับที่รองรับบริเวณปลายคานเนื่องจากแรงเฉือนมีค่ามาก และผลของแรงเฉือนนี้ก่อนให้เกิดรอยแตกตามแนวทแยงในบริเวณตัวแกนของคาน การแตกร้าวชนิดนี้พบมากในคานที่มีหน้าตัดรูปตัว T หรือ I ซึ่งมีความกว้างของแกนน้อย การแตกร้าวชนิดนี้จะเห็นเป็นรอยแตกทแยงตั้งแสดงในรูปที่ 7.1 ก. (บริเวณหน้าตัด B-B)



รูปที่ 7.1 ลักษณะการแตกร้าวในคานเนื่องจากแรงเฉือน

7.1.2 การออกแบบสำหรับการรับแรงเฉือน

ในการออกแบบหน้าตัดคานสำหรับรับแรงเฉือน จะต้องออกแบบให้กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ ϕV_n ไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ V_u

$$\begin{aligned} \text{กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ} &\geq \text{กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ} \\ \phi V_n &\geq V_u \end{aligned} \tag{7.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงเฉือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85
 V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (nominal shear strength) ของหน้าตัด

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท ปี 2537 กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุสามารถหาได้จากสมการที่ 7.2

$$\phi V_n = V_c + V_s \quad (7.2)$$

โดยที่ V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต
 V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

7.1.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต

คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ ซึ่งกำลังในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต เป็นตัวกำหนดความจำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนหรือไม่ ถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตนี้มีมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนนอกได้อย่างปลอดภัยก็ไม่จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในทางตรงกันข้ามกันข้ามถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนใน ส่วนของคอนกรีตมีค่าน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับแรงเฉือนภายนอก ก็จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงเฉือนมี 2 ลักษณะ คือ การแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (flexural-shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web-shear cracking) กำลังในการต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาจากค่าที่น้อยของ 2 ค่าต่อไปนี้ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด V_{ci} และ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลแรงเฉือนในตัวแกน V_{cw} กล่าวคือ ถ้าค่า V_{ci} น้อยกว่า V_{cw} กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต V_c จะเท่ากับ V_{ci} และในทางตรงกันข้ามถ้า V_{cw} น้อยกว่า V_{ci} จะได้ว่า V_c จะเท่ากับ V_{cw}

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีคำนวณค่า ดังแสดงใน V_{ci} สมการที่ 7.3

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c} b_w d_p + V_d + \frac{\Delta V_i \Delta M_{cr}}{\Delta M_{max}} \quad (7.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	V_{ci}	คือ	กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดและมีค่าน้อยกว่า $0.45\sqrt{f'_c}b_wd_p$, กก.
	f'_c	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต , กก./ซม. ²
	b_w	คือ	ความกว้างของตัวแกนของคาน , ซม.
	d_p	คือ	ระยะจากผิวบนสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า $0.8 h$ โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด , ซม.
	V_d	คือ	แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.
	ΔV_i	คือ	แรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shear) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.
	ΔM_{max}	คือ	โมเมนต์เพิ่มส่วน (factored moment) ที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา (อาจต้องมีการจัดรูปแบบของน้ำหนักบรรทุก เพื่อให้โมเมนต์ที่พิจารณานี้มีค่ามากที่สุด) , กก./ซม.
	ΔM_{cr}	คือ	ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มเติมจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ ที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก./ซม. โดย สามารถหาได้จาก
			$\Delta M_{cr} = \frac{I}{y_t}(f_r + f_{pe} - f_d) \quad (6.4)$
โดยที่	I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน , ซม. ⁴
	y_t	คือ	ระยะที่วัดจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวของคอนกรีตที่จะแตกร้าว , ซม.
	f_r	คือ	โมดูลัสของการแตกหักซึ่งในกรณีนี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ , กก./ซม. ²
	f_{pe}	คือ	หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง , กก./ซม. ²
	f_d	คือ	หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตัว , กก./ซม. ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน
มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีคำนวณค่า
ดังแสดงในสมการที่ 7.5

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p$$

โดยที่ V_{cw} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัว
แกน , กก.
 f_{pc} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เนื่องจากการอัดแรง ,
กก/ซม.²
 V_p คือ แรงประกอบย่อยแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่
พิจารณาซึ่งมีค่าเท่ากับ $P \sin \alpha$ หรือ Pa
 d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง
แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 h โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด , ซม.

ในการคำนวณหาค่า V_c สำหรับกรณีที่คานคอนกรีตอัดแรงมีแรงดึงประสิทธิผลใน
เหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของกำลังดึงประลัยของเหล็ก หากไม่ต้องการคำนวณโดยละเอียด
ค่าน้อยของ V_{ci} และ V_{cw} แล้ว อาจหาค่า V_c โดยประมาณจากสมการที่ 7.6

$$V_{cp} = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_p}{M_u} \right) b_w d_p \quad (7.6)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.
 M_u คือ โมเมนต์เพิ่มส่วนที่เกิดขึ้นพร้อมกับแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u ที่หน้าตัดที่พิจารณา ,
กก.-ซม.

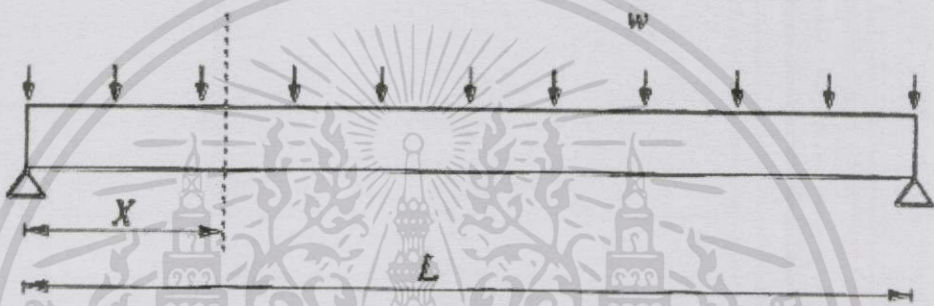
ค่าของ $\frac{V_u d_p}{M_u}$ ในสมการที่ 7.6 จะต้องไม่มากกว่า 1 และค่า V_c (หน่วยเป็นกก.) มีค่าไม่น้อยกว่า
 $0.53\sqrt{f'_c} b_w d_p$ และไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c} b_w d_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงที่เป็นคานช่วงเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่นค่าของ

$\frac{\Delta V_i}{\Delta M_{\max}}$ และ $\frac{V_u}{M_u}$ ในสมการที่ 7.3 และสมการที่ 7.6 อาจหาค่าได้จากสมการที่ 7.7 (ดูรูปที่ 7.2 ประกอบ)

$$\text{ที่ระยะ } x \text{ ใดๆ} \quad \frac{V}{M} = \frac{\frac{\omega L}{2} - \omega x}{\frac{\omega L}{2}x - \frac{\omega x^2}{2}} = \frac{L - 2x}{x(L - x)} \quad (7.7)$$

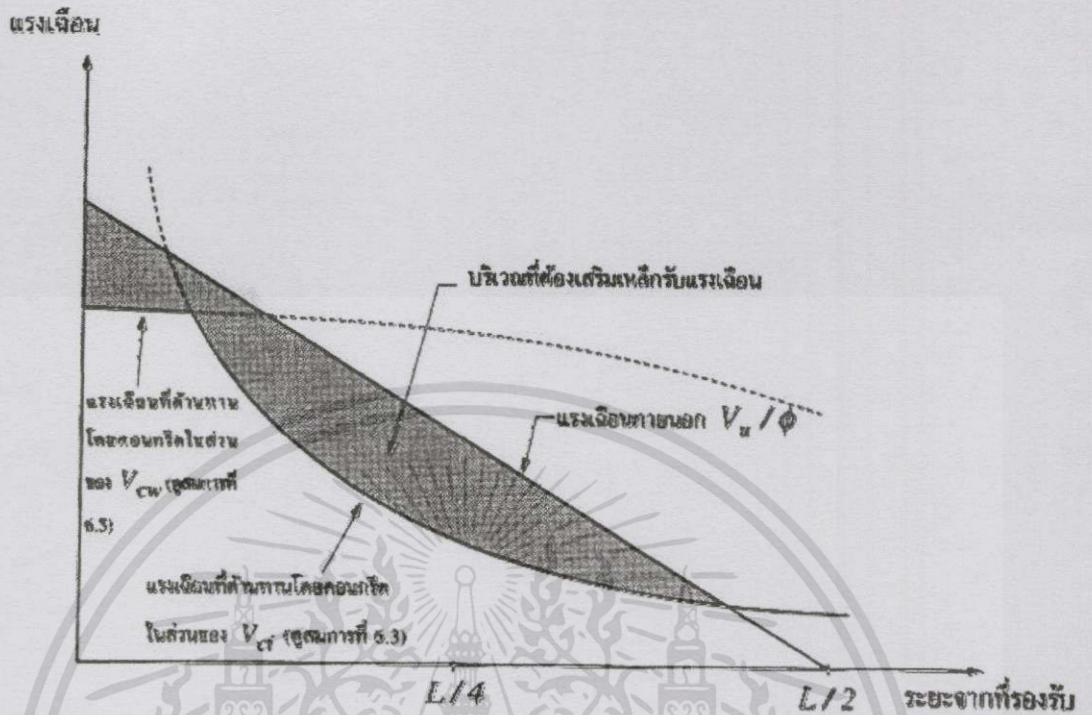


รูปที่ 7.2 คานรับน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดแผ่น

7.1.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก (บริเวณที่แรเงาในรูปที่ 7.3) ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือน นอกจากสมการที่ 7.1 และ 7.2 เขียนใหม่ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 ค่า V_{cl} , V_{cw} ที่ระยะต่างๆ จากที่รองรับและบริเวณที่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกทุกชนิด

$$\begin{aligned} \phi(V_c + V_s) &\geq V_u \\ V_s &\geq \frac{V_u - V_c}{\phi} \end{aligned}$$

หรือ V_s ที่น้อยที่สุดที่ต้องช่วยในการรับแรงเฉือน คือ

$$V_s = \frac{V_u - V_c}{\phi} \tag{7.8}$$

- โดยที่ V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
 V_u คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการหาได้จาก $1.4V_D + 1.7V_L$ โดยที่ V_D และ V_L คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต ซึ่งเป็นค่าที่น้อยระหว่าง V_{ci} และ V_{cw}

ค่าของ V_s สามารถคำนวณได้ดังนี้

ก) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กปลอกวางตั้งฉากกับแนวแกนขององค์อาคาร

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} \quad (7.9)$$

โดยที่ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งโดยปกติเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนี้จะตัดเป็นปลอกสี่เหลี่ยมทำให้ A_v ของเหล็กปลอกมีค่า เท่ากับ 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้, ซม.²

f_y คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, กก./ซม.²

s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, ซม.

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.

ข) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นปลอกวางเอียงกับแนวแกนขององค์อาคาร



รูปที่ 7.4 คานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนวางเอียงแนวแกนของคาน

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (7.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ α คือ มุมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกับแนวแกนของคานดังรูปที่ 7.4

ค) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กคอกม้า ซึ่งประกอบด้วยเหล็กเส้นเดียวหรือกลุ่มของเหล็กที่ขนานกัน และตัดขึ้นที่ระยะห่างจากที่รองรับเท่ากัน

$$V_s = A_v f_y \sin \alpha \leq 0.80 \sqrt{f'_c} b_w d_p \quad (7.11)$$

ง) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กคอกม้า ซึ่งประกอบด้วยชุดของเหล็กคอกม้าที่ขนานกันซึ่งถูกตัดขึ้นที่ระยะต่างๆ จากที่รองรับค่า V_s ให้คำนวณจากสมการที่ 7.10

7.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ก) ระยะเรียง (spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

- ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่วางตั้งฉากที่วางตั้งฉากกับแนวแกนของคานจะต้องไม่ห่างเกิน $\frac{3}{4}h$ หรือ 60 ซม. และถ้าค่า V_s มีค่าเกิน $1.06 \sqrt{f'_c} b_w d_p$ ระยะเรียงจะต้องลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

- เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เหล็กปลอกที่วางเอียงและเหล็กคอกม้า จะต้องจัดวางโดยที่เส้นตรงทุกเส้นที่ลากจากจุดกึ่งกลางความลึกของคาน ทำมุม 45 องศา ไปยังแนวเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง จะต้องผ่านเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอย่างน้อย 1 เส้น

ข) ปริมาณการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

- ค่า V_s ในการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะต้องมามีค่าไม่มากกว่า $2.12 \sqrt{f'_c} b_w d_p$ ถ้ามากกว่าให้ออกแบบขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $\left(V_u \geq \frac{\phi V_c}{2} \right)$ ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน (ยกเว้นกรณีต่อไปนี้เป็นคือ แผ่นพื้น ฐานราก และคานซึ่งมีความลึกไม่มากกว่า 25 ซม. หรือ 2.5 เท่าของความหนาของปีกคาน หรือครึ่งหนึ่งของความกว้างของตัวแกน ทั้งนี้ให้ใช้ค่าที่มากที่สุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน มีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต ให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าค่าปริมาณต่ำสุดของการเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งหาจากสมการที่ 7.12

$$A_{v\min} = \frac{3.5b_w s}{f_y} \quad (\text{หน่วยเป็น ซม.}) \quad (7.12)$$

ในกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีแรงอัดประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง P_e ไม่น้อยกว่า 40% ของกำลังดัดประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง F_{pu} ปริมาณต่ำสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอาจใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างสมการที่ 7.12 และ 7.13

$$A_{v\min} = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d_p} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}} \quad (\text{หน่วยเป็น ซม.}) \quad (7.13)$$

โดยที่ A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.²
 f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงที่จุดประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม.²

บทที่ 8

คอนกรีตรับแรงอัด

คอนกรีตอัดแรงที่นำไปใช้ในวัตถุประสงค์ของการรับแรงอัดอาจจะดูเหมือนว่าเป็นความคิดที่ไม่ถูกต้อง แต่ในความเป็นจริงแล้วองค์อาคารที่รับแรงอัดส่วนมากจะมีผลของโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น เสาเข็ม ผนังอาคารสำเร็จรูป เสาตอม่อสะพาน โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นอาจมาจากแรงกระทำด้านข้าง เช่น แรงต้านข้างของดินกระทำต่อเสาเข็ม แรงลม การเยื้องศูนย์ที่เกิดขึ้นขณะติดตั้ง การยกติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป โมเมนต์ดัดจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในองค์อาคารและเกิดการเสียหายได้ การออกแบบขององค์อาคารรับแรงอัดจึงต้องคำนึงถึงผลของหน่วยแรงดึงที่อาจเกิดขึ้นได้จากการออกแบบ ดังนั้นการออกแบบองค์อาคารรับแรงอัดจึงต้องออกแบบผลรวมของแรงอัดและโมเมนต์ดัดไปพร้อมๆกัน

คอนกรีตอัดแรงจะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ขณะเคลื่อนย้าย ขณะติดตั้ง หน้าตัดของคอนกรีตอัดแรงซึ่งไม่แตกร้าวจึงมีสติเฟเนสูงกว่าหน้าตัดคอนกรีตที่แตกร้าว ทำให้ช่วยลดการดกตัวของตัวด้านข้างขององค์อาคารได้

ถ้าพิจารณาโครงสร้างที่รับแรงอัดตามแนวแกนเป็นหลัก โดยมีโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นน้อยมาก หรือไม่มีเลย การอัดแรงต่อคอนกรีตอาจจะลดกำลังในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ดีในองค์อาคารคอนกรีตที่มีเน้นการรับแรงอัดตามแนวแกนเป็นหลัก การอัดแรงต่อคอนกรีตจะอัดให้คอนกรีตมีหน่วยแรงอัดประมาณ $15-50 \text{ กก./ซม.}^2$ ซึ่งน้อยเพียงพอที่จะไม่ไปทำให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างเปลี่ยนไปมากนัก แต่ถ้าโครงสร้างนั้นเกิดระยะเยื้องศูนย์หรือมีแรงต้านข้างสูงๆกระทำ การอัดแรงจะช่วยให้กำลังในการรับโมเมนต์ดัดสูงขึ้น

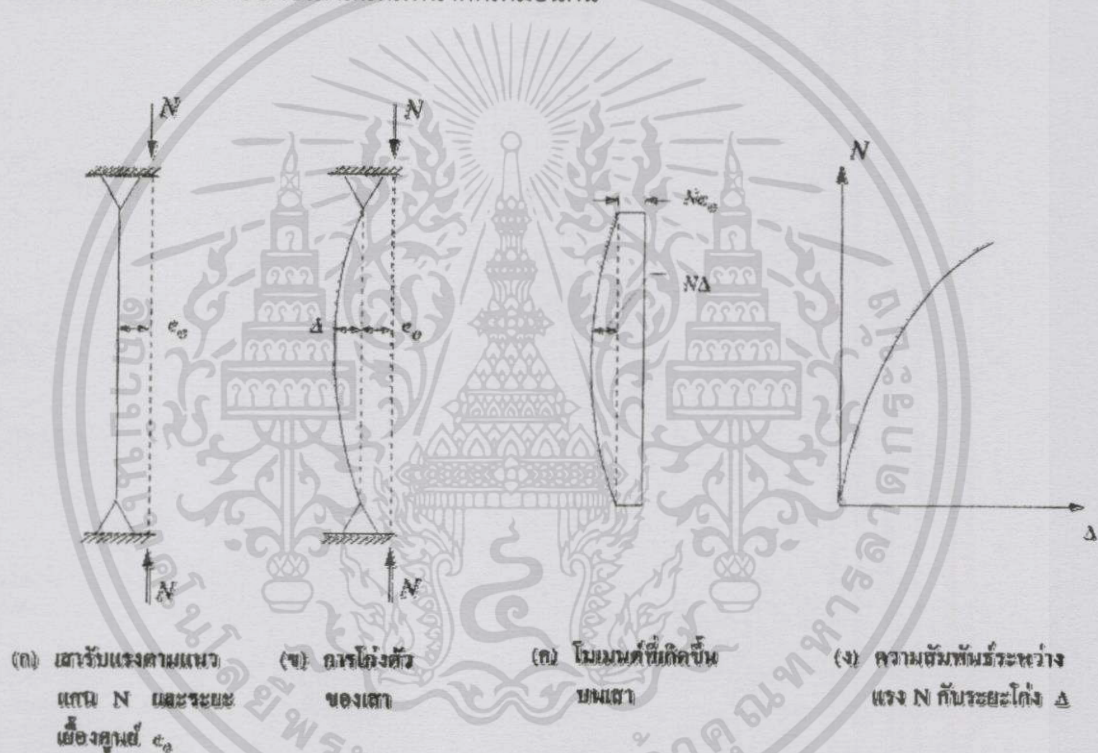
พิจารณาเสาดังรูปที่ 8.1 (ก) เมื่อเสารับแรงอัดภายนอก N และมีระยะเยื้องศูนย์ e_0 เสาจะเกิดการหดสั้นลงพร้อมทั้งมีการโก่งตัวด้านข้างดังรูปที่ 8.1 (ข) ถ้าให้การโก่งตัวด้านข้างที่บริเวณกึ่งกลางเสามีค่าเท่ากับ Δ การโก่งตัวด้านข้างนี้ก่อให้เกิดโมเมนต์รอง (secondary moment) ขึ้นโดยโมเมนต์รองมีค่าเท่ากับแรงอัดภายนอก N คูณกับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนเสาสุทธิมีค่าเท่ากับโมเมนต์หลัก (มีค่าเท่ากับแรง N คูณกับระยะเยื้องศูนย์เริ่มต้น e_0) รวมกับโมเมนต์รอง (มีค่าเท่ากับแรง N คูณกับระยะการโก่งตัวด้านข้างของเสา Δ) ดังรูปที่ 8.1 (ค) เมื่อค่อยๆเพิ่มค่าแรง N การโก่งตัวด้านข้าง Δ จะเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มขึ้นของค่าโมเมนต์รอง $N\Delta$ จะเร็วกว่าการเพิ่มของแรงอัด N ดังรูปที่ 8.1 (ง) ดังนั้นโมเมนต์รองจะมีผลอย่างมากต่อกำลังในการต้านทานของเสาโดยเฉพาะอย่างยิ่งเสาที่มีความชะลูด (slenderness) มากๆ

ชนิดของเสาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะความชะลูด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เสาสั้น (short column หรือ stocky column) เป็นเสาที่มีความขรุขระน้อยโมเมนต์รองจะไม่มีมีความสำคัญต่อโมเมนต์ในเสา แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบจึงคิดเฉพาะแรงตามแนวแกนและโมเมนต์หลักเท่านั้น

2) เสายาว (long column หรือ slender column) เป็นเสาที่มีความขรุขระมากผลของการโก่งตัวด้านข้างก่อให้เกิดโมเมนต์รองซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อกำลังในการต้านทานของเสา แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบจึงคิดแรงตามแนวแกน โมเมนต์หลัก และโมเมนต์รองเข้าไปด้วย โมเมนต์รองในเสายาวอาจมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าโมเมนต์หลัก ซึ่งมีผลทำให้กำลังในการต้านทานของเสายาวมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเสาสั้นที่มีหน้าตัดเหมือนกัน



รูปที่ 8.1 การโก่งตัวและโมเมนต์ของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงในช่วงใช้งานของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัด

8.1.1 หน่วยแรงในช่วงใช้งานของเสาสั้น

สำหรับเสาสั้นคอนกรีตอัดแรงที่มีแรงอัดประสิทธิผล P_e โดยแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ในแนวเดียวกับศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เสารับแรงภายนอกตามแนวแกน N โดยมีระยะเยื้องศูนย์ e จะสามารถหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A_c} + \frac{N}{A_t} + \frac{Ney}{I_t} \quad (8.1)$$

โดยที่ y คือ ระยะจากศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงตำแหน่งของคอนกรีตที่พิจารณา
 I_t คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลงคอนกรีต

8.1.2 หน่วยแรงในช่วงใช้งานของเสายาว

สมการ 8.1 เป็นสมการที่ไม่คำนึงถึงผลของการโก่งตัวด้านข้างของเสาซึ่งสามารถใช้ได้กับเสาสั้น แต่ในกรณีของเสายาวซึ่งมีระยะโก่งตัวด้านข้างมาเกี่ยวข้อง สมการของหน่วยแรงในคอนกรีตจะหาได้จากสมการที่

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A_c} + \frac{N}{A_t} \pm \frac{Ney}{I_t} \pm \frac{N\Delta y}{I_t} \quad (8.2)$$

โดยที่ Δ คือ ระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา

ค่าประมาณของการโก่งตัวที่บริเวณกึ่งกลางของเสาที่มีปลายยึดทั้งสองข้างแบบยึดหมุน (pin-ended column) อาจคำนวณได้จากสมการที่ 8.3

$$\Delta = e \left(\sec \sqrt{\frac{NL^2}{4E_c I_t}} - 1 \right) \quad (8.3)$$

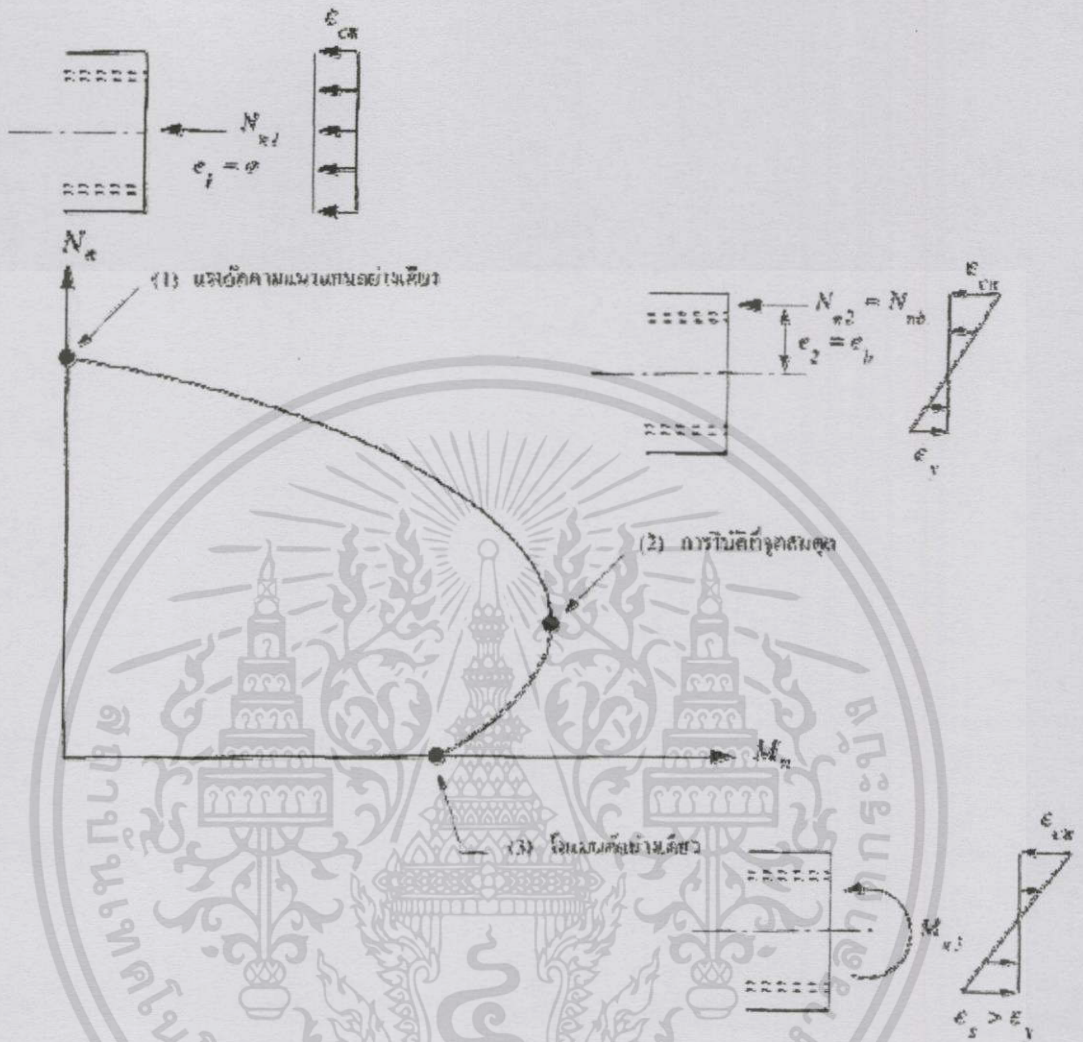
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 กำลังที่สถานะประลัยของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัด

8.2.1 กำลังของเสาสั้น

การคำนวณหากำลังประลัยของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดจะใช้วิธีเดียวกับการคำนวณหากำลังประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป โดยปกติกำลังของเสาจะเขียนอยู่ในรูปของแผนผังกำลัง (strength interaction diagram) ซึ่งเขียนระหว่างกำลังในการรับแรงตามแนวแกน N_u และกำลังในการรับโมเมนต์ดัด M_u

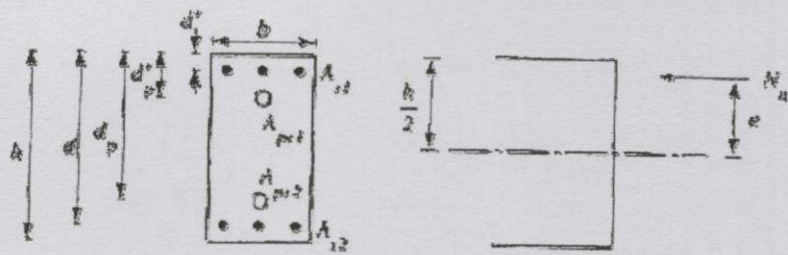
รูปร่างโดยทั่วไปของแผนผังของกำลังของเสาแสดงดังรูปที่ 8.2 เส้นโค้งในรูปแสดงถึงแนววิบัติของเสาหรือกำลังของเสานั้นเอง เสาที่รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ภายนอกที่มีค่าตกอยู่ภายในเส้นโค้งนี้จะปลอดภัยเนื่องจากหน้าตัดของเสาสามารถต้านทานได้ แต่ถ้าแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ภายนอกมีค่าอยู่ภายนอกโค้ง หมายความว่า เสาจะไม่สามารถต้านทานแรงร่วมนี้ได้ การวิบัติของเสาสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การวิบัติโดยพฤติกรรมการอัดเป็นหลัก (compression failure) เมื่อโมเมนต์มีค่าน้อย ดังช่วง (1)-(2) และการวิบัติโดยพฤติกรรมการดึงเป็นหลัก (tension failure) เมื่อโมเมนต์มีค่ามาก ดังช่วง (2)-(3) การวิบัติทั้งสองส่วนจะถูกแบ่งแนวโดยการวิบัติที่จุดสมดุล (balanced failure) ที่จุด (2)



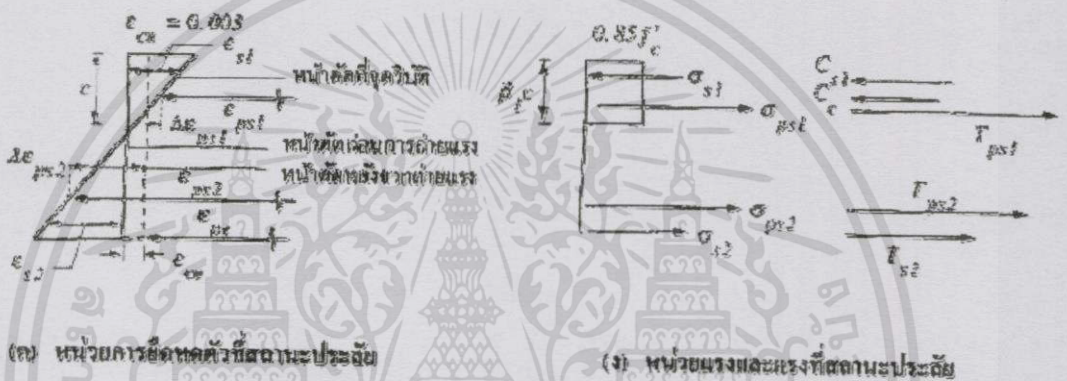
รูปที่ 8.2 แผนผังกำลังของเสา

พิจารณาเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง b และความยาว h หน้าตัดประกอบด้วย เหล็กเสริมธรรมดาไม่อัดแรง A_{s1} และ A_{s2} เหล็กเสริมอัดแรง A_{ps1} และ A_{ps2} ดังรูปที่ 8.3 (ก) เสารับแรงตามแนวแกน N_n โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e ดังรูปที่ 8.3 (ข) หน่วยการยึดหดตัวที่สถานะประลัย และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่สถานะประลัยแสดงไว้ดังรูปที่ 8.3 (ค) และ 8.3 (ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) หน้าตัดเสา (ข) แรงกระทำตามแนวแกน โดยมีระยะย้อยศูนย์กลาง e



(ก) หน่วยการยึดหดตัวที่สถานะประลัย

(ข) หน่วยแรงและแรงที่สถานะประลัย

รูปที่ 8.3 เสาคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย

จากรูปที่ 8.3 (ข) N_n สามารถหาได้จาก

$$N_n = C_c + C_{s1} - T_{ps1} - T_{s2} \tag{8.4}$$

จากรูปที่ 8.3 (ข) M_n สามารถหาได้จากโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางหน้าตัด

$$\begin{aligned} M_n &= N_n \cdot e \\ &= C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + C_{s1} \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T_{ps1} \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\ &\quad + T_{ps2} \left(d_p - \frac{h}{2} \right) + T_{s2} \left(d - \frac{h}{2} \right) \end{aligned} \tag{8.5}$$

โดยที่ $C_c = 0.85 f'_c \beta_1 c b$ (8.6)

$C_{s1} = A_{s1} f_y$ ถ้า $\epsilon_{s1} \geq \epsilon_y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= A_{s1} E_s \varepsilon_{s1} \quad \text{ถ้า } \varepsilon_{s1} > \varepsilon_y \quad (8.7)$$

$$\varepsilon_{s1} \text{ หาได้จาก } \varepsilon_{s1} = 0.003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned} T_{s2} &= A_{s2} f_y \quad \text{ถ้า } \varepsilon_{s2} \geq \varepsilon_y \\ &= A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} \quad \text{ถ้า } \varepsilon_{s2} > \varepsilon_y \end{aligned} \quad (8.9)$$

$$\varepsilon_{s2} \text{ หาได้จาก } \varepsilon_{s2} = 0.003 \left(\frac{d'-c}{c} \right) \quad (8.10)$$

เมื่อให้แรงอัดประสิทธิพล P_e กระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดเสา จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดบนหน้าตัดมีค่าเท่ากับ ε_{ce} ซึ่งหาได้จาก

$$\varepsilon_{ce} = \frac{P_e}{(nA_{s1} + nA_{s2} + A_c) E_c} \cong \frac{P_e}{[(n-1)A_s + A_g] E_c} \quad (8.11)$$

โดยที่

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของเสา

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริมไม่อัดแรง $= A_{s1} + A_{s2}$

เมื่อให้แรงกระทำตามแนวแกน N_n โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง $\Delta \varepsilon_{ps1}$ และ $\Delta \varepsilon_{ps2}$ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 8.12 และ 8.13 ตามลำดับ

$$\Delta \varepsilon_{ps1} = 0.003 \left(\frac{c-d'_p}{c} \right) - \varepsilon_{ce} \quad (8.12)$$

$$\Delta \varepsilon_{ps2} = 0.003 \left(\frac{d'_p - c}{c} \right) + \varepsilon_{ce} \quad (8.13)$$

หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_{ps1} = \varepsilon_{pe} - \Delta\varepsilon_{ps1} \quad (8.14)$$

$$\varepsilon_{ps2} = \varepsilon_{pe} + \Delta\varepsilon_{ps2} \quad (8.15)$$

โดยที่ ε_{pe} คือ หน่วยการยืดตัวประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง = $\frac{P_e}{A_{ps}E_{ps}}$

จากหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมอัดแรง ε_{ps1} และ ε_{ps2} ที่จากสมการ 8.14 และ 8.15 สามารถนำไปคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง σ_{ps1} และ σ_{ps2} ที่สถานะประลัยได้ (โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ $\sigma - \varepsilon$ ของเหล็กเสริมอัดแรง)

แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงสามารถหาได้จาก

$$T_{ps1} = A_{ps1}\sigma_{ps1} \quad (8.16)$$

$$T_{ps2} = A_{ps2}\sigma_{ps2} \quad (8.17)$$

จากแรง $C_c, C_{s1}, T_{s2}, T_{ps1}, T_{ps2}$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 8.6, 8.7, 8.10, 8.16, 8.17 ตามลำดับ สามารถคำนวณหา N_n และ $M_n = N_n e$ ได้จากสมการ 8.4, 8.5 ตามลำดับ

ในกรณีของเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว เช่น ที่จุด (1) ในรูปที่ 8.2 โดยไม่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง ($e=0$) สามารถหา N_{n1} ได้จาก

$$N_{n1} = C_c + A_s f_y - A_{ps} \sigma_{ps} \quad (8.18)$$

โดยที่ $C_c = 0.85 f'_c b h$

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมอัดแรง

σ_{ps} คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยและหาได้จากสมการที่ 8.19

$$\sigma_{ps} = (\varepsilon_{pe} - 0.003 + \varepsilon_{ce}) \quad (8.19)$$

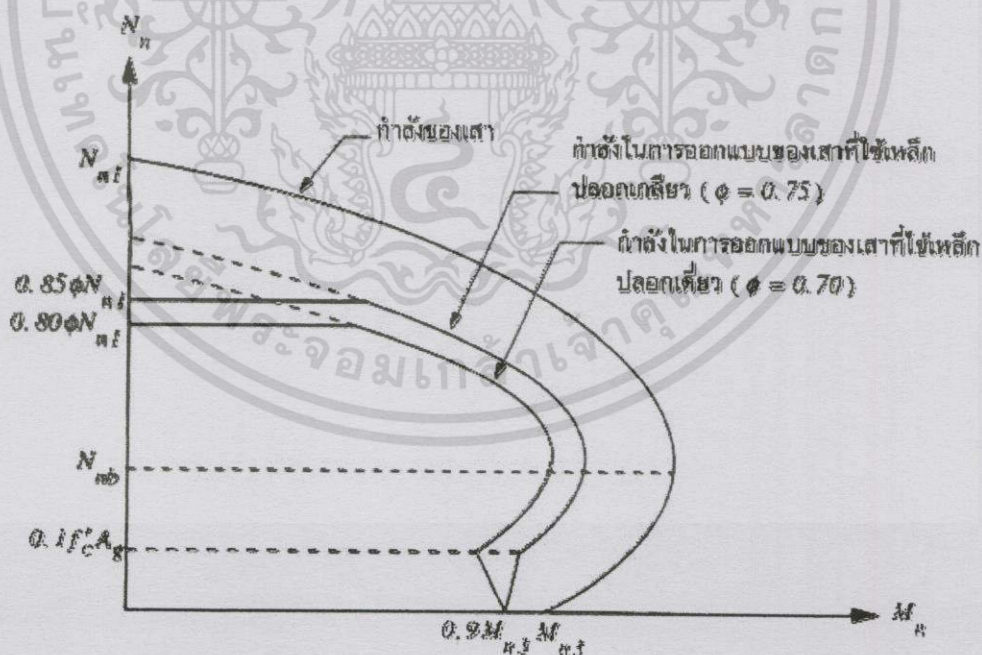
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.2 แผนผังกำลังของเสาสั้นที่ใช้สำหรับการออกแบบ

ในการออกแบบเสาจะต้องคำนวณหาค่าแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ N_u และโมเมนต์ที่ต้องการ M_u ซึ่งเป็นค่าแรงที่ได้ทำการเพิ่มส่วนมาแล้วด้วยค่าตัวคูณน้ำหนัก ค่าแรง N_u และ M_u นี้เมื่อนำมากำหนดจุดลงบนแผนผังกำลังของเสาสำหรับการออกแบบจะต้องอยู่ภายในโค้งแผนผังกำลังของเสาสำหรับการออกแบบจะได้การคูณแผนผังกำลังของเสาตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาด้วยตัวคูณลดกำลัง ϕ

กรณีใช้เหล็กปลอกเกลียว มาตรฐาน ACI กำหนดให้ค่าแรง ϕN_u ในแผนผังกำลังของเสาสำหรับการออกแบบต้องมีค่าไม่เกิน $0.85\phi N_{n1}$ (โดยที่ N_{n1} = กำลังของเสาในการรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว) เพื่อป้องกันการเยื้องศูนย์ที่อาจเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ และในกรณีของเสาที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยว ค่าแรง ϕN_u ต้องมีค่าไม่เกิน $0.80\phi N_{n1}$

เมื่อแรงตามแนวแกน N_u มีค่าน้อย ค่า ϕ อาจค่อยๆ เพิ่มจาก 0.75 ในกรณีของเสาที่ใช้เหล็กปลอกเกลียวหรือ 0.70 ในกรณีของเสาที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยว เป็น 0.90 เมื่อ N_u มีค่าเท่ากับศูนย์ (มีแต่โมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียวเหมือนคาน) การเพิ่มขึ้นของค่า ϕ ให้เริ่มเพิ่มได้ตั้งแต่ N_u มีค่าเท่ากับ $0.1f'_cA_g$ หรือ N_{nb} (ให้ใช้ค่าน้อยระหว่างค่าทั้งสอง) ดังแสดงในรูปที่ 8.4



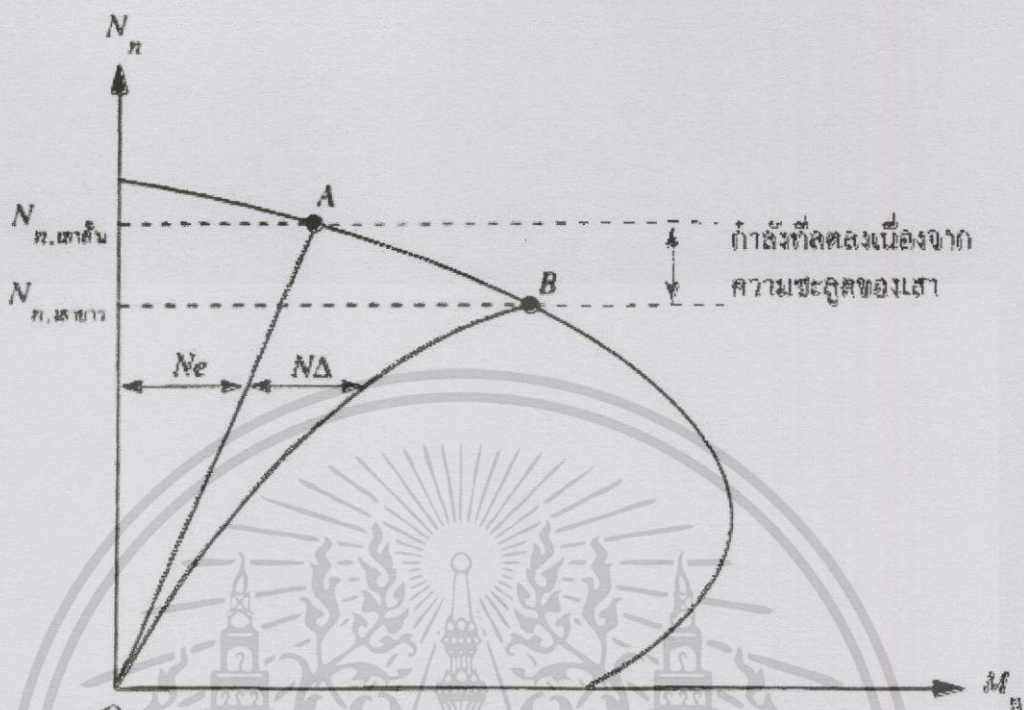
รูปที่ 8.4 แผนผังกำลังของเสาที่ใช้สำหรับการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.3 กำลังของเสายาว

ในกรณีของเสาสั้นจะไม่คิดผลของโมเมนต์รองซึ่งเกิดจากการโก่งตัวด้านข้างของเสา แต่ในเสายาวการโก่งตัวด้านข้างของเสาจะก่อให้เกิดโมเมนต์รอง ทำให้กำลังรับแรงของเสาลดลง ยิ่งเสามีความขะลุ่ยเท่าไร กำลังในการรับแรงของเสาก็ยิ่งลดลงมากขึ้นเท่านั้น

มาตรฐาน ACI ได้กำหนดให้ใช้วิธีการขยายโมเมนต์ (moment magnification method) หลักการของการคำนวณหา กำลังของเสายาววิธีนี้คือ การใช้ตัวแปรหนึ่งมาคูณกับโมเมนต์ภายนอกเพื่อขยายให้โมเมนต์มากขึ้นเพื่อชดเชยผลของโมเมนต์รอง จากนั้นก็นำแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ที่ขยายนี้มาใช้ในการออกแบบเสาต่อไปโดยออกแบบเหมือนเสาสั้นได้เลย เพราะได้มีการชดเชยผลของโมเมนต์รองไปแล้ว ผลของโมเมนต์รองต่อกำลังของเสายาวแสดงไว้ในรูปที่ 8.5 เมื่อค่อยๆเพิ่มแรงกระทำตามแนวแกน N โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e นำค่าแรง N และ M ที่เกิดขึ้นบนเสามาเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนเสา M กับแรงตามแนวแกน N ดังเส้น OA และ OB เส้น OA เป็นเส้นความสัมพันธ์ของแรง M และ N ในกรณีของเสาสั้น โดยในเสาสั้นจะไม่คำนึงถึงผลของโมเมนต์รอง (ซึ่งมาค่าเท่ากับ $N\Delta$) เพราะถือว่าการโก่งตัวด้านข้าง Δ มีค่าน้อยมาก กำลังของเสาสั้นสำหรับระยะเยื้องศูนย์กลาง e ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับกำลังที่จุด A ถ้าเสานี้เป็นเสายาวโมเมนต์รองจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วกว่าการเพิ่มแรงตามแนวแกน N เส้นความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนเสา M และแรงตามแนวแกน N จะมีลักษณะตามโค้ง OB กำลังของเสายาวสำหรับระยะเยื้องศูนย์กลาง e ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับกำลังที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่เส้นความสัมพันธ์ $M-N$ ตัดกับเส้นโค้งกำลังของเสา กำลังที่ลดลงเนื่องจากความขะลุ่ยของเสาแสดงไว้ในรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 แพนผังกำลังของเสายาว

โมเมนต์รวมที่เกิดขึ้นบนเสายาวขณะวิบัติมีค่าเท่ากับโมเมนต์หลัก Ne รวมกับโมเมนต์ตรง $N\Delta$ ถ้ากำหนดให้ δ เป็นค่าตัวคูณเพื่อขยายโมเมนต์หลักให้เป็นโมเมนต์รวมที่เกิดขึ้นบนเสา ค่าโมเมนต์รวมที่ขยาย M_m นี้อาจเขียนในรูปของ

$$M_m = \delta Ne = Ne + N\Delta = Ne\left(\frac{e + \Delta}{e}\right) \tag{8.20}$$

จากสมการที่ 8.20
$$\delta = \left(\frac{e + \Delta}{e}\right) \tag{8.21}$$

การพิจารณาว่าเสาใดเป็นเสาสั้นหรือเสายาวนั้น ให้พิจารณาโดยสมการที่ 8.22 และ 8.23 เสาจะถูกพิจารณาว่าเป็นเสาสั้นเมื่อ

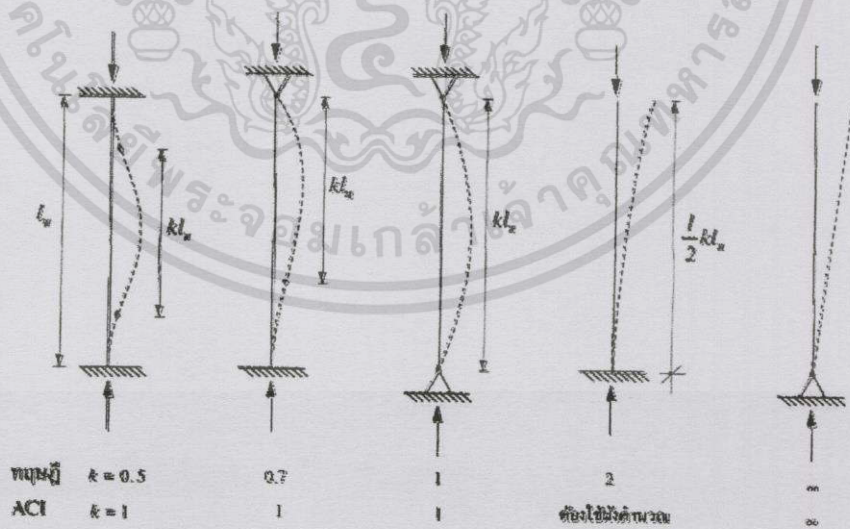
$$\frac{KI_u}{r} < 34 - 12 \frac{M_{ub1}}{M_{ub2}} \quad \text{สำหรับเสาที่มีค้ำยันข้างที่ปลาย} \tag{8.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Kl_u}{r} < 22 \quad \text{สำหรับเสาที่ไม่มีค้ำยันด้านข้างที่ปลาย} \quad (8.23)$$

- โดยที่ k คือ ตัวคูณความยาวประสิทธิผล (ดูรูปที่ 8.6)
- l_u คือ ความยาวของเสา
- r คือ รัศมีจายเรชั่นของเสาในทิศที่พิจารณาการดัด โดยอาจใช้ค่า 0.3 เท่าของความยาวของด้านของเสาที่พิจารณาสำหรับเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสำหรับเสากลม อาจใช้ค่า 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา
- M_{ub1} คือ ค่าที่น้อยระหว่างโมเมนต์เพิ่มส่วน (factor moment) ที่ปลายทั้งสองข้างของเสา โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อโมเมนต์ที่ปลายทั้งสองทำให้เสาดัดในลักษณะโค้งเดียวและมีค่าเป็นลบเมื่อมีโมเมนต์ที่ปลายทั้งสองทำให้เสาดัดในลักษณะโค้งคู่
- M_{ub2} คือ ค่าที่มากระหว่างโมเมนต์เพิ่มส่วนที่ปลายทั้งสองข้างของเสา โดยมีค่าเป็นบวกเสมอ

จากสมการที่ 8.22 และ 8.23 เมื่อพิจารณาได้ว่าเสาใดเป็นเสายาว โมเมนต์ที่นำไปออกแบบจะต้องมีการขยายโมเมนต์ โดยโมเมนต์ขยายสำหรับการออกแบบ M_{um} สามารถหาได้จากสมการที่ 8.24



รูปที่ 8.6 ค่า k ตามทฤษฎีและค่า k สำหรับการออกแบบเสนอโดย ACI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{um} = \delta_b M_{ub2} + \delta_s M_{us2} \quad (8.24)$$

- โดยที่ M_{ub2} คือ ค่าที่มากของโมเมนต์เพียงส่วนที่ปลายทั้งสอง โดยโมเมนต์ที่พิจารณานี้เกิดจากแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่ไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการเซ (sidesway) เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กระทำบนโครงสร้างที่สมมาตร
- M_{us2} คือ ค่าที่มากของโมเมนต์เพียงส่วนที่ปลายทั้งสอง โดยโมเมนต์ที่พิจารณานี้เกิดจากแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้โครงสร้างเกิดการเซ เช่น แรงลมหรือน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เสมอ
- δ_b คือ ตัวคูณขยายโมเมนต์ในส่วนที่ไม่มีการเซ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 8.25
- δ_s คือ ตัวคูณขยายโมเมนต์ในส่วนที่มีการเซ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 8.32

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{\phi N_c}} \geq 1.0 \quad (8.25)$$

โดยที่ $C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_{ub1}}{M_{ub2}} \geq 0.4$ สำหรับโครงสร้างที่มีการค้ำยันไม่ให้เกิดการเซ

และไม่มีแรงกระทำต่อเสาในทิศตั้งฉากกับแกนเสา (8.26)

$= 10$ สำหรับกรณีอื่นๆ ที่ไม่ใช่กรณีดังกล่าวข้างต้น (8.27)

N_c คือ น้ำหนักโก่งเดาะวิกฤต (critical buckling load) (8.28)

$$N_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl_u)^2} \quad (8.29)$$

ค่า EI ในสมการที่ 3.41 เป็นค่า EI ที่ต้องพิจารณาถึงการแตกร้าวของหน้าตัด การครากของเหล็กเสริม การคืบของคอนกรีตและความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตซึ่ง EI สามารถหาค่าโดยประมาณได้จาก

$$EI = \frac{0.2E_c I_g + E_s I_s}{1 + \beta_d} \quad (8.30)$$

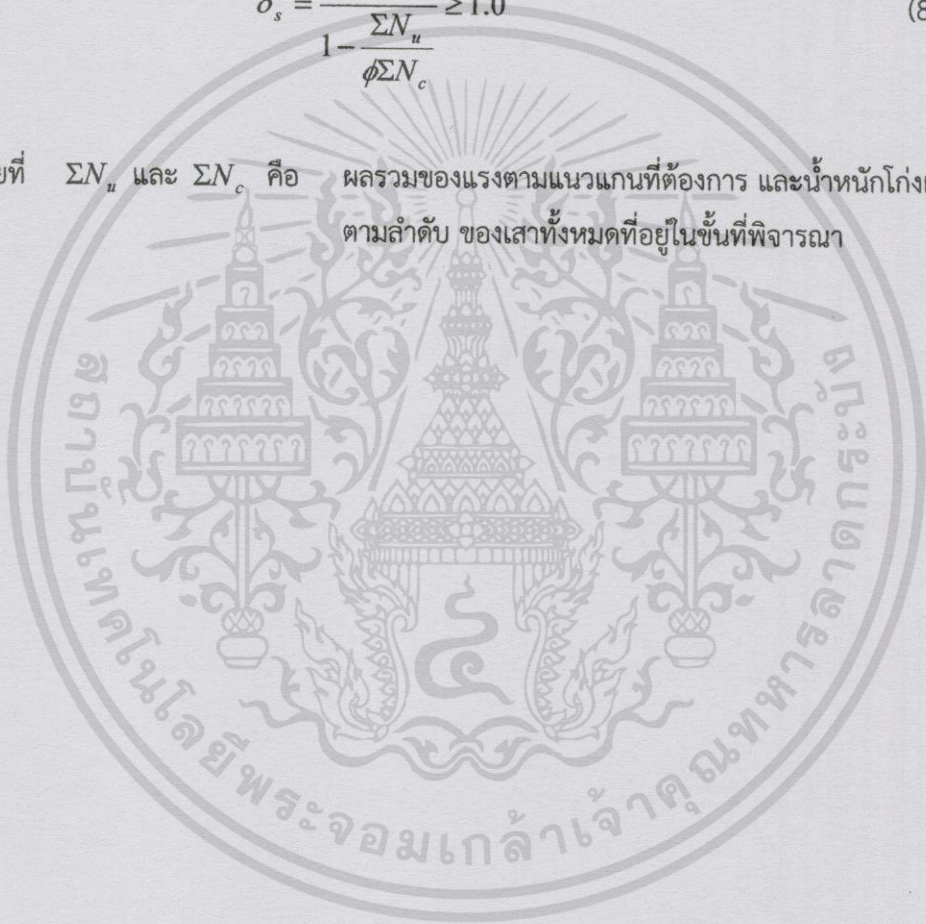
หรือ $EI = \frac{0.4E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad (8.31)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ I_g คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเสา
 I_s คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กรอบแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเสา
 β_d คือ อัตราส่วนของโมเมนต์เพิ่มส่วนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (factored total load moment) โดยที่ β_d นี้มีค่าเป็นบวกเสมอ

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_u}{\phi \Sigma N_c}} \geq 1.0 \quad (8.32)$$

- โดยที่ ΣN_u และ ΣN_c คือ ผลรวมของแรงตามแนวแกนที่ต้องการ และน้ำหนักโคงเตาะวิกฤตตามลำดับ ของเสาทั้งหมดที่อยู่ในชั้นที่พิจารณา

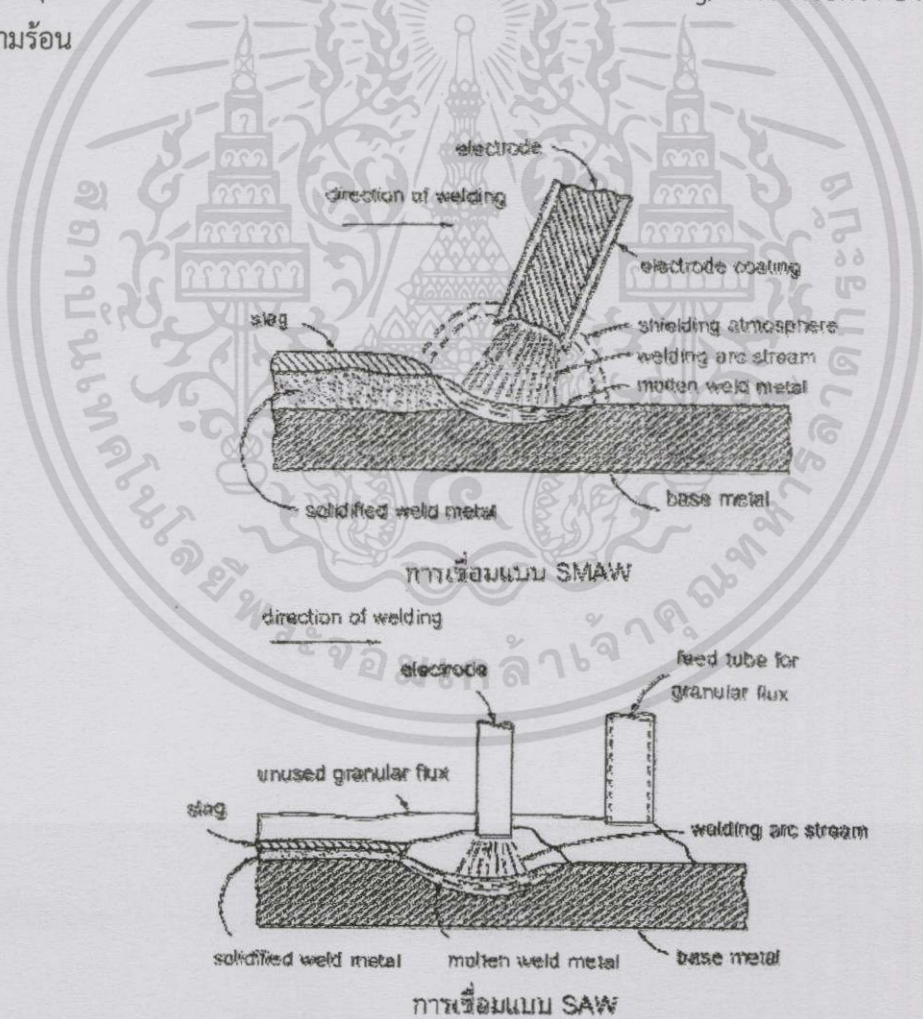


บทที่ 9

การต่อโครงสร้างโดยการเชื่อม

9.1 การต่อโครงสร้างโดยการเชื่อม (Welded Connection)

ปัจจุบันการประกอบโครงสร้างเหล็กมักทำโดยการเชื่อมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นวิธีการต่อชิ้นโลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปให้ติดกันโดยใช้ความร้อนเผาขึ้นโลหะตรงบริเวณที่จะต่อให้ละลายเป็นแอ่งและหลอมติดเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีลวดเชื่อมเป็นตัวประสาน วิธีเชื่อมต่ออาจใช้ก๊าซ (Gas welding) แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดในงานโครงสร้างเหล็ก คือ ใช้ประกายไฟฟ้า (Arc welding) หรือที่เรียกว่า อาร์ค ซึ่งเป็นตัวให้ความร้อน



รูปที่ 9.1 ลักษณะการเชื่อมต่อแบบ SMAW และแบบ SAW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

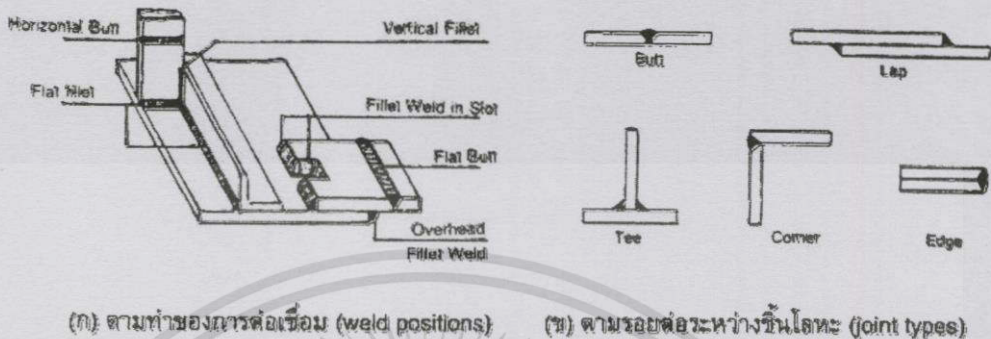
การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็กมีทั้งแบบเชื่อมธรรมดาทั่วไป โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดที่มีเปลือกหุ้มเรียก การเชื่อมแบบนี้ว่า shielded metal arc welding : SMAW เปลือกหุ้มนี้เมื่อถูกหลอมเหลวจะกลายเป็น ชีตะกรันปกคลุมรอยเชื่อมไม่ให้สัมผัสกับอากาศ แบบนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมที่บังคับด้วยมือในสนาม การเชื่อมอีกแบบหนึ่งเรียกว่า submerged (hidden) arc welding : SAW โดยใช้ผงฟลักซ์ (flux) ประกอบกับลวดเชื่อม ซึ่งในขณะที่เชื่อมจะมองไม่เห็นประกายไฟเนื่องจากมีการปล่อยผงฟลักซ์ออกมาปก คลุมรอยเชื่อม ฉะนั้น อาจเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อมใต้ฟลักซ์ ซึ่งเหมาะสำหรับการเชื่อมในโรงงาน ที่ทำแบบอัตโนมัติ และมีรอยเชื่อมซึ่มลึกกว่าแบบ SMAW คุณภาพของรอยเชื่อมจึงสูงกว่า อย่างไรก็ตาม รอยเชื่อมจะมีคุณภาพตามที่ต้องการต่อเมื่อใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับชั้นโลหะที่จะเชื่อม

ลวดเชื่อมที่นำมาใช้เป็นตัวประสานเพื่อเชื่อมต่อนั้นส่วนโครงสร้าง หากเป็นการเชื่อมโดยวิธี SMAW ปกติ จะระบุลวดเชื่อมเป็น E_xx ซึ่งตัว E หมายถึง ลวดเชื่อมหรืออิเล็กโทรด (electrode) ตัวถัดไปเป็นตัวเลขสองตัว เช่น 70 หมายถึงลวดเชื่อมนี้สามารถรับแรงดึงประลัยได้ไม่น้อยกว่า 70 ksi (kip/sq.in) ส่วนอักษร xx บอกถึงคุณสมบัติการเคลือบผิวหรือสารที่ใช้เป็นเปลือกหุ้มลวดเชื่อมรวมทั้ง ตำแหน่งหรือท่าที่เหมาะสมกับการเชื่อมของงาน เป็นต้น แต่สำหรับการเชื่อมโดยวิธี SAW จะระบุ แตกต่างไปจากวิธี SMAW เล็กน้อย คือระบุเป็น F_x-E_xx โดยนำผงฟลักซ์ที่จะใช้มาระบุรวมด้วย ซึ่งตัว F หมายถึง ผงฟลักซ์ ตัวต่อไปเป็นตัวเลขตัวเดียว เช่น เลข 7 ซึ่งหมายถึงแรงดึงประลัยที่ต้องการหลังจาก เชื่อมแล้วต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 70 ksi (kip/sq.in) เป็นต้น ส่วนที่เหลือมีความหมายเช่นเดียวกับที่กล่าว สำหรับเชื่อมที่ใช้วิธี SMAW แต่ตัวเลขหลังตัวอักษร E จะใช้ตัวเลขเพียงตัวเดียว เช่น เลข 7 ซึ่ง หมายถึงลวดเชื่อมนี้สามารถรับแรงดึงประลัยได้ไม่น้อยกว่า 70 ksi (4900 กก./ตร.ซม.)

การตรวจสอบรอยเชื่อม อาจใช้วิธีตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เช่น ใช้ภาพเอ็กซเรย์ หรือด้วยคลื่น เสียงอัลตราโซนิก หรือตรวจสอบโดยใช้เกจวัดขนาดของรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 ประเภทของรอยต่อเชื่อม (Types of Weld)

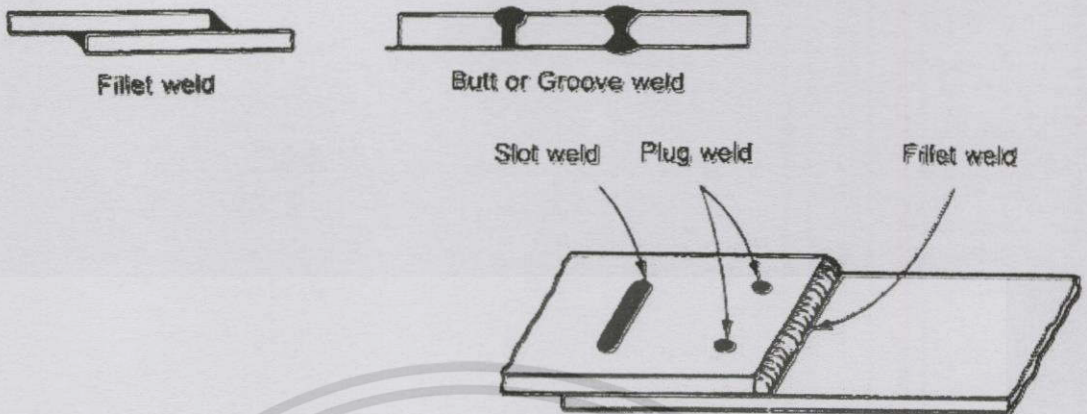


รูปที่ 9.2 การจำแนกแบบรอยต่อของรอยเชื่อม

การเชื่อมต่อชิ้นส่วนโครงสร้างอาจจำแนกตามลักษณะท่าของการเชื่อม (weld positions) เช่น การเชื่อมในแนวนราบ (flat weld) การเชื่อมในแนวนอน (horizontal weld) การเชื่อมในแนวตั้ง (vertical weld) หรือการเชื่อมในแนวเอียง (overhead weld) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้การเชื่อมในแนวนราบเป็นอันดับแรก ส่วนการเชื่อมในแนวนอน และในแนวตั้งเป็นอันดับรองลงมาตามลำดับ

นอกจากนี้ยังอาจจำแนกโดยพิจารณาจากลักษณะการทำรอยต่อระหว่างชิ้นโลหะ (joint types) เช่น ทำรอยต่อแบบต่อชน (butt joint) ทำรอยต่อแบบต่อทับหรือต่อเกย (lap joint) ทำรอยต่อแบบตัวที (tee joint) ทำรอยต่อแบบต่อขอบ (edge joint) หรือทำรอยต่อแบบต่อมุม (corner joint) เป็นต้น

อย่างไรก็ดี จากลักษณะท่าของการต่อ และการทำรอยต่อ ดังที่กล่าว อาจนำมาจำแนกประเภทของรอยต่อเชื่อม (weld types) ออกเป็น 3 ประเภทที่สำคัญ คือ ก) การเชื่อมแบบฟิลเลท (Fillet weld) หรือแบบพอก ที่เชื่อมตามแนวยาวหรือตามแนวขวางของชิ้นโลหะตรงส่วนที่ห้ามุมกัน ข) การเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) หรือแบบบากร่อง (Groove weld) ที่เชื่อมในร่องลึกตลอดความหนาของชิ้นโลหะ (complete penetration) หรือเพียงบางส่วนของความหนา (partial penetration) ของชิ้นโลหะนั้น และ ค) การเชื่อมอุดแบบปลั๊กหรือสลอต (plug หรือ slot weld) ในรูกลมหรือในร่องยาว



รูปที่ 9.3 ประเภทของการต่อเชื่อม

การเชื่อมแบบฟิลเลทหรือแบบพอก เป็นการต่อชิ้นโลหะที่วางทำมุมกันหรือซ้อนเกยกัน แล้วเชื่อมตามแนวยาวหรือตามแนวขวางตรงส่วนที่ทำมุมกัน ผิวของรอยเชื่อมอาจนูนออกหรือเว้าเข้าเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติถือว่ารอยเชื่อมนี้มีผิวเอียงเรียบเป็นเส้นตรง รอยเชื่อมต่อแบบฟิลเลท สามารถรับได้ทั้งแรงดึง แรงอัด และแรงเฉือน การต่อชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กโดยใช้การเชื่อมแบบนี้นิยมใช้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากทำได้ง่ายและราคาถูกกว่าการเชื่อมแบบอื่น

การเชื่อมแบบต่อชนหรือแบบบากร่อง เป็นการเชื่อมต่อตรงขอบปลายของชิ้นโลหะ 2 ชิ้นที่นำมาวางชนกัน การเชื่อมต้อมีทั้งแบบเชื่อมในร่องลึกเพียงบางส่วน (partial penetration) หรือตลอดความหนาของชิ้นโลหะ (full penetration) โดยอาจทำเป็นรูปตัววีเดี่ยวสำหรับชิ้นโลหะที่บาง หรือทำเป็นรูปตัววีคู่เมื่อชิ้นโลหะหนา ปกติ รอยเชื่อมแบบนี้จะใช้สำหรับรับแรงดึง หรือแรงอัดโดยตรง นิยมใช้ในการต่อชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากราคาค่อนข้างแพงเพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเตรียมขอบปลายที่จะเชื่อมไว้ก่อนล่วงหน้า

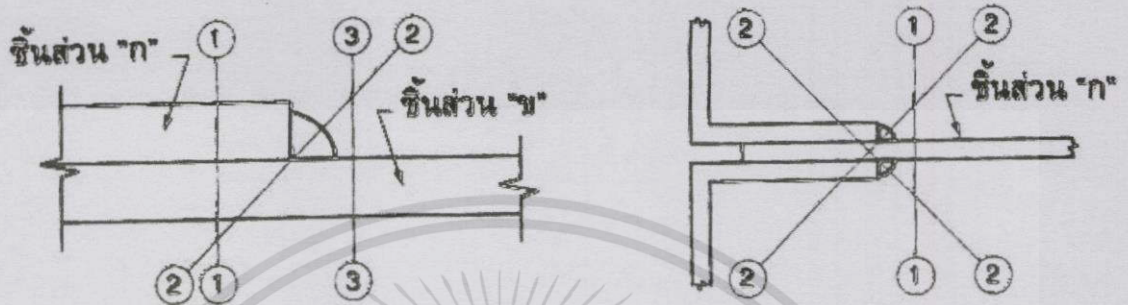
การเชื่อมอุดแบบปลั๊กหรือสลอท เป็นการต่อชิ้นโลหะ 2 ชิ้นที่นำมาซ้อนกัน โดยเจาะรูหรือทำร่องเตรียมไว้ก่อนแล้วจึงเชื่อมอุดลงไปในรูหรือในร่องให้ติดกัน การเชื่อมลักษณะนี้ใช้ถ่ายแรงเฉือนคล้ายกับการเชื่อมแบบต่อทาบ และช่วยป้องกันการหรือโค้งตัวของชิ้นโลหะที่นำมาซ้อนทาบกัน

9.3 การวิบัติของรอยต่อเชื่อม และเนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม

การวิบัติของรอยต่อเชื่อมอันเนื่องมาจากแรงกระทำ อาจเกิดได้ 2 แบบ คือ ก) เกิดการวิบัติที่รอยเชื่อม (weld metal) โดยปรากฏรอยร้าว (crack) ตรงรอยเชื่อม หรือ ข) เกิดการวิบัติที่ชิ้นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(base metal) ทั้งที่ชิ้นโลหะหลัก (main member) และหรือที่ชิ้นโลหะซึ่งนำมาต่อ (connecting member) อันเนื่องมาจากไม่สามารถรับ - ถ่ายแรงกระทำนั้นได้ตามต้องการ



รูปที่ 9.4 ระบายวิบัติจากการเฉือนของรอยเชื่อมต่อ

รูปที่ 9.4 แสดงระบายวิบัติจากการเฉือน (shear plane) ของรอยเชื่อมแบบฟิลเลทและของชิ้นโลหะที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำขนานกับแนวยาวของรอยเชื่อม กล่าวคือ ระบายวิบัติ 1-1 ที่ชิ้นส่วน "ก" หรือระบายวิบัติ 3-3 ที่ชิ้นส่วน "ข" ซึ่งนำมาต่อ เกิดขึ้นเพราะไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ ส่วนระบายวิบัติ 2-2 ตรงรอยเชื่อมต่อแบบฟิลเลท เกิดขึ้นเพราะรอยเชื่อมนั้นมีกำลังรับแรงเฉือนน้อยไป (ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงทิศทางของแรงที่กระทำ) อนึ่ง หากมีแรงกระทำตั้งฉากกับแนวของรอยเชื่อม ระบายวิบัติ 1-1 หรือ 3-3 พิจารณาได้จากกำลังรับแรงดึงของชิ้นส่วน โดยที่ระบายวิบัติ 2-2 ยังคงเหมือนเดิม

จากลักษณะวิบัติของรอยต่อเชื่อม ดังแสดง นั้นหมายความว่า เมื่อจะออกแบบหรือตรวจสอบหา กำลังรับแรงของรอยต่อเชื่อม ต้องพิจารณาทั้งกำลังรับแรงของรอยเชื่อม กำลังรับแรงของชิ้นโลหะหลัก และของชิ้นโลหะที่นำมาต่อ รวมถึงกำลังรับแรงดึงร่วมกับแรงเฉือน (BRS) ตรงรอยต่อเชื่อม (ถ้ามี)

การวิบัติของรอยเชื่อมจะเกิดบนระนาบที่มีเนื้อที่น้อยที่สุด ที่เรียกว่า เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม (effective weld area) ซึ่งปกติได้จาก ผลคูณระหว่างความหนาคอประสิทธิผล (effective throat thickness) กับความยาวของรอยเชื่อม (length of weld)

เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม (effective weld area : A_w)

รอยเชื่อมแบบฟิลเลท :

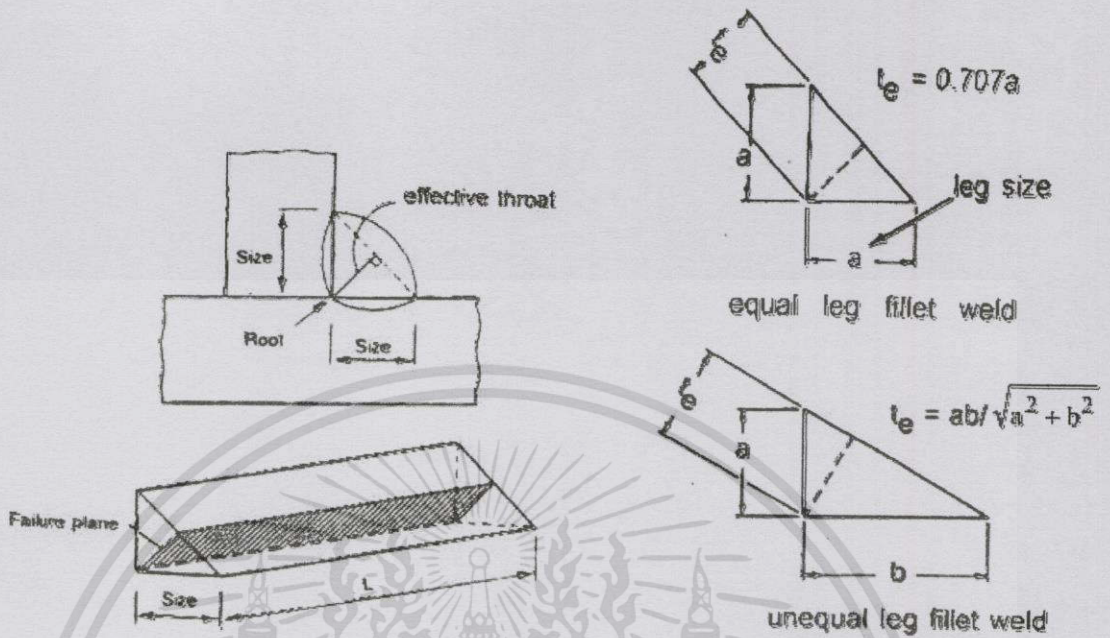
สำหรับรอยเชื่อมแบบฟิลเลท ถือว่าระนาบวิบัติ (failure plane) เกิดที่ คอเชื่อม (throat) เสมอไม่ว่าแรงกระทำในทิศทางใด ระยะคอเชื่อมเป็นระยะที่วัดจากมุมของการเชื่อม (roof of the weld) ไปตั้งฉากกับผิวเชื่อมซึ่งลากจากขาเชื่อมด้านหนึ่งไปยังขาเชื่อมอีกด้านหนึ่ง ในทางปฏิบัติถือว่าผิวเชื่อมนี้เอียงเรียบ ส่วนที่พอกนูนเหนือผิวเชื่อมถือเป็นส่วนเสริมกำลัง (reinforcement) ดังนั้นระยะคอเชื่อมจึงเป็นระยะที่สั้นที่สุดของระนาบวิบัติ เรียกระยะคอเชื่อมนี้ว่า ความหนาคอประสิทธิผล (effective throat thickness : t_e)

เมื่อยรอยเชื่อมแบบฟิลเลทมีขนาดขาเชื่อมเท่ากัน (equal leg fillet weld) และเชื่อมด้วยวิธี SMAW ความหนาคอประสิทธิผล (t_e) มีค่าเท่ากับ 0.707 เท่าของขนาดขาเชื่อม (leg size : a) ดังรูปที่ ฉะนั้น ถ้าให้ความยาวของรอยเชื่อม (length of weld) เท่ากับ L ดังนั้น

เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม (effective weld area) : $A_w = (0.707a)(L)$

เมื่อยรอยเชื่อมแบบฟิลเลทมีขนาดขาเชื่อมไม่เท่ากัน (unequal leg fillet weld) และเชื่อมด้วยวิธี SMAW โดยให้ขนาดขาเชื่อมด้านหนึ่งเท่ากับ a และขนาดขาเชื่อมอีกด้านหนึ่งเท่ากับ b ความหนาคอประสิทธิผล (t_e) มีค่าเท่ากับ $ab/\sqrt{a^2+b^2}$ ดังนั้น

เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม : $A_w = ab/\sqrt{a^2+b^2} (L)$



รูปที่ 9.5 เนื้อที่ประสิทธิภาพของรอยเชื่อมแบบฟิลเลท

ส่วนรอยเชื่อมแบบฟิลเลทที่มีขนาดขาเชื่อมเท่ากัน (equal leg fillet weld) และเชื่อมด้วยวิธี SAW มาตรฐาน AISC กำหนดให้หาเนื้อที่ประสิทธิภาพของรอยเชื่อม ดังนี้

$A_w = (a)(L)$ เมื่อขนาดขาเชื่อมเล็กกว่าหรือเท่ากับ 3 มม.

$A_w = (a + 3mm.)(L)$ เมื่อขนาดขาเชื่อมใหญ่กว่า 3 มม.

รอยเชื่อมแบบตอชนหรือแบบบากร่อง :

หากเชื่อมแบบบากร่องลึกตลอดความหนาของชิ้นโลหะ :

เนื้อที่ประสิทธิภาพ $A_w =$ (ความหนาของชิ้นส่วนที่บางกว่า)(ความยาวของรอยเชื่อม)

หากเชื่อมบากร่องลึกเพียงบางส่วนของความหนาของชิ้นโลหะ :

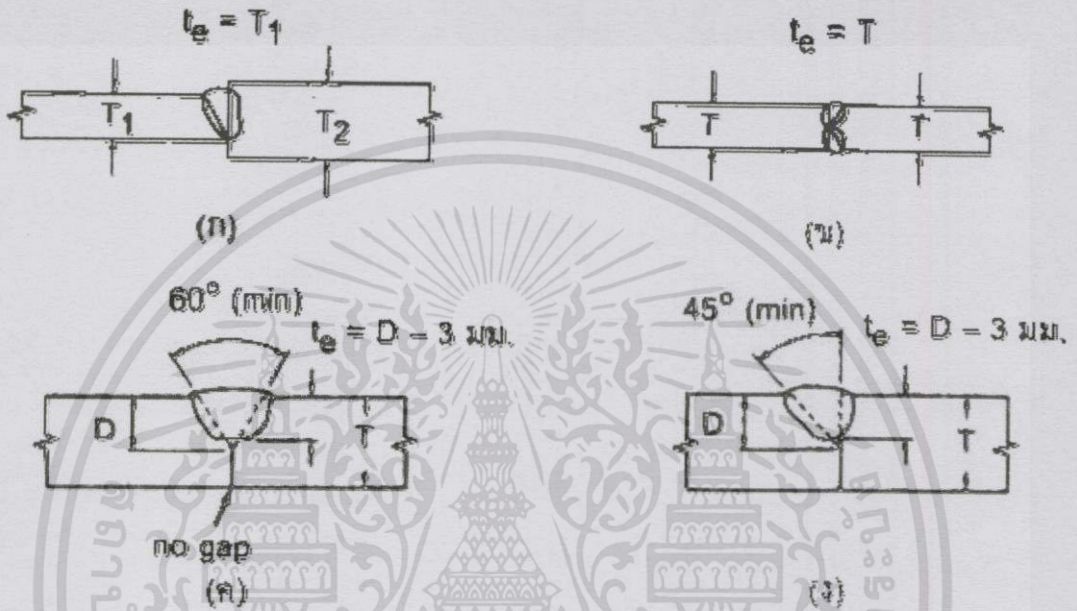
ถ้ารอยต่อแบบตัว J หรือตัว U : ความหนาคอประสิทธิภาพ = ความลึกของมุมที่ลบ

ถ้ารอยต่อแบบ Bevel หรือ V ซึ่งมุมรวมที่ร่อง ≥ 60 : ความหนาคอประสิทธิภาพ = ความลึกของมุมที่ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ารอยต่อแบบ Bevel หรือ V ซึ่งมุมรวมที่ร่อง ≥ 45 แต่ < 60 : ความหนาของประสิทธิผล = ความลึกของมุมที่ลบ - 3 มม.

ดังนั้น เนื้อที่ประสิทธิผล $A_w = (\text{ความหนาของประสิทธิผล})(\text{ความยาวของรอยเชื่อม})$



รูปที่ 9.6 ความหนาของประสิทธิผลของรอยเชื่อมแบบต่อชนหรือแบบบากร่อง รอยเชื่อมมุมแบบปลี๊กหรือสลอท :

เนื้อที่ประสิทธิผล $A_w = \text{เนื้อที่หน้าตัดของรูหรือร่องที่รับแรงกระทำ}$

9.4 กำลังของรอยต่อเชื่อม - มาตรฐาน AISC

มาตรฐาน AISC กำหนดให้พิจารณา กำลังของรอยต่อเชื่อมจากค่าน้อยระหว่างกำลังของลวดเชื่อม (Weld Metal) กับกำลังของชิ้นโลหะ (Base Metal) ที่นำมาต่อเชื่อม :

มาตรฐาน AISC/ASD : กำลังของลวดเชื่อม	= $F_w A_w$
กำลังของชิ้นโลหะ	= $F_{BM} A_{BM}$
มาตรฐาน AISC/LRFD : กำลังของลวดเชื่อม	= $\phi F_w A_w$
กำลังของชิ้นโลหะ	= $\phi F_{BM} A_{BM}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้	F_w	=	หน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ หรือหน่วยแรงประลัยที่ยอมให้ ของลวดเชื่อม
	F_{BM}	=	หน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ หรือหน่วยแรงประลัยที่ยอมให้ ของชิ้นโลหะ
	A_w	=	เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม
	A_{BM}	=	เนื้อที่หน้าตัดของชิ้นโลหะที่นำมาต่อเชื่อม
	ϕ	=	ตัวคูณลดกำลังต้านทาน (resistance factor)

ตาราง ให้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยต่อเชื่อมตามวิธี ASD และ ตารางที่ ให้ค่าหน่วยแรงประลัยของรอยต่อเชื่อมและค่าตัวคูณลดกำลังต้านทาน ตามวิธี LRFD โดยขึ้นกับประเภทของรอยเชื่อม (Types of weld) เมื่อหน่วยแรง (Stress) จากผลการกระทำของแรงดึง แรงอัด หรือแรงเฉือน ฉะนั้นเมื่อคูณหน่วยแรงที่ได้นั้นด้วย เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม (A_w) หรือ เนื้อที่หน้าตัดของชิ้นโลหะ (A_{BM}) จะได้กำลังของลวดเชื่อม หรือ กำลังของชิ้นโลหะที่ต้องการ ตามลำดับ

สังเกตจากตารางที่ (ตามวิธี ASD) ว่า หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของลวดเชื่อมสำหรับทุกประเภทของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ $0.3F_{Exx}$ ส่วนหน่วยแรงเฉือนประลัยของลวดเชื่อมในตารางที่ (วิธี LRFD) มีค่าเท่ากับ $0.6F_{Exx}$ สำหรับทุกประเภทของรอยเชื่อม แต่มีค่าตัวคูณลดกำลังต้านทาน ϕ ต่างกัน ในที่นี้ ค่า F_{Exx} เป็นกำลังรับแรงดึงประลัยของลวดเชื่อม

อนึ่ง มาตรฐานของ American Welding Society : AWS กำหนดชนิดของลวดเชื่อม (weld metal) ที่ต้องใช้คู่กัน (matching) กับเหล็กโครงสร้างชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้ เช่น

- ใช้ลวดเชื่อมชนิด E60 ($F_{Exx} = 60$ ksi หรือ 4200 ksc) คู่กับเหล็กที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 42 ksi เช่น เหล็กชนิด A7 ($F_y = 33$ ksi) , A36 ($F_y = 36$ ksi)
 - ใช้ลวดเชื่อมชนิด E70 ($F_{Exx} = 70$ ksi หรือ 4900 ksc) คู่กับเหล็กที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 55 ksi เช่น เหล็กชนิด A36 ($F_y = 36$ ksi) , A572 Grade 50 ($F_y = 50$ ksi)
- เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.1 สำหรับกำลังของชิ้นโลหะ (Base Metal) หรือของแผ่นโลหะประกบที่นำมาใช้เพื่อถ่ายแรง (connecting elements)

	ตามวิธี ASD	ตามวิธี LRFD
แรงดึงบนหน้าตัดทั้งหมด	$0.6F_y A_{gt}$	$0.9F_y A_{gt}$
แรงดึงบนหน้าตัดสุทธิ	$0.5F_u A_{nt}$	$0.75F_u A_{nt}$
แรงเฉือนบนหน้าตัดทั้งหมด	$0.4F_y A_{gv}$	$0.9(0.6F_y) A_{gv}$
แรงเฉือนบนหน้าตัดสุทธิ	$0.3F_u A_{nv}$	$0.75(0.6F_u) A_{nv}$
แรงเฉือนร่วมกับแรงดึง (BSR)	$0.3F_u A_{nv} + 0.5F_u A_{nt}$	$F_u A_{nt} \geq 0.6F_u A_{nv} : 0.75(0.6F_y A_{gv} + F_u A_{nt})$
		$\leq 0.75(0.6F_u A_{nv} + F_u A_{nt})$
		$F_u A_{nt} < 0.6F_u A_{nv} : 0.75(0.6F_u A_{nv} + F_y A_{nt})$
		$\leq 0.75(0.6F_u A_{nv} + F_u A_{nt})$

ทั้งนี้ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (A_{nt}) ของแผ่นโลหะประกบที่ใช้เพื่อถ่ายแรง ต้องไม่เกินกว่า $0.85A_g$

ตารางที่ 9.2 หน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยต่อเชื่อม - ตามวิธี ASD

ประเภทของรอยเชื่อม (Types of Weld) และหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจาก	หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress)	ชนิดของลวดเชื่อมที่ต้องการ (Required Weld Strength Level)
รอยเชื่อมแบบต่อชนและเชื่อมลึกตลอดความหนาของชิ้นโลหะ (Complete – Penetration Groove Weld)		
แรงดึงตั้งฉากกับเนื้อที่ประสิทธิผล	เท่ากับกับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	ใช้ชนิดลวดเชื่อมที่คู่กันกับชนิดของ เหล็ก
แรงอัดตั้งฉากกับเนื้อที่ประสิทธิผล	เท่ากับกับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มีกำลังเท่ากับ หรือน้อยกว่าชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้ คู่กันก็ได้
แรงดึงหรือแรงอัดขนานกับแรง ของรอยเชื่อม	เท่ากับกับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	
แรงเฉือนบนเนื้อที่ประสิทธิผล	$0.3F_{Exx}$	
รอยเชื่อมแบบต่อชนและเชื่อมลึกเพียงบางส่วนของความหนาของชิ้นโลหะ (Partial – Penetration Groove Weld)		
แรงอัดตั้งฉากกับเนื้อที่ประสิทธิผล	เท่ากับกับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มีกำลังเท่ากับ หรือน้อยกว่าชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้
แรงดึงหรือแรงอัดขนานกับแรง ของรอยเชื่อม	เท่ากับกับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	คู่กันก็ได้
แรงเฉือนขนานกับแนวของรอย เชื่อม	$0.3F_{Exx}$	
แรงดึงตั้งฉากกับเนื้อที่ประสิทธิผล	$0.3F_{Exx}$ ทั้งนี้ หน่วยแรงดึงในชิ้น โลหะที่นำมาต่อ (f_t) ต้องมีค่าไม่ เกินกว่า $0.6F_y$ ของชิ้นโลหะนั้น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.2 (ต่อ)

ประเภทของรอยเชื่อม (Types of Weld) และหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจาก	หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress)	ชนิดของลวดเชื่อมที่ต้องการ (Required Weld Strength Level)
รอยเชื่อมแบบฟิลเลท (Fillet Welds)		
แรงเฉือนบนเนื้อที่ประสิทธิผล	$0.3F_{Exx}$	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มีกำลังเท่ากับ หรือน้อยกว่าชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้ คู่กันก็ได้
แรงดึงหรือแรงอัดขนานกับแรง ของรอยเชื่อม	เท่ากับของชิ้นโลหะที่นำมา เชื่อมต่อ	
รอยเชื่อมแบบอุดรูหรืออุดร่อง (Plug and Slot Welds)		
แรงเฉือนขนานกับผิวสัมผัส (บนเนื้อที่ประสิทธิผล)	$0.3F_{Exx}$	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มีกำลังเท่ากับ หรือน้อยกว่าชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้ คู่กันก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 หน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยต่อเชื่อม - ตามวิธี LRFD

ประเภทของรอยเชื่อม (Types of Weld) และหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจาก	สำหรับชิ้นโลหะ หรือลวดเชื่อม (Material)	ตัวคูณลด กำลัง ϕ	กำลังระบุ (Nominal Strength) F_{BM} หรือ F_w	ชนิดของลวดเชื่อมที่ ต้องการ (Required Weld Strength Level)
รอยเชื่อมแบบต่อชนและเชื่อมลึกตลอดความหนาของชิ้นโลหะ (Complete - Penetration Groove Weld)				
แรงดึงตั้งฉากกับเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	F_y	ใช้ชนิดลวดเชื่อมที่คู่กันกับ ชนิดของเหล็ก
แรงอัดตั้งฉากกับเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	F_y	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มี กำลังเท่ากับหรือน้อยกว่า ชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้คู่ กันก็ได้
แรงดึงหรือแรงอัด ขนานกับแรงของรอย เชื่อม				
แรงเฉือนบนเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	$0.6F_y$	
	ลวดเชื่อม (Electrode)	0.8	$0.6F_{Exx}$	
รอยเชื่อมแบบต่อชนและเชื่อมลึกเพียงบางส่วนของความหนาของชิ้นโลหะ (Partial - Penetration Groove Weld)				
แรงอัดตั้งฉากกับเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	F_y	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มี กำลังเท่ากับหรือน้อยกว่า ชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้คู่ กันก็ได้
แรงดึงหรือแรงอัด ขนานกับแรงของรอย เชื่อม				
แรงเฉือนขนานกับแนว ของรอยเชื่อม	ชิ้นโลหะ (Base)	0.75	$0.6F_{Exx}$	
	ลวดเชื่อม (Electrode)			
แรงดึงตั้งฉากกับเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	F_y	
	ลวดเชื่อม (Electrode)	0.8	$0.6F_{Exx}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 (ต่อ)

ประเภทของรอยเชื่อม (Types of Weld) และหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจาก	สำหรับชิ้นโลหะ หรือลวดเชื่อม (Material)	ตัวคูณลด กำลัง ϕ	กำลังระบุ (Nominal Strength) F_{BM} หรือ F_w	ชนิดของลวดเชื่อมที่ ต้องการ (Required Weld Strength Level)
รอยเชื่อมแบบฟิลเลท (Fillet Welds)				
แรงเฉือนบนเนื้อที่ ประสิทธิผล	ชิ้นโลหะ (Base) ลวดเชื่อม (Electrode)	0.75	$0.6F_{Exx}$	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มี กำลังเท่ากับหรือน้อยกว่า ชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้คู่ กันก็ได้
แรงดึงหรือแรงอัด ขนานกับแรงของรอย เชื่อม	ชิ้นโลหะ (Base)	0.9	F_y	กันก็ได้
รอยเชื่อมแบบอุดรูหรืออุดร่อง (Plug and Slot Welds)				
แรงเฉือนขนาน กับผิวสัมผัส (บนเนื้อที่ประสิทธิผล)	ชิ้นโลหะ (Base) ลวดเชื่อม (Electrode)	0.75	$0.6F_{Exx}$	อาจใช้ชนิดลวดเชื่อมที่มี กำลังเท่ากับหรือน้อยกว่า ชนิดลวดเชื่อมที่ต้องใช้คู่ กันก็ได้

กำลังรับแรงเฉือนขาด (Shear Rupture) ของชิ้นโลหะ = $\phi F_n A_{nv} = 0.75(0.6F_u)(\text{net shear area})$

กำลังรับแรงดึงขาด (Tension Rupture) ของชิ้นโลหะ = $\phi F_n A_{nt} = 0.75(F_u)(\text{net tension area})$

ข้อจำกัดของการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD ให้ข้อจำกัดของการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ ไว้ ดังต่อไปนี้

สำหรับรอยเชื่อมแบบฟิลเลท (Fillet Welds) :

1. ขนาดเล็กสุดของขาเชื่อม ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นโลหะที่หนากว่า ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้ แต่ทั้งนี้ขนาดของขาเชื่อมต้องไม่เกินกว่าความหนาของชิ้นโลหะที่บางกว่า

ตารางที่ 9.4 ขนาดเล็กสุดของขาเชื่อมแบบฟิลเลท

ความหนาของชิ้นโลหะที่หนากว่า มม.	ขนาดเล็กสุดของขาเชื่อม มม.
ไม่เกินหรือเท่ากับ 6 มม.	3
เกินกว่า 6 ถึง 13 มม.	5
เกินกว่า 13 ถึง 19 มม.	6
เกินกว่า 19 มม.	8

2. ขนาดใหญ่สุดของขาเชื่อม ให้ใช้เท่ากับความหนาของชิ้นโลหะเมื่อชิ้นโลหะหนาไม่เกิน 6 มม. แต่ถ้าชิ้นโลหะหนาเท่ากับ 6 มม. หรือมากกว่า ให้ใช้ขนาดใหญ่สุดของขาเชื่อม เท่ากับความหนาของชิ้นโลหะ ลบด้วย 2 มม.

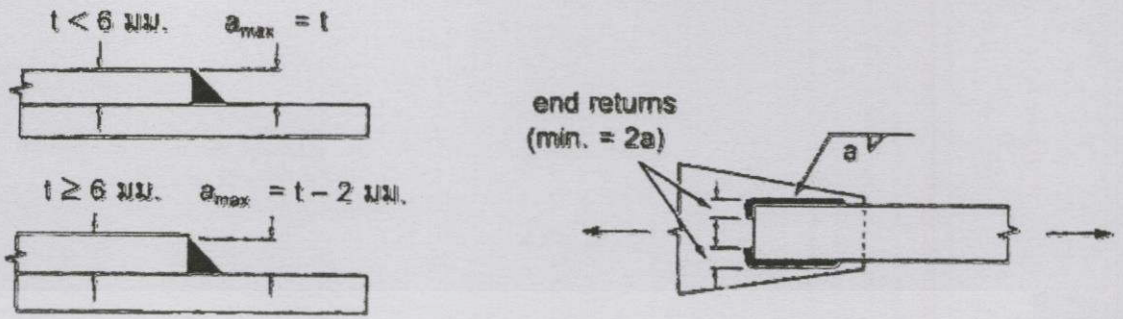
3. ความยาวของรอยเชื่อมต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดขาเชื่อม สำหรับการต่อแผ่นเหล็กแบน (Flat Bar) ให้รับแรงดึง ความยาวของรอยเชื่อมตามแนวยาวที่แต่ละข้างของปลายแผ่นเหล็กต้องไม่น้อยกว่าระยะห่างตั้งฉากระหว่างแนวเชื่อม ทั้งนี้ระยะห่างตั้งฉากระหว่างแนวเชื่อมไม่ควรเกิน 20 ซม. เว้นแต่ได้มีการพิจารณาถึงเนื้อที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล

4. ควรมีการเชื่อมอ้อมปลาย (End Return) โดยมีความยาวไม่น้อยกว่า 2 เท่าของขนาดขาเชื่อม ทั้งนี้ เพื่อช่วยลดความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress Concentration) และในการคำนวณออกแบบอาจพิจารณาให้รอยเชื่อมอ้อมปลายรับแรงกระทำด้วยก็ได้

5. ระยะทาบของแผ่นเหล็กที่นำมาต่อ อย่างน้อยเท่ากับ 5 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็กที่บางกว่า แต่ต้องไม่น้อยกว่า 25 มม.

6. ความยาวของรอยเชื่อมแบบเว้นระยะ ต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดขาเชื่อม หรือ 38 มม.

7. รอยเชื่อมแบบฟิลเลทในรูหรือร่องสามารถส่งถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อทาบ (Lap Joints) ได้ ทั้งนี้ไม่ให้พิจารณาว่ารอยเชื่อมแบบฟิลเลทในรูหรือร่องเป็นรอยเชื่อมแบบอูคูหรือแบบอูคูร่อง



รูปที่ 9.7 ขนาดขาฟิลเลท

สำหรับรอยเชื่อมแบบบากร่องในร่องลึกเพียงบางส่วน (Partial Penetration)

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD กำหนดความหนาของประสิทธิภาพต่ำสุด ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้ โดยกำหนดความหนาของชิ้นโลหะที่หนากว่าซึ่งนำมาเชื่อมต่อ ทั้งนี้ ขนาดของขาเชื่อมต้องไม่เกินกว่าความหนาของชิ้นโลหะที่บางกว่า ซึ่งนำมาเชื่อมต่อ

ตารางที่ 9.5 ความหนาของประสิทธิภาพต่ำสุดของรอยเชื่อมแบบบากร่องในร่องลึกเพียงบางส่วน

ความหนาของชิ้นโลหะที่หนากว่า มม.	ความหนาของประสิทธิภาพต่ำสุด มม.
ไม่เกิน หรือ เท่ากับ 6 มม.	3
เกินกว่า 6 ถึง 13 มม.	5
เกินกว่า 13 ถึง 19 มม.	6
เกินกว่า 19 ถึง 38 มม.	8
เกินกว่า 38 ถึง 57 มม.	10
เกินกว่า 57 ถึง 150 มม.	13
เกินกว่า 150 มม.	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรอยเชื่อมแบบอุดรู (Plug Welds) :

- 1.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่จะอุด \geq ความหนาของชิ้นส่วนที่เจาะรูบวกด้วย 8 มม. แต่ไม่เกินกว่า 2.25 เท่าของความหนาของรอยเชื่อม
- 2.ระยะระหว่างศูนย์กลางที่จะอุด \geq 4 เท่าของรูที่จะอุด

สำหรับรอยเชื่อมแบบอุดร่อง (Slot Welds) :

- 1.ความยาวของร่องที่จะอุด ≤ 10 เท่าความหนาของรอยเชื่อม และความกว้างของร่องที่จะอุด \geq ความหนาของชิ้นส่วนที่มีร่องบวกด้วย 8 มม. แต่ไม่เกินกว่า 2.25 เท่าของความหนาของรอยเชื่อม
- 2.ระยะห่างระหว่างแนวของรอยเชื่อมในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของรอยเชื่อมต้อง ≥ 4 เท่าของความกว้างของร่อง และระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของรอยเชื่อมในทิศทางขนานกับแนวเชื่อมต้อง ≥ 2 เท่าของความยาวร่อง

นอกจากนี้ ยังมีข้อกำหนดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเชื่อมแบบอุดรูและอุดร่อง คือ ต้องให้ความหนาของการเชื่อมแบบอุดรูและอุดร่องเท่ากับความหนาของชิ้นส่วนนั้น เมื่อชิ้นส่วนหนาไม่เกิน 16 มม. แต่เมื่อชิ้นส่วนหนาเกินกว่า 16 มม. ต้องเชื่อมหนาไม่น้อยกว่ากึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นส่วนนั้น แต่ต้องไม่น้อยกว่า 16 มม.

กำลังของรอยเชื่อมแบบฟิลเลท (fillet welds)

เนื่องจากการรับ-ถ่ายแรงของรอยต่อเชื่อมแบบฟิลเลทจะอยู่บนพื้นที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อมเสมอ ไม่ว่าแรงจะกระทำในทิศทางใดก็ตาม ดังนั้น จะหากำลังรับแรงเฉือนของลวดเชื่อมสำหรับรอยต่อเชื่อมแบบฟิลเลทที่มีขนาดขาเชื่อมเท่ากันได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้	size	=	ขนาดขาเชื่อม ซม.
	L	=	ความยาวของรอยเชื่อม (Length of weld) ซม.
	F_{Exx}	=	กำลังรับแรงดึงประลัยของลวดเชื่อม
		=	60 ksi หรือ 4200 ksc สำหรับ E60 electrode
		=	70 ksi หรือ 4900 ksc สำหรับ E70 electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี ASD : จากตารางที่ 9.2 หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของลวดเชื่อมเท่ากับ $0.3F_{Exx}$ ดังนั้น
 กำลังรับแรงเฉือนที่ยอมให้ของลวดเชื่อม : $P_w = (0.3F_{Exx})A_w$ กก.
 $= (0.3F_{Exx})(0.707 \times \text{size} \times L)$ กก.
 หรือ $= (0.3F_{Exx})(0.707 \times \text{size})$ กก./ซม.
 $= 890(\text{size})$ กก./ซม. (ลวดเชื่อมชนิด E60)
 $= 1040(\text{size})$ กก./ซม. (ลวดเชื่อมชนิด E70)

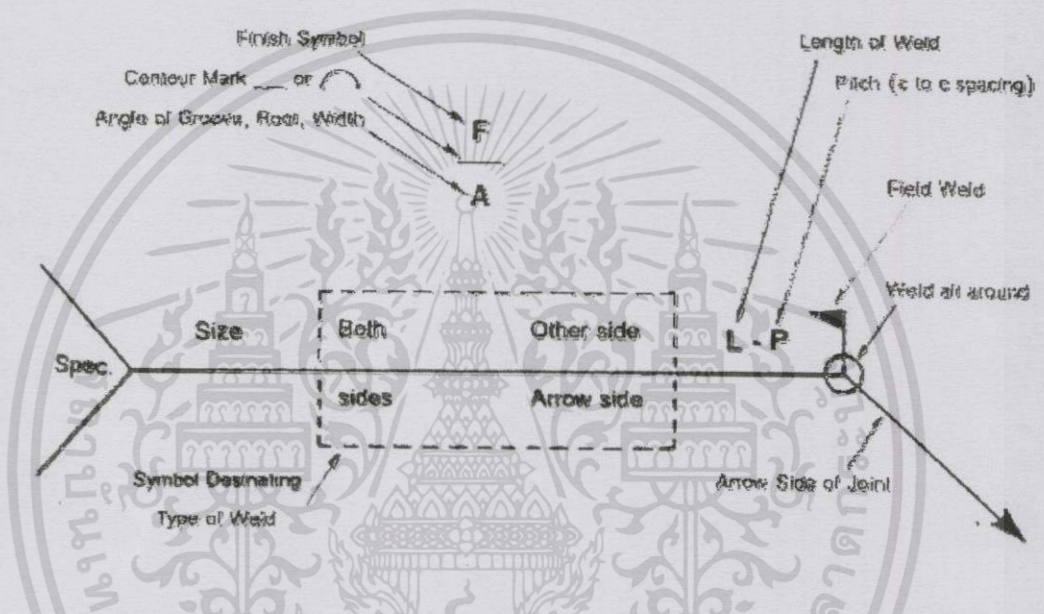
วิธี LRFD : จากตารางที่ 9.3 หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของลวดเชื่อมเท่ากับ $0.6F_{Exx}$ ดังนั้น
 กำลังรับแรงเฉือนที่ยอมให้ของลวดเชื่อม : $P_w = \phi F_w A_w$ กก.
 $= (0.75)(0.6F_{Exx})(0.707 \times \text{size} \times L)$ กก.
 หรือ $= (0.45F_{Exx})(0.707 \times \text{size})$ กก./ซม.
 $= 1335(\text{size})$ กก./ซม. (ลวดเชื่อมชนิด E60)
 $= 1555(\text{size})$ กก./ซม. (ลวดเชื่อมชนิด E70)

ดังนั้น ถ้าทราบค่าแรงเฉือนที่กระทำต่อหน่วยความยาว และรอยต่อนั้นขึ้นกับกำลังของลวดเชื่อม จะหาขนาดของขาเชื่อมที่ต้องการได้

9.5 สัญลักษณ์มาตรฐานของการเชื่อม

รูปที่ 9.8 แสดงสัญลักษณ์ของการเชื่อม ตามมาตรฐานอเมริกัน (American Welding Society) ซึ่งมาตรฐาน AISC ได้นำมาใช้ เป็นการเขียนบอกให้ช่างก่อสร้างทราบถึงลักษณะหรือวิธีการเชื่อม ขนาดขาเชื่อม ความยาวของรอยเชื่อม ตำแหน่งที่จะเชื่อม ลวดที่จะใช้ เป็นต้น โดยเขียนอธิบายบนเส้นตรงนี้ หรือใต้เส้นตรงนี้ซึ่งขึ้นกับว่าจะเชื่อมทางด้านไหนของหัวลูกศรที่ชี้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม

FUSION WELDING SYMBOLS											
TYPE OF WELD								Weld all around	Contour Desired		
FILLET	GROOVE or BUTT					PLUG & SLOT	Field weld		Flush	Convex	Concave
	Square	V	Bevel	U	J						



รูปที่ 9.8 สัญลักษณ์มาตรฐานของการเชื่อม

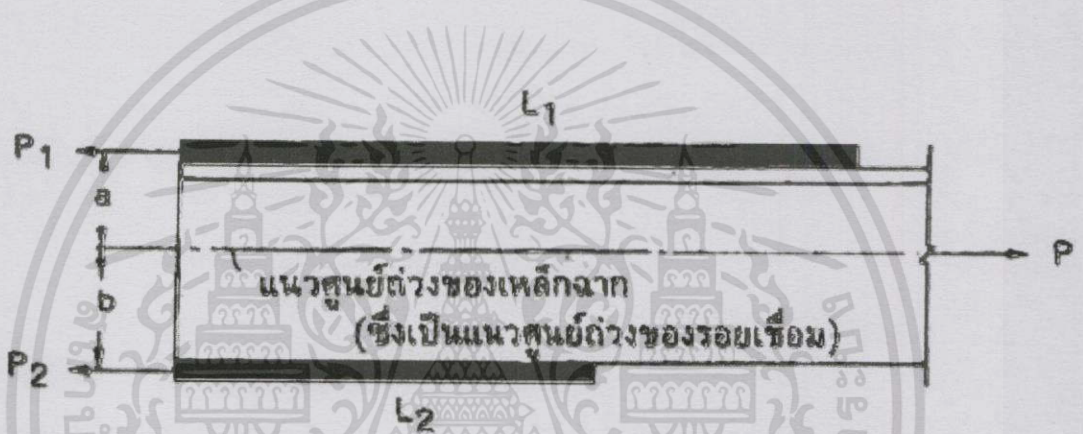
9.6 การวิเคราะห์หาหน่วยแรงบนรอยต่อเชื่อม

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนรอยต่อเชื่อมอาจเป็นหน่วยแรงดึง หน่วยแรงอัด หรือหน่วยแรงเฉือน ซึ่งวิเคราะห์หาค่าได้จากวิธีอีลาสติก (Elastic Analysis) นั่นคือ หาค่าได้จาก สูตรแรงในแนวแกน $f = P/A$ สูตรแรงดัด $f = Mc/I$ สูตรแรงบิด $f = Td/J$ สูตรแรงเฉือนในคาน $f = VQ/It$ ดังแสดงในรูปที่ 9.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบรอยต่อเชื่อมทั่วไปเพื่อรับแรงกระทำ เป็นการพิจารณาหาขนาดขาเชื่อมและความยาวของรอยเชื่อมที่ต้องใช้ ฉะนั้น ถ้าสมมติว่ากำลังรับแรงของลวดเชื่อมเป็นตัวควบคุมการออกแบบ เมื่อลองเลือกใช้ขนาดขาเชื่อม จะหาความยาวของรอยเชื่อมได้ และในทางกลับกันถ้าทราบความยาวของรอยเชื่อม จะหาขนาดของขาเชื่อมได้ ทั้งนี้ ขนาดขาเชื่อมที่นำมาใช้ต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดด้วย

สำหรับการเชื่อมต่อเหล็กฉากให้รับแรงร่วมศูนย์ ต้องพิจารณาจัดให้แนวศูนย์ถ่วงของรอยเชื่อมอยู่ในแนวเดียวกับแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กฉากที่รับแรงกระทำในแนวนั้น ดังรูปที่ 9.10 ซึ่งพิจารณาหาความยาวของรอยเชื่อมแต่ละด้านของเหล็กฉากได้ ดังนี้



รูปที่ 9.10 การออกแบบรอยเชื่อมสำหรับเหล็กฉาก

ให้ P เป็นแรงกระทำผ่านแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กฉาก ซึ่งรอยเชื่อมต้องรับแรงนี้

P_1 และ P_2 เป็นแรงต้านทานของลวดเชื่อมที่เชื่อมยาวเท่ากับ L_1 และ L_2 ตามลำดับ จากสมมูล

ของโมเมนต์รอบแนวเชื่อม L_2 จะหาได้ว่า แรงต้าน $P_1 = \frac{(P)(b)}{a+b}$

ในเมื่อ a และ b เป็นระยะที่ห่างจากแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กฉาก ดังแสดง ดังนั้น ถ้าให้ P_w เป็นกำลังรับแรงของลวดเชื่อมต่อหน่วยความยาว จะได้

$$\text{ความยาวของรอยเชื่อม } L_1 = P_1/P_w$$

ทำนองเดียวกัน จะหาได้ว่า แรงต้าน $P_2 = \frac{(P)(a)}{a+b}$ และความยาวของรอยเชื่อม $L_2 = P_2/P_w$ แต่ในกรณีที่

ทำรอยเชื่อมทางขวางตลอดความกว้างของขาเหล็กฉากด้วย จะหาได้ว่า

$$\text{ความยาวของรอยเชื่อม } L_1 = P_1/P_w - (a+b)/2 \text{ และ } L_2 = P_2/P_w - (a+b)/2$$

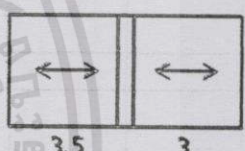
บทที่ 10

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาข้อมูลและนำมาออกแบบโปรแกรมคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ได้ผลดังนี้

10.1 การออกแบบคาน

Input Data			
f'_c	350 ksc	Slab Thickness	0 cm
f'_{ci}	280 ksc	Wal Height	0 m
w	2450 kg/m ³	Wal Weight	180 kg/m ²
f_{pu}	17500 ksc	Live Load, LL	200 kg/m ²
E_{ps}	2000000 ksc	ใช้ลวดอัดแรง, N	8 เส้น
d_b	5 mm	b	0.15 m
f_y	3000 ksc	h	0.3 m
E_s	2040000 ksc	l_1	3.5 m
$f_{y(stirup)}$	5000 ksc	b	3 m
$M_{pointload}$	0 kg-m		
d'_p	5 mm		
f_{py}	15000 ksc		



รูปที่ 10.1 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบคาน

Design Data			
b	0.15 m	z_t	2250 cm ³
h	0.3 m	z_b	2250 cm ³
l_1	3.5 m	A_c	450 cm ²
y_t	0.15 cm	e	9 cm
y_b	0.15 cm	e'	11 cm
I_g	33750 cm ⁴		

รูปที่ 10.2 แสดงข้อมูลหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Criteria

	Concrete	Tendon, Mild Steel
f'_c	350 ksc	f_{pu} 17500 ksc
f'_{ci}	280 ksc	f_{pi} 13125 ksc
E_c	306345 ksc	E_{ps} 2000000 ksc
E_{ci}	254345 ksc	d_b 5 mm
w	2450 kg/m ³	A_{ps} 0.1963 cm ² /tendon
		f_y 3000 ksc
		E_s 2040000 ksc
		$f_{y(stirrup)}$ 5000 ksc
		$M_{pointload}$ 0 kg-m
		f_{pi} 13125 ksc
		d_p' 5 mm
		A_{ps}' 0.1963 cm ² /tendon
		F_i' 2577 kg
		f_{py} 15000 ksc

**** มอก.95-2534**

รูปที่ 10.3 แสดงข้อมูลของคอนกรีตและเหล็ก

Allowable Stresses (F.I.T. Standard)**1. Allowable Stresses of Compression**

$\sigma_{c(allow)}$ 157.500 ksc

$\sigma_{ci(allow)}$ 168.000 ksc

2. Allowable Stresses of Tension

$\sigma_{t(allow)}$ -29.933 ksc

$\sigma_{ti(allow)}$ -13.387 ksc

$f_{t(allow)}$ -37.417 ksc

3. Reduction Factor

ϕ_{shear} 0.85 -

$\phi_{bending}$ 0.9 -

รูปที่ 10.4 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Load And Moment		
Slab Thickness		0 cm
Wall Height	0 m	180 kg/m ²
Live Load , LL		200 kg/m ²
Dead Load Beam , w _g		110.25 kg/m
Dead Load Wall , w _w		0 kg/m
Dead Load Slab , w _s		0 kg/m
Live Load , w _{LL}		650 kg/m
Total Load , w _T		760.25 kg/m
M _g		168.8203 kg-m
M _w		0 kg-m
M _s		0 kg-m
M _{SD} = M _w +M _s		0 kg-m
M _{LL}		995.3125 kg-m
M _D = M _g +M _{SD} +M _{pointload}		168.8203 kg-m
M _T = M _D +M _{LL}		1164.133 kg-m

รูปที่ 10.5 แสดงข้อมูลของแรง และ โมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preliminary Design					
F_t					3504.532 kg
Loss	20 %				0.20 -
η	80 %				0.80 -
N'	1.82 เส้น				
เสริมลวดอัดแรงทั้งหมด, N					8 เส้น
To Determine Losses Of Prestressed					
SH Loss due to Concrete					375 ksc
Shrinkage					
RH in Thailand is about					75 %
ES Loss due to Elastic Shortening					629.09 ksc
f_{cr}'					80.00 ksc
F_i					17318.03 kg
CR Loss due to creep of concrete					960.03 ksc
f_{crb}					0 ksc
RE Loss due to relaxation of Prestressing Steel					751.36 ksc
Total losses in Pretensioned members, Δf_s					2715.48 ksc
Δf_s	22.17 %	η			0.793106 -
To Determine Stressed Due To Working Load At Midspan					
F_{IT}					20616.7 kg
1) σ_{T1}	-3.355 ksc	\geq	σ_{allow}	ผ่าน	
2) σ_{T2}	94.985 ksc	\leq	σ_{allow}	ผ่าน	
3) σ_{T3}	43.053 ksc	\leq	σ_{allow}	ผ่าน	
4) σ_{T4}	30.251 ksc	\leq	σ_{allow}	ผ่าน	
Cracking Moment					
1) M_{cr}	2686.66 kg-m	\geq	M_T	ผ่าน	
Deflection					
1) 1) Camber due to Prestressing Force (Initial), Δ_{F1}					-0.2275 cm
1) 2) Deflection due to Dead load, Δ_{D1}					0.0251 cm
1) 3) Total Deflection (Initial), Δ_1					-0.2024 cm
1) 4) Camber due to Prestressing Force (Final), Δ_{F2}					-0.1511 cm
1) 5) Deflection due to Total load, Δ_2					0.1437 cm
1) 6) Total Deflection (Final), Δ					-0.0074 cm
1) ** $\sqrt{480}$					0.729167 cm

รูปที่ 10.6 แสดงจำนวนลวด และการสูญเสียแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

To Determine Stressed Due To Initial From Support

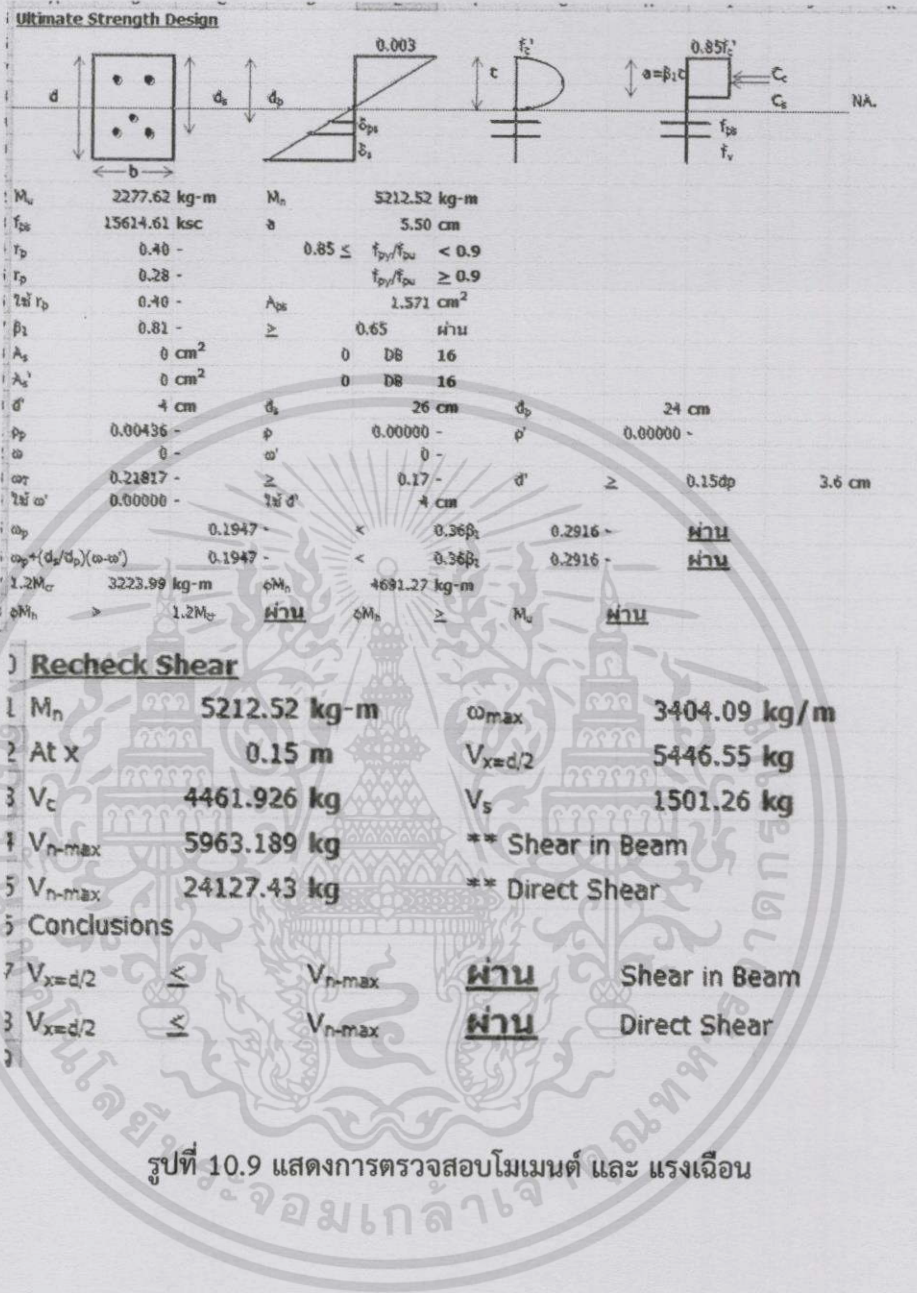
A) At x	50 cm	d_b	25 cm
M_d	44.79 kg-m	e	9 cm
เสริมลวดมัดแรง			8 เส้น
F_i			20616.7 kg
σ_{th}	-8.868 ksc	\geq	$\sigma_{th(allow)}$ ผ่าน
σ_{cl}	100.497 ksc	\leq	$\sigma_{cl(allow)}$ ผ่าน
B) At x	100 cm	d_b	50 cm
M_d	82.688 kg-m	e	9 cm
เสริมลวดมัดแรง			8 เส้น
F_i			20616.7 kg
σ_{th}	-7.183 ksc	\geq	$\sigma_{th(allow)}$ ผ่าน
σ_{cl}	98.813 ksc	\leq	$\sigma_{cl(allow)}$ ผ่าน

รูปที่ 10.7 แสดง Stress ที่ระยะต่างๆ

Shear In Beam	At x	0 m
V_d	192.94 kg	V_{SD} 0 kg
V_D	192.94 kg	V_{LL} 1137.5 kg
V_u	2602.99 kg	V_u/ϕ_{shear} 3062.35 kg
เหล็กเหล็ก	RB 2.8	s 22.50 cm
A_v	0.123 cm ²	V_n 82.100 kg
S_{max}	11.729 cm	A_{vmin} 0.071 cm ²
Direct Shear At End Beams		
V_d	192.94 kg	V_{SD} 0 kg
V_D	192.94 kg	V_{LL} 1137.5 kg
V_u	2603.0 kg	V_u/ϕ_{shear} 3062.3 kg
V_n	31500 kg	V_n 25200 kg
ใช้ค่า V_n	25200 kg	** เลือกใช้ V_n ค่าที่น้อย
μ	0.7 -	A_{vf} 0.875 cm ²
เหล็กเหล็ก	DB 16	A_v 2.011 cm ²
Use Top	2 DB 16	$A_{v(Top)}$ 4.021 cm ²
Use Bot	2 DB 16	$A_{v(Bot)}$ 4.021 cm ²
$A_{v(Total)}$	8.042 cm ²	

รูปที่ 10.8 แสดงแรงเฉือนในคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 การออกแบบเสา

Prestressed Concrete Pile		
Input Data		
Concrete Density		2450 kg/m ³
Compressive Strength of Concrete, f_c'		350 ksc
Tendon diameter, ϕ		5 mm
Tensile Strength of Prestressing Steel, f_{pu}		17500 ksc
Initial Prestress Factor, η		0.7 -
Prestress Losses		20 %
E_s		2040000 ksc
Safe Load, P		3 Tons
Impact Load, I_p		50 %
Use Tendon, N		8 pcs
b	0.20 m	
h	0.20 m	
l	3.00 m	
		0.20
รูปที่ 10.10 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบคาน		
Properties of Materials		
Concrete Density		2450 kg/m ³
Compressive Strength of Concrete, f_c'		350 ksc (Cylinder)
Tendon diameter, ϕ		5 mm
Tensile Strength of Prestressing Steel, f_{pu}		17500 ksc
Tendon Area, A_{ps}		0.1963 cm ²
Initial Prestress Factor, η		0.7 -
Prestress Losses		20 %
E_s		2040000 ksc

รูปที่ 10.11 แสดงข้อมูลของคอนกรีต และ ลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties of Section	
Width , b	20 cm
Effective Depth , d_p	17.5 cm
Length , l	3.00 m
Nominal Depth , A_c	400 cm^2
Moment Inertia , I	13333 cm^4
Section Modulus , $Z_b = Z_t$	1333 cm^3
Safe Load , P	3 Tons

รูปที่ 10.12 แสดงข้อมูลหน้าตัด

Allowable Stress	
f_{ci}'	280 ksc
$\sigma_{ti}(\text{Allow})$	-13.39 ksc
$\sigma_{ty}(\text{Allow})$	-29.93 ksc
$\sigma_{tr}(\text{Allow})$	-37.23 ksc
$\sigma_{ci}(\text{Allow})$	168.00 ksc
$\sigma_c(\text{Allow})$	157.50 ksc
$\sigma_{cc}(\text{Allow})$	105.00 ksc

รูปที่ 10.13 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loading	
Dead Load , w	98 kg/m
Impact Load , I _p	50 %
$M_{min} = 0.0214wl^2$	18.87 kg-m
$M_{max} = (1+I_p)M_{min}$	28.31 kg-m
Axial Force , $F_a = (M_{max}/Z_b + 6_{cr(Allow)})A_c$	869 kg
Force / Tendon = $f_{pu}\eta A_{ps}$	2405 kg
Required Tendon	0.52 pcs
Use Tendon , N	8 pcs
$F_i = f_{pu}\eta NA_{ps}$	19242 kg
F At 80 %	15394 kg

รูปที่ 10.14 แสดงแรง และ โมเมนต์

Cracking Moment		
$M_{cr} = (F/A_c - 6_{cr(Allow)})Z_b$	1010 kg-m	
At Driving		
$f_{pc} = F/A_c$	38.48 ksc	
$P_N = (0.33f'_c - 0.27f_{pc})A_c$	42 Tons	
$E_c = 4270(w^{1.5})f'_c$	306345 ksc	
$N_{cr} = E_c I_g^2 / l^2$	448 Tons	
$P_N = N_{cr} / 2$	224 Tons	
$F/A_c + P/A_c$	45.98 ksc	≤ $6_{cr(Allow)}$ OK
$T = F[(A_c - A_{ps}) + E_s/E_c A_{ps}] / (A_c - A_{ps})$	15.44 Tons	

รูปที่ 10.15 แสดงโมเมนต์แตกร้าว และ แรงที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

At Ultimate Strength Design				
$A_{ps} = NA_{ps}/2$	0.785	cm^2		
Steel Ratio, $\rho = A_{ps}/bd_p$	0.0022	-		
$f_{ps} = f_{pu}(1-0.5\rho f_{pu}/f_c')$	16518	ksc		
$q = \rho f_{ps}/f_c'$	0.106	-	<	0.3 OK
$a = A_{ps}f_{ps}/0.85f_c'b$	2.180	cm		
$\phi M_n = [A_{ps}f_{ps}(d_p-a/2)]$ for $q < 0.3$	2129	kg-m		
$\phi M_n/M_{cr}$	2.109	-	\geq	1.2 OK
$M_u = 1.4M_{min} + 1.7M_{min}I_p$	42	kg-m	<	ϕM_n OK

รูปที่ 10.16 แสดงการตรวจสอบโมเมนต์

Checking Stress Due to Bending Moment				
F/A_c	48.11	ksc	M_{min}/Z_b	1.42 ksc
F/A_c	38.48	ksc	M_{max}/Z_b	2.12 ksc
$F/A_c + M_{min}/Z_b$	49.52	ksc	\leq	$f_{cr}(\text{Allow})$ OK
$F/A_c - M_{min}/Z_b$	46.69	ksc	\leq	$f_{cr}(\text{Allow})$ OK
$F/A_c + M_{max}/Z_b$	40.61	ksc	\leq	$f_{cr}(\text{Allow})$ OK
$F/A_c - M_{max}/Z_b$	36.36	ksc	\leq	$f_{cr}(\text{Allow})$ OK

รูปที่ 10.17 แสดงการตรวจสอบโดยใช้ Stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.3 การออกแบบรอยเชื่อมในคาน

Input Data			
ความหนาของลวดเชื่อม, t			1.0 cm
ความยาวรอยเชื่อม, L			1.0 cm
j	0.90 -	d	0.27 m
พ	2000 kg/m	l	3.3 m
เหล็ก Dowel Bar	16	mm	จำนวน 4 เส้น
fy ของเหล็ก Dowel Bar			4000 ksc
เหล็กใช้ความยาวรอยเชื่อม			6 cm
ความยาวคาน, L			2.5 m
ความกว้างของคาน, b			0.15 m
ความสูงของคาน, h			0.3 m
Slab Thickness			11 cm
Wall Height			3 m
Wall Weight			180 kg/m ²
F _y ของเหล็ก			2400 ksc
เหล็กใช้เหล็ก (รอยต่อ)	1.5	" x	3 " x 2.3 mm
เหล็กเสริม	4	DB 12	
f' _c	350	ksc	e 4 cm
หตุผลของเหล็กใช้ขนาดเหล็กข้างเสา	0.18	x	0.28 m

รูปที่ 10.18 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบรอยเชื่อมในคาน

หน่วยแรงที่ยอมให้ (เชื่อมแบบต่อทาบ)	
F _v ของ E60	1260 kg/m ²
F _v ของ E70	1470 kg/m ²
เหล็กใช้หน่วยแรงเฉือน, F _v ของ E70	1470 kg/m ²
ความหนาของลวดเชื่อม, t	1.0 cm
ความยาวรอยเชื่อม, L	1.0 cm
กำลังของการเชื่อมแบบต่อทาบ, P _s	1039.29 kg/ความยาวรอยเชื่อม1cm

รูปที่ 10.19 แสดงหน่วยแรงที่ยอมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงของเหล็ก Dowel Bar			
j	0.90 -	d	0.27 m
w	2000 kg/m	l	3.3 m
M_{max}	2722.50 kg-m	T	11203.70 kg
เหล็ก Dowel Bar		16	จำนวน 4 เส้น
ค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นจริง ต่อ 1 ขา Dowel , P			2800.93 kg
หาขนาดเหล็ก Dowel Bar ที่ต้องการ			
f_y	4000 ksc	f_r	2600 ksc
A_s	1.08 cm ²	$A_{sเหล็กที่เลือก}$	2.01 cm ²
ความยาวรอยเชื่อม ต่อ 1 ขา Dowel , L			2.70 cm
เหล็กใช้ความยาวรอยเชื่อม			6 cm

รูปที่ 10.20 แสดงแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงใน Dowel Bar

รายการคำนวณเหล็กกล่องรับคาน	
ความยาวคาน , L	2.5 m
ความกว้างของคาน , b	0.15 m
ความสูงของคาน , h	0.3 m
น้ำหนักคาน , w_1	108 kg/m
น้ำหนักผนัง , w_2	540 kg/m
น้ำหนักพื้น , w_3	660 kg/m
น้ำหนักรวม , w	1308 kg/m
R_{max}	1635 kg

รูปที่ 10.21 แสดงข้อมูลของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบรอยต่อคาน					
F_y	2400 ksc	F_t	1440 ksc		
เหล็กใช้	[] - 1.5	" x	3 " x	2.3	mm
A	29.03 cm ²	S_y	9.22 cm ³	I_x	35.12 cm ⁴
A_{use}	29.03 cm ²	>	A_{req}	1.14 cm ²	<u>ผ่าน</u>
ตรวจสอบเหล็กเสริม		4 DB	12		
A_{use}	4.52 cm ²	>	A_{req}	1.14 cm ²	<u>ผ่าน</u>

รูปที่ 10.22 แสดงข้อมูลรอยต่อคาน

ออกแบบเพลาข้างเสา					
ทดลงเหล็กใช้ขนาดเหล็ก	0.18	x	0.28	m	
f_c'	350 ksc	f_y	2400 ksc		
หน่วยแรงกดที่ยอมรับได้ของคอนกรีต, q			24.69 ksc		
P_{max}	1625 kg	M_{max}	6540 kg-cm	e	4 cm
B	18 cm	C	28 cm		
q_{live}	6.02 ksc	q_{dead}	0.46 ksc		
ความหนาแผ่นเหล็ก, t			4.7 cm	f_p	1800 ksc
เหล็กใช้ขนาดเหล็ก	0.18	x	0.28	m	หนา 47 mm

รูปที่ 10.23 แสดงการเลือกแผ่นเหล็กข้างเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.4 การออกแบบรอยเชื่อมในเสา

รายการคำนวณเพดฐานเสา

Input Data	
ความกว้างเสา , b	20 cm
ความกว้างแผ่นเสา , B	22 cm
ความหนาเหล็ก , T	0.9 cm
หน่วยแรงของเหล็กรูปพรรณ , f_y	3000 ksc
หน่วยแรงของคอนกรีต , f_c'	350 ksc
แรง , P	12000 kg
โมเมนต์ , M	50 kg-m
หน่วยแรงของเหล็กมีดเหล็ก , f_y	2400 ksc
เหล็กใช้ DB	12 mm
เหล็กใช้หน่วยแรงเหล็ก , F_y ของ E60	
ความหนาของลวดเชื่อม , T	0.6 cm
ความยาวรอยเชื่อม , L	1 cm

รูปที่ 10.24 ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบรอยเชื่อมในเสา

ขนาดเสาและแผ่นเหล็กที่ใช้

ความกว้างเสา , b	20 cm
ความกว้างแผ่นเสา , B	22 cm
ความหนาเหล็ก , T	0.9 cm

คำนวณหาเพดฐานเสา

หน่วยแรงของเหล็กรูปพรรณ , f_y	3000 ksc
หน่วยแรงของคอนกรีต , f_c'	350 ksc
หน่วยแรงกดของคอนกรีตที่ยึดมโหฬาร , f_c	157.5 ksc
หน่วยแรงกดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นจริง , $q = (P/B^2) + (6M/B^3)$	
แรง , P	12000 kg
โมเมนต์ , M	50 kg-m
$q_{ดล}$	27.61 ksc
$q_{ด}$	21.98 ksc
แรงกระทำที่หน้าตัดวิกฤต (ขอมเสา) , V_x	7.30 kg
โมเมนต์กระทำที่หน้าตัดวิกฤต (ขอมเสา) , M_x	3.65 kg-cm
ความหนาแผ่นเหล็กฐานเสา , t	0.09 cm
e	0.5 cm
f_p	2250 ksc
เหล็กใช้เหล็กขนาด PL 220 x 220	x 0.9 mm

รูปที่ 10.25 แสดงข้อมูลเสา และการตรวจสอบความหนาของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาจำนวนและขนาด Anchor Bolt						
แรงดึงที่เกิดขึ้นจริง , T						238.1 kg
หน่วยแรงของเหล็กยึดเฟลต , f_y						2400 ksc
หน่วยแรงดึงของเหล็กยึดเฟลต , f_t						1440 ksc
เหล็กใช้	DB	12	mm	A_s	1.13 cm^2	
จำนวนที่ติดตั้งการ						0.64 ตัว
สรุปใช้	4	DB	12	mm		

รูปที่ 10.26 แสดงจำนวนของ Anchor Bolt

กำลังของรอยเชื่อมที่มีความยาว 1 cm		
F_v ของ E60		1260 ksc
F_v ของ E70		1470 ksc
เหล็กใช้หน่วยแรงเฉือน , F_v ของ E60		1260 ksc
ความหนาของฉลวดเชื่อม , T		0.6 cm
ความยาวรอยเชื่อม , L		1 cm
กำลังของการเชื่อมตต่อ 1 cm , P_s		534.49 kg/1cm
แรงเฉือนที่ฐานเสา , V		9000 kg
ขนาดของแกนเหล็กที่ใช้ (ฝั่งในเสา) , C		20 cm
ความยาวรอยเชื่อมรอบเสา , L_w		80 cm
กำลังของรอยเชื่อมที่สามารถรับได้ , P_w		42759 kg

รูปที่ 10.27 แสดงกำลังรอยเชื่อม และการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11

สรุปผลการดำเนินงาน

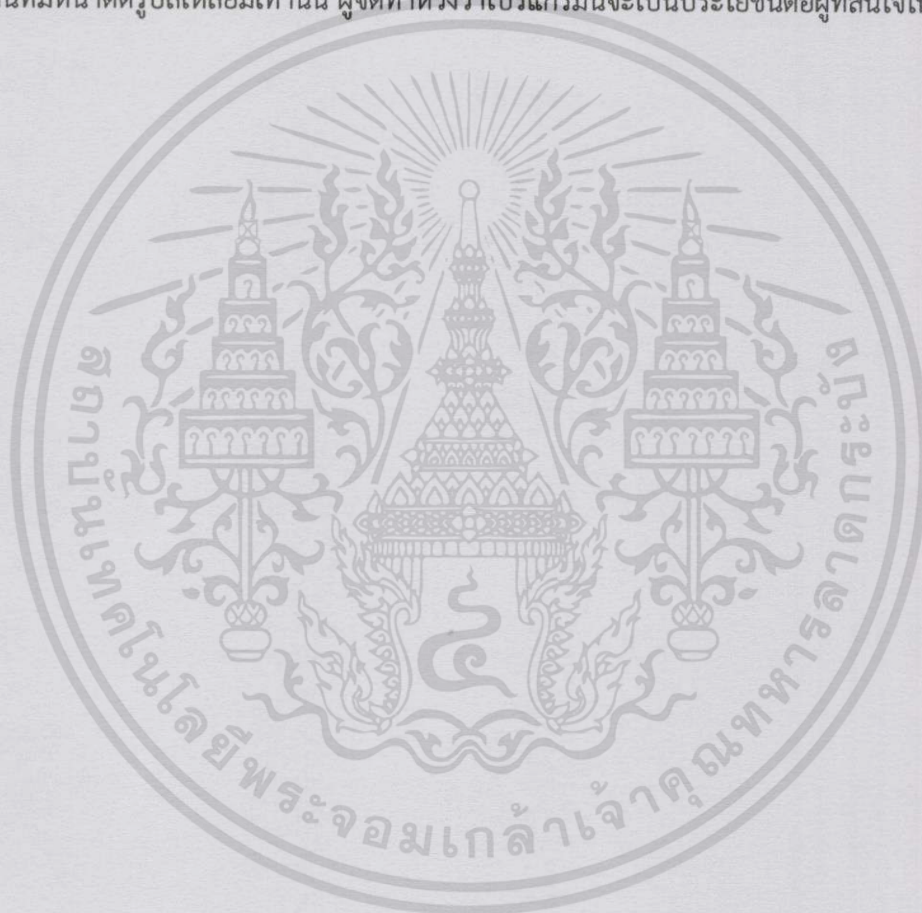
สรุปผลการดำเนินงาน

1. โปรแกรมที่ออกแบบ สามารถนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างเสา คาน prestressed concrete ระบบ pretension ได้จริง โดยที่จะสามารถออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างได้เฉพาะรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม เท่านั้น
2. โปรแกรมที่ออกแบบช่วยประหยัดเวลาในการออกแบบและมีความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณ
3. โปรแกรมที่ออกแบบง่ายสำหรับผู้ใช้งาน เนื่องจากถูกเขียนขึ้นมาจากโปรแกรม Microsoft Excel และมีผลการคำนวณที่ออกมาเป็นขั้นตอน
4. โปรแกรมที่ออกแบบสามารถใช้เป็นสื่อการสอนในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อให้ผู้ที่สนใจมีความเข้าใจมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

โปรแกรมที่ออกแบบสามารถนำไปใช้ออกแบบคานและเสา Pre-stressed Concrete ระบบ Pretension ได้จริง ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการออกแบบและผลการออกแบบมีความถูกต้องแต่ยังมีข้อจำกัดการใช้ในการออกแบบ เพราะโปรแกรมสามารถใช้ออกแบบได้เฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างเสาและคานที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น ผู้จัดทำหวังว่าโปรแกรมนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในการออกแบบ



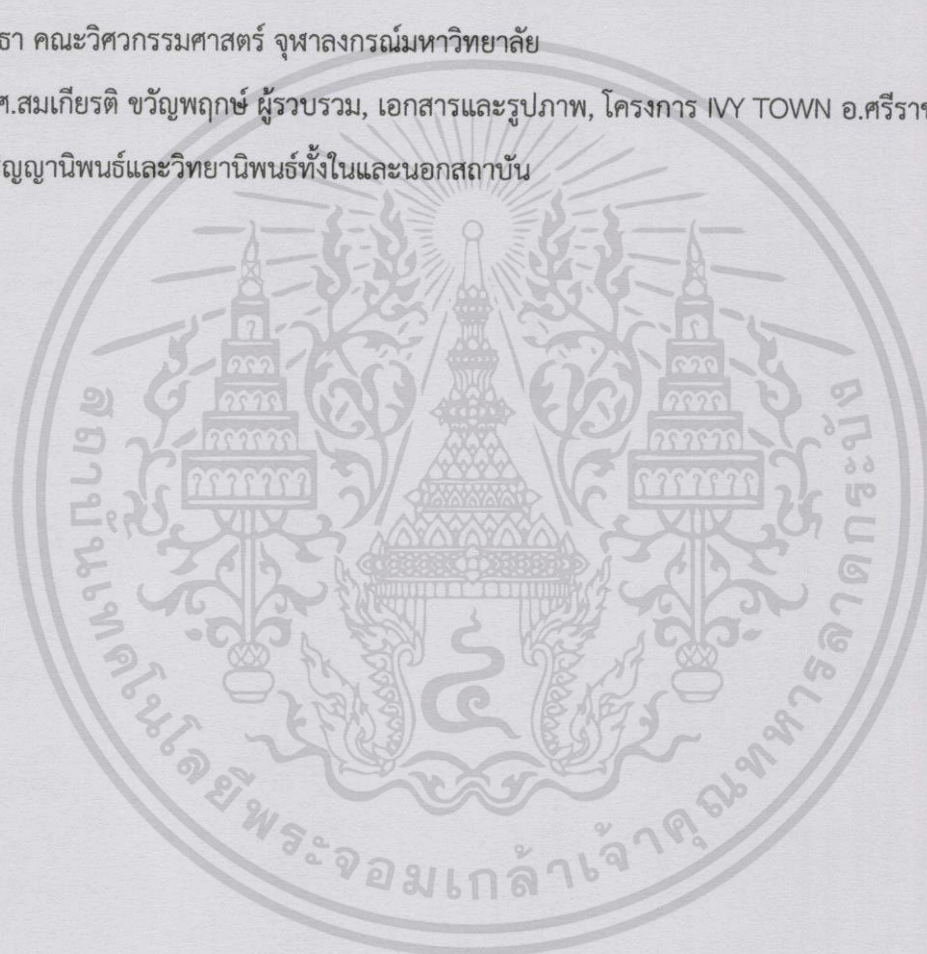
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

ดร.นเรศ พันธราธร, หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ศ.ดร.วินิต ซ่อวิเชียร และ ดร.วรนิติ ซ่อวิเชียร (2539), การออกแบบโครงสร้างเหล็ก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผ.ศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษดิ์ ผู้รวบรวม, เอกสารและรูปภาพ, โครงการ IVY TOWN อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี
 ปริญญาณิพนธ์และวิทยานิพนธ์ทั้งในและนอกสถาบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ดร.นเรศ พันธธาธร, หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย, หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.สมโพธิ วิวิธเกียรติ, หนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศ.ดร.วินิต ช่อวิเชียร และ ดร.วรรณิต ช่อวิเชียร (2539), การออกแบบโครงสร้างเหล็ก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผ.ศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์ ผู้รวบรวม, เอกสารและรูปภาพ, โครงการ IVY TOWN อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี
 ปริญญาโทและวิทยานิพนธ์ทั้งในและนอกสถาบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้