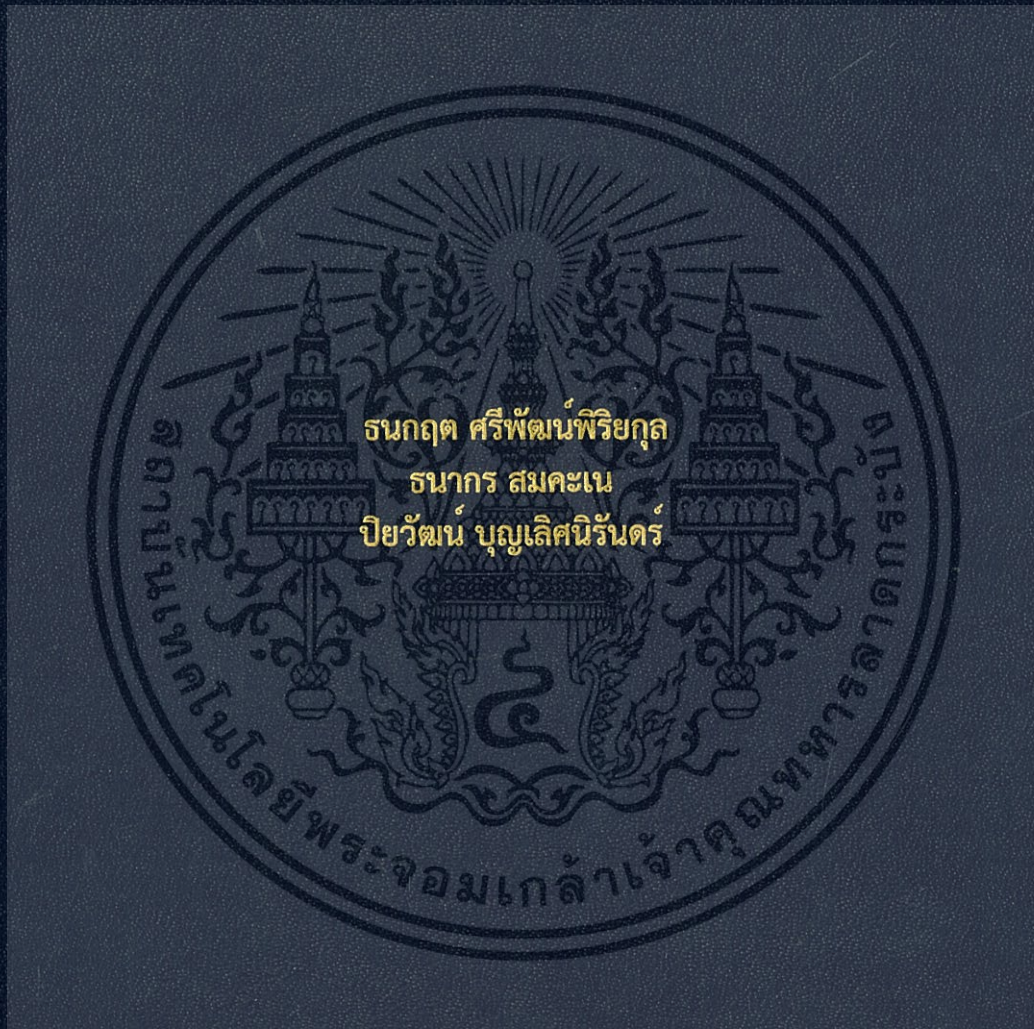


โปรแกรมออกแบบและประมาณราคาเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ  
DESIGN AND ESTIMATE BENDING MOMENT PROGRAM FOR  
I PILE SECTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

โปรแกรมออกแบบและประมาณราคาเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ  
DESIGN AND ESTIMATE BENDING MOMENT PROGRAM FOR  
I PILE SECTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND ESTIMATE BENDING MOMENT PROGRAM FOR  
I PILE SECTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ โปรแกรมออกแบบและประมาณราคาเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ  
DESIGN AND ESTIMATE BENDING MOMENT PROGRAM FOR  
I PILE SECTION

นักศึกษา นายธนกฤต ศรีพัฒน์พิริยกุล รหัสประจำตัว 57010536  
นายธนากร สมคะเน รหัสประจำตัว 57010583  
นายปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์ รหัสประจำตัว 57010778  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษช์  
อาจารย์อุบะ ศิริแก้ว

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ถิรเศรษฐ์	
ผศ.สมเกียรติ	ขวัญพฤษช์	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
อาจารย์ทรงกลด	แซ่ฮัง	
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรัสเกียรติ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 4/6/61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# โปรแกรมออกแบบและประมาณราคาเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ

นายธนกฤต ศรีพัฒนพิริยกุล รหัสประจำตัว 57010536

นายธนากร สมคะเน รหัสประจำตัว 57010583

นายปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์ รหัสประจำตัว 57010778

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์

อาจารย์อุบะ ศิริแก้ว

ปีการศึกษา 2560

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์ดัดโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel เนื่องจากในบริษัทขนาดเล็กยังไม่สามารถออกแบบเสาเข็มเองได้ โดยจะออกแบบตามรูปแบบเดิมๆ และส่วนใหญ่ในการเลือกใช้เสาเข็มจะคำนึงถึงกำลังรับแรงอัดเป็นหลักโดยไม่คำนึงถึงโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ซึ่งทางบริษัทจะไม่สามารถออกแบบตามกำลังรับแรงดัดที่ลูกค้าต้องการได้ โปรแกรมยังสามารถที่จะเป็นตัวช่วยเบื้องต้นในการเลือกใช้เสาเข็มอีกด้วย เพราะการเลือกใช้เสาเข็มไม่เหมาะสมกับงาน อาจส่งผลเสียต่องบประมาณค่าใช้จ่ายและผลเสียที่ร้ายแรงที่สุดอาจหมายถึงชีวิต โดยปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าและทันสมัยมากขึ้น สามารถเข้าถึงบุคคลทุกคน เพราะเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นความสำคัญของการเลือกใช้เสาเข็มและนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี

จากผลที่ได้ทำให้ทราบถึงการรับโมเมนต์ดัดที่เหมาะสมของเสาเข็มแต่ละขนาดได้แก่ I18TIS, I22TIS, I26TIS, I30TIS, I35TIS, I40TIS รับโมเมนต์ได้น้อยกว่า 100, 300, 700, 2000, 3000 และ 4000 ก.ก-ม ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้เสาเข็ม ทั้งขนาดหน้าตัดและจำนวนเหล็กเสริมให้มีความเหมาะสมกับงานที่ก่อสร้าง และประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN AND ESTIMATE BENDING MOMENT PROGRAM FOR

## I PILE SECTION

Mr. Tanakit Sriputpiriyagool Student ID. 57010536

Mr. Thanakorn Somcane Student ID. 57010583

Mr. Piyawat Boonlernirun Student ID. 57010778

Advisor Asst.Prof Somkait Khwanpruk

Uba Sirikaew

Academic Year 2017

### Abstract

The objective of this thesis is to study and design the bending moment of pile using Microsoft Excel. Generally, small shops can't design the piles themselves. It is designed according to the standard section that can't design according to Flexural Strength as customer demand. This program can be the basic guide for choosing the pile suitable to needed power. Selection of the pile that is not appropriate for the job may negatively affect the cost budget, and the most serious consequences mean life. Nowadays, technology is advanced, modern and accessible to everyone. For this reason, the research team is aware of the importance of choosing and applying the piles to technology.

As a result, each appropriate momentum of the pile such as I18TIS, I22TIS, I26TIS, I30TIS, I35TIS, I40TIS is less than 100, 300, 700, 2000, 3000, 4000 kg. -m the study results can help to make decision for choosing the piles, both section size and reinforced steel numbers, to be suitable for the construction work and save costs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ ตามความคาดหวังของคณะผู้จัดทำ เป็นเหตุมาจากความกรุณาจากอาจารย์ทั้งสองท่าน คือ อาจารย์ สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ และ อาจารย์ อุปะ ศิริแก้ว ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษา และคอยช่วยเหลือสอบถามความคืบหน้าของปริญญาานิพนธ์ และคอยตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ และชี้แนะความเป็นไปของปริญญาานิพนธ์จากประสบการณ์ของอาจารย์

ขอขอบคุณทางบริษัท

- ห้างหุ้นส่วน ร่มเกล้าคอนกรีต จำกัด
- บริษัท อรัญคอนกรีต จำกัด
- บริษัท สีนอุดมคอนกรีต จำกัด
- บริษัท ฉะเชิงเทราคอนกรีต จำกัด
- บริษัท เอเชียกรุ๊ป(1999) จำกัด

ที่มีความอนุเคราะห์ให้เข้าเยี่ยมชมบริษัท ให้ข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับเสาเข็ม ทั้งการดูขั้นตอนการผลิต และข้อมูลการคิดราคา และช่วยชี้แนะความเป็นไปของตัวโปรแกรม และประสบการณ์จริงในส่วนของหน้างาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยให้การสนับสนุนด้านการเรียนทั้งด้านทุนทรัพย์ และคอยให้กำลังใจจนการเรียนผ่านพ้นไปได้ด้วยดีขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งปวงให้แก่คณะผู้จัดทำ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ธนภุต ศรีพัฒน์พิริยกุล

ธนากร สมคะเน

ปิยวัฒน์ บุญเลิศนิรันดร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และนำออกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างคานและเสา.....	4
2.1.1 คอนกรีต.....	4
2.1.2 องค์ประกอบของคอนกรีต.....	5
2.1.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม.....	5
2.1.4 กำลังรับแรงของคอนกรีต.....	6
2.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณทำนายกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตที่เวลาใด ๆ.....	8
2.4 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต.....	8
2.5 คอนกรีตกำลังสูง.....	9
2.6 เหล็กเสริม.....	9
2.6.1 ชนิดของเหล็กเสริม.....	10
2.6.2 กำลังรับแรงของเหล็กเสริม.....	11
2.6.3 โมดูลัสของเหล็กเสริม.....	11
2.7 คอนกรีตอัดแรงคืออะไร.....	12
2.8 ข้อกำหนดในการออกแบบ.....	13
2.8.1 สถานการณ์ใช้งาน.....	13
2.8.2 สถานะประลัย.....	15
2.9 น้ำหนักบรรทุกทุกบนโครงสร้าง.....	19
2.10 เหล็กเสริมอัดแรง.....	21
2.10.1 ลวดอัดแรง.....	21
2.10.2 ลวดเกลียวอัดแรง.....	22
2.10.3 เหล็กเส้นอัดแรง.....	24
2.11 เหล็กเสริมไม่อัดแรง.....	25
2.12 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	26
2.12.1 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง.....	27
2.12.2 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา.....	29
2.13 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต.....	31
2.14 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง.....	33
2.15 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16	กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง.....	37
2.17	การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด.....	44
2.18	การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก.....	45
2.19	แนวเหล็กเสริมอัดแรง.....	50
2.20	การออกแบบสำหรับกำลังประลัยของหน้าตัด.....	52
บทที่ 3	วิธีดำเนินงาน.....	57
3.1	แผนผังการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	57
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	58
3.3	ตารางการดำเนินงาน.....	66
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน.....	67
4.1	ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น.....	67
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2	ข้อดีและข้อเสียของตัวโปรแกรม.....	79
5.3	ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้.....	80
	เอกสารอ้างอิง.....	81
	ภาคผนวก.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **VI** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	พฤติกรรมของคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ.....	4
รูปที่ 2.2	ภาพแสดงหน่วยแรงของคาน RC และ PC.....	5
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว.....	7
รูปที่ 2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่ต่างกัน.....	7
รูปที่ 2.5	แสดงเหล็ก RB และ DB.....	9
รูปที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเมื่อได้รับแรงดึง.....	11
รูปที่ 2.7	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง.....	13
รูปที่ 2.8	การเชื่อมลวดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	26
รูปที่ 2.9	หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว.....	35
รูปที่ 2.10	โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว.....	37
รูปที่ 2.11	การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย.....	39
รูปที่ 2.12	หน่วยแรงในคอนกรีต.....	45
รูปที่ 2.13	แผนภาพของแมกเนล.....	48
รูปที่ 2.14	บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแผนเหล็กเสริมอัดแรง.....	51
รูปที่ 2.15	การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว.....	52
รูปที่ 2.16	การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเหล็กเสริมทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง.....	55
รูปที่ 3.1	แผนผังการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	57
รูปที่ 3.2	แสดงหน้าตัดของเสาเข็มรูปไอ.....	58

รูปที่ 4.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	67
รูปที่ 4.2 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	68
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างของข้อมูลขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม.....	68
รูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างของข้อมูลขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม.....	69
รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	70
รูปที่ 4.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	70
รูปที่ 4.7 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	71
รูปที่ 4.8 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม.....	72
รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์.....	73
รูปที่ 4.10 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม.....	74
รูปที่ 4.11 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม.....	74
รูปที่ 4.12 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น.....	75
รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น.....	76
รูปที่ 4.14 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น.....	77
รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น.....	78
รูปที่ 4.16 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ **viii** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	กำลังของเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก. 27-2548.....	10
ตารางที่ 2.2	หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537).....	14
ตารางที่ 2.3	หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537).....	15
ตารางที่ 2.4	ระยะการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ของว.ส.ท. ปี 2537).....	16
ตารางที่ 2.5	ค่าตัวคูนน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537).....	17
ตารางที่ 2.6	ตารางแสดงค่าตัวคูนลดกำลังสำหรับกรณีต่าง ๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537).....	18
ตารางที่ 2.7	น้ำหนักบรรทุกทุกจรสำหรับอาคารประเภทต่าง ๆ.....	20
ตารางที่ 2.8	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421.....	21
ตารางที่ 2.9	คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534.....	22
ตารางที่ 2.10	คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงที่ต่ำตามมาตรฐาน ASTM A416.....	22
ตารางที่ 2.11	คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงที่ต่ำตามมาตรฐาน มอก. 420-2534.....	23
ตารางที่ 2.12	คุณสมบัติของเหล็กเส้นอัดแรง.....	24
ตารางที่ 2.13	คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง.....	26
ตารางที่ 2.14	การสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต.....	29
ตารางที่ 2.15	ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความผิดและการเข้าที่ของสมอยึด).....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงราคาต่อเมตรของแต่ละหน้าตัดจากบริษัทที่ทำการสำรวจ.....64

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเวลาการดำเนินงาน.....66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

เสาเข็มทั่วไปทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากตัวอาคารลงสู่พื้นดิน ในลักษณะงานเช่นนี้การออกแบบเสาเข็มจะไม่ใช้โมเมนต์มาร่วมคำนวณมากนัก เพราะเสาเข็มในงานฐานราก จะรับแรงเสียดทานกับดิน และแรงอัด เป็นส่วนมาก แต่ในงานบางประเภทเสาเข็มจะทำหน้าที่รับโมเมนต์มากเป็นพิเศษ จึงทำให้มีการออกแบบโครงสร้างของเสาเข็มที่ต่างกันแต่ลักษณะภายนอกเหมือนกัน

โดยในอดีตการออกแบบโครงสร้างของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงด้วยการคำนวณด้วยมือนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้เกิดความล่าช้า และเสียเวลาพอสมควรและในปัจจุบัน ถึงจะมีโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณแล้ว แต่ยังเป็นการใช้ในบริษัทใหญ่เท่านั้น ทางเราจึงเห็นว่าน่าจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในด้านการวิศวกรรมโยธา ถ้าได้มีโปรแกรมในการคำนวณและออกแบบเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

### 1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

มีงานหลากหลายประเภทที่เสาเข็มไม่ได้ทำหน้าที่รับแรงอัด แต่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ เช่นในงานกำแพงกันดิน เราทราบว่ากำแพงกันดินถูกสร้างขึ้นมาป้องกันการพังทลายของดินจากสาเหตุต่างๆ และยังสามารถใช้เป็นแนวเขตแดนที่ดินได้ เราจะกล่าวถึงเสาเข็มรูปตัวไอที่นำไปใช้รับกำแพงกันดิน

เสาเข็มรูปตัวไอ ในปัจจุบันถูกสร้างขึ้นมาเพื่อมีจุดประสงค์หลากหลาย ไม่สามารถสังเกตจากภายนอกได้ต้องดูจากเหล็กภายในจึงจะแยกได้ ในงานกำแพงกันดินนั้นหากนำเสาเข็มที่ออกแบบมาจากค่าโมเมนต์ที่น้อยเกินไป อาจส่งผลให้กำแพงกันดินนั้นพังได้ เพราะฉะนั้นการเลือกใช้เสาเข็มที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงเกินความจำเป็น และอีกทางคืออาจส่งผลถึงโครงสร้างอาจพังได้เช่นกัน โดยรูปแบบที่ทางผู้จัดทำจะนำมาศึกษาและวิจัย คนส่วนใหญ่มักซื้อเสาเข็มตามร้านที่ผลิตและจำหน่าย โดยจะเลือกใช้เสาเข็มจากน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการรับโมเมนต์ดัด ดังนั้นส่วนใหญ่แล้วจะเลือกซื้อและสั่งเสาเข็มตามหน้าตัดที่มีการผลิตอยู่แล้วตามร้านผลิตและจำหน่ายเสาเข็ม ซึ่งอาจมีผลต่อความไม่เหมาะสมกับสภาพของดินและโครงสร้างอาคาร เพราะเหตุนี้เนื้อหา ของโครง งานจึงมีความเหมาะสมสำหรับบุคคลทั่วไปที่ต้องการศึกษาการเลือกใช้เสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำมีความสนใจที่จะศึกษาและวิจัยความเหมาะสมในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม รวมไปถึงการเลือกใช้หน้าตัด จำนวนเหล็กของเสาเข็ม เพื่อความเหมาะสมและความปลอดภัยในการก่อสร้าง

### 1.3 วัตถุประสงค์

โครงการนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์ดัด แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 2) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรและห้างร้านที่ต้องการเลือกใช้เสาเข็มทั้งในงานกำแพงกันดินหรือโครงสร้างทั่วไป ที่เสาเข็มทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดเป็นหลัก
- 3) เพื่อศึกษาและวิจัยหาความเหมาะสมในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มแต่ละหน้าตัด โดยดูจากผลการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 4) เพื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนของเสาเข็มที่สามารถรับโมเมนต์ดัดเท่ากัน แต่ขนาดหน้าตัดและจำนวนเหล็กเสริมต่างกัน

### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ศึกษาลักษณะของเสาเข็มคอนกรีตรับแรงอัดรูปตัวไอ จากรูปแบบของหน้าตัดตามทีผลิตและจัดจำหน่ายตามท้องตลาด
- 2) กลุ่มตัวอย่างที่สำรวจเพื่อใช้ในการศึกษาคือ บริษัทที่รับผลิตและจำหน่ายเสาเข็มคอนกรีตรับแรงอัดรูปตัวไอ
- 3) เป็นการออกแบบด้วยวิธีการ pre-stressed concrete
- 4) จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการคำนวณหาค่ารับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มและออกแบบเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจากโมเมนต์ดัดที่กำหนดมา โดยทฤษฎีที่ใช้จะครอบคลุมในระดับปริญญาตรีเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจในที่มาของผลลัพธ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงระบบโครงสร้างของเสาเข็มรับโมเมนต์
- 2) เป็นประโยชน์ต่อ เจ้าของโครงการ วิศวกร และบุคคลทั่วไปโดยสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกขนาดเสาเข็มเบื้องต้นได้
- 3) สามารถเลือกใช้เสาเข็มรูปตัวไอที่มีความเหมาะสมในการรับโมเมนต์ตัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 4) ตัวโปรแกรมสามารถเป็นต้นแบบของการศึกษาและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างคานและเสา

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, (2533) [4] ได้กล่าวไว้ว่า กำลังของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุที่พยายามจะคงสภาพเดิมเมื่อได้รับแรงกระทำโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการแตกหักโดยคุณสมบัตินี้จะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตมีคุณสมบัติรับแรงอัดได้สูง แต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ เหล็กเส้นมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดี แต่ไม่สามารถรับแรงอัดได้ โดยในปริญญานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่วัสดุในการก่อสร้างเสาเข็มและคานรับโมเมนต์ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตและเหล็กเสริม

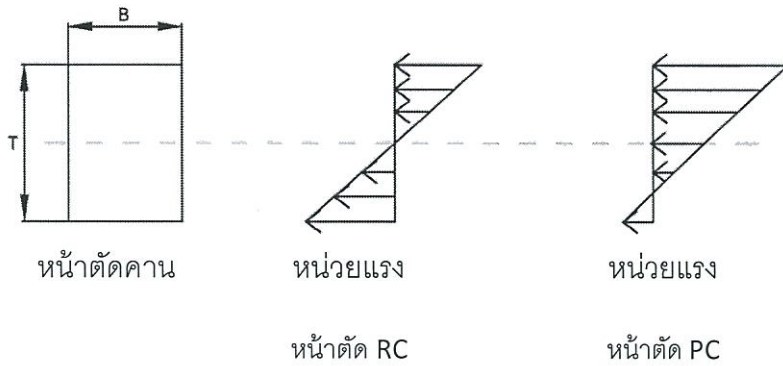
##### 2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุเสมือนหินที่มนุษย์สร้างขึ้นมาใช้งานเป็นโครงสร้าง โดยเกิดจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ทราย หิน กรวด และน้ำ โดยจากที่กล่าวมาข้างต้นคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้สูง ทำให้เป็นองค์ประกอบหลังของคานและเสา จะพบว่าเมื่อคานเสริมเหล็กและคานเสริมเหล็กอัดแรงรับน้ำหนักกระทำ บริเวณหลังคานจะมีพฤติกรรมรับแรงอัด ส่วนท้องคานจะมีพฤติกรรมรับแรงดึงในกรณีของคานเหล็กเสริมปกติ หรือไม่มีแรงดึงเลยในกรณีของเหล็กเสริมอัดแรง จึงเป็นเหตุผลให้คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นตัวโครงสร้างของคานเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 [4]



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงหน่วยแรงของคาน RC และ PC [4]

### 2.1.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุนิยมและได้รับการยอมรับเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตหาง่ายและต้นทุนไม่สูงนัก ในที่นี้เราสามารถแยกองค์ประกอบหลักของคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. วัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ น้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต
2. มวลรวม เช่น ทราย หินและกรวด

เมื่อนำส่วนประกอบต่าง ๆ ของวัสดุมาผสมเข้าด้วยกัน ก็จะมีชื่อเรียกเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ ที่ผสมกันดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต > ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย > มอร์ตาร์ (Mortar)

มอร์ตาร์ผสมกับหินและกรวด > คอนกรีต (Concrete)

### 2.1.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

1. ซีเมนต์เพสต์ ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกันและยังทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นเพื่อที่จะให้ส่วนผสมต่าง ๆ เทเข้าแบบหล่อได้ง่าย

คุณสมบัติ ซีเมนต์เพสต์จะมีคุณสมบัติดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ สารเคมีที่ประกอบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำและปูนซีเมนต์ ความสมบูรณ์ในการเกิดปฏิกิริยา

2. มวลรวม ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานที่กระจายอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ลดการยืหดตัวของคอนกรีต ราคาถูกช่วยให้ต้นทุนต่ำลง

คุณสมบัติ มวลรวมจะต้องมีความคงทนแข็งแรง สามารถทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้

3.น้ำ ทำหน้าที่ผสมกับปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ช่วยเคลือบมวลรวมให้เปียก เพื่อช่วยให้ซีเมนต์เพสต์เข้ายึดเกาะได้โดยรอบ และช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะเหลว สามารถเทลงแบบหล่อได้

คุณสมบัติ น้ำต้องไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เพื่อลดสารปนเปื้อนจากภายนอก

4.น้ำยาผสมคอนกรีต ทำหน้าที่เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตสดหรือที่แข็งตัวแล้วและให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ เช่น ลดหรือเร่งการก่อตัวของคอนกรีต เพิ่มแรงอัด ความสามารถในการเท เป็นต้น

5.คุณภาพของคอนกรีต คอนกรีตที่มีคุณภาพดีต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมและตรงตามลักษณะการใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีโดยรวมทั้งๆไป ต้องมีความชื้นเหลวสม่ำเสมอ มีความสามารถในการเทเข้าแบบหล่อได้ดี ไม่มีการแยกตัวของวัสดุผสมในขณะลำเลียงและเทคอนกรีต ไม่มีการเอีمن้ำบนผิวคอนกรีตมากเกินไป และเมื่อคอนกรีตมีสภาพแข็งตัวแล้วต้องสามารถรับกำลังได้ตามแบบที่กำหนด มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอและมีกำลังดีทั่วตลอดส่วนของโครงสร้าง หดตัวน้อย ปราศจากรอยแตกร้าว ภายในไม่มีโพรงหรือช่องว่างจากการเท

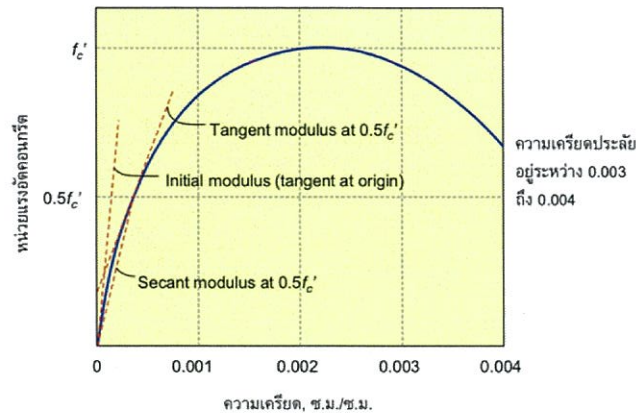
#### 2.1.4 กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงเป็นคุณสมบัติที่นักออกแบบต้องคำนึงถึงเป็นปัจจัยแรก กำลังรับแรงต้านทานสามารถแบ่งออกเป็น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงเฉือน หรือแม้แต่ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ถูกนับเป็นส่วนกับกำลังรับแรงของคอนกรีตด้วยเช่นกัน แต่ในการออกแบบจะคำนึงถึงกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงเป็นหลัก

### 2.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

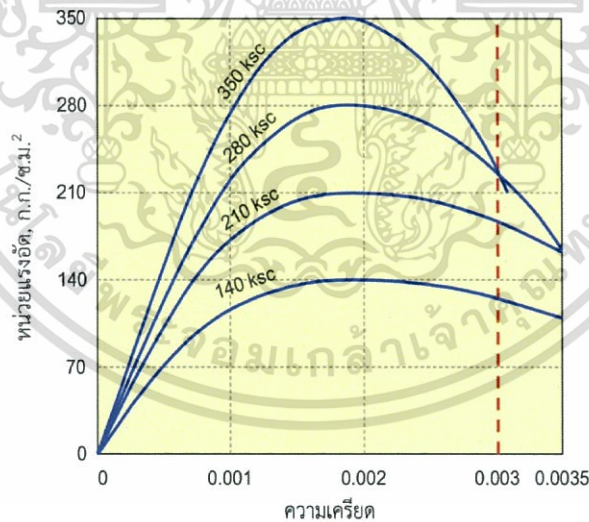
#### 2.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( modulus of elasticity pf concrete , $E_c$ )

เป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทาน (stiffness) ต่อการเสียรูป ( Deformation) เมื่อมีน้ำหนักหรือแรงมากระทำ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว [4]

รูปที่ 2.3 และ 2.4 คือกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ต่างกัน [4] เมื่อมีแรงมากระทำจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วย ตำแหน่งคอนกรีตมีหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเกิดขึ้นในขณะที่หน่วยการหดตัวประมาณ 0.002 และค่าสูงสุดของหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่แตกหัก มีตั้งแต่ 0.003-0.008 โดยในการออกแบบด้วยวิธีกำลังประลัย (ultimate strength design) จะใช้ค่าหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่แตกหักเท่ากับ 0.003



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่ต่างกัน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การคำนวณทำนายกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตที่เวลาใด ๆ

หลังจากการหล่อคอนกรีตจะพบว่ากำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามกาลเวลา โดยอัตราการเพิ่มกำลังมีค่ามากในช่วงแรกและค่อยๆ ซาลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามวิธีการบ่มและชนิดของซีเมนต์ที่ใช้ ในมาตรฐานของ ACI - 209(1978) มีสูตรทำนายกำลังของคอนกรีตที่เวลาใด ๆ ถ้ารู้กำลังอัดที่ 28 วันโดย

$$f'_c(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c(28) \quad (2.3.1)$$

โดยที่  $f'_c(t)$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ  $t$  วัน

$f'_c(28)$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

$\alpha, \beta$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์และวิธีการบ่ม

สำหรับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา ชนิดที่ 1

บ่มความชื้นธรรมดา  $\alpha = 4.0$   $\beta = 0.85$

บ่มด้วยไอน้ำ  $\alpha = 1.0$   $\beta = 0.95$

สำหรับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้กำลังสูงเร็วในช่วงแรก ชนิดที่ 3

บ่มความชื้นธรรมดา  $\alpha = 2.3$   $\beta = 0.92$

บ่มด้วยไอน้ำ  $\alpha = 0.7$   $\beta = 0.98$

## 2.4 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตในการรับแรงดึงจะมีค่าน้อยกว่ากำลังในการรับแรงอัดมาก (กำลังรับแรงดึงมีค่าประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด) ค่าที่นิยมบอกกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตคือ ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture,  $R$ ) แต่ในทางปฏิบัติจะไม่คิดกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเลย โดยมาตรฐาน ว.ส.ท. ได้กำหนดไว้ให้ค่าโมดูลัสการแตกหักของคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R = 2.0\sqrt{f'_c} \quad (2.4.1)$$

เมื่อ  $f'_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีหน่วยเป็น กก/ซม<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

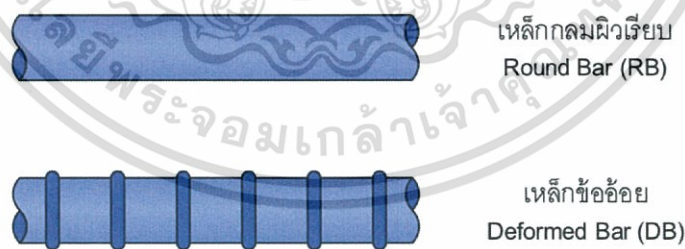
## 2.5 คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete, HSC)

คอนกรีตกำลังสูง หมายถึง คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า  $400 \text{ กก/ซม}^2$  โดยคอนกรีตกำลังสูงเป็นที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น เช่น การทำเสาเข็มคอนกรีต พื้นสำเร็จรูป คานสะพาน คอนกรีตชนิดนี้จะมีการหดตัวหรือยุบตัวน้อยมากหรืออาจไม่มีเลย จึงไม่เหมาะนำคอนกรีตชนิดนี้ไปทำงานในหน่วยงานก่อสร้างเพราะเทคอนกรีตได้ยาก

คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง นอกจากคอนกรีตจะสามารถรับกำลังได้สูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงดึงจะสูงขึ้นด้วย การล้าของคอนกรีตจะน้อยลง มีความทนทานและต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้มากขึ้น หน่วยการหดตัวที่กำลังประลัยมีค่าลดลง ดังนั้น อาจต้องปรับปรุงสมมติฐานการคำนวณออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กำลังสูงในบางส่วน

## 2.6 เหล็กเสริม (Reinforcing bars, Rebar's)

คุณสมบัติในการรับแรงดึงของเหล็กเส้นที่ใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็ก จัดเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากว่าเหล็กเส้นที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะทำหน้าที่รับแรงดึงถึงแม้ว่าบางครั้งอาจจะใช้รับแรงอัดก็ตาม เมื่อคานรับน้ำหนักกระทำตามรูปที่ 2.1 [4] จะพบว่าที่บริเวณท้องคานจะมีพฤติกรรมรับแรงดึง กล่าวคือคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้จึงจำเป็นต้องใส่เหล็กเสริมเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงให้กับคาน โดยในงานก่อสร้างทั่วไปจะใช้เหล็กกล้าละมุนหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลิตขึ้นแบบรีดร้อน



รูปที่ 2.5 แสดงเหล็ก RB และ DB [4]

### 2.6.1 ชนิดของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 ประเภทดังรูปที่ 2.5 [4] ได้แก่ เหล็กเส้นกลม (Round Bar) และเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าละมุน ซึ่งคุณสมบัติรับแรงดึงของเหล็กเสริมถูกนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 1. เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round Bar, RB)

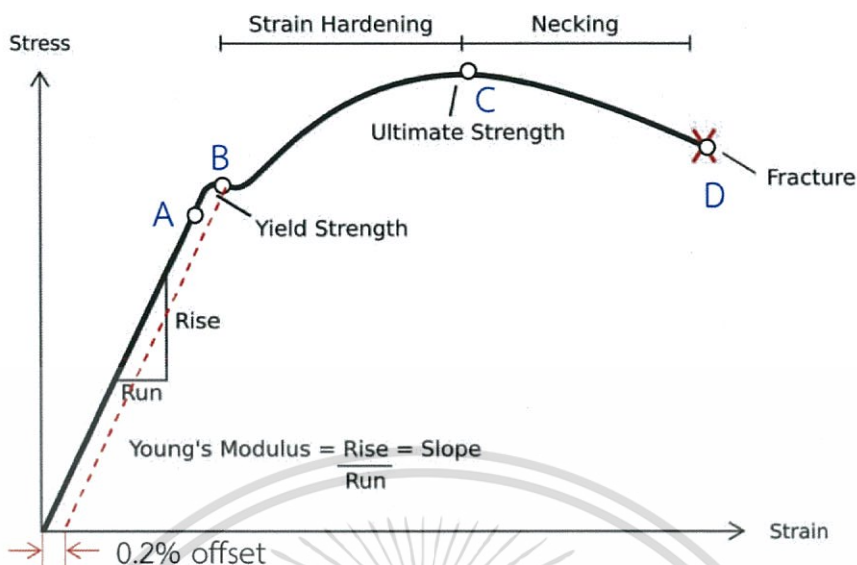
เป็นเหล็กที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวเหล็ก มีขนาดตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2543 กำหนดไว้เพียงชั้นคุณภาพเดียว โดยใช้สัญลักษณ์ SR 24 มีคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงคือ

- ความต้านทานแรงดึง สูงสุด  $F_u$  ต้องไม่น้อยกว่า 385 MPa (3900 ksc)
- ความต้านแรงดึงที่จุดคราก  $F_y$  ต้องไม่น้อยกว่า 235 MPa (2400 ksc)
- ความยืด ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 21

#### 2. เหล็กเส้นข้ออ้อย (Deformed Bar, DB)

เป็นเหล็กที่มีหน้าตัดกลม แต่ผิวตามแนวความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือปล้องหรือเรียบเกลียวซึ่งผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 27-2548 กำหนดไว้ 3 ชั้นคุณภาพคือ SD 30, SD 40 และ SD 50 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [1]  
ตารางที่ 2.1 กำลังของเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก. 27-2548 [3]

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงดึง MPa (ksc)	ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก MPa (ksc)	ความยืด %
SD 30	480 (4900)	295 (3000)	17
SD 40	560 (5700)	390 (4000)	15
SD 50	620 (6300)	490 (5000)	13



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเมื่อได้รับแรงดึง [3]

### 2.6.2 กำลังรับแรงของเหล็กเสริม

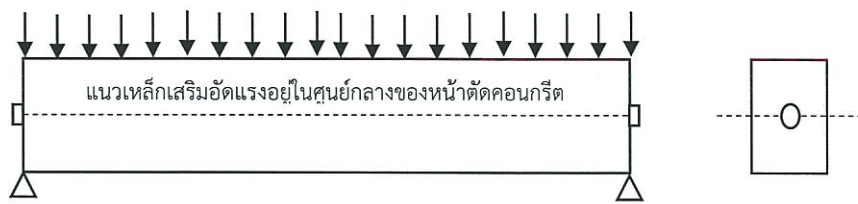
จากรูปที่ 2.6 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อเหล็กได้รับแรงดึงจะพบว่าเมื่อเหล็กรับแรงดึงตั้งแต่ 0 ไปจนถึงจุดคราก (Yield Strength point) ที่จุด B ในช่วงนี้เหล็กจะมีการยืดและคืนตัวตามปกติ (Elastic) และเมื่อเกินจุดนี้ไปเหล็กจะไม่คืนตัวหรือคืนตัวในอัตราส่วนที่ไม่เท่าเดิม (Fracture) ในทางการออกแบบของวิศวกรจะใช้ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength point) ไปออกแบบเพราะเหล็กยังไม่สูญเสียรูปร่างนั่นเอง [3]

### 2.6.3 โมดูลัสของเหล็กเสริม (Modulus of elasticity)

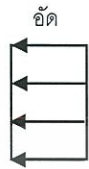
คือ ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กเสริมเมื่อวัสดุมีแรงมากระทำ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความเค้นและความเครียดซึ่งแปรผันตรงซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [3]

## 2.7 คอนกรีตอัดแรงคืออะไร

นเรศ พันธธาร, (2541) [2] ได้กล่าวไว้ว่า การอัดแรง (Prestress) หมายถึง การให้ความเค้น (Stress) แก่องค์อาคาร (Member) แม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง คือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วย คอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเพียงแต่วางเหล็กในเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการ แต่ในคอนกรีตอัดแรง เหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้ง ๆ ที่ยังมีได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัดส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง สภาพเช่นนี้ จะทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงหน่วยแรงดึงสูงๆ และคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุเปราะรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต เมื่อพิจารณาคานคอนกรีต ดังรูปที่ 2.7 [2] สำหรับคานคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำดังรูป (ก) ผลของโมเมนต์จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวบนและหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตดังรูป (ค) แต่สำหรับคานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต จะเป็นผลรวมของหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงในรูป (ข) และหน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอกในรูป (ค) ซึ่งผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานคอนกรีตทั้งผิวบนและผิวล่างแสดงไว้ดังรูป (ง) จะเห็นว่าผลของโมเมนต์ภายนอกก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีต แต่เนื่องจากคานคอนกรีตอัดแรงได้รับหน่วยแรงอัดไว้ก่อนแล้วเมื่อรับโมเมนต์จากภายนอก หน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตจะหักล้างกับหน่วยแรงอัดที่ได้จากการอัดแรง หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากรับโมเมนต์จากภายนอกจะไม่มีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึง ดังนั้นการอัดแรงจึงเป็นการช่วยในพฤติกรรมการรับแรงดึงในคอนกรีต



(ก) คานคอนกรีตอัดแรง



ตัด

(ข) หน่วยแรงเนื่องจากการตัดแรง



ตัด

(ค) หน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก



ตัด

(ง) ผลรวมหน่วยแรงจาก (ข) และ (ค)

รูปที่ 2.7 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง [2]

## 2.8 ข้อกำหนดในการออกแบบ

นเรศ พันธธรร, (2541) [2] ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบคอนกรีตอัดแรง มีขั้นตอนมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากการที่มีขั้นตอนการทำงานที่มากกว่า การออกแบบที่ต้องครอบคลุมถึงความปลอดภัยของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกและการเสีรูปร่าง (Deformation) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างการใช้งาน รวมทั้งต้องมีความอดทน (Durability) เพียงพอตลอดอายุการใช้งานด้วย โดยปกติขั้นตอนการออกแบบต้องมีการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้าง ภายใต้สถานะ 2 ประเภท ดังนี้

2.8.1 สถานการณ์ใช้งาน (Service state) ที่สถานการณ์ใช้งาน โครงสร้างต้องมีความสามารถในการใช้งานได้ตามกำหนด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การโก่งตัว การแตกร้าวและการกัดกร่อนต้องไม่มากเกินข้อกำหนด

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, (2549) [1] ได้กล่าวไว้ว่า มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างรับแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [1] หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงในตารางที่ 2.3 [1] และระยะโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 [1]

ตารางที่ 2.2 หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) [1]

<p>ก) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริมอัดแรง ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) การคืบของคอนกรีต (Creep) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (Steel relaxation) ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้</p>	
<p>หน่วยแรงอัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง เป็นรูปสามเหลี่ยม (triangular distribution of prestress)</li> </ul>	$0.6f'ci$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงเท่าๆกันตลอดหน้าตัดของอาคาร (uniform distribution of prestress)</li> </ul>	$0.45f'ci$
<p>หน่วยแรงดึง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับองค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยว (bonded reinforcement) ในการช่วยรับแรงดึง</li> </ul>	$0.85\sqrt{f'ci}$ กก./ซม <sup>2</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยว ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กยึดเหนี่ยวให้สามารถรับแรงดึงทั้งหมดในส่วนของคอนกรีตที่เกิดหน่วยแรงดึง (tensile zone) โดยแรงดึงคำนวณจากสมมติฐานของหน้าตัดไม่แตกร้าว</li> </ul>	$1.60\sqrt{f'ci}$ กก./ซม <sup>2</sup>
<p>ข) หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง) ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้</p>	
<p>หน่วยแรงอัด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงเนื่องจากแรงดัด</li> </ul>	$0.45f'c$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงโดยตรง</li> </ul>	
<p>หน่วยแรงดึง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- หน่วยแรงดึงในบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงมาก่อน (precompressed tensile zone)</li> </ul>	$0.30f'c$
<ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับองค์อาคารซึ่งไม่ใช่ชนิดไม่ยึดเหนี่ยว หากค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าค่าที่กำหนดข้างต้น อาจจะใส่เหล็กเสริมธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยวให้เพียงพอ เพื่อควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวไม่ให้เกิน 0.2 มม. สำหรับองค์อาคารทั่วไป และไม่เกิน 0.1 มม. สำหรับองค์อาคารที่อาจได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (corrosive atmosphere)</li> </ul>	$1.60\sqrt{f'c}$ กก./ซม <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $f'_{ci}$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.<sup>2</sup>

$f'_c$  คือ กำลังประลัยของคอนกรีต เมื่อ อายุ 28 วัน โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.<sup>2</sup>

ตารางที่ 2.3 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) [1]

หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้	
- ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก	0.94 $f_{py}$ แต่ไม่เกิน 0.80 $f_{pu}$ หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอียัด
- พื้นที่ที่ถ่ายแรงเข้าสู่อาคาร	0.70 $f_{pu}$

โดยที่  $f_{py}$  คือ กำลังคลาก (yield strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม.<sup>2</sup>

$f_{pu}$  คือ กำลังประลัย (breaking strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม.<sup>2</sup>

2.8.2 สถานะประลัย (ultimate state) เป็นโครงสร้างสิ้นสุดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์สถานะนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (overload) ก่อนที่โครงสร้างจะพังลง ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีค่าตัวคูณน้ำหนัก (load factor) ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 [1]

ตารางที่ 2.4 ระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) [1]

ประเภทของชิ้นส่วน	การโก่งตัวที่พิจารณา	พิกัดการโก่งตัว
ดาดฟ้าเรียบไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร	$\frac{L}{180}$
พื้นไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร	$\frac{L}{360}$
พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	ส่วนของการโก่งตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างแล้ว (ผลรวมของการโก่งตัวระยะยาวจากน้ำหนัก	$\frac{L}{480}$
พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งไม่น่าจะเสียหายจากการโก่งตัวมาก	บรรทุกคงค้าง และการโก่งตัวทันทีจากน้ำหนักบรรทุกจรใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น)	$\frac{L}{240}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หมายเหตุ

- สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด ในการคำนวณการโก่งตัวทันทีโดยวิธีปกติ หรือใช้สูตรสำหรับการโก่งตัวอีลาสติก โดยสามารถให้โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดเดิมสำหรับหน้าตัดไม้แตกร้าว
- ในการคำนวณการโก่งตัวเพิ่มเติมในระยะยาวของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงให้คำนึงถึงหน่วยแรงในคอนกรีตและในเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (sustained load) และผนวกผลจากการคืบตัว การหดตัวของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย

ตารางที่ 2.5 ค่าตัวคูณน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) [1]

$$U = 1.4D + 1.7L$$

โดยที่ U คือ กำลังที่ต้องการ (required strength)

D คือ ผลของน้ำหนักคงที่

L คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

ถ้ามีการพิจารณาผลของแรงลมร่วมด้วย จะต้องหากำลังที่ต้องการ จากค่าสูงสุดของทั้งสามสมการ

$$U = 0.75(1.4D + 1.7D + 1.7W)$$

$$U = 0.9D + 1.4W$$

โดยที่ W คือ ผลของแรงลม

ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (required strength) โดยที่กำลังการออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (nominal strength) ด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง สำหรับกรณีต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 [1]

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 แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ

$\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลัง

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับกรณีต่าง ๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537) [1]

กรณีต่าง ๆ	$\phi$
- กรณีของแรงดัด อาจมีหรือไม่มีแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
- กรณีของแรงดิ่งในแนวแกน	0.90
- กรณีของแรงอัด หรือ แรงอัดร่วมกับแรงดัด	
สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเกลียว	0.75
สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว	0.70
- กรณีของแรงเฉือนและแรงบิด	0.85
- กรณีของแรงกด	0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง

ในการออกแบบผู้ออกแบบจะต้องคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (live load) สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่สามารถคำนวณได้โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,400 กก./ชม.<sup>3</sup> ส่วนการกำหนดน้ำหนักจรขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของโครงสร้างนั้น ๆ ตารางที่ 2.6 [2] แสดงน้ำหนักบรรทุกจรที่ระบุไว้ในข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ใช้น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารประเภทต่าง ๆ [2]

ประเภทการใช้อาคาร	น้ำหนักบรรทุกทุกเป็น กก./ชม. <sup>2</sup>
- หลังคา	50
- กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
- ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
- ห้องแถว ตึกแถว อาคารชุด หอพัก โรงแรม และห้องคนไข้พิเศษของ โรงพยาบาล	200
- สำนักงาน ธนาคาร	250
- (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม โรงพยาบาล สำนักงาน และธนาคาร	300
- (ก) ตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในหอสมุด ที่จอดหรือเก็บรถยนต์นั่ง	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	400
- (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑ์ อิมจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร และหอสมุด	500
- ห้องเก็บหนังสือของห้องสมุด	600
- ที่จอดเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่น ๆ	800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 เหล็กเสริมอัดแรง

นเรศ พันธธรร, (2541) [2] ได้กล่าวไว้ว่า เหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงต้องเป็นเหล็กที่มีกำลังสูง เนื่องจากการหดตัวจากการคืบและจากการหดตัวจากการสูญเสียความชื้น จะทำให้เหล็กเสริมอัดแรงนั้นสูญเสียแรงอัดไป เหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด คือ ลวดอัดแรง (prestressing wire) ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand) และเหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar)

2.10.1 ลวดอัดแรง (prestressing wire) ลวดอัดแรงที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A421 และมอก. 95-2534 ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติขั้นต่ำของลวดได้แก่ กำลังดึงประลัย กำลังคลากและค่าการยืดตัวขณะขาด ในการออกแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใช้ค่าคงที่เท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กก./ชม.<sup>2</sup> คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน และค่าที่จำเป็นต้องทราบเบื้องต้นในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ 2.9 [2]

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421 [2]

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421					
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	กำลังดึงประลัยน้อยที่สุด กก./ชม. <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )		กำลังคลากอย่างน้อยที่สุด กก./ชม. <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )	
		ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดปลายยึดเป็นลิ้ม	ชนิดปลายยึดเป็นปม	ชนิดปลายยึดเป็นลิ้ม
4.88 (0.192)	18.70 (0.029)	-	17,580 (250,000)	-	14,060 (200,000)
4.98 (0.196)	19.48 (0.030)	16,870 (240,000)	17,580 (250,000)	13,500 (192,000)	14,060 (200,000)
6.35 (0.250)	31.67 (0.049)	16,870 (240,000)	16,870 (240,000)	13,500 (192,000)	13,500 (192,000)
7.01 (0.276)	38.59 (0.060)	-	16,520 (235,000)	-	13,220 (188,000)

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534 [2]

คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534			
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	กำลังดึงประลัยน้อยที่สุด กก./ชม. <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )	กำลังคลากอย่างน้อยที่สุด กก./ชม. <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )
4 (0.157)	12.57 (0.019)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
5 (0.197)	19.64 (0.030)	17,500 (248,900)	15,000 (213,300)
7 (0.276)	38.48 (0.060)	16,000 (227,600)	13,500 (192,000)
9 (0.354)	63.62 (0.098)	14,500 (206,200)	12,500 (177,800)

2.10.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand) ลวดเกลียวอัดแรงผลิตโดยการนำลวดหลายๆเส้นมาพันกันเป็นเกลียว การที่ใช้ลวดขนาดเล็กมาทำลวดเกลียวอัดแรงทำให้การทำงานสะดวกมากขึ้น เพราะการติดตั้งทำได้ดีกว่ากรณีลวดเส้นใหญ่ที่มีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากัน และการควบคุมคุณภาพทำได้ดีกว่าด้วย โดยลวดเกลียวอัดแรงที่นิยมใช้กันมากเป็นลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น และมีการคลายแรงดึงต่ำ ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A416 และ มอก. 420-2534 ในการออกแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใช้ค่าคงที่เท่ากับ  $1.97 \times 10^6$  กก./ชม.<sup>2</sup> คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงตามมาตรฐาน และค่าที่จำเป็นต้องทราบเบื้องต้นในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.10 และ 2.11 [2]

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงที่ต่ำตามมาตรฐาน ASTM A416 [2]

เกรด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	แรงดึงที่จุดประลัย กก.(ปอนด์)	แรงดึงที่จุดคลาก กก.(ปอนด์)
250	6.35 (1/4)	23.22 (0.036)	4,080 (9,000)	3,680 (8,100)
	7.94 (5/16)	37.42 (0.058)	6,580 (14,500)	5,930 (13,050)
	9.53 (3/8)	52.61 (0.080)	9,070 (20,000)	8,170 (18,000)
	11.11 (7/16)	69.68 (0.108)	12,240 (27,000)	11,020 (24,300)
	12.70 (1/2)	92.90 (0.144)	16,320 (36,000)	14,690 (32,400)
	15.24	139.35	24,490	22,050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	(0.6)	(0.216)	(54,000)	(48,600)
270	9.53	54.84	10,430	9,390
	(3/8)	(0.085)	(23,000)	(20,700)
	11.11	74.19	14,069	12,660
	(7/16)	(0.115)	(31,000)	(27,900)
	12.70	98.71	18,730	16,850
	(1/2)	(0.153)	(41,300)	(37,170)
	15.24	140.00	26,580	23,930
	(0.6)	(0.217)	(58,600)	(52,740)

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงที่ต่ำตามมาตรฐาน มอก. 420-2534 [2]

เกรด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัด มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	แรงดึงที่จุดประลัย กก.(ปอนด์)	แรงดึงที่จุดคลาภ กก.(ปอนด์)
1725	9.53	51.61	9,070	8,163
	(3/8)	(0.080)	(20,000)	(17,999)
	12.70	92.90	16,320	14,688
	(1/2)	(0.144)	(36,000)	(32,387)
	15.24	139.35	24490	22,041
	(0.6)	(0.216)	(54,000)	(48,600)
1890	9.53	54.84	10,430	9,387
	(3/8)	(0.085)	(23,000)	(20,698)
	12.70	98.71	18,730	16,857
	(1/2)	(0.153)	(41,300)	(37,170)
	15.24	140.00	26,580	23,922
	(0.6)	(0.217)	(58,600)	(52,748)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 เหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar) ผลิตจากเหล็กโลหะผสม ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASTM A722 เหล็กเส้นอัดแรงมีอยู่ 2 ชนิด คือ เหล็กเส้นอัดแรงชนิดกลม และเหล็กเส้นอัดแรงชนิดข้ออ้อย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการคำนวณออกแบบให้ใช้ค่าคงที่เท่ากับ  $1.73 \times 10^6$  กก./ซม.<sup>2</sup> ค่ากำลังคลาก (ใช้กำลังคลากของ 0.2% offset) ของเหล็กเส้นอัดแรง  $f_{py}$  ให้ใช้เท่ากับ 0.85 ของกำลังดึงประลัย  $f_{pu}$  ( $f_{py} = 0.85 f_{pu}$ ) คุณสมบัติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.12 [2]

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติของเหล็กเส้นอัดแรง [2]

ชนิดเหล็กเส้นอัดแรง	เกรด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัดจริง มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	กำลังดึงประลัย กก./ซม. <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )		
กลม (ตามมาตรฐาน ASTM A722)	145	19.05 (3/4)	283.9 (0.442)	10,190 (14,500)		
		22.22 (7/8)	387.1 (0.601)	10,190 (14,500)		
		25.40 (1)	503.2 (0.785)	10,190 (14,500)		
		28.57 (9/8)	638.7 (0.994)	10,190 (14,500)		
		31.57 (5/4)	793.5 (1.227)	10,190 (14,500)		
		34.92 (11/8)	954.8 (1.485)	10,190 (14,500)		
			160	19.05 (3/4)	283.9 (0.442)	11,250 (160,000)
				22.22 (7/8)	387.1 (0.601)	11,250 (160,000)
25.40 (1)	503.2 (0.785)			11,250 (160,000)		
28.57 (9/8)	638.7 (0.994)			11,250 (160,000)		
31.57 (5/4)	793.5 (1.227)			11,250 (160,000)		
34.92 (11/8)	954.8 (1.485)			11,250 (160,000)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดเหล็กเส้น อัดแรง	เกรด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มม.(นิ้ว)	พื้นที่หน้าตัดจริง มม. <sup>2</sup> (นิ้ว <sup>2</sup> )	กำลังดึงประลัย กก./ชม <sup>2</sup> (ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )
ข้ออ้อย (ข้อมูลจาก PCI handbook)		19.05 (5/8)	180.6 (0.280)	11,040 (157,000)
		25.40 (1)	548.4 (0.852)	10,550 (150,000)
		25.40 (1)	548.4 (0.852)	11,250 (160,000)
		31.57 (5/4)	835.5 (1.295)	10,550 (150,000)
		31.57 (5/4)	835.5 (1.295)	11,250 (160,000)
		34.92 (3/2)	1,051.6 (1.630)	10,550 (150,000)

## 2.11 เหล็กเสริมไม่อัดแรง (non-prestressed reinforcement)

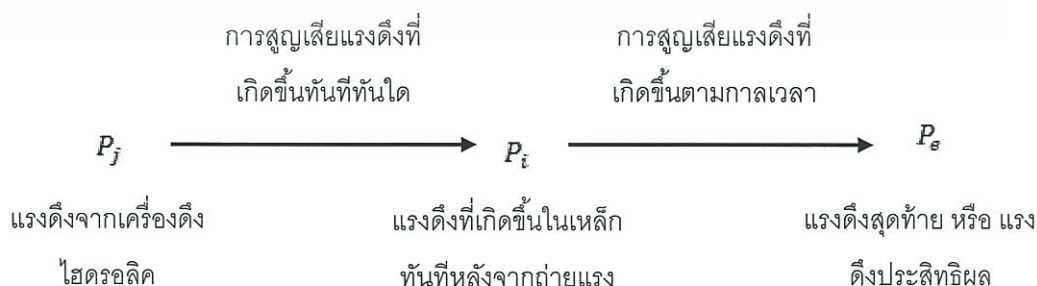
ในคอนกรีตอัดแรงบางครั้งก็มีการเสริมเหล็กชนิดไม่อัดแรงซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน เหล็กเส้นไม่อัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ เหล็กกลม (round bar) และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) เกรดของเหล็กซึ่งเป็นตัวบอกกำลังคลากของเหล็กมี SR24 SD30 SD40 และSD50 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบให้ใช้เท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กก./ชม.<sup>2</sup> สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้กำหนดคุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรงดังตารางที่ 2.13 [2]

ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง [2]

ชนิดเหล็กเสริม	เกรด	กำลังคลาก กก./ชม. <sup>2</sup>	กำลังดึงประลัย กก./ชม. <sup>2</sup>
เหล็กกลม	SR 24 (มีขนาด $\emptyset$ 6, 9, 12, 19, 25 มม.)	2,400	3,900
เหล็กข้ออ้อย	SD 30 (มีขนาด $\emptyset$ 12, 16, 20, 25, 28 มม.)	3,000	4,900
	SD 40 (มีขนาด $\emptyset$ 12, 16, 20, 25, 28, 36 มม.)	4,000	5,700
	SD 50 (มีขนาด $\emptyset$ 32 มม.)	5,000	6,300

## 2.12 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (non-dependent loss) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [2]



รูปที่ 2.8 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.1 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดนี้ มีสาเหตุจากหลายประการด้วยกัน แต่ที่มักนำมาพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss) นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง อาจจะมีสาเหตุอื่น ๆ เช่น การหดตัวของไม้แบบในชั้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหาได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องไฮดรอลิก  $P_j$  กับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง  $P_i$  จากขั้นตอนการทำเสาเข็มรับโมเมนต์ดัดนั้นเป็นแบบชนิดตั้งเหล็กก่อน (pretensioning) จึงคิดแค่การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด} = P_j - P_i \quad (2.12.1)$$

#### 1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

ในกรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน ในคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ก่อนการเทคอนกรีต และเมื่อทำการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต คอนกรีตจะเกิดการหดตัวเนื่องจากแรงอัดตามทฤษฎีอีลาสติก ในขณะเดียวกันเหล็กเสริมอัดแรงก็จะสั้นตามลง ดังนั้นการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจึงเกิดขึ้น โดยที่การสูญเสียหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมอัดแรง ( $\Delta \epsilon_s$ ) เท่ากับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ( $\epsilon_c$ ) ถ้าพิจารณาคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางหน้าตัดคอนกรีต ซึ่งในกรณีนี้ไม่มีผลของโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง มีแต่ผลของแรงตามแนวแกน

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_s &= \epsilon_c \\ &= \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{P_0}{A_c E_c} \\ &= \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{P_0}{A_c E_c} \end{aligned} \quad (2.12.2)$$

โดยที่  $P_0$  คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากถ่ายแรงสู่คอนกรีตแล้ว ซึ่งค่า  $P_0$  นี้ยังไม่ทราบค่า แต่สามารถใช้ค่าเท่ากับ 0.9 ของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงก่อนการถ่าย

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

$E_c$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ดังนั้น ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต  $ES$  หาได้จาก

$$ES = \Delta\sigma_s = E_s \Delta\varepsilon_s = \frac{E_s P_0}{E_c A_c} = n \frac{P_0}{A_c} \quad (2.12.3)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$ES = n f_{cir} = \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir} \quad (2.12.4)$$

โดยที่  $f_{cir}$  คือ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง (ในกรณีของแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีต  $f_{cir} = \frac{P_0}{A_c}$ )

$E_s$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง

$E_{ci}$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง หาได้จาก  $E_{ci} = 15200\sqrt{f'_{ci}}$

ในกรณีที่มีผลของโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งมาจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ ( $P_e$ ) และโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวมันเอง ( $M_G$ ) การคำนวณหาค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตสามารถใช้สมการทั่วไปได้ เพียงแต่ค่า  $f_{cir}$  ต้องคำนวณจากสมการ

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (2.12.5)$$

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง ( $y = e$ ) คือ

$$f_{cir} = \frac{P_0}{A} + \frac{P_0 e^2}{I} - \frac{M_G e}{I} \quad (2.12.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลามีสาเหตุหลักๆ มาจากการหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ถ้าให้  $P_e$  คือแรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้ว การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา} = P_i - P_e \quad (2.12.7)$$

1. การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss) การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีสาเหตุมาจากการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอให้ใช้ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัว เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ดังนี้

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน} \quad SH = 1200 - 11RH \quad (2.12.8)$$

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กทีหลัง} \quad SH = 0.80(1200 - 11RH) \quad (2.12.9)$$

โดยที่  $SH$  คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ซม<sup>2</sup>

$RH$  คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี หน่วยเป็นร้อยละ

การคำนวณหาการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต นอกจากสมการข้างต้นแล้วอาจใช้ค่าประมาณตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.14 [2]

ตารางที่ 2.14 การสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต [2]

ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี (ร้อยละ)	ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสีย (กก.ซม. <sup>2</sup> )	
	คอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน	คอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กทีหลัง
0-25	1,060	580
26-75	700	560
76-100	350	280

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (creep loss) การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับเวลาและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีต การคืบจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอให้ใช้สมการข้างล่าง สำหรับคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สูญเสียเนื่องจากการคืบของคอนกรีตทั้งในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนและคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง ดังต่อไปนี้

$$CR = 12f_{cir} - 7f_{cds} \quad (2.12.10)$$

โดยที่  $CR$  คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต

หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>

$f_{cir}$  คือ หน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจากทำการถ่ายแรง หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>

$f_{cds}$  คือ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่ทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคงที่ซึ่งมีอยู่แล้วในขณะอัดแรง หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>

3. การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงในกรณีนี้ เกิดเนื่องจากการคลายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมอัดแรงเอง ขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง ในการคำนวณออกแบบสามารถใช้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งแสดงไว้ในสมการดังต่อไปนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ก. ลวดเกลียวอัดแรง เกรด 1725 และ 1860 (มอก.420-2525)

$$RE = 1410 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.12.11)$$

ข. ลวดอัดแรง (มอก.95-2525)

$$RE = 1270 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.12.12)$$

- โดยที่ **RE** คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>
- ES** คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>
- SH** คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>
- CR** คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคืบของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ชม.<sup>2</sup>

ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ในการคำนวณหาการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง สามารถใช้ค่าประมาณตามตารางที่ 2.15 [2] ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งประเมินภายใต้สมมติฐานของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) การอัดแรงในระดับธรรมชาติและภายใต้สภาวะแวดล้อมปานกลาง ค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงในตารางที่ 2.15 [2] ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด

ตารางที่ 2.15 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด) [2]

ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง	ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง กก./ชม. <sup>2</sup>	
	$f_c = 300$ กก./ชม. <sup>2</sup>	$f_c = 350$ กก./ชม. <sup>2</sup>
สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน		
- ลวดเกลียวอัดแรง		3,160
สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง		
- ลวดอัดแรง, ลวดเกลียวอัดแรง	2,270	2,320
- เหล็กเส้นอัดแรง	1,570	1,620

## 2.13 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานการณ์ใช้งานดังนั้นทฤษฎีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ทฤษฎีอีลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งาน คือ หลักการรวมแรงดั่งที่กล่าวในหัวข้อ xxx จาก สมการ  $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{P_{psc}}{I} \pm \frac{My}{I}$  หน่วยแรงดั่งในคอนกรีต  $\sigma_c$  ณ ตำแหน่งใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากการอัดแรง  $P$  มีค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  และโมเมนต์ภายนอก  $M$  จะหาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{P_{ey}}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (2.13.1)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

$I$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของหน้าตัดคอนกรีต

$y$  คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้ เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติ ในการรับแรงอัดได้ดี และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตมักพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัด เป็นหลัก ดังนั้นการคำนวณในนี้จะใช้เครื่องหมายบวก (+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและใช้ เครื่องหมายลบ (-) สำหรับหน่วยแรงดั่งในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานนี้ การวิเคราะห์ยังแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และขณะรับ น้ำหนักบรรทุก (working stage)

ก) การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็ก เสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งอัดแรงที่ใช้ในการคำนวณในขั้นตอนนี้จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดั่งใน เหล็กเสริมที่เกิดขึ้นทันทีทันใด  $P_i$  และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักตัวเอง  $M_G$  เท่านั้นเพราะขณะที่ทำการถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกมากระทำ ดังนั้นสมการที่ ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e y}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \quad (2.13.2)$$

ข) การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขณะที่มือน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำ แรงอัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทั้งจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และที่เกิดขึ้นตามเวลา)  $P_e$  แรงนี้เรียกว่าแรงอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (รวมน้ำหนักตัวเองด้วย)  $M_T$  ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e e y}{I} \pm \frac{M_T y}{I} \quad (2.13.3)$$

## 2.14 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง

การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรง กระทำขณะทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรง และหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริม เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำเพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมี การเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้น ๆ จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วงสถานการณ์ใช้งานโดยที่คานกริตยังไม่เกิดการแตกร้าว

### 1. สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง  $\Delta \epsilon_c$  ที่อยู่โดยรอบเท่ากับการคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอัสติคดังนี้

$$\Delta \epsilon_s = \Delta \epsilon_c$$

$$\frac{\Delta \sigma_s}{E_s} = \frac{\Delta \sigma_c}{E_c}$$

$$\Delta \sigma_s = \frac{E_s}{E_c} \Delta \sigma_c = n \Delta \sigma_c = n \frac{M y}{I} \quad (2.14.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\Delta\sigma_s$  คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคาน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม

$M$  คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใด ๆ

$n, I$  คือ อัตราส่วนโมดูลัสและโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด ตามลำดับ

$y$  คือ ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ  $e$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์  $M$  สำหรับคานช่วงเดียวโมเมนต์ที่กึ่งกลางช่วงคานมีค่ามากที่สุด ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะเปลี่ยนไปมากที่สุดที่กึ่งกลางช่วงคานและค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงน้อยลงจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยที่หน้าตัดบริเวณที่รองรับ

## 2. สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวแตกต่างไปจากของระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบเนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่าง ผิวทั้งสอง ดังสมการในข้อที่แล้ว ไม่สามารถนำมาใช้กับการคำนวณหาหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว พิจารณาคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวของคานช่วงเดียวดังรูปที่ 2.9 [2] เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุก หน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยว นี้ก็จะกระจายไปตลอดคาน เนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวจะเฉลี่ยไปตลอดความยาวคาน ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรง  $\Delta L$  ก่อน โดยที่  $\Delta L$  นี้เท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน คือ

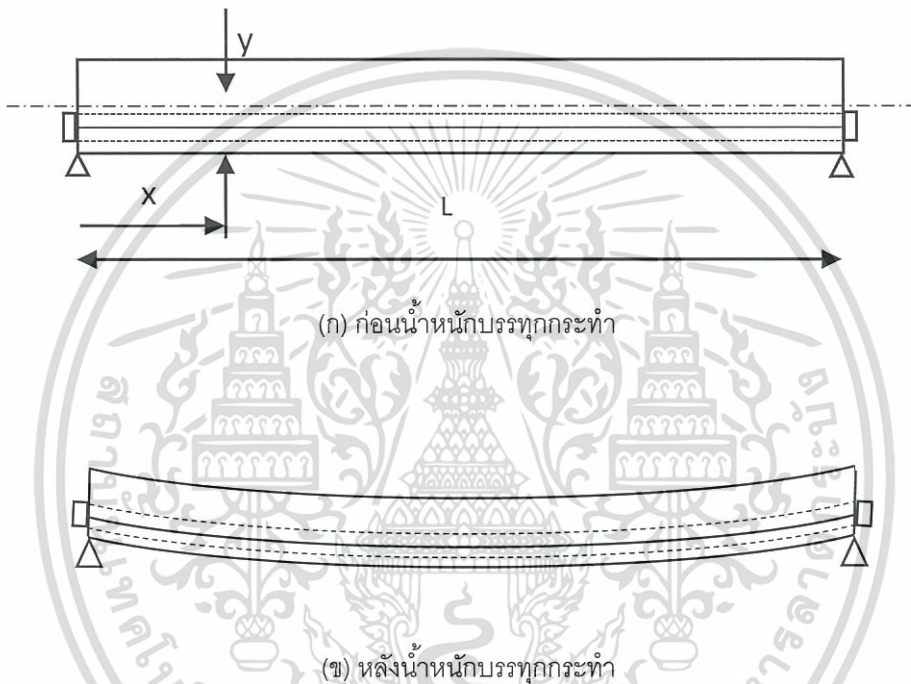
$$\Delta L = \int_0^L \varepsilon_c dx = \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx \quad (2.14.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของหน่วยการยืดตัวหาได้จาก 
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหาได้จาก

$$\Delta\sigma_c = E_s \frac{\Delta L}{L} = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{My}{I} dx \quad (2.14.3)$$



รูปที่ 2.9 หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว [2]

### 2.15 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (cracking moment)

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุด เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นจนเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าวก็คือ ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) จากสมการที่

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I}$$

หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว หาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I} \quad (2.15.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคอนกรีตถูกพิจารณาว่าเริ่มแตกแล้ว จะได้ว่า

$$-f_r = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{M_{cr}c_b}{I} \quad (2.15.2)$$

$$M_{cr} = Pe + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b} \quad (2.15.3)$$

โดยที่  $M_{cr}$  คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกแล้ว

$f_r$  คือ โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต  $\cong 2.0 \sqrt{f'_c}$  (กก./ซม.<sup>2</sup>)

คราวนี้ขอให้พิจารณาอีกแง่หนึ่ง ถ้าให้  $M_1$  เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์จากสมการ  $\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I}$  แทนค่า  $\sigma_c = 0$  จะได้ว่า

$$0 = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{M_1 c_b}{I} \quad (2.15.4)$$

$$M_1 = Pe + \frac{PI}{Ac_b} = P\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \quad (2.15.5)$$

โดยที่  $M_1$  คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์

$r$  คือ รัศมีจโรจน์ของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\frac{I}{A}}$

คอนกรีตสามารถรับหน่วยแรงดึงเท่ากับ  $f_r$  ถ้าให้  $M_2$  เป็นโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเป็น  $f_r$  โดยทฤษฎีอีลาสติกสามารถหาค่าโมเมนต์  $M_2$  ได้จาก

$$\sigma_c = \frac{M_2 c_b}{I} \quad (2.15.6)$$

$$f_r = \frac{M_2 c_b}{I} \quad (2.15.7)$$

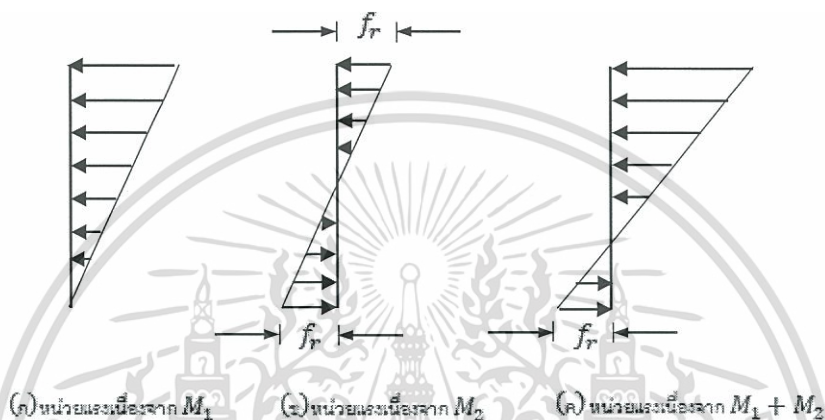
ดังนั้น

$$M_2 = \frac{f_r I}{c_b} \quad (2.15.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $M_2$  คือ โมเมนต์ที่คอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก  $f_r$

จากสมการที่ได้กล่าวมาจะได้ว่า  $M_{cr} = M_1 + M_2$  โดยที่  $M_1$  คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ที่กระทำมีค่าเท่ากับ  $M_1$  สำหรับ  $M_2$  คือ ค่าโมเมนต์ที่คานสามารถรับได้เพิ่มเติมเนื่องจากที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้แสดงไว้ดังรูป 2.10 [2]



รูปที่ 2.10 โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว [2]

## 2.16 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่โครงสร้างสามารถรับได้จะต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าโครงสร้างเกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่จะตามมาจะรุนแรงและค่าใช้จ่ายจากความเสียหายก็สูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตาม

การออกแบบในหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้ในสถานการณ์ใช้งานที่ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

### 1. สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัย

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยขององค์อาคารที่ใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง กล่าวคือหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน

ข) คอนกรีตไม่รับแรงดึง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ

ค) ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปหลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กำลังอัดประลัยของคาน คือ หลักการแรงคู่ควบภายใน ในช่วงสถานะใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่คอนกรีตอัดแรง แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าคงที่แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น แต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามโมเมนต์ภายนอกที่เพิ่มขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเลยช่วงสถานะการณีใช้งาน การแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ตอนนี้แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไป แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่า หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะเริ่มเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป จนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์ดัดประลัย คานก็ถึงจุดวิบัติ

การเกิดวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด (crushing) มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัยการวิบัติของอาคารแบ่งเป็น 2 ประเภทคือการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเริ่มต้นโดยการที่การยึดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (การคลากของเหล็กเกิดขึ้น) และวิบัติในที่สุดเมื่อคอนกรีตอัดระเบิด ( $\epsilon_c = 0003$ ) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล (under-reinforcement) ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะอัดระเบิด ( $\epsilon_c = 0003$ ) ขณะที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคลาก ดังนั้น การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักนี้ องค์อาคารจะวิบัติขณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมก็ยังยึดไม่มาก การวิบัติชนิดนี้จึงมีลักษณะเปราะ (brittle) และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล (over-reinforcement)

2. การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยม (equivalent rectangular concrete stress distribution)

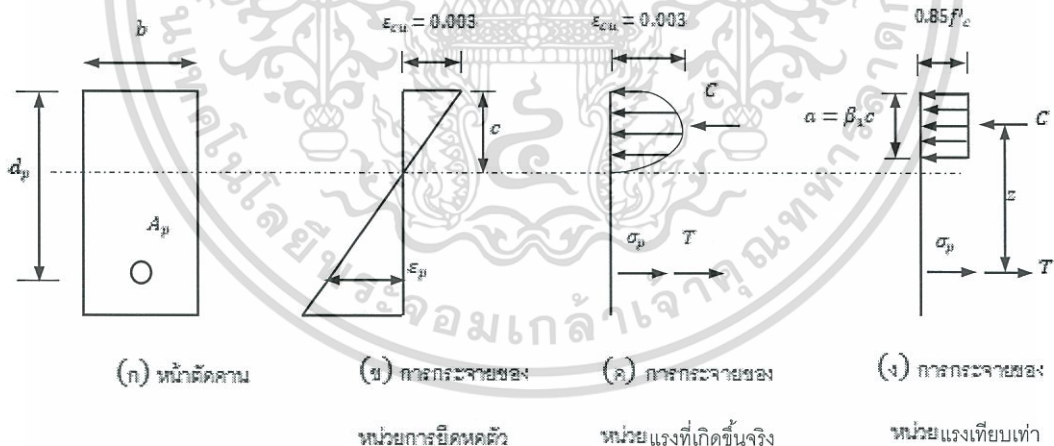
การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยแสดงไว้ในรูป 2.11 [2] ที่สถานะประลัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยึดหดตัวไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรงและสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน ดังรูป (ข) การกระจายของหน่วยแรงในคอนกรีตที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังรูป (ค) เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้น การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งจึงถูกแทนที่โดยการกระจายของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมดังรูป (ง) รูปสี่เหลี่ยมที่เทียบเท่านี้ใช้หลักการของแรงลัพธ์ C ต้องอยู่ภายในตำแหน่งเดิม ดังนั้นพื้นที่ภายในรูปสี่เหลี่ยมของรูป (ง) จึงต้องมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในรูปโค้งของรูป (ค) และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ที่ระดับเดียวกัน มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดให้ความกว้างของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่าที่มีค่าเท่ากับ  $0.85f'_c$  และความสูงของรูปสี่เหลี่ยม  $a$  มีค่า

เท่ากับ  $\beta_1 c$  ดังนั้นที่ (ง) โดยที่  $c$  เป็นระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัด และค่า  $\beta_1$  เป็นตัวแปรที่หาได้จาก

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

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0008(f'_c - 300) \geq 0.65 \quad \text{เมื่อ } f'_c > 300 \text{ กก./ซม}^2$$



รูปที่ 2.11 การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย [2]

### 3. หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย

ออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย ต้องออกแบบให้การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยึดตัวเกินจุดคลากไปแล้ว องค์อาคารจะมีการโก่งตัวมาก่อนเกิดการวิบัติซึ่งกันระหว่างลักษณะเช่นนี้มีความเหนียว (ductility) การออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีสอดคล้องไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดคานาที่แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิสัยของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงเพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลไว้ดังต่อไปนี้

$$\omega_p \quad (2.16.1)$$

$$\omega_p + (\omega - \omega) \frac{d}{d_p} \leq 0.36\beta_1 \quad (2.16.2)$$

$$\omega_{pw} + (\omega_w - \omega_w) \frac{d}{d_p} \quad (2.16.3)$$

โดยที่	$\omega_p$	คือ	ดัชนีเหล็กสัมพัทธ์แรง	$= \frac{\rho_p f'_c}{f'_c}$
	$\omega$	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง	$= \frac{\rho f_y}{f'_c}$
	$\omega'$	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด	$= \frac{\rho' f_y}{f'_c}$
	$\rho_p$	คือ	อัตราส่วนของ	$= \frac{A_{ps}}{bd_p}$
	$\rho$	คือ	อัตราส่วนของเดือ้ธรรมดาที่รับแรงดึง	$= \frac{A_s}{bd}$
	$d_p$	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.	
	$d$	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.	
	$b$	คือ	ความกว้างของคาน	
	$A_{ps}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง	
	$A_s$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง	
	$A'_s$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_{ps}$  คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ

$f_y$  คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา

$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$  คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีก เช่น รูปตัวที และ ไอ คำนวณเช่นเดียวกับ  $\omega_{pw}, \omega_w$  และ  $\omega'_w$  ตามลำดับ แต่ความกว้าง  $b$  ที่ใช้เป็นความกว้างของตัวแกนและปริมาณเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น

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

ก) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon)

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2.16.4)$$

โดยที่  $r_p$  คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังนี้

$$0.4 \quad \text{เมื่อ} \quad 0.85 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.90$$

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

$f_{pu}$  คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง (กก./ซม.<sup>2</sup>)

เมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดในการคำนวณ  $f_{ps}$  ในสมการที่ (หมายถึงถ้าการคำนวณสมการที่มีพจน์ของ  $\omega'$  รวมอยู่ด้วย) ค่าต่อไปนี้จะต้องเป็นไปตามสมการที่ และ

$$\left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \geq 0.17 \quad (2.16.5)$$

และ

$$d' \leq 0.15d_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ข) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กเสริมอัดแรงรับแรงดึงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 \frac{f_c}{100\rho_p} \quad (2.16.6)$$

โดยที่  $f_{se}$  คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง (กก./ซม.<sup>2</sup>)

ค่า  $f_{ps}$  ในสมการที่ จะต้องไม่เกิน  $f_{py}$  และไม่เกิน  $f_{se} + 4000$  (กก./ซม.<sup>2</sup>)

ค) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว และมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกเกินกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 \frac{f_c}{300\rho_p} \quad (2.16.7)$$

ค่า  $f_{ps}$  ในสมการที่ จะต้องไม่เกิน  $f_{py}$  และไม่เกิน  $f_{se} + 2000$  (กก./ซม.<sup>2</sup>)

#### 4. โมเมนต์ดัดประลัย

โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง หาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ  $C - T$  ที่

สถานะประลัยสิ่งที่ยังที่สถานะประลัยมีแรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต  $C$  หาได้จากการกระจาย ของหน่วย

แรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม และแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง  $T$  หาได้จาก

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

ว.ส.ท. 2537 และปริมาณเหล็กเสริมจะต้องน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลกล่าวคือ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่

จากรูปที่ 2.12 จะได้ว่า

$$C = 0.85f'_c ab \quad (2.16.8)$$

$$T = A_{ps}f_{ps} \quad (2.16.9)$$

เนื่องจากเนื่องจากแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต  $C$  จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง  $T$  ดังนั้น

$$C = T \quad (2.16.10)$$

$$0.85f'_c ab = A_{ps}f_{ps} \quad (2.16.11)$$

$$a = \frac{A_{ps}f_{ps}}{0.85f'_c b} \quad (2.16.12)$$

โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดหรือบางที่อาจเรียกว่ากำลังระบุของโมเมนต์สามารถหาได้จาก

$$M_n = C \cdot z = T \cdot z = C \left( d_p - \frac{a}{2} \right) = T \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.16.13)$$

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor)  $\phi$  ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ (design strength)  $\phi M_n$  จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ (required strength)  $M_n$  ดังแสดงไว้ในสมการที่

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.16.14)$$

โดยที่  $\phi = 0.9$  (จากตารางที่ 2.6)

คอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงที่ไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) จะมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่าในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon) เหตุผลหนึ่งที่สำคัญคือในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงที่ไม่ยึดเหนี่ยวเมื่อเกิดรอยแตกกว้างขึ้นจำนวนรอยแตกกว้างจะน้อยกว่าแต่ขนาดของเราแตกกว้างแต่ใหญ่กว่าในกรณีที่เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว รอยแตกกว้างในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวมีการกระจายที่ดีกว่าไม่หล่อแต่เรามีขนาดเล็ก รอยแตกหลายที่ใหญ่จะทำให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่ามากกว่าที่หน้าตัดที่เกิดรอยแตกกว้าง ดังนั้น โมเมนต์ดัดประลัยของคอนกรีตอัดแรงระบบในการยึดเหนี่ยวจึงมีค่าลดลง

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ม.ส.ธ. ปี 2537 ได้กำหนดให้เพิ่มเหล็กเสริมธรรมดา สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดรายการยึดเหนี่ยวน้อยกว่าค่าต่อไปนี้

$$A = 0.004A \quad (2.16.15)$$

โดยที่  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดา

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดพื้นผิวด้านที่เกิดหน่วยแรงดึง เครื่องจากโมเมนต์ดัด

นอกจากนี้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท.ปี 2537 ได้กำหนดให้กำลังที่ ออกแบบของโมเมนต์  $\phi M_n$  จะต้องไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าวนี้ ก็เพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดหลังจากเกิดการแตกร้าว เพราะการโก่งตัวขององค์อาคารจะ เกิดมากขึ้นหลังจากมีการแตกร้าวขึ้น โดยปกติต้องออกแบบให้องค์อาคารโค้งตัวให้มากพอเพื่อเป็น สัญญาณเตือนให้รู้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยควรมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้ เพียงพอ

$$\phi M_n \geq 1.2M_{cr} \quad (2.16.16)$$

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

### 2.17 การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด

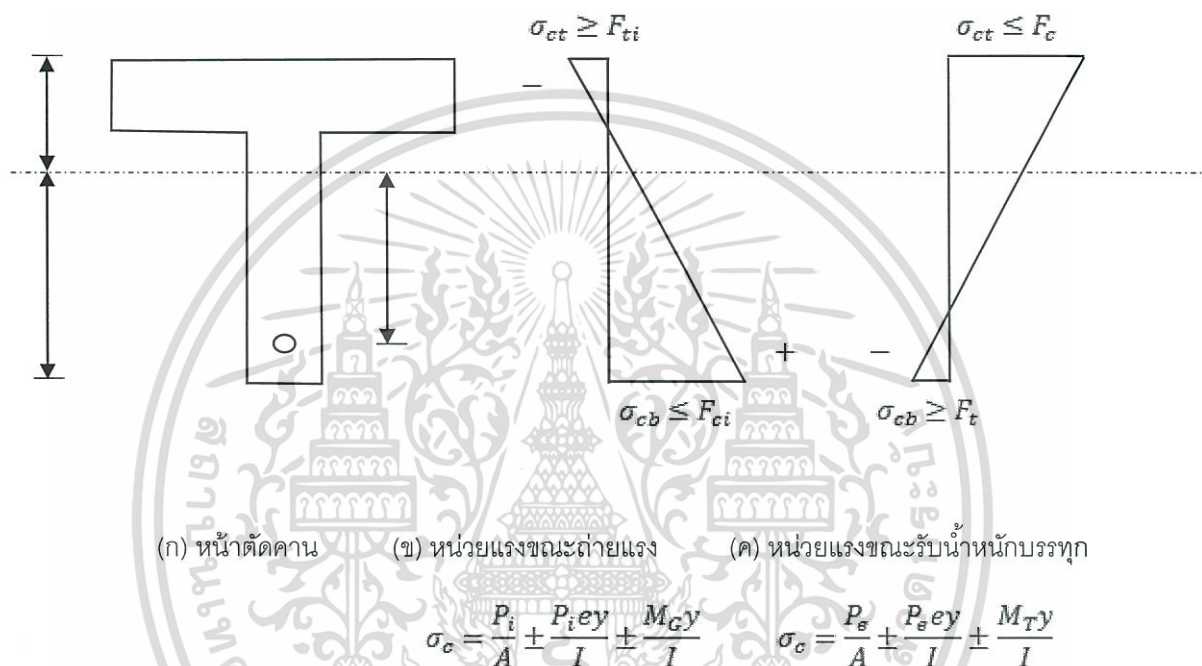
การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด สามารถออกแบบได้ 2 วิธีคือการออกแบบโดยทฤษฎี อีลาสติกซึ่งเป็นการออกแบบในสถานะใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะไม่เกิน หน่วยแรงที่ยอมให้ การออกแบบเน้นคุณสมบัติทางด้านการใช้งาน การออกแบบอีกวิธีหนึ่งคือการ ออกแบบโดยทฤษฎีกำลังประลัยซึ่งเป็นการออกแบบที่จะป้องกันการวิบัติอันเนื่องมาจากน้ำหนัก บรรทุกมากเกินไป การออกแบบเน้นความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างโดยปกติถ้าเลือก วิธีการออกแบบในวิธีหนึ่ง ก็จะวิเคราะห์ตรวจสอบการยอมรับได้ของอีกวิธีหนึ่ง ที่ต้องทำอย่างนี้ก็ เพราะว่าการออกแบบโดยวิธีหนึ่งไม่ได้มีหลักประกันว่า การตรวจสอบของอีกวิธีหนึ่งจะยอมรับได้ เสมอไป เช่น ถ้าเลือกการออกแบบโดยวิธีอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงในช่วงใช้งานจะยอมรับได้แต่ไม่ หมายความว่า เมื่อวิเคราะห์ตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัดนั้น จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเกิน ได้อย่างปลอดภัยเพียงพอ หรือในทางกลับกันถ้าเลือกออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยแล้ว ก็ไม่แน่ว่า หน่วยแรงที่สถานะใช้งานจะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

เลือกวิธีการออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก หลังจากได้หน้าตัดแล้วเหล็กเสริมอัดแรงแล้วก็จะ ตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัด ถ้ากำลังของหน้าตัดมีค่ามากกว่ากำลังที่ต้องการหน้าตัดที่

ออกแบบนั้นก็ได้ แต่ถ้าน้อยกว่าจะออกแบบเหล็กเสริมไม่อัดแรง (non-prestressed steel) เพิ่มเติมเข้าไปในหน้าเพื่อเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัด

## 2.18 การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก

การออกแบบโดยวิธีนี้ออกแบบไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินหน่วยแรงที่ยอมให้ทั้งในขณะถ่ายแรงและขณะรับน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 [2]



รูปที่ 2.12 หน่วยแรงในคอนกรีต [2]

### ขณะถ่ายแรง

สำหรับคานช่วงเดียวโดยทั่วไปผลของแรงอัด  $P_i$  ขณะถ่ายแรงจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวล่างของคานมากกว่าผิวบน ซึ่งผิวบนหน่วยแรงอัดอาจจะน้อย หรือกลายเป็นหน่วยแรงดึงไปเลย แต่อย่างไรก็ดี ขณะถ่ายแรงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบน  $\sigma_{ct}$  และล่าง  $\sigma_{cb}$  ต้องมีค่าไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ดังนั้นหน่วยแรงที่ผิวบนของคาน  $\sigma_{ct}$  จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ  $F_{ti}$  โดยที่  $F_{ti}$  คือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรง (พิจารณาเครื่องหมายด้วย โดย  $F_{ti}$  มีเครื่องหมาย -) และในขณะเดียวกันหน่วยแรงที่ผิวล่างของคาน  $\sigma_{cb}$  ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $F_{ci}$  โดยที่  $F_{ci}$  คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะถ่ายแรง ( $F_{ci}$  มีเครื่องหมาย +)

จากสมการ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (2.18.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิว  
บน

$$\sigma_{ct} = \frac{P_i}{A} - \frac{P_i e c_t}{I} + \frac{M_G c_t}{I} \geq F_{ti} \quad (2.18.2)$$

$$\frac{P}{A} \left( 1 - \frac{A e c_t}{I} \right) + \frac{M_G c_t}{I} \geq F_{ti} \quad (2.18.3)$$

จัดรูปใหม่

$$F_{ti} \leq \frac{P_i}{A} \left( 1 - \frac{A e}{Z_t} \right) + \frac{M_G}{Z_t} \quad (2.18.4)$$

โดยที่  $I$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน

$A$  คือ พื้นที่ของหน้าตัดคาน

$P_i$  คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจากถ่ายแรง

$e$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลาง

$M_G$  คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคาน

$Z_t$  คือ โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวบนสุดของคาน  $= \frac{I}{c_t}$

ในทำนองเดียวกัน หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างขณะถ่ายแรง

$$\sigma_{cb} = \frac{P_i}{A} + \frac{P_i e c_b}{I} - \frac{M_G c_b}{I} \geq F_{ci} \quad (2.18.5)$$

จัดรูปใหม่

$$F_{ci} \geq \frac{P_i}{A} \left( 1 + \frac{A e}{Z_b} \right) - \frac{M_G}{Z_b} \quad (2.18.6)$$

โดยที่  $Z_b$  คือ โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวล่างสุดของคาน  $= \frac{I}{c_b}$

ขณะรับน้ำหนักบรรทุก

ถ้าเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแก่คาน โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักคานรวมกับน้ำหนักบรรทุกจะทำให้ผิวบนของคานคอนกรีตเกิดหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันที่ผิวล่างของคาน หน่วยแรงอัดก็จะน้อยลง จนกระทั่งอาจจะกลายเป็นหน่วยแรงดึงได้ แต่อย่างไรก็ดีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนของคานต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $F_c$  โดยที่  $F_c$  คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก ( $F_c$  มีเครื่องหมาย +) และในขณะเดียวกัน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานต้องมากกว่าหรือเท่ากับ  $F_t$  โดยที่  $F_t$  คือ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก ( $F_t$  มีเครื่องหมาย -)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบน

$$\sigma_{ct} = \frac{P_e}{A} - \frac{P_e e c_t}{I} + \frac{M_T c_t}{I} \leq F_c \quad (2.18.7)$$

จัดรูปใหม่

$$F_c \geq \frac{P_e}{A} \left(1 - \frac{Ae}{Z_t}\right) + \frac{M_T}{Z_t} \quad (2.18.8)$$

ถ้าให้  $P_e = RP_i$  จะได้ว่า

$$F_c \geq \frac{RP_i}{A} \left(1 - \frac{Ae}{Z_t}\right) + \frac{M_T}{Z_t} \quad (2.18.9)$$

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่าง

$$\sigma_{cb} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e e c_b}{I} - \frac{M_T c_b}{I} \geq F_t \quad (2.18.10)$$

จัดรูปใหม่

$$F_t \leq \frac{P_e}{A} \left(1 + \frac{Ae}{Z_b}\right) - \frac{M_T}{Z_b} \quad (2.18.11)$$

ถ้าให้  $P_e = RP_i$  จะได้ว่า

$$F_t \leq \frac{RP_i}{A} \left(1 + \frac{Ae}{Z_b}\right) - \frac{M_T}{Z_b} \quad (2.18.12)$$

จากสมการที่ จัดรูปอีกครั้งหนึ่ง  
จะได้

$$A \left( F_{ti} - \frac{M_G}{Z_t} \right) \leq P_i \left( 1 - \frac{Ae}{Z_t} \right) \quad (2.18.13)$$

หรือ

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{1 - Ae/Z_t}{A(F_{ti} - M_G/Z_t)} \quad (2.18.14)$$

ถ้ากำหนดให้

$$\alpha_t = A/Z_t \quad \text{จะได้} \quad (2.18.15)$$

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_t e - 1}{-AF_{ti} + \alpha_t M_G} \quad (2.18.16)$$

ในทำนองเดียวกัน จัดรูป  $\alpha_b = A/Z_b$  จะได้สมการดังต่อไปนี้  
สมการที่ และกำหนดให้

$$\alpha_b = A/Z_b \quad \text{จะได้สมการดังต่อไปนี้} \quad (2.18.17)$$

จากสมการ

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_b e + 1}{AF_{ci} + \alpha_b M_G} \quad (2.18.18)$$

จากสมการ

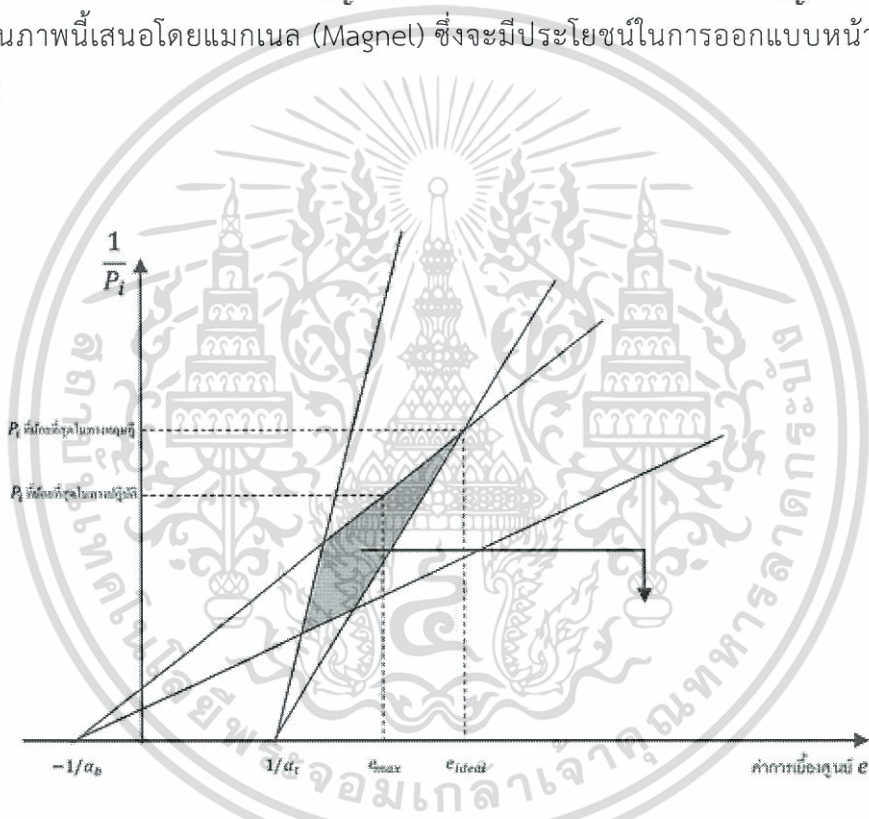
$$\frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_t e - 1)}{-AF_c + \alpha_t M_T} \quad \text{ถ้า} \quad \frac{M_T}{Z_t} > F_c \quad (2.18.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{P_i} \geq \frac{R(\alpha_t e - 1)}{-AF_c + \alpha_t M_T} \quad \text{ถ้า} \quad \frac{M_T}{Z_t} < F_c \quad (2.18.20)$$

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_b e + 1)}{AF_t + \alpha_b M_T} \quad (2.18.21)$$

สามารถนำมาเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P_i}$  กับ  $e$  โดยให้  $\frac{1}{P_i}$  เป็นแกน  $y$  และ  $e$  เป็นแกน  $x$  ดังแสดงในรูป จุดตัดแกน  $x$  (แกน  $e$ ) หาได้จากการแทนค่า  $\frac{1}{P_i} = 0$  ลงในสมการแต่ละสมการเมื่อ  $\frac{1}{P_i} = 0$  จะได้ค่าเอียงศูนย์  $e$  เท่ากับ  $\frac{1}{\alpha_t}$  สำหรับสมการ และ และเท่ากับ  $-\frac{1}{\alpha_t}$  สำหรับสมการที่ และ แผนภาพนี้เสนอโดยแมกเนล (Magnet) ซึ่งจะมีประโยชน์ในการออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด



รูปที่ 2.13 แผนภาพของแมกเนล [2]

จุดบนเส้นตรงของสมการแต่ละเส้นคือ ค่าขอบเขตหน่วยแรงที่ยอมให้ ดังนั้นที่บริเวณด้านหนึ่งของเส้นตรงแต่ละเส้นจะสอดคล้องกับสมการของตัวเองเช่น สมการ  $\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_t - 1}{-AF_{ti} + \alpha_t M_G}$  ด้านที่ลูกศรชี้ขึ้นจากเส้นตรงของสมการที่ จะสอดคล้องกับสมการที่ ดังนั้นพื้นที่ล้อมรอบเส้นตรงทั้ง 4 เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับค่า  $P_i$  และ  $e$  ในการออกแบบเพราะจุดต่าง ๆ ในพื้นที่นี้จะสอดคล้องกับสมการ ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจะออกแบบให้ประหยัด เมื่อกำหนดหน้าตัดคานมาให้ ต้องออกแบบให้ค่า  $P_i$  มีค่าน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ซึ่งหมายความว่า จำนวนเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้จะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้น ค่า  $P_i$  ที่ใช้ควรได้มาจากจุดตัดของเส้นตรงของสมการที่ และ ดังแสดงในรูป จุดตัดนี้จะได้ค่า  $e_{ideal}$  และ  $\frac{1}{P_i}$  ที่มากที่สุดซึ่งหมายถึงค่า  $P_i$  ที่น้อยที่สุดที่อยู่บริเวณที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามค่า  $e_{ideal}$  ที่ได้นี้บางครั้งอาจใช้ไม่ได้ เพราะค่า  $e$  จะถูกจำกัดโดยความลึกของหน้าตัดคานและระยะหุ้มของคอนกรีต ดังนั้น ในทางปฏิบัติคือ หาค่า  $e$  ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้  $e_{max}$  จากหน้าตัดคานแล้ว จึงไปคำนวณหาค่า  $P_i$  ที่น้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากการแทนค่า  $e_{max}$  ลงในสมการ ดังแสดงในรูป

ในบางกรณีถ้าหน้าตัดมีขนาดเล็กเกินไป เส้นตรงของสมการที่ ในรูป อาจอยู่สูงกว่า เส้นตรงของสมการที่ ซึ่งทำให้ไม่สามารถหาบริเวณที่ยอมรับได้เลย หรือในกรณีที่เส้นตรงของสมการที่ อยู่เหนือเส้นตรงของสมการที่ ก็เช่นเดียวกันจะไม่สามารถหาบริเวณที่ยอมรับได้ เพราะไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกับสมการที่ ได้หมดพร้อม ๆ กัน ในกรณีนี้ต้องขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าได้มุมระหว่างเส้นตรงของสมการที่ กับ กว้าง ๆ หรือมุมระหว่างเส้นตรงของสมการที่ กับ กว้าง ๆ แสดงว่าบริเวณที่ยอมรับได้มีพื้นที่มากอาจจะลดขนาดของหน้าตัดลงเพื่อความประหยัดได้

ถ้าต้องการคำนวณหาขนาดหน้าตัดที่เล็กที่สุดที่ยังสอดคล้องกับสมการทั้ง 4 ได้นั้นก็คือ จะต้องคำนวณหาค่า  $Z_b$  ที่น้อยที่สุด  $(Z_b)_{min}$  และ  $Z_t$  ที่น้อยที่สุด  $(Z_t)_{min}$  ถ้าใช้หน้าตัดที่มี  $Z_b$  เท่ากับ  $(Z_b)_{min}$  เส้นตรงของสมการที่ ในรูป จะมาซ้อนกับเส้นตรงของสมการที่ ค่า  $Z_b$  สามารถหาได้จากการทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสมการที่ (หรือสมการที่) และสมการที่ (หรือสมการที่) เท่ากับหน่วยแรงที่ยอมรับให้กล่าวคือ

$$\text{จากสมการที่ จะได้} \quad F_{ci} + \frac{M_G}{(Z_b)_{min}} = \frac{P_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min}e}{(Z_b)_{min}}\right) \quad (2.18.22)$$

$$\text{จากสมการที่ จะได้} \quad F_t + \frac{M_T}{(Z_b)_{min}} = \frac{RP_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min}e}{(Z_b)_{min}}\right) \quad (2.18.23)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{F_t}{R} + \frac{M_T}{R(Z_b)_{min}} = \frac{P_i}{A_{min}} \left(1 + \frac{A_{min}e}{(Z_b)_{min}}\right) \quad (2.18.24)$$

$$\text{จากสมการที่ และ} \quad (Z_b)_{min} = \frac{M_T - RM_G}{RF_{ci} - F_t} \quad (2.18.25)$$

สมการที่ จะได้ว่า

ในทำนองเดียวกัน ค่า  $(Z_t)_{min}$  หาได้จากการทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสมการ เท่ากับ หน่วยแรงที่ยอมรับให้ซึ่งจะได้

$$(Z_t)_{min} = \frac{M_T - RM_G}{F_c - RF_{ti}} \quad (2.18.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $(Z_b)_{min}$  ในสมการที่ จะมากกว่า  $(Z_t)_{min}$  ในสมการที่ เสมอ ดังนั้นในกรณีในกรณีนี้ออกแบบหน้าตัดคานรูปสมมาตรระหว่างบนและล่างของแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เช่น หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือหน้าตัดรูปตัวไอสมมาตรซึ่งค่า  $Z_t = Z_b = Z$  จึงพิจารณาเพียงแต่ออกแบบให้  $Z_b$  มากกว่า  $(Z_b)_{min}$  ก็พอเพราะ  $Z_t$  จะมากกว่า  $(Z_t)_{min}$  ตามไปด้วย สำหรับในกรณีที่ออกแบบให้หน้าตัดคานรูปไม่สมมาตร เช่น คานรูปตัว T ค่า  $Z_t = \frac{I}{c_t}$  จะมากกว่าค่า  $Z_b = \frac{I}{c_b}$  ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า ถ้า  $Z_b$  มากกว่า  $(Z_b)_{min}$  แล้ว  $Z_t$  จะมากกว่า  $(Z_t)_{min}$  ด้วยแน่นอน หมายความว่า ถ้าออกแบบให้ค่า  $Z_b$  มากกว่า  $(Z_b)_{min}$  แล้วค่า  $Z_t$  ของหน้าตัดนั้นจะมากกว่า  $(Z_t)_{min}$  โดยทันที ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงไม่ต้องคำนึงถึงการออกแบบให้  $Z_t$  มากกว่า  $(Z_t)_{min}$  ก็ได้ ไม่ว่าจะหน้าตัดนั้นสมมาตรหรือไม่ก็ตาม

ในการออกแบบหน้าตัดให้เหมาะสมในบางกรณี ค่าอัตราส่วน  $R$  ซึ่งคือ อัตราส่วนของแรงดึงประสิทธิผลต่อแรงดึงทันทีหลังจากถ่ายแรงต้องมีการประมาณก่อน โดยปกติใช้ค่า  $R$  อยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.85 ในกรณีของการที่มีการอัดแรงไม่มากอาจใช้ค่า  $R = 0.85$  แต่ถ้าในกรณีของคานที่มีการอัดแรงมากควรใช้ค่า  $R = 0.75$  เพราะในกรณีที่มีการอัดแรงมากผลของการครีปต่อการสูญเสียแรงดึงจะมีผลมาก แต่อย่างไรก็ดีหลังจากออกแบบหน้าตัดและเหล็กเสริมอัดแรงแล้วควรมีการตรวจสอบค่า  $R$  ที่ใช้ในตอนแรกอีกครั้งหนึ่ง การคำนวณการสูญเสียแรงดึงได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้า

## 2.19 แนวเหล็กเสริมอัดแรง (cable profile)

โดยปกติเมื่อออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง จะเริ่มต้นโดยการคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงและระยะเยื้องศูนย์กลางที่ต้องการจากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุด หลังจากนั้นจะกำหนดตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดต่าง ๆ ตลอดความยาวคาน โดยตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่ทุกหน้าตัดจะต้องสอดคล้องกับสมการที่ กล่าวคือ หลังจากได้ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงก็จะรู้ค่าแรงอัดสำหรับหน้าตัดต่าง ๆ จากนั้นคำนวณหาตำแหน่งเยื้องศูนย์กลางที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยให้สอดคล้องกับสมการที่ ซึ่งสมการเหล่านี้จะให้คำตอบของตำแหน่งเยื้องศูนย์กลางที่หน้าตัดใด ๆ ซึ่งคำตอบนี้เป็นช่วงของระยะเยื้องศูนย์กลางที่ยอมรับได้

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{P_i}{A} - \left( \frac{P_i e - M_G}{Z_t} \right) \geq F_{ti} \quad (2.19.1)$$

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{P_i}{A} + \left( \frac{P_i e - M_G}{Z_b} \right) \leq F_{ci} \quad (2.19.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 
$$\frac{P_e}{A} - \left( \frac{P_e e - M_T}{Z_t} \right) \leq F_c \quad (2.19.3)$$

จากสมการ 
$$\frac{P_e}{A} + \left( \frac{P_e e - M_T}{Z_b} \right) \geq F_t \quad (2.19.4)$$

จัดรูปสมการใหม่ เพื่อหาขอบเขตของค่าระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e$  จะได้

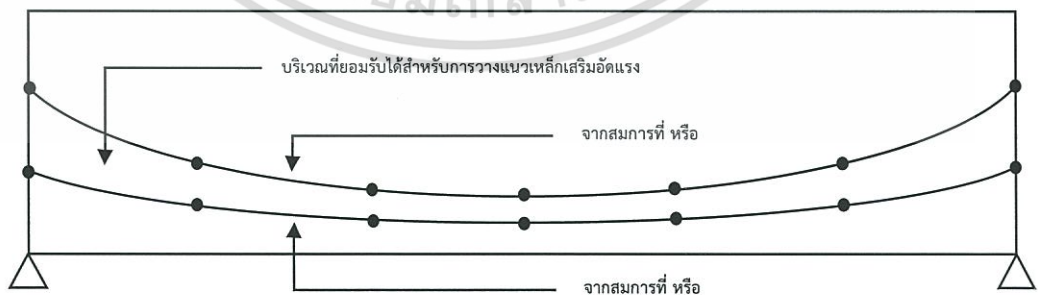
$$e \leq \frac{1}{P_i} \left[ M_G - Z_t \left( F_{ti} - \frac{P_i}{A} \right) \right] \quad (2.19.5)$$

$$e \leq \frac{1}{P_i} \left[ M_G + Z_b \left( F_{ci} - \frac{P_i}{A} \right) \right] \quad (2.19.6)$$

$$e \geq \frac{1}{P_e} \left[ M_T - Z_t \left( F_c - \frac{P_e}{A} \right) \right] \quad (2.19.7)$$

$$e \geq \frac{1}{P_e} \left[ M_T + Z_t \left( F_t - \frac{P_e}{A} \right) \right] \quad (2.19.8)$$

หลังจากได้ค่า  $P_i$  และ  $P_e$  จากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุดก็จะหาค่า  $P_i$  และ  $P_e$  ที่หน้าตัดใด ๆ จากการคำนวณเรื่องการสูญเสียแรงดึง นำค่า  $P_i$ ,  $P_e$  และค่าต่าง ๆ แทนลงในสมการที่ ก็จะได้ช่วงที่ยอมรับได้ของค่า  $e$  ที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยค่า  $e$  ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ขณะถ่ายแรงหาได้จากสมการ และค่า  $e$  ที่น้อยที่สุดที่ต้องการในช่วงรับน้ำหนักบรรทุกทุกหาได้จากสมการที่ หรือ ดังนั้นจะได้ช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของแนวเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงในรูป โดยหน้าตัดที่จะคำนวณหาช่วงยอมรับได้ของค่า  $e$  อาจเลือกมาเพียงบางหน้าตัด บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [2]

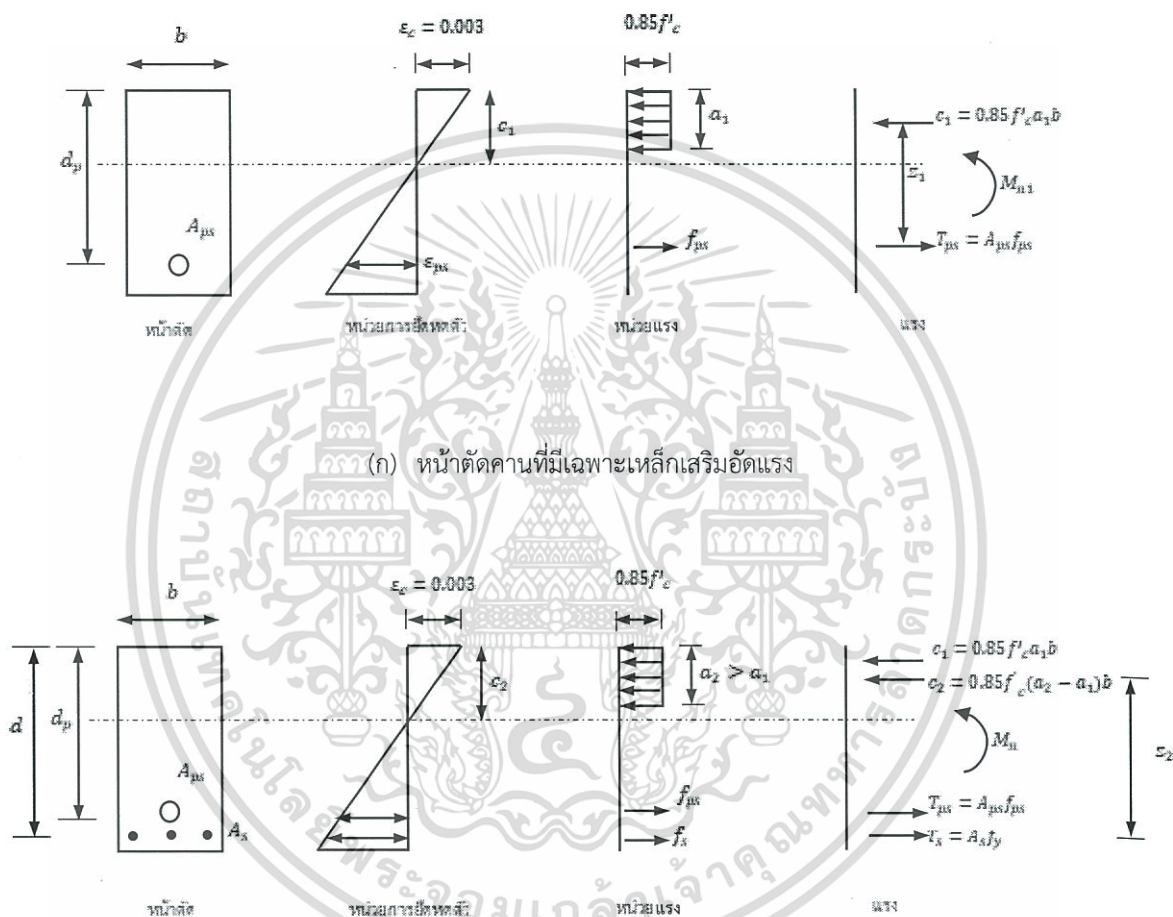


รูปที่ 2.14 บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.20 การออกแบบสำหรับกำลังประลัยของหน้าตัด

ต่อกล ภาณจนาลัย, (2537) [3] กล่าวไว้ว่า เมื่อออกแบบหน้าตัดโดยทฤษฎีอีลาสติก โดยปกติจะได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดคาน ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง และระยะเยื้องศูนย์กลาง หลังจากนั้นจะต้องตรวจสอบกำลังของหน้าตัด  $\phi M_n$  ว่ามากกว่ากำลังที่ต้องการ  $M_u$  หรือไม่ ถ้า  $\phi M_n$  มากกว่า  $M_u$  หน้าตัดก็ใช้ได้ แต่ถ้า  $\phi M_n$  น้อยกว่า  $M_u$  จะต้องเพิ่มค่า  $\phi M_n$  โดยการเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงลงในหน้าตัดนั้น ๆ



รูปที่ 2.15 การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว [3]

### 2.20.1 การเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

พิจารณาหน้าตัดที่มีเฉพาะเหล็กเสริมอัดแรงในรูปที่ สมมุติว่าหน้าตัดคานมีปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง ระยะเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งได้ถูกออกแบบมาโดยทฤษฎีอีลาสติกแล้ว จากหน้าตัดที่ได้สามารถคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดได้จากสมการที่

$$M_n = T_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.20.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= A_{ps}f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.20.2)$$

ถ้ากำลังของหน้าตัด  $\phi M_{n1}$  มากกว่าหรือเท่ากับกำลังต้องการ  $M_u$  ก็ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กเสริมใด ๆ เพิ่มเติม เพราะกำลังออกแล้วแต่มีเพียงพอ แต่ถ้า  $\phi M_{n1}$  น้อยกว่า  $M_u$  หมายถึงว่ากำลังของหน้าตัดไม่เพียงพอต้องเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพิ่มเติม

นอกเหนือจากการที่จะต้องทำให้กำลังของหน้าตัดเพียงพอ ต้องตรวจสอบความเหนียวของหน้าตัดนั้นด้วย การเสริมเหล็กรับแรงถึงเพิ่มเติมที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงเกินปริมาณเหล็กที่เกณฑ์สมดุล (balanced condition) ซึ่งการวิบัติชนิดแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) อาจเกิดขึ้นได้ ทำให้องค์อาคารนั้นเปราะ ดังนั้นการเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงดึงจะต้องตรวจสอบไม่ให้ปริมาณเหล็กมีมากเกินไป ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากสมการต่อไปนี้

$$\omega_p \quad (2.20.3)$$

$$\omega_p + (\omega - \omega) \frac{d}{d_p} \leq 0.36\beta_1 \quad (2.20.4)$$

$$\omega_{pw} + (\omega_w - \omega_w) \frac{d}{d_p} \quad (2.20.5)$$

การเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงดึง ทำให้ค่า  $\omega$  เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้ค่าทางซ้ายของสมการที่ เกินค่า  $0.36\beta_1$  ดังนั้นในบางครั้งการที่จะเพิ่มกำลังของหน้าตัด  $\phi M_n$  ต้องเพิ่มทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงอัดลงไปพร้อมกันเพื่อให้ค่าทางซ้ายของสมการที่ เกิน  $0.36\beta_1$  ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

สำหรับกรณีที่  $\phi M_{n1}$  มีค่าน้อยกว่า  $M_u$  และปริมาณเหล็กเสริมไม่มีปัญหากับความเหนียว (หมายถึง ทำทางซ้ายมือของสมการที่ ยังน้อยกว่า  $0.36\beta_1$  มาก) อาจเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง  $A_s$  เพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มค่า  $\phi M_n$  ดังรูปที่ แสดงถึงการเพิ่มเหล็กเสริมอัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวเพื่อเพิ่มค่า  $\phi M_n$  โดยปกติที่สถานะประลัยหน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่เพิ่มเติมมานั้นจะมากกว่าหน่วยการยึดตัวที่จุดคลาก ( $\epsilon_s > \epsilon_y$ ) นั่นคือหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมไม่อัดแรงมีค่าเท่ากับกำลังคลาก ( $\sigma_s = f_y$ ) เหล็กเสริมไม่อัดแรงที่เพิ่มเข้ามานั้นทำให้แรงดลัพท์ของหน้าตัดมากขึ้น ( $T_{ps} + T_s$ ) และดังนั้นเพิ่มแรงอัดลัพท์ด้วย ( $C = T_{ps} + T_s$ ) การที่แรงอัดลัพท์จะเพิ่มขึ้นได้นั้น หมายความว่าค่าความลึก  $a$  จะต้องเพิ่มขึ้น ( $a_2 > a_1$ ) และค่าความลึกของแกนสะเทิน  $C$  เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าหน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงที่กำลังประลัยลดลง ( $\epsilon_{ps}$  ลดลง) ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยจึงลดลงด้วย ( $f_{ps}$  ลดลง) แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี การลดลงของค่า  $f_{ps}$  ค่อนข้างน้อยมาก ถ้าค่าทางซ้ายของสมการที่ น้อยกว่า  $0.36\beta_1$  ดังนั้นอาจใช้ค่า  $f_{ps}$  เท่าเดิมในการคำนวณได้ ถ้าให้โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเท่ากับ  $M_{n2}$

$$\begin{aligned} M_{n2} &= M_n - M_{n1} \\ &= \frac{M_u}{\phi} - M_{n1} \end{aligned} \quad (2.20.6)$$

โดยที่  $M_{n2}$  หาได้จาก  $M_{n2} = T_s z_2 = A_s f_y z_2$  (2.20.7)

จากสมการที่ และ

$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - M_{n1}}{f_y z_2} \quad (2.20.8)$$

โดยที่  $A_s$  คือ ปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงที่เพิ่มเข้าไปในหน้าตัด สำหรับการเพิ่มกำลังของหน้าตัด

$M_{n1}$  คือ กำลังในการรับโมเมนต์ของหน้าตัด ก่อนที่จะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง

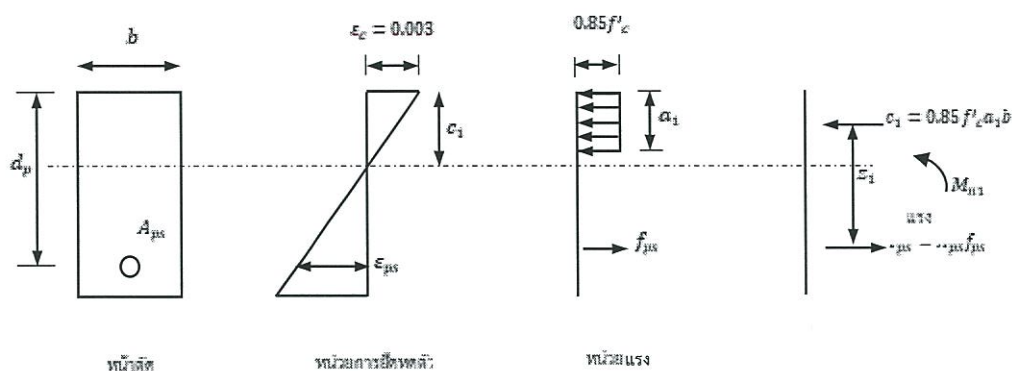
$M_u$  คือ กำลังที่ต้องการของหน้าตัด

$\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลังของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 0.9

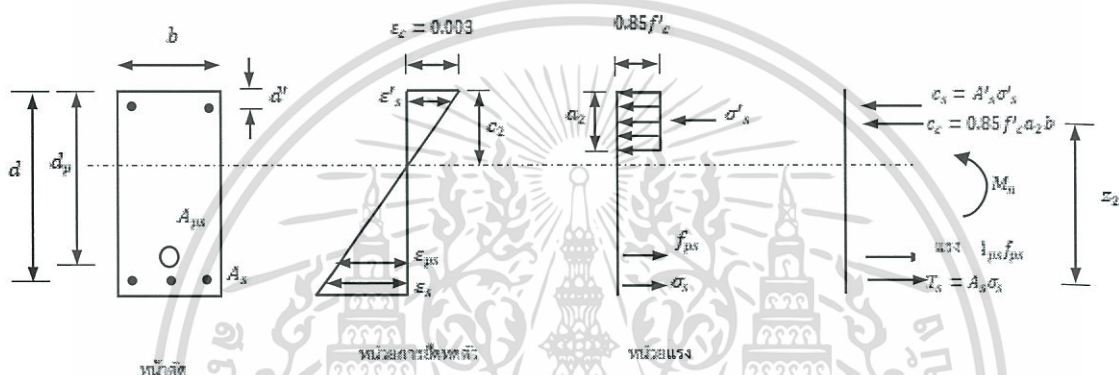
$z_2$  คือ แขนของโมเมนต์คู่ควบของ  $C_2$  และ  $T_s$  ที่เกิดจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงซึ่งอาจหาค่าได้โดยประมาณเท่ากับ  $0.9(d - a_1)$

### 2.20.2 การเพิ่มขึ้นเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและ เหล็กเสริมไม่อัดแรงรับอัด

ในการเสริมเหล็กไม่อัดแรงบนหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง เพื่อเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัดนั้น บางครั้งถ้าเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว อาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับความเหนียวของหน้าตัดได้พิจารณาสมการที่ ถ้าหน้าตัดใดที่ออกแบบมาโดยทฤษฎีอีลาสติกแล้วปรากฏว่า  $\omega_p$  ได้เพียงค่า  $0.36\beta_1$  การเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัดต้องเพิ่มทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงอัดลงไปด้วยเพื่อมีให้ค่าทางซ้ายมือของสมการ เกิน  $0.36\beta_1$  หน้าตัดจะได้มีความเหนียวเพียง



(ก) หน้าตัดคานที่มีเฉพาะเหล็กเสริมอัดแรง



(ข) หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมอัดแรง และเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงดัด

รูปที่ 2.16 การเพิ่มโมเมนต์ดัดประลัยโดยเหล็กเสริมทั้งเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดัด [3]

ในการออกแบบเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงดัด เพื่อเพิ่มกำลังภายในของหน้าตัดจะสมมติว่าการเสริมเหล็กไม่อัดแรงนี้ไม่ทำให้ค่าความลึกของแกนสะเทิน  $c$  เปลี่ยนไป ( $c_2 = c_1$ ) ดังนั้นถ้า  $a$  จึงไม่เปลี่ยนไป ( $a_2 = a_1$ ) เนื่องจากค่า  $a$  ไม่เปลี่ยนจะได้ว่า ค่าแรง  $C_c$  (แรงอัดที่นับโดยคอนกรีต) ก็จะเท่ากันระหว่างรูปที่ (ก) และ (ข) และเนื่องจากค่า  $C_c$  และ  $T_{ps}$  (แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรง) เท่ากัน ดังนั้นจะได้ว่า  $T_{ps}$  ในรูปที่ 5.17 (ก) เท่ากับในรูปที่ 5.17 (ข) อีกทางหนึ่งก็คือ การเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงทั้งเหล็กเสริมรับและอัดและแรงดึงลงไปในหน้าตัดจะไม่ทำให้การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเปลี่ยนไป และจากรูป (ข) สามารถหาค่าหน่วยแรงการหดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดัด  $\epsilon'_s$  และหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริมไม่อัดแรงดัดและแรงดึง  $\epsilon_s$  ได้จาก

$$\epsilon_s = 0.003 \left( \frac{c_2 - d}{c_2} \right) = 0.003 \left( \frac{c_1 - d}{c_1} \right) \quad (2.20.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_s = 0.003 \left( \frac{d - c_2}{c_2} \right) = 0.003 \left( \frac{d - c_1}{c_1} \right) \quad (2.20.10)$$

ถ้าให้หน่วยการยืดหดตัวที่จุดกลางเท่ากับ  $\varepsilon_y$  ดังนั้น ค่าหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงอัด  $\sigma'_s$  และค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่รับแรงดึง  $\sigma_s$  สามารถหาได้จาก

$$\sigma'_s = E_s \varepsilon'_s \quad \text{ถ้า } \varepsilon'_s < \varepsilon_y$$

$$= f_y \quad \text{ถ้า } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{ถ้า } \varepsilon_s < \varepsilon_y$$

$$= f_y \quad \text{ถ้า } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y$$

โดยที่  $f_y$  คือ กำลังครากของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

ถ้าให้โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมเหล็กไม่อัดแรงรับแรงอัดและเหล็กไม่อัดแรงรับแรงดึงเท่ากับ  $M_{n2}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$M_{n2} = M_n - M_{n1} \quad (2.20.11)$$

$$= \frac{M_u}{\phi} - M_{n1} \quad (2.20.12)$$

โดยที่  $M_{n2}$  หาได้จาก  $M_{n2} = C_s(d - d') = T_s(d - d') \quad (2.20.13)$

$$= A_s \sigma_s (d - d') = A_s \sigma_s (d - d') \quad (2.20.14)$$

จะได้ว่า

$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - M_{n1}}{\sigma_s (d - d')} \quad (2.20.15)$$

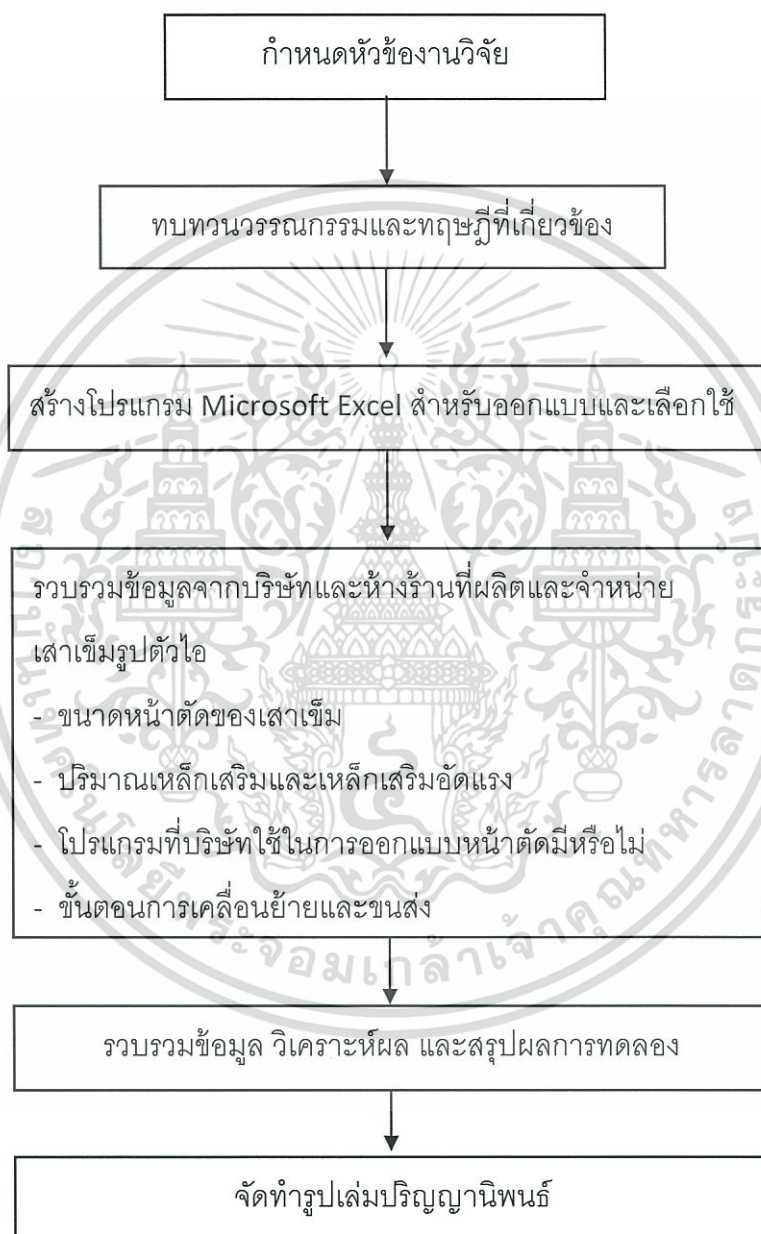
$$A_s = \frac{\frac{M_u}{\phi} - M_{n1}}{\sigma_s (d - d')} \quad (2.20.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 แผนผังการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.2.1 ศึกษาค้นคว้าหลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและวิเคราะห์การรับโมเมนต์ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ จำเป็นต้องศึกษาและมีความรู้เกี่ยวกับทฤษฎี ดังต่อไปนี้

- การออกแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete Design)
- โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)
- ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็ม

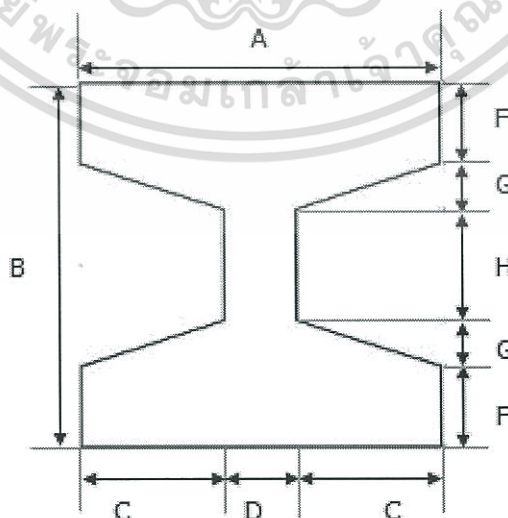
#### 3.2.2 การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

โดยงานวิจัยจำเป็นต้องเก็บรวบรวมข้อมูล จากบริษัทและห้างร้านที่ผลิตและจัดจำหน่ายเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ โดยจะสอบถามและเก็บรวบรวมข้อมูล ดังต่อไปนี้

- ขนาดหน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอที่บริษัทและห้างร้านผลิตและจัดจำหน่าย
- ปริมาณเหล็กเสริมและเหล็กเสริมอัดแรงที่ใส่ในเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ
- ทางบริษัทมีโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและออกแบบหรือไม่

#### แบบสอบถาม

เนื่องจากคณะผู้ทำการที่ต้องการที่จะรวบรวมขนาดหน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ราคา และโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ จึงได้ติดต่อไปยังทางบริษัทต่างๆ ทั้งทางโทรศัพท์ และขอเข้าเยี่ยมชมบริษัทและได้ข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าตัดของเสาเข็มรูปไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบริษัท บริษัท ร่มเกล้าคอนกรีต จำกัด

สถานที่ตั้ง 55 ถนนร่มเกล้า แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอที่จัดจำหน่ายและราคา

ขนาดหน้าตัด	ราคา (บาท/ม.)	พื้นที่หน้าตัด (ซม <sup>2</sup> )	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	F (มม.)	G (มม.)	H (มม.)
18×18 TIS	120	275	180	180	55	70	60	15	30
22×22 TIS	160	386	220	220	70	80	65	20	50
26×26 TIS	210	489	260	260	85	90	65	20	90
30×30 TIS	250	660	300	300	100	100	75	30	90
35×35 TIS	350	880	350	350	115	120	85	30	120
40×40 TIS	510	1240	400	400	120	160	110	30	120

มีโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่

ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบริษัท บริษัท อรัญคอนกรีต จำกัด

สถานที่ตั้ง 39 หมู่ 1 ถ.สุพรรณบุรี-ชัยนาท ต.สามชุก อ.สามชุก จ. สุพรรณบุรี 72130

ขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอที่จัดจำหน่ายและราคา

ขนาดหน้าตัด	ราคา (บาท/ม.)	พื้นที่หน้าตัด (ชม <sup>2</sup> )	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	F (มม.)	G (มม.)	H (มม.)
18×18 TIS	130	275	180	180	55	70	60	15	30
22×22 TIS	160	386	220	220	70	80	65	20	50
26×26 TIS	220	489	260	260	85	90	65	20	90
30×30 TIS	280	660	300	300	100	100	75	30	90
35×35 TIS	360	880	350	350	115	120	85	30	120
40×40 TIS	530	1240	400	400	120	160	110	30	120

มีโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่

ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบริษัท บริษัท สินอุดมคอนกรีต จำกัด

สถานที่ตั้ง 27 ถนนสามวา แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ ฯ 10510

ขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอที่จัดจำหน่ายและราคา

ขนาดหน้าตัด	ราคา (บาท/ม.)	พื้นที่หน้าตัด (ซม <sup>2</sup> )	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	F (มม.)	G (มม.)	H (มม.)
22×22 TIS	150	386	220	220	70	80	65	20	50
26×26 TIS	210	489	260	260	85	90	65	20	90
30×30 TIS	270	660	300	300	100	100	75	30	90
35×35 TIS	350	880	350	350	115	120	85	30	120
40×40 TIS	530	1240	400	400	120	160	110	30	120

มีโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่

ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบริษัท บริษัท ฉะเชิงเทราคอนกรีต จำกัด

สถานที่ตั้ง 27 ถนนสามวา แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ ฯ 10510

ขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอที่จัดจำหน่ายและราคา

ขนาดหน้าตัด	ราคา (บาท/ม.)	พื้นที่หน้าตัด (ซม <sup>2</sup> )	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	F (มม.)	G (มม.)	H (มม.)
18×18 TIS	130	275	180	180	55	70	60	15	30
22×22 TIS	160	386	220	220	70	80	65	20	50
26×26 TIS	220	489	260	260	85	90	65	20	90
30×30 TIS	250	660	300	300	100	100	75	30	90
35×35 TIS	350	880	350	350	115	120	85	30	120
40×40 TIS	530	1240	400	400	120	160	110	30	120

มีโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่

ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบริษัท บริษัท เอเชียกรุป(1999) จำกัด

สถานที่ตั้ง 757 หมู่ 10 ถนนพระราม 2 แขวงบางมด เขตจอมทอง กรุงเทพฯ 10150

ขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอที่จัดจำหน่ายและราคา

ขนาดหน้าตัด	ราคา (บาท/ม.)	พื้นที่หน้าตัด (ซม <sup>2</sup> )	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	F (มม.)	G (มม.)	H (มม.)
18x18 TIS	120	275	180	180	55	70	60	15	30
22x22 TIS	170	386	220	220	70	80	65	20	50
26x26 TIS	230	489	260	260	85	90	65	20	90
30x30 TIS	250	660	300	300	100	100	75	30	90
35x35 TIS	350	880	350	350	115	120	85	30	120
40x40 TIS	520	1240	400	400	120	160	110	30	120
12x12	100	119	120	120	25	70	25	20	30
15x15	100	169	150	150	50	70	30	20	50
18x18	120	207	180	180	65	50	35	20	70
22x22	160	327	220	220	75	70	45	25	80
26x26	210	469	260	260	90	80	60	25	90
30x30	250	570	300	300	105	90	55	33	124
35x35	340	805	350	350	120	110	70	35	140
40x40	360	1045	400	400	140	120	80	44	156
50x50	450	1990	500	500	170	160	160	30	120

มีโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือไม่

มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงราคาต่อเมตรของแต่ละหน้าตัดจากบริษัทที่ทำกรสำรวจ

ชื่อบริษัท ขนาด	ร่มเกล้า	อรัญ	สินอุดม	ฉะเชิงเทรา	เอเชียกรุป
	คอนกรีต (บาท)	คอนกรีต (บาท)	คอนกรีต (บาท)	คอนกรีต (บาท)	(1999) (บาท)
18×18 TIS	120	130	-	130	120
22×22 TIS	160	160	150	160	170
26×26 TIS	210	220	210	220	230
30×30 TIS	250	280	270	250	250
35×35 TIS	350	360	350	350	350
40×40 TIS	510	530	530	530	520
12×12					100
15×15					100
18×18					120
22×22					160
26×26					210
30×30					250
35×35					340
40×40					360
50×50					450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสอบถามไปยังบริษัทต่างๆ ทำให้ทราบว่าในหลายๆบริษัทไม่สามารถออกแบบเสาเข็มได้ หรือไม่มีโปรแกรมในการออกแบบ และจากที่ได้สอบถามถึงราคาของเสาเข็ม ทางบริษัทได้แจ้งว่าขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัยมากทั้ง จำนวนที่จะใช้ ระยะทางจัดส่ง รถที่จะทำการจัดส่ง ฯลฯ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้ราคาเสาเข็มไม่แน่นอนซึ่งราคาที่ได้มาเป็นราคาโดยประมาณจากทางบริษัทเท่านั้น

### 3.2.3 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบ โดยใช้ Microsoft Excel

หลังจากได้ข้อมูลเบื้องต้นจากบริษัทและห้างร้านที่ผลิตและจัดจำหน่ายเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ทำให้ทราบว่า ยังไม่มีโปรแกรมที่คำนวณและออกแบบเสาเข็ม แต่ใช้การผลิตจากรูปแบบที่มีการคำนวณออกแบบตามรูปแบบเดิม ๆ ทำให้การเลือกใช้งานไม่เหมาะสมกับสภาพของงาน โดยการสร้างโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 เรื่อง คือขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce Concrete Design) และการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestress Concrete Design) โดยมีขั้นตอนดังนี้มีดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์ดัด
- สร้างโปรแกรมการคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์ดัด โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel
- ทำการตรวจสอบผลการคำนวณของโปรแกรมโดยส่งโปรแกรมให้ทางบริษัททดลองใช้

### 3.2.4 การประเมินผลที่ได้รับจากโปรแกรมออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์ดัดรูปตัวไอ

หลังจากรู้ขนาดของโครงสร้าง แรงแง และโมเมนต์ดัดที่กระทำต่อเสาเข็ม จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแล้วนำผลที่ได้มากเป็นข้อมูลเทียบเคียงในการประกอบการตัดสินใจเลือกใช้เสาเข็มรูปตัวไอพร้อมทั้งบอกแหล่งจัดจำหน่าย

### 3.3 ตารางการดำเนินงาน

วัน/เดือน/ปี	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ก.				ก.พ.				มี.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษาค้นคว้าเรื่องที่น่าสนใจ			■	■																												
2. กำหนดหัวข้อโครงการวิจัย					■																											
3. วางแผนการดำเนินงาน						■	■	■																								
4. ทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง									■	■	■	■																				
5. จัดทำโปรแกรมโดยใช้ Excel													■	■	■	■	■	■	■	■	■											
6. เตรียมการนำเสนอ ครั้งที่ 1													■	■	■	■																
7. นำเสนอโครงการวิจัย ครั้งที่ 1																	■	■	■	■												
8. สํารวจและเก็บข้อมูล									■	■	■	■					■	■	■	■												
9. วิเคราะห์ข้อมูลที่สำรวจ																					■	■	■	■								
10. เขียนรายงานเพื่อสรุปผลโครงการ																									■	■	■	■				
11. เตรียมการนำเสนอ ครั้งที่ 2																													■	■	■	■
12. นำเสนอโครงการวิจัย ครั้งที่ 2																																
13. จัดทำรูปเล่มโครงการวิจัย																																
14. เผยแพร่โครงการวิจัย																																

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเวลาการดำเนินงาน

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณและออกแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ
2. การประเมินราคาเสาเข็มเบื้องต้น

#### 1. การคำนวณและออกแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ

1.1 กำหนดค่าโมเมนต์ที่ต้องการออกแบบ โดยพิจารณาจากข้อมูลที่มี หรือตามความต้องการที่จะส่งผลิตเสาเข็มรับโมเมนต์ตัด

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	หน่วย
โมเมนต์ที่ต้องการ	400	kg-m
เลือกหน้าตัด	26x26 TIS	cm <sup>2</sup>
ความยาวที่มี	8-24	m
ความยาวที่เลือก	10	m
Fc	540	ksc
ความชื้น	76-100	%

รูปที่ 4.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

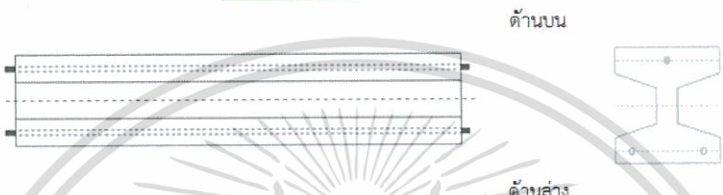
## 1.2 เลือกขนาดหน้าตัดที่ต้องการผลิต โปรแกรมจะมีขนาดหน้าตัดให้เลือก

BENDING MOMENT I-PILE DESIGN PROGRAM

โมเมนต์ที่ต้องการ	=	400	kg-m
เลือกหน้าตัด	=	26x26 TIS	cm <sup>2</sup>
ความยาวที่มี	=	8-24	m
ความยาวที่เลือก	=	10	m
Fc	=	540	ksc
ความชื้น	=	76-100	%

ข้อมูลหน้าตัด

ด้านบน



ด้านล่าง

รูปที่ 4.2 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

## 1.3 สามารถตรวจสอบข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม โดย คลิกที่

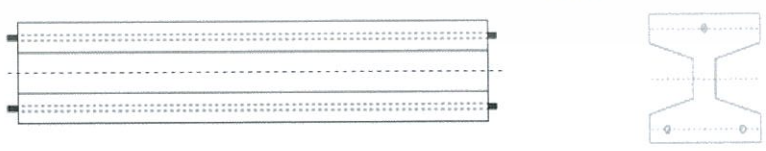
ข้อมูลหน้าตัด

BENDING MOMENT I-PILE DESIGN PROGRAM

โมเมนต์ที่ต้องการ	=	400	kg-m
เลือกหน้าตัด	=	26x26 TIS	cm <sup>2</sup>
ความยาวที่มี	=	8-24	m
ความยาวที่เลือก	=	10	m
Fc	=	540	ksc
ความชื้น	=	76-100	%

ข้อมูลหน้าตัด

ด้านบน



ด้านล่าง

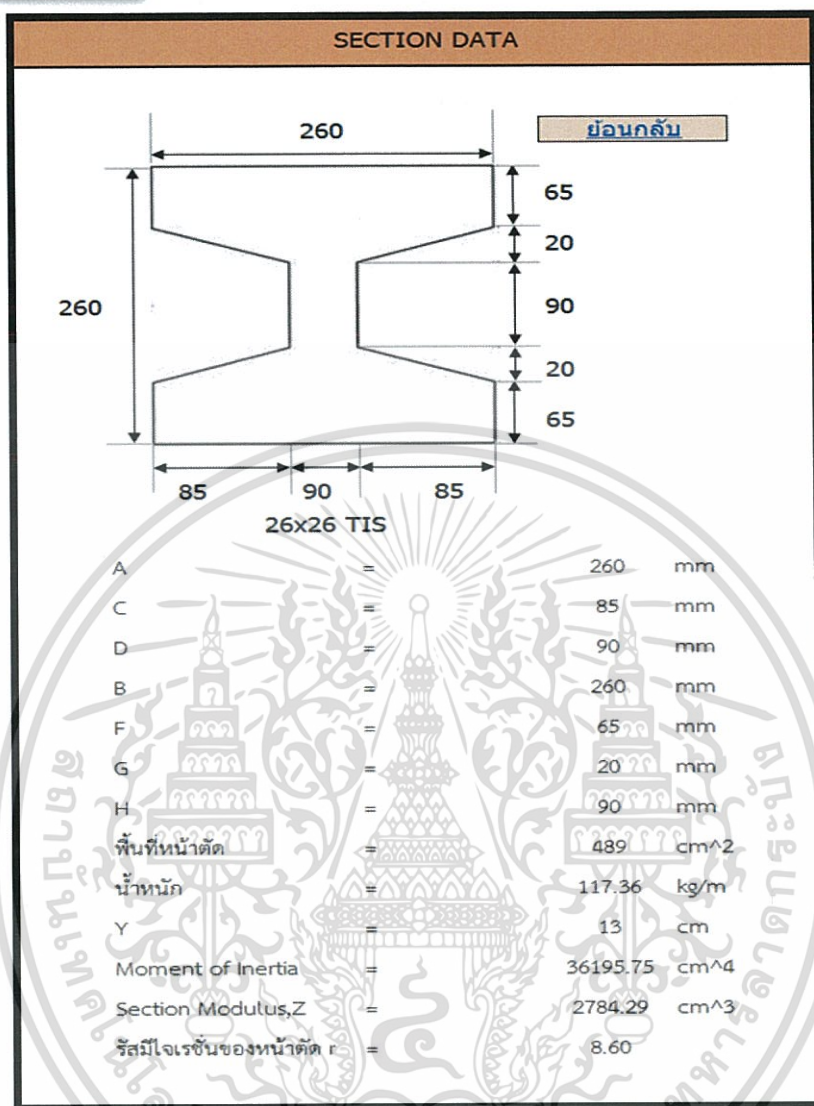
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลิก



จะแสดงหน้าต่างของข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างของข้อมูลขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 เลือกความยาวที่ต้องการ ให้สอดคล้องกลับความต้องการในการใช้งาน โดยมีช่วงความยาว กำหนดมาให้ จากการสอบถามและสำรวจบริษัทที่ผลิตและจัดจำหน่าย

BENDING MOMENT I-PILE DESIGN PROGRAM

โมเมนต์ที่ต้องการ	=	400	kg-m
เลือกหน้าตัด	=	26x26 TIS	cm <sup>2</sup>
ความยาวที่มี	=	8-24	m
ความยาวที่เลือก	=	10	m
Fc	=	540	ksc
ความชื้น	=	76-100	%

ข้อมูลหน้าตัด

รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

1.5 ระบุค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตและกำหนดค่าความชื้น

BENDING MOMENT I-PILE DESIGN PROGRAM

โมเมนต์ที่ต้องการ	=	400	kg-m
เลือกหน้าตัด	=	26x26 TIS	cm <sup>2</sup>
ความยาวที่มี	=	8-24	m
ความยาวที่เลือก	=	10	m
Fc	=	540	ksc
ความชื้น	=	76-100	%

ข้อมูลหน้าตัด

รูปที่ 4.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 เลือกขนาดและชนิดของเหล็กเสริมอัดแรงหรือเหล็กเสริมไม่อัดแรง พร้อมระบุจำนวนเหล็กที่จะใช้ หลังจากนั้นกำหนดแรงดึงของเส้นลวดโดยไม่ควรเกินแรงดึงสูงสุดต่อเส้น โดยกำหนดทั้งด้านบนและด้านล่าง และสามารถตรวจสอบข้อมูลเหล็กเสริมได้ โดยคลิกที่

ข้อมูลเหล็กเสริมด้านบน

ชนิดเหล็กด้านบน	= 12.7 mm เกรด 1750 ลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มอก. 420-2534		
Modulus of elasticity Es	= 2040000 ksc	ข้อมูลเหล็กเสริมด้านบน	
จำนวน	= 2 เส้น		
แรงดึงสูงสุดต่อเส้น	= 9400.32 kg/เส้น		
แรงดึงที่เลือก	= 5000 kg/เส้น	ใส่ 0 กรณีเป็นเหล็กเสริมธรรมดา	
-			
ชนิดเหล็กด้านล่าง	= 12.7 mm เกรด 1750 ลวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มอก. 420-2534		
Modulus of elasticity Es	= 2040000 ksc	ข้อมูลเหล็กเสริมด้านล่าง	
จำนวน	= 4 เส้น		
แรงดึงสูงสุดต่อเส้น	= 9400.32 kg/เส้น		
แรงดึงที่เลือก	= 5000 kg/เส้น	ใส่ 0 กรณีเป็นเหล็กเสริมธรรมดา	
-			
ความเค้นสูงสุดขณะถ่ายแรง	OK	ความเค้นเหล็กเส้นบน	OK
ความเค้นสูงสุดขณะรับน้ำหนัก	OK	ความเค้นเหล็กเส้นล่าง	OK
พร้อมใช้งาน		สมดุลเหล็กเสริม	OK
<a href="#">แปลนเสาเข็ม</a>		<a href="#">ปริมาณราคา</a>	<a href="#">รายการคำนวณ</a>

รูปที่ 4.7 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลิก

ข้อมูลเหล็กเสริมคานบน

จะแสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม ดังตัวอย่างต่อไปนี้

TOP STEEL DATA			
เหล็กคานบน			ย้อนกลับ
ชนิดเหล็ก	12.7 mm เกรด 1750 สวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มอก. 420-2534		
พื้นที่หน้าตัด	= 92.9	mm <sup>2</sup>	
ความเค้นสูงสุดที่จุดคราก	= 15810.55	ksc	
ความเค้นสูงสุดที่ยอมให้	= 11067.38	ksc	
กำลังดึงที่จุดคราก kg/เส้น	= 14688	kg	
กำลังดึงประลัย kg/เส้น	= 16320	kg	
แรงดึงสูงสุดจากเครื่องดึง kg/เส้น	= 11750.4	kg	
จำนวนเส้น	= 2		
ระยะเยื้อง	= 10	cm	
พื้นที่หน้าตัดรวม	= 1.858	cm <sup>2</sup>	
Pj	= 10000	kg	
การสูญเสียแรงดึงแบบทันทีทันใด			
f <sub>cir</sub>	= 80.48482	ksc	
ES	= 519.7071	ksc	
Pi	= 9034.384	kg	สูญเสีย 9.66 %
การสูญเสียแรงดึงตามกาลเวลา			
Shrinkage loss	= 350	ksc	
f <sub>cds</sub>	= 0.143663	ksc	
Creep loss	= 964.8122	ksc	
Steel relaxation loss	= 939.1547	ksc	
Pe	= 4846.514	kg	สูญเสีย 51.53 %

รูปที่ 4.8 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ตรวจสอบความเค้นสูงสุดขณะถ่ายแรงและรับน้ำหนักบรรทุกว่าอยู่ในค่าที่ยอมให้หรือไม่ และสามารถตรวจสอบผลการคำนวณ โดยคลิกไปที่ **รายการคำนวณ**

ชนิดเหล็กด้านบน	= 12.7 mm เกรด 1750 สวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มอก. 420-2534		
Modulus of elasticity Es	= 2040000 ksc	<b>ข้อมูลเหล็กเสริมด้านบน</b>	
จำนวน	= 2 เส้น		
แรงดึงสูงสุดต่อเส้น	= 9400.32 kg/เส้น		
แรงดึงที่เลือก	= 5000 kg/เส้น	ใส่ 0 กรณีเป็นเหล็กเสริมธรรมดา	
-			
ชนิดเหล็กด้านล่าง	= 12.7 mm เกรด 1750 สวดเกลียวอัดแรงชนิด 7 เส้น มอก. 420-2534		
Modulus of elasticity Es	= 2040000 ksc	<b>ข้อมูลเหล็กเสริมด้านล่าง</b>	
จำนวน	= 4 เส้น		
แรงดึงสูงสุดต่อเส้น	= 9400.32 kg/เส้น		
แรงดึงที่เลือก	= 5000 kg/เส้น	ใส่ 0 กรณีเป็นเหล็กเสริมธรรมดา	
-			
ความเค้นสูงสุดขณะถ่ายแรง	OK	ความเค้นเหล็กเส้นบน	OK
ความเค้นสูงสุดขณะรับน้ำหนัก	OK	ความเค้นเหล็กเส้นล่าง	OK
พร้อมใช้งาน		สมดุลเหล็กเสริม	OK
<b>แปลนเสาเข็ม</b>	<b>ประมาณราคา</b>	<b>รายการคำนวณ</b>	

รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างโปรแกรมคำนวณและออกแบบเสาเข็มรับโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลิก

รายการคำนวณ

จะแสดงหน้าต่างของรายการการคำนวณและออกแบบเสาเข็ม ดัง

ตัวอย่างต่อไปนี้

SOLUTION METHOD			
โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคาน MG	=	1467.00	kg-m
โมเมนต์ที่เกิดขึ้น MT	=	1867.00	kg-m
โมเมนต์ที่ออกแบบ MTn	=	2074.44	kg-m
<b>หน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะถ่ายแรง</b>			
กึ่งกลางคานด้านบน	=	76.59	ksc OK
กึ่งกลางคานด้านล่าง	=	31.82	ksc OK
ปลายคานด้านบน	=	23.90	ksc OK
ปลายคานด้านล่าง	=	84.51	ksc OK
<b>หน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะรับน้ำหนักบรรทุก</b>			
กึ่งกลางคานด้านบน	=	88.76	ksc OK
กึ่งกลางคานด้านล่าง	=	-34.38	ksc OK
ปลายคานด้านบน	=	14.25	ksc OK
ปลายคานด้านล่าง	=	40.12	ksc OK
<b>หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริม</b>			
เหล็กด้านบนเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก	=	63.825189	ksc OK
เหล็กด้านล่างเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก	=	63.825189	ksc OK
เหล็กด้านบนเนื่องจากโมเมนต์ทั้งหมด	=	5445.9565	ksc OK
เหล็กด้านล่างเนื่องจากโมเมนต์ทั้งหมด	=	5445.9565	ksc OK

รูปที่ 4.10 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม

SOLUTION METHOD			
<b>ตรวจสอบสมมูลเหล็กเสริม</b>			
Pp	=	0.008932692	
Fps	=	15810.54898	
F'c	=	540	
P	=	0	
P'	=	0	
Fy	=	3000	ksc
Aps	=	5.574	cm <sup>2</sup>
As	=	0	cm <sup>3</sup>
A's	=	0	cm <sup>4</sup>
b	=	26	cm
Wpw	=	0.261538462	
Ww	=	0	
W'w	=	0	
dp	=	24	cm
d	=	15	cm
ดัชนีเหล็กเสริมอัดแรง	=	0.261538462	
B	=	0.85	
ค่าดัชนีที่ยอมให้	=	0.306	OK

รูปที่ 4.11 แสดงหน้าต่างของข้อมูลเหล็กเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การประเมินราคาเสาเข็มเบื้องต้น

2.1 กำหนดขนาดหน้าตัดของเสาเข็มที่ต้องการประมาณราคาเบื้องต้น เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อเสาเข็ม

ประมาณราคา			
ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม	=	22x22 TIS	cm <sup>2</sup>
A	=	386	cm <sup>3</sup>
ความยาวที่มี	=	6-18	m
ความยาวที่ต้องการ	=	10	m
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กด้านบน	=	6	mm
จำนวนเหล็กด้านบน	=	2	เส้น
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	6	mm
จำนวนเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	2	เส้น
จำนวนที่ต้องการ	=	100	ต้น
ราคาเหล็กเฉลี่ย	=	35.584992	bath/m
ราคาคอนกรีตเฉลี่ย	=	115.8	bath/m
ค่าแรงคนงาน ค่าแบบ ขนส่ง	=	22.7077488	bath/m
ราคาเฉลี่ยต่อเมตร	=	174.0927408	bath/m
ราคารวม	=	174092.7408	bath

รูปที่ 4.12 แสดงหน้าตาโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เลือกความยาวที่ต้องการ โดยให้อยู่ในช่วงความยาวที่มีขายตามท้องตลาด

ประมาณราคา		
ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม	=	22x22 TIS cm <sup>2</sup>
A	=	386 cm <sup>3</sup>
ความยาวที่มี	=	6-18 m
ความยาวที่ต้องการ	=	10 m
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กดัดบน	=	6 mm
จำนวนเหล็กดัดบน	=	2 เส้น
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	6 mm
จำนวนเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	2 เส้น
จำนวนที่ต้องการ	=	100 ต้น
ราคาเหล็กเฉลี่ย	=	35.584992 bath/m
ราคาคอนกรีตเฉลี่ย	=	115.8 bath/m
ค่าแรงคนงาน ค่าแบบ ขนส่ง	=	22.7077488 bath/m
ราคาเฉลี่ยต่อเมตร	=	174.0927408 bath/m
ราคารวม	=	174092.7408 bath

รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริม ทั้งด้านบนและด้านล่าง

ประมาณราคา			
ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม	=	22x22 TIS	cm <sup>2</sup>
A	=	386	cm <sup>3</sup>
ความยาวที่มี	=	6-18	m
ความยาวที่ต้องการ	=	10	m
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กด้านบน	=	6	mm
จำนวนเหล็กด้านบน	=	2	เส้น
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	6	mm
จำนวนเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	2	เส้น
จำนวนที่ต้องการ	=	100	ต้น
ราคาเหล็กเฉลี่ย	=	35.584992	bath/m
ราคาคอนกรีตเฉลี่ย	=	115.8	bath/m
ค่าแรงคนงาน ค่าแบบ ขนส่ง	=	22.7077488	bath/m
ราคาเฉลี่ยต่อเมตร	=	174.0927408	bath/m
ราคารวม	=	174092.7408	bath

รูปที่ 4.14 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เลือกจำนวนเสาเข็มที่ต้องการจะประมาณราคา หลังจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณราคาเสาเข็มที่ประมาณราคา ในหน่วยบาท/เมตร และราคารวมทั้งหมด

ประมาณราคา		
ขนาดหน้าตัดเสาเข็ม	=	22x22 TIS cm <sup>2</sup>
A	=	386 cm <sup>3</sup>
ความยาวที่มี	=	6-18 m
ความยาวที่ต้องการ	=	10 m
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กดัดบน	=	6 mm
จำนวนเหล็กดัดบน	=	2 เส้น
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	6 mm
จำนวนเหล็กอัดแรงด้านล่าง	=	2 เส้น
จำนวนที่ต้องการ	=	100 ต้น
ราคาเหล็กเฉลี่ย	=	35.584992 bath/m
ราคาคอนกรีตเฉลี่ย	=	115.8 bath/m
ค่าแรงคนงาน ค่าแบบ ขนส่ง	=	22.7077488 bath/m
ราคาเฉลี่ยต่อเมตร	=	174.0927408 bath/m
ราคารวม	=	174092.7408 bath

รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น

2.5 โปรแกรมจะแสดงบริษัทที่มีเสาเข็มขนาดหน้าตัดนั้นๆ และราคาที่จำหน่าย

บริษัทที่จัดจำหน่าย	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อเมตร)
บริษัท สีนอุดมคอนกรีต จำกัด	150 bath/m
บริษัท อรัญคอนกรีต จำกัด	160 bath/m
บริษัท เอเซียกรุป (1999) จำกัด	170 bath/m
หจก. ร่มเกล้าคอนกรีตอัดแรง	160 bath/m
บริษัท ฉะเชิงเทราคอนกรีต จำกัด	160 bath/m
ราคาเฉลี่ย	160 bath/m

**ย้อนกลับ**

รูปที่ 4.16 แสดงหน้าต่างโปรแกรมการประมาณราคาเสาเข็มเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการออกแบบเสาสีเขียวรับโมเมนต์ดัด แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อวิศวกรหรือบริษัทที่ต้องการออกแบบและเลือกใช้เสาสีเขียวในงานต่างๆ

จากการสำรวจบริษัทที่ผลิตและจัดจำหน่ายเสาสีเขียวอัดแรงรูปตัวไอ ทั้ง 5 บริษัท มีเพียง 1 บริษัทเท่านั้นที่มีโปรแกรมในการคำนวณออกแบบ ส่วนบริษัทที่เหลือยังไม่สามารถออกแบบเสาสีเขียวเองได้ ต้องออกแบบตามแบบมาตรฐาน มอก. หรือตามที่ลูกค้าต้องการโดยมิให้เลือกไม่มากนัก ทางบริษัทไม่สามารถออกแบบเสาสีเขียวเองได้ จึงจำเป็นต้องว่าจ้างวิศวกรผู้ชำนาญการ มาเป็นที่ปรึกษาในการผลิต ส่วนในการเลือกใช้เสาสีเขียวในงานต่างๆ นั้นทางบริษัทจะเลือกใช้จากกำลังรับแรงอัด โดยไม่คำนึงถึงโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นแต่ในงานที่ใช้เสาสีเขียวมาทำเป็นกำแพงกันดิน จะต้องคำนึงถึงโมเมนต์ดัดเป็นหลัก โดยโปรแกรมจะช่วยให้วิศวกรที่ไม่ได้มีความชำนาญในการออกแบบโครงสร้าง แต่มีความจำเป็นต้องเลือกใช้เสาสีเขียว

โดยโปรแกรม Microsoft excel จะเข้ามาเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ไขปัญหาได้อย่างตรงจุด เพราะตัวโปรแกรมสามารถช่วยออกแบบเสาสีเขียวและเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้ไม่มีความรู้ในการคำนวณการออกแบบเสาสีเขียว ส่งผลให้กระบวนการทำงานรวดเร็วขึ้นได้ ซึ่งตรงกับจุดมุ่งหมายของปริญญานิพนธ์เล่มนี้

#### 5.2 ข้อดีและข้อเสียของตัวโปรแกรม

##### ข้อดี

1. โปรแกรมสามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว เพราะตัวโปรแกรมถูกพัฒนามาจากโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐาน
2. คำสั่งของโปรแกรมต่างๆเป็นภาษาไทยและมีคำอธิบายประกอบการคำนวณ ซึ่งทำให้ผู้ใช้โปรแกรมเข้าใจได้ง่าย
3. โปรแกรมมีขนาดหน้าตัดของเสาสีเขียวตาม มาตรฐาน ของ มอก.
4. โปรแกรมการคำนวณออกแบบเสาสีเขียวสามารถใช้กับอุปกรณ์พื้นฐานเช่น smartphone

เอกสารlaptop และเครื่องคอมพิวเตอร์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสีย

1. ผู้ที่จะสามารถใช้โปรแกรมนี้ได้จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องการใช้เสาเข็ม
2. ราคาของเสาเข็มอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับหลายๆปัจจัย เช่น สภาพเศรษฐกิจ ระยะเวลาขนส่ง และจำนวนการสั่งซื้อ

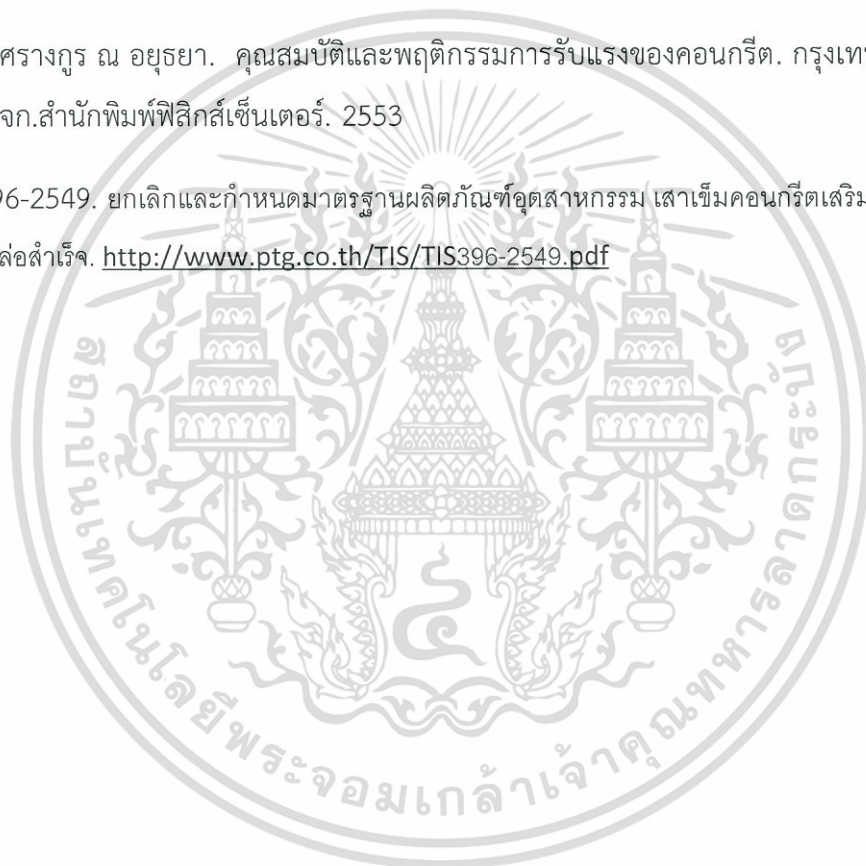
## 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานปริญญาโทฉบับนี้

1. ผู้ที่สนใจในงานวิจัยฉบับนี้สามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือ แอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์มือถือ
2. เพิ่มขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม ให้หลากหลายมากขึ้น (ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.)
3. เพิ่มสีสันของตัวโปรแกรมเพื่อความน่าใช้มากขึ้น
4. เนื่องด้วยราคาเสาเข็มในโปรแกรมเป็นราคา ณ ปัจจุบัน (15 มกราคม 2561) ดังนั้นควรมีการอัปเดตราคาของเสาเข็มอัดแรงเป็นประจำ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. มาตรฐานอาคารสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : บริษัท โกลบอล กราฟฟิก จำกัด. 2549
- [2] นเรศ พันธธาธร. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : LIBRARY NINE PUBLISHING. 2541.
- [3] ต่อกุล กาญจนาลัย. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพมหานคร : หจก.สำนักพิมพ์ฟิลิกส์เซ็นเตอร์. 2537.
- [4] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา. คุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร : หจก.สำนักพิมพ์ฟิลิกส์เซ็นเตอร์. 2553
- [5] TIS 396-2549. ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง หล่อสำเร็จ. <http://www.ptg.co.th/TIS/TIS396-2549.pdf>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## นิยามศัพท์

$\alpha, \beta$	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์และวิธีการบ่ม
$\emptyset$	คือ	ตัวคูณลดกำลัง
$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต
$A_{ps}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง
$A_s$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง
$A'_s$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด
$A_c$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
$b$	คือ	ความกว้างของคาน
$c$	คือ	ระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัด
$CR$	คือ	หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ซม. <sup>2</sup>
$DB$	คือ	เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar)
$d$	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริม ธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.
$d_p$	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัด แรง, ซม.
$E_c$	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
$ES$	คือ	การสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัววิลาสติกของคอนกรีต
$E_s$	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง
$E_{ci}$	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง หาได้จาก $E_{ci} = 15200\sqrt{f'_{ci}}$
$e$	คือ	ระยะเยื้องศูนย์กลาง
$f'_c(t)$	คือ	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ $t$ วัน
$f'_c(28)$	คือ	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน
$f'_c$	คือ	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีหน่วยเป็น กก./ซม. <sup>2</sup>
$f_{py}$	คือ	กำลังคลาก (yield strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม. <sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_{pu}$	คือ	กำลังประลัย (breaking strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็นกก./ ซม. <sup>2</sup>
$f_{cir}$	คือ	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง (กรณีของแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีต $f_{cir} = \frac{P_o}{A_c}$ )
$f_{cds}$	คือ	หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจาก น้ำหนักคงที่ทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคงที่ซึ่งมีอยู่แล้วในขณะอัดแรง หน่วยเป็น กก./ ซม. <sup>2</sup>
$f_{se}$	คือ	หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง (กก./ซม. <sup>2</sup> )
$f_r$	คือ	โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $\cong 2.0 \sqrt{f'_c}$
$f_{ps}$	คือ	หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ
$f_y$	คือ	กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา
HSC	คือ	คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete)
$I$	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของหน้าตัดคอนกรีต
$M$	คือ	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใด ๆ
$M_1$	คือ	โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์
$M_2$	คือ	โมเมนต์ที่คอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก $f_r$
$M_{cr}$	คือ	โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว
$M_{n1}$	คือ	กำลังในการรับโมเมนต์ของหน้าตัด ก่อนที่จะเสริมเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับ แรงดึง
$M_u$	คือ	กำลังที่ต้องการของหน้าตัด
$\phi M_n, \phi P_n, \phi V_n$	คือ	กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
$M_n, P_n, V_n$	คือ	กำลังระบุของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
$M_u, P_u, V_u$	คือ	กำลังที่ต้องการของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือน ตามลำดับ
$M_G$	คือ	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคาน
$n$	คือ	อัตราส่วนโมดูลัส
R	คือ	ค่าโมดูลัสของการแตกหัก
RB	คือ	เหล็กเส้นกลม (Round Bar)
$\Delta L$	คือ	ความยาวที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_j$	คือ แรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องไฮดรอลิก
$P_i$	คือ แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง
$P_0$	คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากถ่ายแรงสู่คอนกรีตแล้ว ซึ่งค่า $P_0$ นี้ยังไม่ทราบค่า แต่สามารถใช้ค่าเท่ากับ 0.9 ของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงก่อนการถ่ายแรงเป็นค่าประมาณเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ
$P_e$	คือ แรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมด
$\rho_p$	คือ อัตราส่วนของ $= \frac{A_{ps}}{bd_p}$
$\rho$	คือ อัตราส่วนของเด็กเสื่อธรรมดาที่รับแรงดึง $= \frac{A_s}{bd}$
$r$	คือ รัศมีจายเรชันของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{I}{A}}$
$r_p$	คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังนี้ $0.4 \text{ เมื่อ } 0.85 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.90$ $0.28 \text{ เมื่อ } f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$
$RH$	คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี หน่วยเป็นร้อยละ
$RE$	คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง หน่วยเป็น กก./ซม. <sup>2</sup>
$SH$	คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ซม. <sup>2</sup>
$\omega_p$	คือ ดัชนีเหล็กสัมผัสแรง $= \frac{\rho_p f'_c}{f'_c}$
$\omega$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง $= \frac{\rho f_y}{f'_c}$
$\omega'$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด $= \frac{\rho' f_y}{f'_c}$
$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีก เช่น รูปตัวที และ ไอ คำนวณเช่นเดียวกับ $\omega_{pw}, \omega_w$ และ $\omega'_w$ ตามลำดับ แต่ความกว้าง $b$ ที่ใช้เป็นความกว้างของตัวแกนและปริมาณเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น
$y$	คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_t$	คือ	โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวบนสุดของคาน = $\frac{I}{c_t}$
$Z_b$	คือ	โมดูลัสของหน้าตัดสำหรับผิวล่างสุดของคาน = $\frac{I}{c_b}$
$\Delta\sigma_s$	คือ	หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้