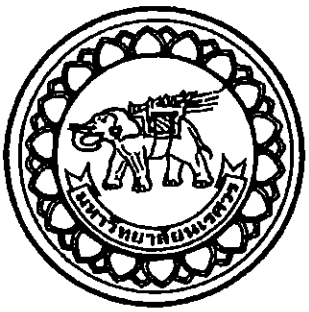


# การพัฒนา Worksheet ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง

## A DEVELOPMENT OF THE WORKSHEET FOR PRESTRESS CONCRETE BEAM DESIGN


นายเตชินท์ มั่นคง รหัส 50361026

นายนวพงษ์ วงษ์พานิช รหัส 50361422

นายอลงกรณ์ ปัจฉิมา รหัส 50363518



ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 19 ก.ค. 2554
เลขทะเบียน 1555776
เลขเรียกหนังสือ ส/ธ.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ต672ก 2553


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553

# ใบรับรองปริญญานิพนธ์

| | | |
|---|---|---|
| **ชื่อหัวข้อโครงงาน** | การพัฒนา Worksheet ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง | |
| **ผู้ดำเนินโครงงาน** | นายเตชินท์ มั่นคง | รหัส 50361026 |
| | นายนวพงษ์ วงษ์พานิช | รหัส 50361422 |
| | นายอลงกรณ์ ปัจฉิมา | รหัส 50363518 |
| **ที่ปรึกษาโครงงาน** | ดร.ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์ | |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมโยธา | |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร | |
| **ปีการศึกษา** | 2553 | |

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร.ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

| | | |
|---|---|---|
| **ชื่อหัวข้อโครงงาน** | การพัฒนา Worksheet ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง | |
| **ผู้ดำเนินโครงงาน** | นายเตชินท์ มั่นคง | รหัส 50361026 |
| | นายนวพงษ์ วงษ์พานิช | รหัส 50361422 |
| | นายอลงกรณ์ ปัจฉิมา | รหัส 50363518 |
| **ที่ปรึกษาโครงงาน** | ดร.ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์ | |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมโยธา | |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร | |
| **ปีการศึกษา** | 2553 | |

.....

## บทคัดย่อ


โครงงานวิศวกรรมโยธาฉบับนี้ เป็นการพัฒนาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชั่นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ในโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา Worksheet สำหรับการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง 3 ส่วนคือ การออกแบบคานเพื่อรับโมเมนต์ดัด การออกแบบคานเพื่อรับแรงเฉือน และการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน ซึ่งการประมวลผลได้อ้างอิงการคำนวณและข้อกำหนดต่างๆ ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) และมาตรฐาน ACI 318-95 หลังจากที่ได้กรอกรายละเอียดครบถ้วนแล้ว โปรแกรมจะทำการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณ โปรแกรมจะแสดงผล ทำให้สามารถออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงได้สะดวกรวดเร็วและมีความแม่นยำมากขึ้น ลดความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยมือ และการออกแบบก็ถูกต้องตามมาตรฐานทางวิศวกรรม

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Project title** | A DEVELOPMENT OF THE WORKSHEET FOR PRESTRESS CONCRETE BEAM DESIGN | | |
| **Name** | Mr. Techin | Monkong | ID. 50361026 |
| | Mr. Nawapong | Wongpanit | ID. 50361422 |
| | Mr. Alongkorn | Putchima | ID. 50363518 |
| **Project advisor** | Dr. Pritsathat Seetapan | | |
| **Major** | Civil Engineering | | |
| **Department** | Civil Engineering Faculty of Engineering Naresuan University | | |
| **Academic year** | 2010 | | |

.....


## Abstract

This Project is to design prestressed concrete beam by using function of mathematic in Microsoft Excel. The main purpose is to create worksheet for prestress concrete beam. There are 3 steps: flexure design, shear design and dapped-end beam connection design. This worksheet had followed The Engineering Institute of Thailand's standard and ACI 318-95's standard specification. This worksheet can show the result of calculation quickly. The result is accurated with design code.

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์ ที่ปรึกษาโครงงานที่ได้สอนวิชาการออกแบบคอนกรีตอัดแรง และให้คำชี้แนะในการพัฒนา Worksheet ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงตลอดจนการเขียนรายงานฉบับนี้จบเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน รวมถึงเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจตลอดมาจนจบการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายเตชินท์ มั่นคง
นายนวพงษ์ วงษ์พานิช
นายอลงกรณ์ ปัจฉิมา

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| ใบรับรองปริญญานิพนธ์ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ | จ |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน | 1 |
| 1.3 ขอบข่ายของโครงงาน | 3 |
| 1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ | 3 |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| 1.6 งบประมาณ | 4 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี | 5 |
| 2.1 บทนำ | 5 |
| 2.2 วิธีการอัดแรง | 6 |
| 2.2.1 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน | 7 |
| 2.2.2 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง | 7 |
| 2.3 หลักการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตอัดแรง | 8 |
| 2.3.1 หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรง | 9 |
| 2.3.2 หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ภายนอก | 9 |
| 2.4 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับคอนกรีตอัดแรง | 10 |
| 2.4.1 คอนกรีต (concrete | 10 |
| 2.4.2 เหล็กเสริมอัดแรง (*prestressing steel*) | 10 |
| 2.4.2.1 ลวดอัดแรง (prestressing wire) | 12 |
| 2.4.2.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand) | 13 |
| 2.4.2.3 เหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar) | 14 |
| 2.4.3 เหล็กเสริมไม่อัดแรง (non-prestressed reinforcement) | 14 |

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

2.5 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง 15

2.5.1 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง 15

2.5.2 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา 16

2.6 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง 16

2.7 การวิเคราะห์หน้าตัดภายใต้โมเมนต์ดัด 17

2.7.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต 17

2.7.2 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (cracking moment) 18

2.7.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอัดแรง 19

2.8 การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด 23

2.8.1 การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก 24

2.8.2 แนวเหล็กเสริมอัดแรง (cable profile) 27

2.9 การออกแบบองค์อาคารรับแรงเฉือน 28

2.9.1 แรงเฉือน(shear)ในคอนกรีตอัดแรง 28

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 36

3.1 บทนำ 36

3.2 ขั้นตอนพัฒนา Worksheet เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว 37

3.2.1 การออกแบบคานเพื่อรับโมเมนต์ดัด 37

3.2.2 ตรวจสอบแรงเฉือน 41

3.2.3 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน 43

3.3 ขอบข่ายของงาน 44

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 51

4.1 บทนำ 51

4.2 ตัวอย่างการใช้Worksheet 51

4.2.1 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว I เพื่อรับโมเมนต์ดัด 52

4.2.2 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว I เพื่อรับแรงเฉือน 58

4.2.3 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว I 59

4.2.4 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว T เพื่อรับโมเมนต์ดัด 62

4.2.5 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว T เพื่อรับแรงเฉือน 68

4.2.6 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว T 70

4.2.7 การวิเคราะห์และออกแบบคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อรับโมเมนต์ดัด 73

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 4.2.8 การวิเคราะห์และออกแบบคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อรับแรงเฉือน | 79 |
| 4.2.9 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม | 81 |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 83 |
| 5.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จาก Worksheet | 83 |
| 5.2 สรุปผลของ Worksheet | 83 |
| 5.3 ข้อจำกัดของ Worksheet | 84 |
| 5.4 แนวทางในการพัฒนา Worksheet | 84 |
| เอกสารอ้างอิง | 85 |
| ภาคผนวก ก | 86 |
| ข้อกำหนดของการออกแบบ | 86 |
| ภาคผนวก ข | 92 |
| น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง | 92 |
| ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน | 93 |

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างทั่วไป เนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปอยู่มากทั้งในด้านเวลาในการก่อสร้าง ซึ่งการก่อสร้างระบบคอนกรีตอัดแรงจะกระทำได้รวดเร็วกว่าระบบคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากมีข้อได้เปรียบต่างๆ เช่น การวางเหล็กเสริมที่น้อยกว่า การถอดแบบทำได้รวดเร็วสามารถถอดแบบได้ทันทีเมื่อขั้นตอนการดึงเหล็กเสริมอัดแรงเสร็จสิ้นลง ส่วนในด้านราคา วัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงจะมีคุณภาพสูง คือคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้มีกำลังสูง โดยที่ปริมาณวัสดุที่ใช้จะน้อยและโครงสร้างสามารถลดขนาดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ในปัจจุบันคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรงที่มีคุณภาพสูงราคาก็ไม่สูงขึ้นมากนัก การใช้ปริมาณวัสดุน้อยลงมีผลทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมของวัสดุลดลง มากกว่าราคาวัสดุต่อหน่วยที่แพงขึ้นเมื่อใช้วัสดุกำลังสูง ดังนั้นแนวโน้มการใช้วัสดุกำลังสูงในปัจจุบันมีมากขึ้นเรื่อยๆ คอนกรีตอัดแรงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับวัสดุกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป นอกจากนี้ขนาดของโครงสร้างที่เล็กลงมีผลทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ลดลง ดังนั้นค่าก่อสร้างฐานรากจึงถูกลงตามไปด้วย และเนื่องจากการก่อสร้างระบบคอนกรีตอัดแรงสามารถทำได้รวดเร็ว ทำให้ประหยัดค่าโสหุ้ย (overhead) ในการก่อสร้าง และการถอดแบบที่เร็วขึ้น ทำให้สามารถนำไม้แบบมาหมุนเวียนใช้ได้เร็วขึ้น ซึ่งทำให้ลดจำนวนไม้แบบที่ใช้ลงจึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ส่วนในด้านของคุณภาพนั้น คอนกรีตอัดแรงเหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีช่วงยาวและรับน้ำหนักบรรทุกมากโดยโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ทำให้รูปร่างไม่ใหญ่โตเทอะทะ คอนกรีตอัดแรงสามารถออกแบบให้ไม่มีรอยแตกร้าวในคอกรีตขณะใช้งานในกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกเกินอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวในโครงสร้าง แต่รอยแตกร้าวเหล่านี้ถ้าไม่เสียหายมากนักจะถูกปิดลงทันทีที่นำหนักบรรทุกที่เกินนี้ถูกนำออกไป ในกรณีของการโก่งตัว (deflection) ของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะน้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากผลของแรงยกตัว (balance load) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับน้ำหนักบรรทุกและเนื่องจากหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงเป็นหน้าตัดที่ไม่มีรอยแตกร้าวขณะใช้งาน ดังนั้นสติฟเนสของคอนกรีตอัดแรง จึงสูงกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปซึ่งเป็นหน้าตัดที่มีรอยแตกร้าวขณะใช้งาน และในด้านความสามารถต้านทานการกัดกร่อนนั้น คอนกรีตอัดแรงสามารถต้านทานการกัดกร่อน(corrosion) ในเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เพราะไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรง แต่อย่างไรก็ดี ถ้าการกัดกร่อนเกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรง ปัญหาจะรุนแรงมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าคอนกรีตอัดแรงมีข้อได้เปรียบกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปหลายประการ แต่ข้อเสียที่เห็นได้ชัดกว่าหนึ่งของคอนกรีตอัดแรงก็คือ การออกแบบและก่อสร้างมีขั้นตอนมากขึ้น ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเพราะใช้วัสดุกำลังสูงและหน้าตัดที่เล็ก การออกแบบจะต้องตรวจสอบกำลังที่รับได้ของโครงสร้างขณะอัดแรงและขณะใช้งาน เมื่อทำการก่อสร้างจะต้องดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดมากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเฉพาะในด้านการออกแบบที่ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบมาก เพราะการออกแบบจะต้องตรวจสอบกำลังที่รับได้ของโครงสร้างทั้งขณะอัดแรงและขณะใช้งาน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงเพื่อการคำนวณออกแบบที่สะดวกรวดเร็ว และลดความผิดพลาดในการออกแบบที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งคณะผู้ดำเนินงานโครงงานมีความคิดที่จะนำโปรแกรม Microsoft Office Excel มาใช้ในการพัฒนา Worksheet เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากคณะผู้ดำเนินงานโครงงานเห็นว่าโปรแกรม Microsoft Office Excel เป็นโปรแกรมที่สามารถพัฒนา Worksheet ได้ง่าย และการคำนวณมีความละเอียดถูกต้องแม่นยำสูง และเป็นโปรแกรมที่สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายจึงน่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่สนใจจะนำ Worksheet ที่ทางคณะผู้ดำเนินงานโครงงานได้พัฒนาขึ้นไปใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงไม่มากก็น้อย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อให้ได้ Worksheet สำหรับการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงตามข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท) ปี พ.ศ.2537 และมาตรฐาน ACI 318-95

1.2.2 เพื่อให้การคำนวณออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงมีความรวดเร็วและมีความละเอียดถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

1.2.3 เพื่อนำ Worksheet ที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปใช้ได้จริงในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงตามข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท) ปี พ.ศ.2537 และมาตรฐาน ACI 318-95

## 1.3 ขอบข่ายของโครงงาน

1.3.1 ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงตามข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท) ปี พ.ศ.2537 และมาตรฐาน ACI 318-95 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงกันทั่วไปในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงในประเทศไทย

1.3.2 ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว (Simple span) เท่านั้น

1.3.3 Worksheet ที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียวเพื่อรับโมเมนต์ดัดโดยทฤษฎีอีลาสติก รับแรงเฉือน และการออกแบบบริเวณจุดเชื่อมต่อที่ปลายคาน

## 1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงงาน

| เดือน / สัปดาห์ที่ / กิจกรรม | พฤศจิกายน | | | | ธันวาคม | | | | มกราคม | | | | กุมภาพันธ์ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.การนำเสนอโครงงาน | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.ศึกษาทฤษฎีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.ศึกษาการเขียน Worksheet ด้วยโปรแกรม Microsoft Office Excel | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.เขียนและพัฒนา Worksheet | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.ตรวจสอบ ปรับปรุง แก้ไข Worksheet | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.จัดทำรูปเล่มและเรียบเรียงรายงาน | | | | | | | | | | | | | | | | |

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ช่วยให้การออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว (Simple span) เป็นไปด้วยความรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.5.2 ได้ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Microsoft Office Excel ทำให้เกิดความรู้และทักษะในด้านการใช้งานโปรแกรม Microsoft Office Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้กันทั่วไป

1.5.3 สามารถนำโปรแกรม Microsoft Office Excel มาประยุกต์ใช้และพัฒนา Worksheet ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ความรู้ทางด้านคอนกรีตอัดแรงให้มีความก้าวหน้าและทันสมัยในโลกปัจจุบันที่คอมพิวเตอร์มีบทบาทมาก

1.5.4 สามารถนำ Worksheet นี้ไปใช้งานในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว (Simple span) ได้จริง

## 1.6 งบประมาณ

| | | |
|---|---|---|
| -ค่าวัสดุสำนักงาน | 400 | บาท |
| -ค่าถ่ายเอกสาร | 400 | บาท |
| -ค่าพิมพ์รายงานทำรูปเล่ม | 1500 | บาท |
| -ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์ | 300 | บาท |
| -อื่นๆ | 400 | บาท |
| รวมค่าใช้จ่าย | 3000 | บาท (สามพันบาทถ้วน) |

หมายเหตุ ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

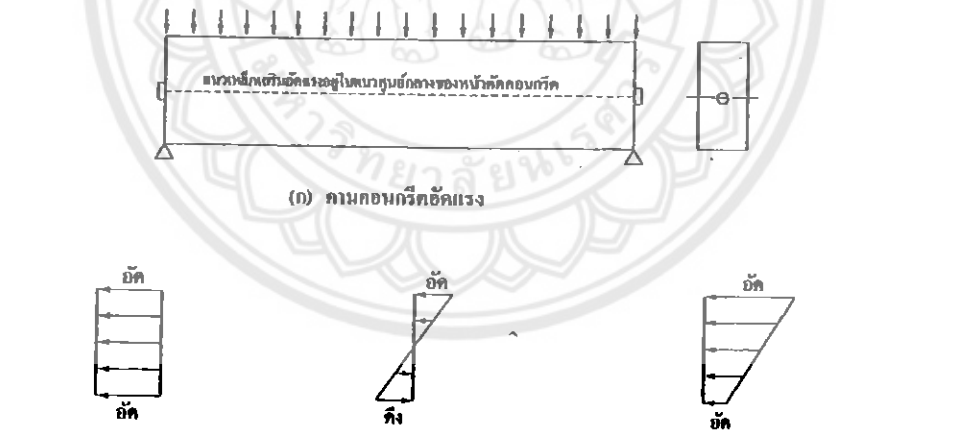
# บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง

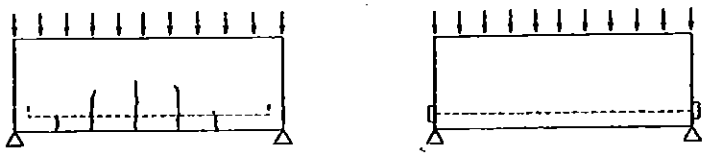
**(อ้างอิงจากหนังสือการออกแบบคอนกรีตอัดแรงโดย ดร.นเรศ พันธราธร พิมพ์ครั้งที่ 4 2543)**

## 2.1 บทนำ

การอัดแรง (prestress) หมายถึง การให้ความเค้น (stress) แก่องค์อาคาร (member) แม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กกับคอนกรีตอัดแรง คือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยเพียงแต่วางเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ต้องการ แต่ในคอนกรีตอัดแรง เหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้งๆที่ยังมิได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กจะถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง สภาพเช่นนี้ จะทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงหน่วยแรงดึงสูง ๆ และคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุเปราะรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่ากับเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต




**รูปแสดง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง**

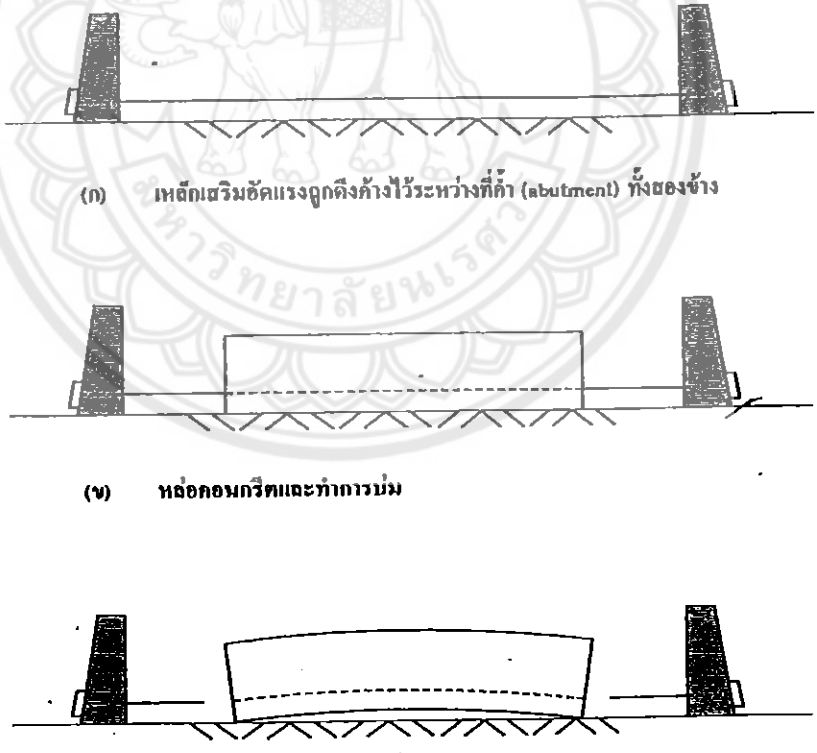


(ก) คอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (ข) คอนกรีตอัดแรง

**รูปแสดง คานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรง**

## 2.2 วิธีการอัดแรง

การอัดแรงเป็นการทำให้เกิดแรงดึงสูงในเหล็กเสริม ซึ่งก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดในคอนกรีต การดึงเหล็กก่อนหรือหลังการเทคอนกรีตนี้ สามารถทำให้แบ่งชนิดของคอนกรีตอัดแรงเป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน (pretensioned concrete) และคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง (posttensioned concrete)



(ก) เหล็กเสริมอัดแรงถูกดึงค้างไว้ระหว่างที่ค้ำ (abutment) ทั้งสองข้าง

(ข) หล่อคอนกรีตและทำการบ่ม

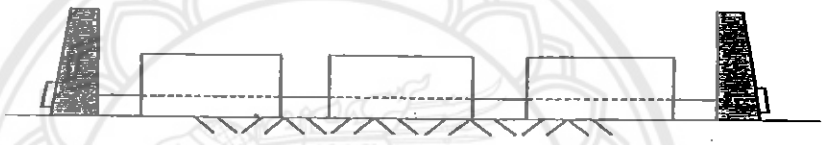
(ค) ตัดหลีกเสริมอัดแรงที่ปลายทั้งสอง

**รูปแสดง ขั้นตอนการอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน**

**2.2.1 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน**

การดึงเหล็กจะกระทำก่อนการหล่อคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ที่ระหว่างที่ค้ำ (fixed abutment) ที่ปลายทั้งสองข้าง หลังจากที่ติดตั้งไม้แบบตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ก็จะหล่อคอนกรีตลงในไม้แบบซึ่งมีเหล็กเสริมอัดแรงที่ดึงค้างไว้ ทำการบ่มคอนกรีตจนคอนกรีตมีกำลังสูงถึงค่าที่ต้องการ จากนั้นก็ทำการตัดเหล็กเสริมอัดแรงที่ปลายทั้งสองข้าง เหล็กเสริมอัดแรงพยายามที่จะหดตัวลง คอนกรีตจึงถูกอัดโดยเหล็กเริมอัดแรงนี้ การอัดแรงเกิดขึ้นโดยการถ่ายแรงผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรง

คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนเหมาะสำหรับการผลิตในโรงงาน ในทางปฏิบัติสามารถผลิตชิ้นงานพร้อมกันหลายๆชิ้นได้โดยการใช้ช่วงห่างระหว่างที่ค้ำมากๆ และหล่อชิ้นงานพร้อมกันหลายๆชิ้น



รูปแสดง การหล่อชิ้นงานหลายๆชิ้นพร้อมกัน โดยการอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

**2.2.2 คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง**

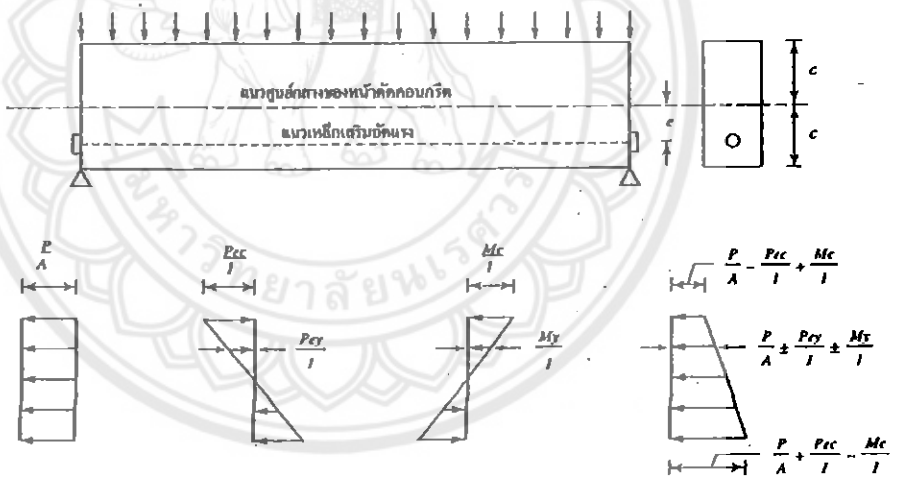
คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง เริ่มต้นโดยการหล่อคอนกรีตในไม้แบบที่ติดตั้งไว้ โดยจะต้องมีการฝังท่อสำหรับร้อยเหล็กเสริม (hollow duct) ในตำแหน่งที่ออกแบบไว้ โดยปกติเหล็กเสริมอัดแรงจะร้อยผ่านในท่อไว้โดยยังไม่ดึงก่อนการเทคอนกรีต (บางครั้งก็ร้อยเหล็กผ่านท่อหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว) เมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงถึงค่าที่ต้องการก็จะทำการดึงเหล็ก การดึงเหล็กอาจดึงเพียงข้างเดียว หรือดึงทั้งสองข้าง ขณะทำการดึงจะยึดปลายข้างหนึ่งไว้และดึงที่ปลายอีกข้างหนึ่ง (ในกรณีที่ออกแบบให้ดึงที่ปลายทั้งสองข้างจะทำการดึงทีละข้าง โดยเมื่อดึงปลายข้างหนึ่งเสร็จแล้ว ก็จะสลับมาดึงปลายอีกข้างหนึ่ง) เมื่อดึงแล้วจะทำการยึดปลายด้านที่ดึงโดยใช้อุปกรณ์ยึดปลาย เหล็กเสริมอัดแรงจึงถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีตทำให้เกิดแรงอัดในคอนกรีต เมื่ออัดแรงเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปคือการอัดน้ำปูน (grouting) เข้าไปในท่อที่ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง น้ำปูนที่เข้าไปในท่อทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีต การควบคุมรอยแตกร้าว (crack) จึงทำได้ดีขึ้น และเพิ่มกำลังประลัย (ultimate strength) ให้สูงขึ้น นอกจากนี้น้ำปูนหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย ระบบที่มีการอัดน้ำปูนเข้าไปในท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงเป็นคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว (bonded system) แต่ในบางครั้งหลังจากอัดแรงเสร็จก็ไม่มีการอัดน้ำปูน ซึ่งกรณีนี้ระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีตจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยว ระบบนี้เรียกว่า ระบบไร้การยึดเหนี่ยว (unbounded system) อย่างไรก็ตาม

เหล็กเสริมอัดแรงในระบบไร้การยึดเหนี่ยวก็ต้องป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากไม่มีน้ำปูนมาหุ้ม การป้องกันการกัดกร่อนอาจทำได้โดยการเคลือบผิวของเหล็กเสริมอัดแรงด้วยสารป้องกันการกัดกร่อน เช่น การใช้จารบีเคลือบเหล็กเสริมอัดแรง โดยปกติระบบไร้การยึดเหนี่ยวจะมีราคาถูกกว่า และมีขั้นตอนการทำงานน้อยกว่า ระบบนี้นิยมใช้กันทั่วไปกับอาคารขนาดเล็กจนถึงปานกลาง และอาคารจอดรถ ในขณะที่ระบบมีการยึดเหนี่ยวนิยมใช้กับอาคารขนาดใหญ่ เช่น อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้า โรงแรม และโรงพยาบาล เป็นต้น

## 2.3 หลักการวิเคราะห์และออกแบบคอนกรีตอัดแรง

**หลักการรวมแรง (combined load concept)**

หลักการนี้จะใช้วิธีการคำนวณหน่วยแรง (stress) ที่เกิดขึ้นบนคอนกรีต จากผลของแรงต่างๆ แยกกันอิสระ เช่น คำนวณหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักตัวเอง หน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก แล้วจึงนำหน่วยแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นมารวมกันโดยหลักการรวมแรง




หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงในส่วนของแรงตามแนวแกน | หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงในส่วนของการเยื้องศูนย์ | หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ภายนอก | หน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงและจากโมเมนต์ภายนอก

รูปแสดง การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีต

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานคอนกรีตมาจากแรงกระทำ 2 ส่วน คือ จากการอัดแรง และจากโมเมนต์ภายนอก โดยจะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ส่วน ตามลำดับดังนี้

**2.3.1 หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรง**

การอัดแรงที่เกิดขึ้นกระทำที่ตำแหน่งต่ำกว่าศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีต เป็นระยะเยื้องศูนย์ e ดังนั้น การอัดแรงจะก่อให้เกิดหน่วยแรง 2 ส่วน คือ หน่วยแรงที่เกิดจากแรงตามแนวแกน (axial force,P) และหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ (Pe)

หน่วยแรงที่เกิดจากแรงตามแนวแกน มีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการเยื้องศูนย์ (Pe)

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{Pey}{I}$$

ดังนั้น หน่วยแรงที่เกิดจากผลของการอัดแรงมีค่า

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I}$$

โดยที่ $\sigma$ คือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ

P คือ แรงอัดประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน

e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของเหล็กเสริมอัดแรงจากแนวศูนย์กลางของหน้าตัดคาน

y คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวศูนย์กลางของหน้าตัด

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชีย (moment inertia) ของหน้าตัด

**2.3.2 หน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ภายนอก**

ถ้ามีโมเมนต์ภายนอก M กระทำต่อหน้าตัดคานหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

ดังนั้นหน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต ณ ตำแหน่งใดๆ

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

และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตที่ผิวบนสุด หรือ ล่างสุดของหน้าตัดคอนกรีต มีค่า

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pec}{I} \pm \frac{Mc}{I}$$

โดยที่ c คือ ระยะที่วัดจากศูนย์กลางของหน้าตัดถึงผิวบนหรือล่างสุดของคาน

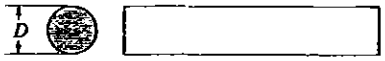
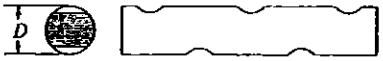
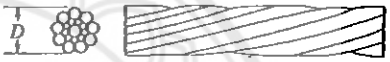
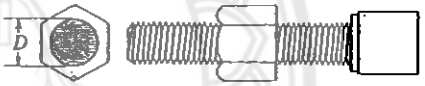
## 2.4 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับคอนกรีตอัดแรง

### 2.4.1 คอนกรีต (concrete)

คอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ต้องการกำลังอัดประลัยที่สูงกว่างานคอนกรีตทั่วไป กำลังอัดประลัยที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงในปัจจุบันจะใช้ตั้งแต่ 300 – 500 กก./ซม.$^2$ (สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วัน ) เหตุผลแรกที่ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูงก็คือ การใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัยสูงทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือ คอนกรีตที่ปลายบริเวณตำแหน่งที่อัดแรง จะต้องต้านทานหน่วยแรงอัดหรือหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่สูงมาก ซึ่งถ้าบริเวณนี้คอนกรีตกำลังไม่สูงพออาจเกิดการเสียหายได้ นอกจากนี้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูง จะมีกำลังในการรับแรงดึง แรงเฉือนและแรงยึดเหนี่ยวสูงด้วย

### 2.4.2 *เหล็กเสริมอัดแรง* (prestressing steel)

เหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงต้องเป็นเหล็กที่มีกำลังสูง เนื่องจากการหดตัวจากการคืบและการหดตัวจากการสูญเสียความชื้น จะทำให้เหล็กเสริมอัดแรงนั้นสูญเสียแรงอัดไป เหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด คือ ลวดอัดแรง (prestressing wire) ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand) และเหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar)

| ชนิด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | | รูปร่าง |
|---|---|---|---|
| | มม. | นิ้ว | |
| ลวดอัดแรงชนิดเรียบ (Plain round wire) | 2.0–9.0 | 0.08–0.36 |  |
| ลวดอัดแรงชนิดมีร่อง (Indented wire) | 5.0–7.0 | 0.200–0.276 |  |
| ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น (Seven-wire strand) | 6.2–15.2 | 0.250–0.600 | |
| ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 19 เส้น (Nineteen-wire strand) | 17.8–21.8 | 0.700–0.860 |  |
| เหล็กเส้นอัดแรงชนิดกลม (Round bar) | 9.2–32.0 | 0.362–1.260 |  |
| เหล็กเส้นอัดแรงชนิดข้ออ้อย (Threaded bar) | 23.0–32.0 | 0.906–1.260 | |

รูปแสดง ขนาดและรูปร่างของเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้กันทั่วไป

### 2.4.2.1 ลวดอัดแรง (prestressing wire)

ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว) | พื้นที่หน้าตัด มม.$^2$(นิ้ว$^2$) | กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม.$^2$(ปอนด์/นิ้ว$^2$) | | กำลังคลากอย่างน้อยสุด(ที่ 1%หน่วยการยืดตัว) กก./ซม.$^2$(ปอนด์/นิ้ว$^2$) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ชนิดปลายยึดเป็นปม | ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม | ชนิดปลายยึดเป็นปม | ชนิดปลายยึดเป็นลิ่ม |
| 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) | 13,000(192,000) |
| 7.01(0.276) | 38.59(0.060) | - | 16,520(235,000) | - | 13,220(188,000) |

ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว) | พื้นที่หน้าตัด มม.$^2$(นิ้ว$^2$) | กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด กก./ซม.$^2$(ปอนด์/นิ้ว$^2$) | กำลังคลากอย่างน้อยสุด(ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) กก./ซม.$^2$(ปอนด์/นิ้ว$^2$) |
|---|---|---|---|
| 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(213,000) |
| 7 (0.276) | 38.48 (0.060) | 16,000 (227,600) | 13,500 (192,000) |
| 8 (0.354) | 63.62(0.098) | 14,500 (206,200) | 12,500 (177,800) |

### 2.4.2.2 ลวดเกลียวอัดแรง (prestressing strand)

ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน ASTM A 416

| เกรด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว) | พื้นที่หน้าตัด มม.$^2$(นิ้ว$^2$) | แรงดึงที่จุดประลัย กก.(ปอนด์) | แรงดึงที่จุดคลาก(ที่ 1%หน่วยการขีดตัว)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) | 51.61(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) | 92.92(0.144) | 16,320(36,000) | 14,690(32,400) |
| | 15.24(0.6) | 139.35(0.216) | 24,490(54,000) | 22,050(48,600) |
| 270 | 9.53(3/8) | 54.84(0.085) | 10,430(23,000) | 9,390(20,700) |
| | 11.11(7/16) | 74.19(0.115) | 14,060(31,000) | 12,660(27,900) |
| | 12.70(1/2) | 98.71(0.153) | 18,730(41,300) | 26,850(37,170) |
| | 15.24(0.6) | 140.00(0.217) | 26,580(58,600) | 23,930(52,740) |

ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน มอก. 420-2534

| เกรด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว) | พื้นที่หน้าตัด มม.$^2$(นิ้ว$^2$) | แรงดึงที่จุดประลัย กก.(ปอนด์) | แรงดึงที่จุดคลาก(ที่ 1%หน่วยการขีดตัว)กก.(ปอนด์) |
|---|---|---|---|---|
| 1725 | 9.53(3/8) | 51.61(0.080) | 9,070(20,000) | 8,163(17,999) |
| | 12.70(1/2) | 92.90(0.144) | 16,320(36,000) | 14,688(32,387) |
| | 15.24(0.6) | 139.35(0.216) | 24,490(54,000) | 22,041(48,600) |
| 1860 | 9.53(3/8) | 54.84(0.085) | 10,430(23,000) | 9,387(20,698) |
| | 12.70(1/2) | 98.71(0.153) | 18,730(41,300) | 16,857(37,170) |
| | 15.24(0.6) | 140.00(0.217) | 26,580(58,600) | 23,922(52,748) |

### 2.4.2.3 เหล็กเส้นอัดแรง (prestressing bar)

ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กเส้นอัดแรง

| ชนิดเหล็กเส้นอัดแรง | เกรด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | | พื้นที่หน้าตัดจริง | | กำลังดึงประลัย | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | มม. | นิ้ว | มม.$^2$ | นิ้ว.$^2$ | กก./ซม.$^2$ | ปอนด์/นิ้ว$^2$ |
| กลม (ตามมาตรฐาน ASTM A722) | 145 | 19.05 | 3/4 | 283.9 | 0.442 | 10,190 | 145,000 |
| | | 22.22 | 7/8 | 387.1 | 0.601 | 10,190 | 145,000 |
| | | 25.40 | 1 | 503.2 | 0.785 | 10,190 | 145,000 |
| | | 28.57 | $1\frac{1}{8}$ | 638.7 | 0.994 | 10,190 | 145,000 |
| | | 31.75 | $1\frac{1}{4}$ | 793.5 | 1.227 | 10,190 | 145,000 |
| | | 34.92 | $1\frac{3}{8}$ | 954.8 | 1.485 | 10,190 | 145,000 |
| | 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 | $1\frac{1}{8}$ | 638.7 | 0.994 | 11,250 | 160,000 |
| | | 31.75 | $1\frac{1}{4}$ | 793.5 | 1.227 | 11,250 | 160,000 |
| | | 34.92 | $1\frac{3}{8}$ | 954.8 | 1.48 | 11,250 | 160,000 |
| ข้ออ้อย (ข้อมูลจาก PCI handbook) | | 19.05 | 5/8 | 180.6 | 0.280 | 11,040 | 157,000 |
| | | 22.22 | 7/8 | 548.4 | 0.852 | 10,550 | 150,000 |
| | | 25.40 | 1 | 548.4 | 0.852 | 11,250 | 160,000 |
| | | 28.57 | $1\frac{1}{4}$ | 835.5 | 1.295 | 10,550 | 150,000 |
| | | 31.75 | $1\frac{1}{4}$ | 835.5 | 1.259 | 11,250 | 160,000 |
| | | 34.92 | $1\frac{1}{2}$ | 1,051.6 | 1.630 | 10,550 | 150,000 |

### 2.4.3 *เหล็กเสริมไม่อัดแรง* (non-prestressed reinforcement)

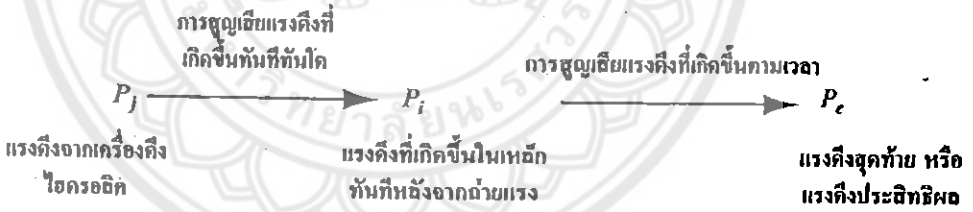
ในคอนกรีตอัดแรงบางครั้งก็มีการเสริมเหล็กชนิดไม่อัดแรง ซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน (mild steel) เหล็กเส้นไม่อัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือเหล็กกลม (round bar) และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) เกรดของเหล็กซึ่งเป็นตัวบอกกำลังคลากของเหล็กมี SR24 SD30 SD40 และ SD50 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบให้ใช้เท่ากับ $2.04 \times 10^6$ กก./ซม.$^2$

ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง

| ชนิดของเหล็กเสริม | เกรด | กำลังคลาก กก./ซม.$^2$ | กำลังดึงประลัย กก./ซม.$^2$ |
|---|---|---|---|
| เหล็กกลม | SR 24 (มีขนาด $\phi$ 6,9,12,19,25 มม.) | 2,400 | 3,900 |
| เหล็กข้ออ้อย | SD 30 (มีขนาด $\phi$ 12,16,20,25,28 มม.) | 3,000 | 4,900 |
| | SD 40 (มีขนาด $\phi$ 12,16,20,25,28,36 มม.) | 4,000 | 5,700 |
| | SD 50 (มีเฉพาะขนาด $\phi$ 32 มม.) | 5,000 | 6,300 |

## 2.5 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (time-dependent loss ) ดังแสดง




รูปแสดง การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

### 2.5.1 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดนี้ มีสาเหตุจากหลายประการด้วยกัน แต่ที่มักจะนำมาพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss) นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง อาจจะมีสาเหตุอื่นๆ เช่น การหดตัวของไม้แบบในชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้น

ทันทีทันใด หาได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิค $P_j$ กับ แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง $P_i$

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด} = P_j - P_i$$

**2.5.2 การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา**

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลามีสาเหตุหลักๆ มาจาก การหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกและค่อยๆลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ถ้าให้ $P_o$ คือ แรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้ว การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา} = P_i - P_o$$

## 2.6 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

การคำนวณการหาการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง สามารถใช้ค่าประมาณตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งประเมินภายใต้สมมติฐานของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) การอัดแรงในระดับธรรมดาและภายใต้สภาวะแวดล้อมปานกลาง ค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงในตาราง ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด

**ตารางค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด)**

| ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง | ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม.$^2$ | |
|---|---|---|
| | $f_c' = 300$ กก./ซม.$^2$ | $f_c' = 350$ กก./ซม.$^2$ |
| สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน | | |
| - ลวดเกลียวอัดแรง | - | 3,160 |
| สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง | | |
| - ลวดอัดแรง, ลวดเกลียวอัดแรง | 2,270 | 2,320 |
| - เหล็กเส้นอัดแรง | 1,570 | 1,620 |

## 2.7 การวิเคราะห์หน้าตัดภายใต้โมเมนต์ดัด

### 2.7.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานะใช้งาน (service state) โดยมีสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานะใช้งาน ดังนั้นในทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ทฤษฎีอีลาสติก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{P_{ey}}{I} \pm \frac{M_y}{I} \qquad (2.1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคอนกรีต

y คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้ เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตมักจะพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดเป็นหลัก ดังนั้นการคำนวณจะใช้เครื่องหมาย(+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีต และใช้เครื่องหมาย(-) สำหรับหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งาน แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และ ขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working state)

**ก). การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง**

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งแรงอัดที่ใช้คำนวณในขั้นตอนนี้จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นทันทีทันใด $P_i$ และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวเอง $M_G$ เท่านั้น เพราะขณะที่ทำการถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกกระทำ

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i ey}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \qquad (2.2)$$

**ข). การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก**

ขั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำ แรงอัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทั้งจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และที่เกิดขึ้นตามเวลา) $P_e$ แรงนี้เรียกแรงอัดอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวรเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (รวมน้ำหนักตัวเองด้วย) $M_T$ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตคือ

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e ey}{I} \pm \frac{M_T y}{I} \qquad (2.3)$$

**2.7.2 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (cracking moment)**

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุด เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นจนเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าวก็คือ ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก(modulus of rupture) หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว หาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I}\frac{Mc_b}{I} \qquad (2.4)$$

ถ้าคอนกรีตถูกพิจารณาว่าเริ่มแตกร้าว จะได้ว่า

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

$$M_{cr} = P_e + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b} \qquad (2.5)$$

**โดยที่** $M_{cr}$ คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

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

ถ้าให้ $M_1$ เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์ จาก**สมการที่ 4.6 แทนค่า** $\sigma_c = 0$ จะได้ว่า

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

$$M_1 = Pe + \frac{PI}{Ac_b} = P\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \qquad (2.6)$$

**โดยที่** $M_1$ คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์

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

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

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

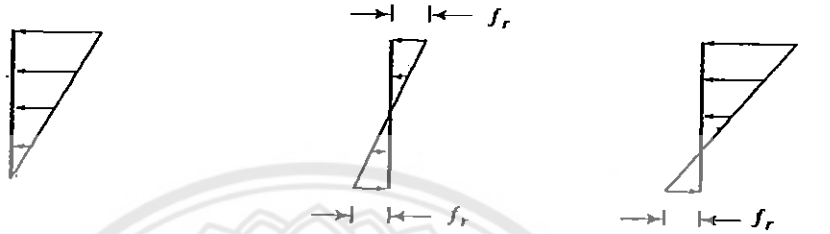
$$f_r = \frac{M_2 c_b}{I}$$

**ดังนั้น**

$$M_2 = \frac{f_r I}{c_b} \qquad (2.7)$$

**โดยที่** $M_2$ **คือ โมเมนต์ที่คอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก** $f_r$

จากสมการ 2.5-2.7 จะได้ว่า $M_{cr} = M_1 + M_2$ โดยที่ $M_1$ คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีแรงเป็นศูนย์ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ที่กระทำมีค่าเท่ากับ $M_1$ สำหรับ $M_2$ คือ ค่าโมเมนต์ที่คานสามารถรับได้เพิ่มเติมเนื่องจากการที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับโมเมนต์ของการแตกหัก หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้แสดงไว้ดังรูป




ก) หน่วยแรงเนื่องจาก $M_1$ (ข) หน่วยแรงเนื่องจาก $M_2$ (ค) หน่วยแรงเนื่องจาก $M_1 + M_2$

รูปแสดงโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว

**2.7.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอัดแรง**

สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่โครงสร้างสามารถรับได้จะต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าโครงสร้างเกิดการวิบัติเนื่องจากกำลังไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่ตามมาจะรุนแรงและค่าใช้จ่ายความเสียหายก็สูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกันไปกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตาม

การออกแบบให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้ในสถานการณ์ใช้งานก็ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

**<u>สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดประลัย</u>**

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยขององค์อาคารที่ใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

ก). การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรงกล่าวคือ หน่วยการยืดในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน

ข). คอนกรีตไม่รับแรงดึง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ

ค). ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

**หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย**

การออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย ต้องออกแบบให้การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัตินี้จะเกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยืดตัวเกินจุดคลากไปแล้วองค์อาคารจะมีการโก่งตัวมากก่อนเกิดการวิบัติซึ่งการวิบัติลักษณะเช่นนี้มีความเหนียว(ductility) การออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีเกณฑ์สมดุลไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดคลากที่แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิกัดของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลไว้ดังต่อไปนี้

$$\omega_p + (\omega - \omega')\frac{d}{d_p} \le 0.36\beta_1 \qquad (2.8)$$

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

โดยที่ $\omega_p$ คือ ดัชนีเหล็กเสริมอัดแรง= $\rho_p f_{ps} / f'_c$

$\omega$ คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง= $\rho\ f_y / f'_c$

$\omega'$ คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด= $\rho'\ f_y / f'_c$

$\rho_p$ คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง= $A_{ps} / bd_p$

$\rho$ คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง= $A_s / bd$

$\rho'$ คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด= $A'_s / bd$

$d_p$ คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง,ซม.

d คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง,ซม.

b คือ ความกว้างของคาน,ซม.

$A_{ps}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง,ซม.$^2$

$A_s$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง,ซม.$^2$

$A'_s$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด,ซม.$^2$

$f_{ps}$ คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ,กก./ซม.$^2$

$f_y$ คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา,กก./ซม.$^2$

$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$ คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีก เช่น รูปตัว T และ I คำนวณเช่นเดียวกับ $\omega_p, \omega$ และ $\omega'$ ตามลำดับ แต่ความกว้าง b ที่ใช้เป็นความกว้างของตัวแกนและปริมารเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น

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

**ก). สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว(bonded tendon)**

$$f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{r_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]\right\} \qquad (2.9)$$

โดยที่ $r_p$ คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังต่อไปนี้

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

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

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

เมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดในการคำนวณ $f_{ps}$ ในสมการที่ 2.9 (หมายถึงถ้าต้องการคำนวณสมการที่ 2.9 มีพจน์ของ $\omega'$ ร่วมอยู่ด้วย) ค่าต่อไปนี้จะต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right] \ge 0.17 \qquad (2.10)$$

และ

$$d' \le 0.15 d_p \qquad (2.11)$$

ถ้า $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right] < 0.17$ การคำนวณหาค่า $f_{ps}$ ในสมการที่ 2.9 ให้แทนค่า $\omega'$ ด้วยศูนย์

**ข). สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว(unbonded tendon)และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35**

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \qquad (2.12)$$

โดยที่ $f_{ps}$ คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง,กก/ซม.$^2$

ค่า $f_{ps}$ ในสมการที่ 4.21 จะต้องไม่เกิน $f_{py}$ และไม่เกิน $f_{se} + 4000$ กก/ซม.$^2$

**ค). สำหรับอาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว และมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกเกินกว่า 35**

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \qquad (2.13)$$

ค่า $f_{ps}$ ในสมการที่ 4.22 จะต้องไม่เกิน $f_{py}$ และไม่เกิน $f_{se} + 2000$ กก/ซม.$^2$

**<u>โมเมนต์ดัดประลัย</u>**

**โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง หาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C-T ที่สถานะประลัย ซึ่งที่สถานะประลัยนี้แรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต C หาได้จากการกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม และแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T หาได้จาก** $T = A_{ps} f_{ps}$ โดยที่ $f_{ps}$ หาได้จากสมการที่เสนอโดยมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537

$$C = 0.85 f'_c ab \qquad (2.14)$$

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

เนื่องจากแรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต C จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T ดังนั้น

$$C = T$$

$$0.85 f'_c ab = A_{ps} f_{ps}$$

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f'_c b} \qquad (2.15)$$

โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด หรือบางทีเรียกว่ากำลังระบุโมเมนต์(norminal strength) $M_n$ สามารถหาได้จากสมการ

$$Mn = C.z = T.z = c\left(d_p - \frac{a}{2}\right) = T\left(d_p - \frac{a}{2}\right) = T\left(d_p - \frac{a}{2}\right) \qquad (2.16)$$

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

$$\phi M_n \geq M \qquad (2.17)$$

โดยที่ $\phi = 0.9$

**คอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) จะมีโมเมนต์ดัดประลัยน้อยกว่าในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon) เหตุผลหนึ่งที่สำคัญคือ ในคอนกรีตอัดแรงที่เหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว เมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นจำนวนรอยแตกร้าวจะมีน้อยกว่าแต่ขนาดของรอยแตกร้าวจะใหญ่กว่าในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว รอยแตกร้าวในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวมีการกระจายที่ดีกว่าทำให้รอย**

แตกร้าวมีขนาดเล็ก รอยแตกร้าวที่ใหญ่จะทำให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่ามากที่หน้าตัดที่เกิดรอยแตกร้าว ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวจึงมีค่าลดลง

$$A_s = 0.004A \qquad (2.18)$$

โดยที่ $A_s$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดา

$A$ คือ พื้นที่ของหน้าตัด ซึ่งอยู่ระหว่างแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัด ถึงผิวด้านที่เกิดหน่วยแรงดึงเนื่องจากโมเมนต์ดัด

นอกจากนี้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดให้กำลังที่ออกแบบโมเมนต์ $\phi Mn$ ต้องไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าวทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดหลังจากเกิดการแตกร้าว เพราะการโก่งตัวขององค์อาคารจะเกิดขึ้น โดยปกติต้องออกแบบให้องค์อาคารโก่งตัวให้มากพอเพื่อเป็นสัญญาณเตือนให้รู้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยควรมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าวให้เพียงพอ

$$\phi Mn \geq 1.2M_{cr} \qquad (2.19)$$

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

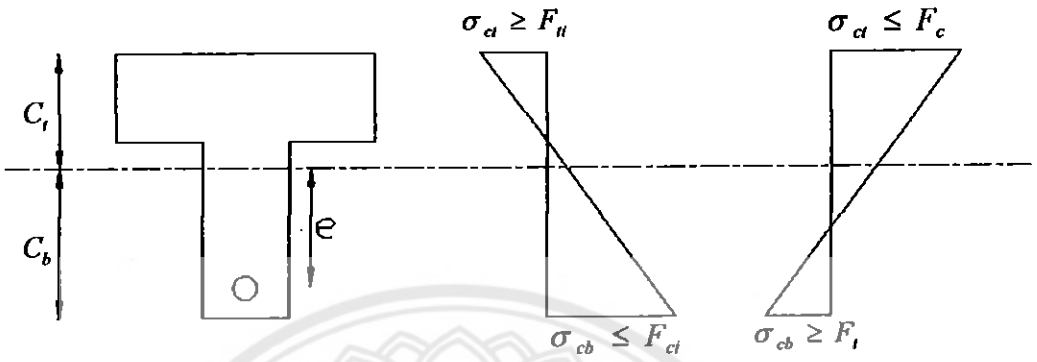
## 2.8 การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด

การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด สามารถออกแบบได้ 2 วิธี คือ การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก ซึ่งเป็นการออกแบบในสถานะใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ การออกแบบเน้นคุณสมบัติทางด้านการใช้งาน การออกแบบอีกวิธีหนึ่งคือ การออกแบบโดยทฤษฎีกำลังประลัย ซึ่งเป็นการออกแบบที่จะป้องกันการวิบัติอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป การออกแบบเน้นความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้าง โดยปกติถ้าเลือกวิธีออกแบบในวิธีหนึ่ง ก็จะวิเคราะห์ตรวจสอบการยอมรับได้ของอีกวิธีหนึ่ง ที่ต้องทำเช่นนี้ก็เพราะว่า การออกแบบด้วยวิธีหนึ่งไม่ได้มีหลักประกันว่าการตรวจสอบของอีกวิธีหนึ่งจะยอมรับได้เสมอไป เช่น ถ้าเลือกออกแบบโดยวิธีอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงในช่วงใช้งานจะยอมรับได้แต่ไม่ได้หมายความว่า เมื่อวิเคราะห์ตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัดนั้น จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเกินได้อย่างปลอดภัยเพียงพอ หรือในทางกลับกันถ้าเลือกออกแบบโดยวิธีกำลังประลัยแล้ว ก็ไม่แน่ว่าหน่วยแรงที่สถานะใช้งานจะไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้

โดยหากเลือกวิธีการออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก หลังจากได้หน้าตัดและเหล็กเสริมอัดแรงแล้วก็จะตรวจสอบกำลังประลัยของหน้าตัด ถ้ากำลังของหน้าตัดมีค่ามากกว่ากำลังที่ต้องการหน้าตัดที่ออกแบบนั้นก็ใช้ได้ แต่ถ้าน้อยกว่าจะออกแบบเสริมเหล็กไม่อัดแรง (non-prestressed steel) เพื่อเพิ่มกำลังประลัยของหน้าตัด

**2.8.1 การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก**

การออกแบบโดยวิธีนี้จะออกแบบไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินหน่วยแรงที่ยอมให้ ทั้งในขณะถ่ายแรงและขณะรับน้ำหนักบรรทุก




(ก) หน้าตัดคาน (ข) หน่วยแรงขณะถ่ายแรง $\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i ey}{I} \pm \frac{M_G y}{I}$ (ค) หน่วยแรงขณะรับน้ำหนักบรรทุก $\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e ey}{I} \pm \frac{M_T y}{I}$

รูปแสดง หน่วยแรงในคอนกรีต

<u>ขณะถ่ายแรง</u>

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

จากสมการ $$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{P_{ey}}{I} \pm \frac{M_y}{I}$$

หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบน $$\sigma_{ct} = \frac{P_i}{A} - \frac{P_i ec_t}{I} + \frac{M_G c_t}{I} \geq F_{ti}$$

$$\frac{P_i}{A}\left(1 - \frac{A_e c_t}{I}\right) + \frac{M_G c_t}{I} \geq F_{ti}$$

จัดรูปใหม่ $$F_{ti} \leq \frac{P_i}{A}\left(1 - \frac{A_e}{Z_t}\right) + \frac{M_G}{Z_t} \qquad (2.20)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียร์ของหน้าตัดคาน

A คือ พื้นที่หน้าตัดคาน

$P_i$ คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจากถ่ายแรง

e คือ ระยะเยื้องศูนย์

$M_G$ คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักคาน

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

ในทำนองเดียวกัน หน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างขณะถ่ายแรง

$$\sigma_{cb} = \frac{P_i}{A} + \frac{P_i e c_b}{I} - \frac{M_G c_b}{I} \le F_{ci}$$

จัดรูปใหม่

$$F_{ci} \ge \frac{P_i}{A}\left(1 + \frac{A_e}{Z_b}\right) - \frac{M_G}{Z_b} \qquad (2.21)$$

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

<u>ขณะรับน้ำหนักบรรทุก</u>

ถ้าเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแก่คาน โมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักคานรวมกับน้ำหนักบรรทุกจะทำให้ผิวบนของคานคอนกรีตเกิดหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันที่ผิวล่างของคานหน่วยแรงอัดก็จะน้อยลง จนกระทั่งอาจกลายเป็นหน่วยแรงดึง แต่อย่างไรก็ดีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนของคานต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ $F_c$ โดยที่ $F_c$ คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก ($F_c$ มีเครื่องหมาย +) และในขณะเดียวกัน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานต้องมากกว่าหรือเท่ากับ $F_t$ โดยที่ $F_t$ คือ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก ($F_t$ มีเครื่องหมาย -)

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

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

ถ้าให้ $P_e = RP_i$ จะได้ว่า $F_c \ge \frac{RP_i}{A}\left(1 - \frac{Ae}{Z_t}\right) + \frac{M_T}{Z_t}$ (2.22)

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

จัดรูปใหม่ $F_t \le \frac{P_e}{A}\left(1 + \frac{A_e}{Z_b}\right) - \frac{M_T}{Z_b}$

$$F_t \le \frac{P_e}{A}\left(1 + \frac{A_e}{Z_b}\right) - \frac{M_T}{Z_b} \qquad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.21 จัดรูปแบบอีกครั้งหนึ่งจะได้

$$A\left(F_{tt}-\frac{M_G}{Z_t}\right)\le P\left(1-\frac{Ae}{Z_t}\right)$$

หรือ $$\frac{1}{P_i}\ge\frac{1-A_e/Z_t}{A(F_{tt}-M_G/Z_t)}$$

ถ้ากำหนดให้ $\alpha_t = A/Z_t$ จะได้

$$\frac{1}{P_i}\ge\frac{\alpha_t e-1}{-AF_{tt}+\alpha_t M_G} \qquad (2.24)$$

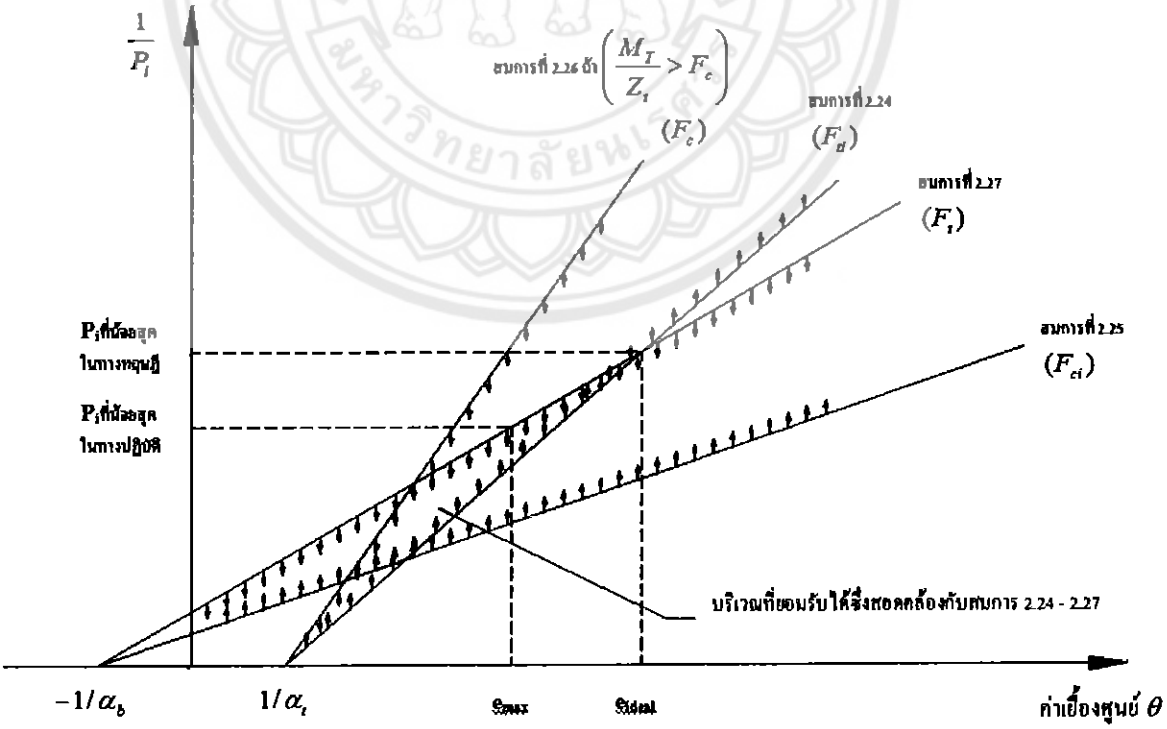
ในทำนองเดียวกัน จัดรูปแบบสมการที่ 2.21-2.23 และกำหนดให้ $\alpha_b = A/Z_b$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

จากสมการที่ 2.21 $$\frac{1}{P_i}\ge\frac{\alpha_b e+1}{AF_{ci}+\alpha_b M_G} \qquad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.22 $$\frac{1}{P_i}\le\frac{R(\alpha_t e-1)}{-AF_c+\alpha_t M_T} \quad \text{ถ้า } \frac{M_T}{Z_t}>F_c \qquad (2.26.1)$$

หรือ $$\frac{1}{P_i}\ge\frac{R(\alpha_t e-1)}{-AF_c+\alpha_t M_T} \quad \text{ถ้า } \frac{M_T}{Z_t}<F_c \qquad (2.26.2)$$

จากสมการที่ 2.23 $$\frac{1}{P_i}\le\frac{R(\alpha_b e+1)}{-AF_t+\alpha_b M_T} \qquad (2.27)$$




รูปแสดง แผนภาพของแมกเนล

$$(Z_b)_{\min} = \frac{M_T - RM_G}{RF_{ci} - F_t} \quad (2.28)$$

$$(Z_t)_{\min} = \frac{M_T - RM_G}{F_c - RF_{ti}} \quad (2.29)$$

ในการออกแบบหน้าตัดให้เหมาะสมในบางกรณี ค่าอัตราส่วน R ซึ่งคือ อัตราส่วนของแรงดึงประสิทธิผลต่อแรงดึงทันทีหลังจากถ่ายแรงต้องมีการประมาณก่อน โดยปกติใช้ค่า R แต่ถ้าในกรณีของคานที่มีการอัดแรงมากควรใช้ค่า R เท่ากับ 0.75 เพราะว่า ในกรรีที่มีการอัดแรงมาก ผลของการคืบต่อการสูญเสียแรงดึงจะมีผลมาก แต่อย่างไรก็ดีหลังจากออกแบบหน้าตัดและเหล็กเสริมอัดแรงแล้วควรมีการตรวจสอบค่า R ที่ใช้ในตอนแรกอีกครั้งหนึ่ง

### 2.8.2 แนวเหล็กเสริมอัดแรง (cable profile)

โดยปกติเมื่อออกแบบคานคอนกรีตอัดแรง จะเริ่มต้นโดยการคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงและระยะเยื้องศูนย์ที่ต้องการจากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุด หลังจากนั้นจะกำหนดตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดต่างๆตลอดความยาวคาน โดยตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงที่ทุกหน้าตัดจะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 2.20-2.23 กล่าวคือ หลังจากได้ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงก็จะรู้ค่าแรงอัดสำหรับหน้าตัดต่างๆ จากนั้นคำนวณหาค่าระยะเยื้องศูนย์ที่หน้าตัดต่างๆ โดยให้สอดคล้องกับสมการที่ 2.20-2.23 ซึ่งสมการเหล่านี้จะให้คำตอบของค่าระยะเยื้องศูนย์ที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งคำตอบนี้เป็นช่วงของระยะเยื้องศูนย์ที่ยอมรับได้

จากสมการที่ 2.20 $$\frac{P_i}{A} - \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_t}\right) \geq F_{ti}$$

จากสมการที่ 2.21 $$\frac{P_i}{A} + \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_b}\right) \leq F_{ci}$$

จากสมการที่ 2.22 $$\frac{P_e}{A} - \left(\frac{P_i e - M_T}{Z_t}\right) \leq F_c$$

จากสมการที่ 2.23 $$\frac{P_e}{A} + \left(\frac{P_e e - M_T}{Z_b}\right) \geq F_t$$

จัดรูปสมการใหม่ เพื่อหาขอบเขตของค่าระยะเยื้องศูนย์ e จะได้

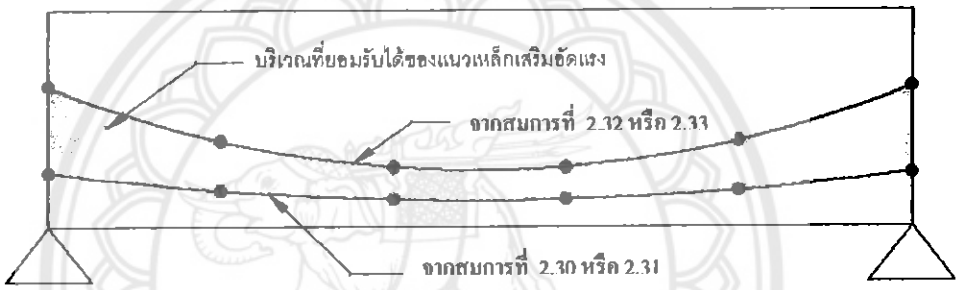
$$e \leq \frac{1}{P_i}\left[M_G - Z_t\left(F_{ti} - \frac{P_i}{A}\right)\right] \quad (2.30)$$

$$e \leq \frac{1}{P_i}\left[M_G + Z_b\left(F_{ci} - \frac{P_i}{A}\right)\right] \quad (2.31)$$

$$e \geq \frac{1}{P_e}\left[M_T - Z_t\left(F_c - \frac{P_e}{A}\right)\right] \quad (2.32)$$

$$e \geq \frac{1}{P_e}\left[M_T + Z_b\left(F_t - \frac{P_e}{A}\right)\right] \qquad (2.33)$$

หลังจากได้ค่า $P_i$ และ $P_e$ จากหน้าตัดที่มีโมเมนต์ภายนอกสูงสุดก็จะหาค่า $P_i$ และ $P_e$ ที่หน้าตัดใดๆ จากการคำนวณเรื่องการสูญเสียแรงดึง นำค่า $P_i, P_e$ และค่าต่างๆแทนลงในสมการที่ 2.30-2.33ก็จะได้ช่วงที่ยอมรับได้ของค่า e ที่หน้าตัดต่างๆ โดยค่า e ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ขณะถ่ายแรงหาได้จากสมการ 2.30 และ 2.31 และค่า e ที่น้อยที่สุดที่ต้องการในช่วงรับน้ำหนักบรรทุกหาได้จากสมการที่ 2.32 หรือ 2.33 ดังนั้นจะได้ช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของแนวเหล็กเสริมอัดแรงดังแสดงในรูปแสดง บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง โดยหน้าตัดที่จะคำนวณหาช่วงยอมรับได้ของค่า e อาจเลือกมาเพียงบางหน้าตัด




รูปแสดง บริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรง

## 2.9 การออกแบบองค์อาการรับแรงเฉือน

### 2.9.1 แรงเฉือน(shear)ในคอนกรีตอัดแรง

การออกแบบหน้าตัดคานในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตอัดแรงจะคล้ายๆกับในคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป กล่าวคือจะใช้เหล็กปลอกในการช่วยเสริมกำลังในการรับแรงเฉือนของหน้าตัด (เหล็กปลอกนี้ช่วยรับหน่วยแรงดึงตามแนวทแยงขณะเกิดรอยแตกตามแนวทแยง) และปริมาณเหล็กปลอกต้องออกแบบให้เพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะไม่เกิดขึ้น โดยให้คานนั้นวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดแทน เพราะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดสามารถทำนายได้ถูกต้องแม่นยำและยังออกแบบให้เป็นการวิบัติที่เหนียวได้

**การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking)**

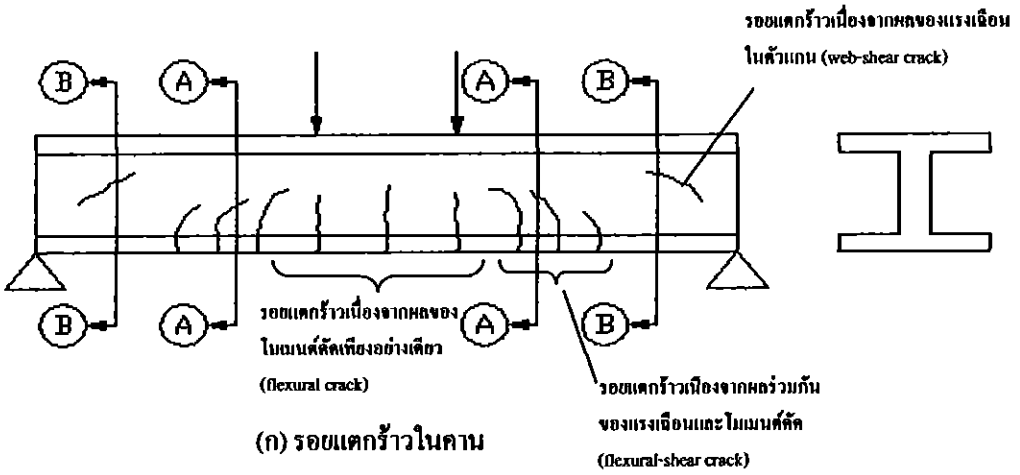
ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (flexural-shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web-shear cracking)

**ก) การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด**

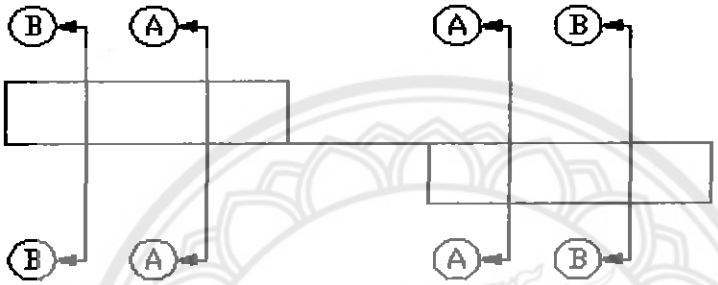
การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่กระทำต่อคานมีค่ามากทั้งคู่ การแตกร้าวลักษณะนี้เริ่มจากการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ก่อน (flexural cracking) โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มที่ผิวล่างสุดของคานและรอยแตกร้าวอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนในช่วงแรก เมื่อผนวกกับผลของแรกเฉือน ร้อยแตกร้าวก็จะแตกลึกต่อไปในแนวทแยง (บริเวณหน้าตัด A-A ในรูป (ก) ถ้าไม่ได้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้เพียงพอ รอยแตกร้าวนี้จะแตกลึกลงไปในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงอัด (compression zone) พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่รับแรงอัดบริเวณปลายบนของรอยแตกร้าวจึงลดลง ทำให้หน้าตัดคานบริเวณนี้ไม่สามารถรับแรงอัดในคอนกรีตอันเกิดจากผลของโมเมนต์ได้อย่างเพียงพอการวิบัติจึงเกิดขึ้น การวิบัติชนิดนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากผลของแรงเฉือนและแรงอัด (shear-compression failure)

**ข) การแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน**

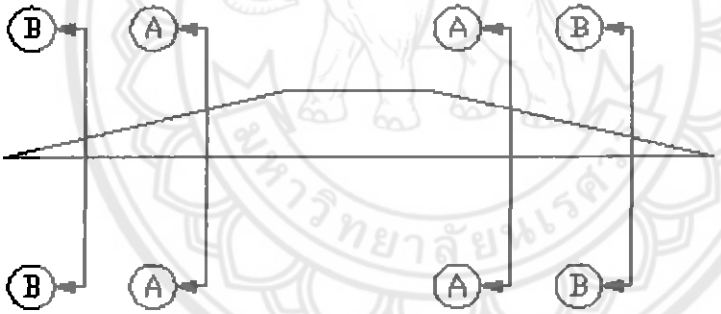
การแตกร้าวนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณที่แรงเฉือนมีค่าสูงมากและโมเมนต์มีค่าน้อย การแตกร้าวชนิดนี้มักจะพบบริเวณใกล้ๆกับที่รองรับบริเวณปลายคานเนื่องจากแรงเฉือนมีค่ามากและผมของแรงเฉือนนี้ก่อให้เกิดรอยแตกตามแนวทแยงในบริเวณตัวแกนของคาน การแตกร้าวชนิดนี้พบมากในคานที่มีหน้าตัดรูปตัว T หรือ I ซึ่งมีความกว้างของแกนน้อย การแตกร้าวชนิดนี้จะเห็นเป็นรอยแตกทแยงดังแสดงในรูป (ก) (บริเวณหน้าตัด B-B )




(ก) รอยแตกร้าวในคาน



(ข) แผนภาพของแรงเฉือน



(ค) แผนภาพของโมเมนต์ดัด

**<u>การออกแบบสำหรับการรับแรงเฉือน</u>**

ในการออกแบบหน้าตัดคานสำหรับแรงเฉือน จะต้องออกแบบให้กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ $\phi Vn$ ไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ $Vu$

กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ ≥ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

$$\phi Vn \geq Vu \qquad (2.34)$$

โดยที่ $\phi$ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงเฉือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85

$Vn$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (nominal shear strength) ของหน้าตัด

ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุสามารถหาได้จากสมการ

$$Vn = Vc + Vs \qquad (2.35)$$

โดยที่ $Vc$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต

$Vs$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

<u>กำลังต้านทานแรงเฉือนในหน่วยของคอนกรีต</u>

คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ ซึ่งกำลังในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตนี้ เป็นตัวกำหนดว่ามีความจำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนหรือไม่ ถ้ากำลังในการต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตนี้มีมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอกได้อย่างปลอดภัยก็ไม่จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในทางตรงกันข้ามถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับแรงเฉือนภายนอก ก็จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงเฉือนมี 2 ลักษณะคือ การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกับแรงเฉือนหรือโมเมนต์ดัด (flexural-shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web-shear cracking) กำลังในการต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาจากค่าที่น้อยของ 2 ค่าต่อไปนี้ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด $Vci$ และ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าว เนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน $Vcw$ กล่าวคือ ถ้าค่า $Vci$ น้อยกว่า $Vcw$ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $Vc$ จะเท่ากับ $Vci$ และในทางตรงกันข้ามถ้า $Vcw$ น้อยกว่า $Vci$ จะได้ว่า $Vc$ จะเท่ากับ $Vcw$

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีคำนวณค่า $Vci$ ดังแสดงในสมการ

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}\,b_w d_p + V_d + \frac{\Delta V_i \Delta M_{cr}}{\Delta M_{\max}} \qquad (2.36)$$

โดยที่ $V_{ci}$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด และมีค่าไม่น้อยกว่า $0.45\sqrt{f'_c}\,b_w d_p$, กก.

$f'_c$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก./ซม.$^2$

$b_w$ คือ ความกว้างของตัวแกนของคาน, ซม.

$d_p$ คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดจนถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.8h โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด , ซม.

$V_d$ คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.

$\Delta V_i$ คือ แรงเฉือนส่วนเพิ่ม (factored shear) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.

$\Delta M_{max}$ คือ โมเมนต์ส่วนเพิ่ม ( factored moment ) ที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดพิจารณา (อาจต้องมีการจัดรูปแบบของน้ำหนักบรรทุก เพื่อให้โมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณานี้มีค่ามากที่สุด),กก.-ซม.

$\Delta M_{cr}$ คือ ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มเติมจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ ที่หน้าตัดที่พิจารณา,กก.-ซม. โดย $\Delta M_{cr}$ สามารถหาได้จาก

$$\Delta M_{cr} = \frac{I}{y_t}(f_{r+} f_{pe} - f_d) \qquad (2.37)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคาน,ซม.$^4$

$y_t$ คือ ระยะที่วัดจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวของคอนกรีตที่จะแตกร้าว,ซม.

$f_r$ คือ โมดูลัสของการแตกหักซึ่งในกรณีนี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ $1.6\sqrt{f'_c}$ , กก./ซม.$^2$

$f_{pe}$ คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่เกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง, กก./ซม.$^2$

$f_d$ คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง, กก./ซม.$^2$

**ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน**

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีคำนวณค่า $V_{cw}$ ดังแสดงในสมการ

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc}) b_w d_w + V_p \qquad (2.38)$$

โดยที่ $V_{cw}$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน,กก.

$f_{pc}$ คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เนื่องจากการอัดแรง, กก./ซม.

$V_p$ คือ แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณาซึ่งมีค่าเท่ากับ $p\sin\alpha$ หรือ $p\alpha$, กก.

$d_p$ คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.8h โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด, ซม.

ในการคำนวณหาค่า $V_c$ สำหรับกรณีที่คานคอนกรีตอัดแรงมีแรงดึงประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของกำลังดึงประลัยของเหล็ก หากไม่ต้องการคำนวณโดยละเอียดจากค่าน้อยของ $V_{ci}$ และ $V_{cw}$ แล้ว อาจหาค่า $V_c$ โดยประมาณจากสมการ

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49\frac{V_u d_p}{M_u}\right) b_w d_p \qquad (2.39)$$

โดยที่ $V_u$ คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่หน้าตัดที่พิจารณา,กก.

$M_u$ คือ โมเมนต์เพิ่มส่วนที่เกิดขึ้นพร้อมกับแรงเฉือนเพิ่มส่วน $V_u$ ที่หน้าตัดที่พิจารณา, กก.-ซม.

ค่าของ $V_u d_p / M_u$ ในสมการที่ 2.39 จะต้องไม่มากกว่า 1 และค่า $V_c$ (หน่วยเป็นกก.) มีค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c} b_w d_p$ และไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c} b\, d_p$

สำหรับกรณีของคานคอนกรีตอันแรงที่เป็นคานช่วงเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่ค่าของ $\frac{\Delta V_i}{\Delta M_{max}}$ และ $\frac{V}{M_u}$ ในสมการที่ 2.36 และสมการที่ 2.39 อาจหาค่าจากสมการที่ 2.40 (ดูรูปรูปแสดงคานรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่ประกอบ)

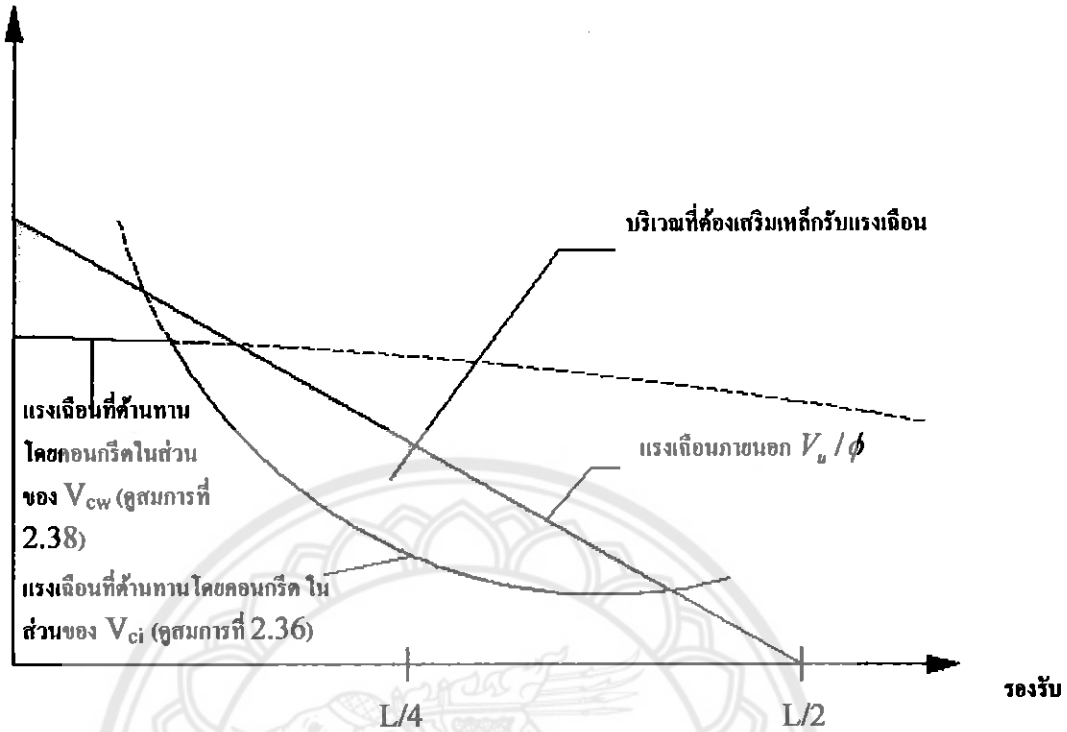
ที่ระยะ x ใดๆ $$\frac{V}{M} = \frac{\frac{wL}{2} - wx}{\frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2}} = \frac{L-2x}{x(L-x)} \qquad (2.40)$$

รูปแสดง คานรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่

**<u>กำลังต้านทานแรงแอนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน</u>**

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก (บริเวณที่แรเงาในรูปแสดงค่า $V_{ci}, V_{cw}$) ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอกจากสมการที่ 2.34 และ 2.35 เขียนใหม่ได้ว่า

แรงเฉือน




รูปแสดงค่า $V_{ci}, V_{cw}$ ที่ระยะต่างๆจากที่รองรับ และบริเวณที่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่

$$\theta(V_s + V_c) \geq V_u$$

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

หรือ $V_s$ ที่น้อยที่สุดที่ต้องช่วยในการรับแรงเฉือน คือ

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \qquad (2.41)$$

โดยที่ $V_s$ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$V_u$ คือ กำลังต้องการรับแรงเฉือนที่ต้องการหาได้จาก $1.4V_d + 1.7V_L$ โดยที่ $V_d$ และ $V_L$ คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ตามลำดับ

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

ค่าของ $V_s$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

ก) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กปลอกวางตั้งฉากกับแนวแกนขององค์อาคาร

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} \qquad (2.42)$$

โดยที่ $A_v$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งโดยปกติเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนี้จะดัดเป็นปลอกสี่เหลี่ยมทำให้ $A_v$ ของเหล็กปลอกมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้,ซม.$^2$

$f_y$ คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน,กก./ซม.$^2$

S คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน.ซม.

$d_p$ คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอักแรง,ซม.

**ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน**

**ก) ระยะเรียง (spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน**

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

- เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เป็นเหล็กปลอกที่วางเอียงและเหล็กคอม้า จะต้องจัดวางโดยที่เส้นตรงทุกเส้นที่ลากจากจุดกึ่งกลางความลึกของคาน ทำมุม 45° ไปยังแนวเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง จะต้องผ่านเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนี้อย่างน้อย 1 เส้น

ข) ปริมารการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

- ค่า $V_s$ ในการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะต้องมีค่าไม่มากกว่า $2.12\sqrt{f'_c}b_w d_p$ ถ้ามากกว่าให้ออกแบบขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน $V_u$ มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $\left(V_u \le \frac{\phi V_c}{2}\right)$ ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน (ยกเว้นกรณีต่อไปนี้คือ แผ่นรากฐานราก และคานซึ่งมีความลึกไม่มากกว่า 25 ซม. หรือ 2.5 เท่าของความหนาของปีกคาน หรือครึ่งหนึ่งของความกว้างของตัวแกน ทั้งนี้ให้ใช้ค่าที่มากที่สุด)

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน $V_u$ มีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $\left(V_u \ge \frac{\phi V_c}{2}\right)$ ให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุดของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน $(A_v)_{\min}$ ซึ่งหาจากสมการที่ 2.43

$$(A_v)_{\min} = \frac{3.5 b_w s}{f_y} \text{ (หน่วยเป็นซม.}^2\text{)} \qquad (2.43)$$

ในกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีแรงอัดประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง $P_e$ ไม่น้อยกว่า 40 % ของกำลังดึงประลัยเหล็กเสริมอัดแรง $F_{pu}$ ปริมาณต่ำสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน อาจใช้ค่าที่น้อยระหว่างสมการ 6.12 และ 6.13

$$(A_v)_{\min} = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d_p}\sqrt{\frac{d_p}{b_w}} \text{ (หน่วยเป็นซม.}^2\text{)} \qquad (2.44)$$

โดยที่ $A_{ps}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง. ซม.$^2$

$f_{pu}$ คือ หน่วยแรงดึงที่จุดประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง . กก/ซม.$^2$

# บทที่ 3
# การดำเนินการพัฒนา Worksheet เพื่อการออกแบบคาน คอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple Span)

## 3.1 บทนำ

เมื่อได้ทำการศึกษาทฤษฎี ข้อกำหนด และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงดังที่กล่าวไปในบทที่ 2 แล้ว ในบทนี้จะเป็นการแสดงขั้นตอนการพัฒนา Worksheet เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple Span) ซึ่งใน Worksheet จะประกอบด้วย 4 tab บนหน้าจอของโปรแกรม Microsoft Excel ดังนี้คือ

3.1.1 Cal I-Girder-Plat ซึ่งเป็น Tab สำคัญที่จะแสดงรายการคำนวณในการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple Span) ประกอบด้วย การออกแบบเพื่อรับโมเมนต์ดัด การตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัย การตรวจสอบและออกแบบเพื่อรับแรงเฉือน และการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานคอนกรีตอัดแรง

3.1.2 I-Prop-Plat เป็น Tab ที่แสดงถึงคุณสมบัติของหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรง ซึ่งใน Worksheet นี้จะใช้หน้าตัดรูปตัว I ซึ่งเป็นหน้าตัดที่มีความคุ้มค่ามากที่สุดในการออกแบบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึง พื้นที่หน้าตัดคาน โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคาน ระยะจากขอบผิวของหน้าตัดยังแนวแกนสะเทิน

3.1.3 ลวดอัดแรง I Plat เป็น Tab ที่แสดงถึงการวางแนวลวดจากขอบล่างคาน และจำนวนลวดอัดแรงที่ระยะต่างๆของคาน

3.1.4 Mat I Plat เป็น Tab ที่แสดงถึงคุณสมบัติของพื้นสำเร็จรูป CPAC HOLLOW CORE SLAB และคุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน ASTM A416 ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งเกรด 250 และเกรด 270

## 3.2 ขั้นตอนพัฒนา Worksheet เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple Span)

### 3.2.1การออกแบบคานเพื่อรับโมเมนต์ดัด

**กำหนดคุณสมบัติหน้าตัดคาน**

1. กำหนดหน้าตัดคานใน I Prop-Plat (btf, dtf, dtfi, dbfi, dbf, bbf, H, bw)
2. คำนวณผลลัพธ์ได้ X-Area, Ix, Iy, Xcg, Ycg
3. กำหนดช่วงความยาวคาน
4. กำหนดกำลังอัดของคอนกรีต f'c
5. กำลังอัดคอนกรีตขณะดึงลวด f'c=0.8f'c
6. ได้ Section Modulus , $Sb = \frac{Ix}{Ycg}$, $St = \frac{Ix}{(H - Ycg)}$

**หาน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงคาน**

1. กำหนด Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel
2. ได้ Dead Load Girder = Unit Weight Concrete x Ax
3. กำหนด Live Load
4. กำหนดความหนาพื้น
5. ได้น้ำหนักบรรทุกที่พื้นจะต้องรับ, TL=SB+LL
6. กำหนดช่วงพื้นที่ถ่ายลงคานด้านซ้าย, ด้านขวา (ช่วงใน x 0.5)
7. ได้ความยาวช่วงที่ถ่ายลงคาน
8. ได้น้ำหนักบรรทุกจากพื้นถ่ายลงคาน

**โมเมนต์ออกแบบ**

1. Moment Girder($M_G$), Moment Dead Load($M_{DL}$), Moment Live Load($M_{LL}$), Moment ออกแบบ($M_T$), ($M_{กึ่งกลาง}=\frac{WL^2}{8}$, $M_{ระยะต่างๆ}=\frac{WX}{2}(L-X)$, $M_T=M_{DL}+M_{LL}$)

**ออกแบบหน้าตัดคาน**

1. สมมติค่า loss ณ ตำแหน่งต่างๆของช่วงคาน (%)
2. หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ขณะถ่ายแรง $F_{ci} = 0.60f'_{ci}$
3. หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ขณะถ่ายแรง $F_{ti} = -0.80\sqrt{f'_{ci}}$
4. หน่วยแรงอัดที่อมให้ขณะรับน้ำหนักบรรทุก $F_c = 0.45f'_c$
5. หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ขณะรับน้ำหนักบรรทุก $F_t = -0.80\sqrt{f'_c}$
6. Z ของหน้าตัด, $Z = \frac{Ix}{Ycg}$
7. $(Z_B)_{\min} = \frac{M_T - RM_G}{RF_{ci} - F_t}$, $R = \frac{P_e}{P_i}$
8. ถ้า $Z > (Z_b)_{min}$ (ใช้ได้) แต่ถ้า $Z < (Z_b)_{min}$ (ใช้ไม่ได้, เปลี่ยนหน้าตัดคาน)
9. ได้ $\alpha = \frac{A}{Z}, \frac{1}{\alpha}$
10. แทนค่าต่างๆลงในสมการของแมกเนลเพื่อหาแผนภาพแมกเนลสำหรับการออกแบบคาน

สมการที่ 5.5 $$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_t e - 1}{-AF_{ti} + \alpha_t M_G}$$

สมการที่ 5.6 $$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_b e - 1}{-AF_{ci} + \alpha_b M_G}$$

สมการที่ 5.7.1 $$\frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_t e - 1)}{-AF_c + \alpha_t M_T}$$ ถ้า $\frac{M_T}{Z_t} > F_c$

สมการที่ 5.7.2 $$\frac{1}{P_i} \geq \frac{R(\alpha_t e - 1)}{-AF_c + \alpha_t M_T}$$ ถ้า $\frac{M_T}{Z_t} < F_c$

สมการที่ 5.8 $$\frac{1}{P_i} \leq \frac{R(\alpha_b e + 1)}{AF_t + \alpha_b M_T}$$

11. นำสมการทั้ง 4 ที่ได้ไปเขียนกราฟ ก็จะได้กราฟแมกเนลสำหรับการออกแบบคาน
12. ค่า $e_{ideal}$ ลงในสมการที่ 5.8 จะได้ $P_i$ ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้
13. หาแนวเหล็กเสริมอัดแรง (Cable Profile) จากสมการ

สมการที่ 5.1 $$\frac{P_i}{A} - \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_t}\right) \geq F_{ti}$$

สมการที่ 5.2 $$\frac{P_i}{A} + \left(\frac{P_i e - M_G}{Z_b}\right) \geq F_{ci}$$

สมการที่ 5.3 $$\frac{P_e}{A} - \left(\frac{P_e e - M_T}{Z_t}\right) \geq F_c$$

สมการที่ 5.4 $$\frac{P_e}{A} + \left(\frac{P_e e - M_T}{Z_b}\right) \geq F_t$$

14. จากแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงด้วยเครื่องดึงลวด
$= 0.94F_{py} \le 0.80F_{pu}$ (ใช้ค่าน้อย)

15. แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงขณะดึงด้วยเครื่องดึง, $P_j = \frac{P_i}{(\frac{100 - \%(loss)}{100})}$

16. จำนวนลวดเกลียวอัดแรงที่น้อยที่สุด = $P_j$ / แรงดึงมากสุดขณะดึงด้วยเครื่องดึง

**ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีต**

**ช่วงทันทีหลังการถ่ายแรง**

1. หน่วยแรงที่ผิวบนของคอนกรีตและหน่วยแรงที่ผิวล่างของคอนกรีต ต้องไม่เกินหน่วยแรงอัดที่ยอมให้($F_{ci}$), ไม่เกินหน่วยแรงดึงที่ยอมให้($F_{ti}$)

**ช่วงหลังจากรับน้ำหนักบรรทุก**

1. หน่วยแรงที่ผิวบนของคอนกรีตและหน่วยแรงที่ผิวล่างของคอนกรีต ต้องไม่เกินหน่วยแรงอัดที่ยอมให้($F_c$), ไม่เกินหน่วยแรงดึงที่ยอมให้($F_t$)

**ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัย**

1. ใส่หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง ($f_{se}$)
2. หน่วยแรงดึงที่จุดประลัย ($f_{pu}$) = แรงดึงที่จุดประลัย/พื้นที่หน้าตัดลวด
3. ตรวจสอบ $\frac{f_{se}}{f_{pu}}$ ถ้า $\frac{f_{se}}{f_{pu}} > 0.50 \Rightarrow$ ใช้

สมการ $f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{r_p}{\beta_1}\left[P_p\frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p}(w - w')\right]\right\}$

โดยที่ – ตัวคูณที่คำนึงถึงกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง $(r_p)$

$r_p = 0.40$ เมื่อ $0.85 \le \frac{f_{py}}{f_{pu}} < 0.90$

$r_p = 0.28$ เมื่อ $\frac{f_{py}}{f_{pu}} \ge 0.90$

$-\beta_1 = 0.85$ เมื่อ $f'_c \le 300ksc$

$-\beta_1 = 0.85 - 0.0008(f'_c - 300) \ge 0.65$ เมื่อ $f'_c > 300ksc$

$-P_p$ คืออัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง $= \frac{Aps}{bdp}$

4. ตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัย

**สมมติ a น้อยกว่าความหนาปีก**

**จริง**

**(a อยู่ในความหนาของปีกคาน)**

- ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริม

$$W_p = \frac{P_p f_{ps}}{f'_c} \le 0.36\beta_1 \Rightarrow OK$$

- โมเมนต์ดัดประลัย $M_n = A_{ps} f_{ps}(d_p - \frac{a}{2})$
- โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

$$M_{cr} = P_e + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b}$$

- โมเมนต์ภายนอก $M_u = 1.4M_{DL} + 1.7M_{LL}$

เมื่อ $\phi = 0.90$

ถ้า $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ และ $\phi M_n > M_u$ } OK

**ไม่จริง**

**(a อยู่นอกความหนาของปีก)**

- $A_{pw} = (0.85f'_c \times$ พื้นที่รับแรง c ในตัวแกน$)/ f_{ps}$

$A_{pw}$ = ปริมาณเหล็กเสริมที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกน

- $P_{pw} = \frac{A_{pw}}{b_w d_p}$
- ตรวจสอบปริมารเหล็กเสริม

$$W_{pw} = \frac{P_{pw} f_{ps}}{f'_c} \le 0.36\beta_1 \Rightarrow OK$$

- โมเมนต์ดัด

ประลัย $M_n = C_f(d_p - \frac{t_f}{2}) + C_w(d_p - \frac{a}{2})$

- โมเมนต์ภายนอก $M_u = 1.4M_{DL} + 1.7M_{LL}$

เมื่อ $\phi = 0.90$

ถ้า $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ และ $\phi M_n > M_u$ } OK

### 3.2.2 ตรวจสอบแรงเฉือน

**ตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต**

กำลังในการต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาจากค่าที่น้อยของ 2 ค่า

**กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ($V_{ci}$)**

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

โดยที่ $-d_p$ ไม่น้อยกว่า 0.8h

$$-V_d = W_d\left(\frac{L}{2} - X\right)$$

$$-\frac{\Delta V_i}{\Delta M_{max}} = \frac{L-2X}{X(L-X)}$$

$$-\Delta M_{cr} = \frac{1}{y_t}(f_r + f_{pe} - f_d)$$

เมื่อ $f_r = 1.6\sqrt{f'_c}$

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e e c}{I}$$

$$f_d = \frac{M_G c}{I}; M_G = \frac{W_D X}{2}(L-X)$$

**กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน ($V_{cw}$)**

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

โดยที่ $-f_{pc} = \frac{P_e}{A}$

$$-V_p = P_e . y'$$

เมื่อ $y' = \frac{dy}{dx}\left[4e\left[\frac{X}{L} - \left(\frac{X}{L}\right)^2\right]\right]$

**กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต($V_c$) = ค่าน้อยระว่าง $V_{ci}$ และ $V_{cw}$**

**ปริมาณการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน**

- กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ $(V_u) = W_u(\frac{L}{2} - X) = [1.4V_D + 1.7V_L]\left[\frac{L}{2} - X\right]$
- กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน $(V_s) = \frac{V_u}{\phi} - V_c$ ;

  (เมื่อ $\phi = 0.85$)
- ใส่ กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน( $f_y$ )
- เมื่อ $V_S$= + (จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน)
- เมื่อ $V_S$= - (ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน)

*แต่ต้องเสริมน้อยที่สุด $(A_v)_{min} = \frac{3.5b_w s}{f_y}$

<u>ระยะจัดเรียง (Spacing) ของเหล็กเริมรับแรงเฉือน</u>

2-leg DB12mm $\Rightarrow$ $A_V$= 2.26 $cm^2$

2-leg DB16mm $\Rightarrow$ $A_V$= 4.02 $cm^2$

**<u>กรณีเลือก Spacing for DB12mm</u>**

$S = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$

$S = \frac{A_v f_y d_p}{3.5b_w}$

} ใช้ S ค่าน้อย

S ที่คำนวณได้ต้อง $\leq \frac{3}{4}h$

$\leq 60cm$

**<u>กรณีเลือก Spacing for DB16mm</u>**

$S = \frac{A_v f_y d_p}{V_s}$

$S = \frac{A_v f_y d_p}{3.5b_w}$

} ใช้ S ค่าน้อย

S ที่คำนวณได้ต้อง $\leq \frac{3}{4}h$

$\leq 60cm$

### 3.2.3 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน Dapped-End Beam Connection Design

- **ออกแบบเพื่อรับ Flexure and Axial Tension in the Extended End**

1. ใส่ค่า $\phi$
2. ใส่ความยาว shear span (a)
3. ใส่ effective depth of the dap to center of reinforcement(d)
4. ใส่ค่า depth of member above the dap(h)
5. กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ($V_u$) ⇒ ได้จาก $V_u$ในการออกแบบรับแรงเฉือนที่ระยะ $\frac{d}{2}$
6. horizontal axial tension($N_u$) = 0.2 $V_u$

$$A_s = \frac{1}{\phi f_y}\left[V_u\left(\frac{a}{d}\right) + N_u\left(\frac{h}{d}\right)\right]$$

7. $f_y$ ⇒ดึงข้อมูลที่กรอกค่าในการออกแบบรับแรงเฉือน

⇒ ได้ $A_s$ ที่ต้องการ ⇒ ไปเลือกเหล็ก DB12mm, DB16mm, DB20mm, DB25mm, DB28mm ⇒ ได้จำนวนเส้น ***ผู้ใช้เลือก**

- **ออกแบบเพื่อรับ Direct Shear**

1. ใส่ค่า $\lambda$
2. ใส่ค่า $\mu_e$

$A_s = \frac{2V_u}{3\phi f_y \mu_e} + A_n$ เทียบกับ $A_s$ด้านบนใช้ค่ามาก

$$A_n = \frac{N_u}{\phi f_y}$$

$$A_h = 0.5(A_s - A_n)$$

⇒ ได้ $A_h$ ที่ต้องการ ⇒ ไปเลือกเหล็ก เหล็ก DB12mm, DB16mm, DB20mm, DB25mm, DB28mm ⇒ ได้จำนวนเส้น ***ผู้ใช้เลือก**

- **ออกแบบเพื่อรับ Diagonal Tension at Re-entrant Corner**

$$A_{sh} = \frac{V_u}{\phi f_y}$$

$A'_{sh} \geq A_{sh}$

⇒ ได้ $A_{sh}$ ที่ต้องการ ⇒ ไปเลือกเหล็ก ได้จำนวนปลอก ***ผู้ใช้เลือก**

⇒ ได้ $A'_{sh}$ ที่ต้องการ ⇒ ไปเลือกเหล็ก ได้จำนวนเส้น ***ผู้ใช้เลือก**

- **ออกแบบเพื่อรับ Diagonal Tension in the Extended End**

  $\Rightarrow$ ใส่ค่า $\alpha, \beta, \lambda$

  $\Rightarrow$ หาระยะฝังของเหล็ก $A_s, A_h, A'_{sh}$

  $\Rightarrow$ ขึ้นอยู่กับขนาดของเหล็ก

## 3.3 ขอบข่ายของงาน

ส่วนของ Worksheet ที่พัฒนาขึ้นใช้ในการคำนวณในส่วนหลักอยู่ 3 ส่วน คือ

- ออกแบบคานเพื่อรับโมเมนต์คัด
- ออกแบบคานเพื่อรับแรงเฉือน
- ออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน

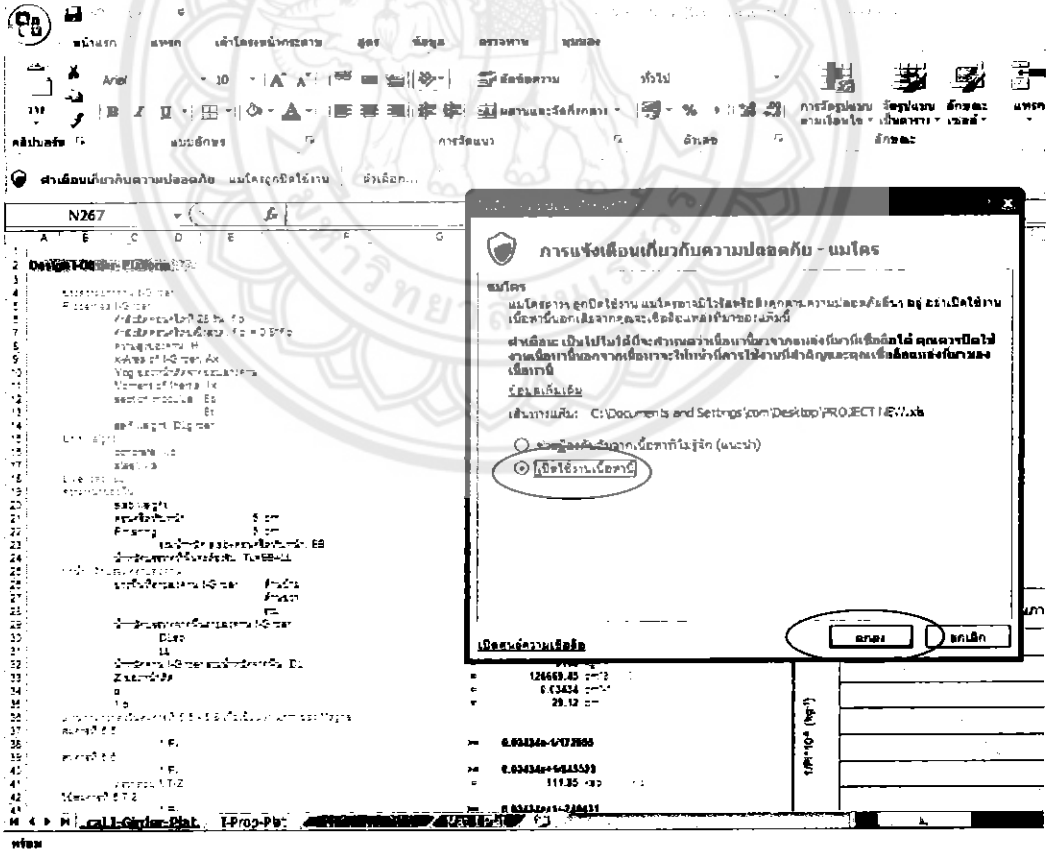
ขั้นตอนวิธีการใช้ Worksheet เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple Span)

จะกล่าวถึงขั้นตอนทั่วๆไปในการใช้งานดังนี้

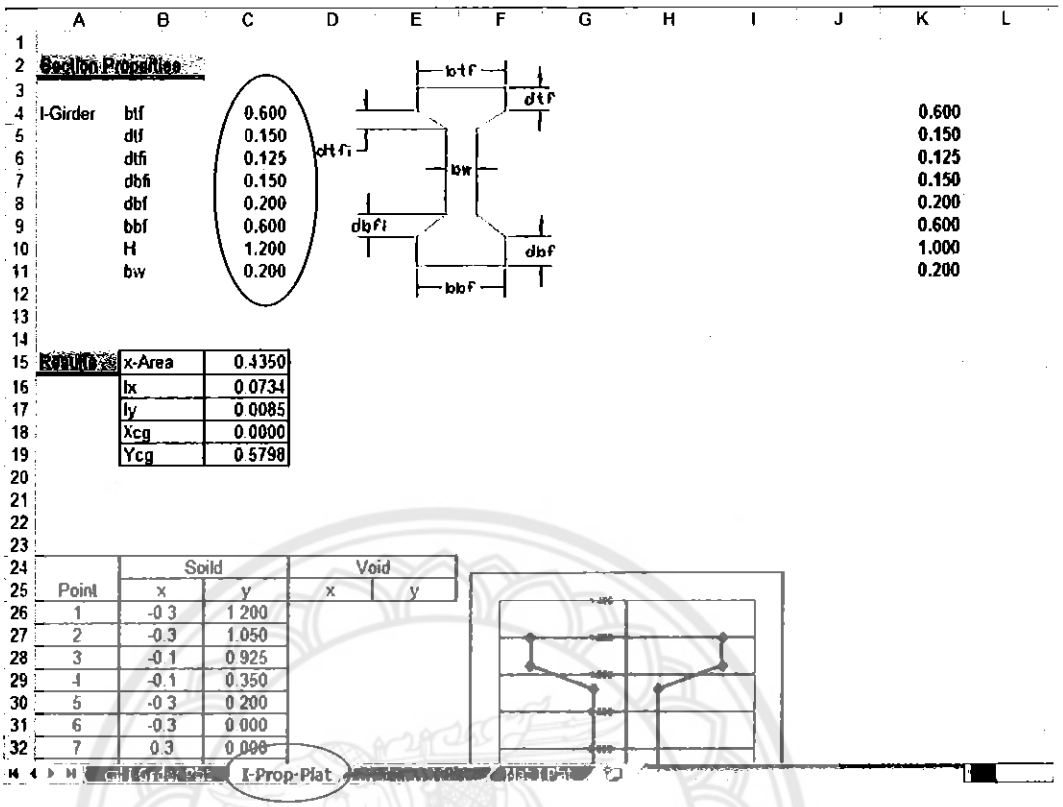
- เข้าไปที่ Worksheet ออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว (Simple Span)
- เมื่อเข้า Worksheet แล้ว เลือกคำสั่ง เปิดใช้งานแมโคร
- เข้าไปที่ I-Prop-Plat เพื่อกำหนดขนาดหน้าตัด
- เข้าไปที่ Mat I Plat เพื่อเลือกเกรดของลวดเกลียวอัดแรง
- เข้าไปที่ cal I-Girder-Plat เพื่อกรอกค่าต่างๆดังนี้ (ค่าที่ต้องกรอกจะเป็นตัวหนังสือสีแดง)
  - ช่วงความยาวคาน I-Girder
  - กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, $f'_c$
  - Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel
  - Live Load
  - ความหนาของพื้น, ความหนาของคอนกรีตทับหน้า, ความหนาของ Finishing
  - ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder ด้านซ้าย, ด้านขวา
  - การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (ทุกช่วงความยาว)
  - การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทุกช่วงความยาว)
  - เลือกช่วงระยะของคานที่ต้องการแสดงกราฟแมกเนล
  - เลือกค่า e (ทุกช่วงความยาว)
  - จำนวนลวดเกลียวอัดแรง (ทุกช่วงความยาว)
  - เลือกแรงดึงในเส้นลวด

- หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง($f_{se}$)
- กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน($f_y$)
- Ø=ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ
- shear span (a)
- effective depth of the dap to center of reinforcement (d)
- depth of member above the dap (h)
- $\lambda, \mu, \mu_e$
- $\alpha, \beta, \lambda$
- กรอกขนาดเหล็กในการออกแบบระยะฝัง(Development Length)

- หลังจากนั้น Worksheet จะทำการคำนวณค่าต่างๆ และเมื่อคำนวณค่าเสร็จจะทำให้ทราบว่าหน้าตัดนั้นสามารถใช้ได้หรือไม่ ทราบจำนวนลวดเกลียวอัดแรง ทราบปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ทราบปริมาณการเสริมเหล็กที่จุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน




รูปแสดงการเปิดใช้งานแมโคร



Section Properties

| | | | |
|---|---|---|---|
| I-Girder | btf | 0.600 | 0.600 |
| | dtf | 0.150 | 0.150 |
| | dtfi | 0.125 | 0.125 |
| | dbfi | 0.150 | 0.150 |
| | dbf | 0.200 | 0.200 |
| | bbf | 0.600 | 0.600 |
| | H | 1.200 | 1.000 |
| | bw | 0.200 | 0.200 |

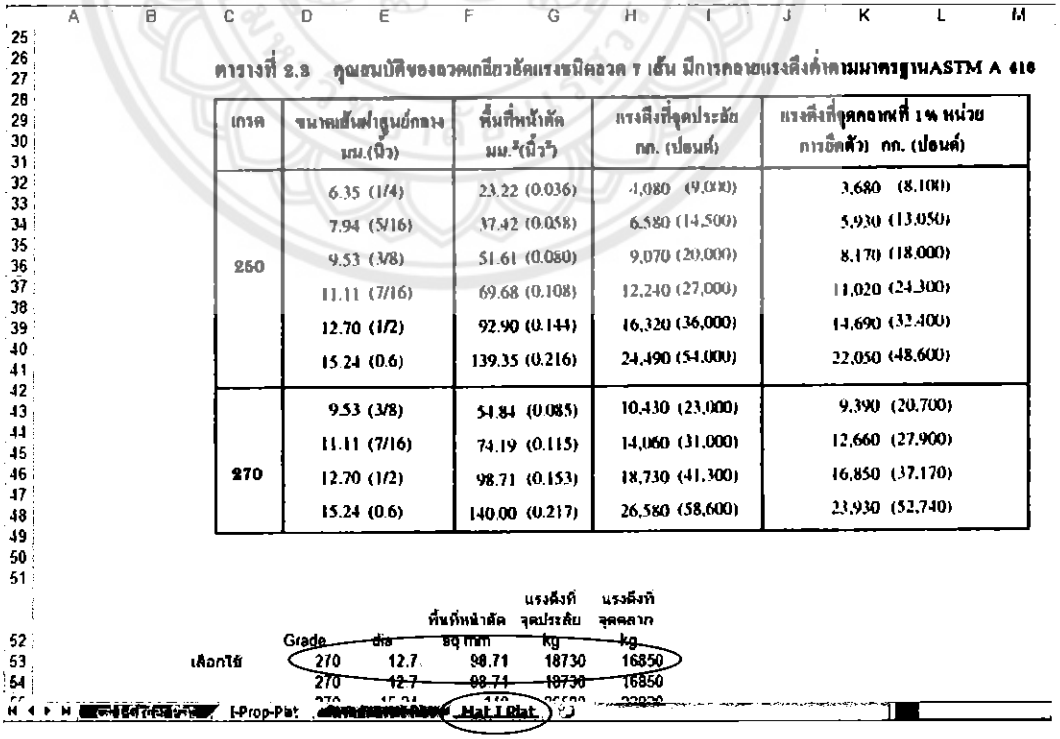
Results

| | |
|---|---|
| x-Area | 0.4350 |
| Ix | 0.0734 |
| Iy | 0.0085 |
| Xcg | 0.0000 |
| Ycg | 0.5798 |

| Point | Solid x | Solid y | Void x | Void y |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.3 | 1.200 | | |
| 2 | -0.3 | 1.050 | | |
| 3 | -0.1 | 0.925 | | |
| 4 | -0.1 | 0.350 | | |
| 5 | -0.3 | 0.200 | | |
| 6 | -0.3 | 0.000 | | |
| 7 | 0.3 | 0.000 | | |

I-Prop-Plat

รูปแสดงกำหนดขนาดหน้าตัดที่ I-Prop-Plat



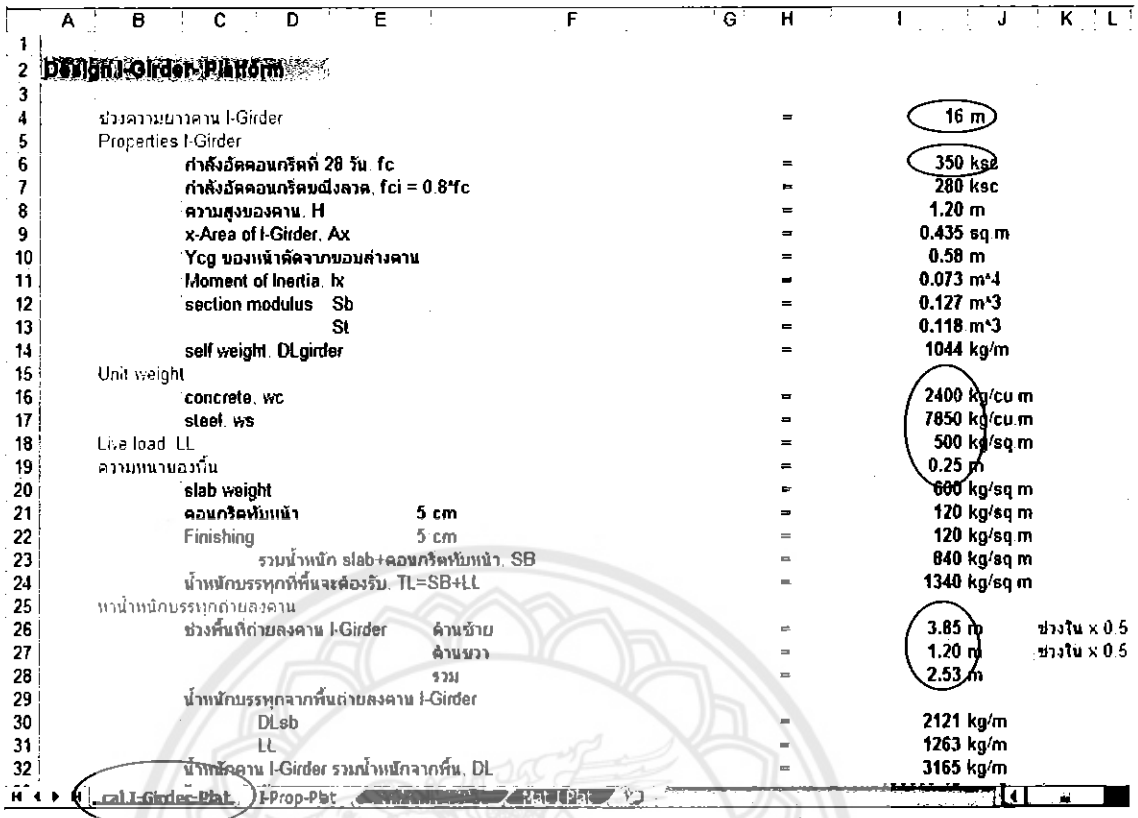
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐานASTM A 416

| เกรด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มม.(นิ้ว) | พื้นที่หน้าตัด มม.²(นิ้ว²) | แรงดึงที่จุดประลัย กก. (ปอนด์) | แรงดึงที่จุดคลาก 1% หน่วยการยืดตัว) 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) | 51.61 (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 (0.6) | 139.35 (0.216) | 24,490 (54,000) | 22,050 (48,600) |
| 270 | 9.53 (3/8) | 54.84 (0.085) | 10,430 (23,000) | 9,390 (20,700) |
| | 11.11 (7/16) | 74.19 (0.115) | 14,060 (31,000) | 12,660 (27,900) |
| | 12.70 (1/2) | 98.71 (0.153) | 18,730 (41,300) | 16,850 (37,170) |
| | 15.24 (0.6) | 140.00 (0.217) | 26,580 (58,600) | 23,930 (52,740) |

| | Grade | dia | พื้นที่หน้าตัด sq mm | แรงดึงที่จุดประลัย kg | แรงดึงที่จุดคลาก kg |
|---|---|---|---|---|---|
| เลือกใช้ | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |

I-Prop-Plat | Mat I Plat

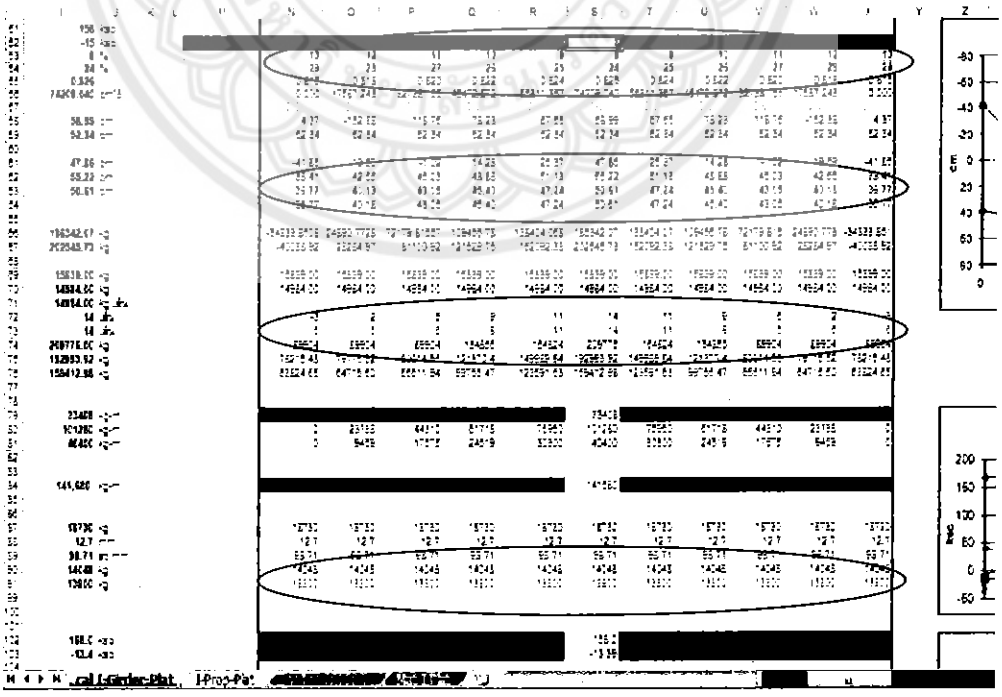
รูปแสดงการเลือกเกรดของลวดเกลียวอัดแรงที่ Mat I Plat



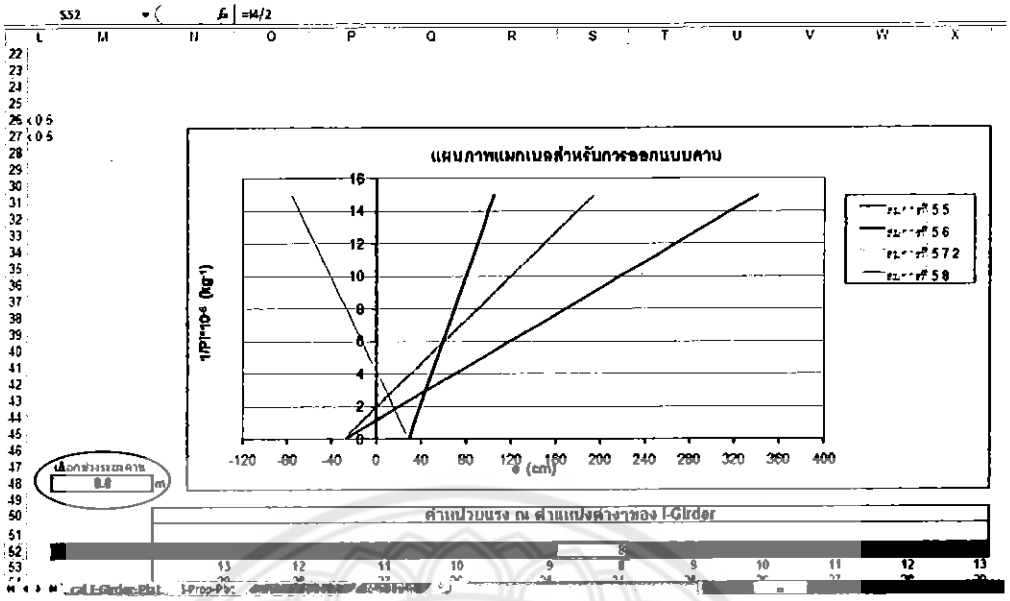
| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Design I-Girder-Platform | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | ช่วงความยาวคาน I-Girder | | | | | | | = | 16 m | | | | |
| 5 | Properties I-Girder | | | | | | | | | | | | |
| 6 | กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, fc | | | | | | | = | 350 ksc | | | | |
| 7 | กำลังอัดคอนกรีตขณะดึงลวด, fci = 0.8*fc | | | | | | | = | 280 ksc | | | | |
| 8 | ความสูงของคาน, H | | | | | | | = | 1.20 m | | | | |
| 9 | x-Area of I-Girder, Ax | | | | | | | = | 0.435 sq m | | | | |
| 10 | Ycg ของหน้าตัดจากขอบล่างคาน | | | | | | | = | 0.58 m | | | | |
| 11 | Moment of Inertia, Ix | | | | | | | = | 0.073 m^4 | | | | |
| 12 | section modulus Sb | | | | | | | = | 0.127 m^3 | | | | |
| 13 | St | | | | | | | = | 0.118 m^3 | | | | |
| 14 | self weight, DLgirder | | | | | | | = | 1044 kg/m | | | | |
| 15 | Unit weight | | | | | | | | | | | | |
| 16 | concrete, wc | | | | | | | = | 2400 kg/cu m | | | | |
| 17 | steel, ws | | | | | | | = | 7850 kg/cu m | | | | |
| 18 | Live load LL | | | | | | | = | 500 kg/sq m | | | | |
| 19 | ความหนาของพื้น | | | | | | | = | 0.25 m | | | | |
| 20 | slab weight | | | | | | | = | 600 kg/sq m | | | | |
| 21 | คอนกรีตทับหน้า | 5 cm | | | | | | = | 120 kg/sq m | | | | |
| 22 | Finishing | 5 cm | | | | | | = | 120 kg/sq m | | | | |
| 23 | รวมน้ำหนัก slab+คอนกรีตทับหน้า, SB | | | | | | | = | 840 kg/sq m | | | | |
| 24 | น้ำหนักบรรทุกที่พื้นจะต้องรับ, TL=SB+LL | | | | | | | = | 1340 kg/sq m | | | | |
| 25 | หาน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงคาน | | | | | | | | | | | | |
| 26 | ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder | ด้านซ้าย | | | | | | = | 3.85 m | ช่วงใน x 0.5 | | | |
| 27 | | ด้านขวา | | | | | | = | 1.20 m | ช่วงใน x 0.5 | | | |
| 28 | | รวม | | | | | | = | 2.53 m | | | | |
| 29 | น้ำหนักบรรทุกจากพื้นถ่ายลงคาน I-Girder | | | | | | | | | | | | |
| 30 | DLsb | | | | | | | = | 2121 kg/m | | | | |
| 31 | LL | | | | | | | = | 1263 kg/m | | | | |
| 32 | น้ำหนักคาน I-Girder รวมน้ำหนักจากพื้น, DL | | | | | | | = | 3165 kg/m | | | | |

cal I-Girder-Plat | I-Prop-Plat

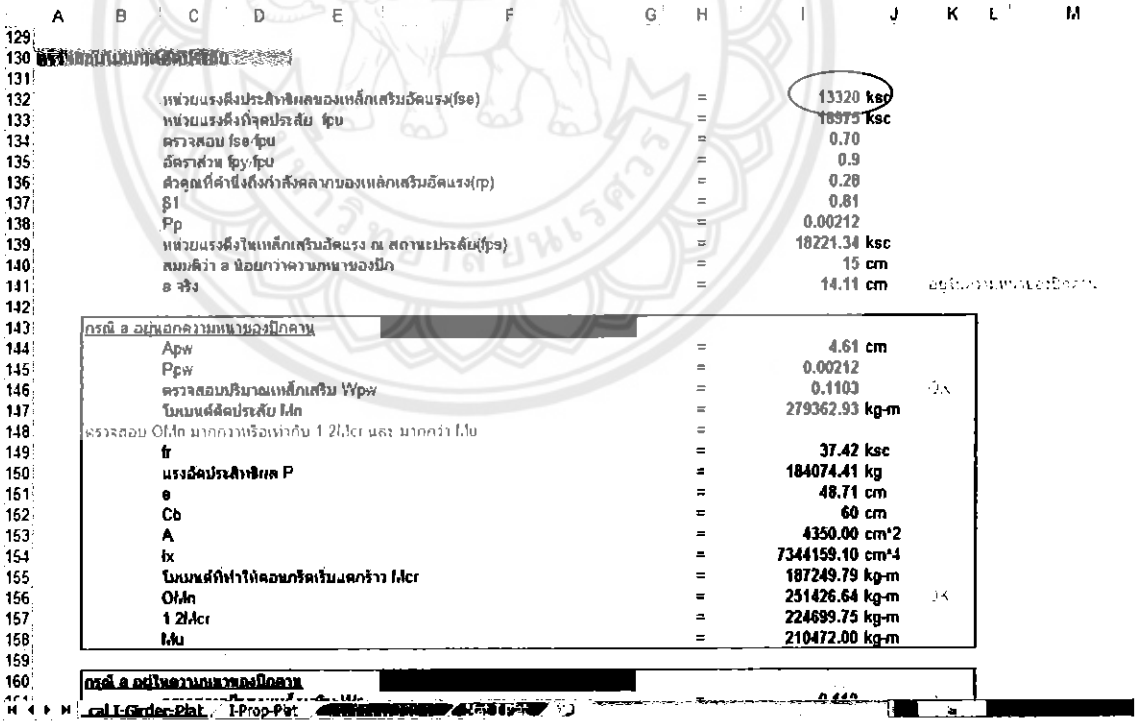
**รูปแสดงการกรอกค่าช่วงความยาวคาน I-Girder, กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, $f_c$, Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel, Live Load, ความหนาของพื้น, ความหนาของคอนกรีตทับหน้า, ความหนาของ Finishing, ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder ด้านซ้าย, ด้านขวา ใน cal I-Girder-Plat**



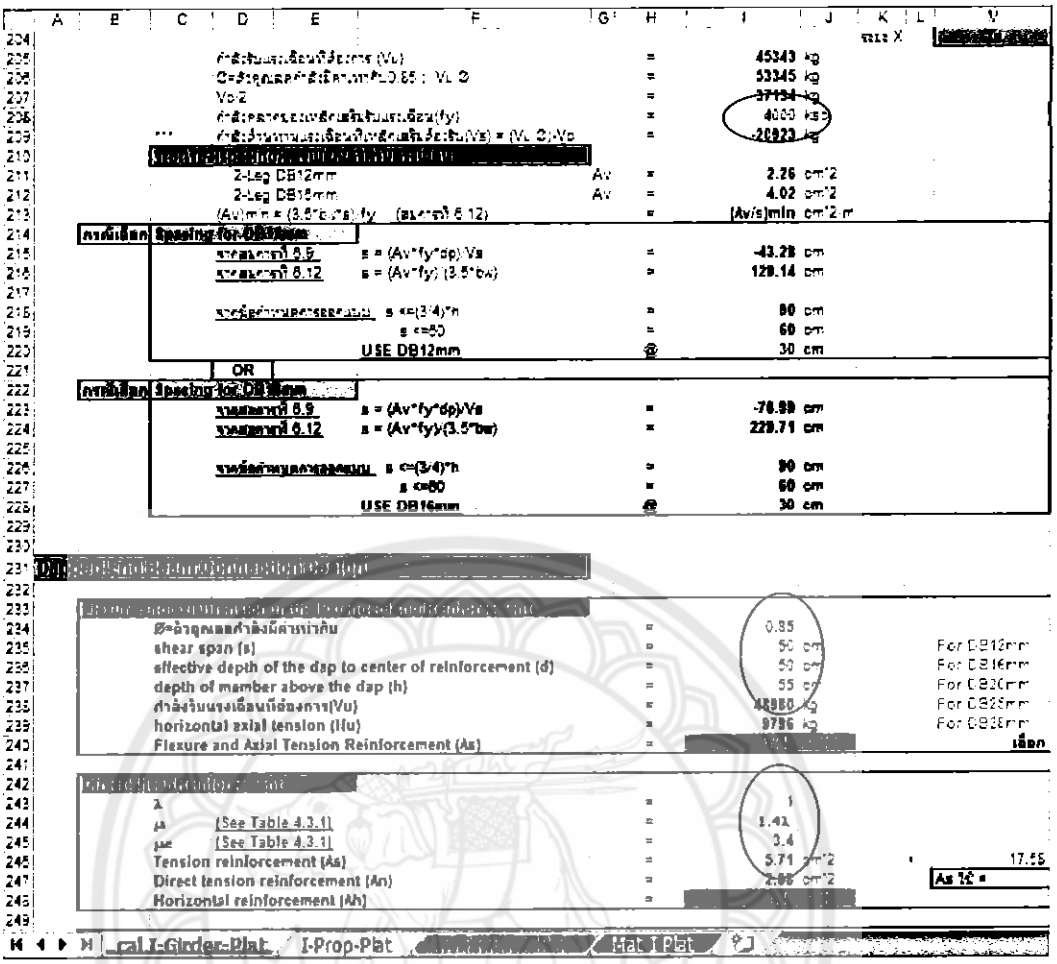
**รูปแสดงการกรอกค่าการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด, การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด, เลือกค่า e, จำนวนลวดเกลียวอัดแรง, เลือกแรงดึงในเส้นลวด**



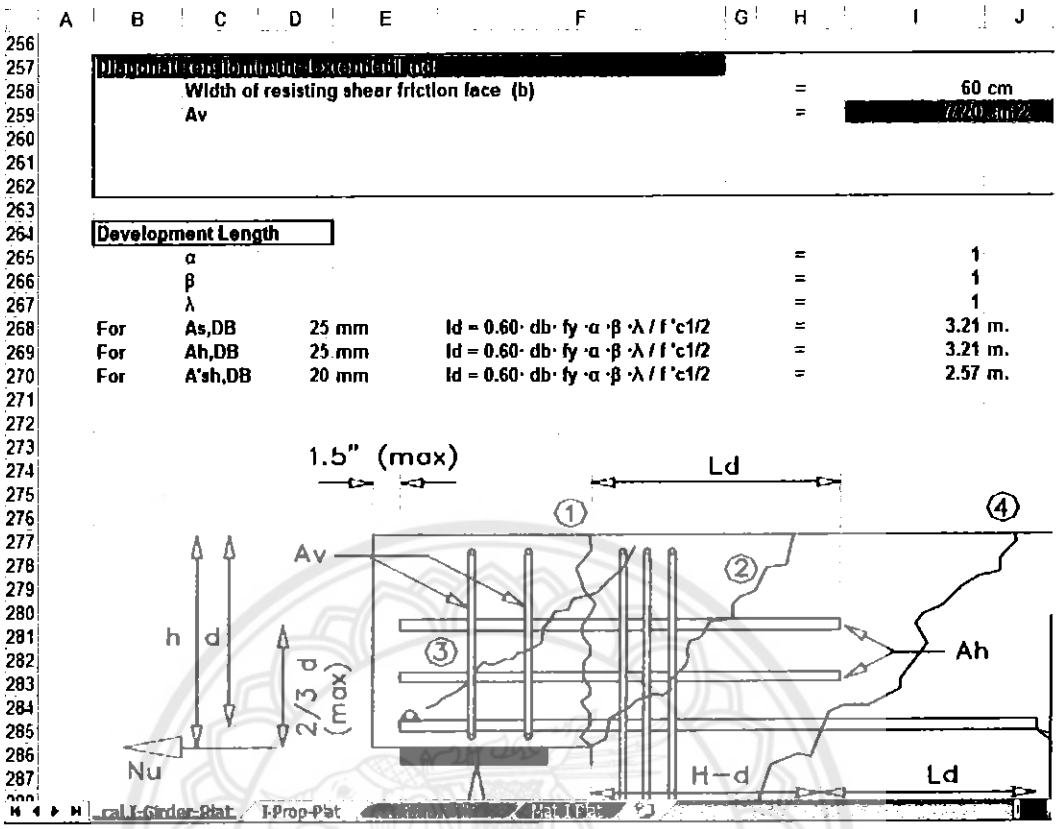

รูปแสดงการเลือกช่วงระยะของคานที่ต้องการแสดงกราฟแมกเนล




รูปแสดงการกรอกค่าหน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง($f_{se}$)




**รูปแสดง**การกรอกค่ากำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน($f_y$), Ø, shear span (a), effective depth of the dap to center of reinforcement (d), depth of member above the dap (h), $\lambda, \mu, \mu_e$




**รูปแสดงการกรอกค่า $\alpha, \beta, \lambda$ กรอกขนาดเหล็กในการออกแบบระยะฝัง(Development Length)**

# บทที่ 4
# ผลการดำเนินงาน

## 4.1 บทนำ

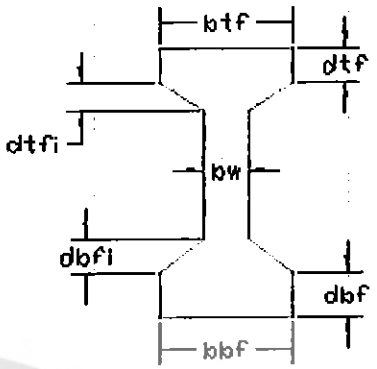
จากการศึกษาถึงการใช้งาน Worksheet เราสามารถคำนวณการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียวให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย โดยสามารถคำนวณและตรวจสอบได้ทุกช่วงความยาวคานได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง รวมถึงช่วยลดเวลาในการออกแบบและแก้ไข (หากเกิดการผิดพลาด คือ Section Modulus ของหน้าตัดไม่ผ่าน, หน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่าง ณ สภาวะขณะถ่ายแรง หรือหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่าง ณ สภาวะขณะใช้งาน เกินหน่วยแรงที่ยอมให้, ปริมาณการเสริมเหล็กอัดแรงสูงกว่าเกณฑ์สมดุลคือ $> 0.36\beta_1$ ซึ่งในการออกแบบต้องเสริมเหล็กอัดแรงให้ต่ำกว่าเกณฑ์สมดุลเพื่อให้มีความเหนียว(ductility) และรวมถึงกรณีที่กำลังประลัยของหน้าตัดไม่ผ่านคือ $\phi M_n < M_u$ ซึ่งจะถือว่าการออกแบบหน้าตัดจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อผ่านในทุกกรณีที่กล่าวมาข้างต้น

## 4.2ตัวอย่างการใช้Worksheet

โจทย์ข้อที่ 1 จงออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I ชนิดดึงเหล็กทีหลังที่เป็นระบบที่มีการยึดเหนี่ยวช่วงเดียวที่มีความยาวช่วง 16 เมตร เพื่อรับน้ำหนักพื้นทีมีความหนา 0.25 เมตร โดยช่วงพื้นที่ถ่ายลงคานด้านซ้ายเท่ากับ 4 เมตร ด้านขวาเท่ากับ 2 เมตร และรับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 500 กก./ตร.ม. กำลังประลัยของคอนกรีตที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 350 กก./ตร.ซม. กำหนดเหล็กเส้นธรรมดาเพื่อรับแรงเฉือนและเสริมที่จุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานมีกำลังคลากเท่ากับ 4,000 กก./ตร.ซม.

### 4.2.1 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว I เพื่อรับโมเมนต์ดัด

| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| 1 | | | |
| 2 | Section Properties | | |
| 3 | | | |
| 4 | I-Girder | btf | 0.600 |
| 5 | | dtf | 0.200 |
| 6 | | dtfi | 0.125 |
| 7 | | dbfi | 0.150 |
| 8 | | dbf | 0.200 |
| 9 | | bbf | 0.600 |
| 10 | | H | 1.200 |
| 11 | | bw | 0.200 |
| 12 | | | |
| 13 | | | |
| 14 | | | |
| 15 | Results | x-Area | 0.4550 |
| 16 | | Ix | 0.0763 |
| 17 | | Iy | 0.0094 |
| 18 | | Xcg | 0.0000 |
| 19 | | Ycg | 0.5966 |
| 20 | | | |




กำหนดขนาดหน้าตัดคานที่ I-Prop-Plat โดยกรอกค่าทุกค่าจะได้คานหน้าตัดรูปตัว I ที่มีบ่า

| | C | D | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | พื้นที่หน้าตัด | แรงดึงที่จุดประลัย | แรงดึงที่จุดคลาก |
| 52 | | Grade | dia | sq.mm | kg | kg |
| 53 | เลือกใช้ | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| 54 | | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| 55 | | 270 | 15.24 | 140 | 26580 | 23930 |
| 56 | | | | | | |

เลือกเกรดของลวดเกลียวอัดแรงที่ Mat I Plat โดยเลือกใช้ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น เกรด 270 ซึ่งมีคุณสมบัติตามรูปด้านบน

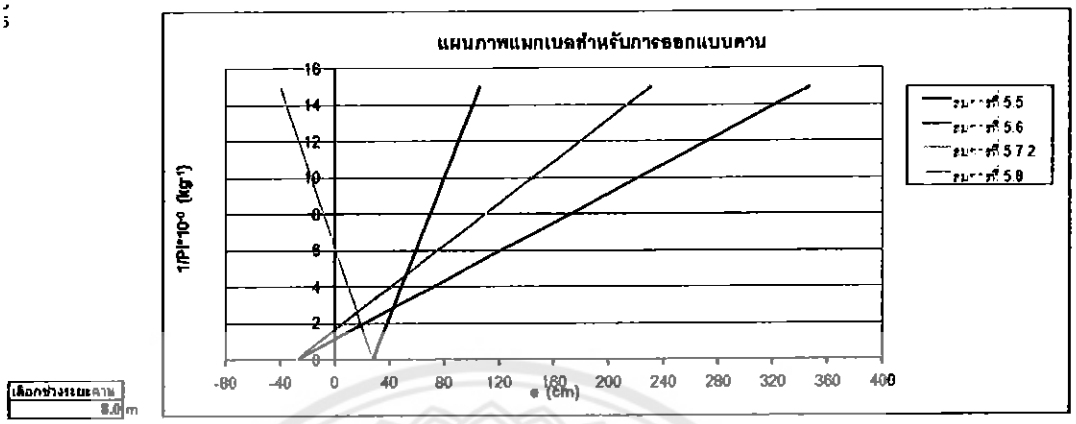
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | **Design I-Girder Plat** | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | ช่วงความยาวคาน I-Girder | | | | | | = | 16 m | | | |
| 5 | | Properties I-Girder | | | | | | | | | | |
| 6 | | | กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, fc | | | | | = | 350 ksc | | | |
| 7 | | | กำลังอัดคอนกรีตขณะดึงลวด, fci = 0.8*fc | | | | | = | 280 ksc | | | |
| 8 | | | ความสูงของคาน, H | | | | | = | 1.20 m | | | |
| 9 | | | x-Area of I-Girder, Ax | | | | | = | 0.455 sq m | | | |
| 10 | | | Ycg ของหน้าตัดจากขอบล่างคาน | | | | | = | 0.60 m | | | |
| 11 | | | Moment of Inertia, Ix | | | | | = | 0.076 m^4 | | | |
| 12 | | | section modulus | Sb | | | | = | 0.128 m^3 | | | |
| 13 | | | | St | | | | = | 0.126 m^3 | | | |
| 14 | | | self weight, DLgirder | | | | | = | 1092 kg/m | | | |
| 15 | | Unit weight | | | | | | | | | | |
| 16 | | | concrete, wc | | | | | = | 2400 kg/cu m | | | |
| 17 | | | steel, ws | | | | | = | 7850 kg/cu m | | | |
| 18 | | Live load, LL | | | | | | = | 500 kg/sq m | | | |
| 19 | | ความหนาของพื้น | | | | | | = | 0.25 m | | | |
| 20 | | | slab weight | | | | | = | 600 kg/sq m | | | |
| 21 | | | คอนกรีตทับหน้า | | 5 cm | | | = | 120 kg/sq m | | | |
| 22 | | | Finishing | | 5 cm | | | = | 120 kg/sq m | | | |
| 23 | | | | รวมน้ำหนัก slab+คอนกรีตทับหน้า, SB | | | | = | 840 kg/sq m | | | |
| 24 | | | น้ำหนักบรรทุกที่พื้นจะต้องรับ, TL=SB+LL | | | | | = | 1340 kg/sq m | | | |
| 25 | | หาน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงคาน | | | | | | | | | | |
| 26 | | | ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder | | ด้านซ้าย | | | = | 4.00 m | | ช่วงใน x 0.5 | |
| 27 | | | | | ด้านขวา | | | = | 2.00 m | | ช่วงใน x 0.5 | |
| 28 | | | | | รวม | | | = | 3.00 m | | | |

กรอกค่าช่วงความยาวคาน I-Girder, กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, $f'_c$, Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel, Live Load, ความหนาของพื้น, ความหนาของคอนกรีตทับหน้า, ความหนาของ Finishing, ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder ด้านซ้าย, ด้านขวา ใน cal I-Girder-Plat

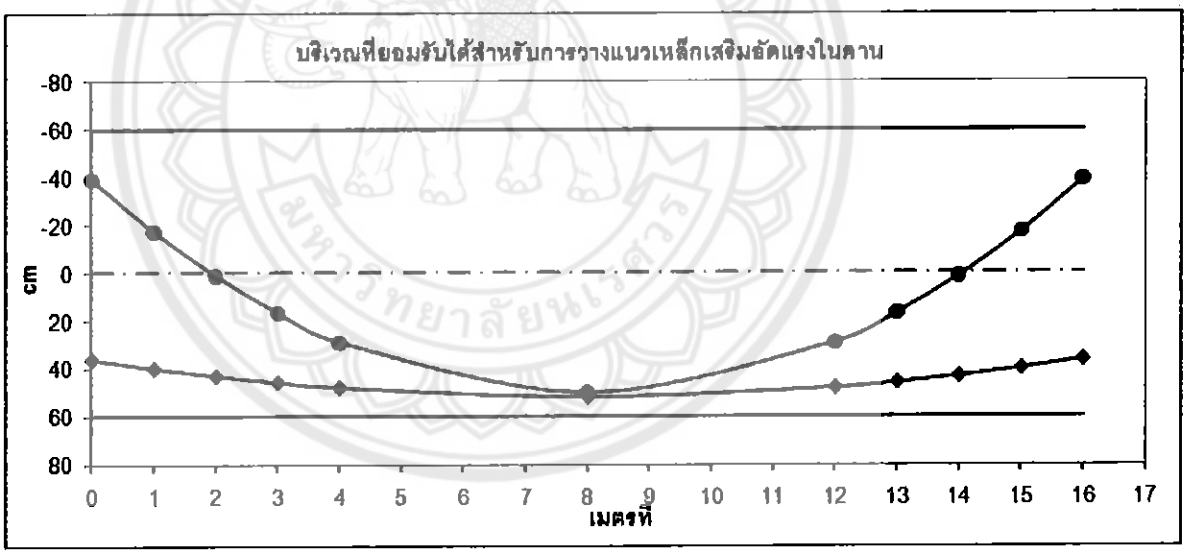
| ตำแหน่งต่างๆของ I-Girder | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 8 | | | | | |
| 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |

กรอก %Loss ณ ตำแหน่งต่างๆของคาน

หลังจากการกรอกค่าทั้งหมด Worksheet จะคำนวณได้กราฟแมกเนลและกราฟแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่ยอมรับได้




แผนภาพแมกเนลสำหรับการออกแบบคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน
(ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกดูกราฟได้ทุกช่วงของคาน)




แผนภาพแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่ยอมรับได้

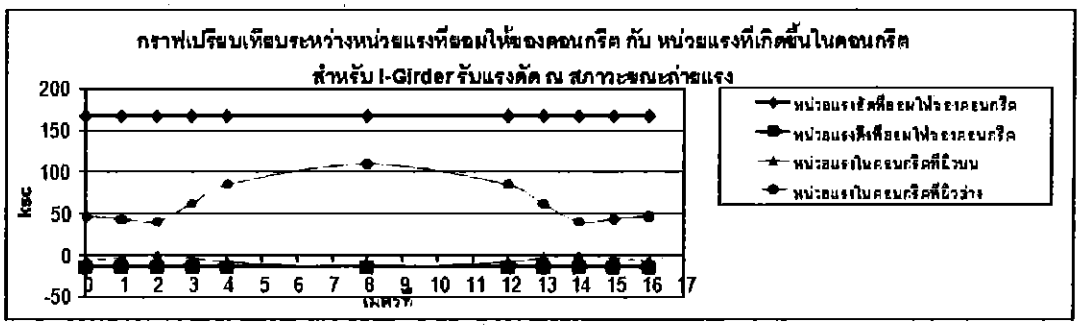
| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 8 | | | | | |
| | 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| | 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| | 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| | 0.000 | 20650.253 | 38494.899 | 53545.292 | 65812.736 | 86343.747 | 65812.736 | 53545.292 | 38494.899 | 20650.253 | 0.000 |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 4.04 | -574.95 | 88.31 | 65.42 | 58.38 | 52.37 | 58.38 | 65.42 | 88.31 | -574.95 | 4.04 |
| | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 | 54.03 |
| | -39.03 | -17.27 | 1.26 | 16.70 | 29.11 | 50.15 | 29.11 | 16.70 | 1.26 | -17.27 | -39.03 |
| | 36.12 | 39.82 | 43.03 | 45.70 | 47.85 | 51.70 | 47.85 | 45.70 | 43.03 | 39.82 | 36.12 |
| | 36.12 | 39.82 | 43.03 | 45.70 | 47.85 | 51.70 | 47.85 | 45.70 | 43.03 | 39.82 | 36.12 |
| | 36.12 | 39.82 | 43.03 | 45.70 | 47.85 | 51.70 | 47.85 | 45.70 | 43.03 | 39.82 | 36.12 |
| | -35599.3506 | 33782.8228 | 88072.67386 | 130402.257 | 162910.7672 | 216274.166 | 162910.767 | 130402.257 | 88072.6739 | 33782.8228 | -35599.351 |
| | -39999.27 | 37636.47 | 97317.87 | 143299.18 | 178044.55 | 235080.62 | 178044.55 | 143299.18 | 97317.87 | 37636.47 | -39999.27 |
| | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 |
| | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 |
| | -3 | 3 | 7 | 10 | 12 | 16 | 12 | 10 | 7 | 3 | -3 |
| | 7 | 7 | 7 | 10 | 13 | 16 | 13 | 10 | 7 | 7 | 7 |
| | 104888 | 104888 | 104888 | 149840 | 194792 | 239744 | 194792 | 149840 | 104888 | 104888 | 104888 |
| | 93350.32 | 94399.2 | 94923.64 | 136354.4 | 178234.68 | 220564.48 | 178234.68 | 136354.4 | 94923.64 | 94399.2 | 93350.32 |
| | 76547.26 | 77596.14 | 78122.16 | 112356.03 | 147043.61 | 184612.47 | 147043.61 | 112356.03 | 78122.16 | 77596.14 | 76547.26 |

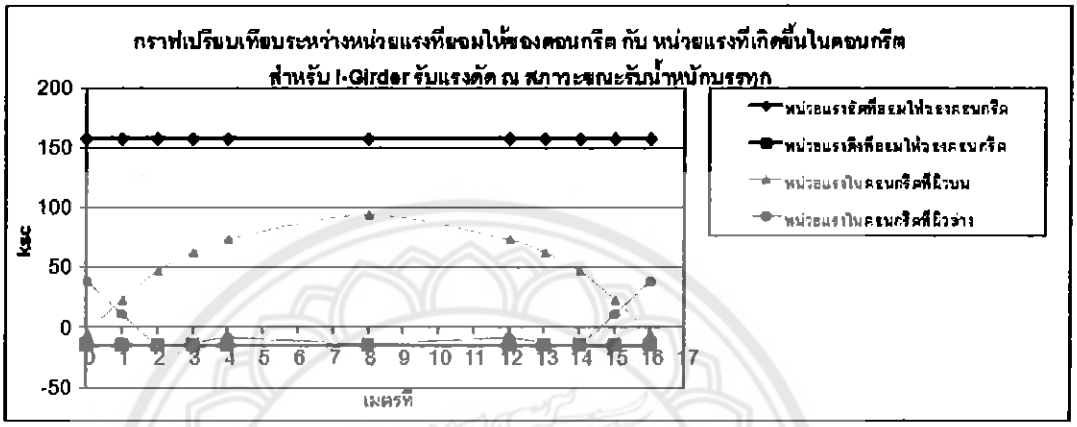
จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่า section modulus ของหน้าตัดคานนั้นมากกว่า section modulus ขั้นต่ำ $(Z_b)_{min}$ ซึ่งเท่ากับ 86343.747 $cm^3$ ในขณะที่หน้าตัดจริงของคานมี section modulus เท่ากับ 127842.583 $cm^3$ จึง OK!

ทำการเลือกค่า e ในแต่ละช่วงของคาน โดยข้อนี้จะเลือกค่า e ของแนวการวางลวดที่ยอมรับได้ในขอบเขตล่าง และทำการเลือกจำนวนลวดเกลียวอัดแรงในแต่ละช่วงของคาน โดยช่วงเมตรที่ 0-2 และเมตรที่ 14-16 จะกำหนดให้ใส่ลวดจำนวน 7 เส้น ส่วนที่ตำแหน่งอื่นใส่ตามจำนวนน้อยที่สุดที่คำนวณได้

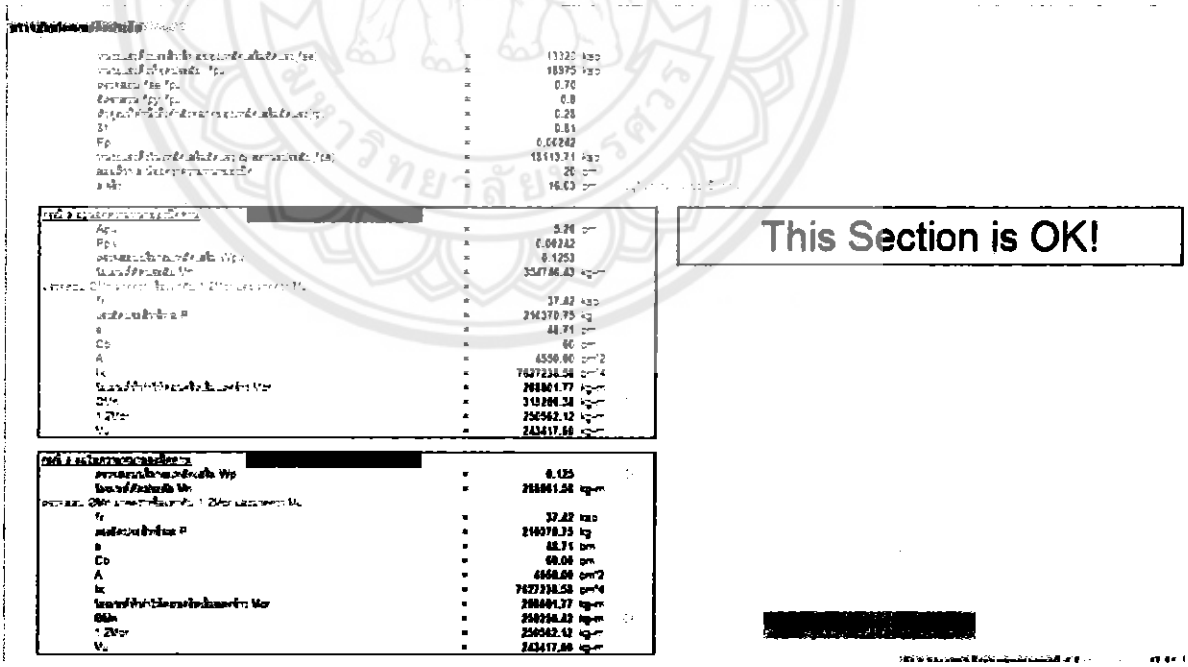
| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 |
| | | | | | | 168.0 | | | | | |
| | | | | | | -13.39 | | | | | |
| | | | | | | -13.39 | | | | | |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | | | | | | 110.34 | | | | | |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 | 157.5 |
| | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 | -14.97 |
| | -4.80 | 22.87 | 46.86 | 62.50 | 73.25 | 93.87 | 73.25 | 62.50 | 46.86 | 22.87 | -4.80 |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 38.45 | 11.24 | -12.52 | -13.11 | -8.62 | -12.73 | -8.62 | -13.11 | -12.52 | 11.24 | 38.45 |
| | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 |
| | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 |
| | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 |
| | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 |

จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่าหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะถ่ายแรงไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ และหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะใช้งานไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ จึง OK!




**กราฟหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ณ สภาวะขณะถ่ายแรงและ ณ สภาวะขณะรับน้ำหนักบรรทุก ไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้**

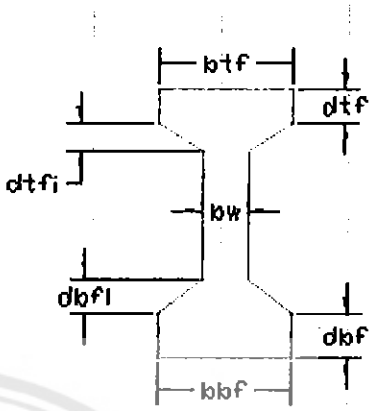



จากการคำนวณของ worksheet ในส่วนของการตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัยจะพบว่าค่า a อยู่ในความหนาของปีกคาน ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากับ 0.125 ซึ่งน้อยกว่า $0.36\beta_1$ และค่า $\phi M_n$ = 259255.425 kg-m, ค่า 1.2 $M_{cr}$ =250562.12 kg-m และ $M_u$ = 243417.60 kg-m ทำให้ค่า $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ และ ค่า $\phi M_n > M_u$ จึง OK!

**สรุปผลการคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I เพื่อรับโมเมนต์ดัด**

- ใช้หน้าตัด (หน่วยเมตร)

| Section Properties | | |
|---|---|---|
| I-Girder | btf | 0.600 |
| | dtf | 0.200 |
| | dtfi | 0.125 |
| | dbfi | 0.150 |
| | dbf | 0.200 |
| | bbf | 0.600 |
| | H | 1.200 |
| | bw | 0.200 |




- ลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้เกรด 270 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. **จำนวนลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆดังนี้**

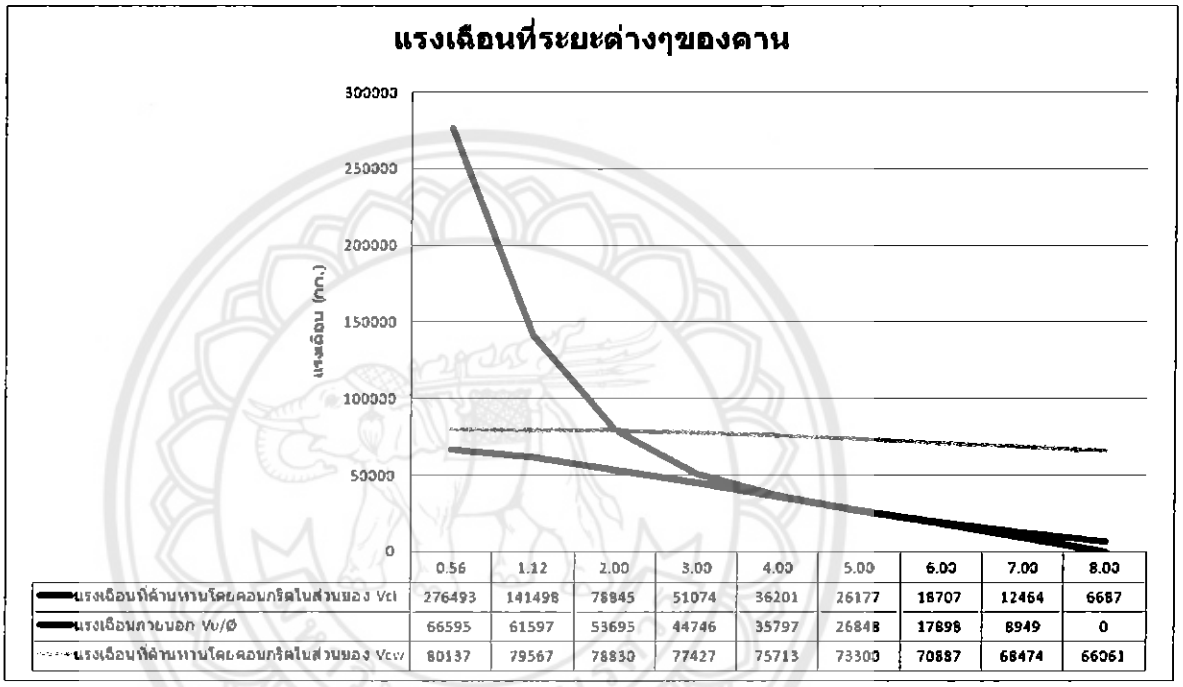
| เมตรที่ | จำนวนลวดเกลียวอัดแรง(เส้น) | เลือกค่า $e$ (ซม.) |
|---|---|---|
| 0 | 7 | 36.12 |
| 1 | 7 | 39.82 |
| 2 | 7 | 43.03 |
| 3 | 10 | 45.70 |
| 4 | 13 | 47.85 |
| 8 | 16 | 51.70 |
| 12 | 13 | 47.85 |
| 13 | 10 | 45.70 |
| 14 | 7 | 43.03 |
| 15 | 7 | 39.82 |
| 16 | 7 | 36.12 |

### 4.2.2 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว I เพื่อรับแรงเฉือน

[redacted]

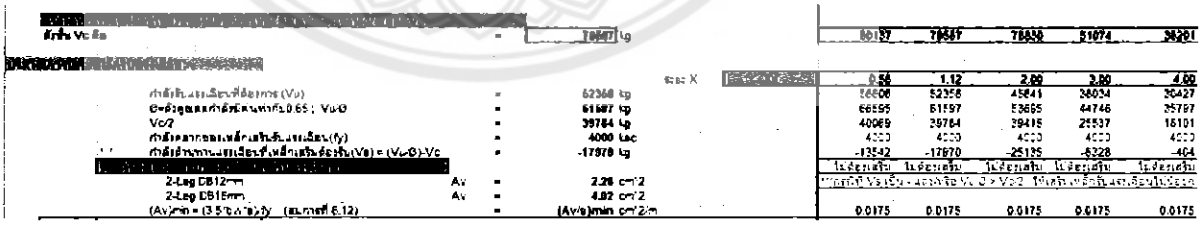
| | | |
|---|---|---|
| กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ (Vu) | = | 52358 kg |
| Ø=ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ0.85 ; Vu/Ø | = | 61597 kg |
| Vc/2 | = | 39784 kg |
| กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน(fy) | = | 4000 ksc |

กรอกค่ากำลังคลากของเหล็กเสริม($f_y$) = 4,000 กก./ตร.ซม.




| | 0.56 | 1.12 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตในส่วนของ Vci | 276493 | 141498 | 78845 | 51074 | 36201 | 26177 | 18707 | 12464 | 6687 |
| แรงเฉือนภายนอก Vu/Ø | 66595 | 61597 | 53695 | 44746 | 35797 | 26848 | 17898 | 8949 | 0 |
| แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตในส่วนของ Vcw | 80137 | 79567 | 78830 | 77427 | 75713 | 73303 | 70887 | 68474 | 66061 |

กราฟแสดงแรงเฉือนที่ระยะต่างๆของคานคอนกรีตอัดแรง




จากการคำนวณของ *Worksheet* จะพบว่าค่า $V_c > \frac{V_u}{\phi}$ ทุกช่วงความยาวคานจึงส่งผลให้ $V_s$ มีค่าเป็น –*Worksheet* จึงแสดงผลให้ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทุกช่วงความยาว แต่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ไม่ต่ำกว่าสมการ *(Av)min = (3.5*bw*s)/fy* (สมการที่ 6.12)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2-Leg DB12mm | | Av | = | 2.26 cm^2 | | |
| | 2-Leg DB16mm | | Av | = | 4.02 cm^2 | | |
| | (Av/s)min = (3.5*bw/s*)/fy (สมการที่ 6.12) | | | = | (Av/s)min cm^2/m | 0.0175 | 0.0175 | 0.0175 |
| การเลือก | Spacing for DB12mm | | | | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 | s = (Av*fy*dp)/Vs | | = | 50.22 cm | -65.40 | -50.22 | -37.06 |
| | จากสมการที่ 6.12 | s = (Av*fy)/(3.5*bw) | | = | 129.14 cm | 129.14 | 129.14 | 129.14 |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ | s <=(3/4)*h | | = | 90 cm | | | |
| | | s <=60 | | = | 60 cm | | | |
| | | USE DB12mm | | @ | 30 cm | | | |
| | OR | | | | | | | |
| การเลือก | Spacing for DB16mm | | | | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 | s = (Av*fy*dp)/Vs | | = | 89.32 cm | -116.33 | -89.32 | -65.91 |
| | จากสมการที่ 6.12 | s = (Av*fy)/(3.5*bw) | | = | 229.71 cm | 229.71 | 229.71 | 229.71 |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ | s <=(3/4)*h | | = | 90 cm | | | |
| | | s <=60 | | = | 60 cm | | | |
| | | USE DB16mm | | @ | 30 cm | | | |

จากการคำนวณของ Worksheet เพื่อหาระยะเรียง (Spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จากทั้งสมการที่ *6.9* และสมการที่ *6.12* จะพบว่าค่า $S$ ของสมการที่ *6.9* เป็น – จึงไม่ใช้ในการคำนวณ และค่า $S$ ของสมการที่ *6.12* ได้ค่า $S = 129.14$ ซม. (กรณีเหล็ก DB12mm)ซึ่งมีค่ามากกว่าข้อกำหนดการออกแบบคือ $S \le \frac{3}{4}h = 90cm$ และ $S \le 60cm$

<u>สรุปผล</u><u>การคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I เพื่อรับแรงเฉือน</u>

-ใช้เหล็ก <u>DB12mm@30cm</u>

### 4.2.3 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว I

| | | | |
|---|---|---|---|
| Design Bracket/Corbel/Dapped-End Reinforcement | | | |
| Ø=ตัวคูณลดกำลังมีค่าแน่ากับ | = | 0.85 | |
| shear span (a) | = | 50 cm | |
| effective depth of the dap to center of reinforcement (d) | = | 50 cm | |
| depth of member above the dap (h) | = | 55 cm | |
| กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ(Vu) | = | 56606 kg | |
| horizontal axial tension (Nu) | = | 11321 kg | |
| Flexure and Axial Tension Reinforcement (As) | = | [illegible] | |
| Direct Shear Reinforcement: | | | |
| λ | = | 1 | |
| μ (See Table 4.3.1) | = | 1.4λ | |
| μe (See Table 4.3.1) | = | 3.4 | |
| Tension reinforcement (As) | = | 6.59 cm^2 | < |
| Direct tension reinforcement (An) | = | 3.33 cm^2 | |
| Horizontal reinforcement (Ah) | = | [illegible] | |

กรอกค่า $\phi$, shear span (a), effective depth of the dap to center of reinforcement(d), depth of member above the dap(h), $\lambda$, $\mu_e$

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | | 18 เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | | 11 เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | | 7 เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | | 5 เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | | 4 เส้น |
| As เลือก | | USE | 5 DB25mm |

Table 4.3.1 Shear-

| Crack interfac |
|---|
| 1. Concrete to conc monolithically |
| 2. Concrete to hard with roughened s |
| 3. Concrete to conc |
| 4. Concrete to steel |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | For DB12mm | ใช้ 8 เส้น |
| | | For DB16mm | ใช้ 5 เส้น |
| | 20.31 cm^2 | For DB20mm | ใช้ 3 เส้น |
| As ใช้ = | 20.31 cm^2 | For DB25mm | ใช้ 2 เส้น |
| | | For DB28mm | ใช้ 2 เส้น |
| | | Ah เลือก | USE 2 DB25mm |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | | 15 เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | | 9 เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | | 6 เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | | 4 เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | | 3 เส้น |
| A'sh เลือก | | USE | 6 DB20mm |

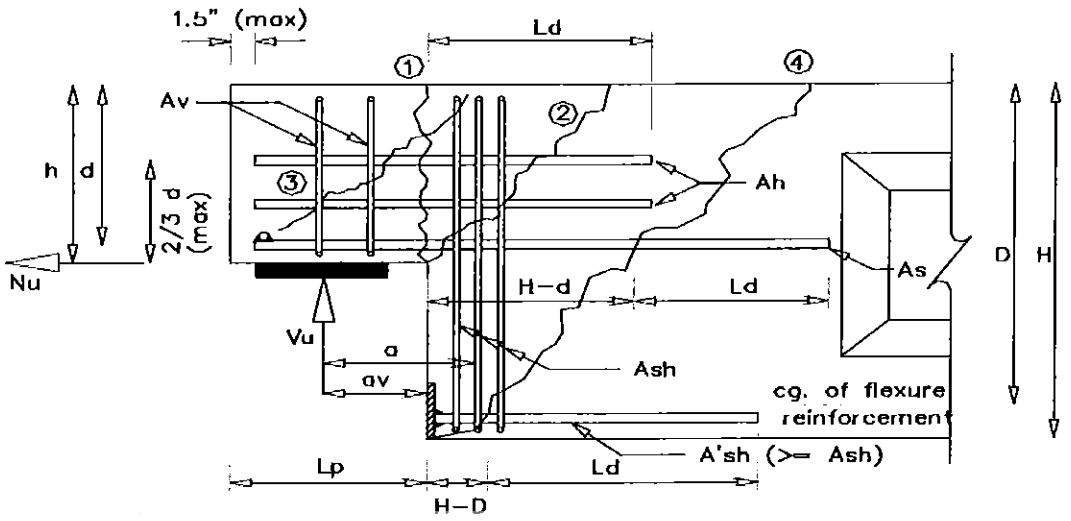
| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | | 8 stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | | 5 stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | | 3 stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | | 2 stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | | 2 stirrups |
| Ash เลือก | | USE DB16mm | 5 stirrups |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | | 4 stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | | 3 stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | | 2 stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | | 1 stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | | 1 stirrups |
| Av เลือก | | USE DB16mm | 3 stirrups |

ผลการคำนวณของ Worksheet ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน

| Development Length | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | α | | | = | 1 |
| | β | | | = | 1 |
| | λ | | | = | 1 |
| For | As,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 3.21 m. |
| For | Ah,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 3.21 m. |
| For | A'sh,DB | 20 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.57 m. |

ผลการคำนวณระยะฝัง (Development Length)




**สรุปผล**การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว I

**As** เลือก 5 DB25mm ระยะฝัง 3.21 m

**Ah** เลือก 2 DB25mm ระยะฝัง 3.21 m

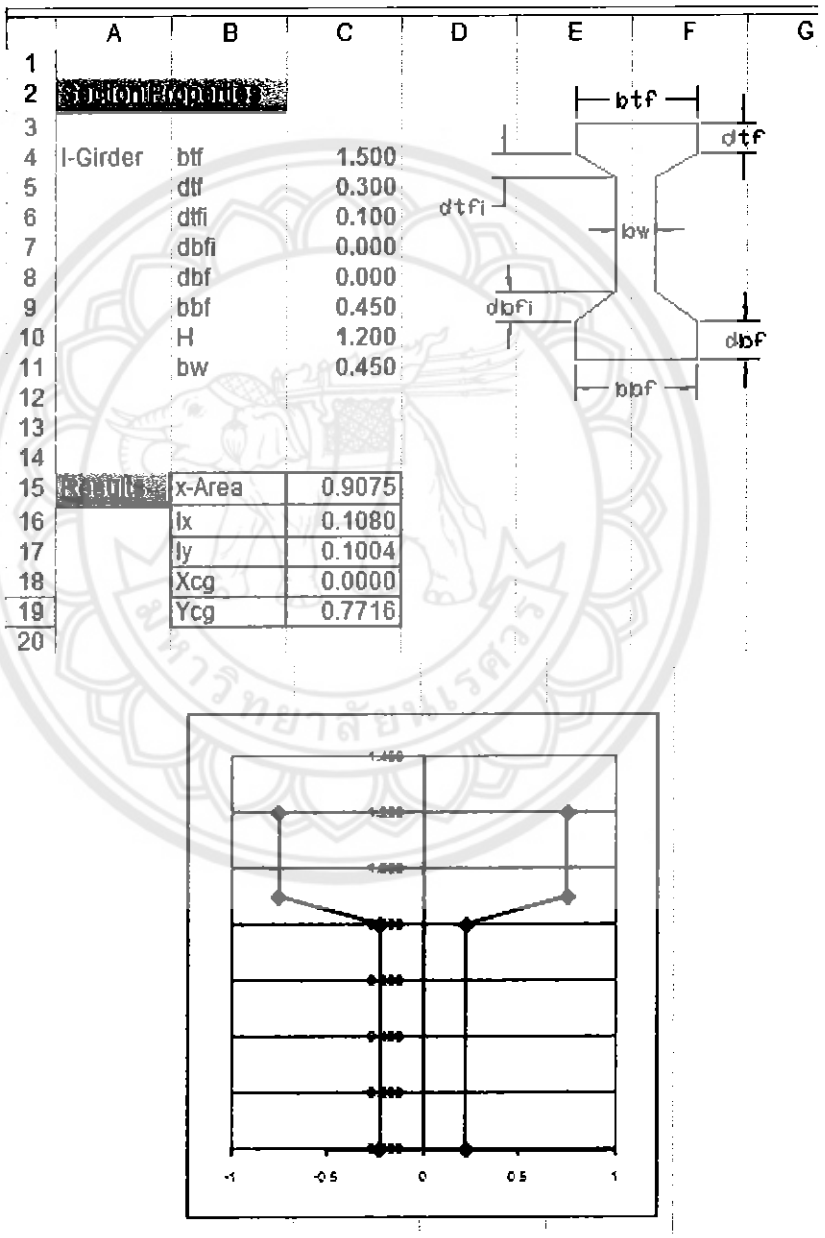
**A'sh** เลือก 6 DB20mm ระยะฝัง 2.57 m

**Ash** เลือก DB16mm-5 stirrups

**Av** เลือก DB16mm-3 stirrups

<u>โจทย์ข้อที่ 2</u> จงออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว T ชนิดดึงเหล็กทีหลังที่เป็นระบบที่มีการยึดเหนี่ยวช่วงเดียวที่มีความยาวช่วง 15 เมตร เพื่อรับน้ำหนักพื้นทีมีความหนา 0.20 เมตร โดยช่วงพื้นที่ถ่ายลงคานด้านซ้ายเท่ากับ 3 เมตร ด้านขวาเท่ากับ 2 เมตร และรับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 300 กก./ตร.ม. กำลังประลัยของคอนกรีตที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 500 กก./ตร.ซม. กำหนดเหล็กเส้นธรรมดาเพื่อรับแรงเฉือนและเสริมที่จุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานมีกำลังคลากเท่ากับ 4,000 กก./ตร.ซม.

**4.2.4 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว T เพื่อรับโมเมนต์ดัด**




กำหนดขนาดหน้าตัดคานที่ I-Prop-Plat โดยต้องกรอกค่า dbfi , dbf ให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าอื่นกรอกตามปกติจะได้คานหน้าตัดรูปตัว T ที่มีบ่า

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 270 | 12.70 (1/2) | 98.71 (0.153) | 18,730 (41,300) | 16,850 (37,170) |
| | 15.24 (0.6) | 140.00 (0.217) | 26,580 (58,600) | 23,930 (52,740) |

| | Grade | dia | พื้นที่หน้าตัด sq.mm | แรงดึงที่จุดประลัย kg | แรงดึงที่จุดคลาก kg |
|---|---|---|---|---|---|
| เลือกใช้ | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| | 270 | 15.24 | 140 | 26580 | 23930 |

เลือกเกรดของลวดเกลียวอัดแรงที่ Mat I Plat โดยเลือกใช้ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น เกรด 270 ซึ่งมีคุณสมบัติตามรูปด้านบน

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | DE | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | ช่วงความยาวคาน I-Girder | | | | | | = | 15 | m |
| 5 | | Properties I-Girder | | | | | | | | |
| 6 | | | กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, fc | | | | | = | 500 | ksc |
| 7 | | | กำลังอัดคอนกรีตขณะดึงลวด, fci = 0.8*fc | | | | | = | 400 | ksc |
| 8 | | | ความสูงของคาน, H | | | | | = | 1.20 | m |
| 9 | | | x-Area of I-Girder, Ax | | | | | = | 0.908 | sq.m |
| 10 | | | Ycg ของหน้าตัดจากขอบล่างคาน | | | | | = | 0.77 | m |
| 11 | | | Moment of Inertia, Ix | | | | | = | 0.108 | m^4 |
| 12 | | | section modulus Sb | | | | | = | 0.140 | m^3 |
| 13 | | | St | | | | | = | 0.252 | m^3 |
| 14 | | | self weight, DLgirder | | | | | = | 2178 | kg/m |
| 15 | | Unit weight | | | | | | | | |
| 16 | | | concrete, wc | | | | | = | 2400 | kg/cu.m |
| 17 | | | steel, ws | | | | | = | 7850 | kg/cu.m |
| 18 | | Live load, LL | | | | | | = | 300 | kg/sq.m |
| 19 | | ความหนาของพื้น | | | | | | = | 0.2 | m |
| 20 | | | slab weight | | | | | = | 480 | kg/sq.m |
| 21 | | | คอนกรีตทับหน้า | | 5 cm | | | = | 120 | kg/sq.m |
| 22 | | | Finishing | | 5 cm | | | = | 120 | kg/sq.m |
| 23 | | | | รวมน้ำหนัก slab+คอนกรีตทับหน้า, SB | | | | = | 720 | kg/sq.m |
| 24 | | | น้ำหนักบรรทุกที่พื้นจะต้องรับ, TL=SB+LL | | | | | = | 1020 | kg/sq.m |
| 25 | | หาน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงคาน | | | | | | | | |
| 26 | | | ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder | | | ด้านซ้าย | | = | 3.00 | m |
| 27 | | | | | | ด้านขวา | | = | 2.00 | m |
| 28 | | | | | | รวม | | = | 2.50 | m |

กรอกค่าช่วงความยาวคาน I-Girder, กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, $f'_c$, Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel, Live Load, ความหนาของพื้น, ความหนาของคอนกรีตทับหน้า, ความหนาของ Finishing, ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder ด้านซ้าย, ด้านขวา ใน cal I-Girder-Plat

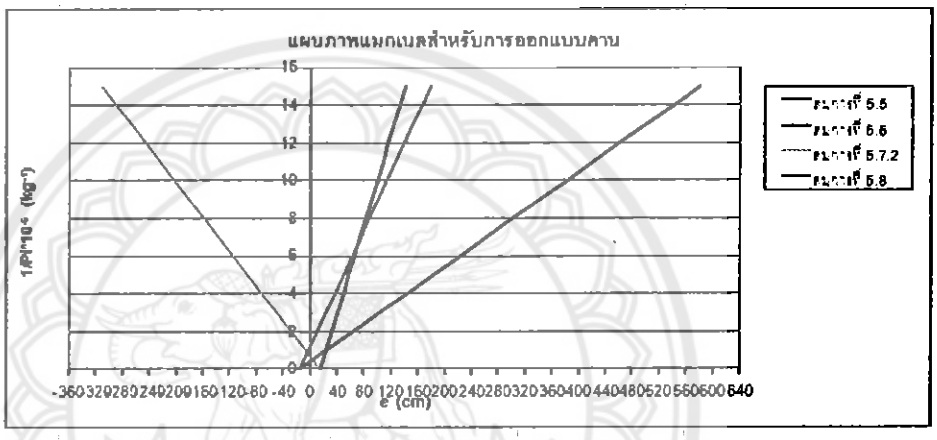
ค่าแรงประลัย ณ ตำแหน่งต่างๆของ I-Girder

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 7.5 | | | | | |
| 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| 0.000 | 9557.061 | 17715.907 | 24484.239 | 29869.719 | 37347.014 | 29869.719 | 24484.239 | 17715.907 | 9557.061 | 0.000 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 2.22 | -26.03 | -202.42 | 202.11 | 105.55 | 72.35 | 105.55 | 202.11 | -202.42 | -26.03 | 2.22 |

I-Girder-Plat / I-Prop-Plat / Mate Plat

กรอก %Loss ณ ตำแหน่งต่างๆของคาน

หลังจากการกรอกค่าทั้งหมด Worksheet จะคำนวณได้กราฟแมกเนลและแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่ยอมรับได้




เลือกช่วงของคาน 7.5

แผนภาพแมกเนลสำหรับการออกแบบคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน

(ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกดูกราฟได้ทุกช่วงของคาน)

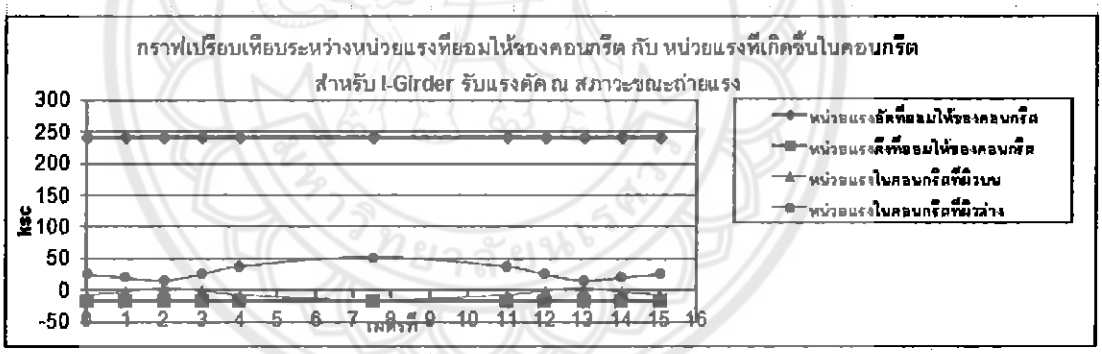
| ค่าแม่วยแรง ณ ตำแหน่งต่างๆของ I-Girder | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 7.5 | | | | | |
| 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| 0.000 | 9557.061 | 17715.907 | 24484.239 | 28869.719 | 37347.014 | 28869.719 | 24484.239 | 17715.907 | 9557.061 | 0.000 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 2.22 | -26.03 | -202.42 | 202.11 | 105.55 | 72.35 | 105.55 | 202.11 | -202.42 | -26.03 | 2.22 |
| 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 | 71.53 |
| -34.49 | -9.38 | 11.78 | 29.12 | 42.76 | 52.54 | 42.76 | 29.12 | 11.78 | -9.38 | -34.49 |
| 29.41 | 38.68 | 46.58 | 53.06 | 58.15 | 65.99 | 58.15 | 53.06 | 46.58 | 38.68 | 29.41 |
| 29.41 | 38.68 | 46.58 | 53.06 | 58.15 | 65.99 | 58.15 | 53.06 | 46.58 | 38.68 | 29.41 |
| 29.41 | 38.68 | 46.58 | 53.06 | 58.15 | 65.99 | 58.15 | 53.06 | 46.58 | 38.68 | 29.41 |
| -66710.843 | 17807.174 | 70202.8624 | 104796.9 | 128258.1908 | 158419.6 | 128258.2 | 104796.9 | 70202.86 | 17807.17 | -66710.84 |
| -74956.00 | 19785.75 | 77572.22 | 115161.46 | 140172.89 | 172185.24 | 140172.89 | 115161.46 | 77572.22 | 19785.75 | -74956.00 |
| 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 |
| 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 |
| -6 | 2 | 6 | 8 | 10 | 12 | 10 | 8 | 6 | 2 | -6 |
| 6 | 6 | 6 | 8 | 10 | 12 | 10 | 8 | 6 | 6 | 6 |
| 89904 | 89904 | 89904 | 119872 | 149840 | 179808 | 149840 | 119872 | 89904 | 89904 | 89904 |
| 80014.56 | 80913.6 | 81383.12 | 109083.5 | 137103.6 | 165423.4 | 137103.6 | 109083.5 | 81383.12 | 80913.6 | 80014.56 |
| 65611.94 | 65510.98 | 65961.85 | 89884.82 | 113110.47 | 138459.35 | 113110.47 | 89884.82 | 65961.85 | 65510.98 | 65611.94 |

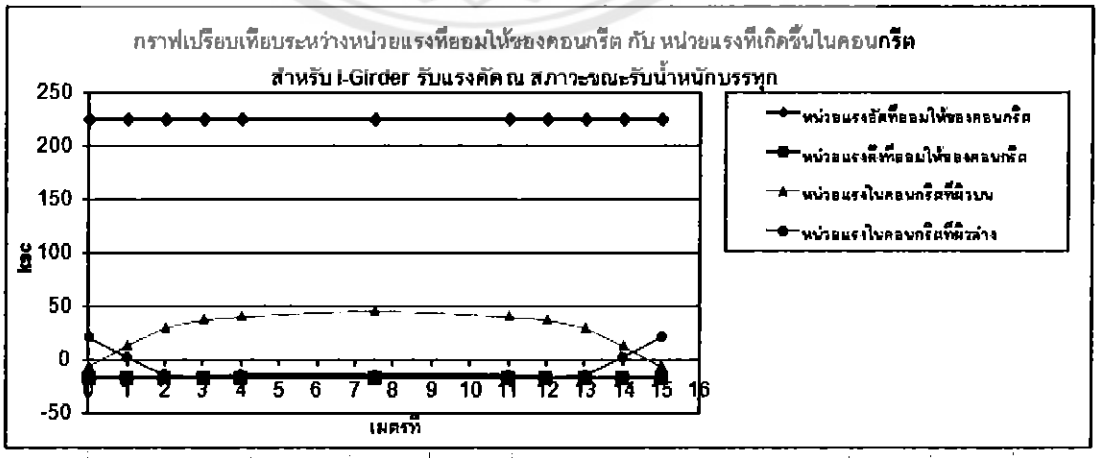
จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่า section modulus ของหน้าตัดคานนั้นมากกว่า section modulus ขั้นต่ำ $(Z_b)_{min}$ ซึ่งเท่ากับ 37347.014 $cm^3$ ในขณะที่หน้าตัดจริงของคานมี section modulus เท่ากับ 139940.79$cm^3$ จึง OK!

ทำการเลือกค่า e ในแต่ละช่วงของคาน โดยข้อนี้จะเลือกค่า e ของแนวการวางลวดที่ยอมรับได้ในขอบเขตล่าง และทำการเลือกจำนวนลวดเกลียวอัดแรงในแต่ละช่วงของคาน โดยช่วงเมตรที่ 0-2 และเมตรที่ 13-15จะกำหนดให้ใส่ลวดจำนวน 6 เส้น ส่วนที่ตำแหน่งอื่นใส่ตามจำนวนน้อยที่สุดที่คำนวณได้

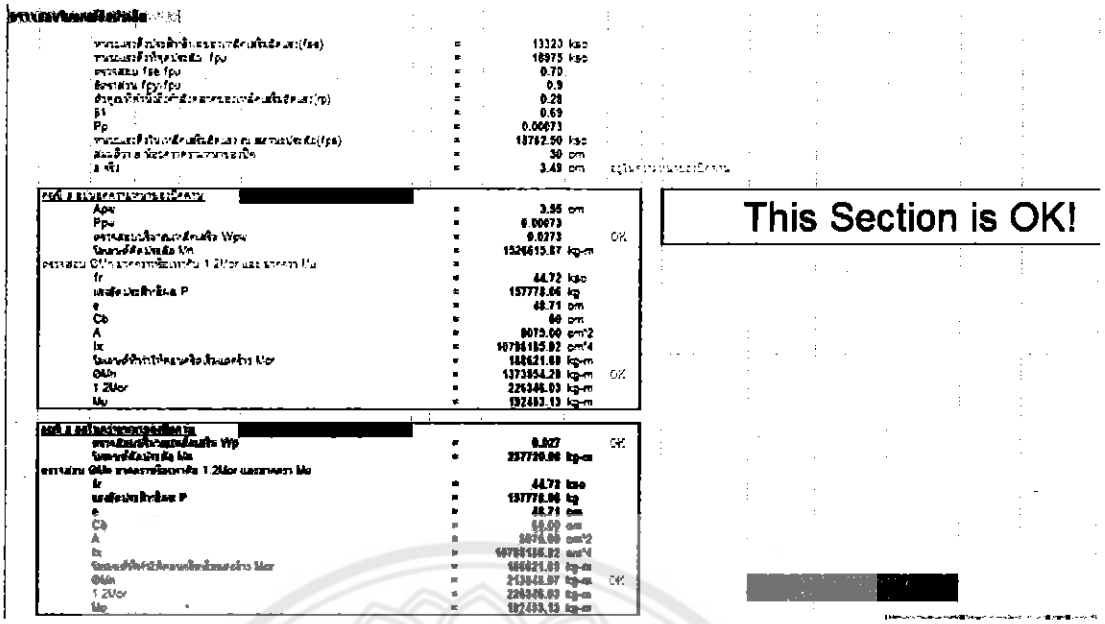
| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 |
| | | | | | 240.0 | | | | | |
| | | | | | -16.00 | | | | | |
| | | | | | -16.00 | | | | | |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| | | | | | 52.46 | | | | | |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 |
| -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 |
| -6.56 | 12.60 | 29.01 | 38.64 | 39.79 | 44.99 | 39.79 | 38.64 | 29.01 | 12.60 | -6.56 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 21.02 | 2.06 | -14.25 | -16.83 | -14.86 | -14.48 | -14.86 | -16.83 | -14.25 | 2.06 | 21.02 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 |
| 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 |
| 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 |
| 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 |

จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่าหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะถ่ายแรงไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ และหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะใช้งานไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ จึง OK!



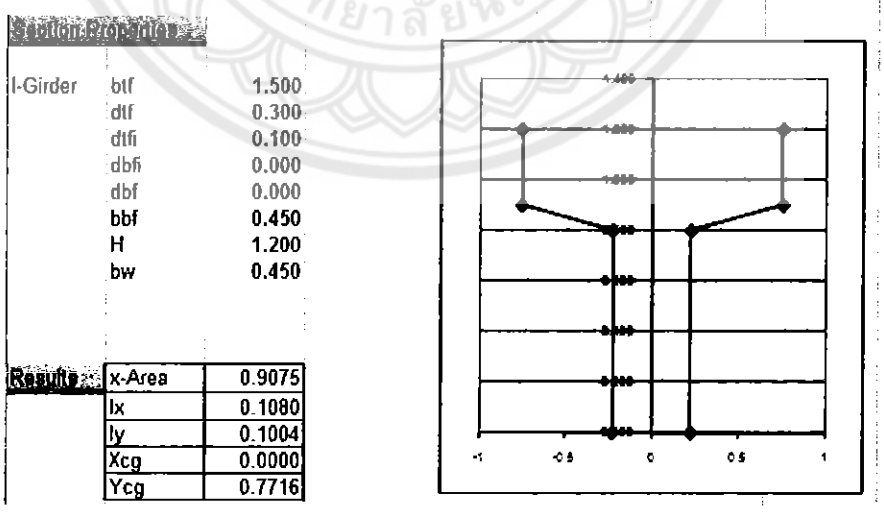

**กราฟหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ณ สภาวะขณะถ่ายแรงและ ณ สภาวะขณะรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้**




จากการคำนวณของ worksheet ในส่วนของการตรวจสอบโมเมนต์ดัดประลัยจะพบว่าค่า a อยู่ในความหนาของปีกคาน ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากับ 0.027 ซึ่งน้อยกว่า $0.36\beta_1$ และค่า $\phi M_n$ = 213948.07 kg-m, และ $M_u$ =192493.13 kg-m ทำให้ค่า $\phi M_n > M_u$ , $\phi M_n$ > Mu จึง OK!

**<u>สรุปผล</u><u>การคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว T เพื่อรับโมเมนต์ดัด</u>**

- ใช้หน้าตัด (หน่วยเมตร)




- **ลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้เกรด 270 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. จำนวนลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆดังนี้**

| เมตรที่ | จำนวนลวดเกลียวอัดแรง(เส้น) | เลือกค่า $e$ (ซม.) |
|---|---|---|
| 0 | 6 | 29.41 |
| 1 | 6 | 38.68 |
| 2 | 6 | 46.58 |
| 3 | 8 | 53.06 |
| 4 | 10 | 58.15 |
| 7.5 | 12 | 65.99 |
| 11 | 10 | 58.15 |
| 12 | 8 | 53.06 |
| 13 | 6 | 46.58 |
| 14 | 6 | 38.68 |
| 15 | 6 | 29.41 |

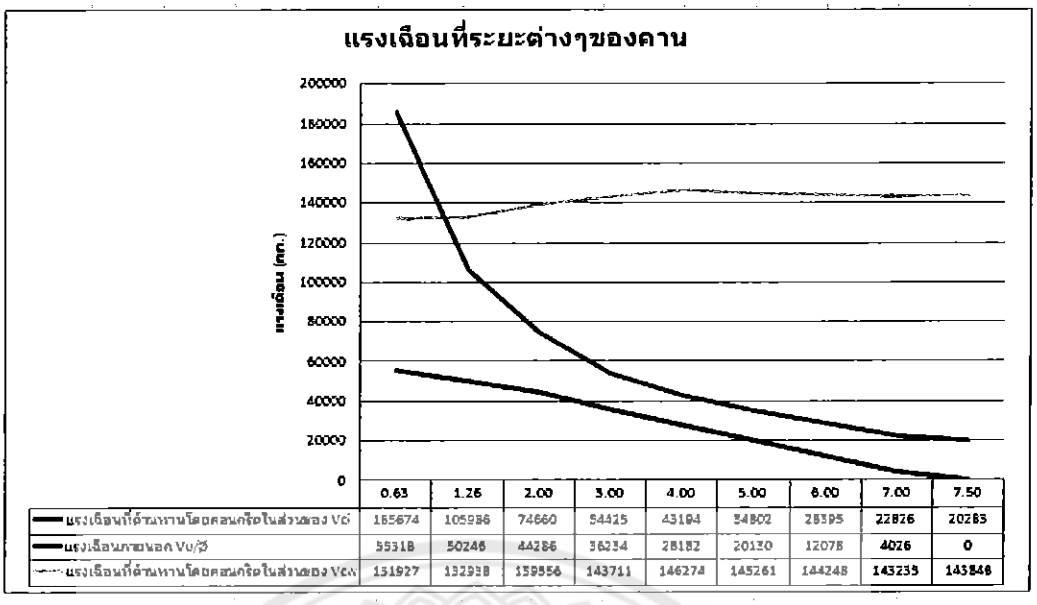
### 4.2.5 การวิเคราะห์และออกแบบคานรูปตัว T เพื่อรับแรงเฉือน

| 0.63 | 1.26 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 6.00 | 6.00 | 7.00 | 7.50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.105 | 0.203 | 0.305 | 0.422 | 0.516 | 0.587 | 0.633 | 0.657 | 0.660 |
| 0.161 | 0.146 | 0.128 | 0.108 | 0.082 | 0.059 | 0.035 | 0.012 | 0.000 |
| 1.518 | 0.721 | 0.423 | 0.250 | 0.159 | 0.100 | 0.056 | 0.018 | 0.000 |
| 138459 | 138459 | 138459 | 138459 | 138459 | 138459 | 138459 | 138459 | 138459 |
| 14963 | 13591 | 11979 | 9801 | 7623 | 5445 | 3267 | 1089 | 0 |
| 94.0 | 98.7 | 106.6 | 113.1 | 118.2 | 120.1 | 122.1 | 124.0 | 126.0 |
| 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 | 96.0 |
| 96.0 | 98.7 | 106.6 | 113.1 | 118.2 | 120.1 | 122.1 | 124.0 | 126.0 |
| 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 |
| 44.36 | 53.53 | 61.34 | 67.76 | 72.80 | 74.73 | 76.67 | 78.61 | 80.54 |
| 9858 | 18851 | 28314 | 39204 | 47916 | 54450 | 58806 | 60984 | 61256 |
| 7.04 | 13.47 | 20.23 | 28.01 | 34.24 | 38.91 | 42.02 | 43.58 | 43.77 |
| 102284 | 106119 | 107598 | 105686 | 104021 | 100198 | 98553 | 98086 | 101525 |
| 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 | 15.26 |
| 22317 | 20271 | 17867 | 14618 | 11370 | 8121 | 4873 | 1624 | 0 |
| 131927 | 105985 | 74550 | 54425 | 43194 | 34802 | 28395 | 22828 | 20293 |

ผลการคำนวณจาก Worksheet จะได้ค่า Vc (*ช่องสีเหลืองล่างสุด*,kg)ที่ระยะต่างๆของช่วงคานซึ่งเป็นค่าน้อยระหว่าง Vci กับ Vcw

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ (Vu) | = | 42709 | kg |
| | Ø=ตัวคูณลดค่ากำลังมีค่าเท่ากับ0.85 ; Vu/Ø | = | 50246 | kg |
| | Vc/2 | = | 52993 | kg |
| | กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน(fy) | = | 4000 | ksc |
| *** | กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เหล็กเสริมต้องรับ(Vs) = (Vu/Ø)-Vc | = | -55740 | kg |

กรอกค่ากำลังคลากของเหล็กเสริม($f_y$) = 4,000 กก./ตร.ซม.




| | 0.63 | 1.26 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 7.50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตในส่วนของ Vc | 185674 | 105986 | 74660 | 54415 | 43194 | 34802 | 28395 | 22826 | 20283 |
| แรงเฉือนภายนอก Vu/ϕ | 55318 | 50246 | 44286 | 36234 | 28182 | 20130 | 12078 | 4026 | 0 |
| แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตในส่วนของ Vcw | 151927 | 132938 | 159956 | 143711 | 146274 | 145261 | 144248 | 143235 | 143846 |

กราฟแสดงแรงเฉือนที่ระยะต่างๆของคานคอนกรีตอัดแรง

| | 0.63 | 1.26 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 7.50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 47020 | 42709 | 37643 | 30799 | 23955 | 17111 | 10266 | 3422 | 0 |
| | 55318 | 50246 | 44286 | 36234 | 28182 | 20130 | 12078 | 4026 | 0 |
| | 65983 | 52993 | 37330 | 27213 | 21597 | 17401 | 14198 | 11413 | 10142 |
| | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| | -76609 | -55740 | -30374 | -18191 | -15012 | -14672 | -16317 | -18800 | -20283 |
| | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม |
| | กรณีที่ Vs เป็น - และกำลัง Vu/ϕ > Vc/2 ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าสมการ (Av)min = (3.5*bw*s)/fy | | | | | | | | |
| | 0.03938 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 | 0.039375 |
| | -11.33 | -16.00 | -31.72 | -56.19 | -71.15 | -74.00 | -67.83 | -59.64 | -56.15 |
| | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 | 57.40 |
| | -20.15 | -28.47 | -56.42 | -99.94 | -126.56 | -131.63 | -120.30 | -106.08 | -99.88 |
| | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 | 102.10 |

จากการคำนวณของ *Worksheet* จะพบว่าค่า $V_c > \frac{V_u}{\phi}$ ทุกช่วงความยาว**คานจึงส่งผลให้** $V_s$ **มีค่าเป็น –***Worksheet* **จึงแสดงผลให้ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทุกช่วงความยาว แต่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ไม่ต่ำกว่าสมการ** *(Av)min = (3.5*bw*s)/fy* **(สมการที่ 6.12)**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2-Leg DB12mm | Av | = | 2.26 | cm^2 |
| | 2-Leg DB16mm | Av | = | 4.02 | cm^2 |
| | (Av)min = (3.5*bw*s)/fy (สมการที่ 6.12) | | = | (Av/s)min | cm^2/m |
| กรณีเลือก | Spacing for DB12mm | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 s = (Av*fy*dp)/Vs | | = | -16.00 | cm |
| | จากสมการที่ 6.12 s = (Av*fy)/(3.5*bw) | | = | 57.40 | cm |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ s <=(3/4)*h | | = | 90 | cm |
| | s <=60 | | = | 60 | cm |
| | USE DB12mm | | @ | 30 | cm |
| | OR | | | | |
| กรณีเลือก | Spacing for DB16mm | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 s = (Av*fy*dp)/Vs | | = | -28.47 | cm |
| | จากสมการที่ 6.12 s = (Av*fy)/(3.5*bw) | | = | 102.10 | cm |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ s <=(3/4)*h | | = | 90 | cm |
| | s <=60 | | = | 60 | cm |
| | USE DB16mm | | @ | 30 | cm |

จากการคำนวณของ Worksheet เพื่อหาระยะเรียง (Spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จากทั้งสมการที่ *6.9* และสมการที่ *6.12* จะพบว่าค่า *S* ของสมการที่ *6.9* เป็น – จึงไม่ใช้ในการคำนวณ และค่า *S* ของสมการที่ *6.12* ได้ค่า *S* = 57.40 ซม.(กรณีเหล็ก DB12mm)ซึ่งมีค่าน้อยกว่าข้อกำหนดการออกแบบคือ $S \le \frac{3}{4}h = 90cm$ และ $S \le 60cm$

**สรุปผลการคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว T เพื่อรับแรงเฉือน**

-ใช้เหล็ก DB12mm@30cm

### 4.2.6 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว T

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ϕ=ค่าคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ | = | 0.85 | |
| | shear span (a) | = | 50 | cm |
| | effective depth of the dap to center of reinforcement (d) | = | 50 | cm |
| | depth of member above the dap (h) | = | 55 | cm |
| | กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ(Vu) | = | 47020 | kg |
| | horizontal axial tension (Nu) | = | 9404 | kg |
| | Flexure and Axial Tension Reinforcement (As) | = | | |
| | λ | = | 1 | |
| μ | (See Table 4.3.1) | = | 1.4λ | |
| μe | (See Table 4.3.1) | = | 3.4 | |

กรอกค่า $\phi$ , shear span (a), effective depth of the dap to center of reinforcement(d), depth of member above the dap(h), $\lambda$ , $\mu_e$

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 15 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 9 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 6 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 4 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| As เลือก | USE | 4 | DB25mm |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 7 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 4 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 2 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 2 | เส้น |
| Ah เลือก | USE | 2 | DB25mm |

16.87 cm^2

As ใช้ = 16.87 cm^2

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 13 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 7 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 5 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| A'sh เลือก | USE | 5 | DB20mm |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 4 | stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| Av เลือก | USE DB16mm | 2 | stirrups |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 7 | stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | 4 | stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | 3 | stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| Ash เลือก | USE DB16mm | 4 | stirrups |

Table 4.3.1 Shear-

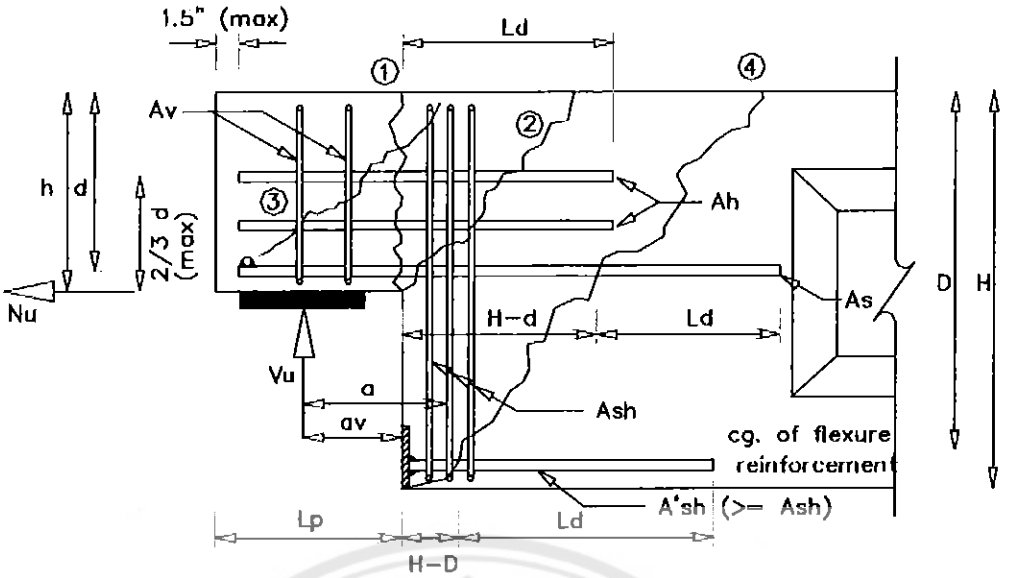
| Crack interfac |
|---|
| 1. Concrete to conc monolithically |
| 2. Concrete to hard with roughened s |
| 3. Concrete to conc |
| 4. Concrete to steel |

ผลการคำนวณของ Worksheet ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน

**Development Length**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | α | | | = | 1 |
| | β | | | = | 1 |
| | λ | | | = | 1 |
| For | As,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.68 m. |
| For | Ah,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.68 m. |
| For | A'sh,DB | 20 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.15 m. |

ผลการคำนวณระยะฝัง (Development Length)




**สรุปผล**การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานรูปตัว T

As เลือก 4 DB25mm ระยะฝัง 2.68 m

Ah เลือก 2 DB25mm ระยะฝัง 2.68 m

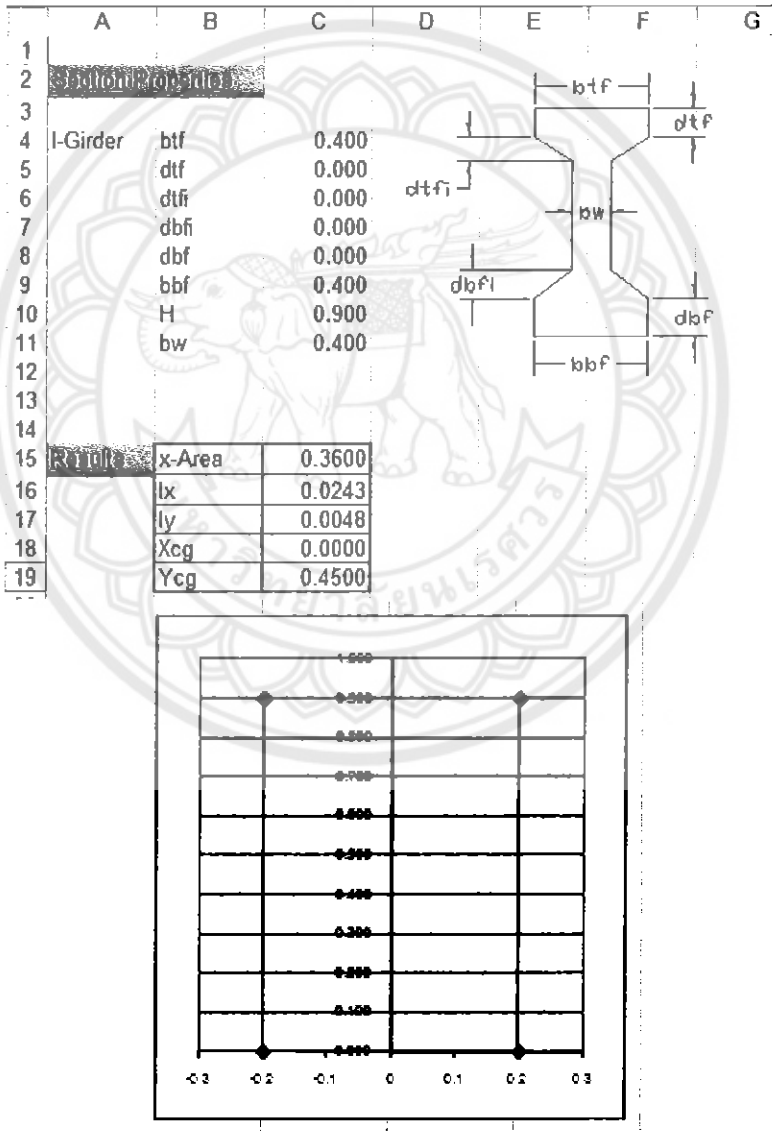
A'sh เลือก 5 DB20mm ระยะฝัง 2.15 m

Ash เลือก DB16mm-4 stirrups

Av เลือก DB16mm-2 stirrups

<u>โจทย์ข้อที่ 3</u> จงออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ชนิดดึงเหล็กทีหลังที่เป็นระบบที่มีการยึดเหนี่ยวช่วงเดียวที่มีความยาวช่วง 16 เมตร เพื่อรับน้ำหนักพื้นที่มีความหนา 0.20 เมตร โดยช่วงพื้นที่ถ่ายลงคานด้านซ้ายเท่ากับ 3 เมตร ด้านขวาเท่ากับ 2 เมตร และรับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 300 กก./ตร.ม. กำลังประลัยของคอนกรีตที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 500 กก./ตร.ซม. กำหนดเหล็กเส้นธรรมดาเพื่อรับแรงเฉือนและเสริมที่จุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานมีกำลังคลากเท่ากับ 4,000 กก./ตร.ซม.

### 4.2.7 การวิเคราะห์และออกแบบคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อรับโมเมนต์ดัด




กำหนดขนาดหน้าตัดคานที่ I-Prop-Plat โดยต้องกรอกค่า dtf ,dtfi , dbfi , dbf ให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าอื่นกรอกตามปกติจะได้คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

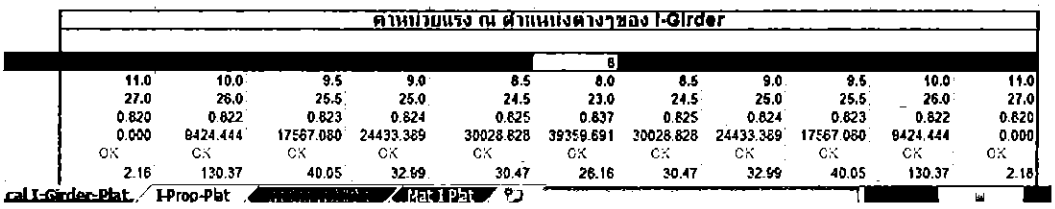
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 270 | 12.70 (1/2) | 98.71 (0.153) | 18,730 (41,300) | 16,850 (37,170) |
| | 15.24 (0.6) | 140.00 (0.217) | 26,580 (58,600) | 23,930 (52,740) |

| | Grade | dia | พื้นที่หน้าตัด sq.mm | แรงดึงที่จุดประลัย kg | แรงดึงที่จุดคลาก kg |
|---|---|---|---|---|---|
| เลือกใช้ | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| | 270 | 12.7 | 98.71 | 18730 | 16850 |
| | 270 | 15.24 | 140 | 26580 | 23930 |

เลือกเกรดของลวดเกลียวอัดแรงที่ Mat I Plat โดยเลือกใช้ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น เกรด 270 ซึ่งมีคุณสมบัติตามรูปด้านบน

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | Design I-Girder Platform | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | ช่วงความยาวคาน I-Girder | | | | | | = | 16 | m |
| 5 | | Properties I-Girder | | | | | | | | |
| 6 | | | กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, f'c | | | | | = | 500 | ksc |
| 7 | | | กำลังอัดคอนกรีตขณะดึงลวด, f'ci = 0.8*f'c | | | | | = | 400 | ksc |
| 8 | | | ความสูงของคาน, H | | | | | = | 0.90 | m |
| 9 | | | x-Area of I-Girder, Ax | | | | | = | 0.360 | sq.m |
| 10 | | | Ycg ของหน้าตัดจากขอบล่างคาน | | | | | = | 0.45 | m |
| 11 | | | Moment of inertia, Ix | | | | | = | 0.024 | m^4 |
| 12 | | | section modulus | Sb | | | | = | 0.054 | m^3 |
| 13 | | | | St | | | | = | 0.054 | m^3 |
| 14 | | | self weight, DLgirder | | | | | = | 864 | kg/m |
| 15 | | Unit weight | | | | | | | | |
| 16 | | | concrete, wc | | | | | = | 2400 | kg/cu.m |
| 17 | | | steel, ws | | | | | = | 7850 | kg/cu.m |
| 18 | | Live load, LL | | | | | | = | 300 | kg/sq.m |
| 19 | | ความหนาของพื้น | | | | | | = | 0.2 | m |
| 20 | | | slab weight | | | | | = | 480 | kg/sq.m |
| 21 | | | คอนกรีตทับหน้า | | 5 | cm | | = | 120 | kg/sq.m |
| 22 | | | Finishing | | 5 | cm | | = | 120 | kg/sq.m |
| 23 | | | | รวมน้ำหนัก slab+คอนกรีตทับหน้า, SB | | | | = | 720 | kg/sq.m |
| 24 | | | น้ำหนักบรรทุกที่พื้นจะต้องรับ, TL=SB+LL | | | | | = | 1020 | kg/sq.m |
| 25 | | หาน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงคาน | | | | | | | | |
| 26 | | | ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder | | | ด้านซ้าย | | = | 3.00 | m |
| 27 | | | | | | ด้านขวา | | = | 2.00 | m |
| 28 | | | | | | รวม | | = | 2.50 | m |

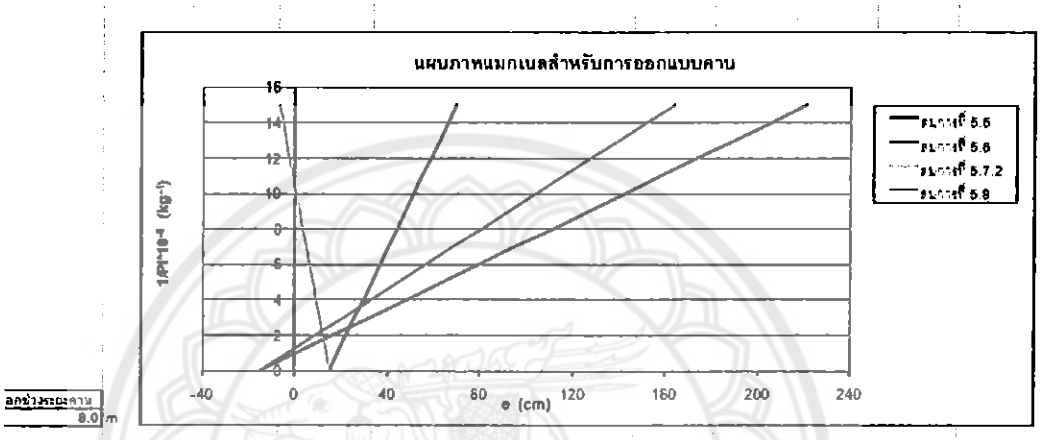
กรอกค่าช่วงความยาวคาน I-Girder, กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน, $f'_c$, Unit Weight Concrete, Unit Weight Steel, Live Load, ความหนาของพื้น, ความหนาของคอนกรีตทับหน้า, ความหนาของ Finishing, ช่วงพื้นที่ถ่ายลงคาน I-Girder ด้านซ้าย, ด้านขวา ใน cal I-Girder-Plat



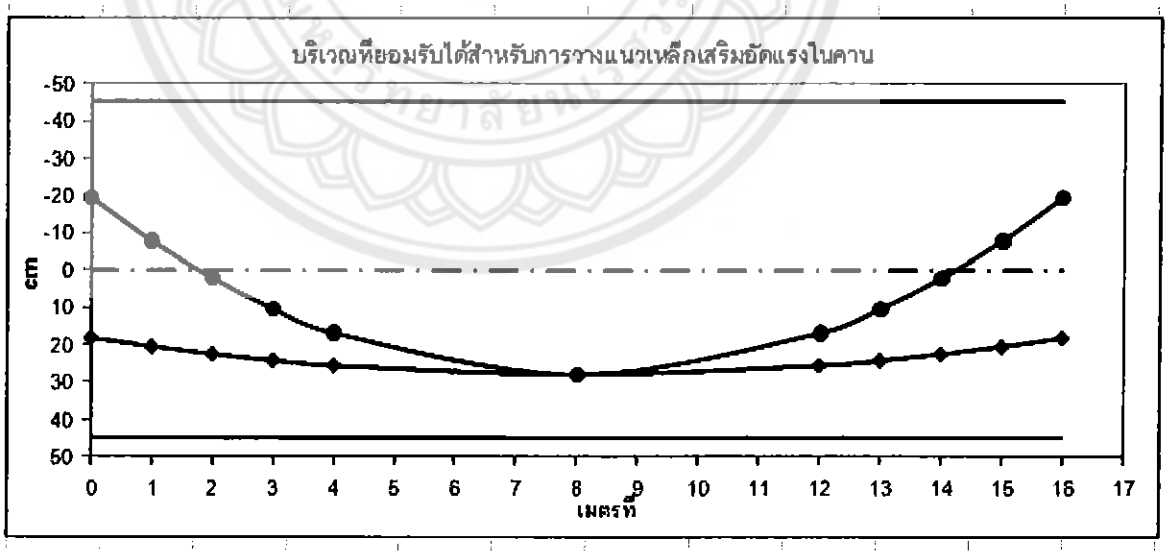
| ตำแหน่งแรง ณ ตำแหน่งต่างๆของ I-Girder | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 8 | | | | | |
| 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| 0.000 | 8424.444 | 17567.080 | 24433.389 | 30028.828 | 39359.691 | 30028.828 | 24433.389 | 17567.080 | 8424.444 | 0.000 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 2.16 | 130.37 | 40.05 | 32.99 | 30.47 | 26.16 | 30.47 | 32.99 | 40.05 | 130.37 | 2.16 |

I-Girder-Plat / I-Prop-Plat / Mat-I-Plat

กรอก %Loss ณ ตำแหน่งต่างๆของคานหลังจากการกรอกค่าทั้งหมด Worksheet จะคำนวณได้กราฟแมกเนลและกราฟแสดงแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่ยอมรับได้




แผนภาพแมกเนลสำหรับการออกแบบคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน
(ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกดูกราฟได้ทุกช่วงของคาน)




แผนภาพแนวการวางเหล็กเสริมอัดแรงที่ยอมรับได้

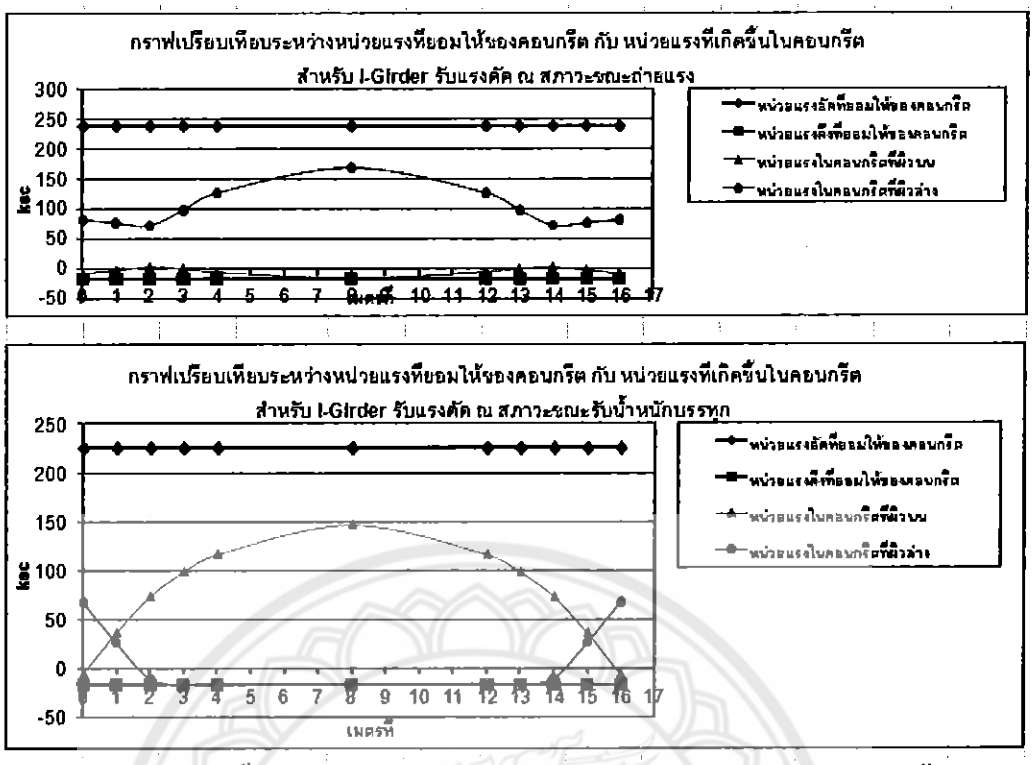
| ค่าหน่วยแรง ณ ตำแหน่งต่างๆของ I-Girder | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 8 | | | | | |
| 11.0 | 10.0 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 | 11.0 |
| 27.0 | 26.0 | 25.5 | 25.0 | 24.5 | 23.0 | 24.5 | 25.0 | 25.5 | 26.0 | 27.0 |
| 0.820 | 0.822 | 0.823 | 0.824 | 0.825 | 0.837 | 0.825 | 0.824 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| 0.000 | 9424.444 | 17567.080 | 24433.389 | 30028.828 | 39359.691 | 30028.828 | 24433.389 | 17567.080 | 9424.444 | 0.000 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 2.16 | 130.37 | 40.05 | 32.99 | 30.47 | 28.16 | 30.47 | 32.99 | 40.05 | 130.37 | 2.16 |
| 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 | 39.36 |
| -19.42 | -7.81 | 2.08 | 10.32 | 16.94 | 28.16 | 16.94 | 10.32 | 2.08 | -7.81 | -19.42 |
| 18.24 | 20.61 | 22.65 | 24.35 | 25.71 | 28.16 | 25.71 | 24.35 | 22.65 | 20.61 | 18.24 |
| 18.24 | 20.61 | 22.65 | 24.35 | 25.71 | 28.16 | 25.71 | 24.35 | 22.65 | 20.61 | 18.24 |
| 18.24 | 20.61 | 22.65 | 24.35 | 25.71 | 28.16 | 25.71 | 24.35 | 22.65 | 20.61 | 18.24 |
| -34719.88 | 53506.178 | 121034.807 | 172820.73 | 212102.9711 | 275671.52 | 212102.97 | 172820.73 | 121034.81 | 53506.178 | -34719.88 |
| -39011.10 | 58451.31 | 133740.12 | 189912.89 | 231806.53 | 299642.95 | 231806.53 | 189912.89 | 133740.12 | 58451.31 | -39011.10 |
| 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 | 15839.00 |
| 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 | 14984.00 |
| -3 | 4 | 9 | 13 | 16 | 20 | 16 | 13 | 9 | 4 | -3 |
| 10 | 10 | 10 | 13 | 16 | 20 | 16 | 13 | 10 | 10 | 10 |
| 149840 | 149840 | 149840 | 184792 | 239744 | 299680 | 239744 | 184792 | 149840 | 149840 | 149840 |
| 133357.6 | 124856 | 135605.2 | 177260.72 | 219365.76 | 276705.6 | 219365.76 | 177260.72 | 135605.2 | 124856 | 133357.6 |
| 109353.23 | 110851.63 | 111603.08 | 146062.83 | 180976.75 | 230765.59 | 180976.75 | 146062.83 | 111603.08 | 110851.63 | 109353.23 |

จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่า section modulus ของหน้าตัดคานนั้นมากกว่า section modulus ขั้นต่ำ $(Z_b)_{min}$ ซึ่งเท่ากับ 39359.691 $cm^3$ ในขณะที่หน้าตัดจริงของคานมี section modulus เท่ากับ 54000.00 $cm^3$ จึง OK!

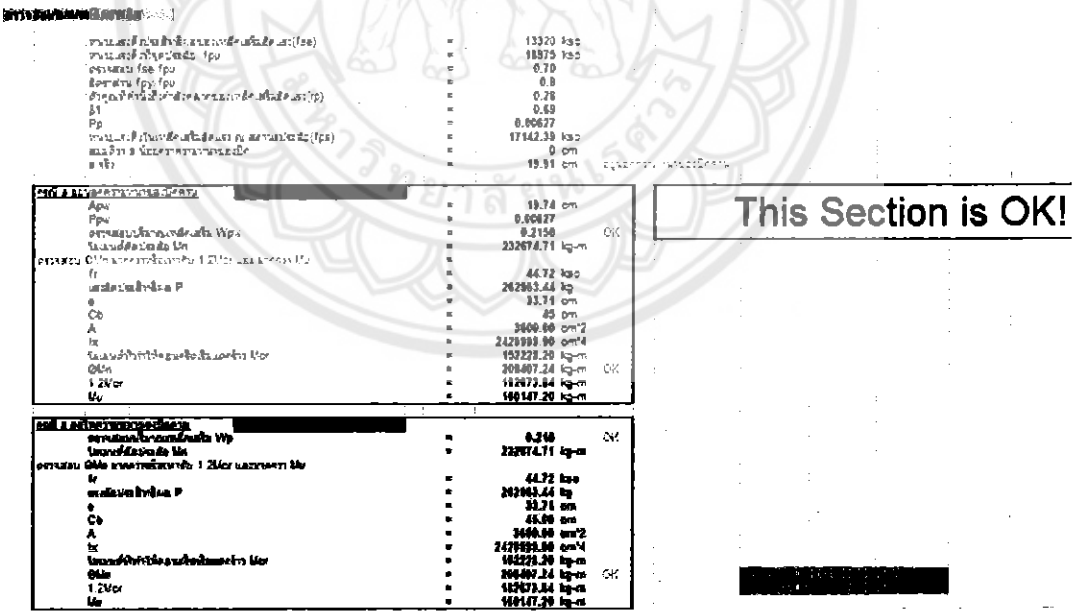
ทำการเลือกค่า e ในแต่ละช่วงของคาน โดยข้อนี้จะเลือกค่า e ของแนวการวางลวดที่ยอมรับได้ในขอบเขตล่าง และทำการเลือกจำนวนลวดเกลียวอัดแรงในแต่ละช่วงของคาน โดยช่วงเมตรที่ 0-2 และเมตรที่ 14-16 จะกำหนดให้ใส่ลวดจำนวน 10 เส้น ส่วนที่ตำแหน่งอื่นใส่ตามจำนวนน้อยที่สุดที่คำนวณได้

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 | 13800 |
| | | | | | 240.0 | | | | | |
| | | | | | -16.00 | | | | | |
| | | | | | -16.00 | | | | | |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| | | | | | 169.17 | | | | | |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 | 225.0 |
| -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 | -17.89 |
| -6.56 | 35.91 | 72.71 | 98.00 | 115.83 | 146.06 | 115.83 | 98.00 | 72.71 | 35.91 | -6.56 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 67.31 | 25.68 | -10.71 | -16.86 | -15.29 | -17.86 | -15.29 | -16.86 | -10.71 | 25.68 | 67.31 |
| OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |
| 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 |
| 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 | 98.71 |
| 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 | 18730 |
| 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 | 16850 |

จากการคำนวณของ Worksheet จะพบว่าหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะถ่ายแรงไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ และหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่างคาน ณ สภาวะขณะใช้งานไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้ จึง OK!




**กราฟหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ณ สภาวะขณะถ่ายแรงและ ณ สภาวะขณะรับน้ำหนักบรรทุก ไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้**



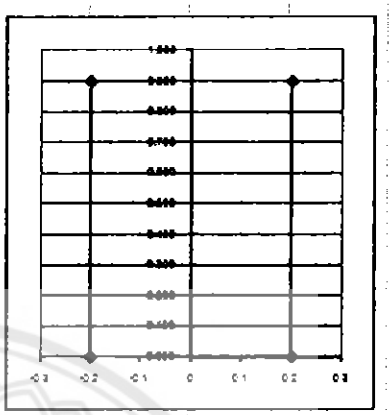

จากการคำนวณของ Worksheet ในส่วนของการตรวจสอบโมเมนต์คัดประลัยของคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากับ 0.215 ซึ่งน้อยกว่า $0.36\beta_1$ และค่า $\phi M_n = 209407.24$ kg-m, ค่า 1.2Mcr =182673.84 kg-m และ Mu=160147.20 kg-m ทำให้ค่า $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ และ ค่า $\phi M_n > M_u$ จึง OK!

**<u>สรุปผลการคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัว T เพื่อรับโมเมนต์ดัด</u>**

**- ใช้หน้าตัด (หน่วยเมตร)**

| Section Properties | | |
|---|---|---|
| I-Girder | btf | 0.400 |
| | dtf | 0.000 |
| | dtfi | 0.000 |
| | dbfi | 0.000 |
| | dbf | 0.000 |
| | bbf | 0.400 |
| | H | 0.900 |
| | bw | 0.400 |

| Results | | |
|---|---|---|
| | x-Area | 0.3600 |
| | Ix | 0.0243 |
| | Iy | 0.0048 |
| | Xcg | 0.0000 |
| | Ycg | 0.4500 |



- ลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้เกรด 270 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. **จำนวนลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆดังนี้**

| เมตรที่ | จำนวนลวดเกลียวอัดแรง(เส้น) | เลือกค่า *e* (ซม.) |
|---|---|---|
| 0 | 10 | 18.24 |
| 1 | 10 | 20.61 |
| 2 | 10 | 22.65 |
| 3 | 13 | 24.35 |
| 4 | 16 | 25.71 |
| 8 | 20 | 28.16 |
| 12 | 16 | 25.71 |
| 13 | 13 | 24.35 |
| 14 | 10 | 22.65 |
| 15 | 10 | 20.61 |
| 16 | 10 | 18.24 |

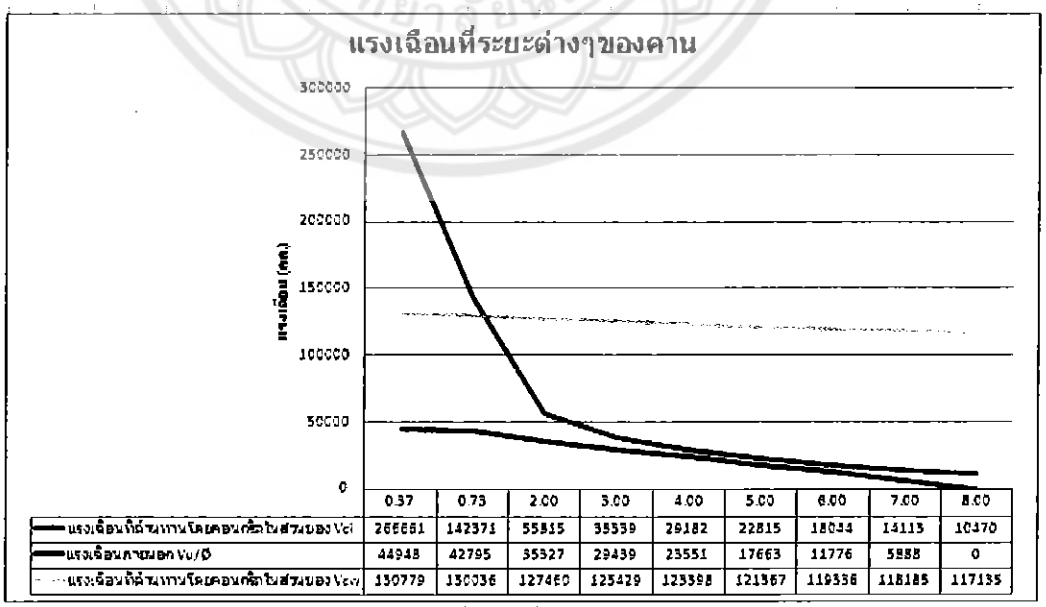
## 4.2.8 การวิเคราะห์และออกแบบคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อรับแรงเฉือน

| 0.37 | 0.73 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.025 | 0.049 | 0.123 | 0.172 | 0.211 | 0.242 | 0.264 | 0.277 | 0.282 |
| 0.067 | 0.064 | 0.053 | 0.044 | 0.035 | 0.026 | 0.018 | 0.009 | 0.000 |
| 2.670 | 1.301 | 0.429 | 0.256 | 0.187 | 0.109 | 0.067 | 0.032 | 0.000 |
| 230766 | 230766 | 230766 | 230766 | 230766 | 230766 | 230766 | 230766 | 230766 |
| 6596 | 6280 | 5184 | 4320 | 3456 | 2592 | 1728 | 864 | 0 |
| 64.4 | 65.6 | 67.6 | 69.3 | 70.7 | 71.3 | 71.9 | 72.5 | 73.2 |
| 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | |
| 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.0 | 72.5 | 73.2 |
| 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 | 35.78 |
| 142.05 | 152.16 | 160.88 | 168.14 | 173.98 | 176.60 | 179.22 | 181.83 | 184.45 |
| 2471 | 4826 | 12096 | 16848 | 20736 | 23760 | 25920 | 27216 | 27648 |
| 4.58 | 8.94 | 22.40 | 31.20 | 38.40 | 44.00 | 48.00 | 50.40 | 51.20 |
| 93554 | 96660 | 94097 | 93269 | 92535 | 90924 | 90177 | 90284 | 91274 |
| [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] |
| 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 | 64.10 |
| 15504 | 14761 | 12185 | 10154 | 8123 | 6093 | 4062 | 2031 | 0 |
| [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] | [illegible] |
| 130779 | 130036 | 55815 | 38539 | 29182 | 22815 | 18044 | 14113 | 10470 |

ผลการคำนวณจาก Worksheet จะได้ค่า Vc (*ช่องสีเหลืองล่างสุด*,kg)ที่ระยะต่างๆของช่วงคานซึ่งเป็นค่าน้อยระหว่าง Vci กับ Vcw

| | | | |
|---|---|---|---|
| | กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ (Vu) | = | 36375 kg |
| | Ø=ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ0.85 ; Vu/Ø | = | 42795 kg |
| | Vc/2 | = | 65018 kg |
| | กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน(fy) | = | 4000 ksc |
| *** | กำลังต้านทานแรงเฉือนที่เหล็กเสริมต้องรับ(Vs) = (Vu/Ø)-Vc | = | -87241 kg |

กรอกค่ากำลังคลากของเหล็กเสริม($f_y$) = 4,000 กก./ตร.ซม.




กราฟแสดงแรงเฉือนที่ระยะต่างๆของคานคอนกรีตอัดแรง

| | 0.37 | 0.73 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 8.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 38206 | 36375 | 30028 | 25023 | 20018 | 15014 | 10009 | 5005 | 0 |
| | 44948 | 42795 | 35327 | 29439 | 23551 | 17663 | 11776 | 5888 | 0 |
| | 65389 | 65018 | 27908 | 19269 | 14591 | 11407 | 9022 | 7056 | 5235 |
| | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| | -85830 | -87241 | -20489 | -9100 | -5631 | -5152 | -6268 | -8225 | -10470 |
| | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม | ไม่ต้องเสริม |
| | ***กรณี Vs เป็น - และ/หรือ Vu/Ø > Vc/2 ให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าค่าสมการ (Av)min = (3.5*bw*s)/fy | | | | | | | | |
| | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 | 0.035 |
| | -7.58 | -7.48 | -31.77 | -71.52 | -115.58 | -126.35 | -103.84 | -79.74 | -63.17 |
| | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 | 64.57 |
| | -13.49 | -13.27 | -56.51 | -127.22 | -205.59 | -224.74 | -184.71 | -141.83 | -112.38 |
| | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 | 114.86 |

จากการคำนวณของ *Worksheet* จะพบว่าค่า $V_c > \frac{V_u}{\phi}$ ทุกช่วงความยาวดานจึงส่งผลให้ $V_s$ มีค่าเป็น –Worksheet จึงแสดงผลให้ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทุกช่วงความยาว แต่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ไม่ต่ำกว่าสมการ *(Av)min = (3.5*bw*s)/fy* (สมการที่ 6.12)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2-Leg DB12mm | Av | = | 2.26 | cm^2 |
| | 2-Leg DB16mm | Av | = | 4.02 | cm^2 |
| | (Av)min = (3.5*bw*s)/fy (สมการที่ 6.12) | | = | (Av/s)min | cm^2/m |
| กรณีเลือก | Spacing for DB12mm | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 | s = (Av*fy*dp)/Vs | = | -7.46 | cm |
| | จากสมการที่ 6.12 | s = (Av*fy)/(3.5*bw) | = | 64.57 | cm |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ | s <=(3/4)*h | = | 67.5 | cm |
| | | s <=60 | = | 60 | cm |
| | | USE DB12mm | @ | 30 | cm |
| | OR | | | | |
| กรณีเลือก | Spacing for DB16mm | | | | |
| | จากสมการที่ 6.9 | s = (Av*fy*dp)/Vs | = | -13.27 | cm |
| | จากสมการที่ 6.12 | s = (Av*fy)/(3.5*bw) | = | 114.86 | cm |
| | จากข้อกำหนดการออกแบบ | s <=(3/4)*h | = | 67.5 | cm |
| | | s <=60 | = | 60 | cm |
| | | USE DB16mm | @ | 30 | cm |

จากการคำนวณของ Worksheet เพื่อหาระยะเรียง (Spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจากทั้งสมการที่ 6.9 และสมการที่ 6.12 จะพบว่าค่า $S$ ของสมการที่ 6.9 เป็น – จึงไม่ใช้ในการคำนวณ และค่า $S$ ของสมการที่ 6.12 ได้ค่า $S$ = 64.57 ซม.(กรณีเหล็ก DB12mm) ซึ่งมีค่ามากกว่าข้อกำหนดการออกแบบคือ $S \le \frac{3}{4}h = 67.5cm$ และ $S \le 60cm$

**สรุปผลการคำนวณออกแบบหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อรับแรงเฉือน**

-ใช้เหล็ก DB12mm@30cm

### 4.2.9 การออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

| | | | |
|---|---|---|---|
| Ø=ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ | | = | 0.85 |
| shear span (a) | | = | 50 cm |
| effective depth of the dap to center of reinforcement (d) | | = | 50 cm |
| depth of member above the dap (h) | | = | 55 cm |
| กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ(Vu) | | = | 38206 kg |
| horizontal axial tension (Nu) | | = | 7641 kg |
| Flexure and Axial Tension Reinforcement (As) | | = | [illegible] |
| λ | | = | 1 |
| μ | (See Table 4.3.1) | = | 1.4λ |
| μe | (See Table 4.3.1) | = | 3.4 |

กรอกค่า $\phi$ , shear span (a), effective depth of the dap to center of reinforcement(d), depth of member above the dap(h), $\lambda$ , $\mu_e$

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 13 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 7 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 5 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| As เลือก | USE | 3 | DB25mm |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 6 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 2 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 2 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 1 | เส้น |
| Ah เลือก | USE | 2 | DB25mm |

13.71 cm^2

As ใช้ = 13.71 cm^2

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 10 | เส้น |
| For DB16mm | ใช้ | 6 | เส้น |
| For DB20mm | ใช้ | 4 | เส้น |
| For DB25mm | ใช้ | 3 | เส้น |
| For DB28mm | ใช้ | 2 | เส้น |
| A'sh เลือก | USE | 4 | DB20mm |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 6 | stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | 3 | stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| Ash เลือก | USE DB16mm | 3 | stirrups |

| | | | |
|---|---|---|---|
| For DB12mm | ใช้ | 3 | stirrups |
| For DB16mm | ใช้ | 2 | stirrups |
| For DB20mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| For DB25mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| For DB28mm | ใช้ | 1 | stirrups |
| Av เลือก | USE DB16mm | 2 | stirrups |

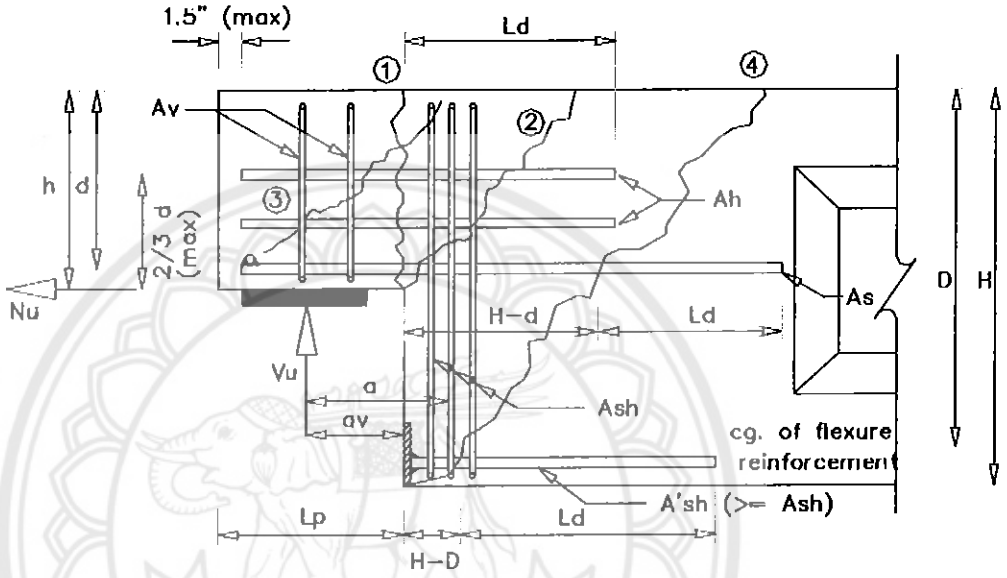
Table 4.3.1 Shear

| Crack Interfa |
|---|
| 1. Concrete to cast monolithically |
| 2. Concrete to hard with roughened |
| 3. Concrete to conc |
| 4. Concrete to stee |

**ผลการคำนวณของ Worksheet ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน**

| Development Length | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | α | | | = | 1 | |
| | β | | | = | 1 | |
| | λ | | | = | 1 | |
| For | As,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.68 | m. |
| For | Ah,DB | 25 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.68 | m. |
| For | A'sh,DB | 20 mm | ld = 0.60· db· fy ·α ·β ·λ / f 'c1/2 | = | 2.15 | m. |

ผลการคำนวณระยะฝัง (Development Length)




**สรุปผลการออกแบบจุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม**

As เลือก 3 DB25mm ระยะฝัง 2.68 m

Ah เลือก 2 DB25mm ระยะฝัง 2.68 m

A'sh เลือก 4 DB20mm ระยะฝัง 2.15 m

Ash เลือก DB16mm-3 stirrups

Av เลือก DB16mm-2 stirrups

# บทที่ 5
# วิเคราะห์และสรุปผล

## 5.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จาก Worksheet

5.1.1 ผลการคำนวณที่ได้จาก Worksheet นั้นสามารถคำนวณค่าหน่วยแรงและตรวจสอบได้ครอบคลุมเกือบทุกช่วงความยาวของคานทำให้การคำนวณมีความละเอียดถูกต้องและมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณและตรวจสอบเฉพาะที่จุดกึ่งกลางคาน ทำให้ผู้ใช้สามารถมีความมั่นใจได้ว่าคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียวที่ได้ออกแบบไว้นั้นจะมีความแข็งแรงและมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย

## 5.2 สรุปผลของ Worksheet

5.2.1 การแสดงผลของ Worksheet แสดงได้ทั้งข้อมูลตัวเลข และกราฟ

5.2.2 การแสดงผลของ Worksheet แสดงในรูปของกราฟคือ กราฟแมกเนลที่สามารถเลือกดูได้เกือบทุกช่วงความยาวของคานเพื่อช่วยในการออกแบบคาน, กราฟแสดงบริเวณที่ยอมรับได้สำหรับการวางแนวเหล็กเสริมอัดแรงในคานเพื่อช่วยในการเลือกวางแนวเหล็กเสริมอัดแรงในช่วงต่างๆของคาน,กราฟเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างของคอนกรีตทั้งที่สภาวะขณะถ่ายแรงและที่สภาวะขณะรับน้ำหนักบรรทุก เพื่อตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นว่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้หรือไม่ , กราฟแสดงแรงเฉือนที่ระยะต่างๆของคาน เพื่อช่วยในการออกแบบการใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

5.2.3 การแสดงผลของ Worksheet จะบอกว่า หน้าตัดที่เลือกนั้นใช้ได้คือสามารถรับโมเมนต์ดัดได้อย่างปลอดภัยก็ต่อเมื่อ Section Modulus ของหน้าตัดผ่าน, หน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่าง ณ สภาวะขณะถ่ายแรง หรือหน่วยแรงที่ผิวบนผิวล่าง ณ สภาวะขณะใช้งานไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้, ปริมาณการเสริมเหล็กอัดแรงต่ำกว่าเกณฑ์สมดุลคือ $< 0.36\beta_1$ ซึ่งในการออกแบบต้องเสริมเหล็กอัดแรงให้ต่ำกว่าเกณฑ์สมดุลเพื่อให้มีความเหนียว(ductility) และรวมถึงกรณีที่กำลังประลัยของหน้าตัดผ่านคือ $\phi M_n > M_u$ และ $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ ซึ่งผู้ใช้ไม่ต้องไปไล่ตรวจสอบทุกกรณีเพราะ Worksheet นั้นจะทำการตรวจสอบทุกกรณีเอง แล้วจะแสดงผลออกมาว่าหน้าตัดที่เลือกไว้สามารถใช้ได้หรือไม่ ถ้าหน้าตัดใช้ได้ Worksheet จะแสดงผลว่า " This section is OK!" ถ้าหน้าตัดใช้ไม่ได้ Worksheet จะแสดงผลว่า " This section is FAIL!"

5.2.4 ผลลัพธ์ของการคำนวณจำนวนลวดเกลียวอัดแรงของ Worksheet เป็นจำนวนลวดเกลียวอัดแรงที่น้อยที่สุด ผู้ใช้สามารถเลือกใส่จำนวนลวดเกลียวอัดแรงให้มากกว่าได้ และผลการคำนวณจำนวนลวดเกลียวอัดแรงบริเวณปลายคานอาจมีค่าติดลบ ทั้งนี้ให้ผู้ใช้ใช้ดุลยพินิจในการใส่จำนวนลวดเกลียวอัดแรงบริเวณปลายคาน หรือที่ระยะต่างๆโดยการใส่จำนวนลวดเกลียวอัดแรงต้องไม่ทำให้ค่าหน่วยแรงที่ตำแหน่งต่างๆเกินหน่วยแรงที่ยอมให้

5.2.5 ผลลัพธ์การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน คือ ระยะเรียง (spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะมีให้เลือกใช้เหล็ก 2 ขนาด คือ DB12mm และ DB16mm

5.2.6 ผลลัพธ์การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมที่จุดเชื่อมต่อบริเวณปลายคาน ของเหล็กแบบต่างๆ Worksheet จะแสดงจำนวนเหล็กเส้น และจำนวนเหล็กปลอก ของเหล็กขนาด Diameter ต่างๆโดยให้ผู้ใช้เลือกขนาดของเหล็กเอง

## 5.3 ข้อจำกัดของ Worksheet

5.3.1 สามารถออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเดียว (Simple span)เท่านั้น

5.3.2 หน้าตัดที่เลือกใช้เป็นหน้าตัดได้ทั้ง ตัว I , ตัว T, หน้าตัดสี่เหลี่ยม แต่ผู้ใช้จำเป็นต้องใช้ความเข้าใจในการกรอกค่าของหน้าตัด ซึ่งบางค่าต้องกรอกค่าเป็น 0 จึงอาจทำให้มีความสับสนได้

5.3.3 Worksheet ไม่สามารถคำนวณ %loss ได้ และผู้ใช้ต้องกรอก %loss ทุกช่วงความยาวคาน ทั้ง loss ที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และ loss ที่เกิดขึ้นทั้งหมด

5.3.4 หน้าจอของ Worksheet และการแสดงผลมีขนาดกว้างทั้งในแนวด้านข้างและแนวดิ่ง ผู้ใช้ต้องเลื่อนดูให้ครบถ้วนเพื่อความถูกต้อง

## 5.4 แนวทางในการพัฒนา Worksheet

5.4.1 ปรับปรุงรูปแบบการป้อนข้อมูลให้มีการป้อนข้อมูลที่ง่ายและเป็นระเบียบมากขึ้น

5.4.2 ปรับปรุงและพัฒนา Worksheet ให้สามารถคำนวณค่า Loss ทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด เพื่อให้การคำนวณออกแบบมีความถูกต้องมากขึ้น

5.4.3ปรับปรุงการแสดงผลหน้าจอให้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น

5.4.4 พัฒนา Worksheet ให้สามารถออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบหลายช่วงได้

# เอกสารอ้างอิง

- ดร.นเรศ พันธราธร : การออกแบบคอนกรีตอัดแรง (DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE) พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร : ไลบรารี นาย, 2543

# ภาคผนวก ก

## ข้อกำหนดของการออกแบบ

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง มีขั้นตอนมากกว่าคอนกรีตเริมเหล็กทั่วไป เนื่องจากการที่มีขั้นตอนการทำงานที่มากกว่าแล้ว การออกแบบต้องครอบคลุมถึงความปลอดภัยของโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุก และการเสียรูป (deformation) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างและการใช้งาน รวมทั้งต้องมีความคงทน (durability) เพียงพอตลอดอายุการใช้งานด้วย โดยปกติขั้นตอนการออกแบบ ต้องมีการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้าง ภายใต้สถานะ 2 ประเภทดังนี้

ก) สถานการณ์ใช้งาน (service state)

ที่สถานการณ์ใช้งาน โครงสร้างต้องมีความสามารถในการใช้งานได้ตามกำหนด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กจะต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การโก่งตัว การแตกร้าวและการกัดกร่อนต้องไม่มากเกินข้อกำหนด

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างรับแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 1.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง ดังแสดงในตารางที่ 1.2 และระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ดังแสดงในตารางที่ 1.3

**ตารางที่ 1.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)**

ก) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ที่ถ่ายแรงมาจากเหล็กเสริมอัดแรง ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage) การคืบของคอนกรีต (creep) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation) ต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| **หน่วยแรงอัด** | |
| - สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรง เป็นรูปสามเหลี่ยม (triangular distribution of prestress) | $0.60 f'_{ci}$ |
| - สำหรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการอัดแรงเท่าๆกันตลอดหน้าตัดขององค์อาคาร (uniform distribution of prestress) | $0.45 f'_{ci}$ |
| **หน่วยแรงดึง** | |
| - สำหรับองค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กเสริมธรรมดายึดเหนี่ยว (bonded reinforcement) ในการช่วยรับแรงดึง | $0.80\sqrt{f'_{ci}}$ กก./ซม.$^2$ |
| - สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมธรรมดายึดเหนี่ยว ซึ่งจะต้องเสริมเหล็กยึดเหนี่ยวให้สามารถรับแรงดึงทั้งหมดในส่วนของคอนกรีตที่เกิดหน่วยแรงดึง (tensile zone) โดยที่แรงดึงคำนวณจากสมมติฐานของหน้าตัดไม่แตกร้าว | $1.60\sqrt{f'_{ci}}$ กก./ซม.$^2$ |

**ตารางที่ 1.1 (ต่อ)**

| | |
|---|---|
| ข) หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (หลังการสูญเสียทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง) ต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้ | |
| **หน่วยแรงอัด** | |
| - กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงเนื่องจากการคัด | $0.45 f'_c$ |
| - กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงอัดโดยตรง (direct comprestress) | $0.30 f'_c$ |
| **หน่วยแรงดึง** | |
| - หน่วยแรงดึงในบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงมาก่อน (precompressed tensile zone) | $1.60\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$ |
| - สำหรับองค์อาคารซึ่งไม่ใช่ชนิดไม่ยึดเหนี่ยว หากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าค่าที่กำหนดข้างต้นอาจจะใส่เหล็กเสริมธรรมดาชนิดยึดเหนี่ยวให้เพียงพอเพื่อควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าวไม่ให้เกิน 0.2 มม. สำหรับองค์อาคารทั่วไป และไม่เกิน 0.1 มม. สำหรับองค์อาคารที่อาจได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (corrosive atmosphere) | |

**โดยที่** $f'_{ci}$ คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทางกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.$^2$

$f'_c$ คือ กำลังประลัยของคอนกรีต เมื่ออายุ 28 วัน โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน หน่วยเป็น กก./ซม.$^2$

**ตารางที่ 1.2 หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรง (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)**

| หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้ | |
|---|---|
| - ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก | $0.94 f_{py}$ แต่ไม่เกิน $0.80 f_{pu}$ หรือค่าสูงสุดที่แนะนำโดยผู้ผลิตเหล็กเสริมอัดแรงหรือสมอยึด |
| - ทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร | $0.70 f_{pu}$ |

**โดยที่** $f_{py}$ คือ กำลังคลาก (yield strength) ของเหล็กเสริมอัดแรงหน่วยเป็น กก./ซม.$^2$

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

**ข) สถานะประลัย (ultimate state)**

เป็นสถานะที่โครงสร้างสิ้นสุดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์ที่สถานะนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเกินน้ำหนักบรรทุก (overload) ก่อนที่โครงสร้างจะพังลง ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีค่าตัวคูณที่น้ำหนัก (load factor) ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนด มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนักดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.4

**ตารางที่ 1.3 ระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)**

| ประเภทของชิ้นส่วน | การโก่งตัวที่พิจารณา | พิกัดการโก่งตัว |
|---|---|---|
| ดาดฟ้าเรียบไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวได้มาก | การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{180}$ |
| พื้นไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้ | การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{360}$ |
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้ | ส่วนของการโก่งตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างแล้ว (ผลรวมของการโก่งตัวระยะยาวจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง และการโก่งตัวทันทีจากน้ำหนักบรรทุกจรใดๆ ที่เพิ่มขึ้น) | $\frac{L}{480}$ |
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งไม่น่าจะเสียหายจากการโก่งตัวมาก | | $\frac{L}{240}$ |

หมายเหตุ - สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด ให้คำนวณการโก่งตัวทันทีโดนวิธีปกติ หรือใช้สูตรสำหรับการโก่งตัวอีลาสติก โดยสามารถใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดเดิมสำหรับหน้าตัดไม่แตกร้าว

- ในการคำนวณการโก่งตัวเพิ่มเติมในระยะยาวของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงให้คำนึงหน่วยแรงในคอนกรีตและในเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง (sustained load) และผนวกผลจากการคืบตัว การหดตัวของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย

**ตารางที่ 1.4 ค่าตัวคูณน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)**

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (1.1)$$

โดยที่ $U$ คือ กำลังที่ต้องการ (required strength)

$D$ คือ ผลของน้ำหนักคงที่

$L$ คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

ถ้ามีการพิจารณาผลของแรงลมร่วมด้วย จะต้องหากำลังที่ต้องการ จากค่าสูงสุดของทั้งสามสมการคือ 1.1-1.3

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

$$U = 0.9D + 1.4W$$

โดยที่ W คือ ผลของแรงลม

ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (required strength) โดยที่กำลังที่ออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (nominal strength) ด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง สำหรับกรณีต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.5

กำลังที่ต้องการ $\leq$ กำลังที่ออกแบบ

$$M_u \leq \phi M_n$$

$$P_u \leq \phi P_n$$

$$V_u \leq \phi V_n$$

โดยที่ $M_u, P_u, V_u$ คือ กำลังที่ต้องการของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือนตามลำดับ

$\phi M_n, \phi P_n, \phi V_n$ คือ กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ แรงอัด และแรงเฉือนตามลำดับ

$M_n, P_n, V_n$ คือ กำลังระบุของโมเมนต์ แรงอัด และแรงเฉือน ตามลำดับ

$\phi$ คือ ตัวคูณลดกำลัง

**ตารางที่ 1.5 ตารางแสดงค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับกรณีต่างๆ (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)**

| | $\phi$ |
|---|---|
| - กรณีของแรงดัด อาจมีหรือไม่มีแรงดึงในแนวแกน | 0.90 |
| - กรณีของแรงดึงในแนวแกน | 0.90 |
| - กรณีของแรงอัด หรือ แรงอัดร่วมกับแรงดัด | |
| สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเกลียว | 0.75 |
| สำหรับชิ้นส่วนเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว | 0.70 |
| - กรณีของแรงเฉือนและแรงบิด | 0.85 |
| - กรณีของแรงกด | 0.70 |

# ภาคผนวก ข

## น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง

ในการออกแบบผู้ออกแบบจะต้องคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (live load) สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่สามารถคำนวณได้โดยปริมาตรของคอนกรีตและความหนาแน่นของคอนกรีต โดยความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2400 กก./ม.$^3$ ส่วนการกำหนดน้ำหนักบรรทุกจร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของโครงสร้างนั้นๆ ตารางที่ 1.6 แสดงน้ำหนักบรรทุกจรที่ระบุไว้ในข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องการควบคุมก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522

**ตารางที่ 1.6** น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารประเภทต่างๆ

| ประเภทการใช้อาคาร | น้ำหนักบรรทุกเป็น กก./ซม.$^2$ |
|---|---|
| 1. หลังคา | 50 |
| 2. กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต | 100 |
| 3. ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม | 150 |
| 4. ห้องแถว ตึกแถว อาคารชุด หอพัก โรงแรม และห้องคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล | 200 |
| 5. สำนักงาน ธนาคาร | 250 |
| 6. (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน | 300 |
| (ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม โรงพยาบาล สำนักงาน และธนาคาร | 300 |
| 7. (ก) ตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในหอสมุด ที่จอดหรือเก็บรถยนต์นั่ง | 400 |
| (ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน | 400 |
| 8. (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑ์ อัฒจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงทิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและทัสดุ | 500 |
| (ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด ห้างสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร และหอสมุด | 500 |
| 9. ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด | 600 |
| 10. ที่จอดหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่นๆ | 800 |

# ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

**ชื่อ** นายเตชินท์ มั่นคง

**ภูมิลำเนา** 336/1 หมู่ 7 ต.หนองกรด อ.บรรพตพิสัย จ.นครสวรรค์

**ประวัติการศึกษา**

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองกรดพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: canon_zuzaa@hotmail.co.th

**ชื่อ** นายนวพงษ์ วงษ์พานิช

**ภูมิลำเนา** 46 หมู่ 9 ต.สระแก้ว อ.ลาดยาว จ.นครสวรรค์

**ประวัติการศึกษา**

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศมัชฉิม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: bomdatacha@hotmail.co.th

**ชื่อ** นายอลงกรณ์ ปัจฉิมา

**ภูมิลำเนา** 36/5 หมู่ 1 ต.ดงมูลเหล็ก อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์

**ประวัติการศึกษา**

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: alongkorn_mn123@hotmail.com