



การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

REINFORCED CONCRETE DESIGN

(Working Stress Design : WSD)



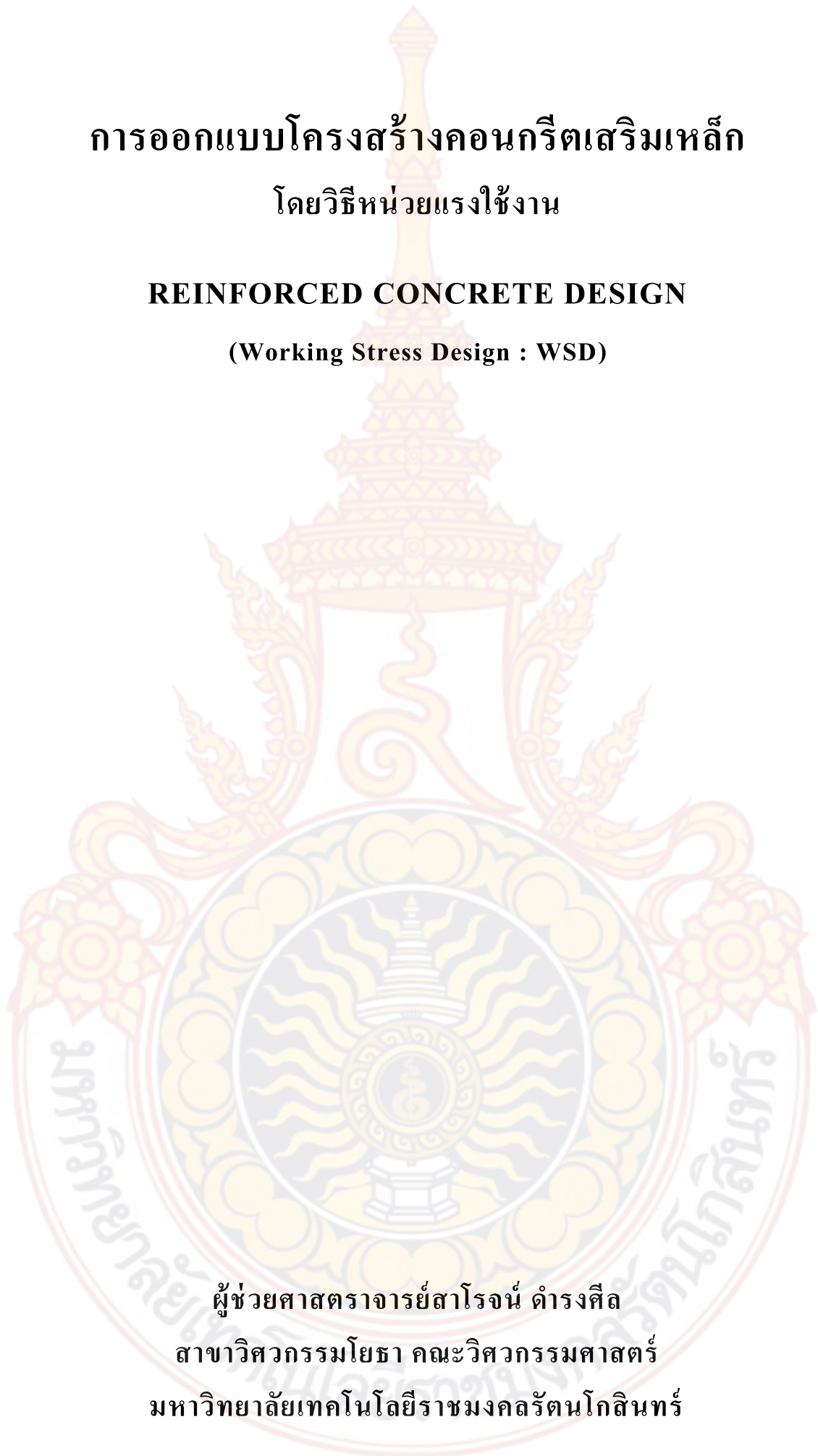
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาโรจน์ ดำรงค์สีล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

REINFORCED CONCRETE DESIGN

(Working Stress Design : WSD)



ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาโรจน์ ดำรงค์ดี

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

คำนำ

ตำราเล่มนี้ใช้สำหรับการเรียนการสอนวิชา CVE 3235 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ซึ่งเป็นวิชาบังคับสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ เนื้อหาประกอบด้วย คอนกรีตและเหล็กเสริม การวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบ การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กต้านทาน โมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงยึดหน่วง และการบิด พื้นและบันได เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมทั้งหมด 7 บท ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาสาระตามเกณฑ์ลักษณะวิชา และเป็นส่วนหนึ่งของวิชาในหลักสูตร โดยใช้ระยะเวลาในการเรียนการสอน 7 สัปดาห์ จากทั้งหมด 15 สัปดาห์ ตลอดหลักสูตร

สิ่งสำคัญในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ ความเข้าใจพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง สูตรที่ใช้ในการคำนวณออกแบบภายใต้สมมติฐาน และข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับการออกแบบ เพื่อให้ได้ขนาดของโครงสร้างที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน แบบฝึกหัดท้ายบทจะช่วยให้นักศึกษาเกิดทักษะจากการคำนวณออกแบบในชั่วโมงปฏิบัติ โดยมีตารางช่วยออกแบบในภาคผนวก และมีตัวอย่างรายการคำนวณ โครงสร้างบ้านพักอาศัย ซึ่งเป็นงานที่มอบหมายในภาคการศึกษา ผู้เรียบเรียงขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ ครู อาจารย์ ผู้ให้วิชาความรู้ทั้งทางตรงจากการอบรมสั่งสอน และทางอ้อมจากการอ่านหนังสือ ตำรา ของท่านทั้งหลาย หวังเป็นอย่างยิ่งว่านักศึกษาจะได้รับประโยชน์จากตำราเล่มนี้ และสามารถนำไปใช้ศึกษาในรายวิชาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อเนื่องได้ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้โดยมิได้ตั้งใจก็ขอภัย และกรุณาให้คำแนะนำด้วยจักเป็นพระคุณยิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาโรจน์ ดำรงศิลป์

18 ธันวาคม 2559

แก้ไขปรับปรุง : พฤษภาคม 2562

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
สัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 คอนกรีตและเหล็กเสริม	1
1.1 คอนกรีต	1
1.1.1 กำลังอัดของคอนกรีต (f_c')	1
1.1.2 กำลังดึงของคอนกรีต	5
1.1.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c)	6
1.2 เหล็กเสริม	8
บทที่ 2 การวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบ	11
2.1 น้ำหนักบรรทุกและแรงที่กระทำกับโครงสร้าง	11
2.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่หรือน้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead loads)	11
2.1.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live loads)	12
2.1.3 แรงแลม (Wind loads)	13
2.1.4 แรงกระแทก (Impact loads)	14
2.1.5 แรงแผ่นดินไหว (Earthquake loads)	14
2.2 แบบจำลองทางโครงสร้าง	15
2.3 การจัดวางน้ำหนักบรรทุก	17
2.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง	19
2.5 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	21
2.5.1 หน่วยแรงที่ขอมให้	21
2.5.2 สมมติฐานในการออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน	22
2.5.3 ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ (n , k และค่า j)	22

บทที่ 3 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กต้านทานโมเมนต์คด	25
3.1 พฤติกรรมของคานภายใต้โมเมนต์คดและการเสริมเหล็ก	26
3.2 การออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว	28
3.3 ข้อกำหนดเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	30
3.4 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว	31
3.5 การออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด	34
3.6 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด	36
3.7 การตรวจสอบความสามารถในการต้านทานโมเมนต์คดของคานแบบฝีกหัด	44
แบบฝีกหัด	47
บทที่ 4 แรงเฉือน แรงยึดหน่วง และแรงบิด	48
4.1 แรงเฉือน	48
4.1.1 แรงเฉือนและแรงดึงทแยงในคาน	49
4.1.2 เหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน	50
4.1.3 ข้อกำหนดมาตรฐาน ว.ส.ท.	51
4.2 แรงยึดหน่วง	55
4.3 แรงบิด	61
แบบฝีกหัด	66
บทที่ 5 พื้นและบันได	67
5.1 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	67
5.1.1 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว	67
5.1.2 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง	74
5.1.3 พื้นสำเร็จรูป	82
5.1.4 พื้นวางบนดิน	83
5.2 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก	84
5.2.1 บันไดพาดช่วงกว้างระหว่างคานแม่บันได	84
5.2.2 บันไดพาดช่วงยาว	87
แบบฝีกหัด	90

บทที่ 6 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	92
6.1 เสาสั้นรับน้ำหนักตามแนวแกน	93
6.2 ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	96
6.3 เสาสั้นรับแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์คดร่วมกัน	102
6.3.1 ช่วงที่ 1 : $e \leq e_a$	104
6.3.2 ช่วงที่ 2 : $e_a < e \leq e_b$	105
6.3.3 ช่วงที่ 3 : $e > e_b$	106
6.4 เสายาว	111
6.4.1 ความชะลูดของเสา	111
6.4.2 ตัวคูณลดกำลังเสาชะลูด (R)	112
แบบฝึกหัด	115
บทที่ 7 ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก	116
7.1 รูปแบบของฐานราก	117
7.2 ฐานรากแผ่วางบนดิน	118
7.2.1 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากแผ่วางบนดิน	119
7.2.2 การเสริมเหล็กในฐานราก	121
7.2.3 แรงเฉือนและแรงยึดหน่วง	122
7.2.4 ความหนาต่ำสุดของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก	122
7.2.5 การถ่ายหน่วยแรงที่ฐานของเสา	123
7.3 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบฐานรากแผ่วางบนดิน	123
7.4 ฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	134
7.4.1 เสาเข็ม	134
7.4.2 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	136
7.4.3 การเสริมเหล็กฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	140
7.5 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	140
แบบฝึกหัด	151
บรรณานุกรม	152
ภาคผนวก	154

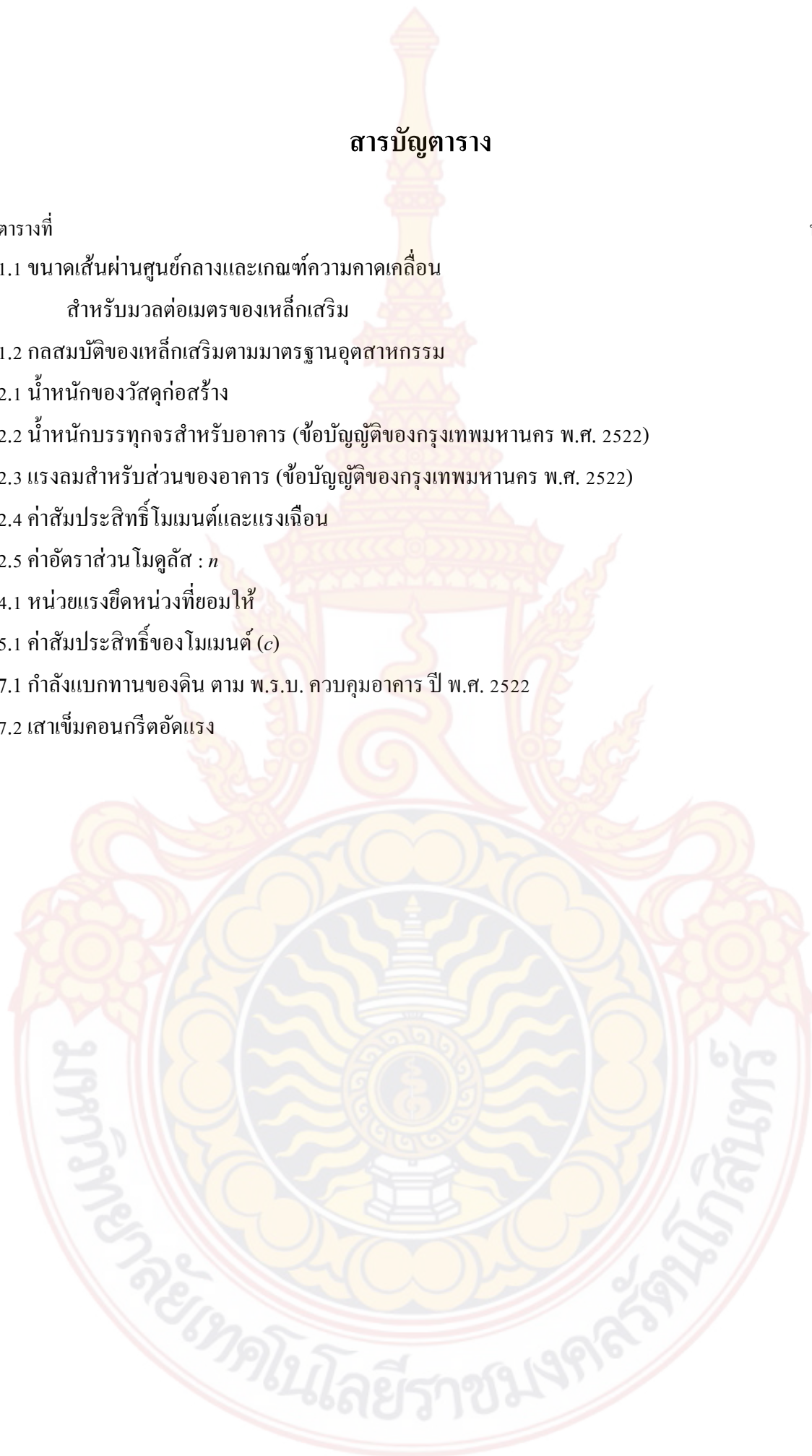
สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกและรูปทรงลูกบาศก์	2
1.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	2
1.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์	3
1.4 ตัวอย่างทดสอบและแผ่นยางรองผิวทดสอบกำลังอัด	4
1.5 การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก	5
1.6 การทดสอบแรงดึงโดยวิธีการตัด	6
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตและการติด Compressometer	7
1.8 เหล็กกลมผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อย	8
1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) กับหน่วยการยืดตัว (Strain) ของเหล็กเสริม	9
1.10 หนังสือมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.1 โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	15
2.2 ผังโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	16
2.3 แบบจำลองทางโครงสร้าง คาน B1, B7 และคาน B9	17
2.4 การจัดวางน้ำหนักบรรทุก	19
2.5 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน	23
2.6 ขั้นตอนในการหาค่าคงที่สำหรับการออกแบบ	24
3.1 แรงภายในและการกระจายความเค้นบนหน้าตัดคาน	25
3.2 ลักษณะการโก่งตัวของคานช่วงเดียวและการเสริมเหล็ก	26
3.3 ลักษณะการโก่งตัวของคานยื่นและการเสริมเหล็ก	26
3.4 ลักษณะการโก่งตัวของคานต่อเนื่องและการเสริมเหล็ก	27
3.5 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียวภายใต้น้ำหนักบรรทุก	28
3.6 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน	29
3.7 คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม	31
3.8 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน	34
4.1 การแตกร้าวของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุก	48
4.2 การวิบัติของคานภายใต้แรงเฉือนและการเสริมเหล็กต้านทานแรงเฉือน	49
4.3 การยึดปลายหรือการงอปลายเหล็กเสริม	55
4.4 หน่วยแรงยึดหน่วง	56

4.5 ความยาวระยะฝั่งของเหล็กเสริม	58
4.6 การรับน้ำหนักของคานรับพื้นยื่น	61
5.1 การเลือกรูปจากการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว	67
5.2 ลักษณะแผ่นพื้นและการพิจารณาหาแรงภายในแผ่นพื้นจากทางด้านสั้น	68
5.3 การเสริมเหล็กพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว	69
5.4 การเลือกรูปจากการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้นเสริมเหล็กสองทาง	74
5.5 การแบ่งพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง	75
5.6 ความต่อเนื่องของแผ่นพื้นทั้ง 5 กรณี	76
5.7 การเสริมเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง	77
5.8 การถ่ายน้ำหนักลงคานรองรับ	78
5.9 ลักษณะและการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูป	82
5.10 พื้นวางบนดิน	83
5.11 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก	84
6.1 รูปแบบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	92
6.2 กำลังรับน้ำหนักของเสาสั้น	93
6.3 ลักษณะการวิบัติของเสา	94
6.4 เสาสั้นรับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดร่วมกันอันเกิดจากแรงเยื้องศูนย์กลาง	102
6.5 กราฟปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram)	103
6.6 กราฟออกแบบเสาแบ่งช่วงตามระยะเยื้องศูนย์กลาง	103
6.7 หน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	104
6.8 ลักษณะการ โกงตัวและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสา	113
7.1 ประเภทของฐานราก	116
7.2 รูปแบบของฐานราก	117
7.3 การแผ่กระจายของแรงดันดินใต้ฐานราก	118
7.4 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์ดัดและแรงยึดหน้าวง	120
7.5 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือน	121
7.6 การเสริมเหล็กในฐานราก	122
7.7 รูปแบบหรือรูปทรงของฐานรากจากการจัดวางกลุ่มเสาเข็มแบบสมมาตร	136
7.8 การกระจายน้ำหนักของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	137
7.9 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์ดัดและแรงยึดหน้าวง	138
7.10 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนและแรงเฉือนในฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเกณฑ์ความคาดเคลื่อน สำหรับมวลต่อเมตรของเหล็กเสริม	8
1.2 กลสมบัติของเหล็กเสริมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม	9
2.1 น้ำหนักของวัสดุก่อสร้าง	12
2.2 น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคาร (ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522)	13
2.3 แรงลมสำหรับส่วนของอาคาร (ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522)	14
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์และแรงเฉือน	20
2.5 ค่าอัตราส่วน โมดูลัส : n	24
4.1 หน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้	57
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ (c)	76
7.1 กำลังแบกทานของดิน ตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร ปี พ.ศ. 2522	119
7.2 เสาค้ำคอนกรีตอัดแรง	134



สัญลักษณ์

A_c	: เนื้อที่คอนกรีตในเสาปลอกเกลียว วัดจากขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว
A_g	: พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
A_s	: พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง
A_s'	: พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด
A_{sB}	: ปริมาณเหล็กเสริมทางด้านสั้นของฐานราก
A_{st}	: พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นทั้งหมดในเสา
A_s'	: พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันร้าว
A_v	: พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
b	: ความกว้างของคาน
B	: ความกว้างด้านสั้นของฐานราก
c	: สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์สำหรับคานและพื้นต่อเนื่องหรือแผ่นพื้นสองทาง
C	: แรงอัดที่กระทำบนหน้าตัดของส่วนโครงสร้าง
C_c	: แรงอัดที่รับโดยคอนกรีตบนหน้าตัดของส่วนโครงสร้าง
C_s'	: แรงอัดที่รับโดยเหล็กเสริมบนหน้าตัดของส่วนโครงสร้าง
d	: ความลึกประสิทธิผล (จากขอบผิวบนด้านรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมรับแรงดึง)
d'	: ระยะจากขอบผิวบนด้านรับแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมรับแรงอัด
d_b	: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม
D	: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาหน้าตัดกลม
D_c	: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างขอบนอกเหล็กปลอกของเสาปลอกเกลียว
D_s	: ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างศูนย์กลางเหล็กยื่นของเสาปลอกเกลียว
DL	: น้ำหนักบรรทุกคงที่
e	: ระยะเยื้องศูนย์กลาง
e_b	: ระยะเยื้องศูนย์กลางสมดุล
E_c	: โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (คอนกรีตธรรมดา : $E_c = 15,100\sqrt{f_c'}$; กก./ซม. ²)
E_s	: โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ($E_s = 2.04 \times 10^6$; กก./ซม. ²)
f_a	: หน่วยแรงอัดตามแนวแกน
f_b	: หน่วยแรงคัด
f_c	: หน่วยแรงอัดคอนกรีต หรือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต
f_c'	: หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต

- f_r : โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต ($f_r = 2.0\sqrt{f_c'}$; กก./ซม.³)
- f_c : หน่วยแรงที่ยอมให้ของแกนเหล็กรูปพรรณ
- f_s : หน่วยแรงดึง หรือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม
- f_s' : หน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด
- f_v : หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
- f_y : หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม
- F_a : หน่วยแรงอัดตามแนวแกนที่ยอมให้ของเสา
- F_b : หน่วยแรงคดตามแนวแกนที่ยอมให้ของเสา
- h : ความสูงของเสา
- I : โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
- I_g : โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมด
- jd : ช่วงแขนของ โมเมนต์
- k : ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ
- kd : ระยะตำแหน่งของแกนสะเทิน (วัดจากผิวบนด้านรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน)
- K : สติเฟเนสการคัด : $\frac{EI}{L}$
- L : ด้านยาวของแผ่นพื้น
- LL : น้ำหนักบรรทุกจร
- m : อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของแผ่นพื้น
- m : อัตราส่วน : $\frac{f_y}{0.85f_c'}$
- M : โมเมนต์คัด
- M_t : โมเมนต์บิด
- n : อัตราส่วน โมดูลัส : $\frac{E_s}{E_c}$
- P : แรงอัดตามแนวแกน
- P_b : แรงอัดตามแนวแกนในสภาวะสมดุล
- P' : กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม หรือแรงดันของเสาเข็ม
- r : รัศมีใจเรชั่น
- r_j : อัตราส่วนระหว่าง $\sum \frac{Eic}{Lc}$ ต่อ $\sum \frac{Elg}{Lg}$ ที่จุดต่อ j
- R : ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ หรือตัวคูณลดกำลังเสาชะลูด
- s : ระยะห่างของเหล็กผูกตั้ง หรือเหล็กปลอก
- S : ด้านสั้นของแผ่นพื้น หรืออัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของฐานราก

- t : ความหนาของแผ่นพื้นหรือส่วนของโครงสร้าง
 T : แรงบิด
 u : หน่วยแรงยึดหน้าวง หรือหน่วยแรงยึดหน้าวงที่ยอมให้
 v : หน่วยแรงเฉือน
 v_c : หน่วยแรงเฉือนของคอนกรีต
 V : แรงเฉือน
 V_c : กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยคอนกรีต
 V', V_s : กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
 w : น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่ต่อหน่วยความยาว
 α : มุมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกับแกนตามยาวของส่วน โครงสร้าง
 \mathcal{E}_c : หน่วยการหดตัวของคอนกรีต
 \mathcal{E}_s : หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง
 \mathcal{E}'_s : หน่วยการหดตัวของเหล็กเสริมรับแรงอัด
 \mathcal{E}_y : หน่วยการยืดหดตัวที่จุดครากของเหล็กเสริม
 ρ : อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของคาน
 ρ' : อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของคาน
 ρ_b : อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมของคานในสภาวะสมดุล
 ρ_g : อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา
 ρ_s : อัตราส่วนของปริมาตรเหล็กปลอกเกลียวต่อปริมาตรของแกนเสาปลอกเกลียว
 \sum_o : เส้นรอบรูปของเหล็กเสริม

บทที่ 1

คอนกรีตและเหล็กเสริม

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วย วัสดุสองชนิดคือคอนกรีตและเหล็กเสริม ทำหน้าที่รับน้ำหนักหรือรับแรงที่กระทำต่อโครงสร้างร่วมกัน แต่คอนกรีตและเหล็กเสริมมีคุณสมบัติต่างกัน ดังนั้น เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาใช้งานร่วมกัน สิ่งที่สำคัญคือความรู้ด้านคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งวิชาพื้นฐาน เช่น คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete technology) และ วัสดุวิศวกรรม (Materials engineering) ช่วยให้ทราบถึงลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองชนิด และวิชาการทดสอบวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials and testing) ทำให้เข้าใจถึงกลสมบัติและกลไกในการรับแรงของวัสดุ วิชาพื้นฐานเหล่านี้เป็นวิชาที่ศึกษาก่อนวิชาออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่จะนำไปใช้ต่อไป

1.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite materials) ประกอบด้วย วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และน้ำ ผสมกับมวลรวม ได้แก่ หิน หรือกรวด เมื่อนำมาผสมรวมกันจะอยู่ในสภาพเหลวช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปใช้เทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง และพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น คุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญของคอนกรีต ได้แก่

1.1.1 กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') เป็นคุณสมบัติด้านกำลังที่สำคัญที่สุด เนื่องจากใช้ประกอบการคำนวณโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนกำลังดึง กำลังดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ขึ้นอยู่กับกำลังอัดหรือเป็นสัดส่วนกับกำลังอัด กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นกำลังด้านอื่นๆ ของคอนกรีตก็จะสูงตามไปด้วย กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ กำลังของมอร์ตาร์ กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับผิวของมวลรวม นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่น คุณสมบัติของวัสดุผสม การทำคอนกรีต การบ่มคอนกรีต และการทดสอบ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2536) โดยปกติการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต และควบคุมการทำคอนกรีต ตลอดจนการบ่มคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนการทดสอบกำลังอัดจะเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่แสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตโดยตรวจสอบจากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบอื่นๆ ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต โดยคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) เสนอแนะว่า การประเมิน

คุณภาพของคอนกรีตโดยปกติจะพิจารณาจากกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ซึ่งถือเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่ใช้จริงในโครงสร้างอาคาร การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัดจะกระทำอย่างน้อยวันละครั้ง หรืออย่างน้อยหนึ่งครั้งต่อการเทคอนกรีตที่ติดต่อกันทุกๆ 50 ลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทดสอบที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 2 แบบ คือรูปทรงกระบอกเป็นมาตรฐานของประเทศอเมริกา ASTM C 192 และทรงลูกบาศก์เป็นมาตรฐานของประเทศอังกฤษ BS 1881 Part 108 ดังรูปที่ 1.1 กำลังอัดของคอนกรีตหาได้จากค่ากำลังอัดสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ($f_c' = P/A$) จากการกดตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งแตกหักไม่สามารถรับแรงต่อไปได้ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 1.2

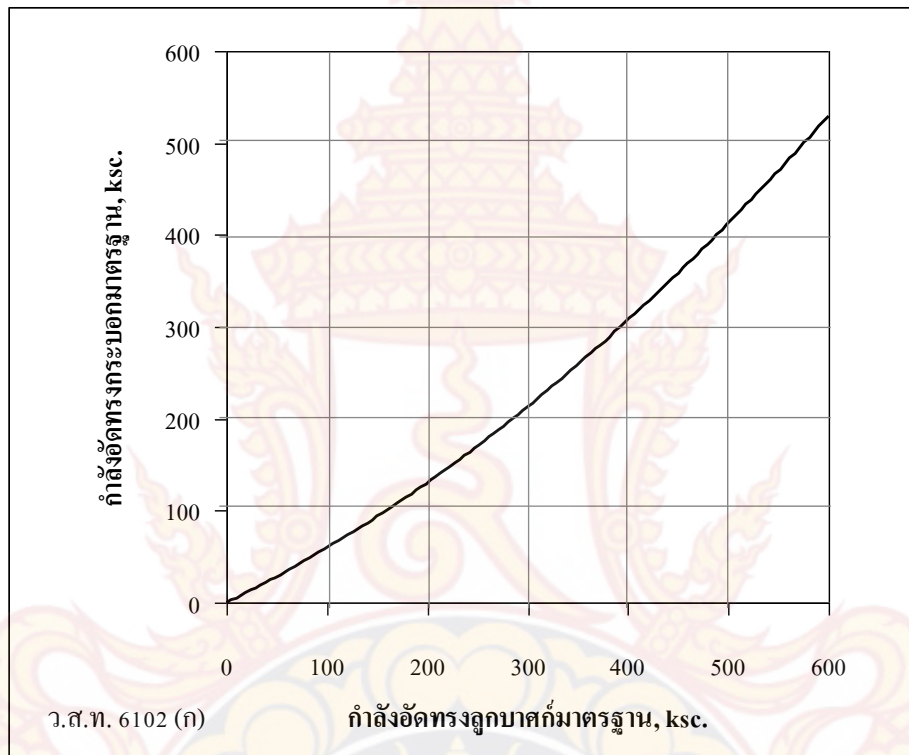


รูปที่ 1.1 ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์



รูปที่ 1.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ความแตกต่างด้านรูปทรงของตัวอย่างทดสอบทั้งสองแบบเป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมีค่าแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าตัวอย่างทดสอบจะมีส่วนผสมเดียวกัน หรือเก็บตัวอย่างพร้อมกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม โดยกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของทรงลูกบาศก์ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6102 (ก) เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์ สำหรับแปลงกำลังอัดตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์

ในปัจจุบันการทดสอบกำลังอัดมีแนวโน้มใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามแบบอเมริกันหรือมาตรฐาน ว.ส.ท. เป็นหลัก และการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตส่วนใหญ่ใช้มาตรฐานของอเมริกา เช่นเดียวกัน อีกทั้งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่าทรงลูกบาศก์หลายประการ เช่น การหล่อและการทดสอบกระทำในแนวตั้งซึ่งเป็นลักษณะของการเทและรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตในงานจริงทั่วไป จึงถือว่าคอนกรีตทรงกระบอกมีความเหมือนจริงมากกว่าคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ทิศทางการเทคอนกรีต นอกจากนี้ คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่า และการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่างการทดสอบน้อยกว่า (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

การเตรียมตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกก่อนเข้าเครื่องกดเพื่อหาค่ากำลังอัด จะต้องทำผิวด้านรับแรงอัดให้เรียบเพื่อสามารถกระจายแรงอัดได้สม่ำเสมอเต็มพื้นที่หน้าตัดขณะทดสอบ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้วิธีเคลือบผิวด้วยกำมะถัน (Capping) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 617 หากผิวตัวอย่างทดสอบไม่เรียบหรือเอียงเพียง 0.25 มิลลิเมตร อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และความหนาของ Capping ควรมีความหนาประมาณ 1.5 ถึง 3.0 มิลลิเมตร หาก Capping หนามากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2540) การทำแท่งคอนกรีตทดสอบให้ผิวเรียบด้วยการเคลือบผิวด้วยกำมะถันก็เพื่อมิให้มีผลกระทบโดยตรงต่อผลการทดสอบกำลังอัดในการประเมินคุณภาพของคอนกรีต งานศึกษาผลกระทบการใช้แผ่นยางแทนกำมะถันเคลือบผิวตามมาตรฐาน ASTM C 617 ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัด 180 กก./ซม.², 240 กก./ซม.² และกำลังอัด 320 กก./ซม.² เป็นขอบเขตในการศึกษา และแผ่นยางที่ใช้มีความหนาประมาณ 15 มิลลิเมตร ได้มาจากยางล้อรถบรรทุกที่หมดสภาพใช้งานแล้ว แต่ยังคงมีความยืดหยุ่นตัว และมีความแข็ง (shore A) เท่ากับ 65 จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ผลการทดสอบพบว่าการใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีตในการทดสอบกำลังอัดมีผลให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานที่ใช้กำมะถันเคลือบผิวคอนกรีตร้อยละ 7.7 ดังนั้น การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีตจะใช้ตัวคูณปรับแก้กำลังอัดเท่ากับ 0.923 เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับการทดสอบตามมาตรฐาน ขณะที่กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ไม่ใช้วัสดุใดๆ เคลือบผิวคอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยลดลงต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานร้อยละ 18.5 ถึงร้อยละ 25.7 เนื่องจากความไม่ราบเรียบของผิวตัวอย่างทดสอบหรือผิวตัวอย่างทดสอบมีความลาดเอียง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แผ่นยางจากล้อรถบรรทุกแทนกำมะถันเคลือบผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (สาโรจน์ คำรงค์สีล, 2559) ตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม และแผ่นยางที่ใช้ในการศึกษาวิจัยแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างทดสอบและแผ่นยางรองผิวทดสอบกำลังอัด

1.1.2 กำลังดึงของคอนกรีต การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยตรงจากการดึงตัวอย่างทดสอบ ลักษณะเดียวกับการทดสอบเหล็กเสริม ไม่มีมาตรฐานทดสอบเนื่องจากทำได้ยาก เกิดหน่วยแรงจากการยึดจับตัวอย่างทดสอบ และเกิดการแตกหักบริเวณหัวจับ ทำให้ผลทดสอบที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้การทดสอบทางอ้อมสองวิธีคือ วิธีทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และการทดสอบโดยการตัด ซึ่งสามารถทำได้สะดวกรวดเร็ว การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 496 ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกมาตรฐาน วางตามยาวในแนวนอนบนเครื่องทดสอบกำลังอัด และใช้ไม้อัดหนา 3 มิลลิเมตร วางตามยาวของตัวอย่างทดสอบ เพื่อเป็นตัวส่งถ่ายแรง ให้แรงอัดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบแตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 การทดสอบแรงดึงแบบวิธีผ่าซีก

โดยทั่วไปคอนกรีตธรรมดาจะมีกำลังดึงที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบผ่าซีกประมาณร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 12 ของกำลังอัดคอนกรีต อย่างไรก็ตาม งานศึกษาวิจัยสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนกากเคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก บดละเอียดจนมีอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปผสมกับมวลรวมและวัสดุผสมอื่นในการทำคอนกรีตและทำการหล่อตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ใช้กากเคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานเท่ากับ 450 กก./ม.³ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังดึงจากการทดสอบแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ร้อยละ 19 ของกำลังอัด ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป (ชนพล เหล่าสมาธิกุล และชัย จาคูรพิทักษ์กุล, 2551)

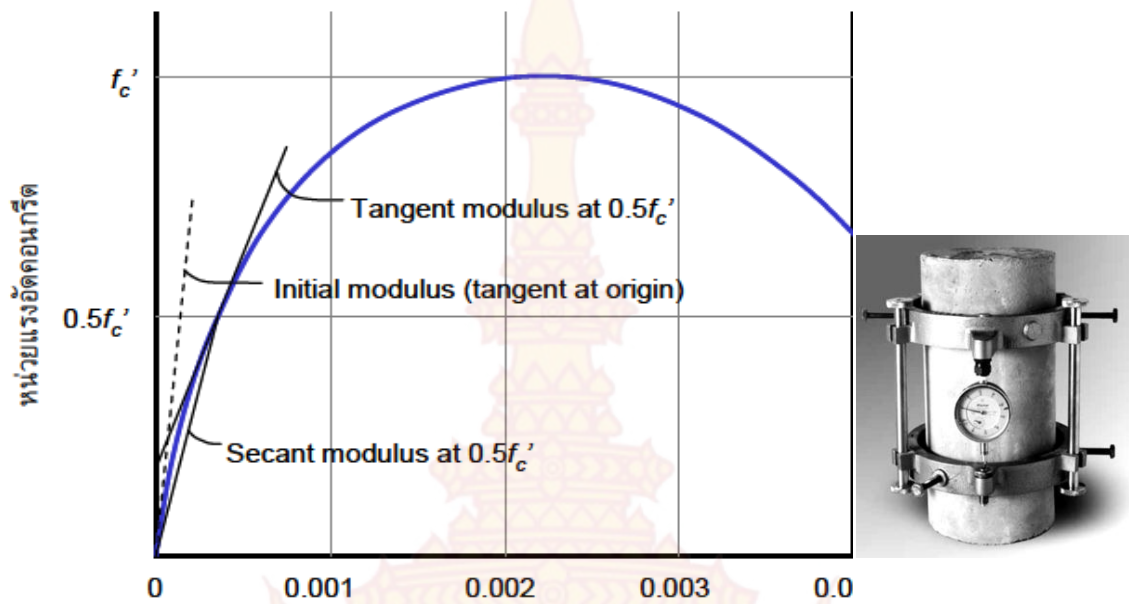
การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีการตัด (Flexural tensile test) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 78 ใช้ตัวอย่างทดสอบในรูปของคานคอนกรีตขนาด 15x15x50 เซนติเมตร ให้แรงค้ำตัวอย่างทดสอบจากการกดน้ำหนักแบบ 3 จุด (Third point loading) จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบ

แตกหัก ดังรูปที่ 1.6 คำนวนหาหน่วยแรงดึงซึ่งเกิดสูงสุดที่บริเวณท้องคาน ซึ่งเรียกว่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture; f_r) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ว.ส.ท. 1008 กำหนดค่าโมดูลัสการแตกร้าว : $f_r = 2.0\sqrt{f_c}$ (กก./ซม.²) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดัดของคอนกรีต ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยในลักษณะบดรวมต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีต พบว่า เถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก มีความละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยคอนกรีตยังคงมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดัดสูงกว่าค่ากำหนดมาตรฐาน ว.ส.ท. (สาโรจน์ คำรังสีล และสุวิมล สัจจวานิชย์, 2550) สอดคล้องกับการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดัดของคอนกรีตสูงกว่ามาตรฐาน ว.ส.ท. เช่นกัน (สาโรจน์ คำรังสีล, 2558) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบในงานคอนกรีตโครงสร้าง



รูปที่ 1.6 การทดสอบแรงดึงโดยวิธีการดัด

1.1.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่งของคอนกรีต เพราะใช้ประกอบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และหาค่าการโก่งตัวของโครงสร้างคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริง เนื่องจากการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดขณะเริ่มต้นทดสอบจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อย และจะโค้งเพิ่มมากขึ้นตามแรงอัดที่เพิ่มขึ้น การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 469 ใช้ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก โดยติดเครื่องมือที่เรียกว่า Compressometer เพื่อวัดการหดตัวของตัวอย่างทดสอบขณะที่ให้แรงอัดบนตัวอย่างทดสอบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตและการติด Compressometer ในตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 1.7



ความเครียด, ซม./ซม. (คู่มือการทดสอบหิน ทราซ และคอนกรีต, 2552)

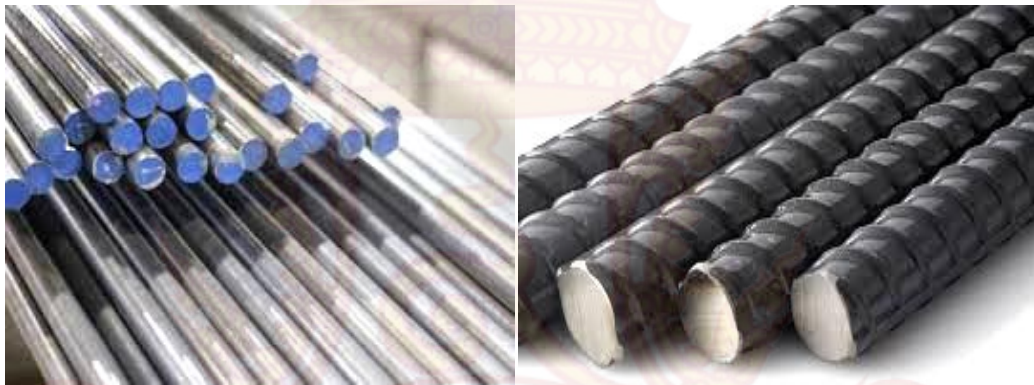
รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตและการวัด Compressometer

ในการออกแบบทั่วไป ACI Building Code 318 และ ว.ส.ท. 6202 กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) คำนวณจาก $4,270w^{1.5}\sqrt{f'c}$ โดยที่ $f'c$ มีหน่วยเป็น กก./ซม.² สำหรับคอนกรีตธรรมดาให้ใช้น้ำหนัก (w) เท่ากับ 2.323 ตัน/ม.³ ดังนั้น เมื่อแทนค่า (w) ลงในสูตรจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต : $E_c = 15,100\sqrt{f'c}$

งานวิจัยการใช้เถ้าชีวมวลในงานคอนกรีต ศึกษาผลกระทบของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อกำลังประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยใช้เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าสามารถใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน ว.ส.ท.แนะนำ โดยไม่มีผลกระทบในแง่ลบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการใช้เถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีต (อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการใช้วัสดุทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้ โดยที่คอนกรีตยังคงมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตาม การนำเถ้าชีวมวลไปใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยังต้องการงานวิจัยอีกมากทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของคอนกรีต ตลอดจนการทดสอบพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีต เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการออกแบบต่อไป

1.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) เป็นโลหะผสมเหล็กกับคาร์บอนและมีส่วนผสมของธาตุอื่นบ้างพอประมาณ เช่น กำมะถัน แมงกานีส และฟอสฟอรัส แต่มีปริมาณคาร์บอนต่ำประมาณร้อยละ 0.30 โดยน้ำหนัก จึงเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีความอ่อนแต่มีความเหนียวและแกร่งมาก เหล็กผลิตขึ้นรูปแบบรีดร้อน (Hot-rolled process) โดยการหลอมแท่งเหล็กแล้วรีดด้วยลูกกลิ้งขึ้นรูปตามความต้องการ เหล็กเสริมคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างมีทั้งลักษณะเส้นกลมผิวเรียบ (Round bars; RB) และเหล็กข้ออ้อย (Deformed bars; DB) ดังรูปที่ 1.8 โดยมีหลายขนาดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับมวลต่อเมตรของเหล็กเสริมทั้งสองที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.8 เหล็กกลมผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อย

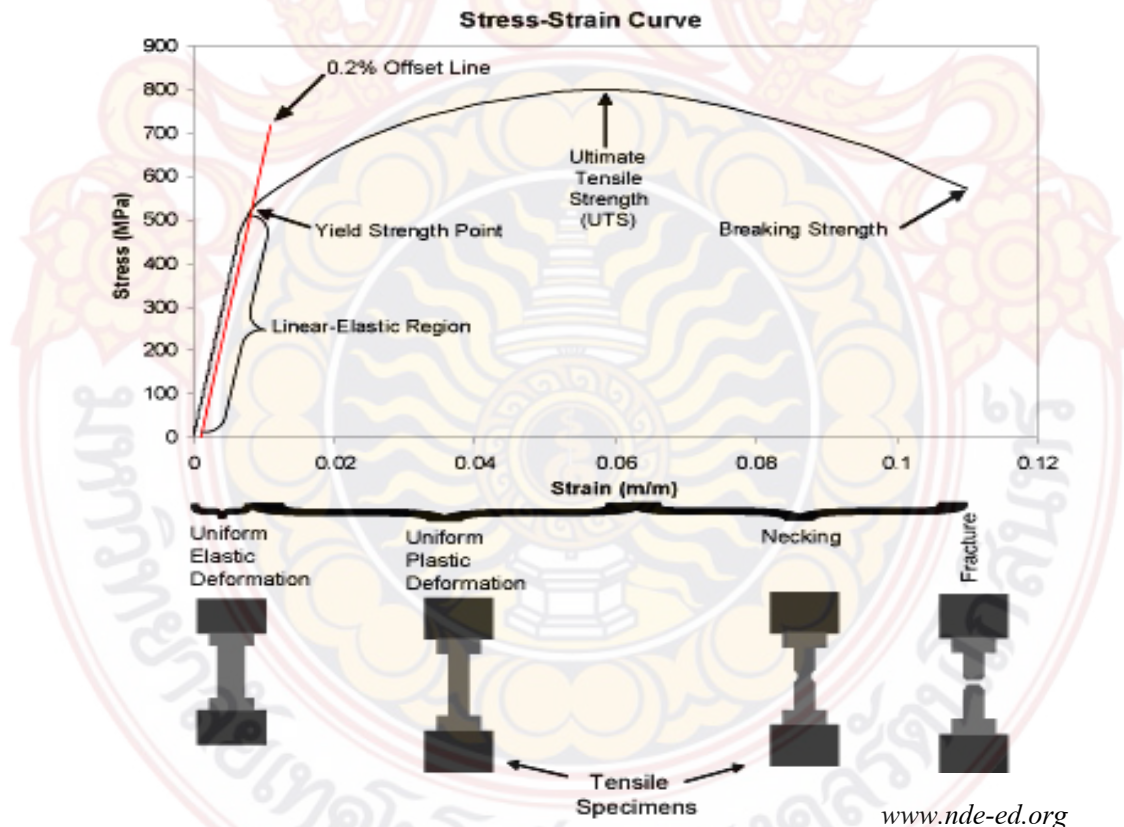
ตารางที่ 1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับมวลต่อเมตรของเหล็กเสริม

ชื่อขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง; มม.)		มวลต่อเมตร (กิโลกรัม)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน สำหรับมวลต่อเมตร	
เหล็กเส้นกลม	เหล็กข้ออ้อย		เฉลี่ยร้อยละ	แต่ละเส้นร้อยละ
RB 6	-	0.222	± 5.0	± 10.0
RB 9	-	0.499		
RB 12	DB 12	0.888		
RB 15	-	1.387		
-	DB 16	1.578		
RB 19	-	2.226	± 3.5	± 6.0
-	DB 20	2.466		
RB 22	DB 22	2.984		
RB 25	DB 25	3.853		
RB 28	DB 28	4.834		

คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กเสริม ได้แก่ กำลังคราก (Yield strength; f_y) กำลังประลัย (Ultimate strength; f_u) ระยะยืด (Elongation) และ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (Young's modulus; E_s) ซึ่งเหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 20-2543) ชั้นคุณภาพ SR 24 และเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 24-2548) ชั้นคุณภาพ SD 30, SD 40 และ SD 50 จะต้องมีการสมบัติเป็นไปตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 1.2 และมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) กับหน่วยการยืดตัว (Strain) ของเหล็กเสริมซึ่งได้จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 1.9

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

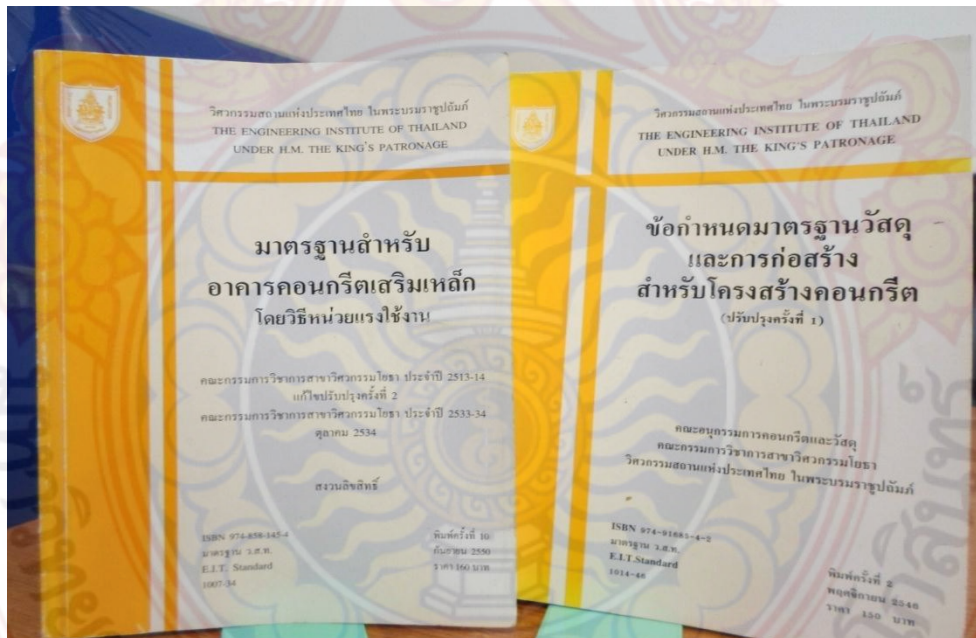
คุณสมบัติ	ชนิดของเหล็กเสริม			
	เหล็กเส้นกลม	เหล็กข้ออ้อย		
ชั้นคุณภาพ	SR 24	SD 30	SD 40	SD 50
ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (f_y) ไม่น้อยกว่า; กก./ชม. ²	2,400	3,000	4,000	5,000
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (f_u) ไม่น้อยกว่า; กก./ชม. ²	3,900	4,900	5,700	6,300
ความยืดในช่วง 5 d ไม่น้อยกว่า; ร้อยละ	21	17	15	13
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s); กก./ชม. ²	2,040,000			



รูปที่ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) กับหน่วยการยืดตัว (Strain) ของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ในทางปฏิบัติเพื่อให้แน่ใจว่าเหล็กเสริมมีขนาด มีคุณภาพตามที่กำหนดไว้ในแบบรูปรายการ และเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมหรือไม่ จำเป็นต้องทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมก่อนนำมาใช้งาน มาตรฐานอุตสาหกรรมมีเกณฑ์การชักตัวอย่างสำหรับทดสอบโดยวิธีการสุ่มจากเหล็กเสริมมัดต่างๆ ในรุ่นเดียวกัน 5 มัด มัดละ 1 เส้น เพื่อทำการตรวจสอบความยาว เมื่อทำการตรวจสอบความยาวแล้วให้ตัดส่วนที่ตรงเป็นชิ้นตัวอย่าง เส้นละ 1 ชิ้นตัวอย่าง ความยาวประมาณ 1.50 เมตร เพื่อตรวจสอบลักษณะทั่วไป และหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสำหรับมวลต่อเมตร จากนั้นให้นำเหล็กไปทดสอบกลสมบัติต่อไป

หนังสือมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน และข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต โดยคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ รูปที่ 1.10 อธิบายคุณลักษณะมาตรฐานของวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมไว้โดยละเอียด จึงเหมาะกับ นิสิต และนักศึกษา ที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อใช้อ้างอิงตลอดการศึกษาวิชาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้ ยังเหมาะกับวิศวกรควบคุมงาน และผู้เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างที่จะใช้เป็นคู่มือหรือเป็นมาตรฐานกลางในการทำงาน เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดี มีความมั่นคงแข็งแรง และปลอดภัยในการใช้งาน



รูปที่ 1.10 หนังสือมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

บทที่ 2

การวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบ

การคำนวณออกแบบโครงสร้างมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วน ส่วนแรกคือการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural analysis) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางโครงสร้างที่ตอบสนองต่อน้ำหนักบรรทุก หรือแรงต่างๆ ที่กระทำกับโครงสร้างนั้น เช่น แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด เป็นต้น ส่วนที่สองคือการออกแบบโครงสร้าง (Structural design) เพื่อให้ได้ขนาดโครงสร้างที่สามารถต้านทานแรงต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้อย่างมั่นคงปลอดภัย เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง น้ำหนักบรรทุกและแรงต่างๆ ที่กระทำกับโครงสร้าง การสร้างแบบจำลองทางโครงสร้าง การจัดวางน้ำหนักบรรทุก และการวิเคราะห์โครงสร้าง ตลอดจนหลักการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สมมติฐานในการออกแบบ และค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

2.1 น้ำหนักบรรทุกและแรงที่กระทำกับโครงสร้าง

น้ำหนักบรรทุกและแรงที่กระทำกับ โครงสร้าง โดยทั่วไปจะพิจารณาในรูปของแรงแบบสถิต (Static loads) ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นน้ำหนักแบบจุด (Point load) และน้ำหนักแผ่แบบสม่ำเสมอ (Uniform load) ก็ได้ น้ำหนักบรรทุกและแรงที่กระทำกับ โครงสร้าง ประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead loads) น้ำหนักบรรทุกจร (Live loads) แรงลม (Wind loads) แรงกระแทก (Impact loads) และแรงแผ่นดินไหว (Earthquake loads) ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างต้องพิจารณาให้ส่วนของ โครงสร้าง นั้นมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุใช้งาน

2.1.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่หรือน้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead loads) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีตำแหน่งของการกระทำคงที่ตลอดเวลาและไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ได้แก่ น้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง เช่น น้ำหนักของแผ่นพื้น คาน เสา เป็นต้น หรือน้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์อาคารต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่กับที่ เช่น ผนัง วัสดุปูพื้น ฝ้าเพดาน และวัสดุผนังหลังคา เป็นต้น โดยปกติจะสมมติให้น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอกระทำบนส่วน โครงสร้าง ซึ่งอาจมีหน่วยน้ำหนักเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตร (กก./ม.²) สำหรับคำนวณออกแบบแผ่นพื้น และมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเมตร (กก./ม.) สำหรับคำนวณออกแบบคาน ตารางที่ 2.1 แสดงค่าโดยประมาณของน้ำหนักบรรทุกคงที่ตามชนิดของวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ โครงสร้าง

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักของวัสดุก่อสร้าง (มกค. จีรวัชรเวช, 2549)

น้ำหนักวัสดุ	กก./ม. ³
คอนกรีตปกติ	2,300
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2,400
เหล็ก	7,850
อิฐ	1,900
ไม้	500–1,200
น้ำหนักผนัง	กก./ม. ²
ผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นฉาบปูน	180
ผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่น	360
ผนังอิฐบล็อก	100 – 200
ฝาไม้ ไม้อัด รวมคร่าว	30 – 50
น้ำหนักวัสดุปูผิวและวัสดุถมหลังคา	กก./ม. ²
กระเบื้องปูพื้น	100
หินอ่อน หินแกรนิต	150
ซีเมนต์ขัดมัน	50
แผ่นพื้นสำเร็จรูปรวมคอนกรีตทับหน้าหนา 10 เซนติเมตร	240 – 260
พื้นไม้ รวมตง	30
กระเบื้องลอนคู่	14
กระเบื้องซีแพคโมเนีย	50
สังกะสี เหล็กกริดลอน	5
ฝ้าเพดาน	14 – 25

2.1.2 น้ำหนักบรรทุกจร (*Live loads*) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลง และตำแหน่งที่กระทำกับโครงสร้างตามกาลเวลา หรือน้ำหนักบรรทุกมีการเคลื่อนย้ายไปมาได้ เช่น น้ำหนักคนหรือสิ่งของบนอาคาร และน้ำหนักรถบรรทุกบนสะพาน ในที่จะกล่าวถึงเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรบนอาคาร (*Building loads*) เป็นน้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำบนพื้นอาคาร โดยสมมติให้แผ่กระจายแบบสม่ำเสมอ และขนาดของน้ำหนักขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและประเภทของอาคาร ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522 กำหนดให้ใช้น้ำหนักบรรทุกจรของอาคารแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคาร (ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522)

ลักษณะการใช้งานและประเภทของอาคาร	น้ำหนัก
หลังคา	50 กก./ม. ²
กันสาด	100 กก./ม. ²
ที่พักอาศัย ห้องน้ำ ห้องส้วม	150 กก./ม. ²
อาคารชุด หอพัก โรงแรม	200 กก./ม. ²
สำนักงาน ธนาคาร	250 กก./ม. ²
อาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย โรงเรียน	300 กก./ม. ²
ห้างสรรพสินค้า โรงแรมหรู หอประชุม	
ภัตตาคาร ที่จอดรถหรือที่เก็บรถยนต์นั่ง	400 กก./ม. ²
คลังสินค้า พิพิธภัณฑ์ อัจฉรินทร์ โรงงานอุตสาหกรรม	
โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสาร	500 กก./ม. ²
ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด	600 กก./ม. ²
ที่จอดรถหรือที่เก็บรถบรรทุกเปล่า และรถอื่นๆ	800 กก./ม. ²

2.1.3 แรงลม (Wind loads) เมื่อที่ตั้งของโครงสร้างมีทิศทางขวางทางลม พลังงานจลน์ของลม (Kinetic energy) จะเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ (Potential energy) เกิดเป็นแรงลม (Wind loads) กระทำกับโครงสร้าง ขนาดของแรงลมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (Density) ความเร็วลม (Velocity) ซึ่งแปรเปลี่ยนตามสภาพพื้นที่ และความสูงเหนือพื้นดิน ตลอดจนมุมที่กระทำและรูปร่างของโครงสร้าง ในการออกแบบให้โครงสร้างรับแรงลมสามารถคำนวณค่าแรงลมโดยวิธีสถิต (Static) ซึ่งสมมติให้แรงลมกระทำอย่างสม่ำเสมอต่อโครงสร้างด้านรับแรงลม และแรงลมสามารถกระทำได้ทุกทิศทาง โดย American Society of Civil Engineers (ASCE) เสนอแรงลม (q) ที่กระทำกับพื้นที่โครงสร้างและตั้งฉากกับทิศทางความเร็วลม ดังนี้

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

เมื่อ p = ความหนาแน่นของอากาศ (1.2244 กก./ม.³)
 v = ความเร็วลม (ไมล์/ชั่วโมง หรือ กิโลเมตร/ชั่วโมง)
 หรือ $q(psf) = 0.00256[v(mph)]^2$
 $q(kg/m^2) = 0.00481[v(km/h)]^2$

กรุงเทพมหานครได้ออกข้อบัญญัติ พ.ศ. 2522 สำหรับใช้คำนวณออกแบบโครงสร้างเนื่องจากแรงลมซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แรงลมสำหรับส่วนของอาคาร (ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522)

ความสูงอาคาร	น้ำหนัก
อาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50 กก./ม. ²
อาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตรแต่ไม่เกิน 20 เมตร	80 กก./ม. ²
อาคารที่สูงไม่เกิน 20 เมตรแต่ไม่เกิน 40 เมตร	120 กก./ม. ²
อาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	160 กก./ม. ²

2.1.4 แรงกระแทก (Impact loads) การออกแบบโครงสร้างสะพานหรืออาคารจอดรถต้องคำนึงถึงแรงกระแทก เนื่องจากความไม่ราบเรียบของพื้นผิวและมีรอยต่อระหว่างสะพานกับคอสสะพานหรือทางลาดเชื่อมรอยต่อระหว่างชั้นของอาคารจอดรถ เป็นต้น โดยพิจารณาเพิ่มค่าน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุกด้วยตัวคูณประกอบแรงกระแทก (Impact factor: I) ดังนี้

$$I = \frac{50}{L + 125} \times 100 \quad \text{แต่ไม่เกินร้อยละ 30}$$

เมื่อ L = ความยาวของสะพาน มีหน่วยเป็นฟุต

2.1.5 แรงแผ่นดินไหว (Earthquake loads) แผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนก่อให้เกิดแรงกระทำทางด้านข้างของโครงสร้างอาคาร โดยขนาดของแรงแผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของความเร่งของพื้นดิน มวลน้ำหนัก และความแกร่ง (Stiffness) ของโครงสร้าง การวิเคราะห์หาแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยวิธีสถิต (Static) ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณที่กระทำต่อโครงสร้างทางด้านข้าง หรือค่าแรงเฉือน (V) ที่เกิดขึ้นที่ฐานรากของโครงสร้าง คำนวณจากสมการดังนี้

$$V = ZIKCSW$$

เมื่อ Z = Seismic coefficient ขึ้นอยู่กับเขตแผ่นดินไหว (Earthquake zone)

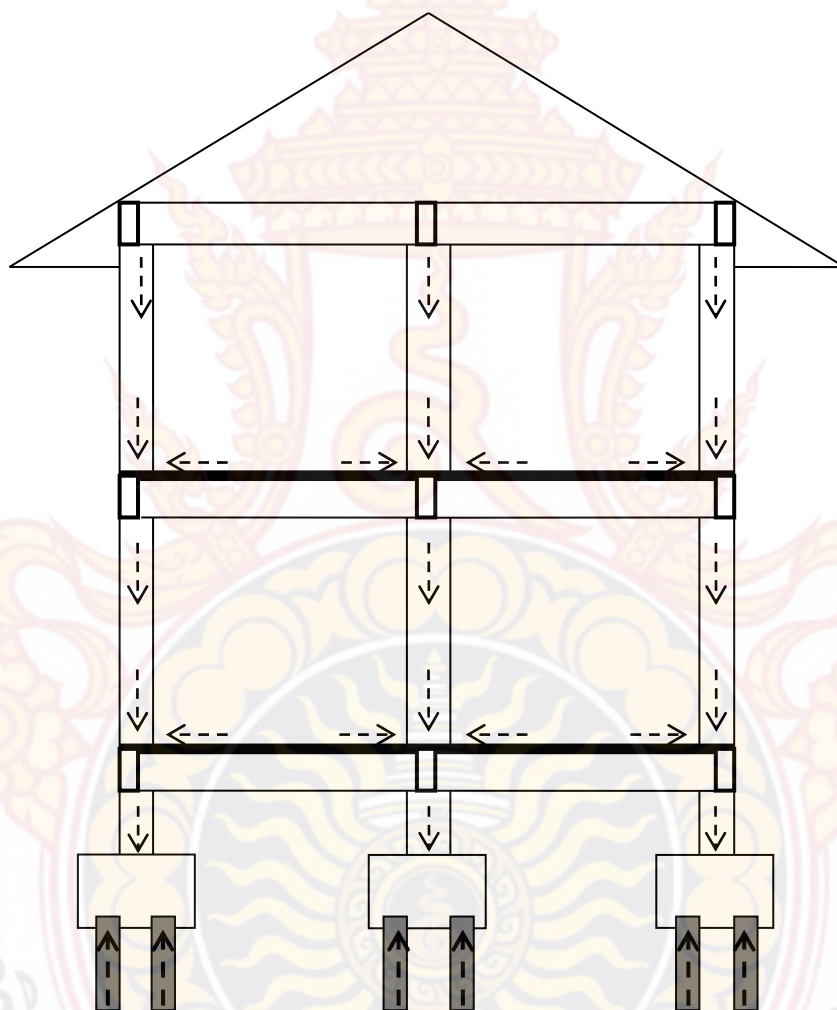
I = ตัวคูณแสดงความสำคัญในการใช้งาน, K = ตัวคูณซึ่งขึ้นกับรูปร่างโครงสร้าง

C = ค่าสัมประสิทธิ์การแกว่งของโครงสร้าง, W = น้ำหนักของ โครงสร้าง

S = ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของชั้นดินที่รองรับโครงสร้าง

2.2 แบบจำลองทางโครงสร้าง

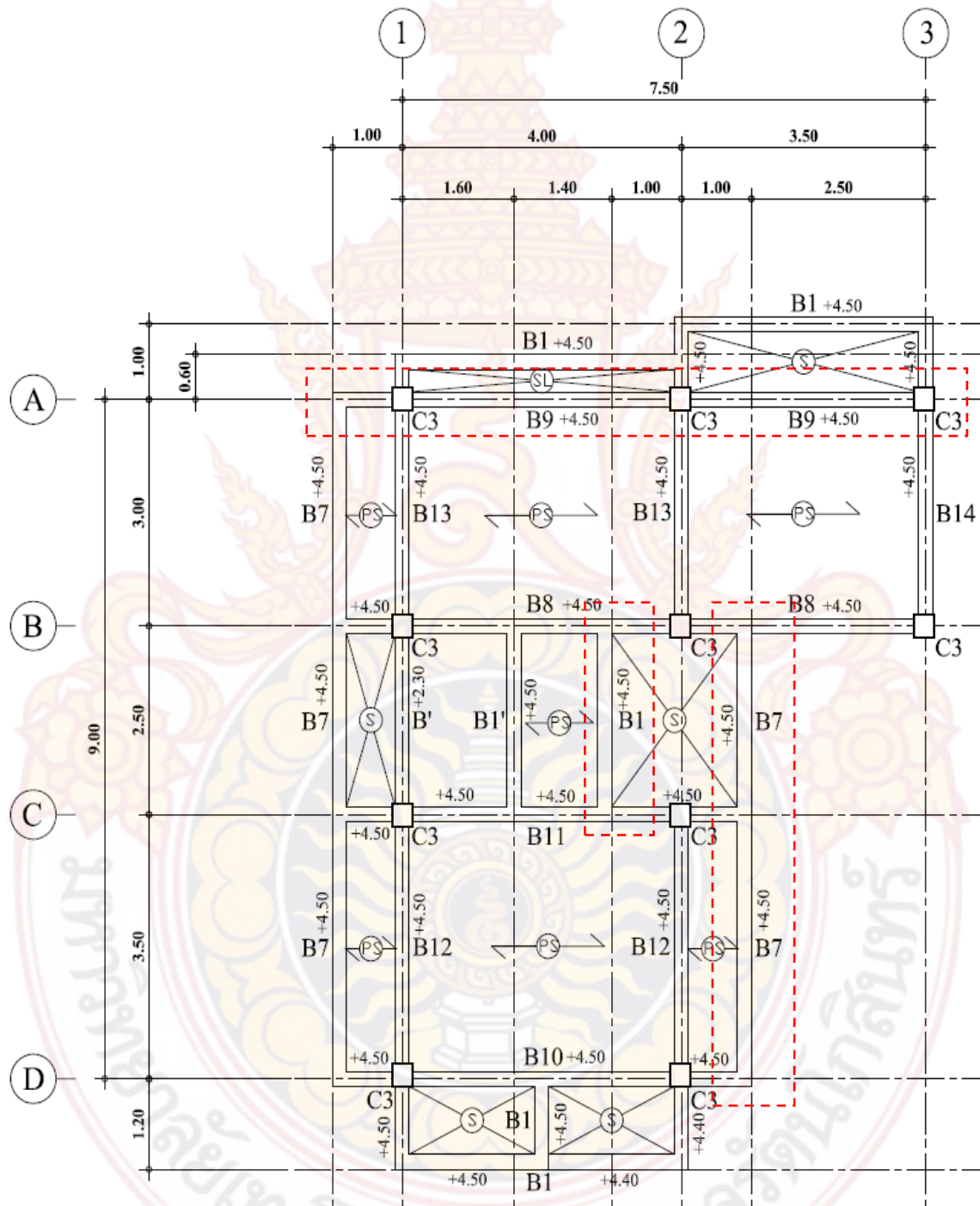
การสร้างแบบจำลองทางโครงสร้างที่สอดคล้องกับโครงสร้างจริงจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์และการตอบสนองพฤติกรรมทางโครงสร้างต่อการรับน้ำหนักถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง ระบบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ประกอบด้วย พื้น คาน เสา และฐานราก น้ำหนักหรือแรงที่กระทำกับโครงสร้างอาคารเริ่มจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ที่กระทำกับพื้นในแต่ละชั้นแล้วถ่ายน้ำหนักต่อไปยังคานรองรับ เสา และฐานราก ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1



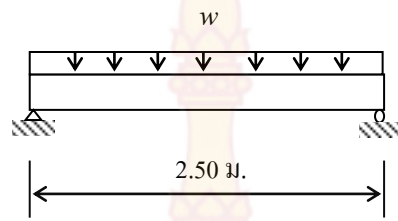
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองทางโครงสร้าง จากรูปที่ 2.2 เป็นแบบผังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อพิจารณาคาน B1, B7 และคาน B9 จะเห็นว่าคาน B1 เป็นคานช่วงเดียวและเป็นคานชอยหรือคานฝากมีฐานรองรับเป็นคานหลัก (คาน B8 และคาน B11 เป็นคานหลัก) จึงแสดงเป็นคานช่วงเดียว ดัง

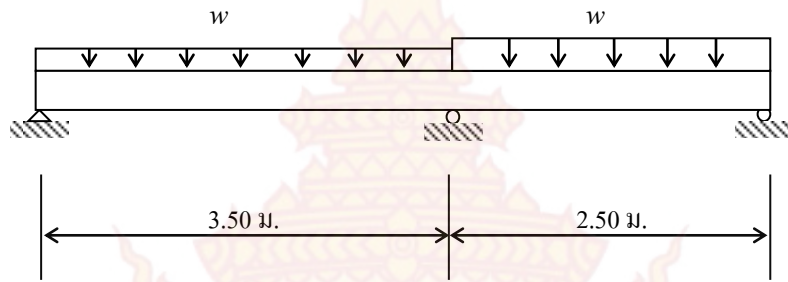
รูปที่ 2.3 (ก) ส่วนคาน B7 เป็นคานต่อเนื่องสองช่วงและเป็นคานชอยหรือคานฝาก มีฐานรองรับเป็นคานหลักเช่นกัน (คาน B10, คาน B11 และคาน B8 เป็นคานหลัก) จึงแสดงเป็นคานต่อเนื่องสองช่วง ดังรูปที่ 2.3 (ข) ขณะที่คาน B9 เป็นคานต่อเนื่องสองช่วงและเป็นคานหลักที่มีฐานรองรับเป็นเสา (C3) จึงควรพิจารณาเป็นโครงข้อแข็ง (Rigid frame) ดังรูปที่ 2.3 (ค) (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)



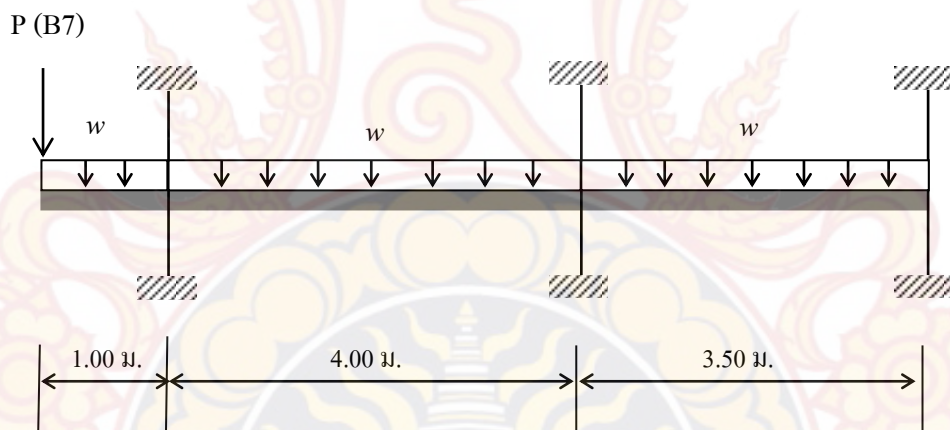
รูปที่ 2.2 ผังโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ก) คาน B1



(ข) คาน B7



(ค) คาน B9

รูปที่ 2.3 แบบจำลองทางโครงสร้าง คาน B1, B7 และคาน B9

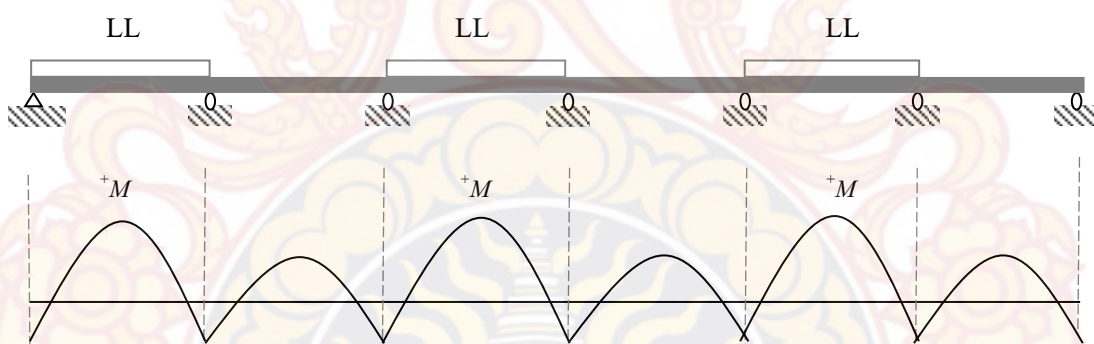
2.3 การจัดวางน้ำหนักบรรทุก

เมื่อสร้างจำลองแบบทางโครงสร้างและคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้างแล้ว นำน้ำหนักบรรทุกมาจัดวางบนโครงสร้างจำลองเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของแรงที่กระทำกับโครงสร้าง ได้แก่ แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และแรงบิด (ถ้ามี) สิ่งสำคัญคือการจัดวางน้ำหนักบรรทุกให้ได้ค่าสูงสุดสำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างนั้น โดยทั่วไปน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) ซึ่งเป็นน้ำหนักของโครงสร้างจะจัดวางเต็มทุกช่วงของโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4 (ก) ส่วนการวางน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ถ้า

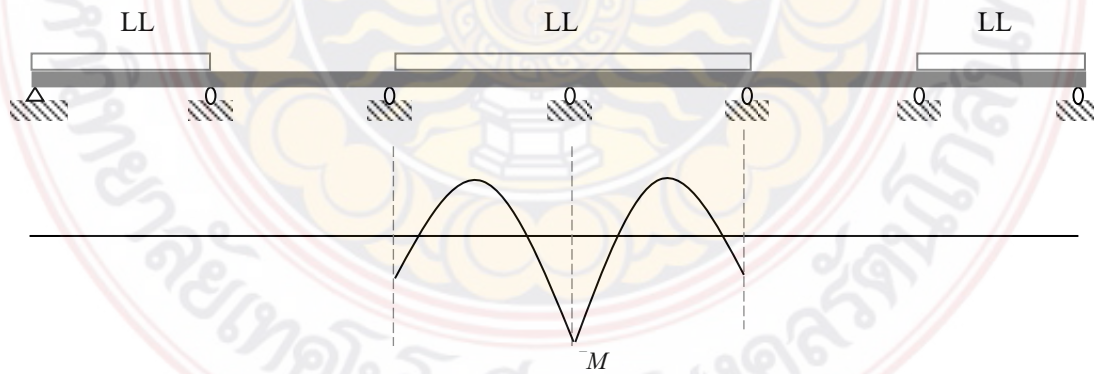
ต้องการหาโมเมนต์บวก (+M) สูงสุดที่ช่วงกึ่งกลางคานช่วงใดให้วางน้ำหนักเต็มช่วงโครงสร้างนั้นแล้วเว้นไว้ช่วงหนึ่ง (วางเต็มช่วงเว้นช่วง) สลับกันไปตลอดความยาวของโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4 (ข) กรณีที่ต้องการหาโมเมนต์ลบ (-M) สูงสุดที่บริเวณจุดต่อ (ฐานรองรับ) ช่วงใดให้วางน้ำหนักเต็มสองช่วงโครงสร้างนั้นแล้วเว้นช่วงถัดมา และวางเต็มช่วงเว้นช่วงสลับกันไปตลอดความยาวของโครงสร้างนั้น ดังรูปที่ 2.4 (ค) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกจรต่อน้ำหนักบรรทุกคงที่มีค่าไม่เกิน $\frac{3}{4} \left(\frac{LL}{DL} < 0.75 \right)$ อาจพิจารณารวมน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร (DL+LL) แล้ววางเต็มทุกช่วงตลอดความยาวของโครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของโมเมนต์บวก (+M) และโมเมนต์ลบ (-M) ก็ได้ ดังรูปที่ 2.4 (ง) (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)



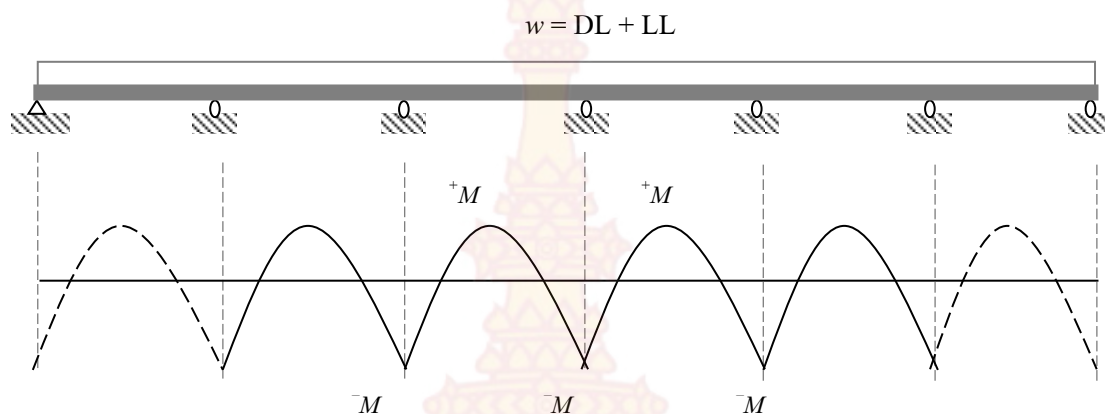
(ก) การวางน้ำหนักบรรทุกคงที่เต็มทุกช่วง



(ข) โมเมนต์บวก (+M) สูงสุด



(ค) โมเมนต์ลบ (-M) สูงสุด



(ง) การวางน้ำหนักบรรทุกคงที่รวมกับน้ำหนักบรรทุกจรเต็มทุกช่วง

รูปที่ 2.4 การจัดวางน้ำหนักบรรทุก

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์คัต และแรงบิด สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงอีลาสติก (Elastic analysis) กล่าวคือ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงพักยึดหยุ่นของวัสดุ และการเปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกถือว่ามีค่าน้อยมาก (Small deformation theory) เมื่อเทียบกับความยาวของโครงสร้าง กรณีที่เป็นโครงสร้างแบบดีเทอร์มิเนท (Statically determinate structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบง่ายสามารถวิเคราะห์หาแรงต่างๆ ได้ด้วยสมการสมดุล ($\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M = 0$) ส่วนกรณีที่เป็นโครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนท (Statically indeterminate structures) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่สามารถวิเคราะห์หาแรงต่างๆ ได้ด้วยสมการสมดุลเพียงอย่างเดียวจะใช้วิธีอื่นๆ ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีสมการของสามโมเมนต์ (Three-moment equation) วิธีสมการของมุมและการโก่งตัว (Slope-deflection equation) วิธีการกระจายโมเมนต์ (Moment distribution method) และวิธีเมตริก (Matrix analysis method) เป็นต้น

กรณีที่โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนทเป็นพื้นหรือคานต่อเนื่องที่มีหน้าตัดคงที่ และมีช่วงตั้งแต่สองช่วงขึ้นไป มีความต่างของความยาวช่วงที่ติดกันไม่เกินร้อยละ 20 น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสม่ำเสมอเต็มทุกช่วงตลอดความยาวของโครงสร้าง และมีน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ไม่เกิน 3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) หากไม่คำนวณหาโมเมนต์และแรงเฉือนโดยการวิเคราะห์อย่างละเอียดมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. 5201 ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์และแรงเฉือนได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์และแรงเฉือน (ว.ศ.ท. 5201)

(ก) โมเมนต์บวก	
คานช่วงนอก :	
ปลายไม่ยึดรั้งกับที่รองรับ	$\frac{1}{11} wL^2$
ปลายหล่อเป็นเนื้อเดียวกับที่รองรับ	$\frac{1}{14} wL^2$
คานช่วงใน :	$\frac{1}{16} wL^2$
(ข) โมเมนต์ลบ	
โมเมนต์ลบที่ขอบนอกของที่รองรับตัวในแรก	
เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกัน 2 ช่วง	$\frac{1}{9} wL^2$
เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกันมากกว่า 2 ช่วง	$\frac{1}{10} wL^2$
โมเมนต์ลบที่ขอบนอกของที่รองรับตัวในอื่นๆ	$\frac{1}{11} wL^2$
โมเมนต์ลบที่ขอบนอกของที่รองรับทุกแห่ง :	$\frac{1}{12} wL^2$
สำหรับแผ่นพื้นที่มีช่วงยาวไม่เกิน 3.0 เมตร	
หรือคานที่มีอัตราส่วนสตีเฟนของเสาต่อคาน > 8	
โมเมนต์ลบที่ขอบนอกของที่รองรับตัวริมที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับที่รองรับ	
เมื่อที่รองรับเป็นคานขอบ	$\frac{1}{24} wL^2$
เมื่อที่รองรับเป็นเสา	$\frac{1}{16} wL^2$
(ค) แรงเฉือน	
แรงเฉือนที่ขอบรองรับตัวในแรก	$1.15 \frac{wL'}{2}$
แรงเฉือนที่ขอบของที่รองรับตัวอื่นๆ	$\frac{wL'}{2}$
ลักษณะคานและพื้นที่ต่อเนื่อง	
ต่อเนื่อง 2 ช่วง	
ต่อเนื่อง 3 ช่วง	
ต่อเนื่อง 4 ช่วง	
ต่อเนื่องมากกว่า 4 ช่วง	

2.5 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การออกแบบโครงสร้าง คือ ขั้นตอนการเลือกใช้วัสดุ และเลือกขนาดหน้าตัดของส่วนประกอบต่างๆ ทางโครงสร้าง เพื่อให้องค์อาคารมีเสถียรภาพมั่นคง และใช้งานได้อย่างปลอดภัย วิธีที่นิยมใช้สองวิธีคือ วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design : WSD) และวิธีกำลัง (Ultimate Strength Design : USD) ในที่นี้กล่าวเฉพาะวิธีหน่วยแรงใช้งาน แต่เดิมเรียกว่าทฤษฎีอีลาสติก (Elastic theory) จะใช้หน่วยแรงไม่เกินกว่าพิสัยยืดหยุ่นของวัสดุ กล่าวคือ หน่วยแรงของวัสดุที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกขณะใช้งาน (Working stress, f) ไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress, f_{allow}) ซึ่งถือเป็นหลักเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบ ($f < f_{allow}$)

2.5.1 หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress, f_{allow}) เป็นหน่วยแรงของวัสดุที่อยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น ช่วงที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุนั้น (กราฟเป็นเส้นตรง) ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้สามารถหาได้ด้วยการหารหน่วยแรงต้านทานสูงสุดของวัสดุนั้นๆ ด้วยส่วนปลอดภัยที่เหมาะสม ซึ่งมาตรฐาน ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังนี้

หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต

$$\text{หน่วยแรงอัดที่ผิว} : f_c = 0.45 f_c'$$

$$\text{หน่วยแรงกด หรือหน่วยแรงแบกทาน (Bearing stress)} : f_c = 0.25 f_c'$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน} : v_c = 0.29 \sqrt{f_c'}$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงเฉือน} : v_c = 1.32 \sqrt{f_c'}$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนของพื้นและฐานรากคอนกรีต (ตามเส้นขอบ)} : v_c = 0.53 \sqrt{f_c'}$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

เมื่อรับแรงดึง

$$\text{เหล็กเส้นที่เป็นเหล็กกลม ซึ่งไม่มีผลทดสอบ} : f_s = 1,200 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{เหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR 24} : f_s = 0.50 f_y$$

$$\text{เหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD 30} : f_s = 0.50 f_y$$

$$\text{เหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD 40} : f_s = 0.50 f_y \text{ แต่ไม่เกิน } 1,700 \text{ กก./ซม.}^2$$

เมื่อรับแรงอัด

$$\text{เสาปลอกเกลียว} : f_s = 0.40 f_y \text{ แต่ไม่เกิน } 2,100 \text{ กก./ซม.}^2$$

เสาแบบผสม

$$\text{เหล็กรูปพรรณ มอก. 116-2529 ชั้นคุณภาพ Fe24} \dots\dots 1,200 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{เหล็กหล่อ} \dots\dots\dots 700 \text{ กก./ซม.}^2$$

2.5.2 สมมติฐานในการออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

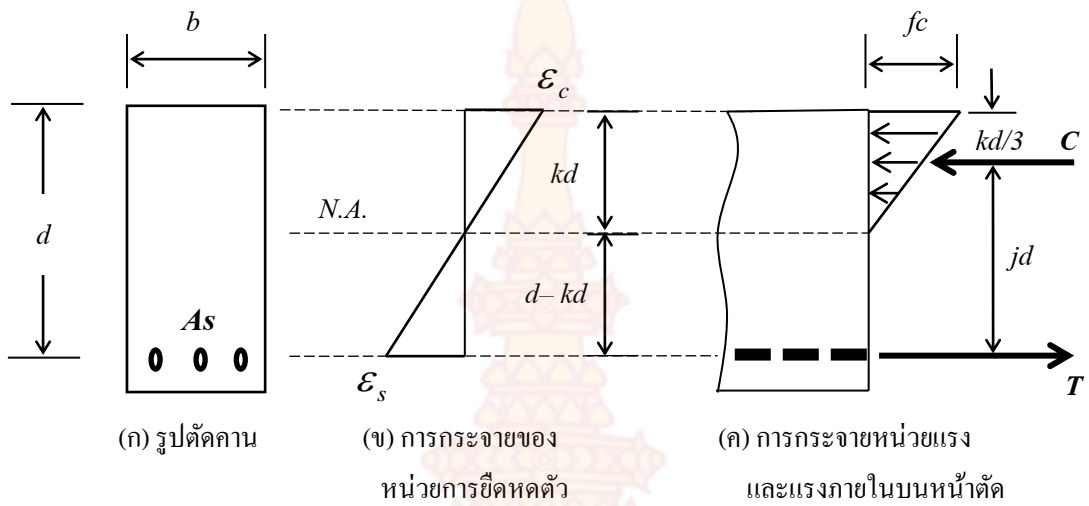
- 1) ระบายรูปตัดทั้งก่อนและหลังรับ โมเมนต์ดัดยังคงเป็นระนาบ นั่นคือสมมติให้การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วน โดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวสะเทิน
- 2) กลสมบัติของวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) คือความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวเป็นสัดส่วน โดยตรง
- 3) การยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ หน่วยการยืดหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีค่าเท่ากัน
- 4) ไม่คิดกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต
- 5) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) มีค่าเท่ากับ $w^{1.5} 4,270 \sqrt{f_c'}$ โดยที่ w เป็นหน่วยน้ำหนักคอนกรีตปกติเท่ากับ 2.323 ตัน/ลบ.ม. ดังนั้น ใช้ $E_c = 15,100 \sqrt{f_c'}$ กก./ชม.²
- 6) โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (E_s) มีค่าเท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.²
- 7) อัตราส่วนโมดูลัส (Modulus ratio : $n = E_s/E_c$) เป็นค่าคงที่ และใช้เลขจำนวนเต็มทีใกล้เคียงที่สุด แต่ต้องไม่น้อยกว่า 6

อย่างไรก็ตาม ข้อสมมติฐานอาจไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง แต่ช่วยให้การคำนวณออกแบบทำได้ง่ายขึ้นและเมื่อใช้หน่วยแรงที่ยอมรับให้ตามข้อกำหนดแล้ว โครงสร้างสามารถใช้งานได้ดีและมีความปลอดภัยเพียงพอ

2.5.3 ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ (n , k และค่า j) การเลือกใช้วัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นขั้นตอนแรกในการออกแบบซึ่งทำให้ทราบถึงกลสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เช่น เลือกส่วนผสมของคอนกรีตให้มีกำลังอัด (f_c') เท่ากับ 240 กก./ชม.² และเลือกใช้เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD 30 จะได้ค่ากำลังครากของเหล็กเสริม (f_y) เท่ากับ 3,000 กก./ชม.² เป็นต้น จากสมมติฐานในการออกแบบ (หัวข้อ 2.5.2) จะได้ค่าคงที่สำหรับการออกแบบคือ ค่า n ค่า k และค่า j ดังนี้

$$1) \text{ อัตราส่วนโมดูลัส : } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,040,000}{15,100 \sqrt{f_c'}}$$

2) พิจารณารูปตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัด รูปที่ 2.5 (ก) การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วน โดยตรงกับระยะห่างจากแนวสะเทิน (Neutral axis, N.A.) หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต (ϵ_c) ที่ผิวด้านบนของคานมีระยะห่างเท่ากับ kd จากแนวแกนสะเทิน และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม (ϵ_s) ที่ตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังรูปที่ 2.5 (ข) การกระจายหน่วยแรงและแรงภายในบนหน้าตัดซึ่งไม่คิดกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต โดยค่า jd คือระยะจากแนวแรงอัด (C) ที่รับโดยคอนกรีต ถึงแนวแรงดึง (T) ที่รับโดยเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.5 (ค)



(วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

รูปที่ 2.5 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน

จากรูปสามเหลี่ยมคล้ายของการกระจายหน่วยการหดตัวของคอนกรีต (ϵ_c) และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม (ϵ_s) รูปที่ 2.5 (ข)

$$\frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d - kd} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\epsilon_c}{\epsilon_s} = \frac{k}{1 - k} \quad \dots(a)$$

$$\text{ขณะที่} \quad n = \frac{E_s}{E_c} \quad \text{หรือ} \quad n = \frac{f_s \cdot \epsilon_c}{f_c \cdot \epsilon_s} \quad \dots(b)$$

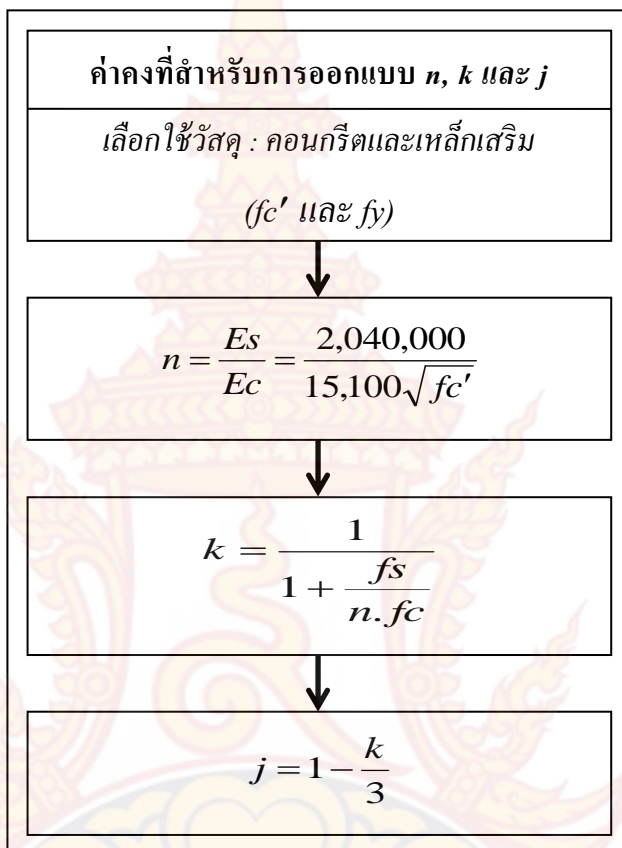
แทนค่าสมการ (a) ลงใน (b) จะได้

$$n = \frac{f_s \cdot k}{f_c(1 - k)} \quad \text{หรือ} \quad k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n \cdot f_c}}$$

จากรูปที่ 2.5 (ค) แนวแรงอัด (C) ถึงแนวแรงดึง (T) จะได้ระยะ jd ดังนี้

$$jd = d - \frac{kd}{3} \quad \text{หรือ} \quad j = 1 - \frac{k}{3}$$

ขั้นตอนในการหาค่าคงที่สำหรับการออกแบบสรุปเป็นแผนภาพ ดังรูปที่ 2.6 และมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดค่าอัตราส่วนโมดูลัส (n) สำหรับคอนกรีตที่กำลังอัดต่างๆ (fc') ในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนในการหาค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

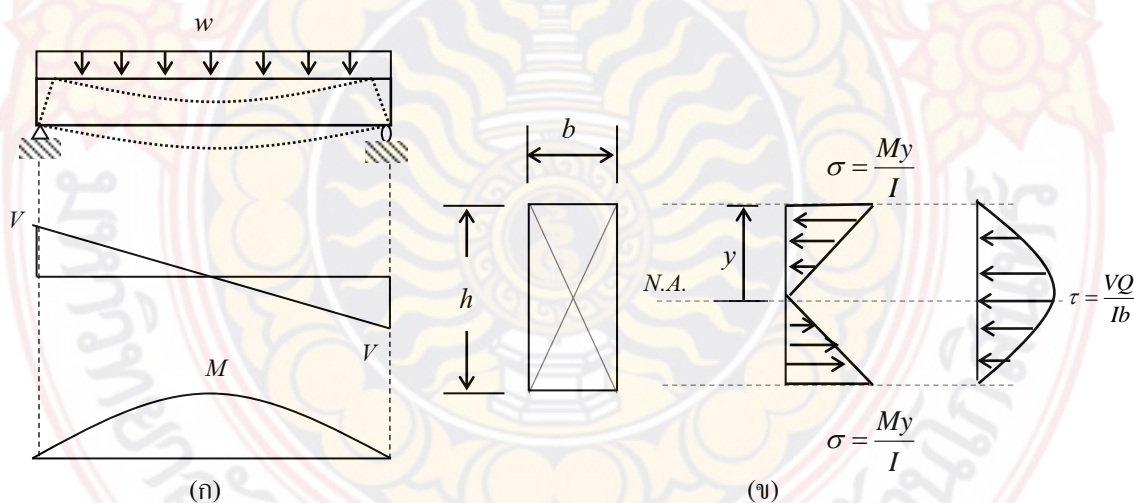
ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส : n

รายการ	สูตร	กำลังอัดของคอนกรีต : fc' (กก./ซม. ²)					
		100	150	200	250	300	350
อัตราส่วนโมดูลัส : n	$\frac{E_s}{E_c} = \frac{2,040,000}{15,100\sqrt{fc'}}$	14	11	10	9	8	7

บทที่ 3

การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้านทานโมเมนต์ดัด

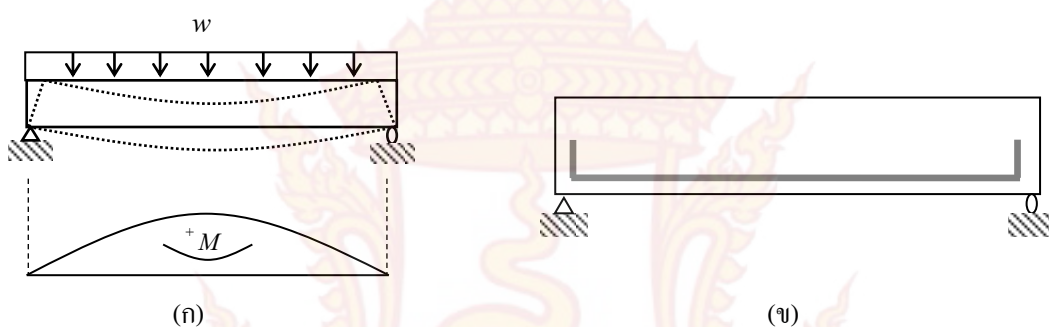
คานเป็นองค์อาคารที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้น น้ำหนักผนัง และอื่นๆ โดยอาจถ่ายน้ำหนักต่อไปยังคานหลักหรือเสาที่รองรับ น้ำหนักบรรทุกหรือแรงภายนอกที่กระทำกับคานทำให้เกิดแรงภายใน ได้แก่ แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด อีกทั้งยังส่งผลให้คานเกิดการโก่งตัว ดังรูปที่ 3.1 (ก) การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural analysis) จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางโครงสร้างที่ตอบสนองต่อแรงภายใน ซึ่งการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องพิจารณาให้สามารถต้านทานแรงต่างๆ เหล่านี้ได้ โดยคานคอนกรีตเสริมเหล็กอาจเป็นคานช่วงเดียว คานยื่น หรือคานต่อเนื่องก็ได้ นอกจากนี้ วิชาพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานคือกำลังวัสดุ (Strength of Materials) ซึ่งทำให้เข้าใจความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเค้นในคาน ทั้งความเค้นดัด (Bending stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) อันเป็นที่มาของภาพการกระจายความเค้นบนหน้าตัดคาน ดังรูปที่ 3.1 (ข) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป ทั้งนี้ การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กต้องอาศัยความเข้าใจพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของคาน สูตรที่ใช้คำนวณออกแบบภายใต้สมมติฐาน และข้อกำหนดตามมาตรฐาน เพื่อให้ได้ขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยภายใต้ น้ำหนักบรรทุกใช้งาน



รูปที่ 3.1 แรงภายในและการกระจายความเค้นบนหน้าตัดคาน

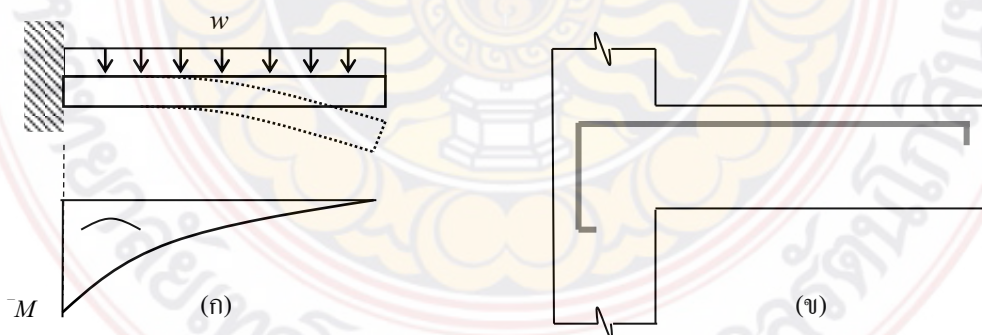
3.1 พฤติกรรมของคานภายใต้โมเมนต์ดัดและการเสริมเหล็ก (มงคล จิรวรรณ, 2549)

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกจะเกิดแรงภายใน โครงสร้าง ได้แก่ แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด แรงภายในเหล่านี้ทำให้คานเกิดการโก่งตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โมเมนต์ดัดมีผลอย่างมากต่อการโก่งตัวของคานเมื่อเทียบกับแรงภายในอื่นๆ ลักษณะการโก่งตัวของคานช่วงเดียวภายใต้โมเมนต์ดัด ในรูปที่ 3.2 (ก) จะเห็นว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานและมีทิศทางเป็นบวก ($+M$) โดยคานจะแอ่นตัวลง ทำให้บริเวณหลังคานด้านบนเกิดแรงอัด ส่วนท้องคานด้านล่างเกิดแรงดึง คอนกรีตซึ่งต้านทานแรงดึงได้น้อยจึงส่งผลให้คานเกิดการแตกร้าวที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่าง ดังนั้น จึงต้องเสริมเหล็ก บริเวณด้านล่างเพื่อทำหน้าที่รับแรงดึง ดังรูปที่ 3.2 (ข)



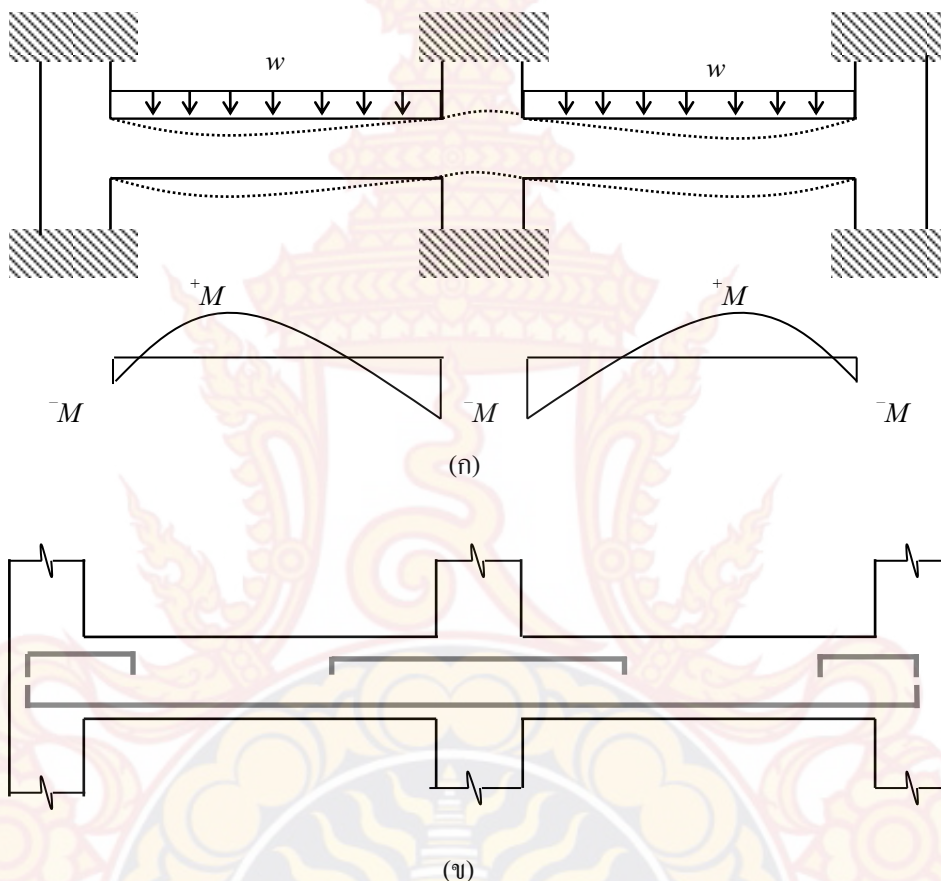
รูปที่ 3.2 ลักษณะการ โก่งตัวของคานช่วงเดียวและการเสริมเหล็ก

คานยื่นรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอตลอดความยาวคาน ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ฐานรองรับและมีทิศทางเป็นลบ ($-M$) ส่งผลให้คานโก่งตัว ดังรูปที่ 3.3 (ก) บริเวณหลังคานด้านบนใกล้ฐานรองรับเกิดแรงดึง ส่วนท้องคานด้านล่างเกิดแรงอัด การแตกร้าวของคานยื่นจะเกิดขึ้นบริเวณหลังคานด้านบนที่เกิดแรงดึง ดังนั้น การเสริมเหล็กรับแรงดึงจึงเสริมด้านบนหลังคานบริเวณฐานรองรับ ดังรูปที่ 3.3 (ข)



รูปที่ 3.3 ลักษณะการ โก่งตัวของคานยื่นและการเสริมเหล็ก

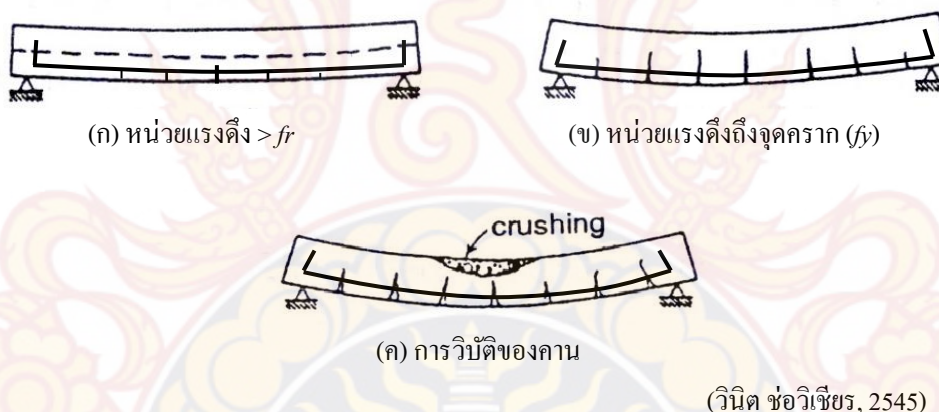
กรณีคานต่อเนื่องที่รับน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอตลอดความยาวคาน โมเมนต์คัตจะเกิดขึ้นทั้งสองทิศทาง คือค่าโมเมนต์บวก ($+M$) เกิดที่บริเวณกลางคาน ทำให้คานแอ่นตัวลง และโมเมนต์ลบ ($-M$) เกิดที่บริเวณฐานรองรับ ทำให้คานโก่งตัวขึ้น ดังรูปที่ 3.4 (ก) ดังนั้น การเสริมเหล็กเพื่อทำหน้าที่รับแรงดึงจึงเสริมทั้งด้านล่างบริเวณฐานรองรับถึงกลางคาน และเสริมด้านบนหลังคานบริเวณฐานรองรับ ดังรูปที่ 3.4 (ข)



รูปที่ 3.4 ลักษณะการโก่งตัวของคานต่อเนื่องและการเสริมเหล็ก

เมื่อพิจารณาการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียวภายใต้น้ำหนักบรรทุก พบว่าการแตกร้าวเริ่มเกิดที่บริเวณท้องคานตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์คัตสูงสุด ดังรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งเป็นผลจากการโก่งตัวของคานทำให้เกิดแรงดึงที่บริเวณดังกล่าว คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านทานแรงอัดได้ดี แต่ด้านทานแรงดึงได้น้อย เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีต (Modulus of Rupture : $f_r = 2.0\sqrt{fc'}$, กก./ซม.) จึงทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยเหล็กเสริมจะทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดขึ้น และเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น แรงดึงในเหล็กเสริมก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมถึงจุดคราก ส่งผลให้การแตกร้าวของคอนกรีตมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 (ข) เมื่อคานรับน้ำหนักเกินกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยแรงของวัสดุจะเกินกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่น โดยคานคอนกรีตเสริม

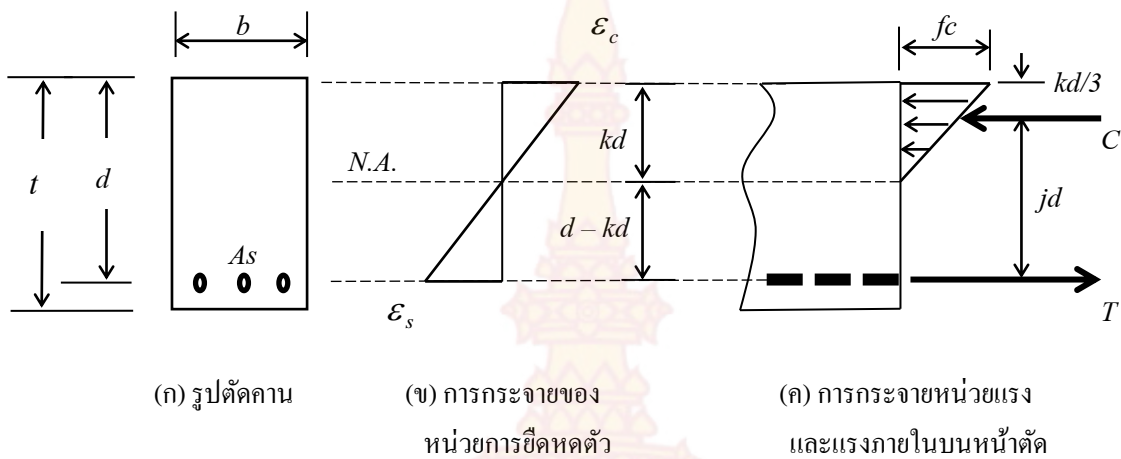
เหล็กจะเกิดการโค้งตัวอย่างมากและมีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น จนกระทั่งเกิดการวิบัติเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด กล่าวโดยสรุป การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากโมเมนต์ค้ำมีสองลักษณะขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมในคานคอนกรีต กรณีที่เสริมเหล็กไม่มากเรียกว่า *คานเสริมเหล็กต่ำกว่าสภาวะสมดุล (Under-reinforced concrete beams)* การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นที่ด้านรับแรงดึง โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดจนแตก และกรณีที่เสริมเหล็กมากเกินไป เรียกว่า *คานเสริมเหล็กเกินกว่าสภาวะสมดุล (Over-reinforced concrete beams)* การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นที่ด้านรับแรงอัด โดยคอนกรีตจะถูกอัดจนแตกก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดคราก ดังรูปที่ 3.5 (ค) เป็นการวิบัติแบบจับปล้นทันทีทันใดจัดว่าอันตรายอย่างยิ่ง (วินิต ช่อวิเชียร, 2545) ในทางอุดมคติ กรณีที่เรียกว่า *การเสริมเหล็กแบบสมดุล (Balanced-reinforced concrete beams)* จะทำให้คอนกรีตและเหล็กเสริมเกิดการวิบัติไปพร้อมกันเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดด้านขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จึงไม่สามารถเสริมเหล็กพอดีกับที่คำนวณได้จริงเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลได้



รูปที่ 3.5 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียวภายใต้น้ำหนักบรรทุก

3.2 การออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบช่วงเดียวภายใต้โมเมนต์ค้ำ ผิวคานด้านบนจะถูกอัดส่วนท้องคานจะถูกดึง จากสมมติฐานในการออกแบบข้อที่ 1 รูปตัดทั้งก่อนและหลังการรับโมเมนต์ค้ำยังคงเป็นระนาบ ดังรูปที่ 3.6 (ก) และการกระจายหน่วยการยืดหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างจากแกนสะเทิน (Neutral axis, N.A.) ดังรูปที่ 3.6 (ข) โดยหน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต (ϵ_c) เกิดขึ้นที่ผิวด้านบนของคานมีระยะห่างเท่ากับ kd จากแนวแกนสะเทิน และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม (ϵ_s) เกิดขึ้นที่ด้านล่างของคานตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงดึง สมมติฐานข้อที่ 2 และข้อที่ 4 กลสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) การกระจายหน่วยแรงอัดของคอนกรีตและแรงภายในบนหน้าตัดโดยไม่คิดกำลังด้านทานแรงดึงของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.6 (ค)



รูปที่ 3.6 การกระจายหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

อธิบายสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ ดังนี้

- A_s : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง
- b : ความกว้างของคาน
- t : ความลึกของคาน
- C : แรงอัดที่รับโดยคอนกรีต
- T : แรงดึงที่รับโดยเหล็กเสริม
- f_c : หน่วยแรงอัดของคอนกรีต
- f_s : หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริม
- d : ความลึกประสิทธิภาพของคาน
- kd : ระยะจากผิวบนของคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทิน
- jd : ระยะจากแนวแรงอัด (C) ถึงแนวแรงดึง (T)

พิจารณาภาวะสมดุลของแรงภายในบนหน้าตัดคาน รูปที่ 3.6 (ค) แรงอัดที่รับโดยคอนกรีต (C) เท่ากับ แรงดึงที่รับโดยเหล็กเสริม (T)

แรงอัดที่รับโดยคอนกรีต : $C = \frac{1}{2} f_c \cdot kd \cdot b$ (1)

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : $M_c = C \cdot jd$
 $M_c = \frac{1}{2} f_c \cdot kd \cdot b \cdot jd$ (2)

ถ้าให้ $R = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j$ โดยที่ค่า R เป็นค่าคงที่สำหรับการออกแบบ ดังนั้น
 $M_c = Rbd^2$ (3)

และนิยมใช้สมการ (3) ตรวจสอบหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสม โดยให้ $M_c = M_{max}$

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{R \cdot b}}$$
(4)

$$\text{แรงดึงที่รับโดยเหล็กเสริม : } T = A_s \cdot f_s \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\begin{aligned} \text{โมเมนต์ที่คานทานโดยเหล็กเสริม : } & M_s = T \cdot j d \\ & M_s = A_s \cdot f_s \cdot j d \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

และนิยมใช้สมการ (6) กำหนดหาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม โดยแทนค่า $M_s = M_{max}$.

$$\text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : } A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j d} \quad \dots\dots\dots(7)$$

3.3 ข้อกำหนดเกี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ว.ส.ท. ให้ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนี้

3.3.1 ความลึกค้ำสุดของคาน (t) ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดระยะ โกง หากใช้ความลึกน้อยกว่านี้ต้องกำหนดระยะ โกงตัวของคาน แต่ทั้งนี้ต้องไม่ทำให้ความแข็งแรงขององค์อาคารนั้นด้อยลง

กรณี	ความลึกค้ำสุด (t)
คานช่วงเดียว	L/16
คานปลายต่อเนื่องข้างเดียว	L/18.5
คานปลายต่อเนื่องสองข้าง	L/21
คานยื่น	L/8

3.3.2 คานลึกคาน ช่วงเดียวที่มีอัตราส่วนความลึกต่อระยะช่วง มากกว่า 4/5 และคานต่อเนื่องที่มีอัตราส่วนความลึกต่อระยะช่วงมากกว่า 2/5 ให้ถือว่าเป็นคานลึก ในการคำนวณออกแบบถือว่าความเครียดที่เกิดขึ้นไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน และต้องคำนึงถึงการ โกงงอตามขวาง ตลอดจนผลเกี่ยวเนื่องอื่นๆ ด้วย สำหรับคานปกติทั่วไปควรมีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกประสิทธิภาพ (b/d) ระหว่างช่วง 0.25 ถึง 0.60

3.3.3 เหล็กเสริมน้อยสุดสำหรับองค์อาคารรับแรงคัต (ρ_{min}) ต้องมีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่น้อยกว่า $\frac{14}{f_y}$ เพื่อป้องกันการวิบัติที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันทันทีเมื่อเกิดการแตกร้าวด้านรับแรงดึง โดยที่ค่า ρ คืออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดคาน ($\rho = \frac{A_s}{bd}$)

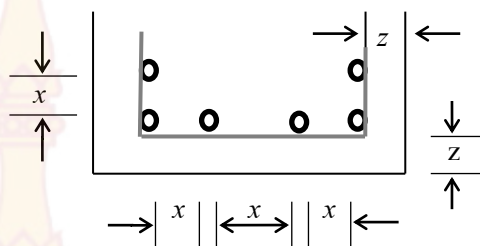
3.3.4 คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Covering) เป็นระยะที่วัดจากผิวคอนกรีตถึงผิวนอกของเหล็กปลอกและการจัดวางเหล็กเสริมต้องคำนึงถึงความสามรถเทได้ของคอนกรีตโดยสะดวก กรณีที่คานเสริมเหล็กมากกว่าหนึ่งชั้นควรวางเหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าไว้ด้านล่าง และวางเหล็กแต่ละชั้นให้สมมาตรกัน โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น ไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.7

$x \geq 1.34$ เท่าขนาดโตสุดของหิน

$x \geq 2.5$ ซม.

$z \geq 3.0$ ซม. เมื่ออยู่ในรุ่มและไม่สัมผัสดิน

$z \geq 4.0$ ถูกแดด ฝน และสัมผัสดิน



รูปที่ 3.7 คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

3.4 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

1. เขียนแบบจำลองทางโครงสร้าง และหาหน้าหนักที่กระทำกับโครงสร้าง เลือกขนาดหน้าตัดคานเพื่อหาหน้าหนักคงที่ของคาน โดยสมมติขึ้นจากการพิจารณา ชนิดของคานที่ออกแบบ ความลึกขั้นต่ำของคานที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งตัวของคาน และอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกประสิทธิภาพ (b/d) ที่เหมาะสม แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้าง (หาค่าโมเมนต์คัตสูงสุด; M_{max})

2. เลือกวัสดุ : กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') เลือกชนิดของเหล็กเสริม (เหล็กกลมผิวเรียบ หรือเหล็กข้ออ้อย) จะได้กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (f_y)

3. คำนวณหาค่าคงที่สำหรับการออกแบบ : n, k, j และค่า R

4. ตรวจสอบขนาดหน้าตัดคานที่เหมาะสมได้จาก 2 กรณี (เลือกกรณีใด กรณีหนึ่ง)

4.1 เปรียบเทียบค่า $M_c = Rbd^2$ กับค่า M_{max}

ถ้า $M_c < M_{max}$ หมายถึง โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีตน้อยกว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจริง แสดงว่าขนาดหน้าตัดคานเล็กไปให้เพิ่มขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

ถ้า $M_c > M_{max}$ หมายถึง โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีตมากกว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจริง แสดงว่าใช้ได้ แต่ถ้า $M_c > M_{max}$ มากๆ แสดงว่าหน้าตัดคานใหญ่เกินไป

4.2 ค่าความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ (d) ให้ค่า $M_c = M_{max}$: $d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}}$

5. คำนวณหาปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : $A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j d}$

6. ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด ต้องมีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่น้อยกว่า $\frac{14}{f_y}$ เพื่อป้องกันการวิบัติที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันทันทีเมื่อเกิดการแตกร้าวด้านรับแรงดึง โดยที่ ค่า ρ คืออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดคาน ($\rho = \frac{A_s}{bd}$)

7. เลือกขนาด และจำนวนของเหล็กเสริมที่ใช้ให้เหมาะกับขนาดหน้าตัดคาน พร้อมเขียนรายละเอียดแสดงรายการเหล็กเสริม

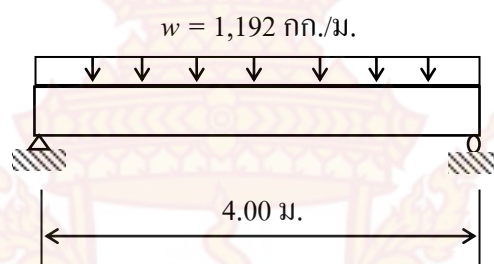
ตัวอย่างที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวยาว 4.00 ม. รับน้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ 1,000 กก./ม. กำหนดให้ : ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ}$$

วิธีทำ สมมติขนาดคาน : 0.20x0.40 ม. (ความลึกต่ำสุดสำหรับคานช่วงเดี่ยว : $L/16$)

$$\text{น้ำหนักคาน} : 0.20 \times 0.40 \times 2,400 = 192 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{น้ำหนักบรรทุกรวม (w)} = 1,000 + 192 \Rightarrow 1,192 \text{ กก./ม.}$$



$$\text{วิเคราะห์โครงสร้าง} : M_{max} = wL^2/8 \Rightarrow 1,192 (4^2) / 8$$

$$M_{max} = 2,384 \text{ กก.-ม.}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 10^6}{15,100 \sqrt{f_c'}} = 10.68 \approx 11$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n \cdot f_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1,500}{11(72)}} = 0.345$$

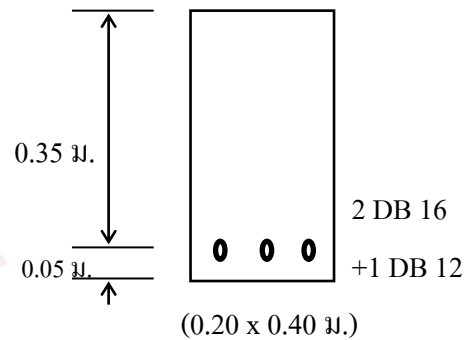
$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.345}{3} = 0.885$$

$$R = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j = 0.5 (72) (0.345) (0.885) = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c	ความลึกประสิทธิภาพ (d) ที่ต้องการ
$M_c = Rbd^2 = 10.99(0.20)35^2$ $= 2,692.55 \text{ กก.-ม.} > M_{max} \text{ ok}$	$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{2,384 \times 100}{10.99 \times 20}}$ $= 32.93 \text{ ซม.} < 35.0 \text{ ซม.} \text{ ok}$

$$A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot j d} = \frac{2,384 \times 100}{1,500(0.885)35} = 5.13 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 2 DB 16 + 1 DB 12 ($A_s = 5.15 \text{ ซม.}^2$)



ข้อสังเกต

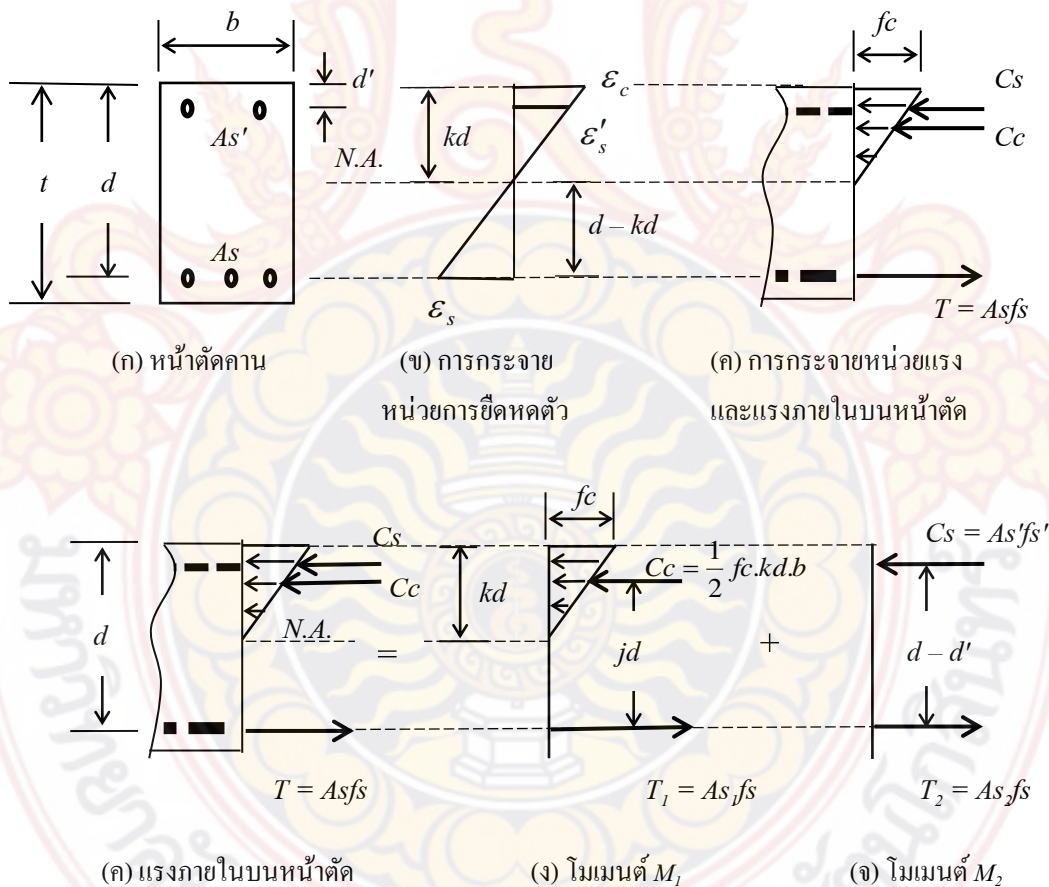
1. การออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว ค่าโมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีตมากกว่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในคานซึ่งได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง : $M_c > M_{\max}$ (2,384 กก.-ม.) โดย $M_c = Rbd^2$ ดังนั้น M_c จึงขึ้นอยู่กับ bd^2 หากใช้วิธี Trial and error ในการออกแบบ โดยเลือกความกว้างของคาน (b) คงที่เท่ากับ 0.20 ม. และให้ค่าความลึกต่ำสุดเป็นระยะ d เริ่มต้น (ความลึกต่ำสุดสำหรับคานช่วงเดียวที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งตัวเท่ากับ $L/16 = 400/16 \Rightarrow 25$ ซม.) จะได้ค่าโมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c ดังนี้

R (กก./ซม. ²)	b (ม.)	d (ซม.)	$M_c = Rbd^2$ (กก.-ม.)
10.99	0.20	25	$1,373.75 < M_{\max}$
		30	$1,978.20 < M_{\max}$
		35	$2,692.55 > M_{\max}$

2. ปริมาณเหล็กเสริม 2 DB 16 + 1 DB 12 ($A_s = 5.15 \text{ ซม.}^2$) ใช้ต้านทานโมเมนต์สูงสุดซึ่งเกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานประมาณ 2,384 กก.-ม. ซึ่งน้อยกว่าโมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต ($M_s < M_c$) ดังนั้น จึงเป็นการเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล (*Under-reinforced concrete beams*) และมีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดคาน ($\rho = \frac{A_s}{bd}$) เท่ากับ 0.00735 ซึ่งมากกว่าเหล็กเสริมน้อยสุดสำหรับองค์อาคารรับแรงคัต ($\rho_{\min} = \frac{14}{f_y}$) เป็นไปตามข้อกำหนด

3.5 การออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ในกรณีค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในคานมีค่ามากจะส่งผลให้คานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวมีขนาดใหญ่ การลดขนาดหน้าตัดคานลงในขณะที่ความสามารถรับโมเมนต์คัตของคานยังคงเดิมทำได้โดยเสริมเหล็กรับแรงอัด (A_s') ดังรูปที่ 3.8 (ก) ซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดโดยเหล็กเสริมร่วมกับคอนกรีต (C_s+C_c) ดังรูปที่ 3.8 (ค) และจากสภาวะสมดุลของแรงภายในบนหน้าตัดจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ($T=Asfs$) ความต้านทานโมเมนต์คัตของคานเสริมเหล็กรับแรงอัดคือ : $M=M_1+M_2$ โดยค่าโมเมนต์ M_1 พิจารณาจากความสมดุลของแรงอัดที่รับโดยคอนกรีต ($C_c=\frac{1}{2}fc.kd.b$) กับแรงดึงที่รับโดยเหล็กเสริม ($T_1=Asfs$) ดังรูปที่ 3.8 (ง) ซึ่งเทียบได้กับสภาวะสมดุลของแรงภายในบนหน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว ดังนั้น โมเมนต์ $M_1=C_c.jd$ หรือ $M_1=\frac{1}{2}fc.kd.b.jd = Rbd^2$ หรือสรุปได้ว่า $M_1=M_c$ นั่นเอง และโมเมนต์ M_2 พิจารณาจากความสมดุลของแรงที่รับโดยเหล็กเสริมรับแรงอัด ($C_s=As'fs'$) กับเหล็กเสริมรับแรงดึง ($T_2=Asfs$) ดังรูปที่ 3.8 (จ)



รูปที่ 3.8 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงบนหน้าตัดคาน (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

อธิบายสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ ดังนี้

b : ความกว้างของคาน	fc : หน่วยแรงอัดของคอนกรีต
As : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง	As' : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด
d : ความลึกประสิทธิภาพของคาน	d' : ระยะหุ้มเหล็กเสริมรับแรงอัด
fs : หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริม	fs' : หน่วยแรงอัดของเหล็กเสริม
Cc : แรงอัดที่รับโดยคอนกรีต	Cs : แรงอัดที่รับโดยเหล็กเสริมรับแรงอัด
T : แรงดึงทั้งหมดที่รับโดยเหล็กเสริมรับแรงดึง	
kd : ระยะจากผิวบนของคอนกรีตค้ำานรับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทิน	
jd : ระยะจากแนวแรงอัด (C) ถึงแนวแรงดึง (T)	

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานเสริมเหล็กรับแรงอัด : $As = As_1 + As_2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับความค้ำานทาน โมเมนต์ค้ดของคาน : $M = M_1 + M_2$ โดยค้ำานวนหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม As_1 และ As_2 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากรูปที่ 3.8 (ง) : } M_1 &= As_1 fs jd & \text{โดยที่ } M_1 &= Mc = Rbd^2 \\ As_1 &= \frac{M_1}{fs \cdot jd} & & \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากรูปที่ 3.8 (จ) : } M_2 &= As_2 fs (d - d') & \text{โดยที่ } M_2 &= M_{\max} - Mc \\ As_2 &= \frac{M_2}{fs (d - d')} & & \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด : As'

$$\text{จากรูปที่ 3.8 (จ) : } M_2 = As' fs' (d - d')$$

$$\text{ค่า } M_2 \text{ จากสมการ (9) : } As_2 fs (d - d') = As' fs' (d - d')$$

จากรูปที่ 3.8 (ข) : การกระจายหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริม (ϵ_s, ϵ'_s) จะได้หน่วยแรงอัดของเหล็กเสริม $fs' = fs \frac{kd - d'}{d - kd}$ และมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดให้หน่วยแรงอัดของเหล็กเสริม

มีค่าเป็นสองเท่าแต่น้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม ดังนั้น $fs' = 2 fs \frac{kd - d'}{d - kd} \leq f_{allow}$

$$As' = \frac{1}{2} As_2 \left(\frac{(1 - k)}{(k - \frac{d'}{d})} \right) \dots\dots\dots(10)$$

3.6 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

1. เขียนแบบจำลองทางโครงสร้าง และหาหน้าหนักที่กระทำกับโครงสร้าง เลือกขนาดหน้าตัดคาน เพื่อหาหน้าหนักคงที่ของคาน โดยสมมติขึ้นจากการพิจารณา ชนิดของคานที่ออกแบบ ความลึกขั้นต่ำของคานที่ไม่ต้องตรวจสอบการโก่งตัวของคาน และอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกประสิทธิภาพ (b/d) ที่เหมาะสม แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้าง (หาค่าโมเมนต์คัตสูงสุด; M_{max})

2. เลือกวัสดุ : กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') และชนิดของเหล็กเสริม (เหล็กเส้นกลม หรือเหล็กข้ออ้อย) จะได้กำลังครากของเหล็กเสริม (f_y)

3. คำนวณหาค่าคงที่สำหรับการออกแบบ : n, k, j และค่า R

4. คำนวณค่าโมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : $M_c = Rbd^2$ ถ้า

$M_c > M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$M_c < M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

5. คำนวณหาปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง

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

$$\text{โดย } A_{s1} = \frac{M_c}{f_y \cdot j \cdot d} \quad \text{และ} \quad A_{s2} = \frac{M_2}{f_y (d - d')}$$

6. คำนวณหาปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$A_{s'} = \frac{1}{2} A_{s2} \left(\frac{(1-k)}{(k - \frac{d'}{d})} \right)$$

7. เลือกขนาดและจำนวนของเหล็กเสริมที่ใช้ให้เหมาะกับขนาดหน้าตัดคาน พร้อมเขียนรายละเอียดแสดงรายการเหล็กเสริม

ตัวอย่างที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวยาว 4.00 ม. รับน้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ 1,550 กก./ม.

กำหนดให้: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

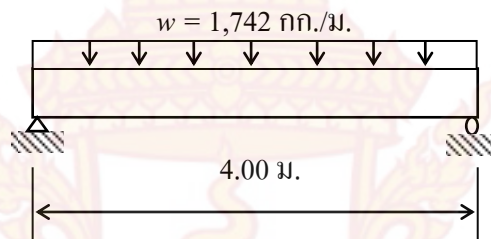
$$f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$$

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ สมมติขนาดคาน : 0.20x0.40 ม. (ความลึกต่ำสุดคานช่วงเดียว : $L/16$)

$$\text{น้ำหนักคาน} : 0.20 \times 0.40 \times 2,400 = 192 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{น้ำหนักบรรทุกรวม (w)} = 1,550 + 192 \Rightarrow 1,742 \text{ กก./ม.}$$



$$\text{วิเคราะห์โครงสร้าง : } M_{max} = wL^2/8 \Rightarrow 1,742 (4^2) / 8$$

$$M_{max} = 3,484 \text{ กก.-ม.}$$



ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2.04 \times 10^6}{15,100 \sqrt{f_c'}} = 10.68 = 11$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{f_s}{n \cdot f_c}} = \frac{1}{1 + \frac{1,500}{11(72)}} = 0.345$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0.345}{3} = 0.885$$

$$R = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j = 0.5 (72) 0.345 (0.885) = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 10.99(0.20)34^2$$

$$= 2,540.88 \text{ กก.-ม.} < M_{max} : \text{ออกแบบคานเสริมเหล็กที่รับแรงดึงและแรงอัด}$$

เหล็กเสริมรับแรงดึง : A_s

$$A_{s1} = \frac{Mc}{f_s \cdot jd} = \frac{2,540.88 \times 100}{1,500(0.885)34} = 5.63 \text{ ซม.}^2$$

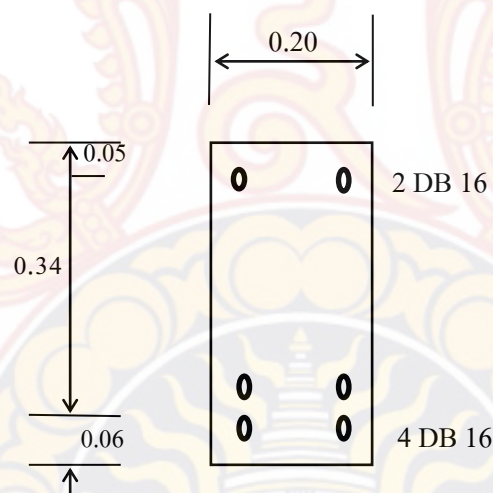
$$A_{s2} = \frac{M_{\max} - M_c}{f_s(d - d')} = \frac{943.12 \times 100}{1,500(34 - 5)} = 2.17 \text{ ซม.}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 7.80 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 4 DB 16 ($A_s = 8.04 \text{ ซม.}^2$)เหล็กเสริมรับแรงอัด : A_s'

$$A_s' = \frac{1}{2} A_{s2} \frac{(1-k)}{(k - \frac{d'}{d})} = \frac{1}{2} (2.17) \frac{(1-0.345)}{(0.345 - \frac{5}{34})}$$

$$= 3.59 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 2 DB 16 ($A_s = 4.02 \text{ ซม.}^2$)

ตัวอย่างที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง 3 ช่วง ความยาวช่วงคานเท่ากับ 4.00 ม. (วัดจากกึ่งกลางเสา) รับน้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ 1,850 กก./ม. ตลอดความยาวคาน

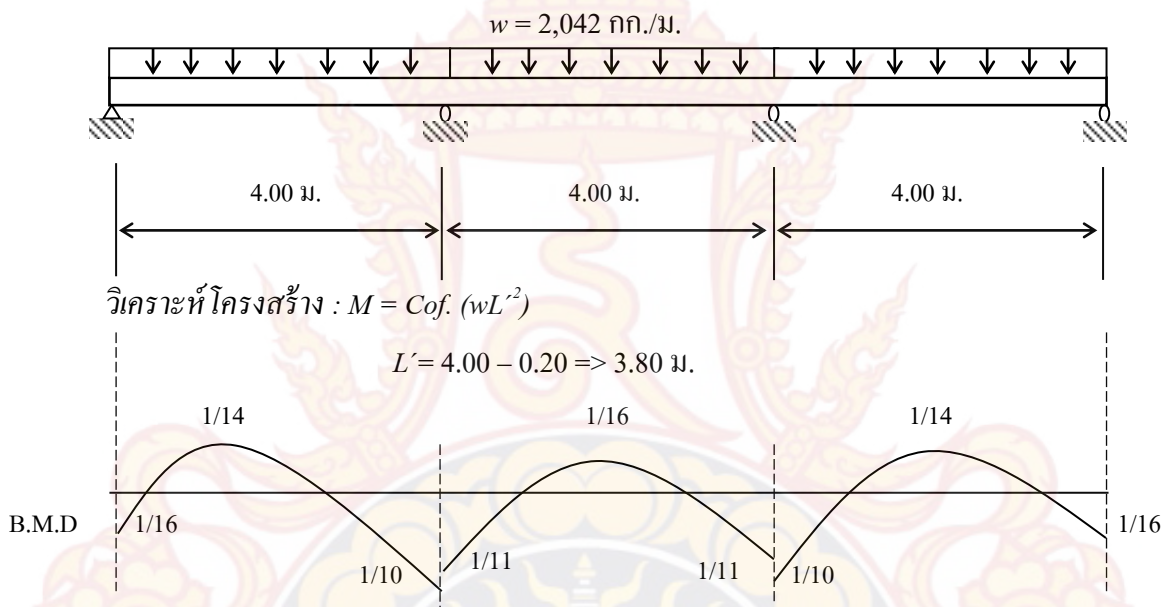
กำหนดให้ : $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.² ขนาดเสาเท่ากับ 0.20 x 0.20 เมตร

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ สมมติขนาดคาน : 0.20x0.40 ม. (ความลึกต่ำสุดคานต่อเนื่อง : $L/21$)

น้ำหนักคาน : $0.20 \times 0.40 \times 2,400 = 192$ กก./ม.

น้ำหนักบรรทุกรวม (w) = $1,850 + 192 \Rightarrow 2,042$ กก./ม.



ค่าโมเมนต์สูงสุด : M_{max}

$$+M_{max} = \frac{1}{14} wL^2 = \frac{1}{14} (2,042) 3.8^2 = 2,106.17 \text{ กก.-ม.}$$

$$-M_{max} = \frac{1}{10} wL^2 = \frac{1}{10} (2,042) 3.8^2 = 2,948.64 \text{ กก.-ม.}$$

และ $-M = \frac{1}{16} wL^2 = \frac{1}{16} (2,042) 3.8^2 = 1,842.90 \text{ กก.-ม.}$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 10.99(0.20)34^2 \\ = 2,540.88 \text{ กก.-ม.}$$

$M_c > M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$M_c < M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

พิจารณาช่วงคานที่มีค่าโมเมนต์เป็นบวก :

$$M_c = 2,540.88 \text{ กก.-ม.}, \quad +M_{max} = 2,106.17 \text{ กก.-ม.}$$

$M_c > M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot jd} = \frac{2,106.17 \times 100}{1,500(0.885)34} = 4.66 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 2 DB 16 + 1 DB 12 ($A_s = 5.15 \text{ ซม.}^2$)

พิจารณาช่วงคานที่มีค่าโมเมนต์เป็นลบ (คานช่วงใน) :

$$M_c = 2,540.88 \text{ กก.-ม.}, \quad -M_{max} = 2,948.64 \text{ กก.-ม.}$$

$M_c < M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

$$A_{s1} = \frac{M_c}{f_s \cdot jd} = \frac{2,540.88 \times 100}{1,500(0.885)34} = 5.62 \text{ ซม.}^2$$

$$A_{s2} = \frac{M_{max} - M_c}{f_s(d - d')} = \frac{407.76 \times 100}{1,500(34 - 5)} = 0.93 \text{ ซม.}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 6.55 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 4 DB 16 ($A_s = 8.08 \text{ ซม.}^2$)

$$A_{s'} = \frac{1}{2} A_{s2} \frac{(1-k)}{(k - \frac{d'}{d})} = \frac{1}{2} (0.93) \frac{(1-0.345)}{(0.345 - \frac{5}{34})} = 1.54 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 2 DB 12 ($A_s = 2.26 \text{ ซม.}^2$)

พิจารณาช่วงคานที่มีค่าโมเมนต์เป็นลบ (คานช่วงริมออก) :

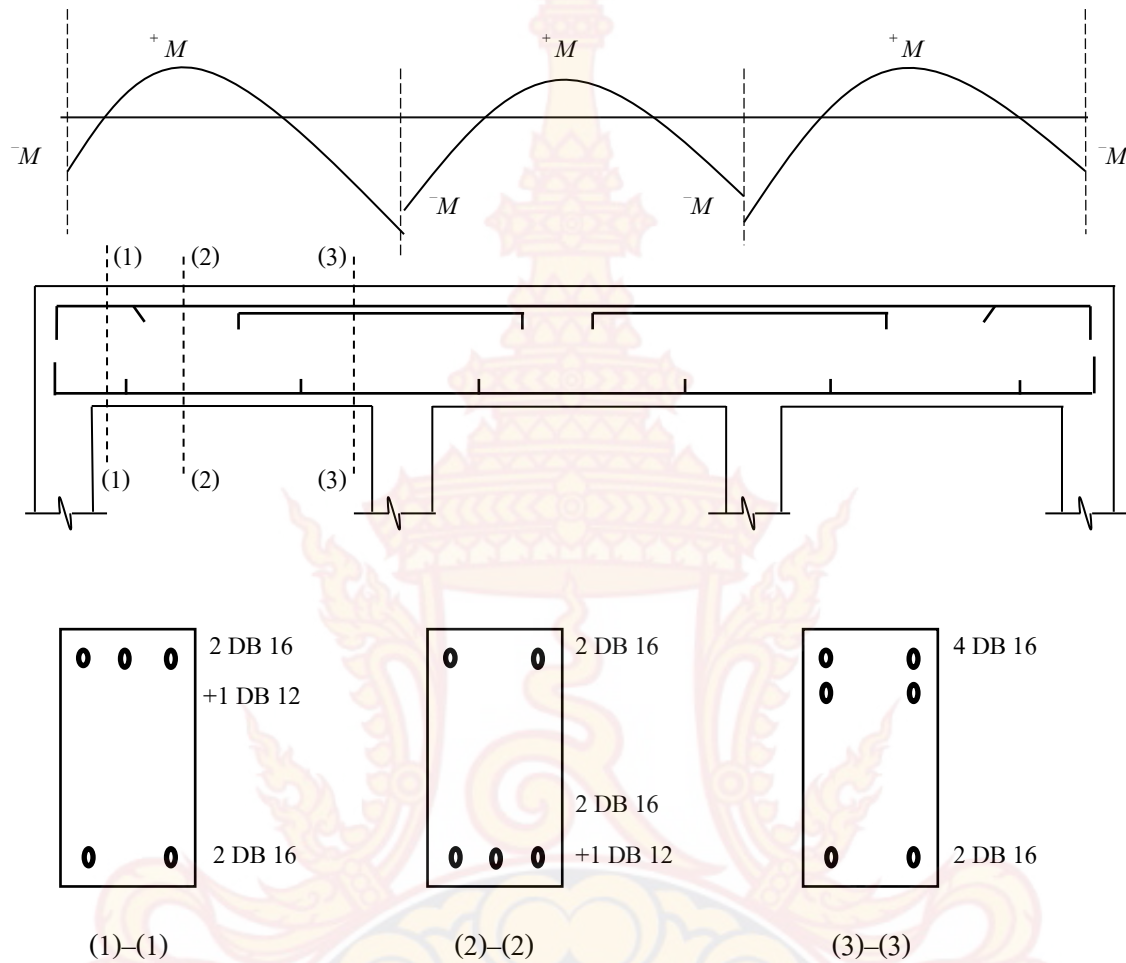
$$M_c = 2,540.88 \text{ กก.-ม.}, \quad -M = 1,842.90 \text{ กก.-ม.}$$

$M_c > M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot jd} = \frac{1,842.90 \times 100}{1,500(0.885)34} = 4.08 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 2 DB 16 + 1 DB 12 ($A_s = 5.15 \text{ ซม.}^2$)

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



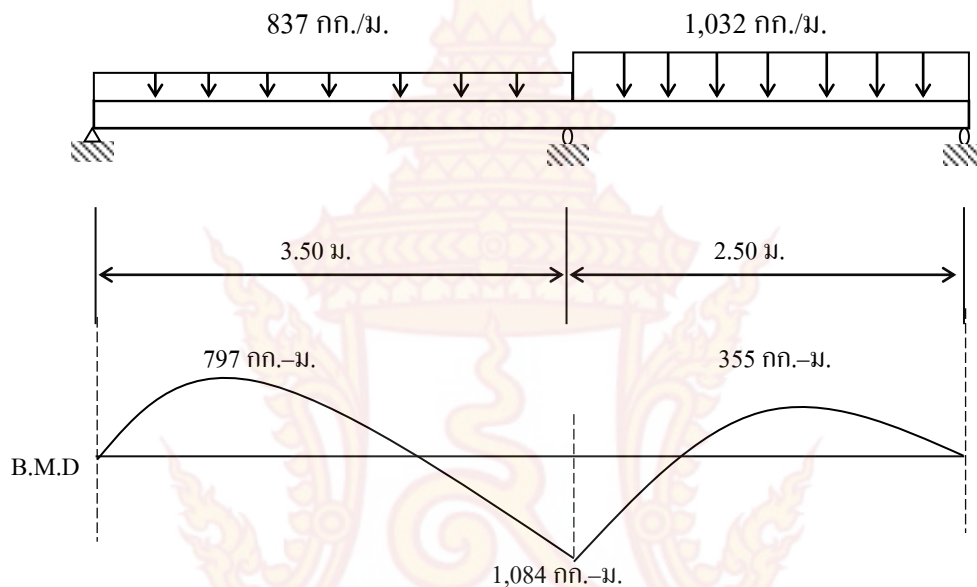
ข้อสังเกต

ในทางทฤษฎี หน้าตัดแนวที่ (3)-(3) เป็นคานช่วงในรับโมเมนต์ลบ (M) ต้องการเหล็กเสริมรับแรงดึงจำนวน 4 DB 16 (วางด้านบน) และเหล็กเสริมรับแรงอัดจำนวน 2 DB 12 (วางด้านล่าง) แต่รายละเอียดการเสริมเหล็ก แสดงการเสริมเหล็กล่าง 2 DB 16 ซึ่งเกินกว่าความต้องการ เพราะเหตุใด ?

ในทางปฏิบัติ การเสริมเหล็กควรคำนึงถึงความต่อเนื่องสอดคล้อง เพื่อให้ทำงานได้สะดวก รวดเร็ว ดังนั้น จึงเลือกใช้เหล็ก 2 DB 16 เป็นเหล็กเสริมหลักวางตามมุมทั้งสี่ตลอดความยาวคาน แล้วใช้เหล็ก DB 12 เป็นเหล็กเสริมพิเศษวางเพิ่มในช่วงต่างๆ ให้ได้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามต้องการ

ตัวอย่างที่ 4 จงคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่อง 2 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นรวมทั้งน้ำหนักคานเท่ากับ 837 กก./ม. และ 1,032 กก./ม. ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ (BMD) ดังแสดงตามรูปข้างล่าง

กำหนดให้: $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.² ขนาดคานเท่ากับ 0.15x0.35 เมตร
ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



วิธีทำ

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$\begin{aligned} M_c &= Rbd^2 = 10.99(0.15)30^2 \\ &= 1,483.65 \text{ กก.-ม.} > M_{max} \end{aligned}$$

: ออกแบบคานเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว

พิจารณาช่วงคานที่มีค่าโมเมนต์เป็นบวก :

$$+ A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j \cdot d} = \frac{797 \times 100}{1,500(0.885)30} = 2.00 \text{ ซม.}^2$$

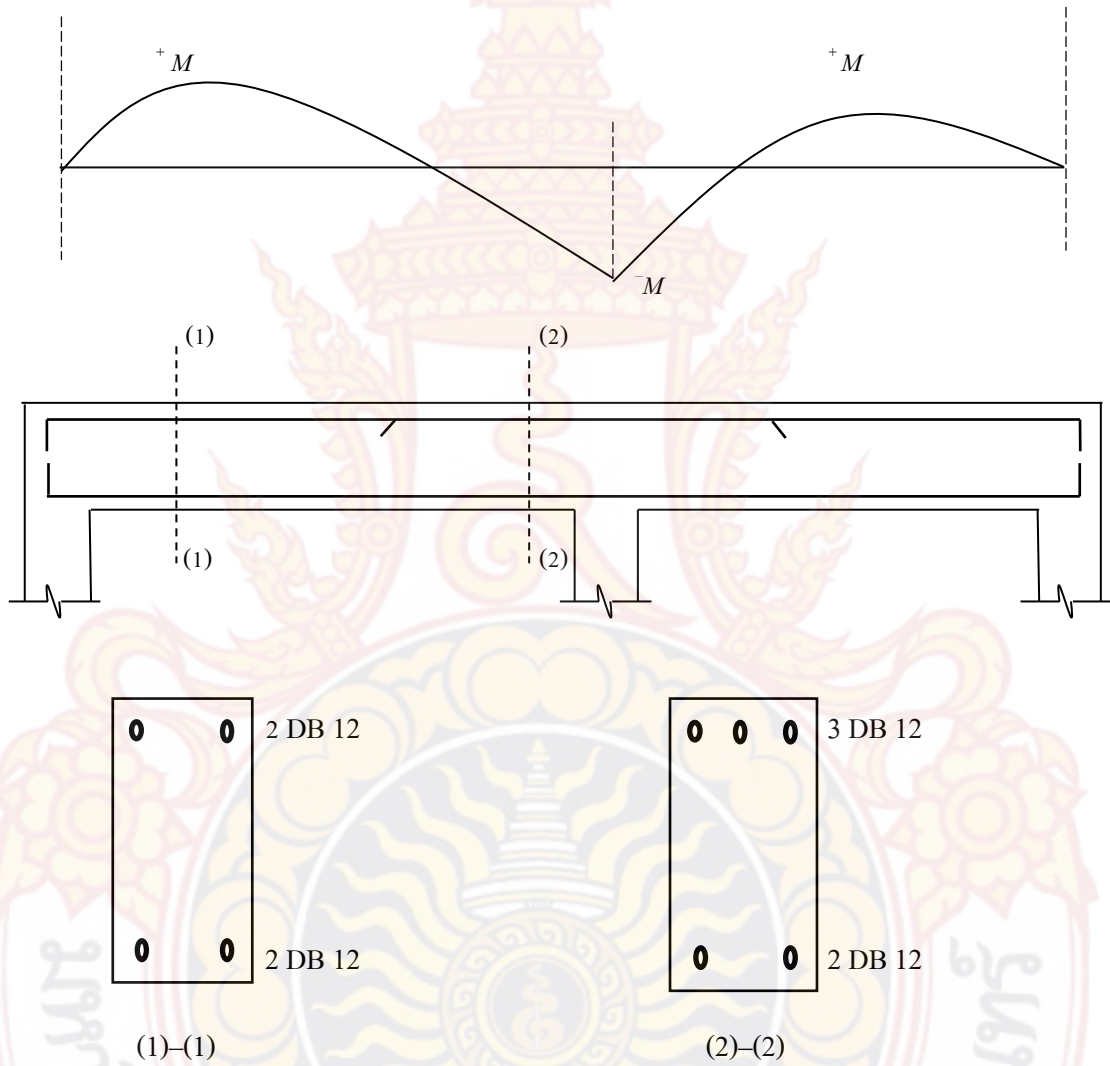
เลือก : 2 DB 12 ($A_s = 2.26$ ซม.²)

พิจารณาช่วงคานที่มีค่าโมเมนต์เป็นลบ :

$$-A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot j d} = \frac{1,084 \times 100}{1,500(0.885)30} = 2.72 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 3 DB 12 ($A_s = 3.39 \text{ ซม.}^2$)

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



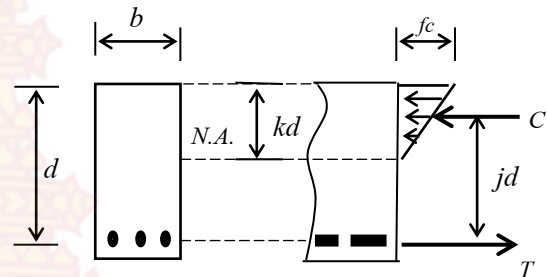
3.7 การตรวจสอบความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของคาน

เมื่อทราบถึงขนาดหน้าตัดคาน และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม ถ้าต้องการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานแรงดัด หรือการรับน้ำหนักบรรทุกของคานก็ทำได้ โดยเริ่มจากการหาค่า k หรือระยะ kd ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงตำแหน่งของแกนสะเทิน (N.A.) และแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

3.7.1 คานเสริมเหล็กรับแรงดัดอย่างเดียว

$$k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n$$

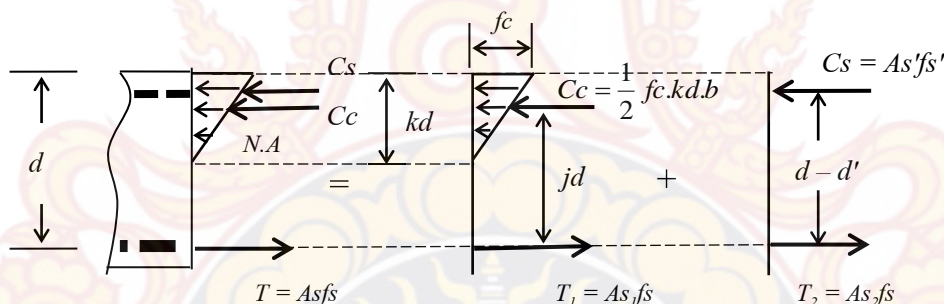
$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad \text{และ} \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$



3.7.2 คานเสริมเหล็กรับแรงดัดและแรงอัด

$$k = \sqrt{2n[\rho + 2\rho'(\frac{d'}{d})] + n^2(\rho + 2\rho')^2} - n(\rho + 2\rho')$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}, \quad \rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad \text{และ} \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$



ทั้งสองกรณีจะต้องตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดัดและเหล็กเสริมรับแรงอัด ซึ่งเป็นตัวควบคุมความปลอดภัยในการรับน้ำหนักและถือเป็นหลักเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งาน กล่าวคือหน่วยแรงของวัสดุที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกขณะใช้งาน (Working stress, f) ไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress, f_{allow})

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดัด : } fs = nfc \frac{d - kd}{kd} \leq f_{allow}$$

$$\text{และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงอัด : } fs' = 2fs \frac{kd - d'}{d - kd} \leq f_{allow}$$

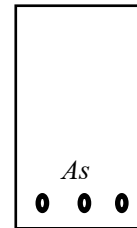
ตัวอย่างที่ 5 คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20×0.40 ม. ($b = 0.20$ ม., $d = 0.35$ ม.)

เสริมเหล็กรับแรงดึง (2 DB 16 + 1 DB 12 : $A_s = 5.15$ ซม.²) ดังรูป

จงหาโมเมนต์ต้านทานโดยปลอดภัยของคาน

กำหนดให้ : $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

$n = 11$ ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



วิธีทำ $A_s = 5.15$ ซม.², $\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{5.15}{(20)35} = 0.00858$

$$k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n = 0.35 \quad j = 1 - \frac{k}{3} = 0.883$$

$$kd = (0.35 \times 0.35) = 0.122$$

ตรวจสอบหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม : สมมติว่า f_c เท่ากับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ ($f_c = 0.45f_c'$)

$$f_s = n f_c \frac{d - kd}{kd} = 11(72) \left[\frac{0.35 - 0.122}{0.122} \right]$$

$$= 1,480 \text{ กก./ซม.}^2 < f_{allow}$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยเหล็กเสริม : $M_s = A_s f_s j d$

$$= 5.15 \times 1,480 \times 0.883 \times 0.35$$

$$= 2,355.57 \text{ กก.-ม.}$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : $M_c = \frac{1}{2} f_c k j b d^2$

$$= \frac{1}{2} \times 72 \times 0.35 \times 0.883 \times 0.20 \times 35^2$$

$$= 2,725.82 \text{ กก.-ม.}$$

ดังนั้น โมเมนต์ต้านทานโดยปลอดภัยของคานเท่ากับ 2,355.57 กก.-ม. และคานเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุล ($M_c > M_s$)

ตัวอย่างที่ 6 คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20×0.40 ม. ($b = 0.20$ ม., $d = 0.35$ ม., $d' = 0.05$ ม.)

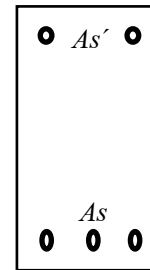
เสริมเหล็กรับแรงดึง 3 DB 20 และเหล็กเสริมรับแรงอัด 2 DB 16

($A_s = 9.42$ ซม.² และ $A_s' = 4.02$ ซม.²) ดังรูป

จงหาโมเมนต์ด้านทานโดยปลอดภัยของคาน

กำหนดให้: $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

$n = 11$ ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



วิธีทำ

$$A_s = 9.42 \text{ ซม.}^2, \quad \rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{9.42}{(20)35} = 0.01346$$

$$A_s' = 4.02 \text{ ซม.}^2, \quad \rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{4.02}{(20)35} = 0.00574$$

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \frac{2\rho'd'}{d}\right) + n^2(\rho + 2\rho')^2} - n(\rho + 2\rho') = 0.363$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 0.879$$

ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น : สมมติว่า f_c เท่ากับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ ($f_c = 0.45f_c'$)

$$\begin{aligned} \text{หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม} : f_s &= nfc \frac{1-k}{k} = (11 \times 72) \frac{1-0.363}{0.363} \\ &= 1,389.81 \text{ กก./ซม.}^2 < f_{allow} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงอัด} : f_s' &= 2fs \frac{kd-d'}{d-kd} \\ &= 960.61 \text{ กก./ซม.}^2 < f_s \end{aligned}$$

ดังนั้นโมเมนต์ด้านทานโดยปลอดภัยของคานถูกควบคุมโดยหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงดึงซึ่งมีค่าเท่ากับ $1,389.81$ กก./ซม.²

$$M_1 = Mc = \frac{1}{2} fckjbd^2 = \frac{1}{2} \times 72 \times 0.363 \times 0.879 \times 0.20 \times 35^2 = 2,814.25 \text{ กก.-ม.}$$

$$A_{s1} = \frac{M_1}{f_s \times j \times d} = \frac{2,814.25 \times 100}{1,389.81(0.879)35} = 6.58 \text{ ซม.}^2$$

$$A_{s2} = A_s - A_{s1} = 9.42 - 6.58 = 2.84 \text{ ซม.}^2$$

$$M_2 = A_{s2} f_s (d - d') = 2.84 \times 1,389.81 (0.35 - 0.05) = 1,184.11 \text{ กก.-ม.}$$

โมเมนต์ด้านทานโดยปลอดภัยของคาน

$$M_1 + M_2 = 2,814.25 + 1,184.11 = 3,998.36 \text{ กก.-ม.}$$

แบบฝึกหัด

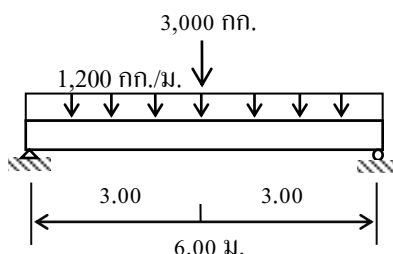
1. คานช่วงเดียวยาว 6.00 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอ 1,200 กก./ม. (ไม่รวมน้ำหนักคาน) และ น้ำหนักลงเป็นจุด 3,000 กก. ที่กึ่งกลางคาน ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

ก) ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

ข) ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

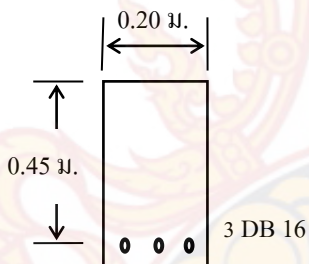


2. จงคำนวณหาความต้านทานโมเมนต์คัตปลอดภัยของคานเสริมเหล็ก ดังรูป

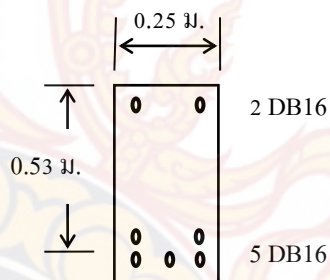
กำหนดให้ $f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$

ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

ก)



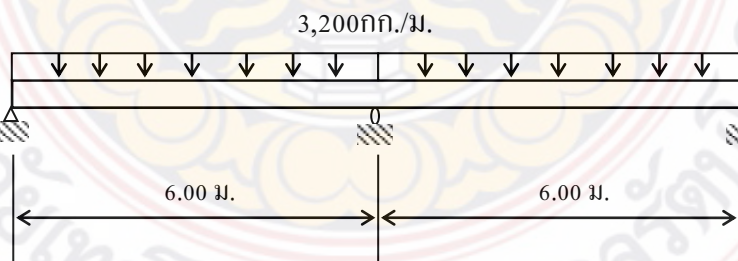
ข)



3. จงออกแบบคานต่อเนื่องรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอ 3,200 กก./ม. (ไม่รวมน้ำหนักคาน) ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

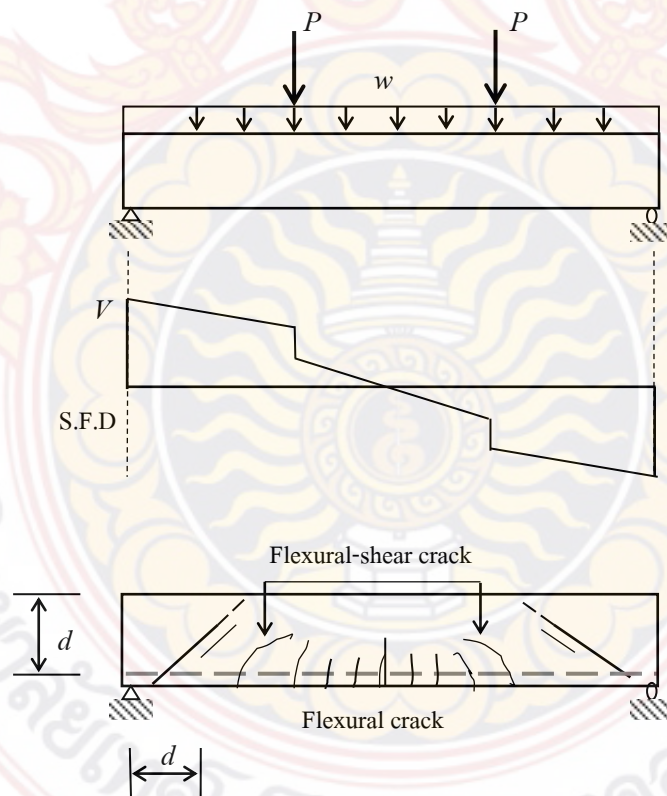


บทที่ 4

แรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยว และแรงบิด

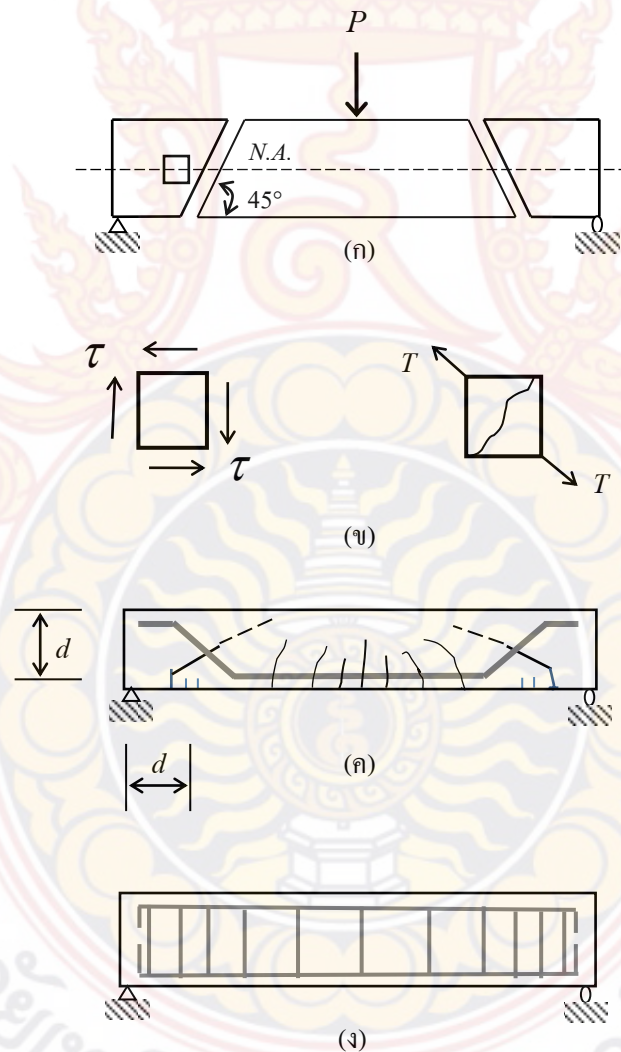
4.1 แรงเฉือน

คานคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดึงที่อาจเกิดจากแรงดึงโดยตรง หรือเกิดจากโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงบิด เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเกินกว่าหน่วยแรงดึงที่คอนกรีตรับได้ก็จะเกิดการแตกร้าว ดังรูปที่ 4.1 หน่วยแรงดึงที่ทำให้เกิดการแตกร้าวที่ท้องคานด้านล่างบริเวณกึ่งกลางคานตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด เรียกว่าการแตกร้าวจากการดัด (Flexural crack) ส่วนการแตกร้าวแนวเฉียงที่แนวแกนสะเทินเชื่อมต่อกับรอยร้าวจากการดัดบริเวณท้องคานด้านล่างเป็นผลจากหน่วยแรงดึงที่เกิดจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด จึงเรียกว่าการแตกร้าวจากการเฉือนร่วมกับการดัด (Flexural-shear crack) บริเวณฐานรองรับซึ่งแรงเฉือนมีค่ามากจะพบการแตกร้าวแนวเฉียงที่แกนสะเทินเกิดจากแรงดึงทแยง และนำไปสู่การวิบัติของคานคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็ก ด้านทานแรงเฉือน ดังนั้น ในการคำนวณออกแบบมาตรฐาน ว.ส.ท. 6103 ให้ใช้แรงเฉือนสูงสุด (V_u) ที่ตำแหน่งห่างจากขอบฐานรองรับเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของคาน (d) และถือเป็นแนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือน



รูปที่ 4.1 การแตกร้าวของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุก

4.1.1 แรงเฉือนและแรงดึงทแยงในคาน การวิบัติของคานภายใต้แรงเฉือนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากขอบฐานรองรับเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของคาน (d) โดยแนววิบัติทำมุมเฉียง 45 องศา กับแนวราบ เมื่อพิจารณาชิ้นส่วนเล็กๆ ที่ตำแหน่งแนวแกนสะเทิน ดังรูปที่ 4.2 (ก) จะเห็นว่าจุดดัดงอตัวอยู่ภายใต้การกระทำของหน่วยแรงเฉือนอย่างเดียว (Pure shear) ส่งผลให้เกิดแรงดึงทแยงในคาน (Diagonal tension) ดังรูปที่ 4.2 (ข) เมื่อแรงดึงที่เกิดขึ้นเกินกว่าแรงดึงที่คอนกรีตรับได้จึงเกิดการแตกร้าวและเกิดการวิบัติที่บริเวณดังกล่าว (สถาพร โภคา, 2544) การเสริมเหล็กด้านทานแรงเฉือนทำได้โดยให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงโดยตรงตามทิศทางของแรงดึง คือ เสริมตั้งฉากกับแนวแตกร้าวที่ทำมุม 45 องศา กับแนวราบ ที่เรียกว่าเหล็กคอกม้า ดังรูปที่ 4.2 (ค) แต่ปัจจุบันนิยมเสริมเหล็กคอกตั้งหรือเหล็กปลอก (Vertical stirrup) เพื่อต้านทานแรงเฉือนซึ่งทำได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว โดยวางเป็นระยะตามแนวความยาวคาน ดังรูปที่ 4.2 (ง)



(สถาพร โภคา, 2544)

รูปที่ 4.2 การวิบัติของคานภายใต้แรงเฉือนและการเสริมเหล็กด้านทานแรงเฉือน

4.1.2 เหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน กำลังต้านทานแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดจากการรับแรงร่วมกันของวัสดุทั้งสอง นั่นคือ กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยคอนกรีตและเหล็กเสริม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = V_c + V'$$

โดยที่ V : แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน หาได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

V_c : กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยคอนกรีต ว.ส.ท. กำหนดให้

$$\text{หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต} : v_c = 0.29\sqrt{fc'}$$

$$\text{ดังนั้น } V_c = v_c b.d = 0.29\sqrt{fc'} b.d$$

V' : กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยเหล็กเสริม ($V' = V - V_c$)

ในกรณีที่ออกแบบให้เหล็กเสริมรับแรงโดยตรงซึ่งใช้ชุดเหล็กค่อมประกอบด้วยเหล็กหลายเส้น หรือใช้เหล็กปลอกที่ทำมุม 45 องศา กับแนวราบ (มุม $\alpha = 45^\circ$) โดยวางเรียงระยะห่างเท่ากัน มาตรฐาน ว.ส.ท. 6304 (ค) กำหนดให้กำลังต้านทานแรงเฉือน โดยเหล็กเสริมคำนวณได้ ดังนี้

$$V' = \frac{A_v \cdot f_v \cdot d (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s}$$

หรือคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน ดังนี้

$$A_v = \frac{V' \cdot s}{f_v \cdot d (\sin \alpha + \cos \alpha)}$$

และในกรณีที่ออกแบบเป็นเหล็กปลอกที่ทำมุม 90 องศา กับแนวราบ (มุม $\alpha = 90^\circ$) โดยวางเรียงระยะห่างเท่ากัน ว.ส.ท. 6303 (ก) กำหนดให้คำนวณพื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก ดังนี้

$$A_v = \frac{V' \cdot s}{f_v \cdot d}$$

หรือเลือกขนาดเหล็กปลอก และคำนวณหาระยะห่างของเหล็กปลอก ดังนี้

$$s = \frac{A_v \cdot f_v \cdot d}{V'}$$

โดยที่ s : ระยะห่างของเหล็กปลอก

A_v : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน (เหล็กปลอก)

f_v : หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของเหล็กเสริม ($f_v = 0.5 f_y$)

d : ความลึกประสิทธิภาพของคาน

4.1.3 ข้อกำหนดมาตรฐาน ว.ส.ท. การคำนวณออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงเฉือนให้เป็นไปตามเกณฑ์บังคับ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6305 และ 6306 ดังนี้

1) หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน : $v < 1.32\sqrt{fc'}$ หรือแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในคาน : $V < 1.32\sqrt{fc'}b.d$ กรณีเกินกว่าที่กำหนด ต้องเปลี่ยนขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

2) หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.29\sqrt{fc'}$ หรือกำลังด้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีต : $V_c = 0.29\sqrt{fc'}b.d$

3) หน่วยแรงเฉือนที่ด้านทานโดยเหล็กเสริม : $v' < 1.03\sqrt{fc'}$ หรือกำลังด้านทานแรงเฉือนโดยเหล็กเสริม : $V' < 1.03\sqrt{fc'}b.d$

4) ณ ที่ใดต้องใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือน ต้องจัดระยะห่างของเหล็กเสริม (s) ไม่เกิน $\frac{d}{2}$ และถ้าหน่วยแรงเฉือน (v) เกินกว่า $0.795\sqrt{fc'}$ ระยะห่างของเหล็กเสริม (s) ไม่เกิน $\frac{d}{4}$ หรือพิจารณาจากแรงเฉือน (V) ที่เกิดขึ้นในคาน ระยะห่างของเหล็กปลอก (s) ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ดังนี้

$$(ก) \text{ กรณี } V \leq 0.795\sqrt{fc'}b.d \text{ ต้องไม่เกิน } \frac{d}{2}$$

$$(ข) \text{ กรณี } V > 0.795\sqrt{fc'}b.d \text{ ต้องไม่เกิน } \frac{d}{4}$$

5) กรณีที่กำลังด้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตมากกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในคาน ($V_c > V$) ในทางทฤษฎีหมายความว่า คานคอนกรีตมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรับแรงเฉือนได้ อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดให้เสริมเหล็กปลอกในปริมาณต่ำสุด เท่ากับ $Av = 0.0015b.s$ หรือ เสริมเหล็กปลอกระยะห่างเท่ากับ : $s = \frac{Av}{0.0015b}$

ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงเฉือน (เหล็กปลอก)

1. หาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานที่แนวหน้าตัดวิกฤต (V_d) และตรวจสอบ ถ้า $V > 1.32\sqrt{fc'}b.d$ ต้องเปลี่ยนขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

2. หาแรงเฉือนที่ด้านทานโดยคอนกรีต : $V_c = 0.29\sqrt{fc'}b.d$

3. หาแรงเฉือนที่ด้านทานโดยเหล็กเสริม : $V' = V_d - V_c$

4. ตรวจสอบระยะห่างของเหล็กปลอก (s) ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ดังนี้

$$(ก) \text{ กรณี } V \leq 0.795\sqrt{fc'}b.d \text{ ต้องไม่เกิน } \frac{d}{2}$$

$$(ข) \text{ กรณี } V > 0.795\sqrt{fc'}b.d \text{ ต้องไม่เกิน } \frac{d}{4}$$

5. คำนวณหาระยะห่างของเหล็กปลอก : $s = \frac{Av \cdot f_v \cdot d}{V'}$

6. กรณี $V_c > V$: ระยะห่างเหล็กปลอก : $s = \frac{Av}{0.0015b}$

ตัวอย่างที่ 1 จงคำนวณหาระยะห่างเหล็กปลอก รับแรงเฉือน (V) เท่ากับ 4,700 กก.

กำหนดให้ $fc' = 160$ กก./ชม.² $fy = 2,400$ กก./ชม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

ขนาดหน้าตัดคานเท่ากับ 0.20 x 0.45 เมตร ($b = 0.20$ ม., $d = 0.40$ ม.)

วิธีทำ $V = 4,700$ กก. : ตรวจสอบ $V < 1.32\sqrt{fc'b.d}$

$$V_c = 0.29\sqrt{fc'bd} = 0.29\sqrt{160(20)(40)} = 2,934.59 \text{ กก.}$$

$$V' = V - V_c = 4,700 - 2,934.59 = 1,765.41 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบระยะห่างของเหล็กปลอก (s) ตามเกณฑ์บังคับ มาตรฐาน ว.ส.ท.

$$\text{แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน : } V = 4,700 \text{ กก.} < 0.795\sqrt{fc'b.d}$$

$$\text{ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอก : } s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V'} \leq \frac{d}{2}$$

กรณีเลือกใช้เหล็กปลอกขนาด ϕ 6 มม. $A_v = 0.565$ ชม.²

$$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V'} = \frac{0.565(1,200)40}{1,765.41} = 15.36 \text{ ซม.}$$

ใช้เหล็กปลอก ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.

กรณีเลือกใช้เหล็กปลอกขนาด ϕ 9 มม. $A_v = 1.272$ ชม.²

$$s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V'} = \frac{1.272(1,200)40}{1,765.41} = 34.58 \text{ ซม.}$$

ใช้เหล็กปลอก ϕ 9 มม. @ 0.20 ม. (ข้อกำหนด : $s \leq \frac{d}{2}$)



← ป ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.

หรือ ป ϕ 9 มม. @ 0.20 ม.

ตัวอย่างที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวยาว 5.00 ม. รับน้ำหนักแบบสม่ำเสมอเท่ากับ 3,800 กก./ม.

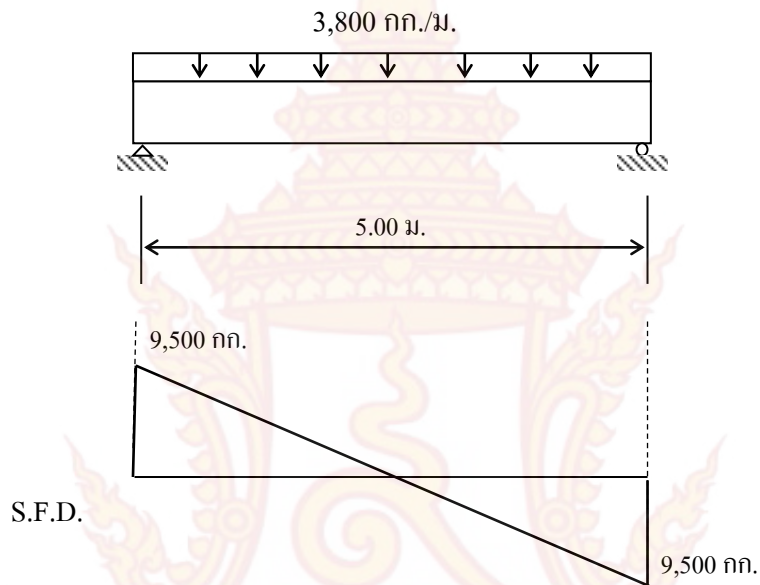
ตลอดความยาวคาน จงหาขนาดและระยะห่างของเหล็กปลอกโดยละเอียด

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 2,400$ กก./ซม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

ขนาดหน้าตัดคานเท่ากับ 0.20 x 0.50 เมตร ($b = 0.20$ ม., $d = 0.43$ ม.)

วิธีทำ



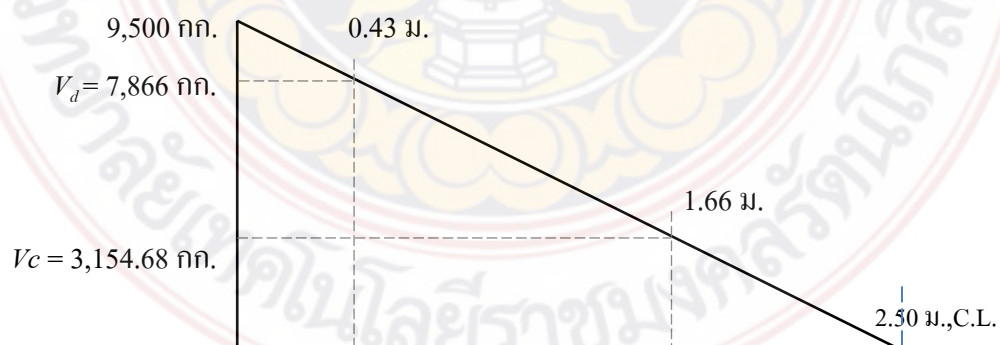
แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤต (ตำแหน่งห่างจากฐานรองรับเท่ากับระยะ $d = 0.43$ ม.)

$$V_d = 9,500 - (3,800 \times 0.43) = 7,866 \text{ กก.} < 0.795\sqrt{f_c'}bd$$

$$V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd = 0.29\sqrt{160}(20)(43) = 3,154.68 \text{ กก.}$$

$$V' = V_d - V_c = 7,866 - 3,154.68 = 4,711.32 \text{ กก.}$$

พิจารณารูป S.F.D. จากรูปสามเหลี่ยมคล้ายจะเห็นว่าค่า $V_c = 3,154.68$ กก. อยู่ที่ระยะ 1.66 ม. จากฐานรองรับ ดังนั้น ที่ระยะดังกล่าวถึงกลางคานในทางทฤษฎีไม่ต้องเสริมเหล็กปลอกก็ได้



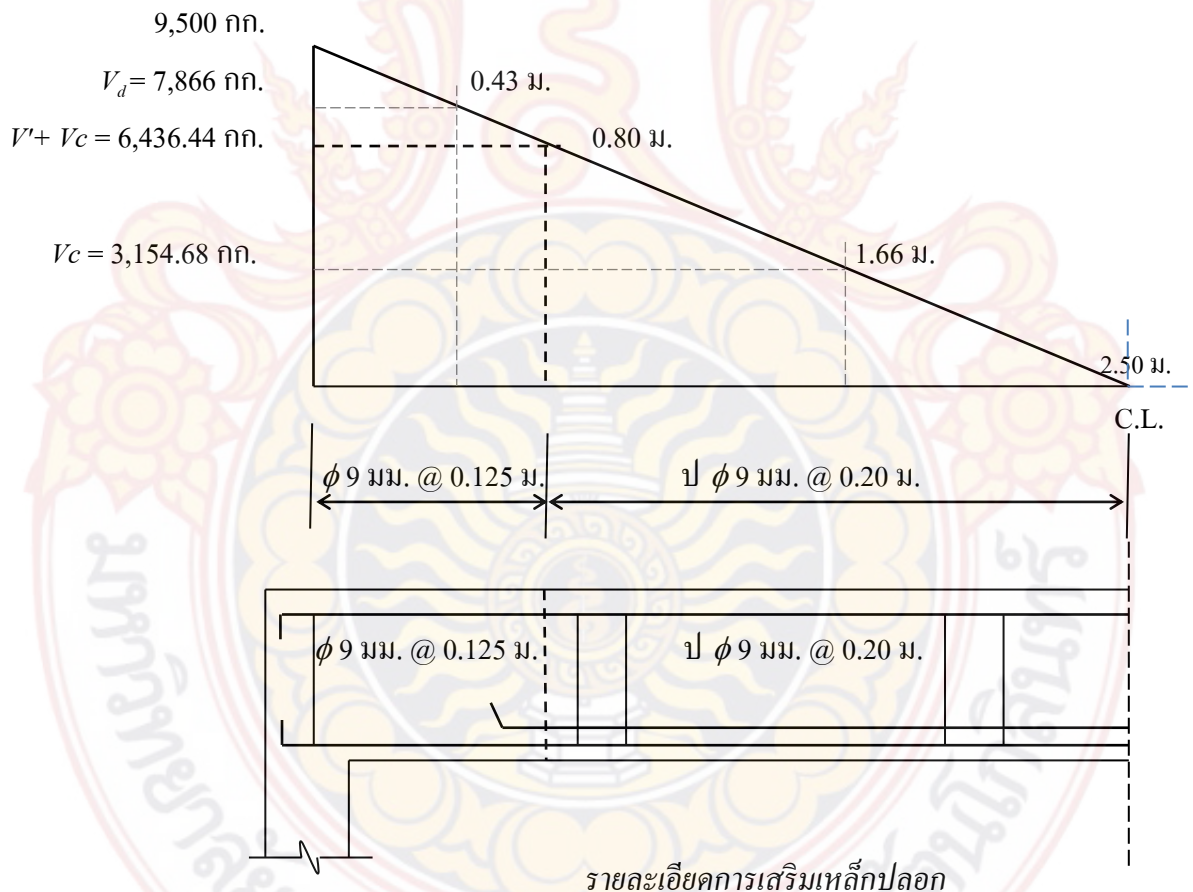
อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ว.ศ.ท. กำหนดให้เสริมเหล็กปลอกในปริมาณต่ำสุด ถ้าเลือกใช้เหล็กปลอก ϕ 9 มม. @ 0.20 ม. ซึ่งเหล็กปลอกที่เสริมในปริมาณต่ำสุดจะรับแรงเฉือนได้

$$V' = \frac{Av \cdot fv \cdot d}{S} = \frac{1.272(1,200)43}{20} = 3,281.76 \text{ กก.}$$

รวมแรงเฉือนที่คอนกรีตและเหล็กปลอกรับได้ : $V = V_c + V' = 3,281.76 + 3,154.68 = 6,436.44$ กก. และเมื่อกลับไปพิจารณารูป S.F.D. จะเห็นว่าค่า $V' + V_c = 6,436.44$ กก. อยู่ที่ระยะ 0.80 ม. จากฐานรองรับ ดังนั้น ในช่วงที่เหลือจากฐานรองรับถึงระยะ 0.80 ม. เลือกใช้เหล็กปลอก ϕ 9 มม. คำนวณระยะห่างเหล็กปลอกได้ ดังนี้

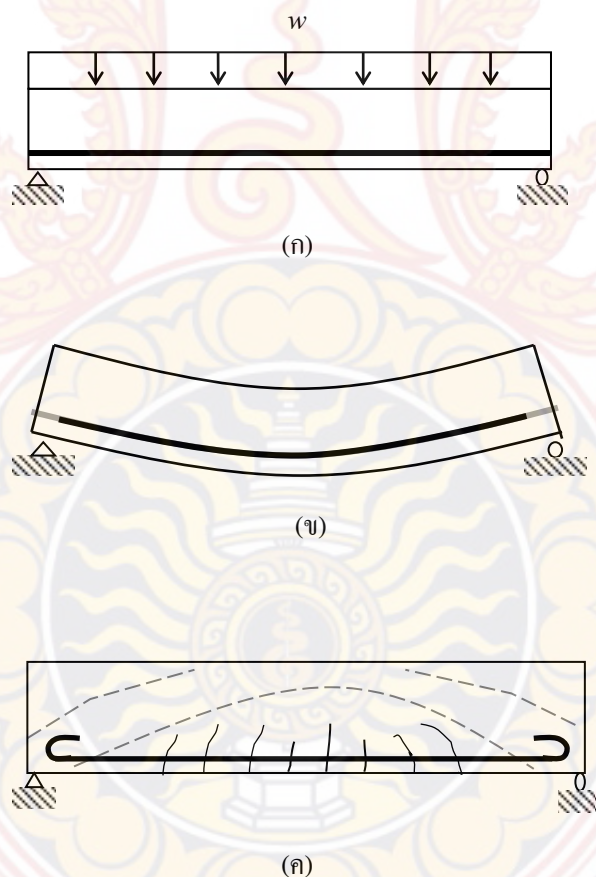
$$s = \frac{Av \cdot fv \cdot d}{V'} = \frac{1.272(1,200)43}{4,711.32} = 13.93 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้เหล็กปลอก ϕ 9 มม. @ 0.125 ม.



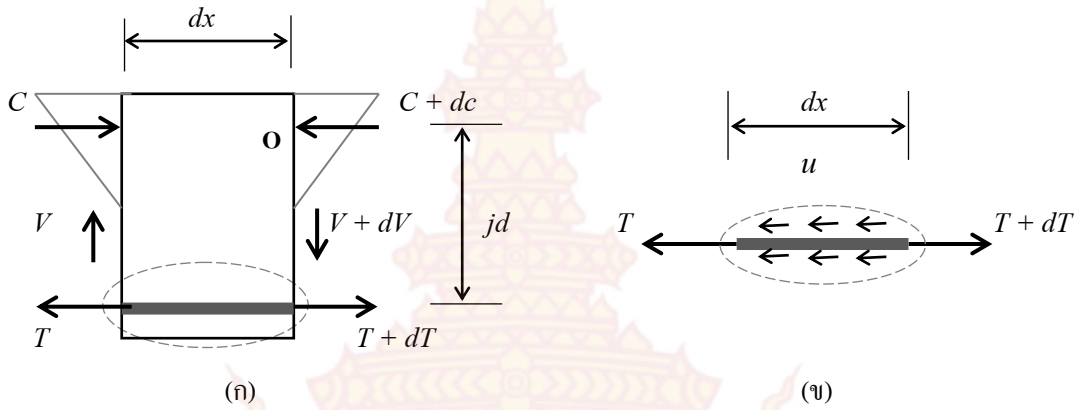
4.2 แรงยึดเหนี่ยว (Bond)

คานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ คอนกรีต และเหล็กเสริม เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ดังรูปที่ 4.3 (ก) พบว่า แรงภายในต่างๆ ที่เกิดขึ้นในคานส่งผลให้คานเกิดการโก่งตัว และอาจทำให้เกิดการรูดของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4.3 (ข) จากสมมติฐานข้อที่ 3 ในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ หน่วยการยึดเหนี่ยวตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีค่าเท่ากัน เพื่อให้เป็นไปตามสมมติฐาน มาตรฐาน ว.ส.ท. 6501 (ข) กำหนดให้ที่หน้าตัดใดๆ ต้องมีความยาวระยะฝัง การยึดปลายหรือมีของสำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เพียงพอ เนื่องจากผลของการโก่งตัวของคาน จากรูปที่ 4.3 (ค) จะเห็นว่าบริเวณท้องคานเกิดแรงดึงทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวจึงสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ดังนั้น การยึดปลายหรือการงอปลายเหล็กเสริมจะป้องกันการรูดของเหล็กเสริมและช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่สูญเสียไป



รูปที่ 4.3 การยึดปลายหรือการงอปลายเหล็กเสริม (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

ในองค์อาคารรับแรงคัตที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงขนานกับผิวที่รับแรงอัด หน่วยแรงยึดหยุ่นอันเกิดจากแรงคัตที่หน้าตัดใดๆ พิจารณาจากความยาวคานระยะ dx ดังรูปที่ 4.4 (ก) และหน่วยแรงยึดหยุ่นกับแรงดึงในเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4.4 (ข)



รูปที่ 4.4 หน่วยแรงยึดหยุ่น (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

รูปที่ 4.4 (ก) พิจารณา $\sum M_o = 0$ $\curvearrowright +$

$$dT \cdot jd - Vdx = 0$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{V}{jd} \quad \dots\dots\dots(a)$$

รูปที่ 4.4 (ข) พิจารณา $\sum F_x = 0$ $\rightarrow +$

$$dT - u \cdot \sum_o dx = 0$$

$$\frac{dT}{dx} = u \cdot \sum_o \quad \dots\dots\dots(b)$$

แทนค่าสมการ (b) ลงใน (a) จะได้

$$u = \frac{V}{\sum_o \cdot jd}$$

โดยที่ u : หน่วยแรงยึดหยุ่น

V : แรงเฉือน

\sum_o : เส้นรอบรูปของเหล็กเสริม

d : ความลึกประสิทธิภาพของคาน

หน่วยแรงยึดหน่วง (u) ที่คำนวณได้ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้ ในกรณีที่หน่วยแรงยึดหน่วงที่เกิดจากแรงคดในเหล็กเสริมรับแรงอัด หรือในเหล็กเสริมรับแรงดึง ซึ่งหน่วยแรงยึดหน่วงเกิดจากการยึดปลายมีค่าน้อยกว่า 0.8 ของค่าที่ยอมให้ ไม่ต้องนำมาพิจารณา และมาตรฐาน ว.ส.ท. 6501 (ค) กำหนดหน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 หน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้

ตำแหน่ง	เหล็กกลมผิวเรียบ : RB	เหล็กข้ออ้อย : DB
เหล็กเสริมรับแรงดึง : เหล็กบน* เหล็กอื่นๆ นอกจากเหล็กบน	$\frac{1.145\sqrt{fc'}}{d_b} \leq 11$; กก./ชม. ² $\frac{1.615\sqrt{fc'}}{d_b} \leq 11$; กก./ชม. ²	$\frac{2.29\sqrt{fc'}}{d_b} \leq 25$; กก./ชม. ² $\frac{3.23\sqrt{fc'}}{d_b} \leq 35$; กก./ชม. ²
เหล็กเสริมรับแรงอัด : เหล็กบนและเหล็กอื่นๆ	$0.86\sqrt{fc'} \leq 11$; กก./ชม. ²	$1.72\sqrt{fc'} \leq 28$; กก./ชม. ²

* เหล็กบน: เหล็กเสริมตามแนวอนที่มีคอนกรีตหล่ออยู่ได้เหล็กเกินกว่า 30 เซนติเมตร ขึ้นไป

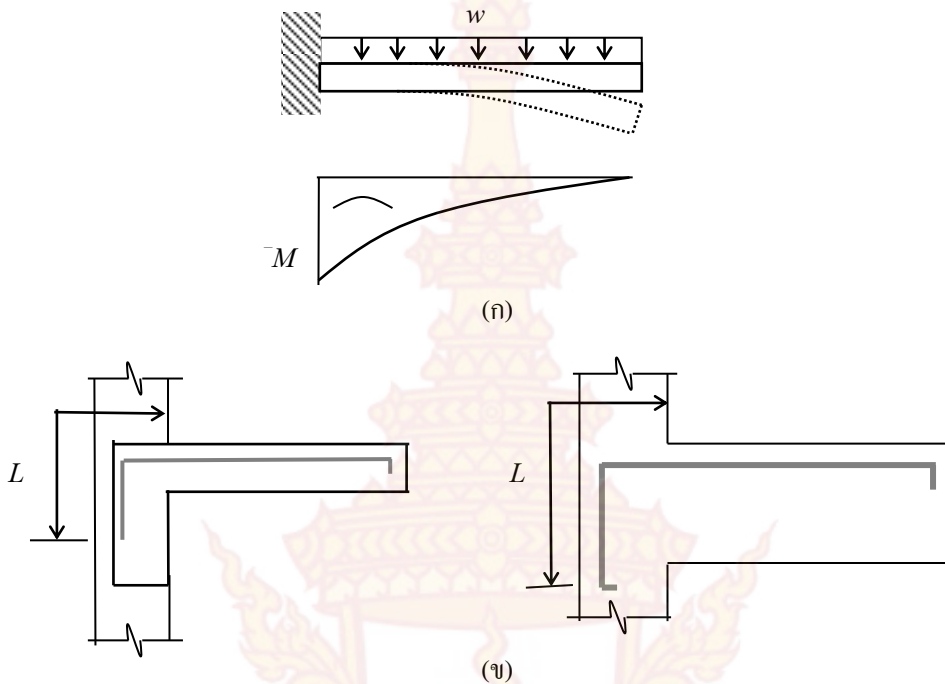
พฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นยื่นหรือคานยื่นภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน พื้นยื่นหรือคานยื่นจะโค้งตัวตามทิศทางของโมเมนต์คด (M) ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ฐานรองรับ ดังรูปที่ 4.5 (ก) การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นที่หลังคานบริเวณฐานรองรับ เนื่องจากแรงดึงที่เกิดจากการคดโค้งของคาน ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่บริเวณดังกล่าว ดังนั้น นอกจากการเสริมเหล็กรับแรงดึงเพื่อต้านทานโมเมนต์คดแล้ว ต้องเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กเสริมในการออกแบบพื้นหรือคานยื่นด้วย ดังรูปที่ 4.5 (ข) เพื่อทดแทนแรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่สูญเสียไป และป้องกันการวิบัติจากการรูดของเหล็กเสริม ความยาวระยะฝังของเหล็กเสริมพิจารณาจาก แรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เพียงพอต่อแรงดึงของเหล็กเสริม แรงยึดหน่วงคำนวณจากหน่วยแรงยึดหน่วง (u) คูณกับพื้นที่ ซึ่งก็คือผลคูณของเส้นรอบรูป ($\sum o$) กับความยาวระยะฝัง (L) ส่วนแรงดึงของเหล็กเสริม คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม (A_s) คูณกับหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม (f_s) ดังนี้

$$\text{แรงยึดหน่วง} : \sum o \cdot L \cdot u = \pi d_b \cdot L \cdot u$$

$$\text{และแรงดึงในเหล็กเสริม} : A_s f_s = \frac{\pi d_b^2}{4} f_s$$

$$\text{เมื่อแรงยึดหน่วงเท่ากับแรงดึงของเหล็กเสริม} : \pi d_b \cdot L \cdot u = \frac{\pi d_b^2}{4} f_s$$

$$\text{ความยาวระยะฝัง} : L = \frac{d_b f_s}{4u}$$

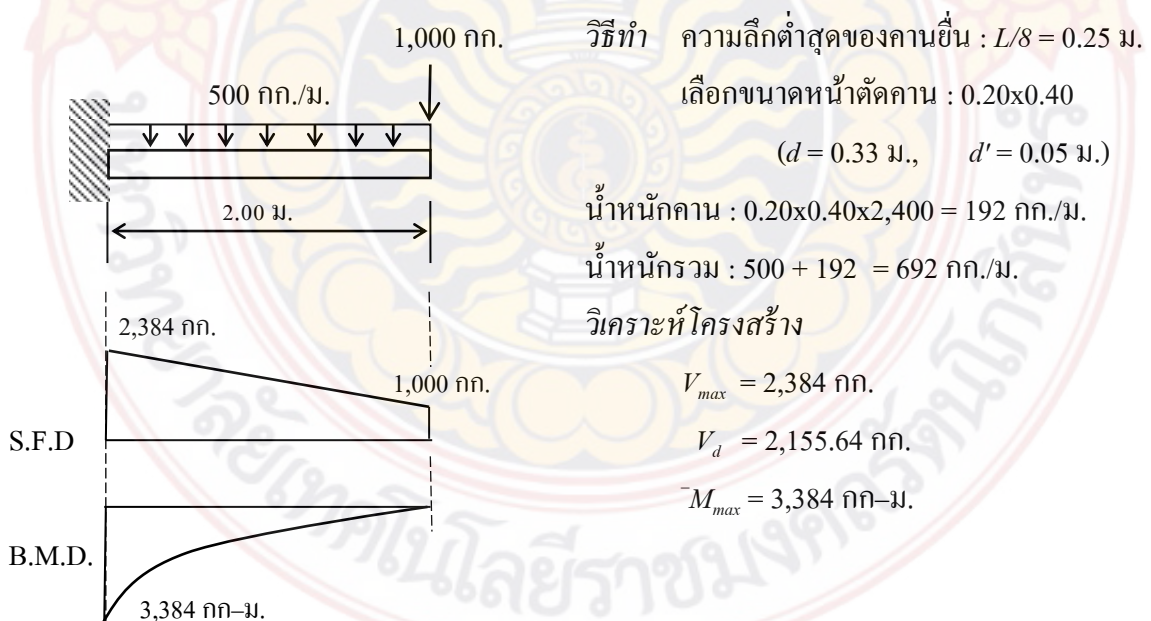


รูปที่ 4.5 ความยาวระยะฝั่งของเหล็กเสริม

ตัวอย่างที่ 3 จงออกแบบคานยื่น ระยะยื่นจากเสา 2.00 ม. รับน้ำหนักแบบสม่ำเสมอเท่ากับ 500 กก./ม. และน้ำหนักกระทำเป็นจุดที่ปลายคานเท่ากับ 1,000 กก. ดังรูป พร้อมทั้งหาระยะฝั่งเหล็กเสริม (L)

กำหนดให้ $f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



ค่าคงที่ในการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 10.99(0.20)33^2 = 2,393.62 \text{ กก-ม.} < 3,384 \text{ กก-ม.}$$

 $M_c < M_{max}$: ออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

$$As_1 = \frac{M_c}{fs \cdot jd} = \frac{2,393.62 \times 100}{1,500(0.885)33} = 5.46 \text{ ซม.}^2$$

$$As_2 = \frac{M_{max} - M_c}{fs(d - d')} = \frac{990.38 \times 100}{1,500(33 - 5)} = 2.35 \text{ ซม.}^2$$

$$As = As_1 + As_2 = 7.81 \text{ ซม.}^2$$

เลือก : 4 DB 16 ($As = 8.04 \text{ ซม.}^2$)

$$As' = \frac{1}{2} As_2 \frac{(1-k)}{(k - \frac{d'}{d})} = \frac{1}{2} (2.35) \frac{(1-0.345)}{(0.345 - \frac{5}{33})}$$

$$= 3.97 \text{ ซม.}^2$$

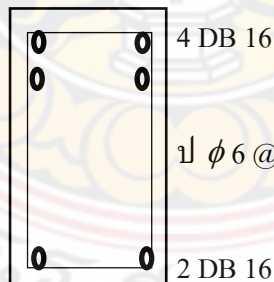
เลือก : 2 DB 16 ($As = 4.02 \text{ ซม.}^2$)แรงเฉือนที่แนวหน้าตัดวิกฤต : $V_d = 2,155.64 \text{ กก.}$

$$\text{แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีต : } V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd = 0.29\sqrt{160}(20)(33)$$

$$= 2,421.03 \text{ กก.} > V_d$$

ดังนั้น เสริมเหล็กปลอกในปริมาณต่ำสุด : $A_v = 0.0015 b_w s$ เลือกใช้เหล็ก ϕ 6 มม.

$$s = \frac{A_v}{0.0015b_w} = \frac{0.565}{0.0015(20)} = 18.83 \text{ ซม.} \leq \frac{d}{2}$$

เลือกใช้เหล็กปลอก ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.ป ϕ 6 @ 0.15 ม.

2 DB 16

ตรวจสอบหน่วยแรงยึดหน่วง : u

$$u = \frac{V_d}{\sum_o . j . d} = \frac{2,155.64}{20.10(0.885 \times 33)}$$

$$= 3.67 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้ : u_a

$$u_a = \frac{2.29\sqrt{f'c'}}{d_b} = \frac{2.29\sqrt{160}}{1.6}$$

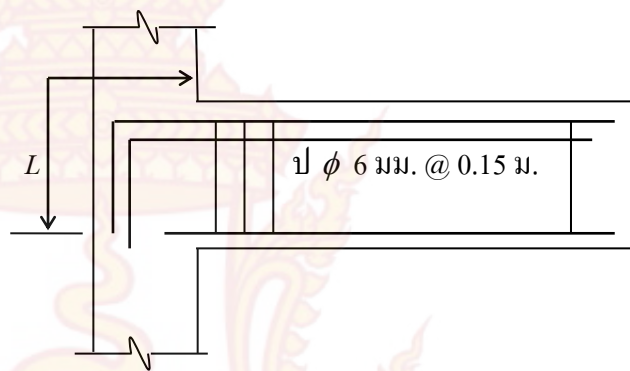
$$= 18.10 \text{ กก./ซม.}^2 > u$$

ระยะฝังเหล็กเสริมในคอนกรีต : L

$$L = \frac{d_b \cdot f_s}{4u} = \frac{1.6(1,500)}{4(18.10)}$$

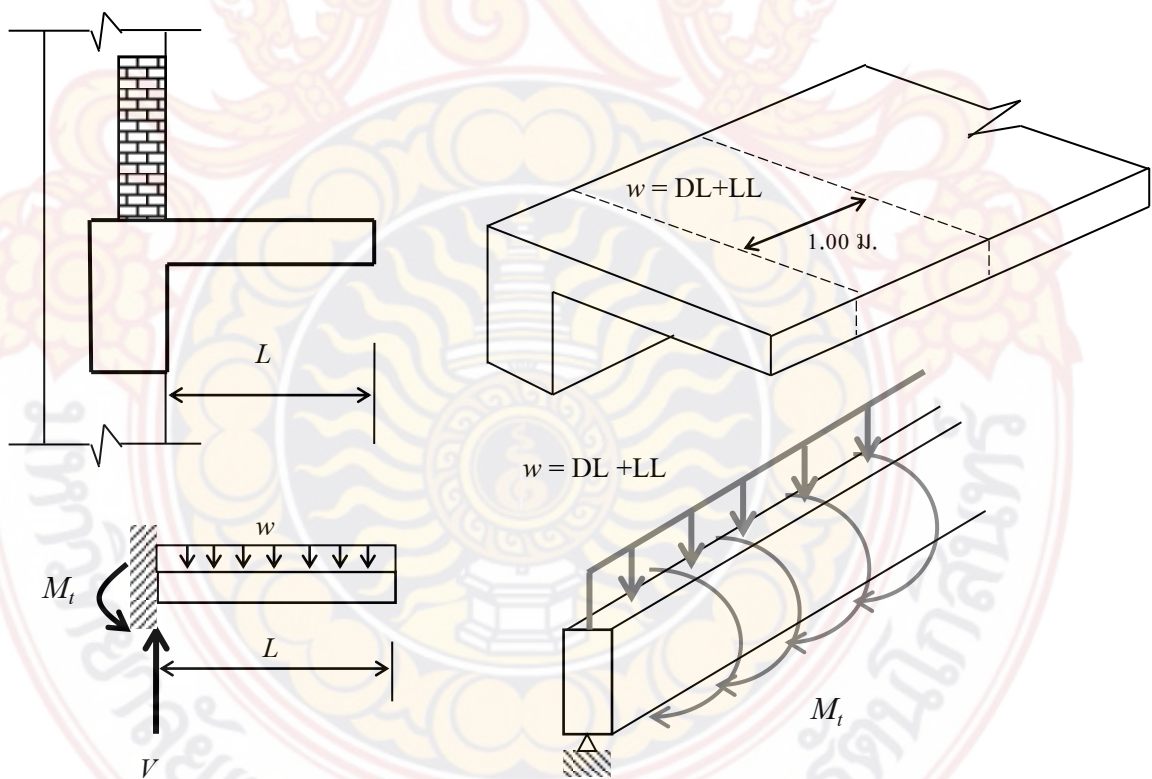
$$= 33.14 \text{ ซม.}$$

$$= 0.35 \text{ ม.}$$



4.3 แรงบิด (Torsion)

แรงบิดเกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำเชิงศูนย์กลางห่างออกจากแนวแกนขององค์อาคาร เช่น คานรับพื้นระเบียง หรือคานรับพื้นกันสาด ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นยื่นรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) เป็นน้ำหนักแผ่แบบสม่ำเสมอแล้วถ่ายน้ำหนักไปยังคานที่เป็นฐานรองรับแบบยึดแน่นให้กับพื้นยื่น การรับน้ำหนักของคานรับพื้นยื่นจึงมีทั้งแรงตามแนวตั้ง และ โมเมนต์คดกระทำตามความยาวคาน ซึ่งโมเมนต์คดกระทำตามความยาวคานนี้เองก็คือแรงบิดหรือโมเมนต์บิดที่ต้องนำมาพิจารณาคำนวณออกแบบ เมื่อองค์อาคารถูกโมเมนต์บิดกระทำจะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนขึ้นสำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของหน้าตัดคานแต่ละด้านแล้วค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ที่มุมทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่มักจะพบองค์อาคารที่ถูกแรงบิดกระทำร่วมกับแรงอื่นๆ เช่น โมเมนต์คด และแรงเฉือน ดังนั้น การออกแบบคานรับพื้นยื่นจะต้องออกแบบให้สามารถต้านทานโมเมนต์คด และแรงเฉือน ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกอยู่แล้ว ในกรณีที่มีโมเมนต์บิดเกิดร่วมด้วยก็ให้ทำการตรวจสอบว่าขนาดหน้าตัดคาน เหล็กเสริมตามยาว และเหล็กปลอกที่เสริมต้านทานโมเมนต์คด และแรงเฉือนแล้วนั้น เพียงพอที่จะต้านทานโมเมนต์บิดหรือไม่ ถ้าไม่เพียงพอก็จำเป็นต้องเสริมเหล็กปลอกและเหล็กตามแนวยาวเพิ่มขึ้นเพื่อให้คานสามารถต้านทานโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.6 การรับน้ำหนักของคานรับพื้นยื่น

ขั้นตอนในการตรวจสอบ เริ่มจากการพิจารณาแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานที่ระยะห่างจากฐานรองรับเท่ากับความลึกประสิทธิผลของคาน (d) และดำเนินการตามลำดับ ดังนี้

4.3.1 หน่วยแรงบิดสำหรับรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปตัดตัวทึบ และรูปตัดตัวแผล หากทำได้จาก

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2 y} \quad \text{ว.ส.ท. 6402 (ก)}$$

โดย v_t : หน่วยแรงบิด, M_t : โมเมนต์บิด

x, y : ด้านสั้นและด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ

4.3.2 หน่วยแรงบิดที่ยอมให้ไม่เกิน $1.32\sqrt{fc'}$ (กก./ซม.²) และหน่วยแรงบิดรวมกับหน่วยแรงเฉือนยอมให้ไม่เกิน $1.65\sqrt{fc'}$ (กก./ซม.²)

4.3.3 เมื่อหน่วยแรงบิดโดยลำพัง หรือหน่วยแรงบิดรวมกับหน่วยแรงเฉือน เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต ($v_c = 0.29\sqrt{fc'}$) ต้องเสริมเหล็กส่วนที่เกินนี้ (ว.ส.ท. 6404)

ก) เสริมเหล็กปลอกหรือเหล็กลูกตั้ง ด้านทานแรงบิด คำนวณจาก

$$A_v = \frac{M_t \cdot s}{2A_c \cdot f_v} \quad \text{หรือ}$$

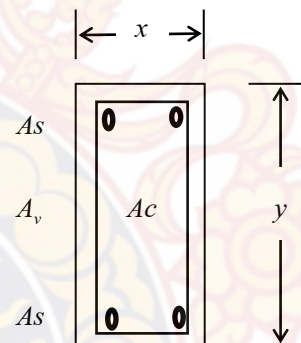
ข) เสริมเหล็กปลอกเกลียว ด้านทานแรงบิด คำนวณจาก

$$A_v = \frac{M_t \cdot s}{2\sqrt{2}A_c \cdot f_v} \quad \text{และ}$$

ค) เสริมเหล็กตามแนวยาวจัดวางตามมุม

ขนาดไม่เล็กกว่า ϕ 12 มม. คำนวณจาก

$$A_s = \frac{M_t \cdot z}{2A_c \cdot f_s}$$



โดย A_s : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามยาว

A_v : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กปลอก และเหล็กปลอกเกลียว

A_c : พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตภายในวงเหล็กลูกตั้งหรือวงเหล็กปลอก

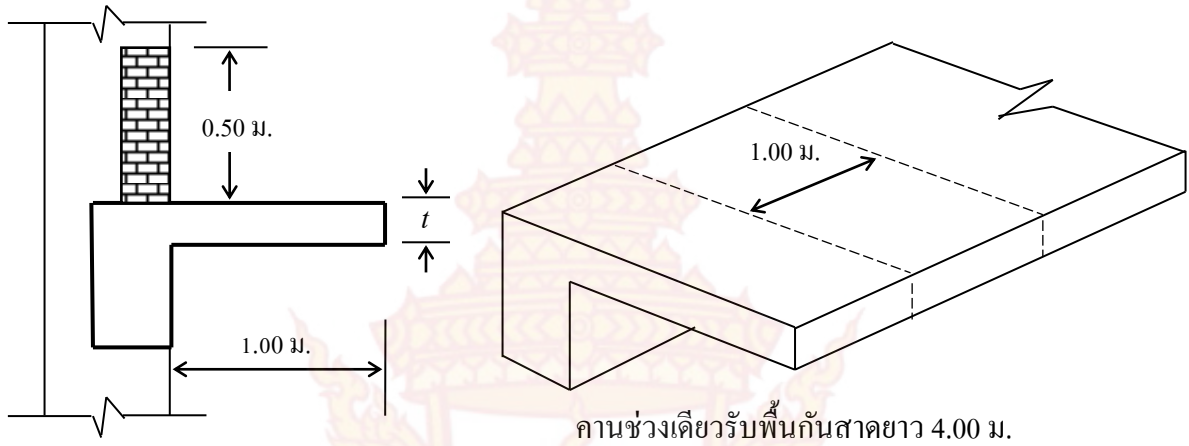
s : ระยะห่างเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กปลอกเกลียว

z : ค่าเฉลี่ยระยะระหว่างเหล็กเสริมตามยาว

f_v : หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของเหล็กปลอก

f_s : หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมตามยาว

ตัวอย่างที่ 4 จงออกแบบคานช่วงเดียวความยาว 4.00 ม. รับพื้นกันสาดหนา (t) 0.10 ม. ระยะยื่นจากคาน 1.00 ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 100 กก./ม.² และคานรับผนังอิฐมวลฉนวนสูง 0.50 ม. ตลอดความยาวคาน ดังรูป กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.² ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



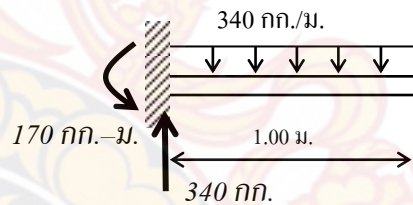
วิธีทำ

น้ำหนักที่กระทำกับพื้น :

$$w_{DL} : 0.10 \times 2,400 = 240 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{LL} = 100 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักรวม} : w = 340 \text{ กก./ม.}^2$$



น้ำหนักที่กระทำบนคานในแนวตั้ง : (เลือกขนาดคาน 0.15x0.35 ม.)

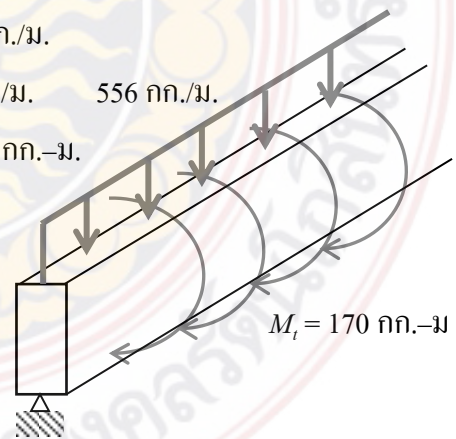
$$\text{น้ำหนักจากพื้นลงคาน} = 340 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{น้ำหนักผนัง} : 180 \times 0.50 = 90 \text{ กก./ม.}$$

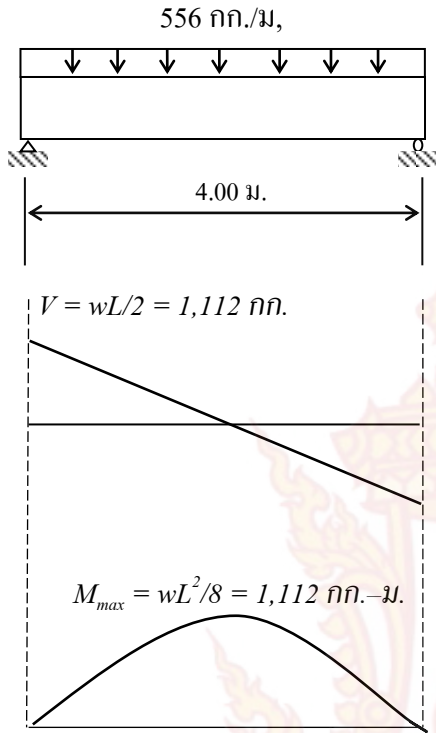
$$\text{น้ำหนักคาน} : 0.15 \times 0.35 \times 2,400 = 126 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{รวมน้ำหนักที่กระทำบนคาน} : w = 556 \text{ กก./ม.}$$

โมเมนต์บิดที่กระทำตลอดความยาวคาน : $M_t = 170$ กก.-ม.



ออกแบบคานต้านทาน โมเมนต์ค้ำและแรงเฉือน
วิเคราะห์โครงสร้าง



ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885$$

$$R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

เลือกขนาดคาน 0.15x0.35 ม.

$$(d = 0.28 \text{ ม.}, \quad d' = 0.05 \text{ ม.})$$

$$M_c = Rbd^2 = 10.99(0.15)28^2 = 1,292.42 \text{ กก.-ม.}$$

$M_c > M_{max}$: คานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j \cdot d} = \frac{1,112 \times 100}{1,500(0.885)28} = 2.99 \text{ ซม.}^2$$

เหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน (เหล็กปลอก)

$$\text{แรงเฉือนที่แนวหน้าตัดวิกฤต : } V_d = 1,112 - (556 \times 0.28) = 956.32 \text{ กก.}$$

$$\text{แรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีต : } V_c = 0.29\sqrt{f_c'}bd = 0.29\sqrt{160}(15)(28) = 1,540.66 \text{ กก.} > V_d$$

$$\text{ดังนั้น เสริมเหล็กปลอกในปริมาณต่ำสุด : } A_v = 0.0015 b_w s \leq \frac{d}{2}$$

$$\text{เลือกใช้เหล็ก } \phi 6 \text{ มม. : } s = \frac{A_v}{0.0015b_w} = \frac{0.565}{0.0015(15)} = 25.11 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้เหล็กปลอก $\phi 6$ มม. @ 0.14 ม.

ตรวจสอบขนาดหน้าตัดคานที่ออกแบบมีขนาดเพียงพอที่จะต้านแรงบิดได้หรือไม่ ?

โมเมนต์บิดสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะห่างจากฐานรองรับเท่ากับ d ($d = 0.28$ ม.)

$$M_t = 170\left(\frac{4}{2} - 0.28\right) = 292.4 \text{ กก.-ม.}$$

หน่วยแรงบิดที่เกิดขึ้น

$$v_t = \frac{3.5M_t}{\sum x^2y} = \frac{3.5(292.4 \times 100)}{(15^2) \times 35} = 12.99 \text{ กก./ซม.}^2 < v = 1.32\sqrt{fc'}$$

ขนาดหน้าตัดคาน 0.15x0.35 ม. สามารถต้านทานโมเมนต์บิดได้

หน่วยแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤต

$$v_d = \frac{V_d}{bd} = \frac{956.32}{(15) \times 28} = 2.27 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงบิดรวมกับหน่วยแรงเฉือน : $12.99 + 2.27 = 15.26 \text{ กก./ซม.}^2$

หน่วยแรงบิดรวมกับหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้

$$v = 1.65\sqrt{fc'} = 1.65\sqrt{160} = 20.87 \text{ กก./ซม.}^2 > 15.26 \text{ กก./ซม.}^2$$

ขนาดหน้าตัดคาน 0.15x0.35 ม. สามารถต้านทานแรงเฉือนรวมได้

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต

$$v_c = 0.29\sqrt{fc'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ซม.}^2 < 15.26 \text{ กก./ซม.}^2$$

ต้องเสริมเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาวรับหน่วยแรงส่วนเกิน

เลือกเหล็กปลอกขนาด ϕ 9 มม. ($A_v = 0.636 \text{ ซม.}^2$)

$$s = \frac{2A_c A_v f_v}{M_t} = \frac{2(290)0.636(1,200)}{(292.4 \times 100)} = 15.13 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้เหล็กปลอก ϕ 9 มม. @ 0.125 ม.

เหล็กเสริมตามยาวที่ต้องเพิ่มในแต่ละมุม

$$A_s = \frac{M_t z}{2A_c f_s} = \frac{(292.4 \times 100)19.5}{2(290)1,500} = 0.655 \text{ ซม.}^2$$

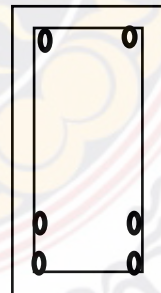
พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมด (เหล็กล่าง) : $2.99 + 2(0.655) = 4.30 \text{ ซม.}^2$

เลือก : 4 DB 12 ($A_s = 4.52 \text{ ซม.}^2$)

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนทั้งหมด (เหล็กบน) : $2(0.655) = 1.31 \text{ ซม.}^2$

เลือก : 2 DB 12 ($A_s' = 2.26 \text{ ซม.}^2$)

ขนาดหน้าตัดคาน 0.15x0.35 ม.



2 DB 12

ป ϕ 9 มม. @ 0.125 ม.

4 DB 12

แบบฝึกหัด

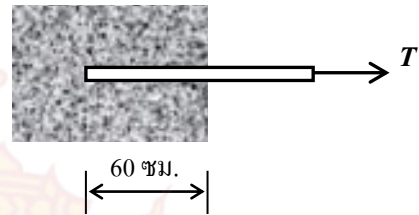
1. จากแบบฝึกหัดบทที่ 3 โจทย์ข้อที่ 3 จงวิเคราะห์โครงสร้างหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานและออกแบบเหล็กกุดตั้ง (เหล็กปลอก) ด้านทานแรงเฉือน

2. เหล็กเสริม RB 15 ฝังในคอนกรีต 60 ซม. ดังรูป ถ้าหน่วยแรงยึดหน่วงที่ยอมให้เท่ากับ 11 กก./ซม.²

จงหา ก) แรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม

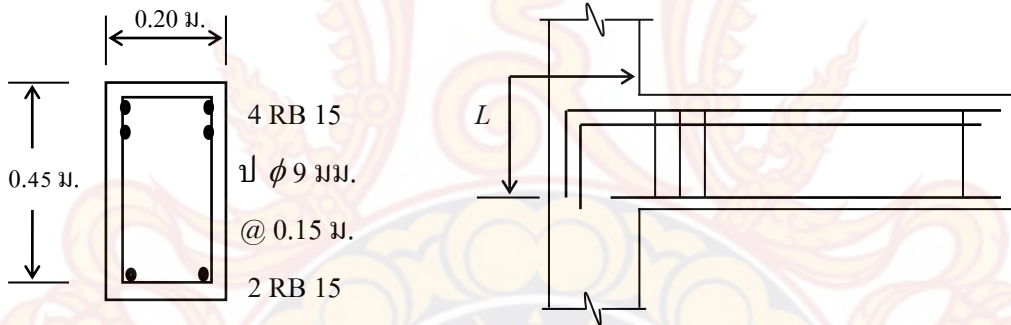
ข) แรงดึง T ที่ยอมให้สูงสุด

ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ว.ศ.ท.



3. จงคำนวณหาระยะฝังเหล็กเสริมในคานยื่น (L) ดังรูป

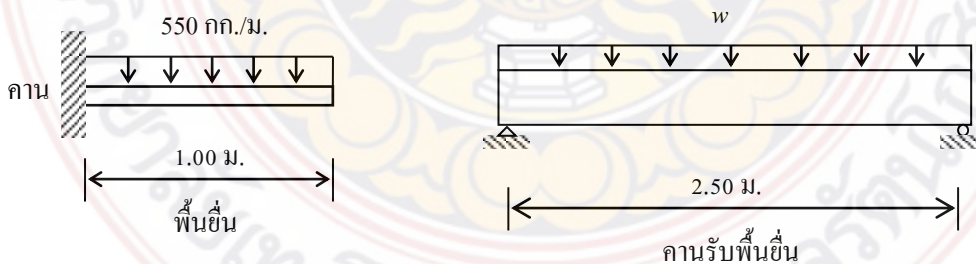
กำหนดให้ $f_c' = 150$ กก./ซม.²



4. จงออกแบบพื้นยื่นรับน้ำหนัก 550 กก./ม. ระยะยื่นจากคานรองรับ 1.00 เมตร และคานรับพื้นยื่นเป็นคานช่วงเดียวยาว 2.50 เมตร ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 150$ กก./ซม.² $f_y = 2,400$ กก./ซม.²

ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ว.ศ.ท.



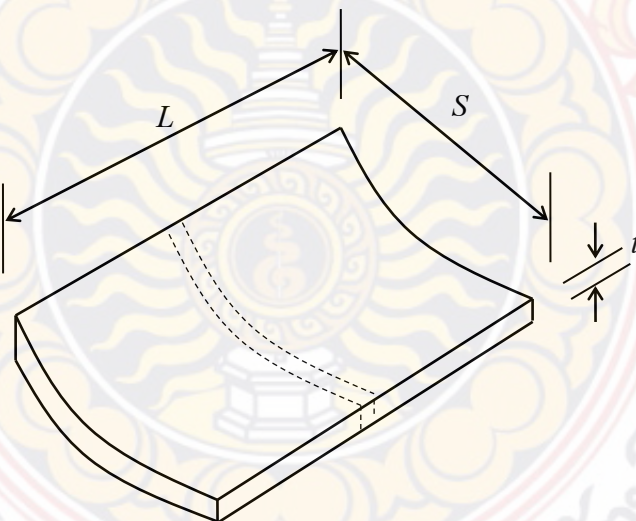
บทที่ 5

พื้น และบันได

5.1 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

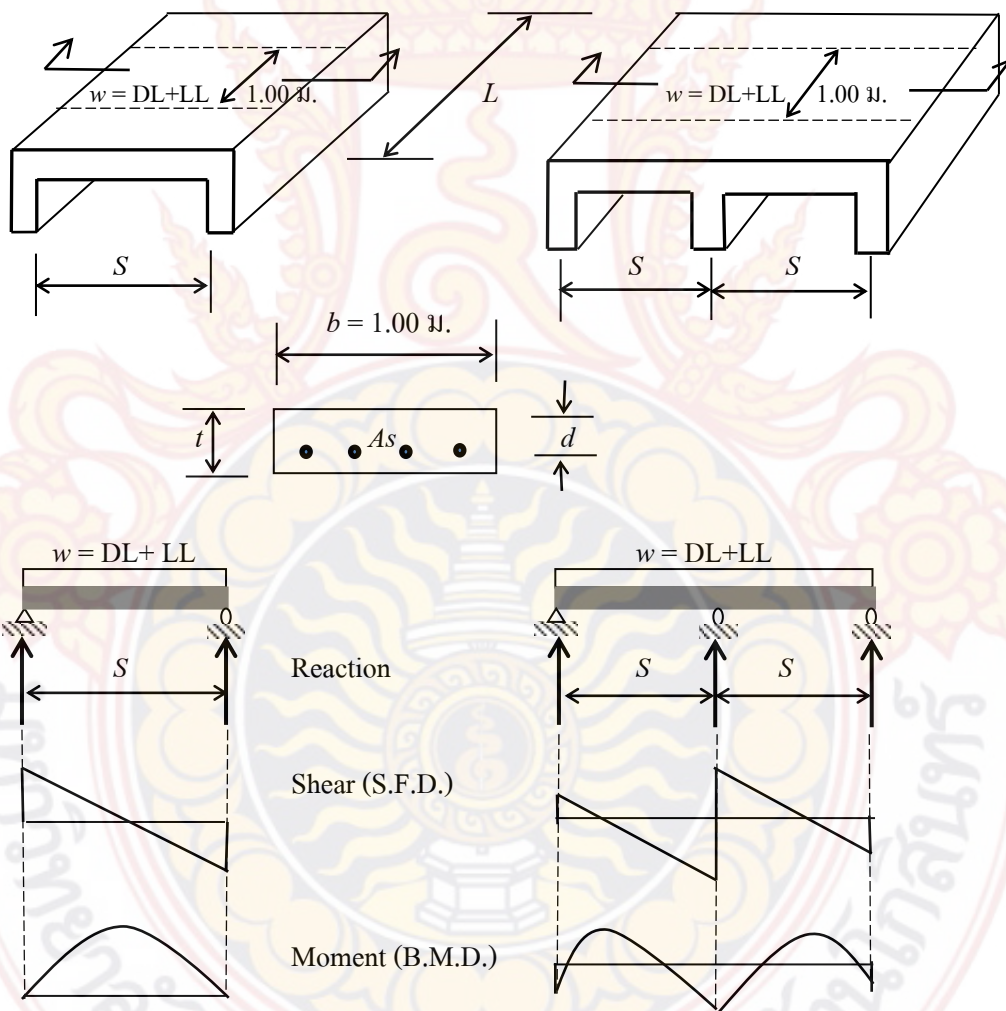
พื้นเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอาคารทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง ทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) แล้วถ่ายน้ำหนักไปยังคาน หรือเสา หรือลงสู่พื้นดินที่บดอัดแน่น พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีคานรองรับ เช่น พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว (One-way slabs) และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง (Two-way slabs) ประเภทที่สอง พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่มีคานรองรับ เช่น แผ่นพื้นไร้คาน (Flat slabs) ซึ่งจะถ่ายน้ำหนักลงเสารองรับโดยตรง และพื้นวางบนดิน เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป และพื้นวางบนดิน

5.1.1 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว (One-way slabs) ลักษณะของแผ่นพื้นจะมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวน้อยกว่า 0.5 ($\frac{S}{L} < 0.5$) หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นแผ่นพื้นที่มีด้านยาวมากกว่าสองเท่าของด้านสั้น และมีฐานรองรับตลอดแนวยาวของแผ่นพื้นอย่างน้อยสองด้าน โดยฐานรองรับอาจเป็นคาน กำแพงคอนกรีต หรือคานเหล็กรูปพรรณ ก็ได้ การเสวยรูปจากการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียวจะเกิดการคดโค้งเนื่องจากโมเมนต์คดโค้งทางด้านสั้น ขณะที่ไม่มีเกิดการคดโค้งทางด้านยาว ซึ่งเป็นการเสวยรูปลักษณะทรงกระบอก ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเสวยรูปจากการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว

ก) หลักเกณฑ์ในการออกแบบ การออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวใช้หลักการเดียวกับการออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว กล่าวคือ แผ่นพื้นจะต้องสามารถต้านทานโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และไม่เกิดการโก่งตัวเกินกว่าเกณฑ์กำหนดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยพิจารณาวิเคราะห์หาแรงภายในต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น ได้แก่ โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน จากทางด้านสั้นที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับที่รองรับ รวมถึงการหาแรงปฏิกิริยา ซึ่งก็คือการถ่ายน้ำหนักจากพื้นลงสู่คานนั่นเอง และการคำนวณออกแบบแผ่นพื้นจะแบ่งออกเป็นแถบกว้างทุกๆ 1.00 เมตร ดังนั้น แผ่นพื้นจึงมีลักษณะคล้ายกับคานบางๆ ที่มีความกว้าง (b) เท่ากับ 1.00 เมตร ดังรูปที่ 5.2 (สถาพร โภคา, 2544) ทั้งนี้ ในการออกแบบอาจพิจารณาเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวแบบช่วงเดียว หรือแบบต่อเนื่องหลายช่วงก็ได้ โดยมีช่วงว่างไม่เกิน 3.00 เมตร และหล่อพื้นเป็นเนื้อเดียวกับที่รองรับ



รูปที่ 5.2 ลักษณะแผ่นพื้นและการพิจารณาหาแรงภายในพื้นจากทางด้านสั้น

ข) การเสริมเหล็กในแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว เหล็กเสริมหลักจะจัดวางตั้งฉากกับคานรองรับพื้น เพื่อทำหน้าที่ต้านทาน โมเมนต์ดัด และถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นลงคานรองรับพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมคำนวณจากสูตร : $As = \frac{M}{fs \cdot jd}$ และต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าเหล็กเสริมกันร้าว หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เหล็กเสริมต้านทานการยืดหดตัวของคอนกรีต (Temperature or Shrinkage reinforcement : As') โดยเหล็กเสริมกันร้าวจะวางทับบนเหล็กเสริมหลักขนานกับฐานรองรับ ดังรูปที่ 5.3 นอกจากนี้ มาตรฐาน ว.ส.ท. 3407 กำหนดให้เหล็กเสริมกันร้าวหรือเหล็กเสริมต้านทานการยืดหดต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 มิลลิเมตร และวางเรียงให้มีระยะห่างไม่เกิน 3 เท่าของความหนาพื้น หรือไม่เกิน 30 เซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันร้าวต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นพื้น ($\frac{As'}{b \times t}$) ต้องไม่น้อยกว่าค่าต่อไปนี้

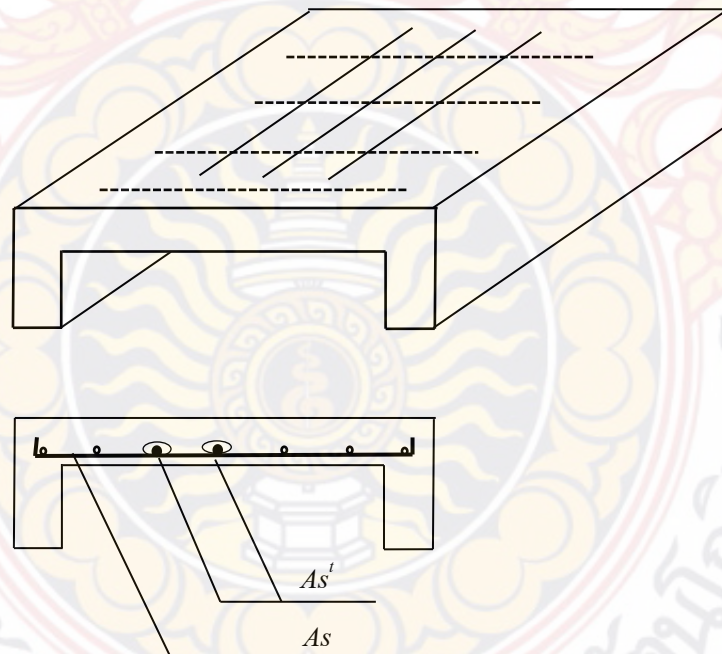
กรณีใช้เหล็กเส้นกลม

ชั้นคุณภาพ SR 240.0025 : $As' = 0.0025bt$

กรณีใช้เหล็กข้ออ้อย

ชั้นคุณภาพ SD 300.0020 : $As' = 0.0020bt$

ชั้นคุณภาพ SD 400.0018 : $As' = 0.0018bt$



รูปที่ 5.3 การเสริมเหล็กพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว

ก) ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว (y) โดยทั่วไปความหนาของแผ่นพื้นชนิดนี้ประมาณ 8–15 เซนติเมตร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการโค้งตัวของแผ่นพื้น (มงคล จิรวรรณ, 2549) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่ได้คำนวณระยะโค้ง และเพื่อควบคุมมิให้แผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียวโค้งตัวมากเกินไป มาตรฐาน ว.ส.ท. 4500 กำหนดให้ใช้ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว ดังนี้

กรณี	ความหนาต่ำสุด (t)
พื้นช่วงเดียว	L/20
พื้นต่อเนื่องข้างเดียว	L/24
พื้นต่อเนื่องสองข้าง	L/28
พื้นยื่น	L/10

ในส่วนของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียวอาจพิจารณาหาแรงเฉือนสูงสุดที่ตำแหน่งห่างจากฐานรองรับเท่ากับระยะความลึกประสิทธิภาพ (d) ของพื้นที่ได้ โดยตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นจากสูตร : $v = \frac{V}{bd}$ ต้องไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.29\sqrt{fc'}$ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมความหนาพื้นของแผ่นพื้นอีกทางหนึ่ง

ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว

1. เลือกความหนาพื้นเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกคงที่ของพื้น โดยพิจารณาความหนาต่ำสุดจากชนิดของพื้นที่ออกแบบซึ่งไม่ต้องตรวจสอบการโค้งตัว รวมน้ำหนักที่กระทำกับแผ่นพื้น แล้ววิเคราะห์โครงสร้าง (M_{max} , V_{max})

2. เลือกวัสดุ : กำลังอัดของคอนกรีต (fc') และกำลังครากของเหล็กเสริม (fy)

3. คำนวณค่าคงที่สำหรับการออกแบบ : n , k , j , และค่า R

4. ตรวจสอบความหนาพื้นที่เหมาะสม 2 กรณี (เลือกกรณีใด กรณีหนึ่ง)

4.1 เปรียบเทียบค่า $Mc = Rbd^2 > M_{max}$

4.2 ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ : $d = \sqrt{\frac{M_{max}}{R.b}}$

5. คำนวณหาปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : $As = \frac{M_{max}}{fs.jd}$ และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันร้าว

: $As' = 0.0025bt$ (กรณีใช้เหล็กเส้นกลม : SR 24)

6. ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น : $v = \frac{V}{bd} < 0.29\sqrt{fc'}$

7. เขียนรายละเอียดแสดงรายการเหล็กเสริม

ตัวอย่างที่ 1 จงออกแบบพื้นระเบียงอาคาร (S) ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 2,400$ กก./ซม.²

LL = 250 กก./ม.² วัสดุพื้น = 40 กก./ม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ $m = S / L : 1.5 / 4.0 = 0.375 < 0.5$: One way slab

ความหนาพื้นต่ำสุดของพื้นช่วงเดียว

$t = L / 20 : 1.5 / 20 = 0.075$ ม. เลือกใช้ 0.08 ม.

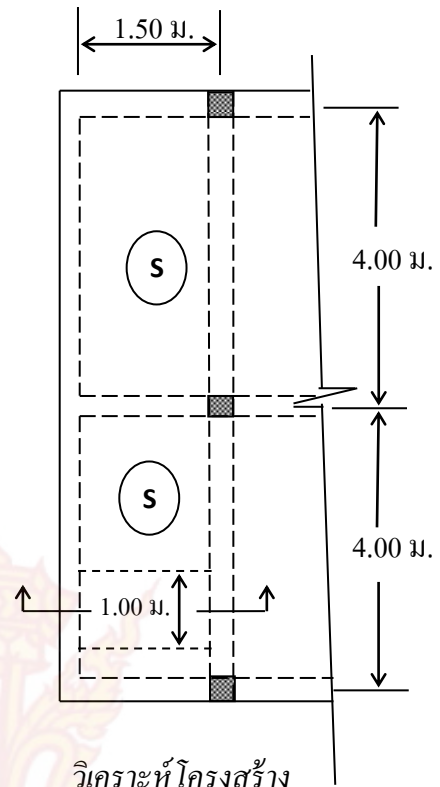
น้ำหนักที่กระทำกับพื้น

$$w_{DL} : 0.08 \times 2,400 = 192 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{LL} = 250 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{\text{วัสดุพื้น}} = 40 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักรวม : } w = 482 \text{ กก./ม.}^2$$



ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.397$$

$$j = 0.867, \quad R = 12.39 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 12.39(1.0)5.5^2 = 374.79 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j \cdot d} = \frac{135.56 \times 100}{1,200(0.867)5.5} = 2.37 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 6$ มม. @ 0.10 ม. ($A_s = 2.82$ ซม.²)

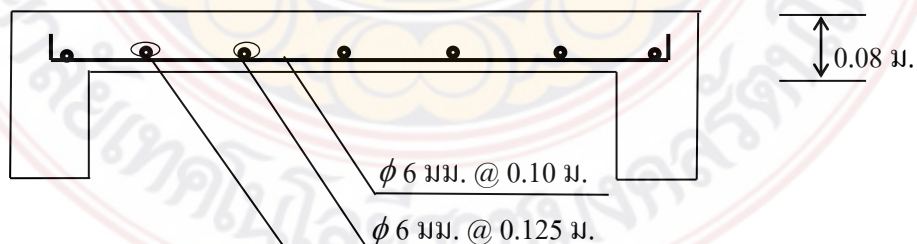
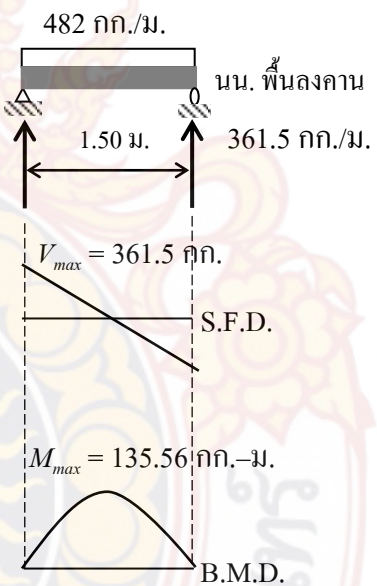
$$A_s' = 0.0025bt : 0.0025 \times 100 \times 8 = 2.00 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 6$ มม. @ 0.125 ม. ($A_s = 2.25$ ซม.²)

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น : v

$$v = \frac{V}{bd} = \frac{361.5}{(100)(5.5)} = 0.657 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{f_c'}$$

วิเคราะห์โครงสร้าง



ตัวอย่างที่ 2 จงออกแบบพื้น (S) ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 160 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$

LL = 300 กก./ม.² วัสดุพื้น = 60 กก./ม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ $m = S / L : 2.0 / 5.0 = 0.4 < 0.5 : \text{One way slab}$

ความหนาพื้นต่ำสุดของพื้นต่อเนื่องสองช่วง

$t = L / 24 : 2 / 24 = 0.083 \text{ ม.}$ เลือกใช้ 0.10 ม.

น้ำหนักที่กระทำกับพื้น

$w_{DL} : 0.10 \times 2,400 = 240 \text{ กก./ม.}^2$

$w_{LL} = 300 \text{ กก./ม.}^2$

$w_{วัสดุพื้น} = 60 \text{ กก./ม.}^2$

น้ำหนักรวม : $w = 600 \text{ กก./ม.}^2$

ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

$$+M = \frac{1}{14} wL^2 = \frac{1}{14} (600)2.0^2 = 171.42 \text{ กก.-ม.}$$

$$-M = \frac{1}{24} wL^2 = \frac{1}{24} (600)2.0^2 = 100.00 \text{ กก.-ม.}$$

$$-M_{max} = \frac{1}{9} wL^2 = \frac{1}{9} (600)2.0^2 = 266.67 \text{ กก.-ม.}$$

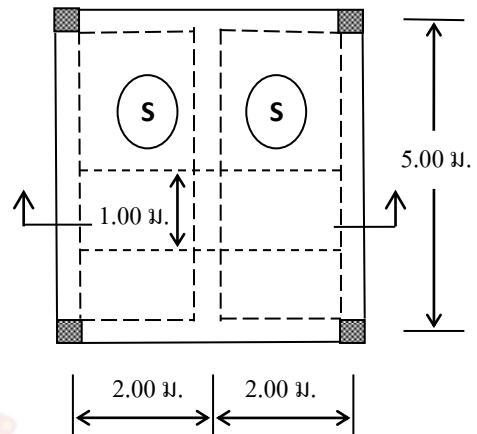
$$V_{max} = 1.15 \frac{wL}{2} = 1.15 \frac{(600 \times 2)}{2} = 690.00 \text{ กก.}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

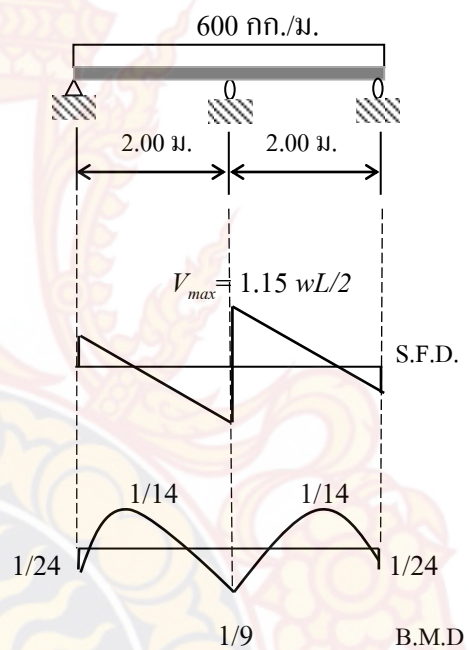
$n = 11, \quad k = 0.397, \quad j = 0.867, \quad R = 12.39 \text{ กก./ซม.}^2$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 12.39(1.0)7.5^2 = 696.93 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$



วิเคราะห์โครงสร้าง



คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลัก :

$$+A_s = \frac{+M}{f_s \cdot jd} = \frac{171.42 \times 100}{1,200(0.867)7.5} = 2.19 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 9$ มม. @ 0.25 ม. ($A_s = 2.54 \text{ ซม.}^2$)

$$-A_s = \frac{-M}{f_s \cdot jd} = \frac{100.00 \times 100}{1,200(0.867)7.5} = 1.28 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 9$ มม. @ 0.30 ม. ($A_s = 2.12 \text{ ซม.}^2$)

$$-A_s = \frac{-M_{\max}}{f_s \cdot jd} = \frac{266.67 \times 100}{1,200(0.867)7.5} = 3.41 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 9$ มม. @ 0.175 ม. ($A_s = 3.63 \text{ ซม.}^2$)

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันร้าว :

$$A_s' = 0.0025bt = 0.0025(100)10 = 2.50 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ $\phi 9$ มม. @ 0.25 ม. ($A_s = 2.54 \text{ ซม.}^2$)

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน : v

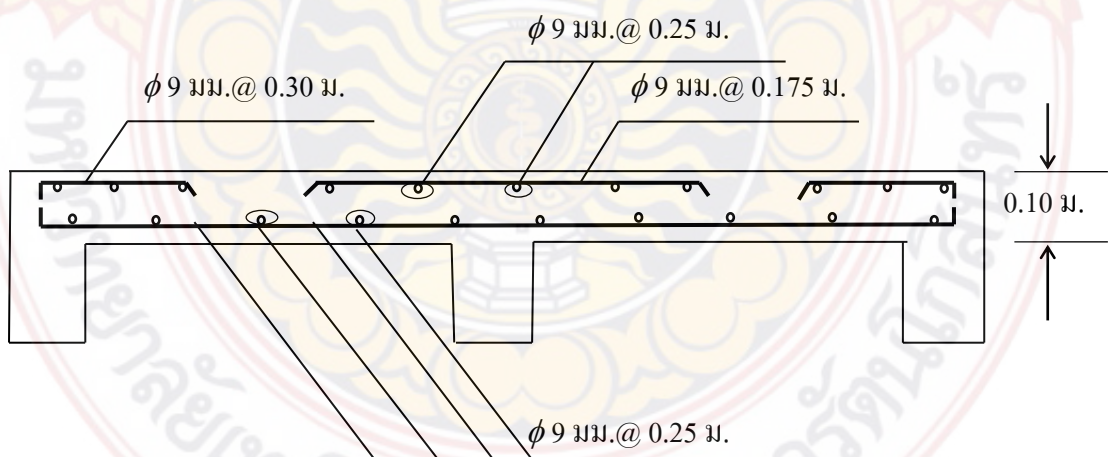
$$v = \frac{V}{bd} = \frac{690}{(100)(7.5)} = 0.92 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{f_c'}$$

ถ่ายน้ำหนักจากพื้นลงคาน

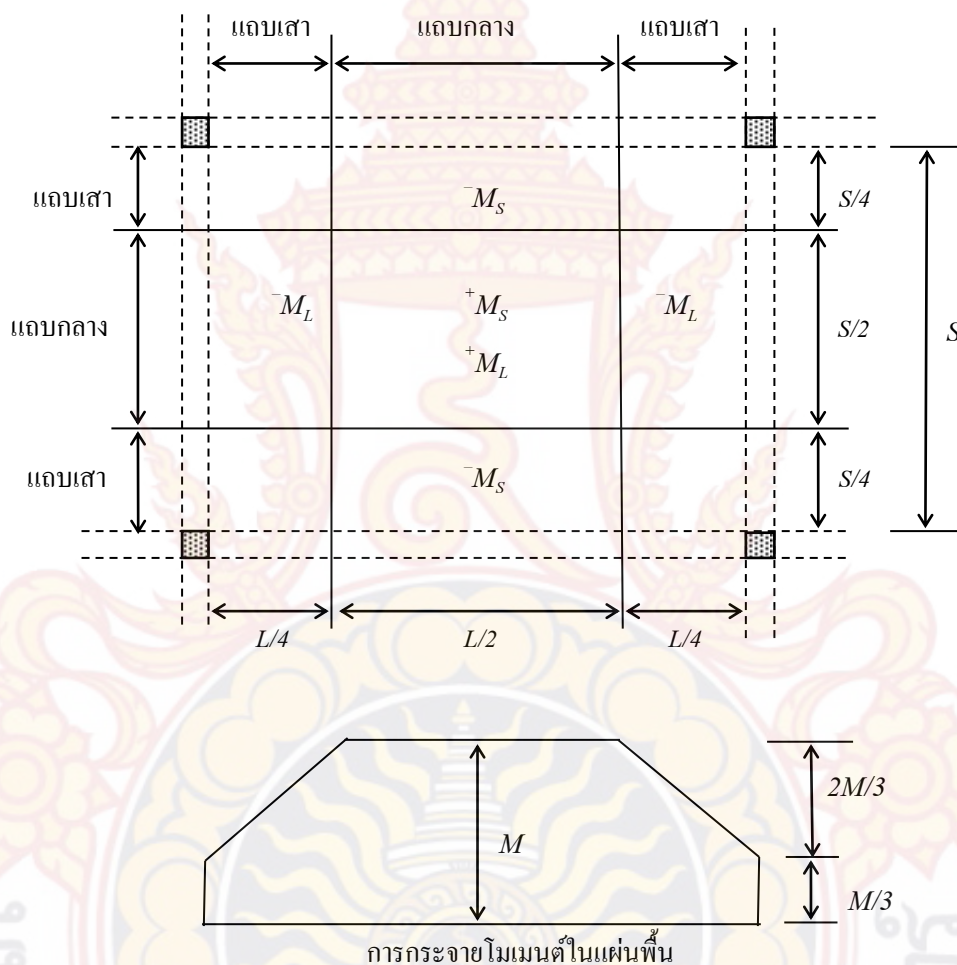
$$\text{คานตัวริม} = (600 \times 2) / 2 = 600 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{คานตัวใน} = 2(600 \times 2) / 2 = 1,200 \text{ กก./ม.}$$

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



การกระจายโมเมนต์ในแผ่นพื้น ค่าโมเมนต์ตัดในแถบเสาจะสมมติให้มีค่าลดลงแบบเชิงเส้นจากค่าที่หาได้ในแถบกลางเหลือเพียงหนึ่งในสามที่ขอบของคานรองรับ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ตัดในแถบเสาจึงมีค่าเท่ากับสองในสามของโมเมนต์ตัดในแถบกลาง ในกรณีที่ว่าโมเมนต์ลบที่ขอบคานรองรับด้านใดน้อยกว่าร้อยละ 80 ของโมเมนต์อีกด้านหนึ่ง ให้นำค่าสองในสามของผลต่างโมเมนต์กระจายออกไปตามสัดส่วนความแข็ง (Stiffness) ของแผ่นพื้น

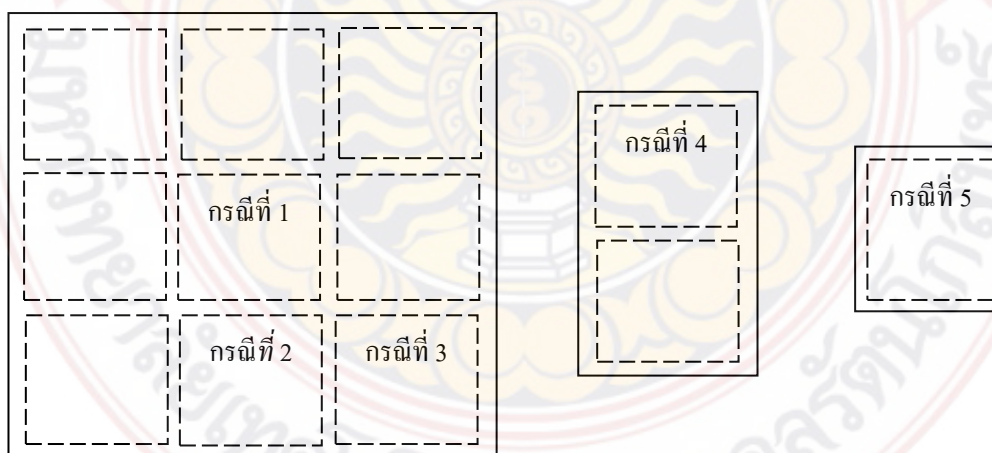


รูปที่ 5.5 การแบ่งพื้นที่พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. 9102 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ (c) ที่ใช้ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง วิธีที่ 2 แสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของแผ่นพื้น โดยแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังรูปที่ 5.6 และยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว ($m = S/L$) ของแผ่นพื้นอีกด้วย

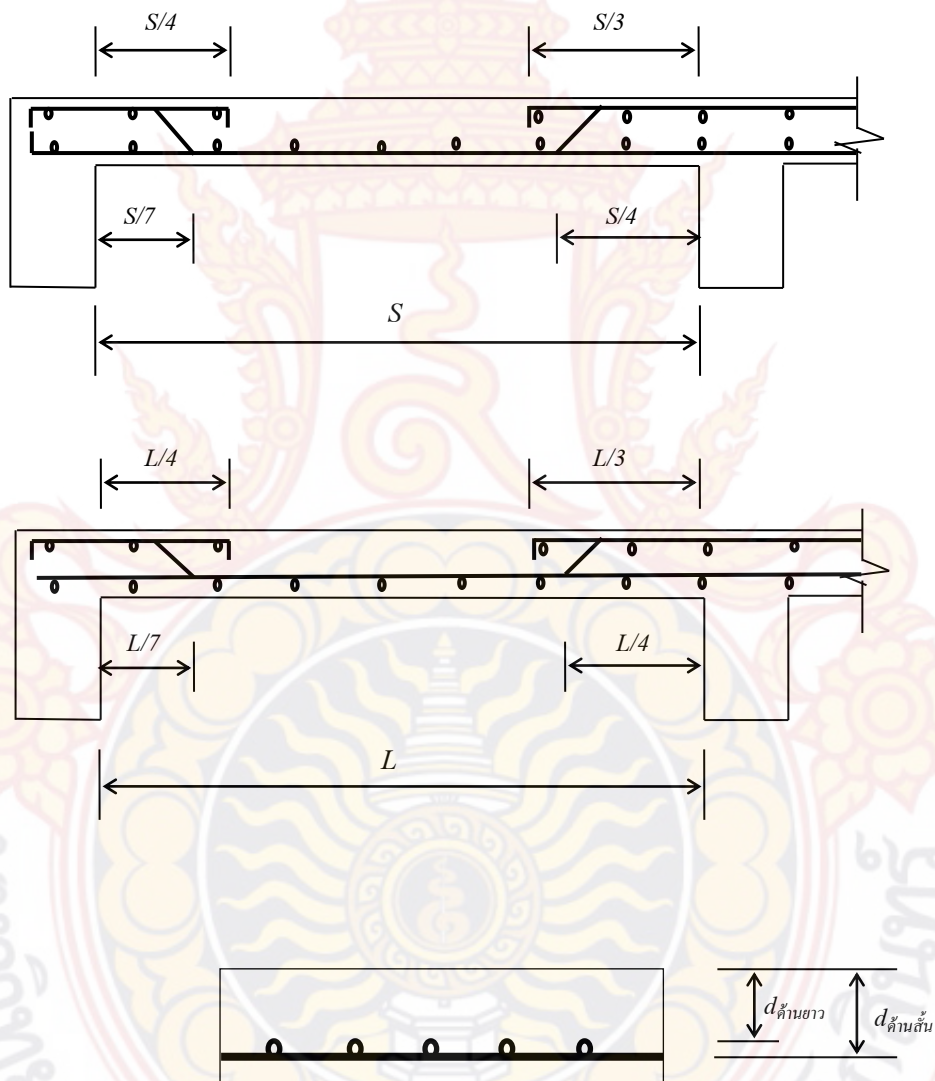
ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ (c)

โมเมนต์	ช่วงสั้น						ช่วงยาว
	อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว ($m=S/L$)						
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	
กรณีที่ 1 พื้นภายใน							
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.033	0.040	0.048	0.055	0.063	0.083	0.033
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	–	–	–	–	–	–	–
โมเมนต์บวกที่กลางช่วง	0.025	0.030	0.036	0.041	0.047	0.062	0.025
กรณีที่ 2 พื้นไม่ต่อเนื่องด้านเดียว							
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.041	0.048	0.055	0.062	0.069	0.085	0.041
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	0.021	0.024	0.027	0.031	0.035	0.042	0.021
โมเมนต์บวกที่กลางช่วง	0.031	0.036	0.041	0.047	0.052	0.064	0.031
กรณีที่ 3 พื้นไม่ต่อเนื่องสองด้าน							
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.049	0.057	0.064	0.071	0.078	0.090	0.049
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	0.025	0.028	0.032	0.036	0.039	0.045	0.025
โมเมนต์บวกที่กลางช่วง	0.037	0.043	0.048	0.054	0.059	0.068	0.037
กรณีที่ 4 พื้นไม่ต่อเนื่องสามด้าน							
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.058	0.066	0.074	0.082	0.090	0.098	0.058
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	0.029	0.033	0.037	0.041	0.045	0.049	0.029
โมเมนต์บวกที่กลางช่วง	0.044	0.050	0.056	0.062	0.068	0.074	0.044
กรณีที่ 5 พื้นไม่ต่อเนื่องสี่ด้าน							
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	–	–	–	–	–	–	–
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	0.033	0.038	0.043	0.047	0.053	0.055	0.033
โมเมนต์บวกที่กลางช่วง	0.050	0.057	0.064	0.072	0.080	0.083	0.050



รูปที่ 5.6 ความต่อเนื่องของแผ่นพื้นทั้ง 5 กรณี

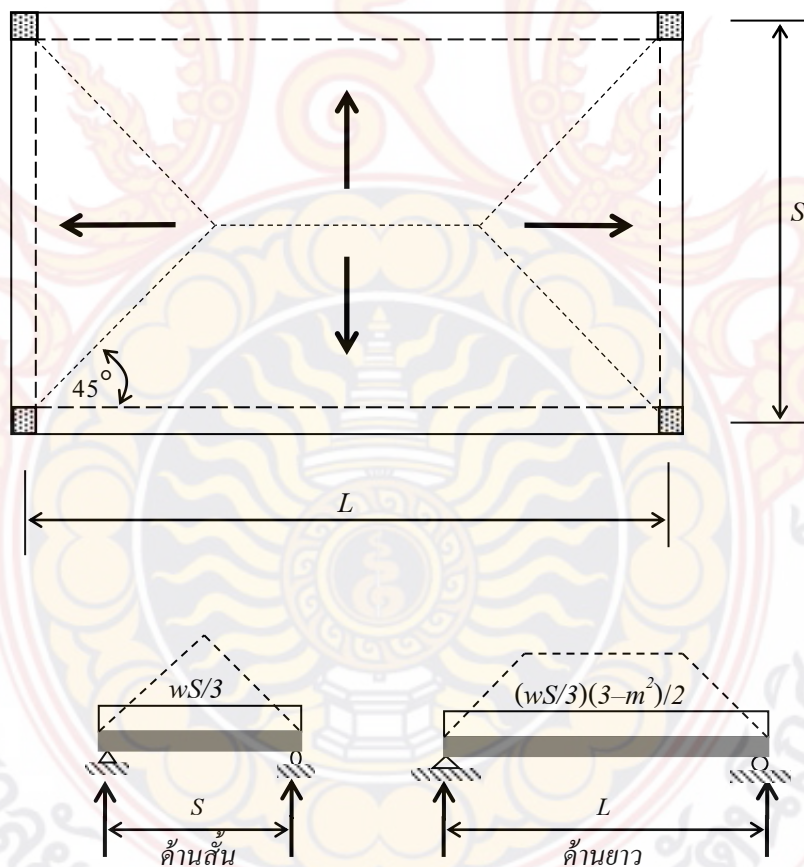
ข) การเสริมเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง มีลักษณะเป็นเหล็กตะแกรง คือเสริมเหล็กทั้งด้านสั้นและด้านยาวของแผ่นพื้น เพื่อทำหน้าที่ต้านทานโมเมนต์ดัดและถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นลงคานรองรับ โดยวางตามตำแหน่ง ดังรูปที่ 5.7 พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมคำนวณจาก สูตร : $A_s = \frac{M}{f_s \cdot j d}$ และจัดวางเหล็กเสริมด้านสั้นซึ่งรับโมเมนต์มากกว่าอยู่ด้านล่าง ส่วนเหล็กเสริมด้านยาววางทับด้านบน และมาตรฐาน ว.ส.ท. 3404 กำหนดให้เหล็กเสริมในแผ่นพื้นต้องมีระยะเรียงไม่ห่างกว่า 3 เท่าของความหนาพื้น หรือไม่เกิน 30 เซนติเมตร



รูปที่ 5.7 การเสริมเหล็กในแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

ค) ความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง (t) เพื่อควบคุมมิให้แผ่นพื้นโก่งตัวมากเกินไป ความหนาของพื้นเสริมเหล็กสองทางต้องไม่น้อยกว่า 8 เซนติเมตร และไม่น้อยกว่า $\frac{1}{180}$ ของเส้นรอบรูปของแผ่นพื้นนั้น

ง) การถ่ายน้ำหนักลงคาน พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางจะถ่ายน้ำหนักแบบแผ่นสม่ำเสมอลงคานรองรับทั้งสองด้าน โดยการแบ่งพื้นที่จากการลากเส้นทำมุม 45 องศา จากมุมทั้งสี่ตัดกับเส้นแบ่งครึ่งช่วงพื้นที่ขนานกับด้านยาว ดังรูปที่ 5.8 ในส่วนของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นเสริมเหล็กสองทาง อาจคำนวณหาหน่วยแรงในแผ่นพื้นได้จากการสมมติว่ากระจายน้ำหนักบรรทุกไปยังที่รองรับ โดยการแบ่งพื้นที่จากการลากเส้นทำมุม 45 องศา ทำนองเดียวกับการถ่ายน้ำหนักลงคาน แล้วทำการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนจากสูตร : $v = \frac{V}{bd}$ โดยหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นต้องไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.29\sqrt{fc'}$ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมความหนาพื้นของแผ่นพื้นอีกทางหนึ่ง

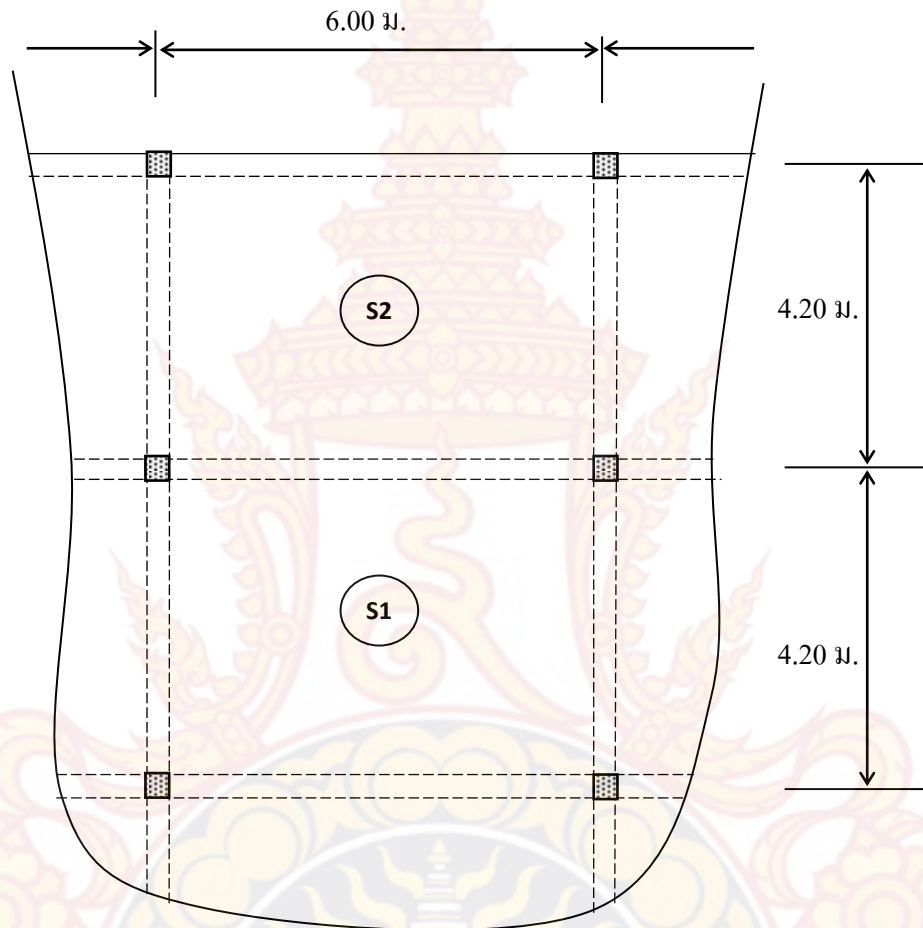


รูปที่ 5.8 การถ่ายน้ำหนักลงคานรองรับ

ตัวอย่างที่ 3 จงออกแบบพื้น **S1** และ **S2** ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 210 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$

LL = 250 กก./ม.² วัสดุพื้น = 50 กก./ม.² ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



วิธีทำ

$$m = S / L : 4.2 / 6.0 = 0.7 > 0.5 : \text{Two way slab}$$

$$\text{ความหนาพื้นต่ำสุด} : t = \frac{1}{180} (4.2 \times 2 + 6.0 \times 2) = 0.11 \text{ ม. เลือกใช้ } 0.12 \text{ ม.}$$

น้ำหนักที่กระทำกับพื้น

$$w_{DL} : 0.12 \times 2,400 = 288 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{LL} = 250 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{\text{วัสดุพื้น}} = 50 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักรวม} : w = 588 \text{ กก./ม.}^2$$

ออกแบบต่อความกว้างพื้นที่ทุกๆ 1.00 เมตร

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 9, \quad k = 0.414, \quad j = 0.862, \quad R = 16.86 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 16.86(1.0)9.5^2 = 1,521.61 \text{ กก.-ม.}$$

S1 พื้นต่อเนื่องทั้งสี่ด้าน

ตำแหน่ง	c (สปส. โมเมนต์)	$M = cwS^2$ (กก.-ม.)	As (ซม. ²)	เลือกเหล็กเสริม
ช่วงสั้น				
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.055	570.47	5.80	φ 9 มม. @ 0.10 ม.
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.041	425.26	4.32	φ 9 มม. @ 0.125 ม.
ช่วงยาว				
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.033	342.28	3.84	φ 9 มม. @ 0.15 ม.
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.025	259.30	2.91	φ 9 มม. @ 0.20 ม.

S2 พื้นต่อเนื่องสามด้าน

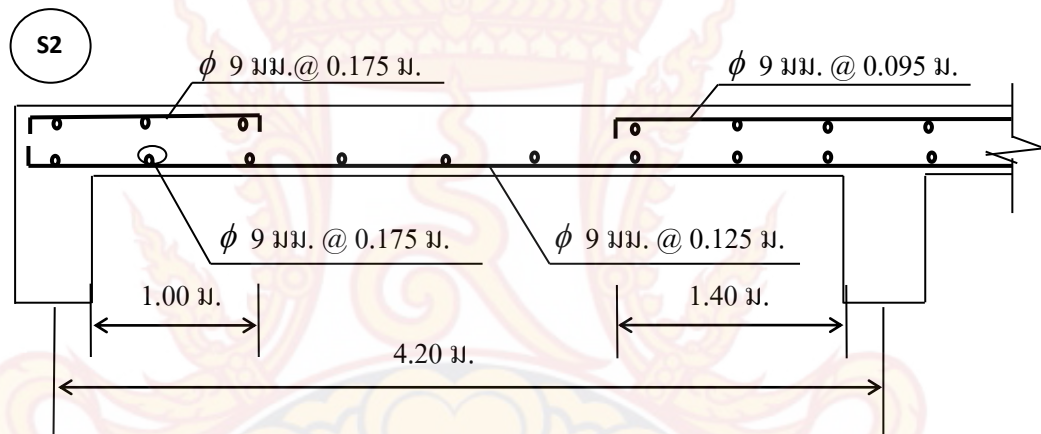
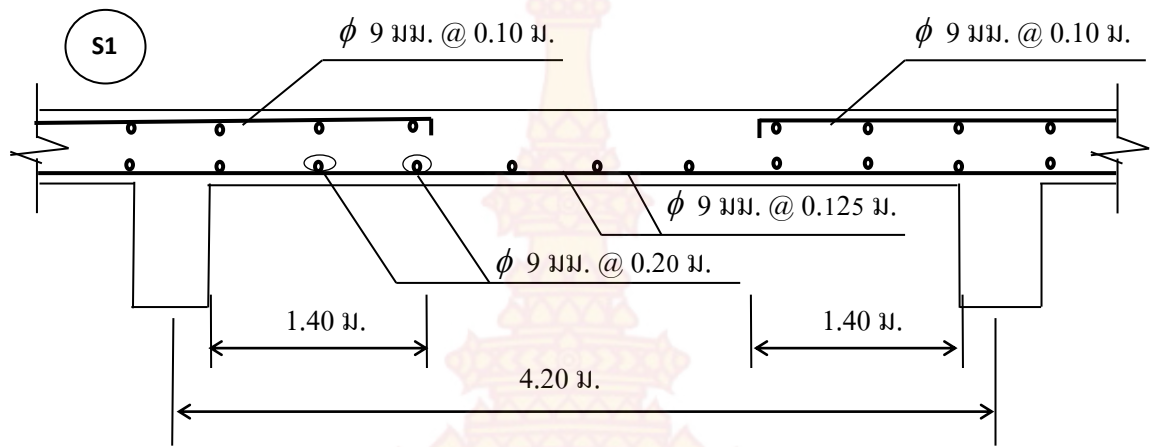
ตำแหน่ง	c (สปส. โมเมนต์)	$M = cwS^2$ (กก.-ม.)	As (ซม. ²)	เลือกเหล็กเสริม
ช่วงสั้น				
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.062	643.08	6.54	φ 9 มม. @ 0.095 ม.
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	0.031	321.54	3.27	φ 9 มม. @ 0.175 ม.
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.047	487.49	4.96	φ 9 มม. @ 0.125 ม.
ช่วงยาว				
โมเมนต์ลบ – ด้านต่อเนื่อง	0.041	425.26	4.78	φ 9 มม. @ 0.125 ม.
– ด้านไม่ต่อเนื่อง	–	–	–	–
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.031	321.54	3.61	φ 9 มม. @ 0.175 ม.

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน

$$V = 1.15 \frac{wL}{2} : 1.15 \frac{(1,033.11 \times 6.0)}{2} = 3,564.22 \text{ กก.}$$

$$v = \frac{V}{bd} : \frac{3,564.22}{(100)(9.5)} = 3.73 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{fc'} \quad \text{ใช้ได้}$$

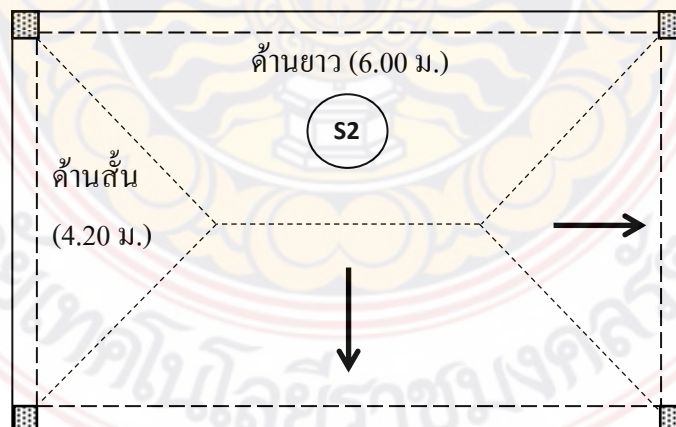
รายละเอียดการเสริมเหล็ก :



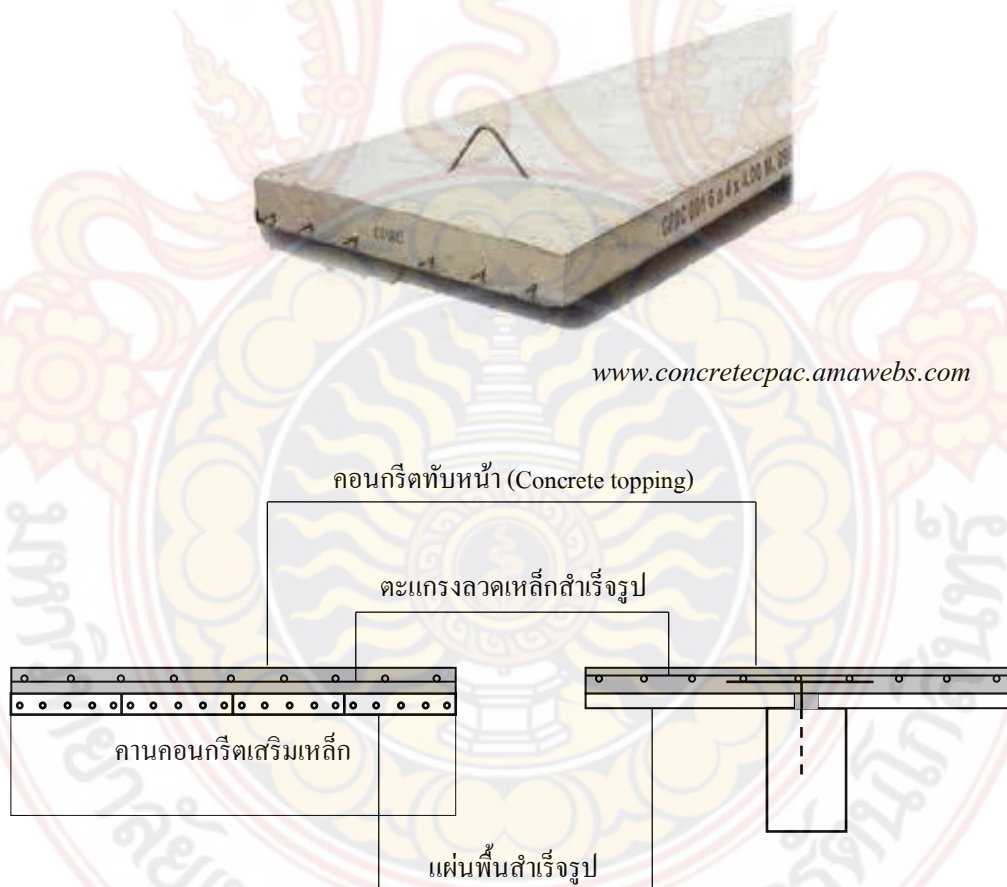
ถ่ายน้ำหนักจากพื้นลงคานรองรับ

$$\text{น้ำหนักลงคานด้านสั้น} : \frac{wS}{3} = \frac{588(4.20)}{3} = 823.2 \text{ กก./ม.}$$

$$\text{น้ำหนักลงคานด้านยาว} : \frac{wS}{3} \cdot \frac{(3-m^2)}{2} = 823.2 \cdot \frac{(3-0.7^2)}{2} = 1,033.11 \text{ กก./ม.}$$



5.1.3 พื้นสำเร็จรูป (Plank slab) เป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมือนแผ่นกระดาน โดยทั่วไป มีความกว้างประมาณ 35 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 5 เซนติเมตร และมีความยาวหลายขนาด โดยสามารถเลือกใช้ได้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานที่ออกแบบไว้ตามความเหมาะสม ปัจจุบันนิยมใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูปกับงานอาคารทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บ้านพักอาศัย เพราะทำงานได้สะดวกรวดเร็ว โดยนำแผ่นพื้นมาวางชิดกันแล้วเชื่อมประสานแผ่นพื้นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยคอนกรีตทับหน้า (Concrete topping) หนาประมาณ 5.0–6.0 เซนติเมตร และเสริมเหล็กด้านทานการแตกร้าวที่เกิดจากการยึดหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยอาจใช้หลักเกณฑ์เดียวกับการคำนวณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันรัวของพื้นเสริมเหล็กทางเดียว หรือใช้ตะแกรงลวดเหล็กสำเร็จรูป (Weld wire reinforcement, WWR หรือ Wire mesh) ก็ได้ แผ่นพื้นสำเร็จรูปถูกออกแบบให้วางพาดบนช่วงคานสองข้าง ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้น ($w = w_{DL} + w_{LL}$) จะถ่ายลงคานรองรับด้านที่แผ่นพื้นวางพาดตั้งฉากกับคานทั้งสองข้าง เป็นน้ำหนักแผ่แบบสม่ำเสมอเท่าๆ กัน รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะและการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูป



รูปที่ 5.9 ลักษณะและการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูป

5.1.4 พื้นวางบนดิน (Slab on ground) พื้นรอบบริเวณบ้านพักอาศัย โรงจอดรถ หรือแม่แต่พื้นชั้นล่างบ้านพักอาศัย อาจออกแบบเป็นพื้นวางบนดินเพื่อลดน้ำหนักบรรทุกให้กับอาคาร พื้นวางบนดินทำหน้าที่รับน้ำหนักแผ่กระจายแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่พื้นดินโดยตรง ดังนั้น พื้นดินที่รองรับจะต้องปรับปรุงโดยการบดอัดให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้พื้นเกิดการทรุดตัว และเสริมเหล็กต้านทานการแตกร้าวที่เกิดจากการยึดหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยอาจใช้หลักเกณฑ์เดียวกับการคำนวณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกันรั้วของพื้นเสริมเหล็กทางเดียว ตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกใช้เหล็กกลมผิวเรียบ ชั้นคุณภาพ SR 24 : $A_s' = 0.0025bt$ และเสริมเป็นลักษณะเหล็กตะแกรงวางด้านบนของพื้น ดังรูปที่ 5.10 ปัจจุบันนิยมใช้ตะแกรงลวดเหล็กสำเร็จรูป (Wire mesh) ซึ่งสามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ควรตัดแบ่งแผ่นพื้นวางบนดินออกเป็นช่วงๆ แบบแยกอิสระออกจากกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพื้นที่ใช้งานด้วย



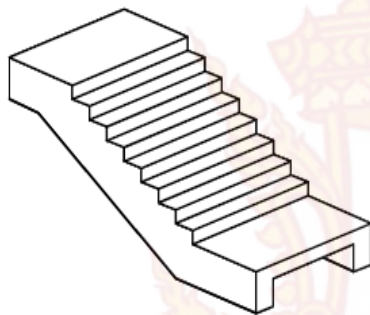
พื้นภายนอก : พื้นบริเวณรอบบ้านและที่จอดรถ



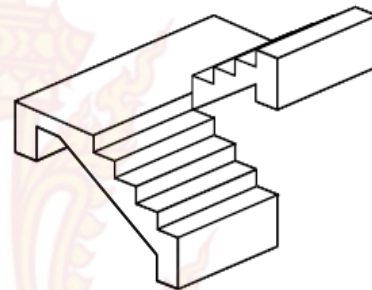
รูปที่ 5.10 พื้นวางบนดิน

5.2 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก

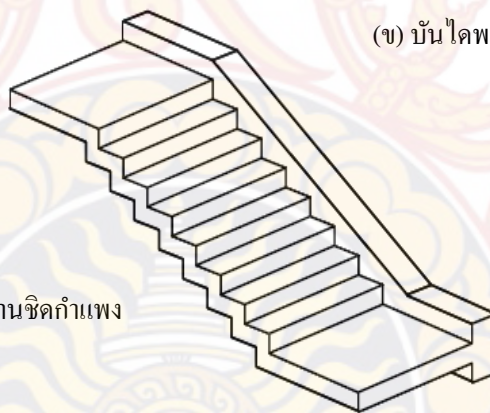
บันไดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายแผ่นพื้นใช้เชื่อมต่อทางขึ้นลงระหว่างชั้นในอาคาร โดยมีขั้นบันไดส่วนลูกนอนกว้างประมาณ 25–30 เซนติเมตร และลูกตั้งสูงประมาณ 15–20 เซนติเมตร รูปแบบของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอาจเป็นแบบพาดทางช่วงกว้าง หรือพาดทางช่วงยาวระหว่างคานที่รองรับ หรือบันไดขึ้นจากคาน ดังรูปที่ 5.11 การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้หลักการเดียวกับการออกแบบแผ่นพื้น กล่าวคือ บันไดจะต้องสามารถต้านทานโมเมนต์คัต แรงเฉือน และโมเมนต์บิด (ถ้ามี) นอกจากนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงคือการเสริมเหล็กปลายบันไดที่เชื่อมต่อกับคานหรือแผ่นพื้นระหว่างชั้นจะต้องต่อเนื่องสอดคล้อง สามารถส่งถ่ายแรงและรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานได้อย่างปลอดภัย



(ก) บันไดพาดช่วงกว้าง
ระหว่างคานแม่บันได



(ข) บันไดพาดช่วงยาว



(ค) บันไดขึ้นจากคานชิดกำแพง

รูปที่ 5.11 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก (มงคล จิรวัชรเดช, 2549)

5.2.1 บันไดพาดช่วงกว้างระหว่างคานแม่บันได ลักษณะรูปแบบของบันไดเหมือนกับพื้นเสริมเหล็กทางเดียวซึ่งมีคานรองรับสองข้างของความกว้างบันได ดังรูปที่ 5.11 (ก) ดังนั้น การคำนวณออกแบบจึงเหมือนกับการออกแบบพื้นเสริมเหล็กทางเดียว โดยพิจารณาหาแรงภายในต่างๆ ทางด้านสันแบบพื้นช่วงเดียว และเหล็กเสริมต้านทานโมเมนต์คัต (A_s) วางด้านล่างตั้งฉากกับคานแม่บันได ส่วนเหล็กเสริมต้านทานการแตกร้าว (A_s') วางด้านบนขนานกับคานแม่บันได และฝังยึดกับคานที่รองรับ

ตัวอย่างที่ 4 จงออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กกว้าง 2.00 เมตร วางพาดช่วงกว้างระหว่างคานแม่บันไดสองข้าง ลูกนอนบันไดกว้าง 0.25 เมตร ลูกตั้งบันไดสูง 0.15 เมตร

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 2,400$ กก./ซม.²

LL = 300 กก./ม.² วัสดุปูพื้น = 40 กก./ม.² ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

ความหนาบันไดต่ำสุด (ลักษณะเดียวกับพื้นช่วงเดียว)

$$t = L / 20 : (2.00 / 20) = 0.10 \text{ ม. เลือกใช้ } 0.10 \text{ ม.}$$

น้ำหนักที่กระทำกับบันได

$$\text{น้ำหนักพื้นบันได} : 0.10 \times \frac{\sqrt{25^2 + 15^2}}{25} \times 2,400 = 280 \text{ กก./ม.}^2$$

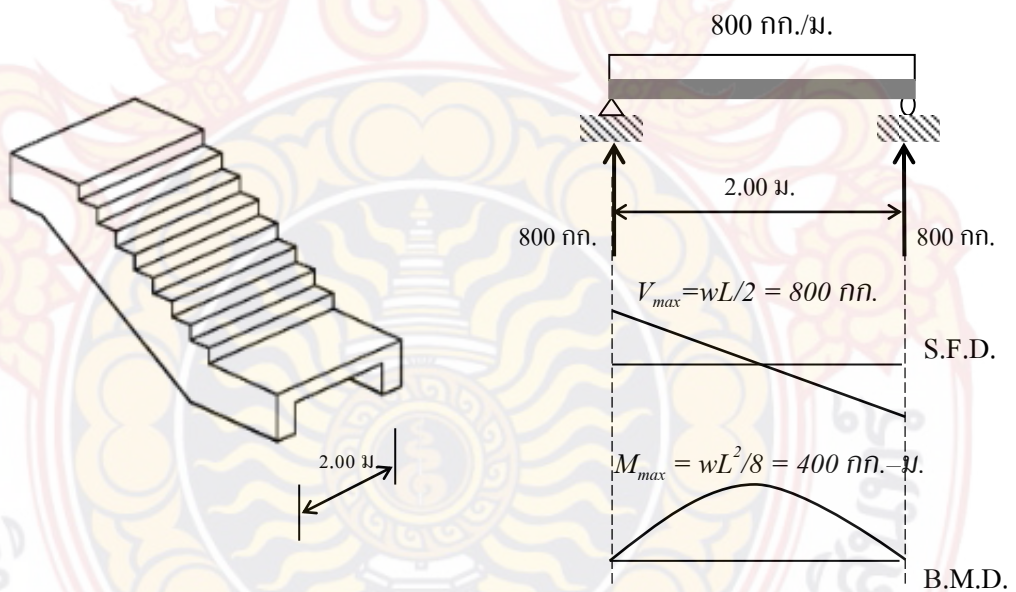
$$\text{น้ำหนักชั้นบันได} : 0.50 (0.15) 2,400 = 180 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักวัสดุปูพื้น} = 40 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักบรรทุกจร} = 300 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักรวม} : w = 800 \text{ กก./ม.}^2$$

วิเคราะห์โครงสร้าง : ออกแบบต่อความกว้างพื้นที่ทุกๆ 1.00 เมตร



ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.397, \quad j = 0.867, \quad R = 12.39 \text{ กก./ซม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 12.39(1.0)7.0^2 = 607.11 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

ปริมาณเหล็กเสริม : A_s

$$A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot j d} = \frac{400 \times 100}{1,200(0.867)7.5} = 5.12 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.10 ม. ($A_s = 6.36 \text{ ซม.}^2$)

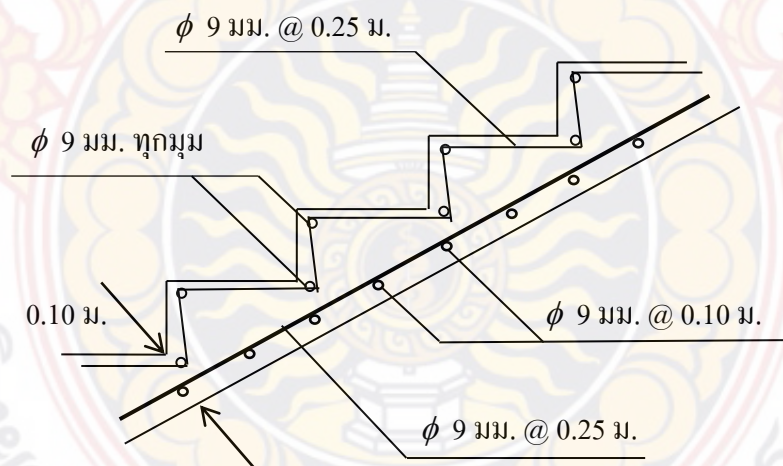
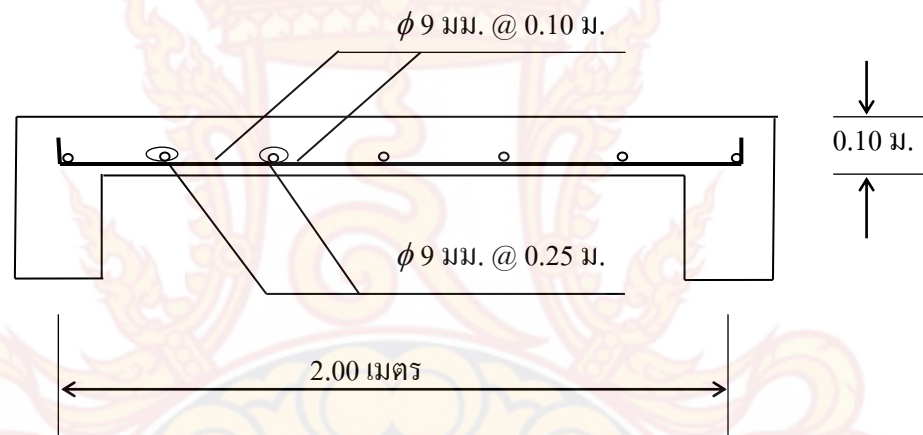
$$A_s' = 0.0025bt = 0.0025(100)10 = 2.50 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.25 ม. ($A_s = 2.54 \text{ ซม.}^2$)

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน : v

$$v = \frac{V}{bd} = \frac{800}{(100)(7.0)} = 1.14 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{f_c'}$$

รายละเอียดการเสริมเหล็ก

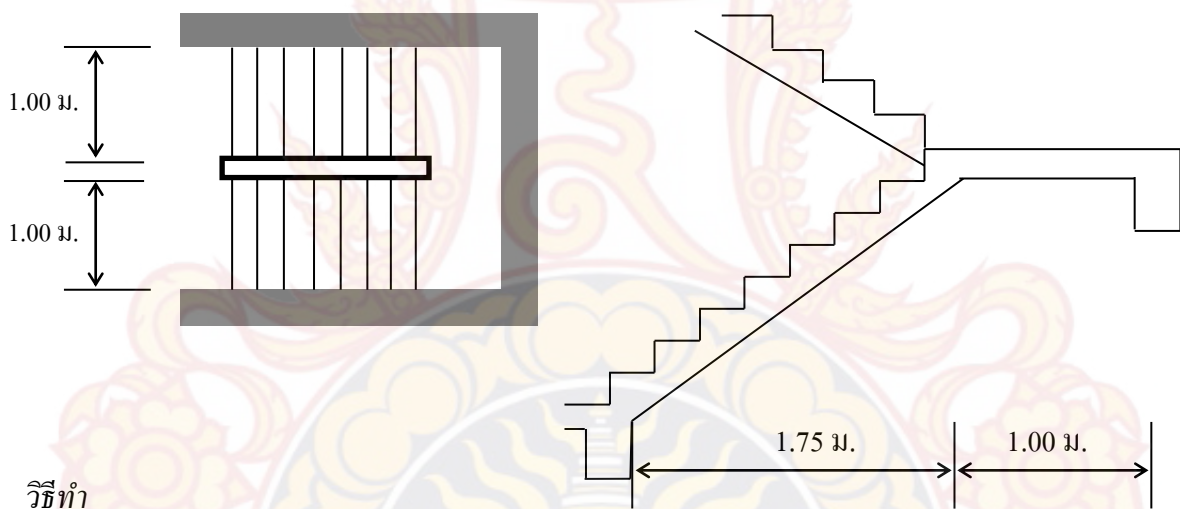


5.2.2 บันไดพาดช่วงยาว ลักษณะรูปแบบของบันไดเป็นแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียวพาดช่วงยาว ระหว่างคานรองรับ กับคานชันพักบันได ดังรูปที่ 5.11 (ข) ซึ่งท้องบันไดอาจเป็นแบบเรียบหรือแบบพับฝักก็ได้ ดังนั้น การคำนวณออกแบบจึงเหมือนกับการออกแบบพื้นเสริมเหล็กทางเดียว โดยพิจารณาหาแรงภายในแผ่นพื้นจากช่วงยาวระหว่างคานรองรับ โดยใช้ระยะแนวราบ เสริมเหล็กลักษณะเดียวกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว และฝังยึดเข้ากับคานที่รองรับ

ตัวอย่างที่ 5 จงออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กทางพาดช่วงยาว โดยมีช่วงยาวระหว่างคานรองรับ 2.75 เมตร ดังรูป ลูกนอนบันไดกว้าง 25 เซนติเมตรลูกตั้งสูง 20 เซนติเมตร

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

LL = 300 กก./ม.² วัสดุพื้น = 60 กก./ม.² ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



วิธีทำ

ความหนาบันไดต่ำสุด : $t = L / 20$

$t = 2.75 / 20 = 0.13$ ม. เลือกใช้ 0.15 ม. ($d = 0.125$ ม.; Covering : 2.5 cm.)

น้ำหนักที่กระทำกับบันได

น้ำหนักพื้นบันได : $0.15 \times \frac{\sqrt{20^2 + 25^2}}{25} \times 2,400 = 461$ กก./ม.²

น้ำหนักชั้นบันได : $0.50 (0.20) 2,400 = 240$ กก./ม.²

น้ำหนักวัสดุพื้น = 60 กก./ม.²

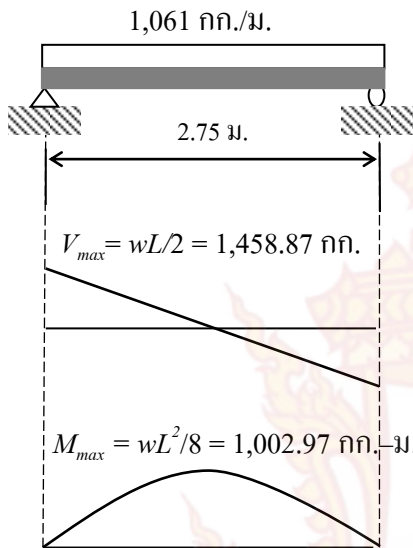
น้ำหนักบรรทุกจร = 300 กก./ม.²

น้ำหนักรวม : $w = 1,061$ กก./ม.²

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

วิเคราะห์โครงสร้าง : ออกแบบต่อความกว้างพื้นที่ทุกๆ 1.00 เมตร



โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 10.99(1.0)12.5^2 = 1,717.18 \text{ กก./ซม.}^2 > M_{max}$$

หรือตรวจสอบความลึกประสิทธิภาพ (d) ที่ต้องการ

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{1,002.97 \times 100}{10.99 \times 100}} = 9.55 \text{ ซม.} < 12.5 \text{ ซม.} \text{ ok}$$

ปริมาณเหล็กเสริม : A_s

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \cdot j \cdot d} = \frac{1,002.97 \times 100}{1,500(0.885)12.5} = 6.04 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ DB 12 มม. @ 0.175 ม. ($A_s = 6.45 \text{ ซม.}^2, \sum o = 21.54 \text{ ซม.}$)

$$A_s' = 0.0025bt = 0.0025(100)15 = 3.75 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.15 ม. ($A_s = 4.24 \text{ ซม.}^2$)

เส้นรอบรูปที่ต้องการ

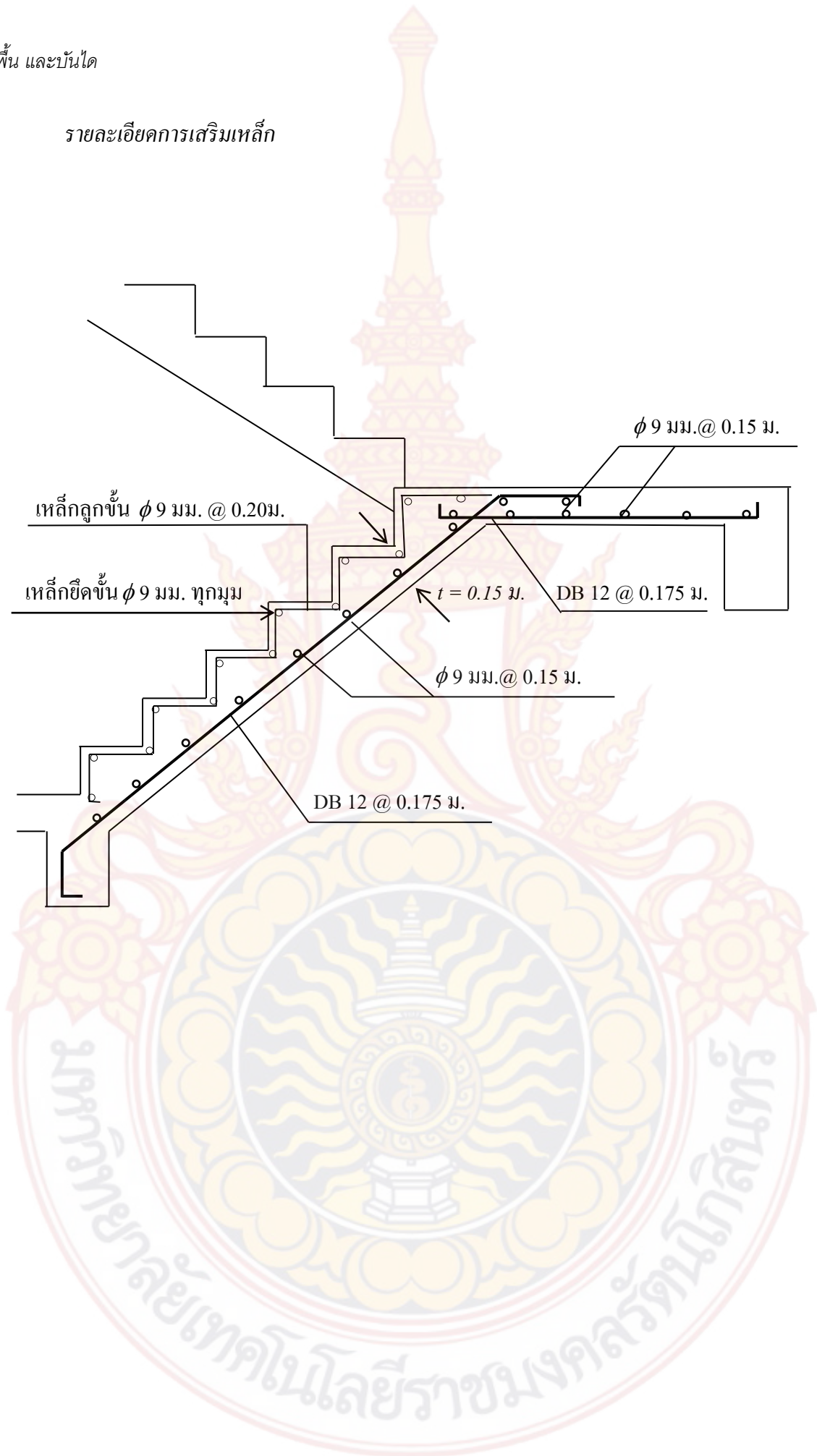
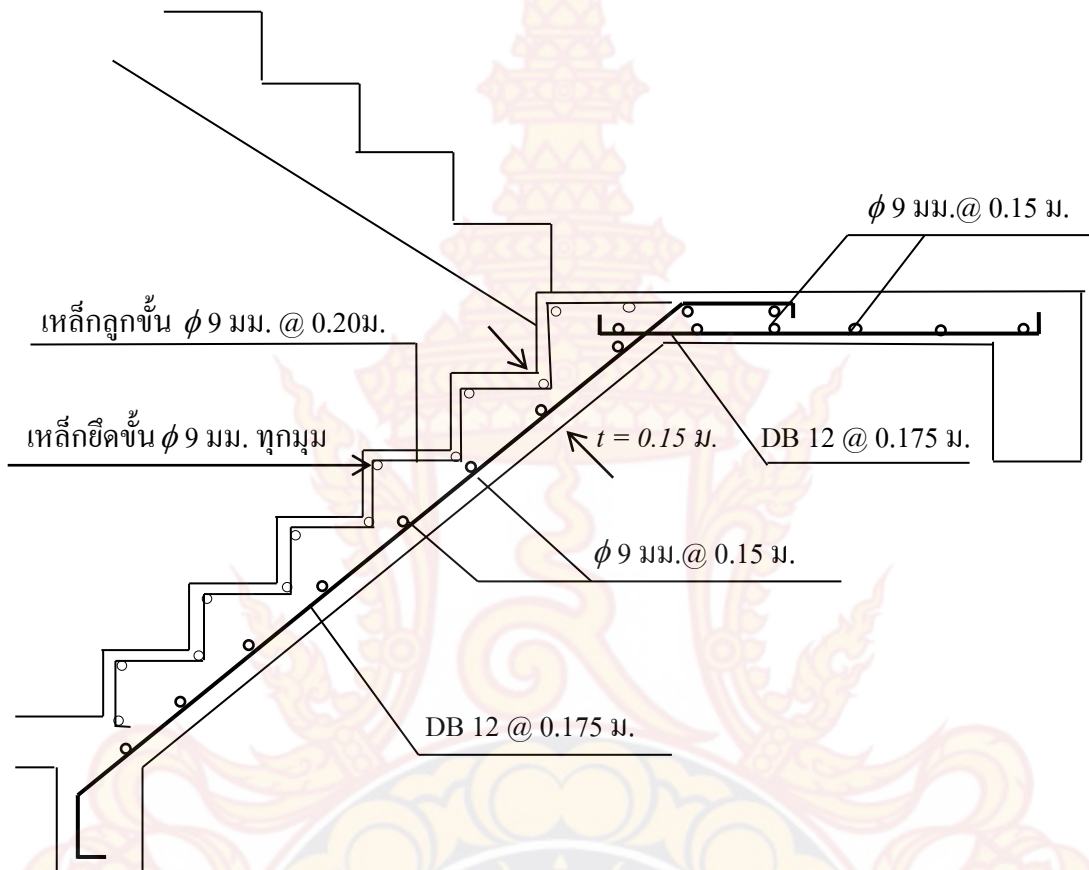
$$\sum o = \frac{V}{u \cdot j \cdot d} = \frac{1,458.87}{34.04(0.885 \times 12.5)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{f_c'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 3.87 \text{ ซม.} < 21.54 \text{ ซม.} \text{ ใช้ได้}$$

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน : v

$$v = \frac{V}{bd} = \frac{1,458.87}{(100)(12.5)} = 1.16 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{f_c'}$$

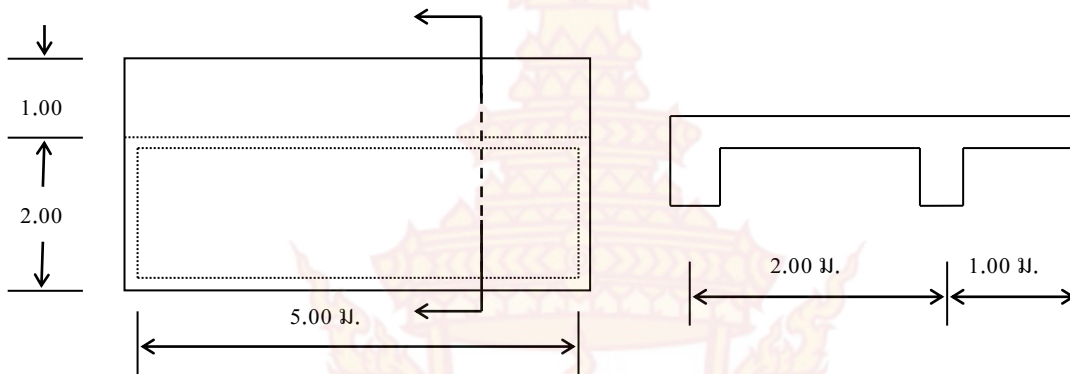
รายละเอียดการเสริมเหล็ก



แบบฝึกหัด

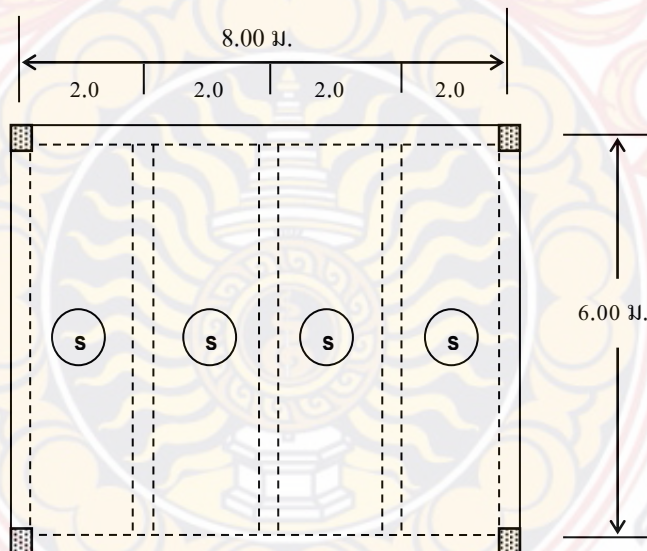
1. จงออกแบบพื้นเสริมเหล็กทางเดียว ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 210 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$
 $w_{LL} = 250 \text{ กก./ม.}^2$ ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ



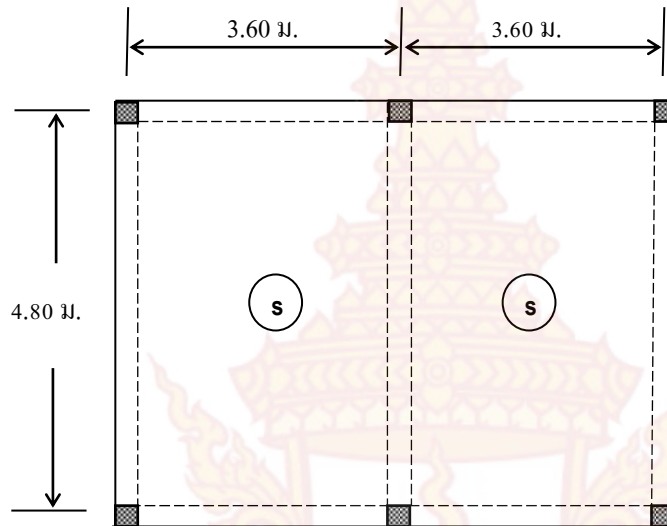
2. จงออกแบบพื้นเสริมเหล็กทางเดียว (s) ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 180 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$
 $w_{LL} = 300 \text{ กก./ม.}^2$ น้ำหนักวัสดุปูพื้น = 50 กก./ม.^2



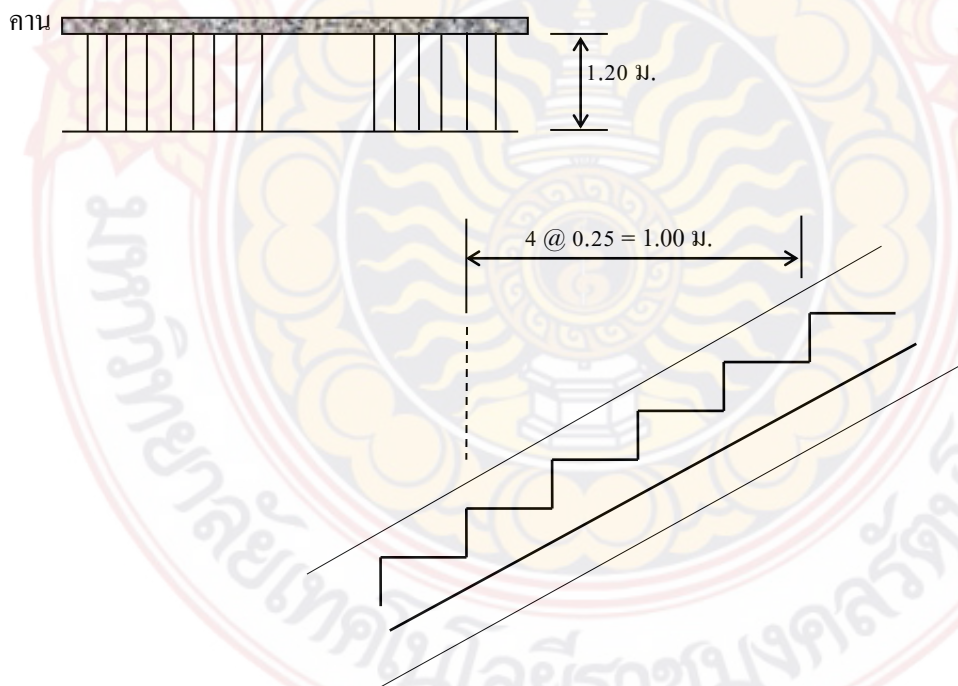
3. จงออกแบบพื้นเสริมเหล็กสองทาง (s) ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 180 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$
 $w_{LL} = 300 \text{ กก./ม.}^2$ น้ำหนักวัสดุปูพื้น = 60 กก./ม.^2



4. จงออกแบบบันไดขึ้นห้องเรียบกว้าง 1.20 ม. ปลายยื่นจากคาน ดังรูป

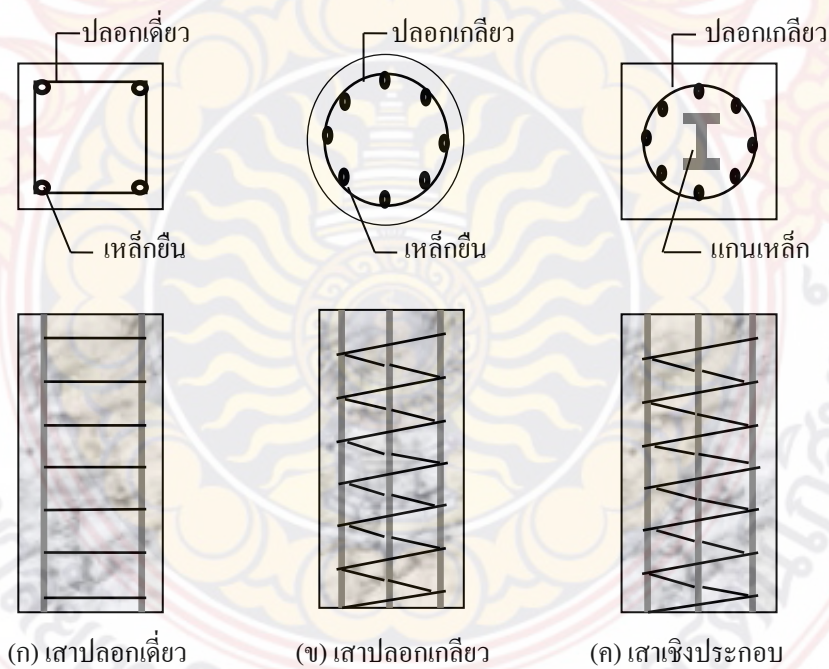
กำหนดให้ $f_c' = 210 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$ $w_{LL} = 300 \text{ กก./ม.}^2$
 ลูกตั้งบันไดสูง 18 ซม. และลูกนอนกว้าง 25 ซม.



บทที่ 6

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

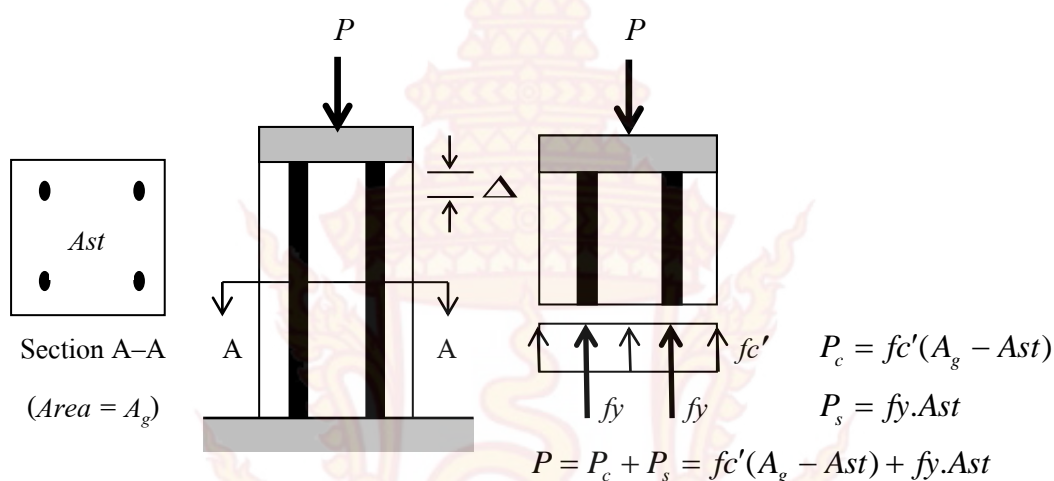
เสาเป็นองค์อาคารที่รับแรงอัดเป็นหลักหรืออาจรับแรงอัดร่วมกับ โมเมนต์ดัดซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉื่อยศูนย์ หรือแรงกระทำทางด้านข้าง เช่น แรงลม เป็นต้น เนื่องจากพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาจะทำหน้าที่เป็นฐานรองรับของคานหรือพื้น และทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักบรรทุกนั้นให้กับเสาด้านต่อไปจนถึงชั้นฐานราก เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ เสาสั้น (Short column) และเสายาวหรือเสาชะลูด (Slender column) พฤติกรรมในการรับน้ำหนักของเสาทั้งสองทำให้เกิดการวิบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการออกแบบเสาจึงต้องพิจารณาทั้งพฤติกรรมการรับแรงของเสาและประเภทของเสาคงคู่กัน รูปแบบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจออกแบบให้มีรูปตัดกลม หรือรูปตัดสี่เหลี่ยมทั้งแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ มีเหล็กเสริมหลักที่เรียกว่าเหล็กยืนตามความยาวเสาเพื่อช่วยรับน้ำหนักร่วมกับคอนกรีต และมีเหล็กเสริมทางขวางที่เรียกว่าเหล็กปลอกยึดรอบเหล็กยืน โดยอาจเป็นปลอกเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมวงแหวนเป็นระยะๆ เรียกว่าเสาปลอกเดี่ยว ดังรูป 6.1 (ก) หรือมีลักษณะวงกลมเป็นปลอกเกลียวพันรอบเหล็กยืน เรียกว่าเสาปลอกเกลียว ดังรูป 6.1 (ข) และเสาที่ใช้เหล็กรูปพรรณเสริมเพิ่มแกนกลางเสา ดังรูป 6.1 (ค) ซึ่งเรียกเสาแบบนี้ว่า เสาเชิงประกอบ (Composite columns) (Edward G. Nawy., 2009)



รูปที่ 6.1 รูปแบบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Edward G. Nawy., 2009)

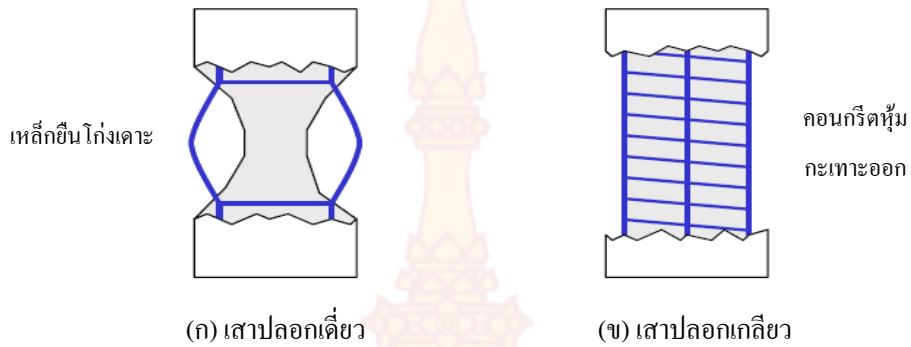
6.1 เสาสั้นรับน้ำหนักตามแนวแกน

เสาสั้น (Short columns) เป็นเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อย (Slenderness ratio : h/r) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนความสูงของเสาต่อด้านแคบสุดของเสาไม่เกิน 15 ($h/t \leq 15$) กำลังรับน้ำหนักของเสาสั้นขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุและพื้นที่หน้าตัดเสา กล่าวคือ ความสามารถในการรับน้ำหนักเสา P เท่ากับกำลังรับน้ำหนักโดยคอนกรีต (P_c) ร่วมกับเหล็กเสริม (P_s) ซึ่งหาได้จากหน่วยแรงของวัสดุคูณพื้นที่หน้าตัดวัสดุ ดังรูปที่ 6.2 (มงคล จิรวัชรเดช, 2549)



รูปที่ 6.2 กำลังรับน้ำหนักของเสาสั้น (มงคล จิรวัชรเดช, 2549)

เมื่อเสาเริ่มรับน้ำหนักเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะหดตัวเล็กน้อยตามแนวแกนเท่ากับ Δ และแบ่งตัวหรือขยายตัวออกทางด้านข้าง และเมื่อเสารับน้ำหนักเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกินขีดความสามารถของกำลังวัสดุเสาจะเกิดการวิบัติ ซึ่งคอนกรีตผิวนอกที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวลักษณะคล้ายกับตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยังมีเหล็กเสริมทางขวางหรือเหล็กปลอก ซึ่งอาจเป็นเหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เพราะนอกจากจะช่วยยึดเหล็กยื่นให้อยู่ในตำแหน่งเพื่อช่วยคอนกรีตรับแรงแล้ว ยังส่งผลให้มีพฤติกรรมแบบเหนียวและทำให้การวิบัติของเสามีความแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เสาปลอกเดี่ยว เมื่อคอนกรีตผิวนอกที่หุ้มเหล็กเสริมถูกอัดจนแตกหลุดร่อนออก เหล็กยื่นจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการโก่งคด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าระยะห่างของเหล็กปลอกมากเกินไปเหล็กยื่นจะเกิดการโก่งคดและเกิดการวิบัติทันที ดังรูปที่ 6.3 (ก) แต่ถ้าเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวดีๆ กำลังรับน้ำหนักของเสาค่อยๆ ลดลงหลังจากที่คอนกรีตหุ้มผิวถูกแรงอัดจนทะลุออกทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ ลักษณะเดียวกับเสาปลอกเกลียวเมื่อคอนกรีตผิวนอกที่หุ้มเหล็กเสริมแตกออกแต่ปลอกเกลียวยังคงรัดคอนกรีตภายในไว้ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (ข)



รูปที่ 6.3 ลักษณะการวิบัติของเสา (มงคล จิรวัชรเดช, 2549)

มาตรฐาน ว.ส.ท. 6602 ถึง 6606 เสนอสูตรคำนวณหาหน้าหนักปลอดภัยตามแนวแกนของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบต่างๆ ดังนี้

6.1.1 เสาปลอกเกลียว เสาที่มีปลอกเกลียวพันถี่ๆ รอบเหล็กตามแนวยาวที่เรียกว่าเหล็กยื่นของ เสาในแนวตั้ง คำนวณหาหน้าหนักปลอดภัยตามแกน ดังนี้

$$P = A_g (0.25 fc' + fs \rho_g)$$

โดยที่ P : หน้าหนักปลอดภัยตามแกน

A_g : พื้นที่หน้าตัดเสา

fc' : กำลังของคอนกรีต

fs : หน่วยแรงของเหล็กเสริม ($0.40fy$)

ρ_g : อัตราส่วนเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา (Ast/A_g)

และเมื่อแทนค่า $\rho_g = \frac{Ast}{A_g}$ ลงในสูตร จะได้

$$P = A_g (0.25 fc' + fs \frac{Ast}{A_g})$$

$$= 0.25 fc' A_g + fs Ast$$

แสดงให้เห็นถึงกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้จากกำลังที่รับ โดยคอนกรีต ร่วมกับเหล็กเสริม (Ast : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นทั้งหมดในเสา)

6.1.2 เสาปลอกเดี่ยว เป็นเสาที่เสริมเหล็กตามแนวยาวที่เรียกว่าเหล็กยื่น และมีเหล็กปลอกเดี่ยว เว้นห่างเป็นระยะๆ ใ้รับน้ำหนักปลอดภัยสูงสุดตามแกนเท่ากับร้อยละ 85 ของเสาปลอกเกลียว

$$P = 0.85 A_g (0.25 fc' + fs \rho_g)$$



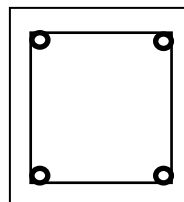
โดยที่ P : น้ำหนักปลอดภัยตามแกน

A_g : พื้นที่หน้าตัดเสา

fc' : กำลังของคอนกรีต

fs : หน่วยแรงของเหล็กเสริม ($0.40fy$)

ρ_g : อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา (Ast/A_g)



6.1.3 เสา ค.ส.ล.แกนเหล็ก เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามแนวยาวและใช้เหล็กปลอกเกลียวพันรอบ โดยมีแกนเป็นเหล็กรูปพรรณหรือเหล็กหล่อ รับน้ำหนักปลอดภัยได้ไม่เกิน

$$P = 0.225A_g fc' + fsAst + f_r A_r$$

โดยที่ f_r : หน่วยแรงที่ยอมให้ของแกนเหล็กรูปพรรณแต่ต้องไม่เกิน 1,200 กก./ซม.² สำหรับเหล็ก มอก.

116-2529 ชั้นคุณภาพ Fe 24 หรือ 700 กก./ซม.² สำหรับแกนที่ทำด้วยเหล็กหล่อ

A_r : พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กรูปพรรณต้องไม่เกินร้อยละ 20 ของพื้นที่หน้าตัดเสา ถ้าใช้แกนโลหะ

กลางต้องเทคอนกรีตภายในให้เต็มทุกๆ จุดตลอดเสาต้องมีระยะห่างระหว่างเหล็ก

ปลอกเกลียวกับแกนเหล็กรูปพรรณอย่างน้อย 7.5 เซนติเมตร ในกรณีที่ใช้แกนเสาเหล็ก

รูปตัว H ระยะห่างที่แคบที่สุดต้องไม่น้อยกว่า 5.0 เซนติเมตร

6.1.4 เสาแบบผสม เป็นเสาเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่ฝังในคอนกรีตที่มีระยะหุ้มของคอนกรีตไม่ต่ำกว่า 6 เซนติเมตร จากผิวเหล็ก ให้คำนวณหาน้ำหนักปลอดภัย ดังนี้

$$P = A_r f_r' \left(1 + \frac{A_g}{100A_r} \right)$$

โดยที่ คอนกรีตที่ใช้ต้องมีกำลังอัด fc' ไม่ต่ำกว่า 200 กก./ซม.² เมื่ออายุ 28 วัน และต้องเสริมด้วยเหล็ก

ตาข่ายเบอร์ 10 A S & W Gage หรืออย่างอื่นที่เทียบเท่าพันรอบเสา โดยมีลวดเหล็กตาม

แนวนอนที่พันรอบเสาห่างกันไม่เกิน 10.0 เซนติเมตร ส่วนลวดเหล็กที่ขนานกับแกน ของ เสา

ต้องห่างกันไม่เกิน 20.0 เซนติเมตร เหล็กตาข่ายนี้ให้พันรอบเสาห่างจากผิวหน้าคอนกรีตเข้ามา

ไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร และให้พันเหลื่อมกันไม่น้อยกว่า 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของ

ลวดเหล็ก

6.1.5 เสาท่อนเหล็กคอนกรีต เป็นเสาซึ่งประกอบด้วยท่อเหล็กที่กรอกคอนกรีตเต็มภายใน ให้คำนวณน้ำหนักปลอดภัย ดังนี้

$$P = 0.25fc'(1 - 0.000025 \frac{h^2}{K_c^2})A_c + f_r' A_r$$

โดย h : ความสูงของเสา, K_c : รัศมีจายเรชั่นของเสาคอนกรีต, A_c : พื้นที่หน้าตัดเสาคอนกรีต

f_r' : $1,195 - 0.0342 \frac{h^2}{K_s^2}$ โดยที่ $\frac{h^2}{K_s^2} < 120$ และท่อเหล็กมีกำลังครากไม่น้อยกว่า 2,300 กก./ซม.²

K_s : รัศมีจายเรชั่นของท่อเหล็ก

6.2 ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

6.2.1 ขนาดเล็กที่สุดของเสาต้องมีด้านแคบที่สุด หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 20 เซนติเมตร เสาที่อยู่ระหว่างเสาหลักและไม่ต่อเนื่องระหว่างชั้นถึงชั้นอาจมีขนาดเล็กกว่าได้ แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 15 เซนติเมตร

6.2.2 คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม (Covering) วัดจากผิวคอนกรีตถึงผิวนอกสุดของเหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว กรณีไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน ระยะหุ้มต่ำสุดเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร

6.2.3 พิกัดหน้าตัดเสา เสาปลอกเดี่ยวที่มีหน้าตัดใหญ่สามารถรับน้ำหนักได้เกินกว่าที่ ต้องการมาก การหาปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุดและความสามารถในการรับน้ำหนักให้คำนวณจากพื้นที่หน้าตัด A_g ที่ลดลงได้ แต่ต้องไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของหน้าตัดจริง

6.2.4 พิกัดสำหรับเหล็กเสริมในเสา

ก) เสาปลอกเดี่ยวต้องมีเหล็กยื่นอย่างน้อย 4 เส้น เสาปลอกเกลียวต้องมีอย่างน้อย 6 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยื่นต้องไม่เล็กกว่า 12 มิลลิเมตร โดยอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา ($\rho_g = A_{st}/A_g$) ต้องไม่น้อยกว่า 0.01 และไม่เกิน 0.08

ข) ในเสาปลอกเดี่ยว เหล็กยื่นทุกเส้นต้องมีเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 มิลลิเมตร พันโดยรอบ โดยมีระยะเรียงของเหล็กปลอกไม่ห่างกว่า 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยื่น และไม่ห่างกว่า 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก และ/หรือมีดัดเล็กที่สุดของเสานั้น

ค) ในเสาปลอกเกลียว เหล็กยื่นทุกเส้นต้องมีเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 มิลลิเมตร พันโดยรอบ โดยมีระยะห่างระหว่างเกลียวไม่เกิน 7 เซนติเมตร และไม่แคบกว่า 3 เซนติเมตร หรือ 1.34 เท่าของขนาดโตสุดของหิน ทั้งนี้อัตราส่วนของปริมาตรเหล็กปลอกเกลียว (ρ_s)

ต้องไม่น้อยกว่าที่คำนวณจากสมการ : $\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{fc'}{f_y}$

โดยที่ f_y คือ กำลังครากของเหล็กปลอกเกลียว แต่ต้องไม่เกิน 4,000 กก./ซม.²

ตัวอย่างที่ 6.1 จงออกแบบเสาปลอกเกลียว รับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน (P) เท่ากับ 72,000 กก.

กำหนดให้ $fc' = 180$ กก./ซม.², $fy = 3,000$ กก./ซม.²

วิธีทำ

กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน : $P = A_g (0.25fc' + fs\rho_g)$

สมมติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเท่ากับ 0.35 ม. ($A_g = 962.11$ ซม.²)

กำลังรับน้ำหนักโดยคอนกรีต : $P_c = 0.25fc'A_g = 0.25(180)962.11$
 $= 43,294.95$ กก.

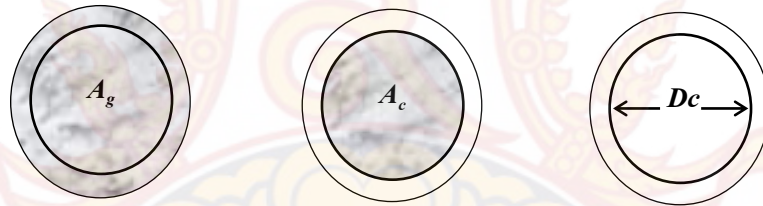
กำลังรับน้ำหนักโดยเหล็กเสริม : $P_s = P - P_c = fs\rho_g A_g = fsAst$

$$72,000 - 43,294.95 = (0.40 \times 3,000) Ast$$

$$Ast = \frac{28,705.05}{(0.40 \times 3,000)} = 23.92 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้เหล็ก 8 DB 20 ($Ast = 25.13$ ซม.², $\rho_g = 0.0261$)

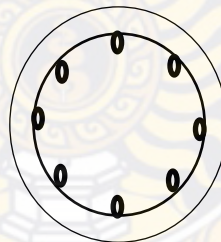
$$\text{ปริมาณเหล็กปลอกเกลียว : } \rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{fc'}{fy} = 0.45 \left[\left(\frac{35}{29} \right)^2 - 1 \right] \frac{180}{2,400} = 0.01541$$



เลือกใช้เหล็กปลอกเกลียวขนาด $\phi 9$ มม. ($As = 0.636$ ซม.²)

$$\text{ระยะห่างปลอกเกลียว : } s = \frac{4As}{\rho_s Dc} = \frac{4 \times 0.636}{0.01541 \times 29} = 5.69 \text{ ซม.}$$

ใช้ปลอกเกลียวขนาด $\phi 9$ มม. @ 0.055 ม.



8 DB 20

ป $\phi 9$ มม. @ 0.055 ม.

ตัวอย่างที่ 6.2 จงออกแบบเสาปอดเดี่ยว รับน้ำหนักปอดกัยตามแกน (P) เท่ากับ 22,500 กก.

กำหนดให้ $fc' = 180$ กก./ ซม.^2 , $fy = 3,000$ กก./ ซม.^2

วิธีทำ

กำลังรับน้ำหนักปอดกัยตามแกน : $P = 0.85A_g(0.25fc' + fs\rho_g)$

สมมติขนาดหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ 0.20 x 0.20 ม. ($A_g = 400.00$ ซม.^2)

กำลังรับน้ำหนักโดยคอนกรีต : $P_C = 0.85(0.25fc')A_g = 0.85(0.25 \times 180) 400$
 $= 15,300.00$ กก.

กำลังรับน้ำหนักโดยเหล็กเสริม : $P_s = P - P_C = 0.85fs\rho_g A_g = 0.85fsAst$

$$22,500 - 15,300.00 = 0.85(0.40 \times 3,000) Ast$$

$$Ast = \frac{7,200}{0.85(0.40 \times 3,000)} = 7.05 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้เหล็ก 4 DB 16 ($Ast = 8.04$ ซม.^2 , $\rho_g = 0.0201$)

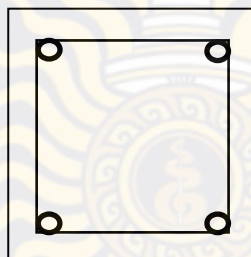
ระยะห่างเหล็กปอด (s) : เลือกใช้เหล็กขนาด ϕ 6 มม. โดยใช้ค่าต่ำสุดดังนี้

$$s = 16 \text{ ของเหล็กขึ้น} = 16 \times 1.6 = 25.6 \text{ ซม.}$$

$$\text{หรือ} = 48 \text{ เท่าของเหล็กปอด} = 48 \times 0.6 = 28.8 \text{ ซม.}$$

$$\text{หรือ} = \text{ด้านแคบสุดของเสา} = 20 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้เหล็กปอดขนาด ϕ 6 มม. @ 0.20 ม.



4 DB 16

ป ϕ 6 มม. @ 0.20 ม.

ตัวอย่างที่ 6.3 จงออกแบบเสา ค.ส.ล. แกนเหล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแกนเหล็กรูปพรรณ WF 100x17.2 ($A_r = 21.90$ ซม.²) รับน้ำหนักปลอดภัยตามแกนเท่ากับ 72,000 กก.

กำหนดให้ $fc' = 180$ กก./ซม.², $fy = 3,000$ กก./ซม.², $f_r = 1,200$ กก./ซม.²

วิธีทำ

กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน : $P = 0.225A_g fc' + fsAst + f_r A_r$

เลือกขนาดเสาเท่ากับ 0.30x0.30 เมตร และตรวจสอบเนื้อที่หน้าตัดแกนเหล็กรูปพรรณ (A_r) ต่อ

พื้นที่หน้าตัดเสา (A_g) : $\frac{A_r}{A_g} = \frac{21.9}{30 \times 30} (100) = 2.43 \% < 20 \%$ ใช้ได้ (ตามข้อกำหนด)

ปริมาณเหล็กยื่นที่ต้องการ

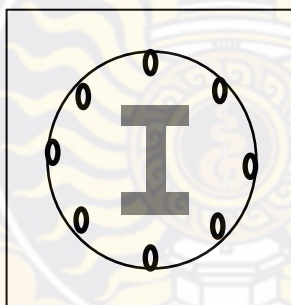
$$\begin{aligned} Ast &= P - 0.225A_g fc' - f_r A_r / fs \\ &= [72,000 - (0.225 \times 900 \times 180) - (1,200 \times 21.90)] / (0.40 \times 3,000) \\ &= 7.72 \text{ ซม.}^2 \text{ เลือกใช้เหล็ก 8 DB 12 } (Ast = 9.04 \text{ ซม.}^2) \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณเหล็กปลอกเกลียว : } \rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{fc'}{fy} = 0.45 \left[\left(\frac{30 \times 30}{\frac{\pi}{4} (24^2)} \right) - 1 \right] \frac{180}{2,400} = 0.033$$

เลือกใช้เหล็กปลอกเกลียวขนาด ϕ 9 มม. ($As = 0.636$ ซม.²)

$$\text{ระยะห่างปลอกเกลียว : } s = \frac{4As}{\rho_s Dc} = \frac{4 \times 0.636}{0.033 \times 24} = 3.21 \text{ ซม.}$$

ใช้ปลอกเกลียวขนาด ϕ 9 มม. @ 0.03 ม.



เหล็กรูปพรรณ WF 100x17.2

เหล็กยื่น 8 DB 12 ($Ast = 9.04$ ซม.²)

ป ϕ 9 มม. @ 0.03 ม.

ขนาดเสา 0.30x0.30 เมตร

ตัวอย่างที่ 6.4 จงออกแบบเสาแบบผสม เป็นเสาเหล็กรูปพรรณฝังในคอนกรีตขนาดหน้าตัด 0.25x0.25 ม. สูง (h) เท่ากับ 3.50 ม. รับน้ำหนักปลอดภัยตามแกนเท่ากับ 25,000 กก.

กำหนดให้ $fc' = 180$ กก./ซม.², ใช้เหล็กรูปพรรณ WF ชนิด A 36

วิธีทำ

เสาเหล็กรูปพรรณหุ้มคอนกรีต ใช้ลวดตาข่ายเบอร์ 10 AS & W Gage หรือเทียบเท่าพันรอบเสา และมีคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กไม่น้อยกว่า 6 ซม.

$$\text{กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน : } P = A_r fr' \left(1 + \frac{A_g}{100A_r}\right)$$

เลือกใช้ WF 125 x 23.3 ; ระยะคอนกรีตหุ้มผิวเหล็ก : $(25-12.5)/2 = 6.25$ ซม. > 6.0 ซม.

ข้อมูลจากตารางเหล็ก WF 125 x 23.3 : $A_r = 30.31$ ซม.², $K_{sx} = 5.29$ ซม., $K_{sy} = 3.11$ ซม.,

A_g : เนื้อที่หน้าตัดเสา = 625 ซม.²

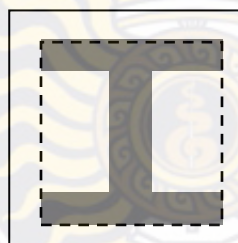
$$fr' : \text{หน่วยแรงที่ยอมให้ของเสาเหล็ก} = 1,195 - 0.0342\left(\frac{h^2}{K_s^2}\right) \text{ โดยอัตราส่วน } \frac{h}{K_s} < 120$$

$$\text{ตรวจสอบอัตราส่วน } \frac{h}{K_s} = \frac{350}{3.11} = 112.54 < 120 \text{ ใช้ได้}$$

$$\text{ดังนั้น } fr' = 1,195 - 0.0342(112.54)^2 = 761.84 \text{ กก./ซม.}^2$$

ความสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน

$$\begin{aligned} P &= A_r fr' \left(1 + \frac{A_g}{100A_r}\right) = 30.31 \times 761.84 \left(1 + \frac{625}{100 \times 30.31}\right) \\ &= 27,852.87 \text{ กก.} > 25,000 \text{ กก. ใช้ได้} \end{aligned}$$

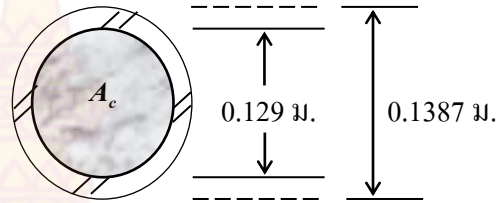


เหล็กรูปพรรณ WF 125x23.3

ขนาดเสา 0.25x0.25 เมตร

ตัวอย่างที่ 6.5 จงตรวจสอบความสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกนของเสาท่อนี้คอนกรีตประกอบด้วย ท่อเหล็ก ชนิด Fe 24 กรอกคอนกรีตเต็ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อเหล็กเท่ากับ 0.1387 ม. และ 0.129 ม. ตามลำดับ หนา 4.85 มม. ดังรูป

กำหนดให้ $fc' = 240$ กก./ซม.²
ความสูงเสา (h) = 3.00 ม.



วิธีทำ

กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกนของเสาท่อนี้คอนกรีต ภายในกรอกคอนกรีตเต็ม

$$P_a = 0.25 fc' \left(1 - 0.000025 \frac{h^2}{K_c^2}\right) A_c + fr' A_r$$

$$A_r = \frac{\pi d_o^2}{4} - \frac{\pi d_i^2}{4} = \frac{\pi (13.87)^2}{4} - \frac{\pi (12.90)^2}{4} = 20.40 \text{ ซม.}^2$$

$$A_c = \frac{\pi (12.90)^2}{4} = 130.69 \text{ ซม.}^2$$

$$K_c: \text{รัศมีใจเรขาคณิตของเสาส่วนที่เป็นคอนกรีต} = \frac{d_i}{4} = \frac{12.90}{4} = 3.225 \text{ ซม.}$$

$$fr': \text{หน่วยแรงที่ยอมให้ของท่อเหล็ก} = 1,195 - 0.0342 \frac{h^2}{K_s^2} \text{ กก./ซม.}^2 \text{ โดย } \frac{h}{K_s} < 120$$

$$\text{และ } K_s = \frac{1}{4} \sqrt{d_o^2 + d_i^2} = \frac{1}{4} \sqrt{13.87^2 + 12.90^2} = 4.73 \text{ ซม.}$$

$$\text{ตรวจสอบอัตราส่วน } \frac{h}{K_s} = \frac{300}{4.73} = 63.42 < 120 \text{ ใช้ได้}$$

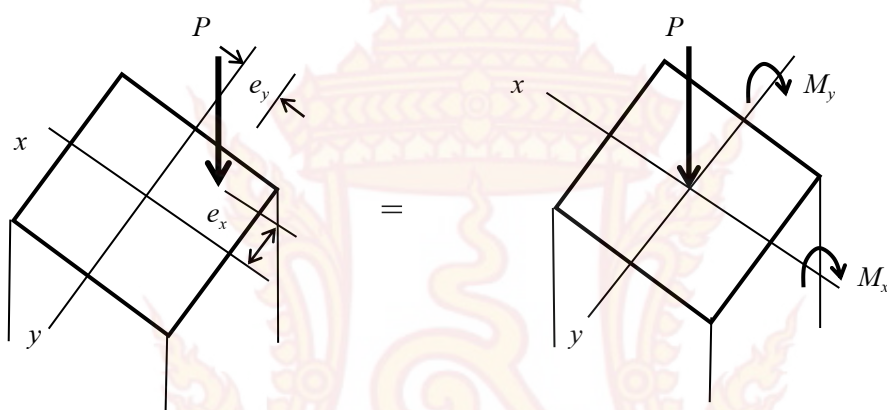
$$fr' = 1,195 - 0.0342 (63.42)^2 = 1,057.44 \text{ กก./ซม.}^2$$

ความสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน

$$\begin{aligned} P_a &= 0.25 fc' \left(1 - 0.000025 \frac{h^2}{K_c^2}\right) A_c + fr' A_r \\ &= 0.25 \times 240 \times \left[1 - 0.000025 \times \left(\frac{300}{3.225}\right)^2\right] \times 130.69 + (1,057.44 \times 20.40) \\ &= 6,145.04 + 21,577.89 \\ &= 27,722.93 \text{ กก.} \end{aligned}$$

6.3 เสาสั้นรับแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน

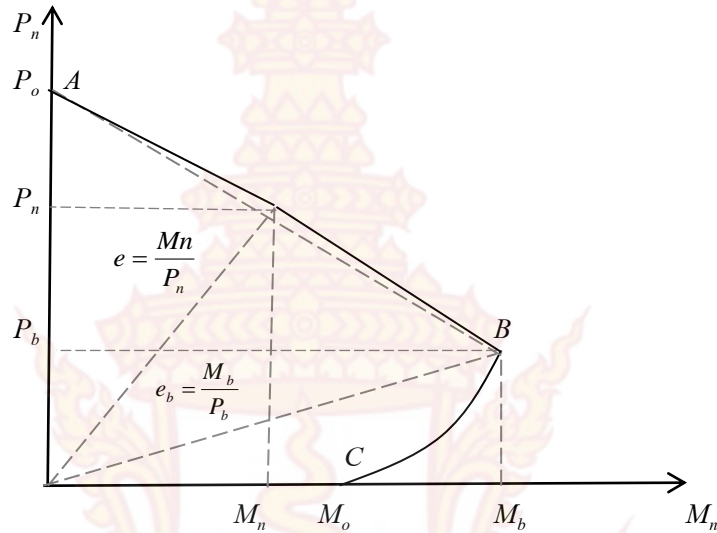
เสาอาจรับแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกันอันเนื่องมาจากแรงเยื้องศูนย์กลาง เช่น เสาที่มี บ่าหรือหูช้างเพื่อรับคาน และ/หรือ รางเครนยกวัสดุในโรงงาน เป็นต้น นอกจากนี้ โครงสร้างอาคารที่มี แรงกระทำทางด้านข้าง เช่น แรงลม ก็ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ที่จุดต่อแบบยึดรั้ง (Rigid joint) ของ โครงสร้าง ดังนั้น การออกแบบเสาจึงต้องพิจารณาทั้งแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน ลักษณะแรงเยื้องศูนย์กลาง แสดงในรูปที่ 6.4 โดย $e_x = \frac{M_x}{P}$ และ $e_y = \frac{M_y}{P}$ หรือเมื่อแรงเยื้องศูนย์กลางอยู่ในแกน หนึ่งแกนใด หรือแกนเดียว $e = \frac{M}{P}$



รูปที่ 6.4 เสาสั้นรับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดร่วมกันอันเกิดจากแรงเยื้องศูนย์กลาง

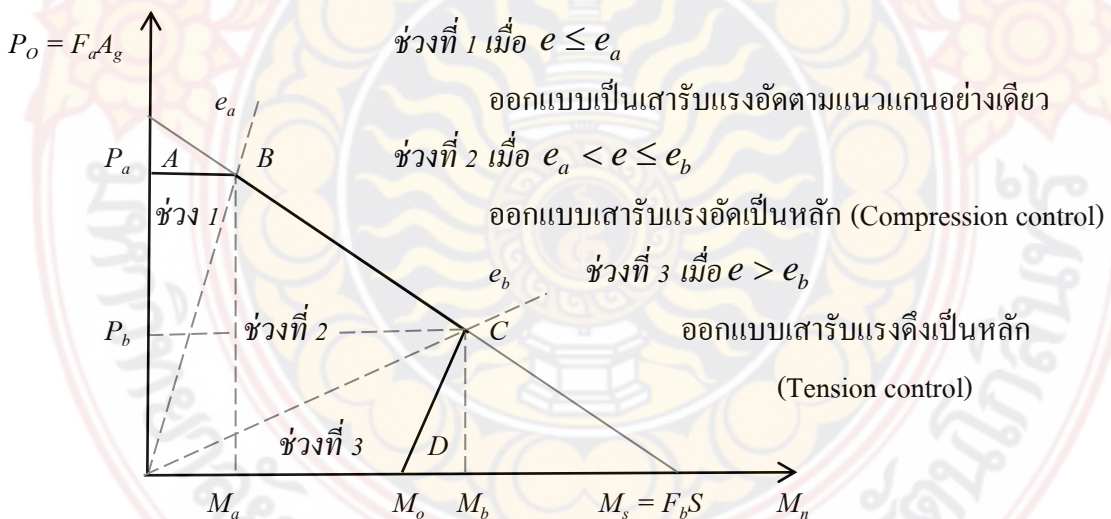
การรับแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกันของเสามีโอกาสเกิดการวิบัติได้ 3 ลักษณะ คือ *วิบัติแบบแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure)* โดยคอนกรีตจะถูกอัดแตกก่อนที่เหล็กเสริมรับแรง ดึงจะถึงจุดคราก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่เสารับแรงอัดมากแต่มีค่าโมเมนต์ดัดน้อยหรือระยะเยื้องศูนย์กลางที่เกิด ในเสาไม่มากนัก ลักษณะที่สอง *การวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก (Tension failure)* ซึ่งมีลักษณะตรงข้ามกับ แบบแรก นั่นคือ เหล็กเสริมรับแรงดึงถูกดึงจนถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดแตก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณี ที่เสามีโมเมนต์ดัดอย่างมากหรือระยะเยื้องศูนย์กลางที่เกิดในเสามาก และลักษณะที่สาม *การวิบัติแบบสมดุล (Balanced failure)* ซึ่งเป็นสถานะที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถูกดึงจนถึงจุดคราก ไปพร้อมคอนกรีตถูกอัดแตก โดยคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดที่ 0.003 มม./มม. การวิบัติของเสาทั้งสามลักษณะ สามารถอธิบาย ได้ด้วยกราฟปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดร่วมกัน ซึ่งให้แกน x เป็นค่าโมเมนต์ดัด (M_u) และแกน y เป็นแรงอัดตามแนวแกน (P_u) ดังรูป ที่ 6.5 โดยการพิจารณาเปรียบเทียบเสาที่มีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมเท่ากัน นำมาทดสอบโดย ให้แรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียวจนกระทั่งวิบัติ จะได้กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของเสา (P_o) ที่จุด A ทำนองเดียวกัน เสาคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบภายใต้โมเมนต์ดัดอย่างเดียวจนกระทั่งเกิดการวิบัติ จะได้

กำลังต้านทาน โมเมนต์ค้ดสูงสุดของเสา (M_o) ที่จุด C และที่จุด B แสดงถึงกำลังต้านทานสูงสุดของเสาทั้งแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ค้ดที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบสมดุล (P_b, M_b) ซึ่งเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมหนึ่งๆ จะมีค่าสมดุลอยู่จุดหนึ่งภายใต้การรับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ค้ดร่วมกัน (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)



รูป 6.5 กราฟปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram)

จากกราฟปฏิสัมพันธ์นำไปสู่การประยุกต์ใช้กราฟในการออกแบบเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ค้ดร่วมกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามระยะเชิงศูนย์กลาง : $e = \frac{M}{P}$ ดังรูปที่ 6.6



รูป 6.6 กราฟออกแบบเสาแบ่งช่วงตามระยะเชิงศูนย์กลาง (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

6.3.1 ช่วงที่ 1: $e \leq e_a$; เป็นช่วงที่เสามีโมเมนต์ค้ดกระทำน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงอัดตามแนวแกน เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) มีค่าน้อย โมเมนต์ค้ดจึงไม่มีผลต่อการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสา ดังนั้น จึงออกแบบเป็นเสารับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว และเสาจจะเกิดการวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure) หรือที่เรียกว่าเสารับแรงอัดเป็นหลัก (Compression control) โดยที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) หาได้จากสมการ ดังนี้

$$e_a = M_s \left(\frac{1}{P_o} - \frac{1}{P_a} \right)$$

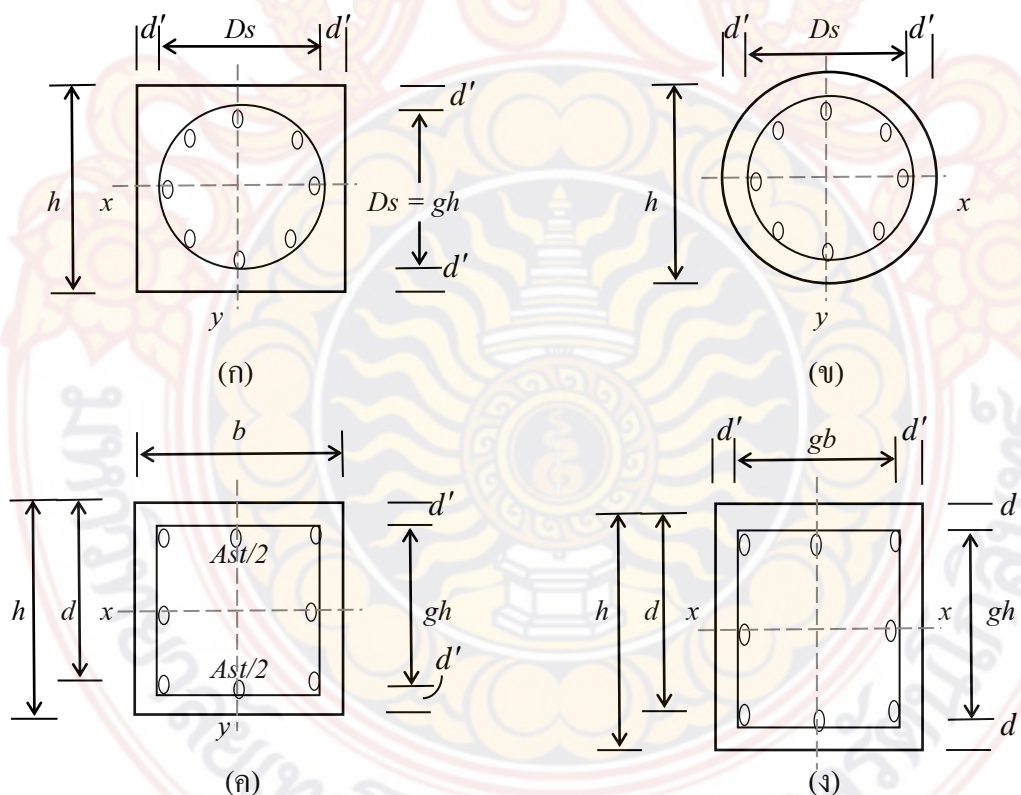
เมื่อ $P_a = A_g (0.25 fc' + fs \rho_g)$ เสาปลอกเกลียว

$P_a = 0.85 A_g (0.25 fc' + fs \rho_g)$ เสาปลอกเดี่ยว

$$P_o = F_a A_g, \quad F_a = 0.34(1 + \rho_g m) fc', \quad \rho_g = \frac{A_s}{A_g}$$

$$M_s = F_b S, \quad F_b = 0.45 fc', \quad S = \frac{I}{c}, \quad m = \frac{f_y}{0.85 fc'}$$

ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของรูปตัดเสา (I_x, I_y) คำนวณจากเนื้อที่หน้าตัดการแปลงของเหล็กเสริม : $(2n - 1)A_{st}$ ดังรูปที่ 6.7 โดยที่ n คืออัตราส่วนโมดูลัส : E_s/E_c



รูปที่ 6.7 หน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กยื่นเป็นวงกลม ดังรูปที่ 6.7 (ก)

$$I_x = I_y = \frac{h^4}{12} (2n-1) Ast \frac{Ds^2}{8}$$

$$c_x = c_y = \frac{h}{2}$$

เสาน้ำตัดกลม เรียงเหล็กยื่นเป็นวงกลม ดังรูปที่ 6.7 (ข)

$$I_x = I_y = \frac{\pi d^4}{64} + (2n-1) Ast \frac{Ds^2}{8}$$

$$c_x = c_y = \frac{h}{2}$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เรียงเหล็กยื่นเหมือนกัน 2 ด้านขนานกัน ดังรูปที่ 6.7 (ค)

$$I_x = \frac{bh^3}{12} + (2n-1) Ast \frac{(gh)^2}{4}$$

$$I_y = \frac{b^3h}{12} + (2n-1) Ast \frac{(gh)^2}{4}$$

$$c_x = \frac{b}{2}, \quad \text{และ} \quad c_y = \frac{h}{2}$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียงเหล็กยื่นเหมือนกันทั้งสี่ด้าน ดังรูปที่ 6.7 (ง)

$$I_x = \frac{bh^3}{12} + (2n-1) Ast \frac{(gh)^2}{6}$$

$$I_y = \frac{b^3h}{12} + (2n-1) Ast \frac{(gh)^2}{6}$$

$$c_x = \frac{b}{2}, \quad \text{และ} \quad c_y = \frac{h}{2}$$

6.3.2 ช่วงที่ 2 : $e_a < e \leq e_b$; เป็นช่วงที่เสามี โมเมนต์คดกระทำปานกลาง ผลของ โมเมนต์คดที่กระทำกับเสาทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาลดลง แต่ การวิบัติ ของเสายังคงเป็นแบบแรงอัดเป็นหลัก (Compression failure) ดังนั้น จึงเรียกรอกแบบเสาช่วงนี้ว่า เสา รับแรงอัดเป็นหลัก (Compression control) โดยที่ระยะเยื้องศูนย์กลางสมมูล (e_b) หาได้จากสมการ ดังนี้

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เสริมเหล็กรับแรงอัดและแรงดึงเหมือนกัน

เสาปลอกเกลียว ดังรูปที่ 6.7 (ก)

$$e_{bx} = e_{by} = 0.43 \rho_g m Ds + 0.14h$$

เสาปลอกเดี่ยว ดังรูปที่ 6.7 (ข)

$$e_{bx} = e_{by} = [0.67 \rho_g m + 0.17](h - d')$$

เสาน้ำตัดกลม : เสาปลอกเกลียว ดังรูปที่ 6.7 (ข)

$$e_{bx} = e_{by} = 0.43 \rho_g m Ds + 0.14h$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กรับแรงอัดและแรงดึงเหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว ดังรูปที่ 6.7 (ง)

$$e_{bx} = [0.67\rho_g m + 0.17](h - d')$$

$$e_{by} = [0.67\rho_g m + 0.17](b - d')$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสริมเหล็กรับแรงอัดและแรงดึงไม่เหมือนกัน

เสาปลอกเดี่ยว

$$e_{bx} = \frac{\rho' m (h - 2d') + 0.1(h - d')}{(\rho' - \rho)m + 0.6}$$

$$e_{by} = \frac{\rho' m (b - 2d') + 0.1(b - d')}{(\rho' - \rho)m + 0.6}$$

เมื่อ $\rho = \frac{As}{bd}$, $\rho' = \frac{As'}{bd}$, $m = \frac{fy}{0.85fc'}$, $\rho_g = \frac{Ast}{A_g}$

เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลาง $e_a < e \leq e_b$ หลักการออกแบบจะใช้วิธีการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยหาผลรวมของอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ของแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทั้งสองแกนต้องไม่เกินหนึ่ง ดังนี้

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (\text{ว.ศ.ท. 6607 (ข)})$$

เมื่อ $f_a = \frac{P}{A_g}$: หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นตามแนวแกน

$$f_{bx} = \frac{M_x c_y}{I_x}$$
 : หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นรอบแกน x

$$f_{by} = \frac{M_y c_x}{I_y}$$
 : หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นรอบแกน y

$$F_a = 0.34(1 + \rho_g m)fc'$$
 : หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

$$F_b = 0.45fc'$$
 : หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของคอนกรีต

6.3.3 ช่วงที่ 3 : $e > e_b$; เป็นช่วงที่เสามีโมเมนต์ดัดกระทำอย่างมากผลของโมเมนต์ดัดที่กระทำกับเสาทำให้เกิด การวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก (Tension failure) เหล็กเสริมรับแรงดึงถูกดึงจนถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดแตก ดังนั้น จึงเรียกการออกแบบเสาช่วงนี้ว่าเสารับแรงดึงเป็นหลัก (Tension control) การคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาช่วงนี้ให้ถือว่าโมเมนต์ดัดปลอดภัย

(M) ผันแปรแบบเส้นตรงกับน้ำหนักตามแนวแกน (P) จาก M_o ถึง M_b (เส้น CD รูปที่ 6.6) ค่า M_b หาได้

จาก : $M_b = P_b \cdot e_b$ และค่า P_b หาจากสูตร $\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$ ส่วนค่าของ M_o หาจากสมการต่อไปนี้

เสาน้ำตัดกลม และเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีปลอกเกลียว

$$M_{ox} = M_{oy} = 0.12A_{st}fyDs$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีปลอกเดี่ยวเสริมเหล็กสองด้านเท่ากัน

$$M_{ox} = 0.40Asfy(t - 2d')$$

$$M_{oy} = 0.40Asfy(b - 2d')$$

เสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีปลอกเกลียว เสริมเหล็กสองด้านไม่เท่ากัน

$$M_{ox} = 0.40Asfy(J_x)(t - d')$$

$$M_{oy} = 0.40Asfy(J_y)(b - d')$$

เมื่อ A_{st} : พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นทั้งหมดในเสา

As : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงของเหล็กยื่น

$(J_x)(t - d')$ และ $(J_y)(b - d')$ คือช่วงแขนของโมเมนต์

ในกรณีที่แรงอัดตามแนวแกน (P) กระทำเยื้องศูนย์กลางทั้งแกน x และแกน y พร้อมกัน (M_x , M_y) ให้ทำการตรวจสอบความปลอดภัยในการรับน้ำหนักจากสมการ ดังนี้

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \leq 1.0 \quad (\text{ว.ศ.ท. 6607 (ก)})$$

ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบเสารับแรงอัดตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดร่วมกัน

1. สมมติขนาดเสา และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา : b, t, d, ρ_g, A_{st}

2. คำนวณหาระยะเยื้องศูนย์กลาง : $e = \frac{M}{P}$, $e_a = M_s \left(\frac{1}{P_o} - \frac{1}{P_a} \right)$ และระยะเยื้องศูนย์กลางสมดุล e_b

3. เปรียบเทียบระยะเยื้องศูนย์กลาง :

3.1 ถ้า $e \leq e_a$; ช่วงที่ 1 : ออกแบบเป็นเสารับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว

3.2 ถ้า $e_a < e \leq e_b$; ช่วงที่ 2 : ออกแบบเสารับแรงอัดเป็นหลัก (Compression control)

ใช้วิธีการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

3.3 ถ้า $e > e_b$; ช่วงที่ 3 : ออกแบบเสารับแรงดึงเป็นหลัก (Tension control)

ตัวอย่างที่ 6 จงออกแบบเสาปอดกเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส รับน้ำหนักปลอดภัยตามแกน (P) เท่ากับ 72,000 กก. และโมเมนต์ดัด $M_x = 4,800$ กก.-ม. โมเมนต์ดัด $M_y = 1,200$ กก.-ม.

กำหนดให้ $fc' = 180$ กก./ซม.², $fy = 3,000$ กก./ซม.², $n = 10$

วิธีทำ

สมมติขนาดหน้าตัดเสา และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นต่อพื้นที่หน้าตัดเสา : ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเสา

สมมติใช้ขนาดหน้าตัดเสาเท่ากับ 0.40×0.40 ม. และเลือก $\rho_g = 0.020$ (2.0 %)

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่น : $A_{st} = \rho_g \times A_g = 0.020 \times (40 \times 40) = 32.0$ ซม.²

เลือกใช้เหล็กยื่น 12 DB 20 มม. ($A_{st} = 37.70$ ซม.², $\rho_g = 0.0235$)

จัดวางเหล็กยื่นปริมาณเท่ากันทุกด้าน ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่ากับ 3.0 ซม. ใช้เหล็กปอดกขนาด ϕ 9 มม. เหล็กยื่นขนาด DB 20 มม. ดังนั้น $d' = 3.0 + 0.9 + 1.0 = 4.90$ ซม.

$$m = \frac{fy}{0.85fc'} = \frac{3,000}{0.85 \times 180} = 19.60$$

ระยะเยื้องศูนย์กลางสูงสุด : $e_x = \frac{M_x}{P} = \frac{4,800 \times 100}{72,000} = 6.67$ ซม.

ระยะเยื้องศูนย์กลางสมดุล : $e_{bx} = e_{by} = [0.67\rho_g m + 0.17](h - d')$
 $= [0.67 \times 0.0235 \times 19.60 + 0.17](40 - 4.90)$
 $= 16.80$ ซม. > 6.67 ซม.

ช่วงที่ 2 : $e_a < e \leq e_b$; ออกแบบเสารับแรงอัดเป็นหลัก

ตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาจากสมการ

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

$$f_a = \frac{P}{A_g} = \frac{72,000}{(40 \times 40)} = 45.00 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_a = 0.34(1 + \rho_g m)fc' = 0.34(1 + 0.0235 \times 19.60)180 = 89.38 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_{bx} = \frac{M_x c_y}{I_x}, \quad I_x = I_y = \frac{bh^3}{12} + (2n - 1)A_{st} \times \frac{(gh)^2}{6}$$

$$= \frac{4,800 \times 100 \times 20}{322,215.70} = 29.79 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_{by} = \frac{M_y c_x}{I_y} = \frac{1,200 \times 100 \times 20}{322,215.70} = 7.44 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_{bx} = F_{by} = 0.45fc' = 0.45 \times 180 = 81.0 \text{ กก./ชม.}^2$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} = \frac{45.0}{89.38} + \frac{29.79}{81.0} + \frac{7.44}{81.0} = 0.963 < 1.0 \text{ ใช้ได้}$$

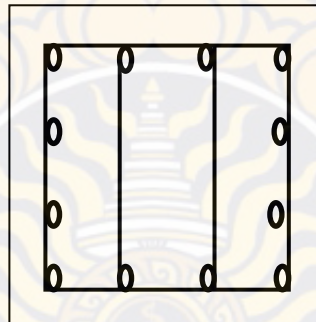
ทั้งนี้แรงอัดที่เสารับได้โดยปลอดภัยมีค่าไม่เกินกว่าค่า P_u เมื่อเสารับแรงอัดตามแกนอย่างเดียว

$$\begin{aligned} P_u &= 0.85A_g(0.25fc' + fs\rho_g) \\ &= 0.85 \times 1,600(0.25 \times 180 + 1,200 \times 0.0235) \\ &= 99,552 \text{ กก.} > 72,000 \text{ กก.} \text{ ใช้ได้} \end{aligned}$$

ระยะห่างเหล็กปลอก (s) : เลือกใช้เหล็กขนาด $\phi 9$ มม. โดยใช้ค่าต่ำสุดดังนี้

$$\begin{aligned} s &= 16 \text{ ของเหล็กขึ้น} &= 16 \times 2.0 &= 32.0 \text{ ซม.} \\ \text{หรือ} &= 48 \text{ เท่าของเหล็กปลอก} &= 48 \times 0.9 &= 43.2 \text{ ซม.} \\ \text{หรือ} &= \text{ด้านแคบสุดของเสา} &= 40 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

ใช้เหล็ก 2 ป $\phi 9$ มม. @ 0.30 ม.



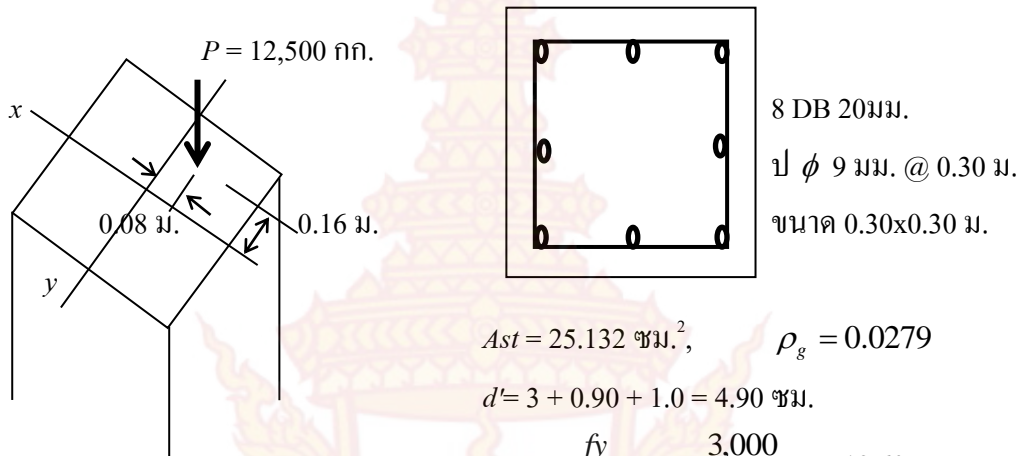
12 DB 20 มม.

2 ป $\phi 9$ มม. @ 0.30 ม.

ขนาดเสา 0.40x0.40 เมตร

ตัวอย่างที่ 7 เสาปลอกเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30x0.30 เมตร เสริมเหล็กชั้น 8 DB 20 มม. เหล็กปลอก ϕ 9 มม. @ 0.30 ม. รับแรงอัดเฉียงศูนย์ 12,500 กก. คังรูป จงตรวจสอบว่าสามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัยหรือไม่

กำหนดให้ $f_c' = 180$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.²



$$A_{st} = 25.132 \text{ ซม.}^2, \quad \rho_g = 0.0279$$

$$d' = 3 + 0.90 + 1.0 = 4.90 \text{ ซม.}$$

$$m = \frac{f_y}{0.85 f_c'} = \frac{3,000}{0.85 \times 180} = 19.60$$

วิธีทำ โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงเฉียงศูนย์

$$M_x = 12,500 \times 0.16 = 2,000 \text{ กก.-ม.}$$

$$M_y = 12,500 \times 0.08 = 1,000 \text{ กก.-ม.}$$

$$\text{ระยะเยื้องศูนย์สูงสุด : } e = \frac{M}{P} = \frac{2,000 \times 100}{12,500} = 16.00 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเยื้องศูนย์สมดุล : } e_{bx} = e_{by} &= [0.67 \rho_g m + 0.17](h - d') \\ &= [0.67 \times 0.0279 \times 19.60 + 0.17](30 - 4.90) \\ &= 13.46 \text{ ซม.} < 16.00 \text{ ซม.} : \text{เสารับแรงดึงเป็นหลัก} \end{aligned}$$

$$\text{แรงอัดตามแนวแกนกระทำเยื้องศูนย์พร้อมกันทั้งสองแกน : } \frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \leq 1.00$$

$$\begin{aligned} M_{ox} = M_{oy} &= 0.40 A_s f_y (h - 2d') \\ &= 0.40 (4 \times 3.141) 3,000 [30 - (2 \times 4.90)] \\ &= 304,551.36 \text{ กก.-ซม.} \end{aligned}$$

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \leq 1.00 : \frac{(2,000 + 1,000) \times 100}{304,551.36} = 0.985 < 1.00$$

เสาสามารถรับน้ำหนักได้โดยปลอดภัย

6.4 เสายาว (Slender columns)

เสายาวหรือเสาชะลูดเป็นเสาที่มีขนาดรูปตัดน้อยเมื่อเทียบกับความสูงของเสา โดยอาจพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความสูงต่อด้านแคบสุดของเสามากกว่า 15 ($h/t > 15$) เมื่อเสายาวรับน้ำหนักความชะลูดของเสาทำให้เกิดการโก่งตัวทางด้านข้าง การวิบัติของเสาจึงอาจเกิดขึ้นได้สองแบบซึ่งขึ้นอยู่กับการยึดหรือการค้ำยันปลายเสา แบบแรกถ้ายึดหรือค้ำยันปลายเสาอย่างมั่นคง ปลายเสาไม่เกิดการเคลื่อนที่ การวิบัติจะเกิดจากกำลังวัสดุ (Material failure) ลักษณะเดียวกับการวิบัติของเสาสั้น แบบที่สอง ถ้ายึดหรือค้ำยันปลายเสาอย่างไม่มั่นคงเพียงพอ และ/หรือเป็นเสาอิสระไม่ยึดรั้ง ปลายเสาเกิดการเคลื่อนที่ การวิบัติของเสาจะเกิดจากการสูญเสียความมั่นคงก่อนถึงกำลังสูงสุดของวัสดุ (Instability failure) ความชะลูดของเสาส่งผลให้ความสามารถในรับน้ำหนักของเสายาวน้อยกว่าเสาสั้น ในการออกแบบเสายาวมาตรฐาน ว.ส.ท. 5303 ให้ใช้สูตรเดียวกับเสาสั้น แล้วใช้ตัวคูณลดกำลังเสาชะลูด (R) ดังนี้

$$P_{\text{เสายาว}} = R \times P_{\text{เสาสั้น}} \quad M_{\text{เสายาว}} = R \times M_{\text{เสาสั้น}}$$

เมื่อ $P_{\text{เสาสั้น}}, M_{\text{เสาสั้น}}$: แรงอัดและโมเมนต์ดัดที่คำนวณจากสูตรออกแบบเสาสั้น
 R : ตัวคูณลดกำลังเสาชะลูด ($R \leq 1.0$)

6.4.1 ความชะลูดของเสา พิจารณาจากอัตราส่วนความชะลูดของเสา : h/r (Slenderness ratio) เมื่อ h เป็นความยาวอิสระปราศจากการค้ำยัน และ r เป็นรัศมีจอร์จัน ($r = \sqrt{I/A}$) กรณีเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า $r = 0.30 t$ โดย t คือความลึกของเสาด้านรับโมเมนต์ดัด ส่วนเสาหน้าตัดกลม $r = 0.25 D$ โดย D คือเส้นผ่านศูนย์กลางเสา อย่างไรก็ตาม เสาในโครงสร้างอาคารทั่วไปจะต่อยึดกับคาน (ต่อยึดเป็นโครงเฟรม) หรือมีการค้ำยันยึดด้านข้างในรูปแบบต่างๆ จึงทำให้สติฟเนส (Stiffness) ของเสาที่มีคานและสิ่งค้ำยันยึดด้านข้างต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้โครงเฟรมเกิดการเคลื่อนที่หรือไม่เคลื่อนที่ก็ได้ ดังนั้นมาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดให้พิจารณาความยาวอิสระเสา (h) จากความยาวประสิทธิผล : h' (effective length) ดังนี้

ก. เสาในโครงเฟรมปลายเสาไม่เคลื่อนที่ เนื่องจากยึดหรือค้ำยันปลายเสาอย่างมั่นคงเพียงพอ ให้ใช้ความยาวประสิทธิผล : $h' = h$

ข. เสาในโครงเฟรมปลายเสาเคลื่อนที่ เนื่องจากไม่มีการยึดปลายเสาหรือค้ำยันปลายเสาไม่มั่นคงเพียงพอ ความยาวประสิทธิผล : h' จะขึ้นอยู่กับ การยึดปลายเสาโดยคำนวณจากตัวคูณของจุดต่อ : r_j ซึ่งเป็นอัตราส่วนของผลรวมสติฟเนสของเสา (Kc) ต่อผลรวมสติฟเนสของคาน (Kb) บนระนาบพิจารณาที่จุดต่อ j นั่นคือ

$$r_j = \frac{\sum Kc}{\sum Kb}$$

โดยที่ r_j' : ตัวคูณความยาวประสิทธิผล

Kc : ผลรวมสติฟเนสของเสาที่อยู่เหนือและใต้จุดต่อ; $\sum \frac{2EIc}{h}$

Kb : ผลรวมสติฟเนสของคานซ้ายและขวาจุดต่อ; $\sum \frac{2EIb}{L}$

h : ความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน

L : ความยาวของคาน

ให้ใช้ความยาวประสิทธิผล h' ที่มีค่ามากโดยพิจารณาทั้ง 2 ระนาบ จากกรณีต่อไปนี้

1. ถ้าอัตราส่วน $r' > 25$ ให้ถือว่าปลายเสานั้นมีสภาพยึดหมุน (Pinned end)

2. ถ้าปลายเสาข้างหนึ่งถูกยึดรั้งไม่ให้หมุน และอีกปลายหนึ่งมีสภาพยึดหมุน

ให้ใช้ความยาวประสิทธิผล $h' = 2h(0.78 + 0.22r') \geq 2h$ โดย r' เป็นค่าสำหรับปลายที่ถูกยึดไว้

3. ถ้าปลายเสาถูกยึดรั้งไว้ไม่ให้หมุนทั้งสองปลาย ให้ใช้ความยาวประสิทธิผล $h' = h(0.78 + 0.22r') \geq h$ โดย r' เป็นค่าเฉลี่ยสำหรับปลายเสาทั้งสอง ($r' = \frac{1}{2}r_T' + r_B'$) คือปลายเสาด้าน (T) และปลายเสาด้าน (B)

4. สำหรับปลายเสาอิสระ (Free end) อีกปลายหนึ่งมีสภาพยึดแน่นไม่ให้หมุน ให้ใช้ความยาวประสิทธิผลเป็นสองเท่าของความยาวเสา: $h' = 2h$

6.4.2 ตัวคูณลดกำลังเสาขะลุค (R) มาตรฐาน ว.ส.ท. 5303 กำหนดให้ใช้สูตรลดกำลังเสาขะลุค ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนขะลุค ลักษณะการ โกงทางข้างของเสา และการเคลื่อนที่ปลายเสา ดังนี้

ก. กรณีเสารับแรงอัดตามแกนอย่างเดียว ($e \leq e_a$)

$$R = 1.07 - 0.008 (h/r) \leq 1.0$$

ข. กรณีเสารับแรงอัดและแรงค้ำคร่อมกัน

1. เมื่อเสารับแรงอัดเป็นหลัก ($e_a < e \leq e_b$)

1.1 ปลายเสาไม่เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

- เมื่อเสาโก่งสองทาง (double curvature) ดังรูปที่ 6.8 (ก)

$$\text{ถ้า } (h/r) < 60 : R = 1.0$$

$$\text{ถ้า } 60 \leq \left(\frac{h}{r}\right) \leq 100 : R = 1.32 - 0.006 (h/r) \leq 1.0$$

ถ้า $h/r > 100$ ให้วิเคราะห์โดยค้ำนึ่งถึงระยะ โกงที่เพิ่มขึ้น

- เมื่อเสาโก่งทางเดียว (single curvature) ดังรูปที่ 6.8 (ข)

$$R = 1.07 - 0.008(h/r) \leq 1.0$$

1.2 ปลายเสาเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างได้ ดังรูปที่ 6.8 (ค) ถึง (จ)

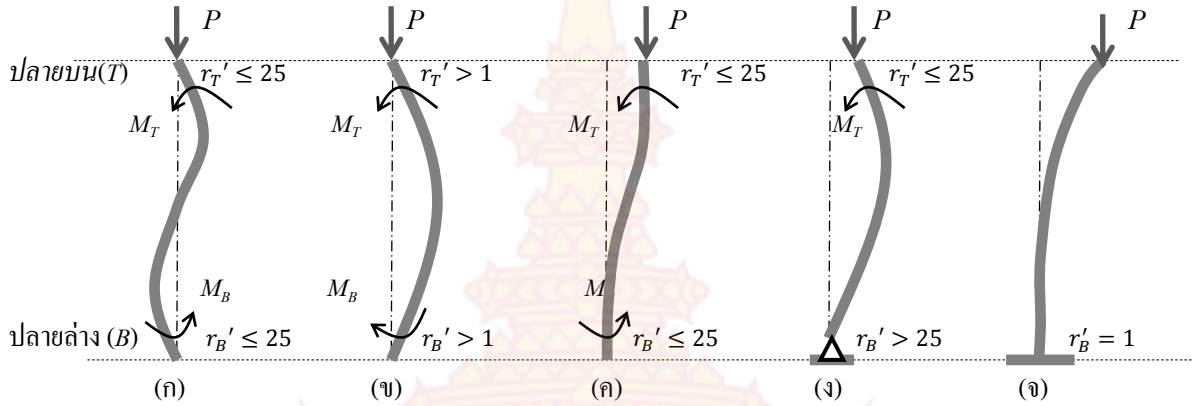
$$R = 1.07 - 0.008(h'/r) \leq 1.0$$

2. เมื่อเสารับแรงค้ำเป็นหลัก ($e > e_b$)

$$R' = 1 - (1 - R) \frac{e_b}{e} \geq R$$

R : ตัวคูณลดกำลังเสาขะลุดที่ได้จากกรณีที่ 1.1 หรือ 1.2

$\frac{e_b}{e}$: อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางสมดุลต่อระยะเยื้องศูนย์กลาง

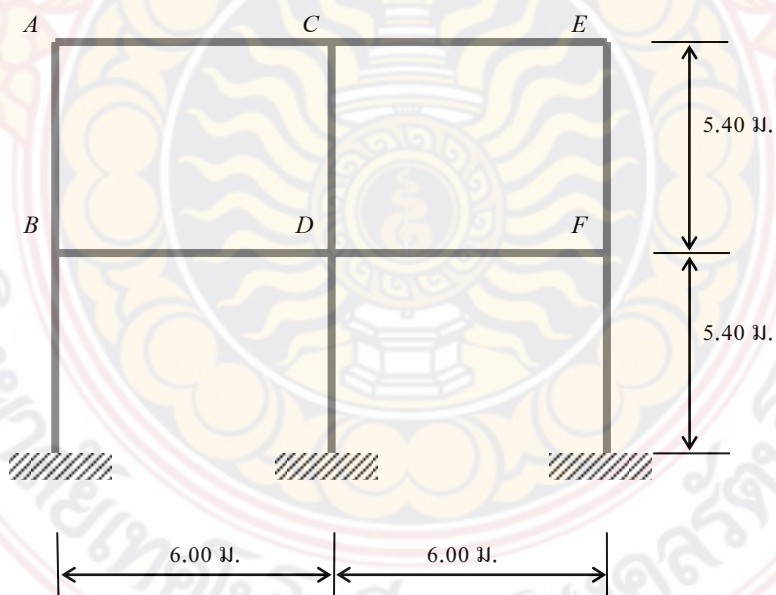


รูปที่ 6.8 ลักษณะการ โกงตัวและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสา

ตัวอย่างที่ 8 จงหาค่าตัวคูณลดกำลังเสาขะลุด (R) ของเสาดักกลาง CD ในโครงเฟรม ดังรูป เมื่อ

- ก) ปลายเสาไม่เกิดการเคลื่อนที่ และ
- ข) ปลายเสาเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ปลายเสาถูกยึดไว้ไม่ให้หมุนทั้งสองปลาย กำหนดให้ เสาโค้งแบบสองทาง และเสารับแรงอัดเป็นหลัก

ขนาดเสา 0.25x0.40 ม. และขนาดคาน 0.25x0.50 ม.



วิธีทำ

ก) ปลายเสาไม่เกิดการเคลื่อนที่

$$h = 540 \text{ ซม.}, \quad r = 0.30 \quad t = 0.30(40) = 12 \text{ ซม.}$$

$$h/r = 45 < 60 \quad \text{ไม่ต้องลดกำลังเสาขะลุค; ใช้ } R = 1.0$$

ข) ปลายเสาเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

$$\text{ค่าตัวคูณลดกำลังเสาขะลุค: } R = 1.07 - 0.008(h'/r) \leq 1.0$$

$$\text{ความยาวประสิทธิผล: } h' = h(0.78 + 0.22r') \geq h$$

$$\text{โดย } r' = \frac{1}{2}r_T' + r_B'$$

$$r_T' = \frac{\sum Kc}{\sum Kb} = \frac{\frac{(25 \times 40^3)/12}{540}}{\frac{2(25 \times 50^3)/12}{600}} = \frac{246.91}{868.05} = 0.284$$

$$r_B' = \frac{\sum Kc}{\sum Kb} = \frac{\frac{2(25 \times 40^3)/12}{540}}{\frac{2(25 \times 50^3)/12}{600}} = \frac{493.82}{868.05} = 0.568$$

$$\text{ค่าเฉลี่ย } r' = \frac{1}{2}r_T' + r_B' = 0.426$$

$$h' = h(0.78 + 0.22 \times 0.426) = 471.80 < h \text{ ดังนั้น ใช้ } h' = 540 \text{ ซม.}$$

$$R = 1.07 - 0.008(540/12) \\ = 0.71$$

ผลของความขะลุคและการโค้งตัวทางด้านข้างทำให้เสารับน้ำหนักลดลงร้อยละ 29

แบบฝึกหัด

1. เสาต้นรับน้ำหนักปลอดภัยตามแนวแกน 55,000 กก.

กำหนดให้ $f_c' = 210$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

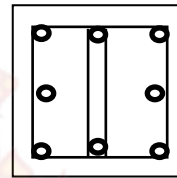
จงออกแบบ ก) เสาปลอกเดี่ยว ข) เสาปลอกเกลียว

2. จงตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัย

ตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป

กำหนดให้ $f_c' = 250$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

ขนาดหน้าตัดเสา 0.40x0.40 ม.



8 DB 25

2 ป ϕ 9 มม. @ 0.40 ม.

3. จงออกแบบเสาปลอกเดี่ยวน้ำหนักปลอดภัยตามแนวแกน 50,000 กก. และ โมเมนต์ดัด 3,600 กก.-ม.

กำหนดให้ $f_c' = 250$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.² $n = 9$

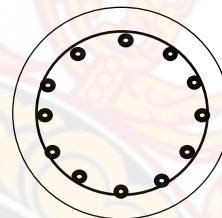
4. จงตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกน

เท่ากับ 70,000 กก. และ โมเมนต์ดัด (M) เท่ากับ 4,200 กก.-ม.

ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป ได้ปลอดภัยหรือไม่

กำหนดให้ $f_c' = 210$ กก./ซม.² $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

เสาปลอกเกลียวขนาด ϕ 0.40 ม.



12 DB 20

ป ϕ 9 มม. @ 0.05 ม.

5. จากตัวอย่างที่ 8 จงหาค่าตัวคูณลดกำลังเสาเชลูด (R) ของเสาตัวริม AB ในโครงเฟรม เมื่อ

ก) ปลายเสาไม่เกิดการเคลื่อนที่ และ

ข) ปลายเสาเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ปลายเสาถูกยึดไว้ไม่ให้หมุนทั้งสองปลาย

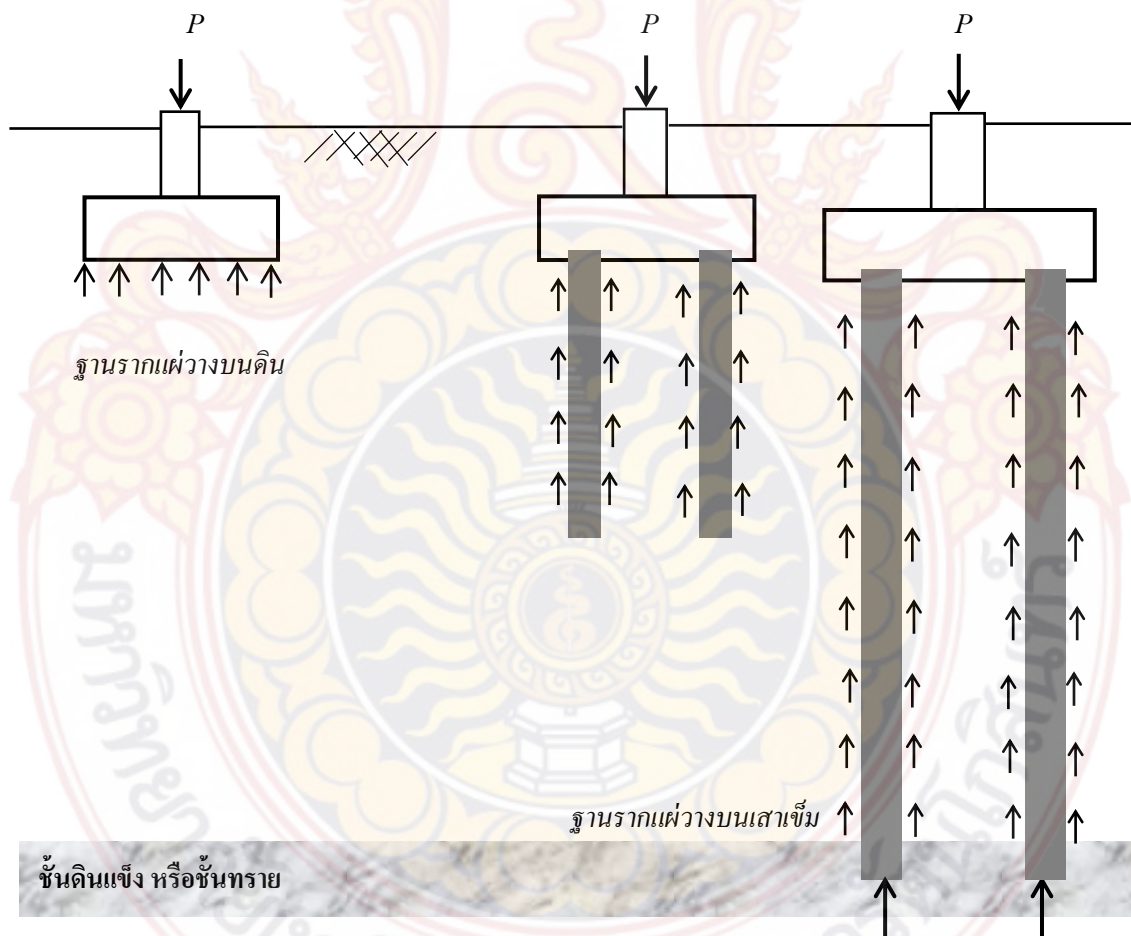
กำหนดให้ เสาโค้งแบบสองทาง และเสารับแรงอัดเป็นหลัก

ขนาดเสา 0.25x0.40 ม. และขนาดคาน 0.25x0.50 ม.

บทที่ 7

ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

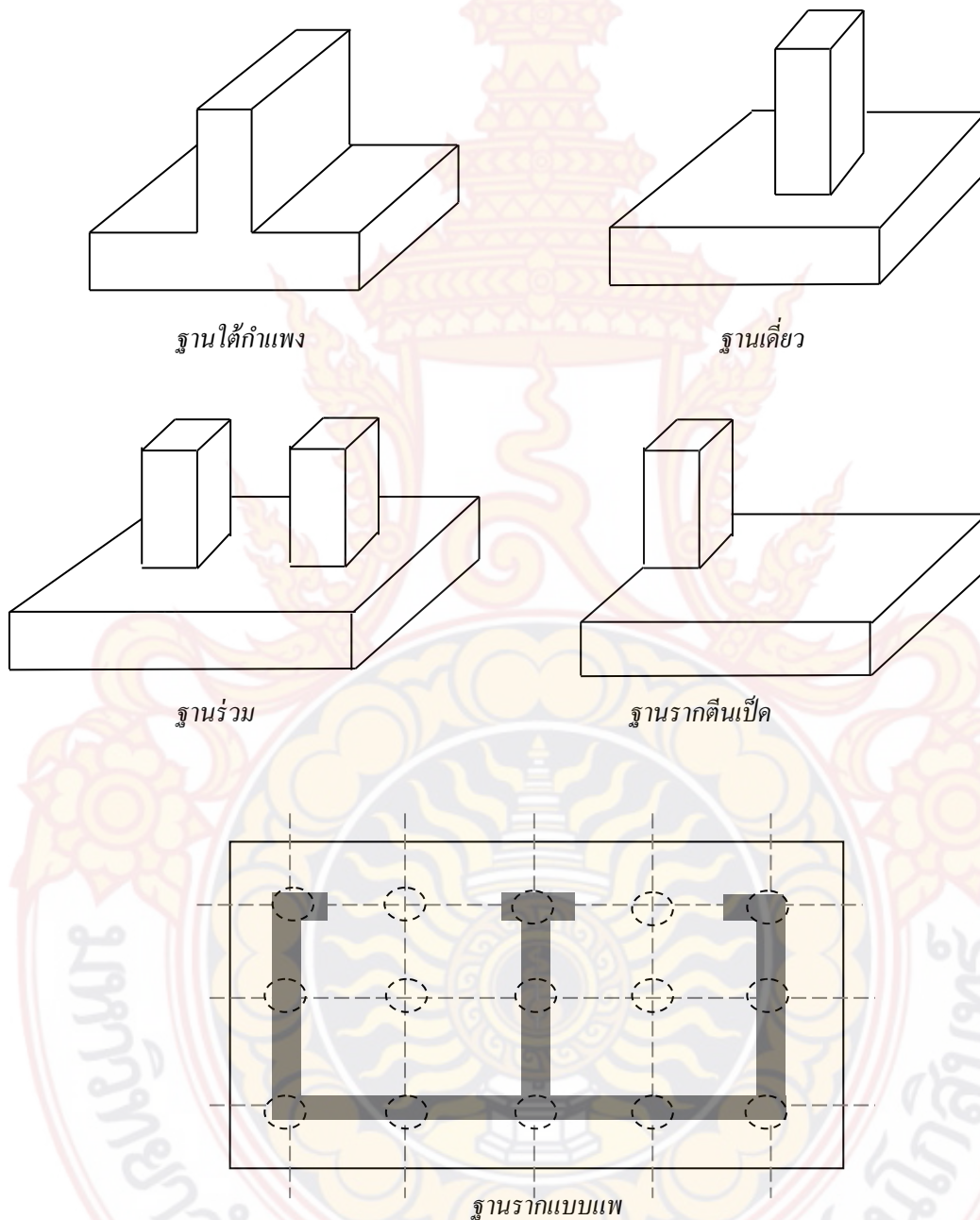
ฐานรากเป็นองค์อาคารที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากเสาหรือผนังของอาคารและถ่ายลงสู่ชั้นดิน โดยอาจถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินโดยตรงหรือถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินผ่านเสาเข็ม ดังนั้น ฐานรากจึงอาจแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ฐานรากแผ่วางบนดิน (Spread footing) ซึ่งจะต้องมีพื้นที่ใหญ่เพียงพอที่จะลดแรงดันดินใต้ฐานรากให้มีกำลังเพียงพอที่รับน้ำหนักได้ และฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม (Pile footing) ซึ่งเสาเข็มจะรับน้ำหนักจากฐานรากและถ่ายลงสู่ชั้นดินอีกทอดหนึ่ง โดยฐานรากอาจวางอยู่บนเสาเข็มสั้นซึ่งอาศัยหน่วยแรงฝืดของดินกับพื้นที่ผิวเสาเข็มในการรับน้ำหนัก หรือฐานรากที่วางบนเสาเข็มยาวปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินแข็งซึ่งใช้ทั้งหน่วยแรงฝืดของดินกับพื้นที่ผิวเสาเข็ม และแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มในการรับน้ำหนัก ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ประเภทของฐานราก

7.1 รูปแบบของฐานราก (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

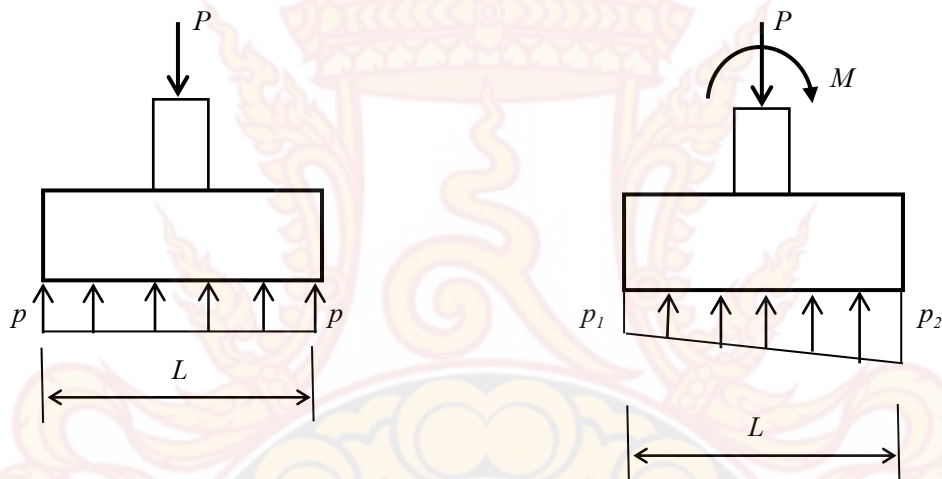
ฐานรากที่ใช้รองรับน้ำหนักอาคารมีหลายรูปแบบ เช่น ฐานรากใต้กำแพง ฐานรากเดี่ยว ฐานรากร่วม ฐานรากดินเปิด และฐานรากแบบแพ การออกแบบหรือการเลือกรูปแบบของฐานรากขึ้นอยู่กับการใช้งาน น้ำหนักบรรทุก ตำแหน่งเสา และขอบเขตที่ดิน เป็นต้น รูปแบบของฐานรากแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 รูปแบบของฐานราก

7.2 ฐานรากแผ่วางบนดิน

ฐานรากแผ่วางบนดินเป็นองค์อาคารที่ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินโดยตรง เมื่อน้ำหนักอาคารส่งผ่านเสาตอม่อ หรือผนังกำแพงคอนกรีตลงสู่ฐานราก จะเกิดแรงปฏิกิริยาซึ่งก็คือแรงดันดินใต้ฐานราก หรือที่เรียกว่าแรงแบกทานของดิน (Bearing pressure) และโดยทั่วไปจะสมมติให้แรงดันดินกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอ โดยถือว่าดินใต้ฐานรากเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogenous elastic materials) จึงไม่คำนึงถึงชนิดของดินใต้ฐานราก อย่างไรก็ตาม การแผ่กระจายของแรงดันดินใต้ฐานรากยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำ กรณีแรงรวมศูนย์ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงตามแนวแกน แรงดันดินใต้ฐานรากแผ่กระจายแบบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 7.3 (ก) และกรณีแรงเอียงศูนย์ที่ทำให้เกิดทั้งแรงตามแนวแกนและโมเมนต์คดคร่อมกัน การแผ่กระจายของแรงดันดินใต้ฐานราก ดังรูปที่ 7.3 (ข)



$$p = \frac{P}{A_F} = \frac{P}{B \times L}$$

(ก)

$$p_1 = \frac{P}{B \times L} - \frac{6M}{B \times L^2}$$

$$p_2 = \frac{P}{B \times L} + \frac{6M}{B \times L^2}$$

(ข)

เมื่อ p : แรงดันดินใต้ฐานราก

P : น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับฐานราก

A_F : พื้นที่ของฐานราก

M : โมเมนต์คดคร่อมที่กระทำกับฐานราก

B, L : ความกว้างและความยาวของฐานราก

รูปที่ 7.3 การแผ่กระจายของแรงดันดินใต้ฐานราก

การออกแบบฐานรากวางบนดิน ชั้นดินจะต้องมีคุณสมบัติที่ดีสามารถรับกำลังได้สูง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชนบทที่เป็นดินแข็งหรือดินลูกรัง และขนาดของฐานรากจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะช่วยกำลังแบกทานของดินเพื่อป้องกันมิให้ดินเกิดการวิบัติ โดยอาศัยหลักการออกแบบ คือ **แรงดันดินใต้ฐานรากจะต้องไม่เกินกว่ากำลังแบกทานของดิน หรือไม่เกินกว่าหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้** พ.ร.บ. กรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2522 (กฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527) กำหนดว่า ถ้าไม่มีเอกสารแสดงผลการทดลองที่รับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้ ให้ใช้กำลังแบกทานของดิน ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 กำลังแบกทานของดิน ตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร ปี พ.ศ. 2522

ประเภทของดิน	กำลังแบกทานของดิน (ตัน/ม. ²)
ดินอ่อนหรือดินถมไว้แน่นตัวเต็มที่	2
ดินแน่นปานกลาง หรือทรายร่วน	5
ดินแน่น หรือทรายหยาบ	10
กรวด หรือดินดาน	20
หินดินดาน	25
หินปูน หรือหินทราย	30
หินอัคนีที่ยังไม่แปรสภาพ	100

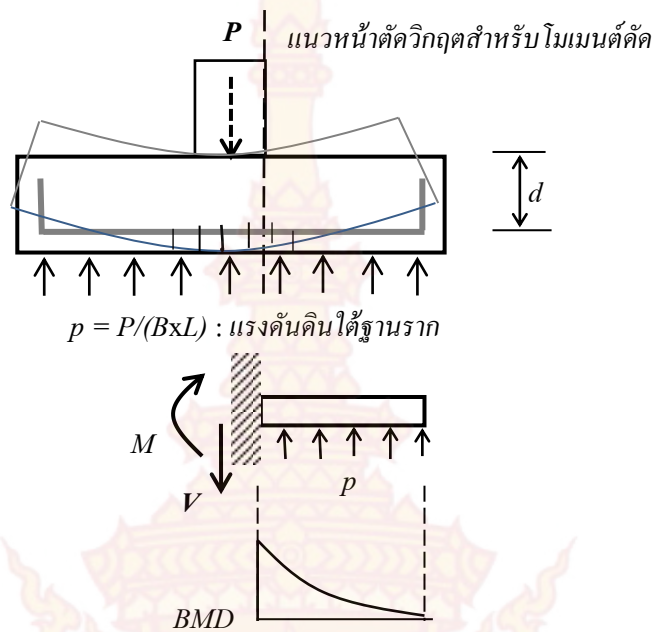
7.2.1 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากแผ่วางบนดิน แรงดันดินใต้ฐานรากส่งผลให้เกิดแรงภายในฐานรากทั้งโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงยึดหยุ่น ดังนั้น ในการออกแบบฐานรากจึงต้องคำนึงถึงขนาดและความหนาที่เหมาะสมสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ

ก) โมเมนต์ดัด แรงดันดินใต้ฐานรากทำให้ฐานรากคดโค้งลักษณะคล้ายการโก่งตัวของคานที่ถูกแรงภายนอกกระทำ ซึ่งเป็นผลมาจากโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในฐานราก ดังรูปที่ 7.4 โดยค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ใช้คำนวณออกแบบฐานรากเดียวเกิดขึ้นที่ขอบเสาตอม่อ หรือแนวขอบผนังกำแพงคอนกรีต เรียกว่า เป็นแนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ดัดและแรงยึดหยุ่นในฐานราก เมื่อตัดเฉพาะส่วนแนวหน้าตัดวิกฤตดังกล่าวมาพิจารณาจะพบว่ามีลักษณะคล้ายคานยื่น โดยมีแรงดันดินใต้ฐานรากเป็นน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น การวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด (M) และแรงเฉือนสูงสุด (V) ที่เกิดในฐานรากจึงพิจารณาเหมือนคานยื่น ส่วนการออกแบบฐานรากจะเหมือนกับการออกแบบคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว โดยพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต้านทานโมเมนต์ดัดคำนวณจาก :

$$A_s = \frac{M}{f_s \cdot j d}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับการฝังยึดเพื่อต้านทานแรงยึดหยุ่นคำนวณจาก :

$$\sum o = \frac{V}{u \cdot j d}$$



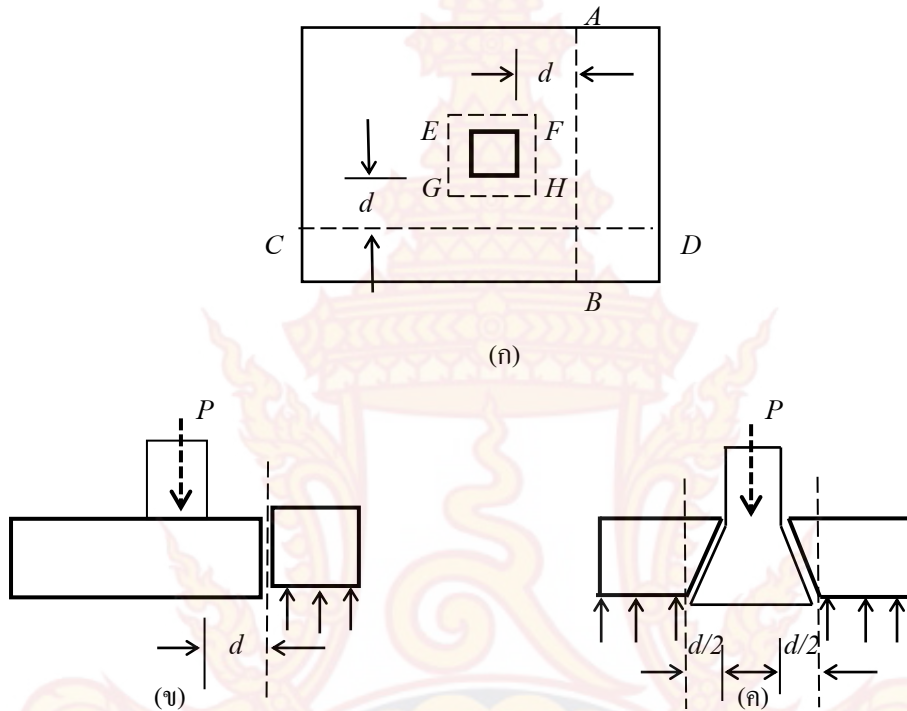
รูปที่ 7.4 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์คัตและแรงยึดหน่วย

ข) แรงเฉือน การวิบัติของฐานรากภายใต้แรงเฉือนมีโอกาสเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับพิจารณาแรงเฉือน ดังนี้คือ (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

1. **แรงเฉือนทางเดียว (One-way action)** เกิดจากการพิจารณาว่าฐานรากเป็นคาน การวิบัติเกิดจากแรงดึงที่ตำแหน่งห่างออกจากขอบเสาตอม่อเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของฐานราก (d) ซึ่งถือเป็นแนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบเดียวกับคาน โดยพิจารณาการวิบัติในแต่ละทิศทางทั้งด้านสั้นและด้านยาวของฐานรากในแนว AB และ CD ดังรูปที่ 7.5 (ก) และแสดงเป็นภาคตัดในรูปที่ 7.5 (ข) การป้องกันการวิบัติจะต้องออกแบบให้ฐานรากมีความลึกหรือความหนาที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือน ซึ่งสามารถทำได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : $v = \frac{V}{bd}$ ต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6301 กำหนดให้ไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.29\sqrt{f'c}$

2. **แรงเฉือนสองทาง (Two-way action)** เกิดจากการกระทำของแรงเฉือนในสองทิศทางพร้อมกัน โดยพิจารณาว่าฐานรากเป็นแผ่นพื้นรองรับเสาตอม่อซึ่งส่งถ่ายแรงลงฐานราก จึงเกิดการวิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching shear) มีลักษณะการวิบัติเป็นรูปทรงกรวยหรือรูปทรงปิรามิด ที่ตำแหน่งห่างออกจากขอบเสาตอม่อโดยรอบเป็นระยะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพของฐานราก ($d/2$) และถือเป็นแนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบทะลุ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ก) ในแนว EFGH และแสดงเป็นภาคตัดในรูปที่ 7.5 (ค) การป้องกันการวิบัติแบบเฉือนทะลุ จะต้องออกแบบให้ฐาน

รากมีความลึกหรือความหนาที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือน ซึ่งสามารถทำได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : $v = \frac{V}{bd}$ ต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6307 กำหนดให้ไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.53\sqrt{f_c'}$



รูปที่ 7.5 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือน (วินิต ช่อวิเชียร, 2545)

7.2.2 การเสริมเหล็กในฐานราก มาตรฐาน ว.ส.ท. 7304 กำหนดให้เสริมเหล็กต้านทานโมเมนต์คัต ดังนี้

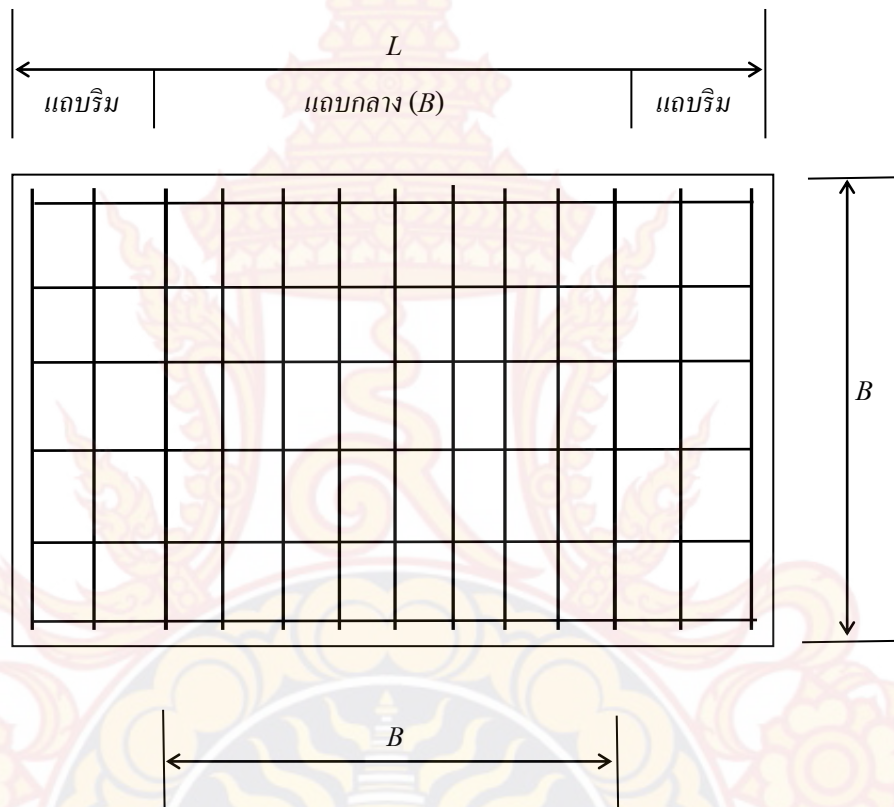
ก) ฐานรากที่เสริมเหล็กทางเดียว ต้องมีปริมาณเหล็กเสริมที่สามารถรับโมเมนต์คัตได้ไม่น้อยกว่าที่คำนวณได้ และต้องกระจายเหล็กเสริมให้สม่ำเสมอตลอดความกว้างของหน้าตัดนั้นๆ

ข) ฐานรากที่เสริมเหล็กสองทาง กรณีฐานรากเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ต้องกระจายเหล็กเสริมในแต่ละทิศทางให้สม่ำเสมอตลอดความกว้างของฐานรากนั้น และในกรณีที่ฐานรากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เหล็กเสริมในทิศทางยาวต้องกระจายสม่ำเสมอตลอดความกว้างทางด้านสั้น ขณะที่เหล็กเสริมในทิศทางสั้นที่คำนวณได้ทั้งหมดให้แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 7.6 โดยส่วนแรกต้องกระจายสม่ำเสมอบริเวณแถบกลางของฐานราก ความกว้างเท่ากับด้านสั้นของฐานราก (B) และพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมคำนวณจากสูตร :

$$A_s = \frac{2}{(S+1)} A_{s_B}$$

- เมื่อ A_s : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในแถบกลางความกว้างเท่ากับด้านสั้น (B)
 A_{s_B} : พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในทิศทางสั้นที่คำนวณได้ทั้งหมด
 S : อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของฐานราก

เหล็กเสริมส่วนที่เหลือให้แบ่งครึ่งเพื่อเสริมแถบริมทั้งสองข้าง โดยกระจายเหล็กเสริมแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 7.6 การเสริมเหล็กในฐานราก

7.2.3 แรงเฉือนและแรงยึดหน่วง มาตรฐาน ว.ศ.ท. 7305 ให้ใช้หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงยึดหน่วงที่ระนาบเดียวกับหน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ค้ด และเป็นแนวในการคำนวณแรงเฉือน เพื่อนำมาใช้หาค่าแรงยึดหน่วงซึ่งเกิดจากแรงค้ด และเหล็กเสริมรับแรงค้ดทั้งหมด ณ หน้าตัดใดๆ ต้องสามารถต้านทานแรงยึดหน่วงได้ไม่น้อยกว่าเกณฑ์กำหนดของแรงยึดหน่วงตามที่คำนวณได้จากแรงเฉือนภายนอก ณ หน้าตัดนั้น

7.2.4 ความหนาต่ำสุดของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรากแผ่วางบนดินหรือฐานรากที่ใช้เสาเข็มสั้นในดินอ่อน มาตรฐาน ว.ศ.ท. 7309 กำหนดความหนาของคอนกรีตที่อยู่เหนือเหล็กเสริมถึงขอบนอกของฐาน ต้องไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร และต้องไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร สำหรับฐานรากที่

ใช้เสาเข็มอื่น กรณีฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก ความหนาที่ขอบนอกของฐานต้องไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร และต้องไม่น้อยกว่า 35 เซนติเมตร จากหัวเสาเข็มสำหรับฐานรากที่ใช้เสาเข็มอื่น

7.2.5 การถ่ายหน่วยแรงที่ฐานของเสา การถ่ายหน่วยแรงหรือแรงต่างๆ จากเสาตอม่อ หรือผนัง กำแพงคอนกรีต ลงสู่ฐานรองรับ อาศัยกำลังรับแรงกดหรือแรงแบกทาน (Bearing) ของคอนกรีต ซึ่งกำลังรับแรงกดหรือแรงแบกทานที่ยอมให้ต่อเนื่องที่ทั้งหมดต้องไม่เกิน $0.25f_c'$ เมื่อรับน้ำหนักใช้งาน นอกจากนี้ ยังอาศัยเหล็กยื่นที่เสริมในเสา หรือใช้เหล็กเดือย (Dowels) ในการส่งถ่ายแรง โดยยื่นเหล็กยื่นของเสาเข้าไปในฐานราก กรณีใช้เหล็กเดือยต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่าสี่เส้น และมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเหล็กเสริมตามแกนไม่น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร ยื่นเข้าไปในเสา หรือตอม่อระยะไม่น้อยกว่าการต่อทาบเหล็กเสริมแกนเสา

7.3 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบฐานรากแผ่วางบนดิน

1. รวมน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับฐานราก และคำนวณหาขนาดของฐานราก โดยพิจารณาจากน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับฐานรากหารด้วยหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้ได้ฐานราก

2. คำนวณหาค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนสูงสุดที่แนวหน้าตัดวิกฤติ ขอบเสาตอม่อในแต่ละทิศทาง (กรณีฐานรากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า)

3. หาความหนาของฐานราก (t) โดยการคำนวณหาความลึกประสิทธิผลที่ต้องการ (d) จากสูตร :

$$d = \sqrt{\frac{M}{R.b}}$$

4. ตรวจสอบความหนาของฐานรากที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยการพิจารณาหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานรากต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ ที่ตำแหน่งแนวหน้าตัดวิกฤติสำหรับแรงเฉือนทั้ง 2 กรณี คือ แรงเฉือนทางเดียว (แบบคาน : $v_c = 0.29\sqrt{f_c'}$) และแรงเฉือนสองทาง (แบบทูลู : $v_c = 0.53\sqrt{f_c'}$)

5. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านทาน โมเมนต์คัตในแต่ละทิศทางจากสูตร :

$A_s = \frac{M}{f_s.jd}$ และคำนวณเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับการฝังยึดเพื่อต้านทานแรงยึด

หน้าจจากสูตร : $\sum o = \frac{V}{u.jd}$ เลือกขนาดของเหล็กเสริมและเขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 1 จงออกแบบฐานรากแผ่สี่เหลี่ยมจัตุรัส รับน้ำหนักจากเสาตอม่อ 22,500 กก. ขนาดเสาเท่ากับ 0.30x0.30 ม. ได้ฐานรากเป็นชั้นดินแน่นมีหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้เท่ากับ 10,000 กก./ม.²

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.²,

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

น้ำหนักจากเสาตอม่อ = 22,500 กก.

สมมติน้ำหนักฐานราก = 2,250 กก.

น้ำหนักรวม = 24,750 กก.

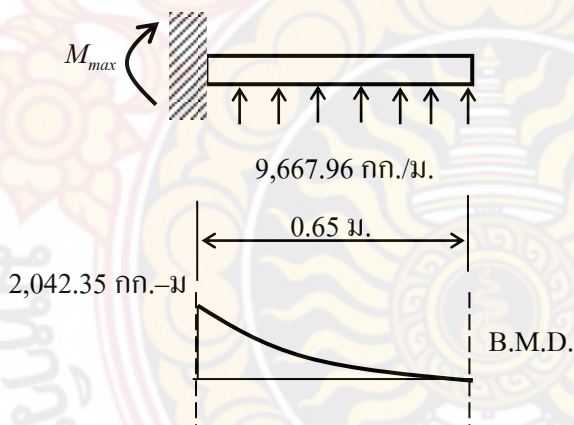
พื้นที่ฐานรากที่ต้องการ = $\frac{24,750}{10,000} = 2.475$ ม.²

เลือกใช้ขนาดฐานรากเท่ากับ 1.60x1.60 ม.

หน่วยแรงดันดิน = $\frac{24,750}{1.60 \times 1.60} = 9,667.96$ กก./ม.²

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$M_{max} = \frac{1}{2} wL^2 = \frac{1}{2} (9,667.96)(0.65)^2 = 2,042.35 \text{ กก.-ม}$$

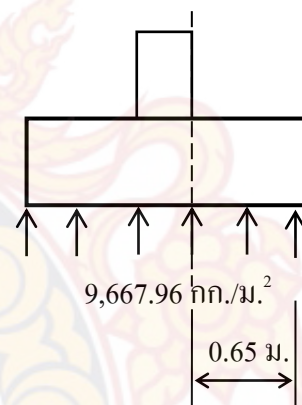
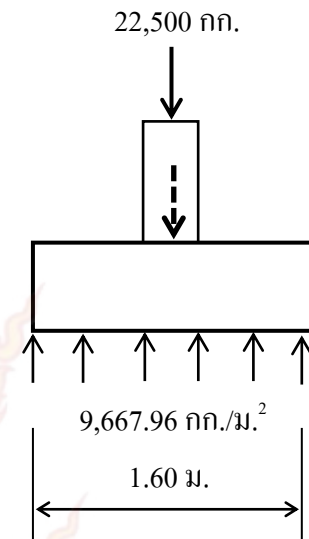


ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{2,042.35 \times 100}{10.99 \times 100}} = 13.63 \text{ ซม. ใช้ } d = 15.00 \text{ ซม.}$$



ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

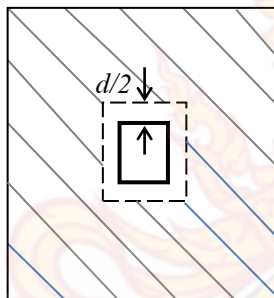
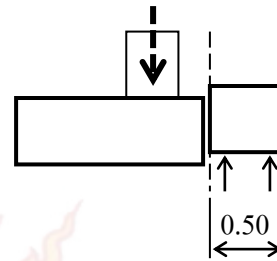
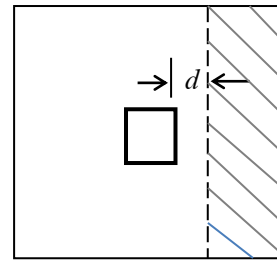
หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

$$v_c = 0.29\sqrt{fc'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ชม.}^2$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{1.60(0.65 - 0.15) \times 9,667.96}{(160)(15)}$$

$$= 3.22 \text{ กก./ชม.}^2 < v_c \quad \text{ใช้ได้}$$



หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบทะลุ : v_c

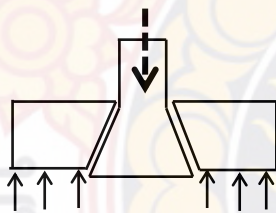
$$v_c = 0.53\sqrt{fc'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ชม.}^2$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{[(1.60)^2 - (0.45)^2] \times 9,667.96}{(180)(15)}$$

$$= 8.44 \text{ กก./ชม.}^2 > v_c$$

ใช้ไม่ได้ ต้องเพิ่มความหนาฐานราก



ความลึกประสิทธิผลของฐานรากที่ต้องการหาจากสูตร :

$$d = \frac{V}{v_c b} = \frac{22,792.21}{6.70(180)} = 18.89 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้ $d = 20.00$ ซม.

สรุปขนาดของฐานราก $1.60 \times 1.60 \times 0.30$ ม. ระยะ $d = 20.00$ ซม.

น้ำหนักฐานราก : $1.60 \times 1.60 \times 0.30 \times 2,400 = 1,843.2$ กก. $< 2,250$ กก. ใช้ได้

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : A_s

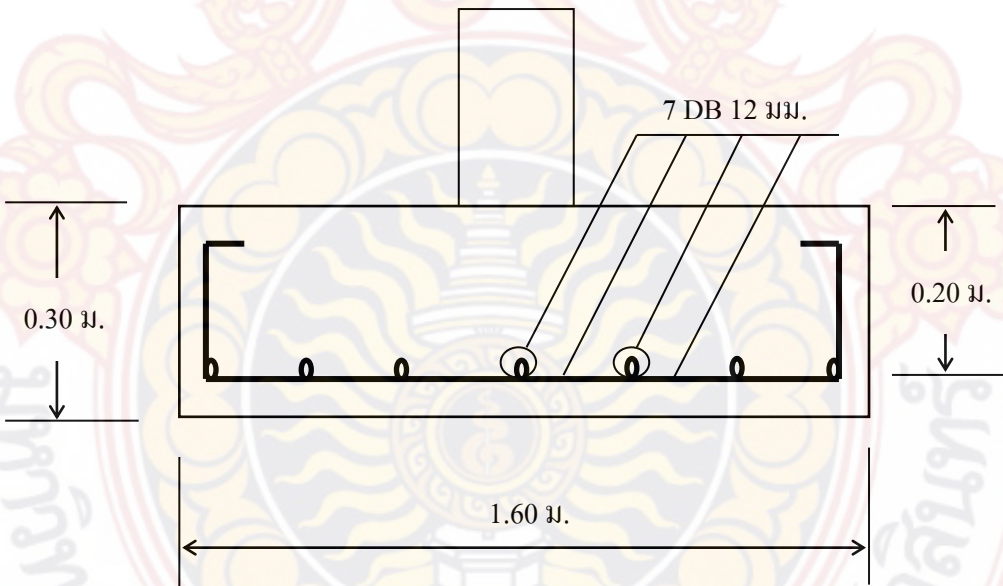
$$A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot j d} = \frac{2,042.35 \times 100}{1,500(0.885)20} \\ = 7.69 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 12} = 6.80 \text{ เส้น)}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการ : \sum_o

$$\sum_o = \frac{V}{u \cdot j d} = \frac{0.65 \times 1.60 \times 9,667.96}{34.04(0.885 \times 20)}, \quad u = \frac{3.23 \sqrt{f_c'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2 \\ = 16.68 \text{ ซม. (DB 12} = 4.42 \text{ เส้น)}$$

เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกับเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการ กรณีใดใช้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่ากัน ดังนั้น เลือกใช้เหล็กเสริม 7 DB 12 (เสริมสองทางเท่ากัน) $A_s = 7.91 \text{ ซม.}^2$, $\sum_o = 26.38 \text{ ซม.}$

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



ตัวอย่างที่ 2 จงออกแบบฐานรากแผ่สี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อรับน้ำหนักจากเสาต่อม่อ 34,000 กก. ขนาดเสาเท่ากับ 0.30x0.30 ม. ได้ฐานรากเป็นชั้นดินแน่นมีหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้เท่ากับ 10,000 กก./ม.²

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.²,

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

น้ำหนักจากเสาต่อม่อ = 34,000 กก.

สมมติน้ำหนักฐานราก = 3,400 กก.

น้ำหนักรวม = 37,400 กก.

พื้นที่ฐานรากที่ต้องการ = $\frac{37,400}{10,000} = 3.74$ ม.²

เลือกใช้ขนาดฐานรากเท่ากับ 1.80x2.20 ม.

หน่วยแรงดันดิน = $\frac{37,400}{1.80 \times 2.20} = 9,444.44$ กก./ม.²

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาต่อม่อ : M_{max}

ด้านสั้น (1.80 ม.)

$$M_{max} = \frac{1}{2} wL^2 = \frac{1}{2} (9,444.44)(0.75)^2 = 2,656.25 \text{ กก.-ม.}$$

ด้านยาว (2.20 ม.)

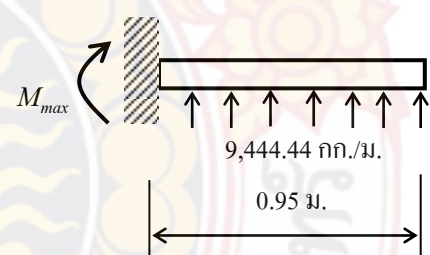
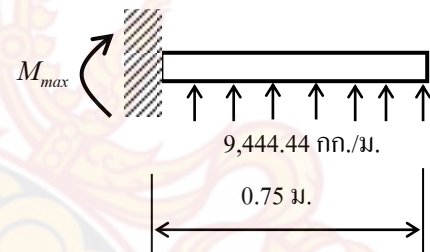
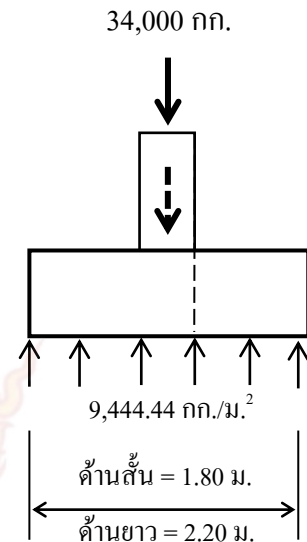
$$M_{max} = \frac{1}{2} wL^2 = \frac{1}{2} (9,444.44)(0.95)^2 = 4,261.80 \text{ กก.-ม.}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{4,261.80 \times 100}{10.99 \times 100}} = 19.69 \text{ ซม. ใช้ } d = 25.00 \text{ ซม.}$$



ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมรับให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

$$v_c = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นทางด้านสั้น: $v = \frac{V}{bd}$

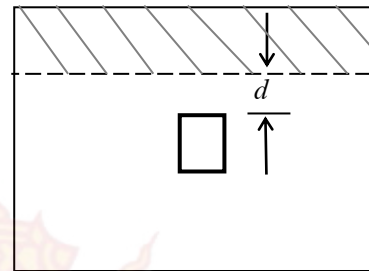
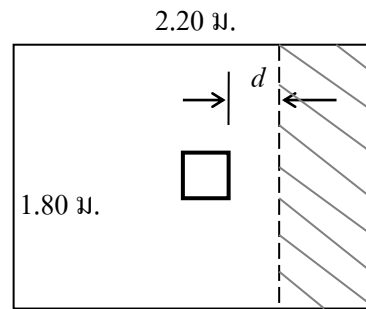
$$v = \frac{1.80(0.95 - 0.25) \times 9,444.44}{(180)(25)}$$

$$= 2.64 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c \text{ ใช้ได้}$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นทางด้านยาว: $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{2.20(0.75 - 0.25) \times 9,444.44}{(220)(25)}$$

$$= 1.88 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c \text{ ใช้ได้}$$



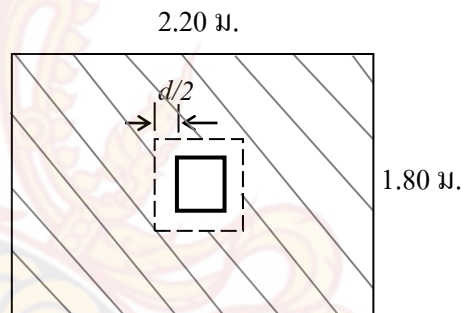
หน่วยแรงเฉือนที่ยอมรับให้ของคอนกรีตแบบทะลุ : v_c

$$v_c = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ซม.}^2$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{[(1.80 \times 2.20) - (0.55)^2] \times 9,444.44}{(4 \times 55)(25)}$$

$$= 6.28 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c \text{ ใช้ได้}$$



สรุปขนาดของฐานราก $1.80 \times 2.20 \times 0.35$ ม. ระยะ $d = 25.00$ ซม.

น้ำหนักฐานราก : $1.80 \times 2.20 \times 0.35 \times 2,400 = 3,326.4$ กก. < 3,400 กก. ใช้ได้

คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านยาว : As_L

$$As_L = \frac{M_{max}}{f_s \cdot jd} = \frac{4,261.80 \times 100}{1,500(0.885)25}$$

$$= 12.84 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 12} = 11.36 \text{ เส้น)}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการทางด้านยาว : $\sum o$

$$\sum o = \frac{V}{u \cdot jd} = \frac{0.95 \times 1.80 \times 9,444.44}{34.04(0.885 \times 25)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{f_c'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 21.44 \text{ ซม. (DB 12} = 5.68 \text{ เส้น)}$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางด้านยาววงกระจายแบบสม่ำเสมอทางด้านสั้นเท่ากับ 12 DB 12 : A_s
 $= 13.56 \text{ ซม.}^2$, $\sum o = 45.24 \text{ ซม.}$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านสั้น : A_{sB}

$$A_{sB} = \frac{M}{f_s \cdot jd} = \frac{2,656.25 \times 100}{1,500(0.885)25}$$

$$= 8.00 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 12 = 7.08 เส้น)}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการทางด้านสั้น : $\sum o$

$$\sum o = \frac{V}{u \cdot jd} = \frac{0.75 \times 2.20 \times 9,444.44}{34.04(0.885 \times 25)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{f_c'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 20.69 \text{ ซม. (DB 12 = 5.48 เส้น)}$$

ใช้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางด้านสั้นเท่ากับ $A_s = 8.00 \text{ ซม.}^2$ โดยแบ่งเป็นเหล็กเสริมด้านสั้น
 แถบกลางและแถบริม ดังนี้

เหล็กเสริมแถบกลาง

$$A_s = \frac{2}{S+1} (A_{sB}) = \frac{2}{\frac{2.20}{1.8} + 1} (8.00)$$

$$= 7.20 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ 7 DB 12 ($A_s = 7.91 \text{ ซม.}^2$)

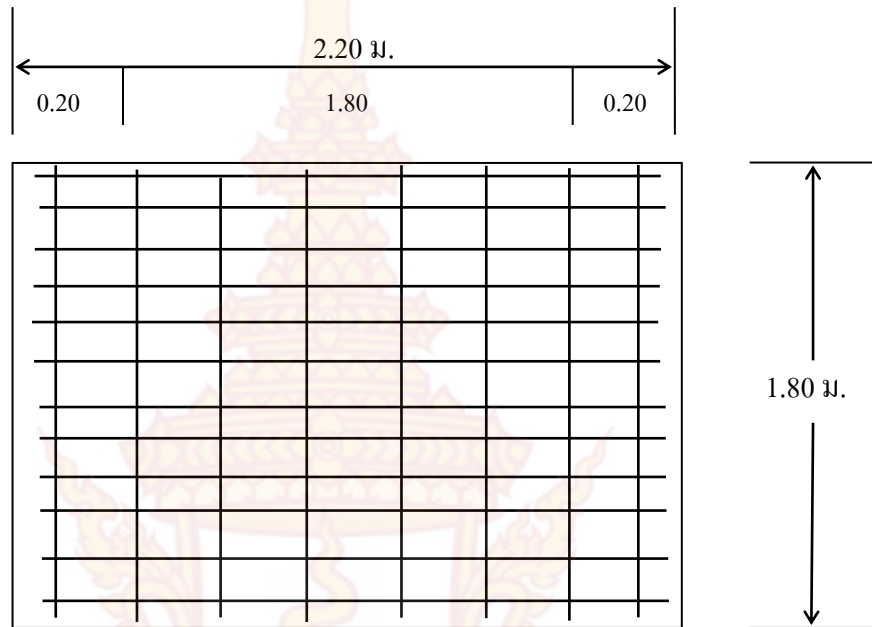
เหล็กเสริมแถบริมแถบละ

$$A_s = \frac{8.00 - 7.20}{2}$$

$$= 0.40 \text{ ซม.}^2$$

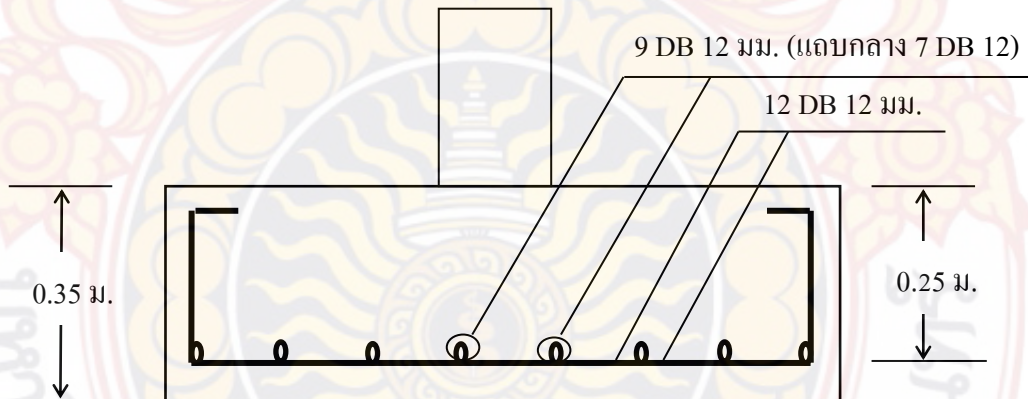
เลือกใช้ 1 DB 12 ($A_s = 1.13 \text{ ซม.}^2$)

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



ค้ำยาว : 12 DB 12

ค้ำสั้น : 9 DB 12 (แถบกลาง 7 DB 12)



ตัวอย่างที่ 3 จงออกแบบฐานรากแผ่รับน้ำหนักตามแกนเท่ากับ 22,500 กก. และโมเมนต์ดัด 2,000 กก.-ม. ได้ฐานรากเป็นชั้นดินแน่นมีหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้เท่ากับ 10,000 กก./ม.²

กำหนดให้ $fc' = 160$ กก./ซม.², $fy = 3,000$ กก./ซม.², ขนาดเสาตอม่อ : 0.30x0.30 ม.

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ น้ำหนักจากเสาตอม่อ = 22,500 กก.

สมมติน้ำหนักฐานราก = 4,500 กก.

น้ำหนักรวม = 27,000 กก.

พื้นที่ฐานรากที่ต้องการ = $\frac{27,000}{10,000} = 2.70$ ม.²

เลือกใช้ขนาดฐานรากเท่ากับ 2.0x2.0 ม.

(เพื่อขนาดฐานรากเพื่อรับ โมเมนต์ดัด)

หน่วยแรงดันดินข้างมาก : $p = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{BL^2}$

$$p = \frac{27,000}{(2.0 \times 2.0)} + \frac{6(2,000)}{(2.0 \times 2.0^2)}$$

$$= 8,250 \text{ กก./ม.}^2 < 10,000 \text{ กก./ม.}^2 \text{ ใช้ได้}$$

หน่วยแรงดันดินข้างน้อย : $p = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{BL^2}$

$$p = \frac{27,000}{(2.0 \times 2.0)} - \frac{6(2,000)}{(2.0 \times 2.0^2)}$$

$$= 5,250 \text{ กก./ม.}^2$$

หน่วยแรงดันดินที่ขอบเสาตอม่อ :

$$p = 5,250 + \frac{3,000}{2} (1.15) = 6,975 \text{ กก./ม.}^2$$

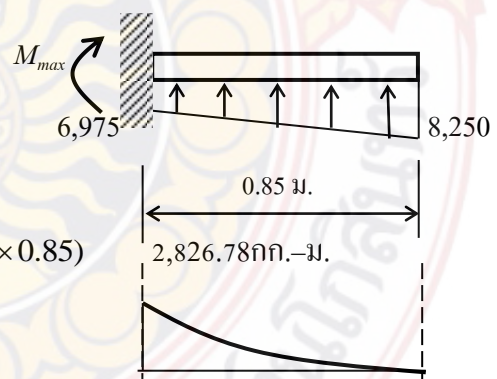
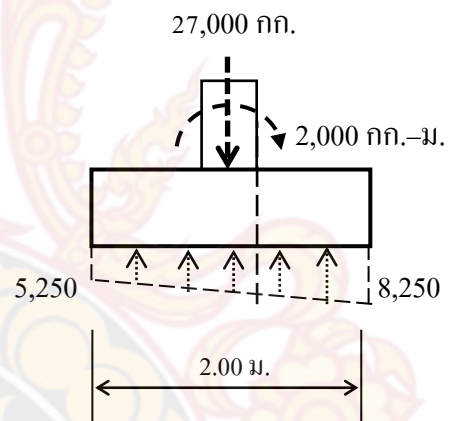
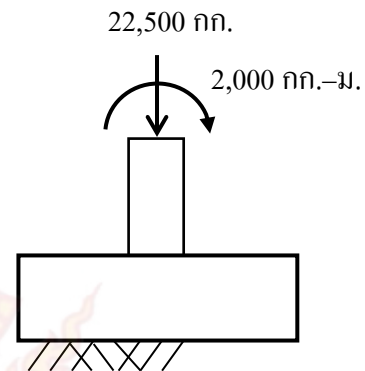
ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$M_{max} = \frac{1}{2} \times 6,975 \times 0.85^2 + \frac{1}{2} (1,275) 0.85 \left(\frac{2}{3} \times 0.85 \right)$$

$$= 2,826.78 \text{ กก.-ม.}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$



หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{\max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{2,826.78 \times 100}{10.99 \times 100}} = 16.03 \text{ ซม.} \quad \text{ใช้ } d = 20.00 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

$$v_c = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ ซม.}^2$$

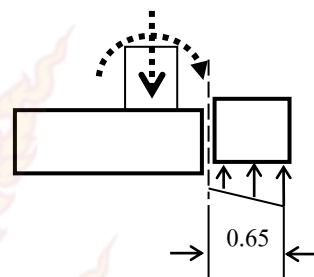
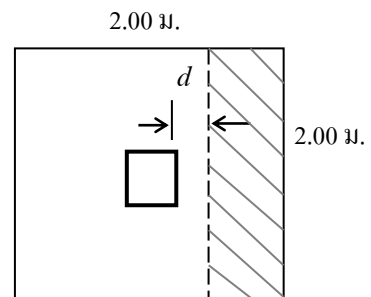
$$\text{หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : } v = \frac{V}{bd}$$

หน่วยแรงดันดินที่แนวหน้าตัดวิกฤต :

$$p = 5,250 + \frac{3,000}{2}(1.35) = 7,275 \text{ กก./ม.}^2$$

$$V = \frac{1}{2}(8,250 + 7,275) \times 2 \times 0.65 = 10,091.25 \text{ กก.}$$

$$v = \frac{10,091.25}{(200)(20)} = 2.52 \text{ กก./ ซม.}^2 < v_c \quad \text{ใช้ได้}$$



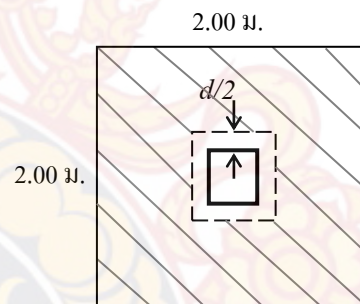
หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบทงู : v_c

$$v_c = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ ซม.}^2$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : } v = \frac{V}{bd}$$

$$V = \left(\frac{8,250 + 5,250}{2}\right) \times (2.0^2 - 0.5^2) = 25,312.50 \text{ กก.}$$

$$v = \frac{25,310.50}{(4 \times 50)(20)} = 6.32 \text{ กก./ ซม.}^2 < v_c \quad \text{ใช้ได้}$$



สรุปขนาดของฐานราก 2.00 x 2.00 x 0.30 ม. ระยะ $d = 20.00$ ซม.

น้ำหนักฐานราก : 2.00 x 2.00 x 0.30 x 2,400 = 2,880 กก. < 4,500 กก. ใช้ได้

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : A_s

$$A_s = \frac{M_{\max}}{f_s \cdot j d} = \frac{2,826.78 \times 100}{1,500(0.885)20} = 10.64 \text{ ซม.}^2 \quad (\text{DB 12} = 9.41 \text{ เส้น})$$

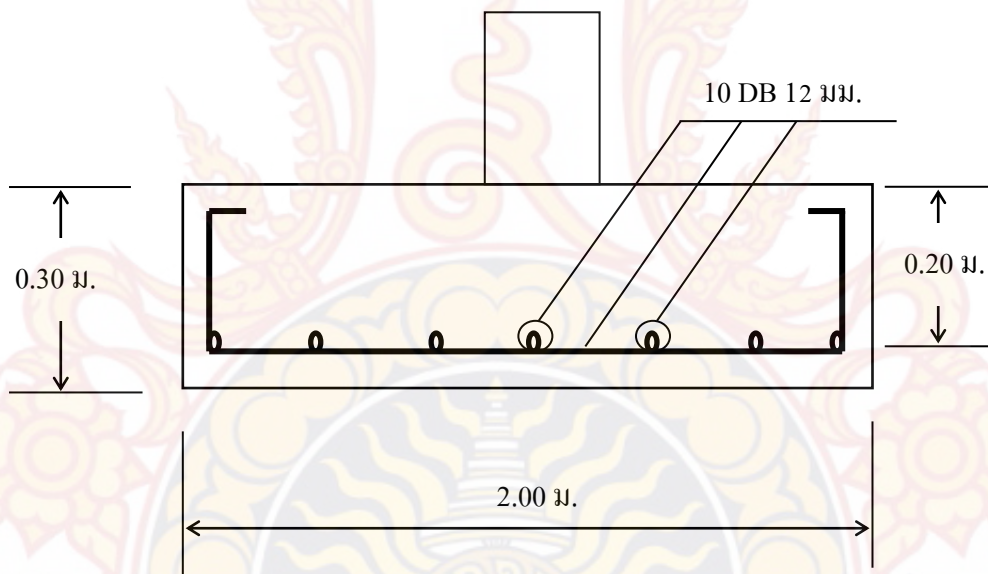
เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการ : \sum_o

$$\sum_o = \frac{V}{u \cdot jd} = \frac{\frac{1}{2}(8,250 + 6,975) \times 2.0 \times 0.85}{34.04(0.885 \times 20)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{fc'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 21.47 \text{ ซม. (DB 12 = 5.69 เส้น)}$$

เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกับเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการ กรณีใดใช้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่ากัน ดังนั้น เลือกใช้เหล็กเสริม 10 DB 12 (เสริมสองทางเท่ากัน) $A_s = 11.30 \text{ ซม.}^2$, $\sum_o = 37.69 \text{ ซม.}$

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



7.4 ฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม

ฐานรากของอาคารที่ตั้งอยู่ในบริเวณดินอ่อนจะอาศัยเสาเข็มเป็นตัวถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกลงไปได้ดิน โดยมักจะทำเป็นกลุ่มเสาเข็มแล้วใช้ฐานรากคอนกรีต หรือฐานแผ่หุ้มเสาเข็ม เพื่อทำหน้าที่กระจายน้ำหนักลงเสาเข็ม ลักษณะของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มจึงคล้ายกับฐานรากแผ่วางบนดินต่างกันเพียงแรงที่กระทำต่อฐานราก โดยฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มจะมีแรงกระทำเป็นจุดขณะที่ฐานรากแผ่วางบนดินมีแรงดันดินใต้ฐานรากกระจายต่อพื้นที่

7.4.1 เสาเข็ม การพิจารณาออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มจำเป็นต้องทราบถึงข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ของเสาเข็มเพื่อที่จะเลือกนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งปัจจุบันเสาเข็มมีมากมายหลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเสาเข็มที่นิยมใช้ในงานอาคารพักอาศัย ดังนี้

ก) เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เป็นเสาเข็มเสริมลวดแรงดึงสูง กระบวนการผลิตจะใช้เทคนิคการดึงลวดแล้วเทคอนกรีตลงในแบบ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วมีกำลังตามกำหนดจึงทำการตัดลวดรับแรงดึงเพื่อเพิ่มกำลังอัดในตัวเสาเข็ม และช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตด้วย เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมีรูปตัดหลายแบบ เช่น เสาเข็มรูปตัวไอ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเสาเข็มหกเหลี่ยมกลวง เป็นต้น บริษัทผู้ผลิตจะประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มเบื้องต้นจากขนาดหน้าตัดของเสาเข็มและคุณสมบัติของวัสดุเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้งาน ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

รหัส	รูปตัด	ขนาดเสาเข็ม	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^2)	เส้นรอบรูป (ซม.)	น้ำหนัก (กก./ม.)	น้ำหนัก ปลอดภัย (ตัน)
I-18		0.18x0.18x12.00–21.00 ม.	235	83	57	8 – 20
I-22		0.22x0.22x2@10.50 ม.	332	105	80	25 – 60
I-26		0.26x0.26x21.00–24.00 ม.	460	126	110	30 – 35
I-30		0.30x0.30x21.00–24.00 ม.	570	154	137	35 – 40
I-35		0.35x0.35x21.00–24.00 ม.	880	165	211	57
S-18		0.18x0.18x3@ 7.00 ม.	324	72	78	20 – 25
S-22		0.22x0.22x2@10.50 ม.	484	88	116	25 – 30
S-26		0.26x0.26x21.00–24.00 ม.	676	104	160	40 – 45
S-30		0.30x0.30x21.00–24.00 ม.	900	120	216	45 – 50
S-35		0.35x0.35x 21.00–24.00 ม.	1,225	140	294	60 – 80
Hp-15		0.15x0.15x4.00ม.				1.03
		0.15x0.15x5.00 ม.	138	50	33	1.35
		0.15x0.15x6.00 ม.				

ข) เสาค้ำเข็มเจาะ ใช้ในงานก่อสร้างที่มีพื้นที่จำกัดและบริเวณก่อสร้างติดอาคารข้างเคียง เพื่อลดปัญหาในการตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงลงดิน ซึ่งอาจกระทบกระเทือนทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงได้ สำหรับอาคารพักอาศัยทั่วไปนิยมใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ความยาวเสาเข็มเจาะ 20–30 เมตร เป็นระบบเจาะแบบแห้ง โดยขุดเจาะดินออกตามความลึกที่กำหนด ใส่เหล็กเสริม แล้วเทคอนกรีตจนเต็มหลุมเจาะ

โดยทั่วไปวิศวกรจะเป็นผู้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของเสาเข็ม ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดิน ตลอดจนทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานของเสาเข็มตามหลักวิชาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก เพื่อให้ได้ความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มอย่างแท้จริง ดังนั้น ความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับ 2 ส่วน ส่วนแรกก็คือเสาเข็มประกอบด้วยขนาดและคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม และส่วนที่สองคือคุณสมบัติของชั้นดินที่รองรับเสาเข็ม กรณีที่ฐานรากวางบนเสาเข็มสั้นจะอาศัยหน่วยแรงฝืดของดินกับพื้นที่ผิวของเสาเข็มในการรับน้ำหนัก ส่วนเสาเข็มยาวจะอาศัยทั้งหน่วยแรงฝืดของดินกับพื้นที่ผิวของเสาเข็มในการรับน้ำหนักและกำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็มซึ่งหยั่งบนชั้นดินแข็ง ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ.2522 กำหนดให้ใช้หน่วยแรงฝืดและกำลังแบกทานของดิน ดังนี้

ในกรณีไม่มีเอกสารผลทดสอบคุณสมบัติของดิน

1. สำหรับดินที่อยู่ในระดับลึกไม่เกิน 7.00 เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง ให้ใช้หน่วยแรงฝืดของดินได้ไม่เกิน 600 กก./ม.² ของพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็ม

2. สำหรับดินที่อยู่ในระดับลึกเกินกว่า 7.00 เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง ให้ใช้หน่วยแรงฝืดของดินเฉพาะส่วนที่ลึกเกินกว่า 7.00 เมตร ลงไปโดยคำนวณจากสมการ : หน่วยแรงฝืดเท่ากับ $800 + 200 L$ (L : ความยาวเสาเข็มส่วนที่เกิน 7.00 เมตร) และในการคำนวณหาลำกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยอาศัยหน่วยแรงฝืดของดิน ให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$P = f.p.L$$

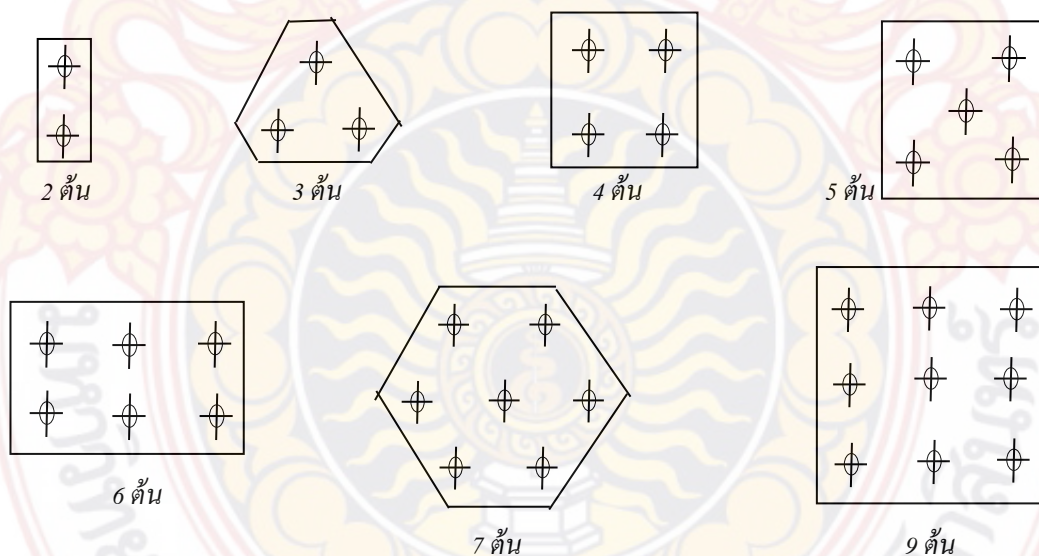
เมื่อ P : กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม, L : ความยาวของเสาเข็ม
 f : หน่วยแรงฝืดของดินที่ยอมให้, p : เส้นรอบรูปของเสาเข็ม

ในกรณีที่มีเอกสารผลทดสอบคุณสมบัติของดินหรือมีการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็ม ในบริเวณก่อสร้างหรือข้างเคียง ให้ใช้กำลังแบกทานของเสาเข็มไม่เกินอัตราต่อไปนี้

1. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานเสาเข็มที่คำนวณจากการทดสอบคุณสมบัติดิน
2. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานเสาเข็มที่คำนวณจากสูตรการตอกเสาเข็ม

3. ไม่เกินร้อยละ 50 ของกำลังแบกทานเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบกำลังแบกทานสูงสุด ทั้งนี้ ในการทดสอบกำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็ม ค่าทรุดตัวของเสาเข็มต้องไม่เกิน 0.25 มม. ต่อ น้ำหนักแบกทาน 1,000 กก. และเมื่อเอาน้ำหนักแบกทานออกหมดแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าทรุดตัวที่ปรากฏต้องไม่เกิน 6.00 มม.

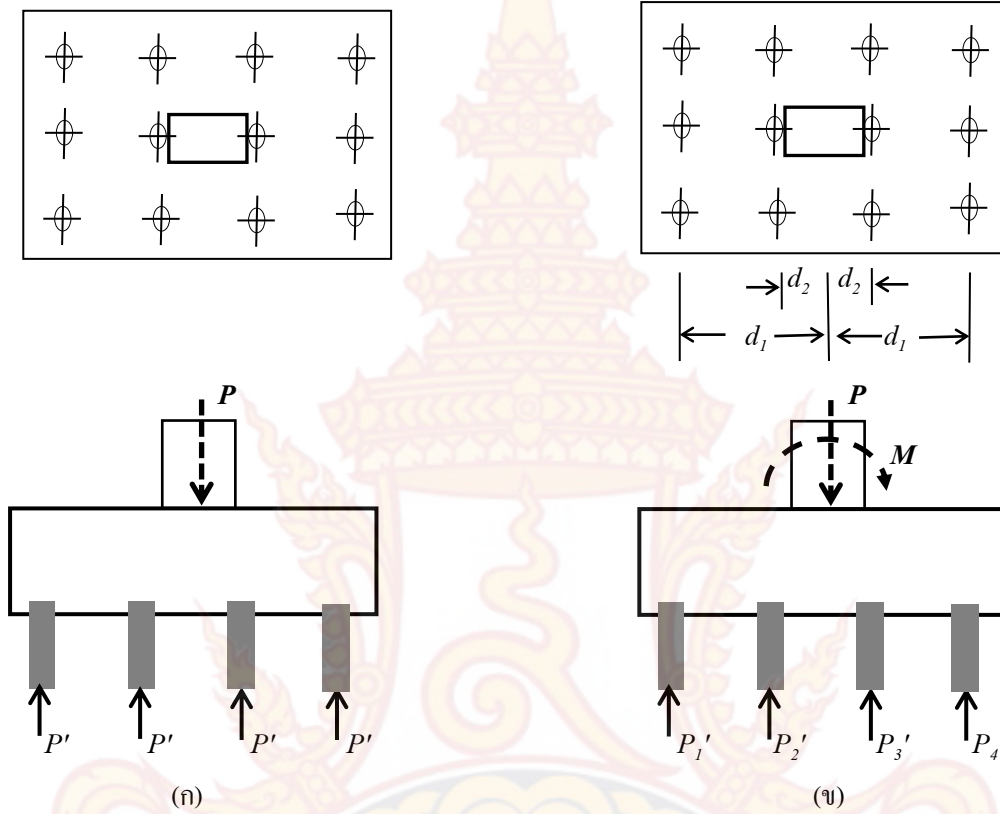
7.4.2 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม จำนวนเสาเข็มที่ใช้ในแต่ละฐานรากหาได้จาก น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานทั้งหมดที่ถ่ายลงสู่ฐานรากหารด้วยน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม ซึ่งปกติทั่วไปเสาเข็มมีตัวคูณค่าความปลอดภัย (Factor of safety) ไม่น้อยกว่า 2.5 โดยมีสมมติฐานในการออกแบบ คือ ให้เสาเข็มทุกต้นรับน้ำหนักเท่ากัน (Balance design method) จากการจัดวางเสาเข็มให้สมมาตรกัน สำหรับประเทศไทย นิยมจัดเรียงเสาเข็มให้มีระยะห่างอย่างน้อย 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ส่วนระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็มต้นริมถึงขอบฐานรากประมาณ 1 ถึง 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (สถาพร โภคา, 2544) เมื่อได้จำนวนเสาเข็มที่ใช้ในแต่ละฐานแล้ว จำนวนเสาเข็มจะเป็นตัวควบคุมรูปแบบหรือรูปทรงของฐานราก ตัวอย่างเช่น ฐานรากที่ใช้เสาเข็ม 2 ต้น จะมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ฐานรากที่ใช้เสาเข็ม 3 ต้น จะมีรูปทรงเป็นสามเหลี่ยมปลายตัด (หรือลักษณะหกเหลี่ยม) และฐานรากที่ใช้เสาเข็ม 4 ต้น จะมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นต้น รูปแบบหรือรูปทรงของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม แสดงในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 รูปแบบหรือรูปทรงของฐานรากจากการจัดวางกลุ่มเสาเข็มแบบสมมาตร

การกระจายน้ำหนักของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม กรณีเป็นฐานรากเดี่ยวรับน้ำหนักรวมศูนย์กลางเสาตอม่อเป็นแรงตามแนวแกนอย่างเดียว ก็คือน้ำหนักเฉลี่ยที่เสาเข็มแต่ละต้นรับมีลักษณะกระทำแบบ

เป็นจุดเท่ากันทุกต้น ดังรูปที่ 7.8 (ก) และกรณีที่มีแรงเยื้องศูนย์กลางกระทำส่งผลให้ฐานรากรับน้ำหนักตามแนวแกน (P) และ โมเมนต์ค้ด (M) การกระจายน้ำหนักในแต่ละแถวแสดงในรูปที่ 7.8 (ข)

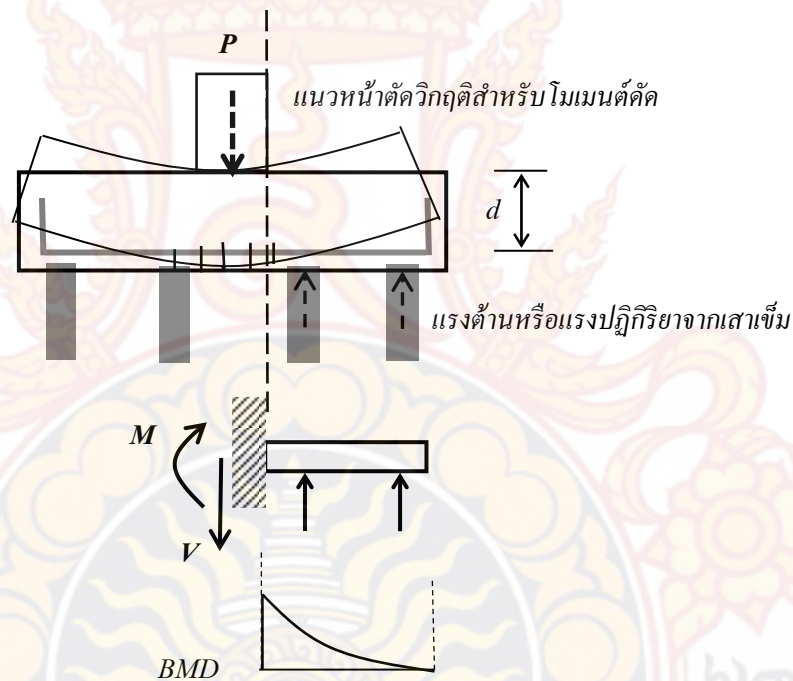


<p>กรณีแรงรวมศูนย์ : ฐานรากรับน้ำหนักตามแนวแกนอย่างเดียว (P)</p>	<p>กรณีแรงเยื้องศูนย์กลาง : ฐานรากรับน้ำหนักตามแนวแกน (P) และ โมเมนต์ค้ด (M)</p>
<p style="text-align: center;">$P' = \frac{P}{n} \leq R_a$</p> <p>เมื่อ P' : น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ P : น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำกับฐานราก n : จำนวนเสาเข็ม R_a : กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม</p>	<p style="text-align: center;">$P' = \frac{P}{n} \pm \frac{Mc}{I}$</p> <p>$P'_1 = \frac{P}{n} - \frac{Md_1}{\sum d_n^2}, \quad P'_2 = \frac{P}{n} - \frac{Md_2}{\sum d_n^2}$ $P'_3 = \frac{P}{n} + \frac{Md_2}{\sum d_n^2}, \quad P'_4 = \frac{P}{n} + \frac{Md_1}{\sum d_n^2}$</p> <p>เมื่อ d_n : ระยะห่างของเสาเข็มแต่ละต้นจากแกนศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม $\sum d_n^2 = 2[3(d_1)^2 + 3(d_2)^2]$</p>

รูปที่ 7.8 การกระจายน้ำหนักของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม

แรงจากเสาเข็มส่งผลให้เกิดแรงภายในฐานราก ทั้งโมเมนต์คัต แรงเฉือน และแรงยึดหยุ่น ดังนั้น ในการออกแบบฐานรากจึงต้องคำนึงถึงขนาดและความหนาที่เหมาะสมสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ

ก) โมเมนต์คัต ฐานรากเดี่ยววางแผ่นเสาเข็มมีแนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์คัต และแรงยึดหยุ่นที่ขอบเสาตอม่อหรือขอบผนังกำแพงคอนกรีต ดังนั้น การหาค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนสูงสุดพิจารณาจากรูปที่ 7.9 ซึ่งจะพบว่าแรงต้านจากเสาเข็มที่กระทำกับฐานรากมีลักษณะเป็นจุด ในส่วนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต้านทานโมเมนต์คัตคำนวณจาก : $A_s = \frac{M}{f_s \cdot jd}$ และเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับการฝังยึด เพื่อต้านทานแรงยึดหยุ่นซึ่งเกิดจากการคัตคำนวณจาก : $\sum o = \frac{V}{u \cdot jd}$ เป็นไปในลักษณะเดียวกับการออกแบบฐานรากแผ่วางบนดิน



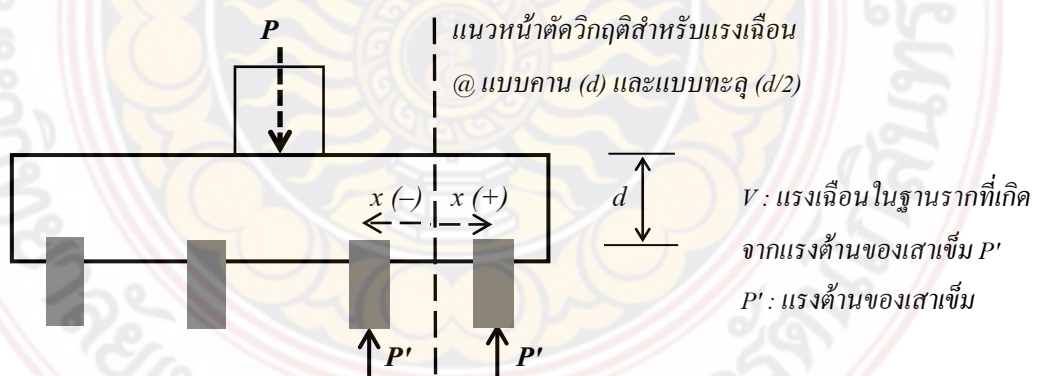
รูปที่ 7.9 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์คัตและแรงยึดหยุ่น

ข) แรงเฉือน แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนของฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มซึ่งเป็นแนวที่ทำให้ฐานรากเกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือนมีโอกาสดังกล่าวได้ 2 กรณี เช่นเดียวกับฐานรากแผ่วางบนดินดังกล่าวมาแล้ว คือ กรณีแรงเฉือนทางเดียว (One-way action) เกิดจากการพิจารณาว่าฐานรากเป็นคาน ซึ่งการวิบัติเกิดจากแรงดึงที่ตำแหน่งห่างออกจากขอบเสาตอม่อเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของฐานราก (d) โดยพิจารณาแรงเฉือนในแต่ละทิศทางทั้งด้านสั้นและด้านยาวของฐานราก

การป้องกันการวิบัติจะต้องออกแบบให้ฐานรากมีความลึกหรือความหนาที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือน ซึ่งสามารถทำได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : $v = \frac{V}{bd}$ ต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6301 กำหนดให้ไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.29\sqrt{fc'}$ และกรณีแรงเฉือนสองทาง (Two-way action) เกิดจากการกระทำของแรงเฉือนในสองทิศทางพร้อมกัน โดยพิจารณาว่าฐานรากเป็นแผ่นพื้นรองรับเสาตอม่อซึ่งส่งถ่ายแรงลงฐานราก จึงเกิดการวิบัติแบบเฉือนทะลุ (Punching shear) มีลักษณะการวิบัติเป็นรูปทรงกรวยหรือรูปทรงปิรามิด ที่ตำแหน่งห่างออกจากขอบเสาตอม่อโดยรอบเป็นระยะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผลของฐานราก ($d/2$) การป้องกันการวิบัติแบบเฉือนทะลุจะต้องออกแบบให้ฐานรากมีความลึกหรือความหนาที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงเฉือน ซึ่งสามารถทำได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : $v = \frac{V}{bd}$ ต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ มาตรฐาน ว.ส.ท. 6307 กำหนดให้ไม่เกินกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต : $v_c = 0.53\sqrt{fc'}$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแรงที่กระทำกับฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มมีลักษณะเป็นจุดกระจายอยู่บนฐานราก ในการหาแรงเฉือนที่หน้าตัดใดๆ มาตรฐาน ว.ส.ท. 7305 ให้พิจารณาดังนี้

1. แรงต้านทั้งหมดของเสาเข็มต้นใดก็ตามที่มีศูนย์กลางอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤตออกไปภายนอกตั้งแต่ 15 เซนติเมตร ขึ้นไป มีผลให้เกิดแรงเฉือนเต็มๆที่หน้าตัดนั้น
2. เสาเข็มที่มีศูนย์กลางอยู่ห่างจากหน้าตัดวิกฤตเข้ามาภายในตั้งแต่ 15 เซนติเมตร ขึ้นไป ให้ถือว่าไม่ทำให้เกิดแรงเฉือนที่หน้าตัดนั้น

3. กรณีที่ศูนย์กลางของเสาเข็มอยู่ในช่วงนี้ให้ใช้วิธีเทียบอัตราส่วนโดยตรง จากสมการ : $V = \frac{1}{30}(x+15)P'$ เมื่อ x คือระยะระหว่างแนวหน้าตัดวิกฤตกับศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 แนวหน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนและแรงเฉือนในฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม

7.4.3 การเสริมเหล็กฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ว.ส.ท. 7304 ลักษณะเดียวกับการเสริมเหล็กฐานรากแผ่วางบนดิน รายละเอียดในหัวข้อ 7.2.2 และข้อ 7.2.3 นอกจากนี้มาตรฐาน ว.ส.ท. 7309 กำหนดความหนาต่ำสุดของขอบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนที่อยู่เหนือเหล็กเสริมถึงขอบนอกของฐาน ต้องไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร สำหรับฐานรากที่ใช้เสาเข็มสั้นบนดินอ่อน และต้องไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร สำหรับฐานรากที่ใช้เสาเข็มอื่น

7.5 ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม

1. รวมน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับฐานราก เลือกขนาดเสาเข็มที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มต่อต้น แล้วคำนวณหาจำนวนเสาเข็มจากน้ำหนักทั้งหมดที่กระทำกับฐานรากหารด้วยกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม จัดวางเสาเข็มให้สมมาตรกันจะได้รูปแบบและขนาดของฐานราก

2. คำนวณค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนสูงสุดที่แนวหน้าตัดวิกฤตที่ขอบเสาตอม่อในแต่ละทิศทาง (กรณีฐานรากเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า)

3. หาความหนาของฐานราก (t) โดยการคำนวณหาความลึกประสิทธิผลที่ต้องการ (d) จากสูตร :

$$d = \sqrt{\frac{M}{R.b}}$$

4. ตรวจสอบความหนาของฐานรากที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยการพิจารณาหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานรากต้องน้อยกว่าหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ ที่ตำแหน่งแนวหน้าตัดวิกฤติสำหรับแรงเฉือนทั้ง 2 กรณี คือ แรงเฉือนทางเดียว (แบบคาน: $v_c = 0.29\sqrt{fc'}$) และแรงเฉือนสองทาง (แบบทงล: $v_c = 0.53\sqrt{fc'}$)

5. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมเพื่อต้านทานโมเมนต์คัตในแต่ละทิศทางจากสูตร :

$A_s = \frac{M}{f_s.jd}$ และคำนวณเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับการฝังยึดเพื่อต้านทานแรงยึด

หน้าจจากสูตร : $\sum o = \frac{V}{u.jd}$ เลือกขนาดของเหล็กเสริมและเขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตัวอย่างที่ 4 จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มรับน้ำหนักจากเสาตอม่อ 84,000 กก. ขนาดเสาเท่ากับ 0.40x0.40 ม. ใช้เสาเข็ม I-22 (ขนาด 0.22x0.22x21.00 เมตร) รับน้ำหนักปลอดภัย 25,000 กก./ต้น กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

น้ำหนักจากเสาตอม่อ = 84,000 กก.

สมมติน้ำหนักฐานราก = 8,400 กก.

น้ำหนักรวม = 92,400 กก.

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ = $\frac{92,400}{25,000} = 3.69$ ต้น

ใช้เสาเข็ม I-22 จำนวน 4 ต้น ระยะห่างระหว่าง

ศูนย์กลางเสาเข็มเท่ากับ 0.80 ม. และระยะห่างระหว่าง

ศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานรากเท่ากับ 0.25 ม. ดังนั้น

ขนาดฐานรากที่ใช้เท่ากับ 1.30 x 1.30 เมตร

น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ : $\frac{92,400}{4} = 23,100$ กก.

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$M_{max} = P'L = 2(23,100)0.20$$

$$= 9,240.00 \text{ กก.-ม}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

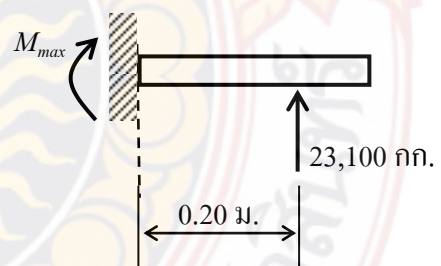
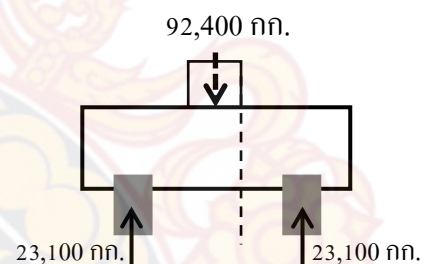
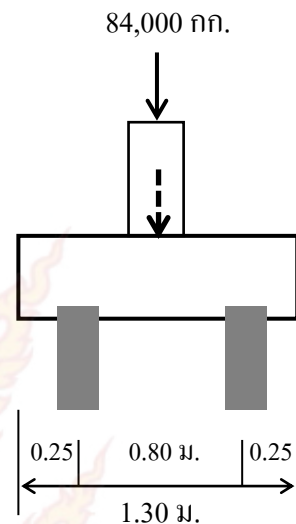
$$n = 11, \quad k = 0.345,$$

$$j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{9,240.00 \times 100}{10.99 \times 130}} = 25.43 \text{ ซม.}$$

$$\text{ใช้ } d = 30.00 \text{ ซม.}$$



ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

$$v_c = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ซม.}^2$$

ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

เข้ามาภายใน 10 ซม. ; $V = \frac{1}{30}(x+15)P$

$$V = \frac{1}{30}(-10+15)(23,100) = 3,850 \text{ กก.}$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{2 \times 3,850}{(130)(30)} = 1.97 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c \quad \text{ใช้ได้}$$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบทะลุ : v_c

$$v_c = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ซม.}^2$$

ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

ออกไปภายนอก 5 ซม. ; $V = \frac{1}{30}(x+15)P'$

$$V = \frac{1}{30}(5+15)(23,100) = 15,400 \text{ กก.}$$

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{4 \times 15,400}{(4 \times 70)(30)} = 7.33 \text{ กก./ซม.}^2 > v_c$$

ใช้ไม่ได้ ต้องเพิ่มความหนาฐานราก

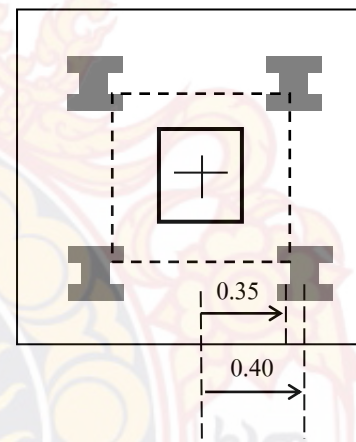
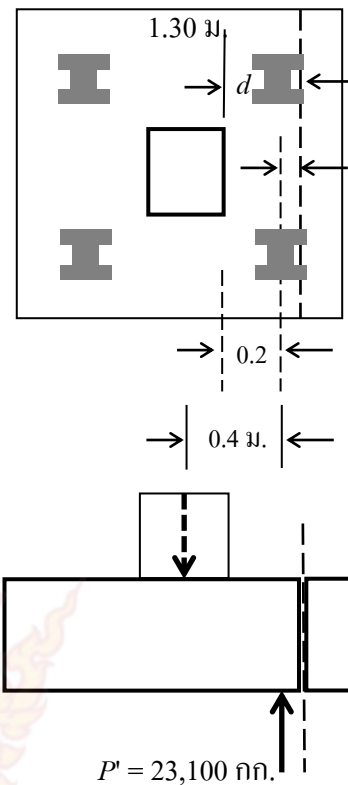
ความลึกประสิทธิผลของฐานรากที่ต้องการ โดยประมาณจากสูตร :

$$d = \frac{V}{v_c b} = \frac{4 \times 15,400}{6.70(4 \times 70)} = 32.83 \text{ ซม. ใช้ } d = 35.00 \text{ ซม.}$$

สรุปขนาดของฐานราก 1.30 x 1.30 x 0.45 ม. ระยะ $d = 35.00$ ซม.

น้ำหนักฐานราก : 1.30 x 1.30 x 0.45 x 2,400 = 1,825.2 กก. < 8,400 กก. ใช้ได้

น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ : $P' = \frac{84,000 + 1,825.2}{4} = 21,456.30 \text{ กก.}$



ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$\begin{aligned} M_{max} &= P'L = 2(21,456.30)0.20 \\ &= 8,582.52 \text{ กก.-ม} \end{aligned}$$

คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

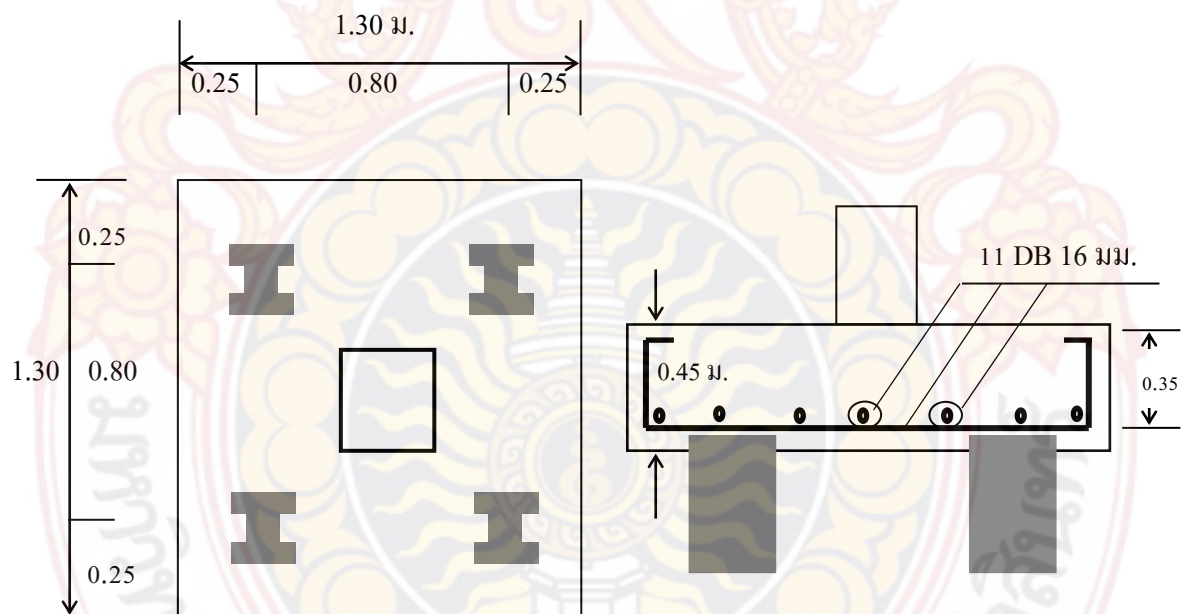
พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : A_s

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{M_{max}}{f_s \cdot j d} = \frac{8,582.52 \times 100}{1,500(0.885)35} \\ &= 18.47 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 16} = 9.18 \text{ เส้น)} \end{aligned}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการ : \sum_o

$$\begin{aligned} \sum_o &= \frac{V}{u \cdot j d} = \frac{2 \times 21,456.30}{25.53(0.885 \times 35)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{f_c'}}{d_b} = 25.53 \text{ กก./ซม.}^2 \\ &= 54.26 \text{ ซม. (DB 16} = 10.79 \text{ เส้น)} \end{aligned}$$

ดังนั้น วางเหล็กเสริมกระจายแบบสม่ำเสมอเท่าๆ กันทั้งสองด้าน จำนวน 11 DB 16 : $A_s = 22.11$ ซม.², $\sum_o = 55.29$ ซม.



ตัวอย่างที่ 5 จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มรับน้ำหนักจากเสาตอม่อ 135,000 กก. ขนาดเสาเท่ากับ 0.55x0.55 ม. ใช้เสาเข็ม I-22 (ขนาด 0.22x0.22x21.00 เมตร) รับน้ำหนักปลอดภัย 25,000 กก./ต้น กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.²

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

น้ำหนักจากเสาตอม่อ = 135,000 กก.

สมมติน้ำหนักฐานราก = 6,750 กก.

น้ำหนักรวม = 141,750 กก.

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ = $\frac{141,750}{25,000} = 5.67$ ต้น

ใช้เสาเข็ม I-22 จำนวน 6 ต้น ระยะห่างระหว่าง

ศูนย์กลางเสาเข็มเท่ากับ 0.80 ม. และระยะห่างระหว่าง

ศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานรากเท่ากับ 0.30 ม. ดังนั้น

เป็นฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับ 1.40 x 2.20 ม.

น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ = $\frac{141,750}{6} = 23,625$ กก.

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

ด้านสั้น (1.40 ม.)

$$M_{max} = P'L = 3(23,625)0.125$$

$$= 8,859.37 \text{ กก.-ม}$$

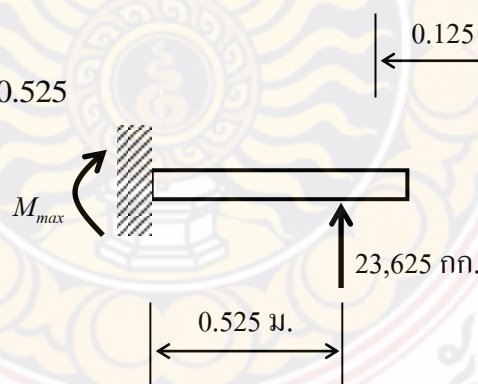
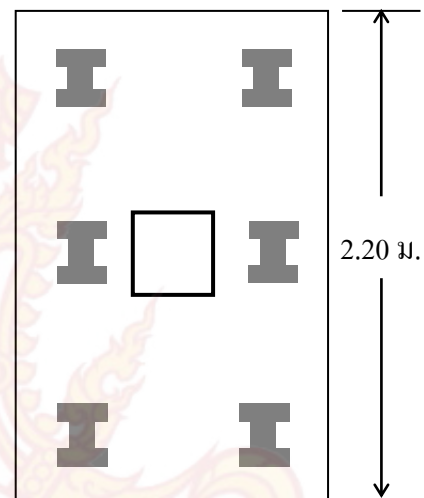
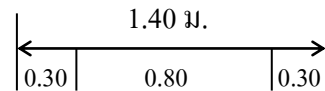
ด้านยาว (2.20 ม.)

$$M_{max} = P'L = 2(23,625)0.525$$

$$= 24,806.25 \text{ กก.-ม}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$



หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{\max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{24,806.25 \times 100}{10.99 \times 140}} = 40.15 \text{ ซม. ใช้ } d = 55.00 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

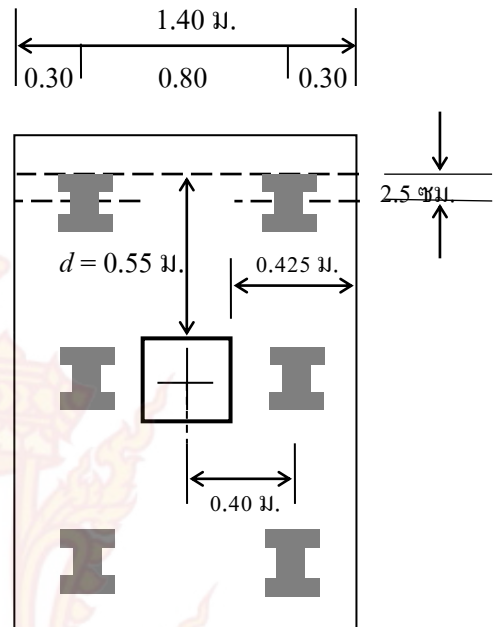
$$v_c = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ ซม.}^2$$

ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

เข้ามาภายใน 2.5 ซม. ; $V = \frac{1}{30}(x+15)P'$

$$V = \frac{1}{30}(-2.5+15)(23,625) = 9,843.75 \text{ กก.}$$

$$v = \frac{2 \times 9,843.75}{(140)(55)} = 2.55 \text{ กก./ ซม.}^2 < v_c \text{ ใช้ได้}$$



หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบทงู : v_c

$$v_c = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ ซม.}^2$$

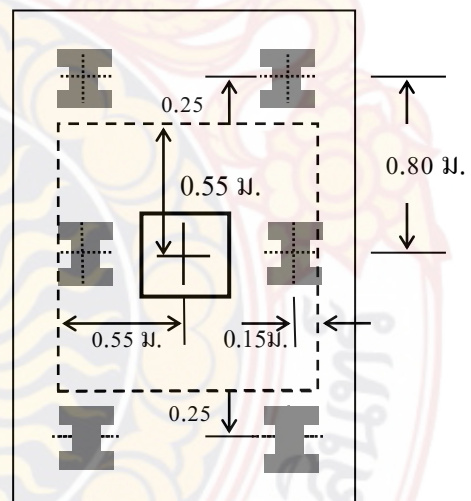
ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

ออกไปภายนอก 25 ซม. มีผลให้เกิดแรงเฉือนเต็ม

ที่หน้าตัดนั้น จำนวน 4 ต้น

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : $v = \frac{V}{bd}$

$$v = \frac{4 \times 23,625}{(4 \times 110)(55)} = 3.90 \text{ กก./ ซม.}^2 < v_c$$



สรุปขนาดของฐานราก 1.40 x 2.20 x 0.65 ม. ระยะ $d = 55.00$ ซม.

น้ำหนักฐานราก : 1.40 x 2.20 x 0.65 x 2,400 = 4,804.8 กก. < 6,750 กก. ใช้ได้

น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ : $P' = \frac{135,000 + 4,804.8}{6} = 23,300.80$ กก.

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

ด้านยาว (2.20 ม.) : $M_{max} = P'L = 2(23,300.8)0.525 = 24,465.84$ กก.-ม

ด้านสั้น (1.40 ม.) : $M_{max} = P'L = 3(23,300.8)0.125 = 8,737.80$ กก.-ม

คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านยาว : As_L

$$As_L = \frac{M_{max}}{fs.jd} = \frac{24,465.84 \times 100}{1,500(0.885)55}$$

$$= 33.50 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 20 = 10.66 เส้น)}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการทางด้านยาว : \sum_o

$$\sum_o = \frac{V}{u.jd} = \frac{2 \times 23,300.8}{20.42(0.885 \times 55)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{fc'}}{d_b} = 20.42 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 46.88 \text{ ซม. (DB 20 = 7.46 เส้น)}$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางด้านยาววางกระจายแบบสม่ำเสมอทางด้านสั้นเท่ากับ 11 DB 20 : As
 $= 34.55 \text{ ซม.}^2, \quad \sum_o = 69.11 \text{ ซม.}$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมด้านสั้น : As_B

$$As_B = \frac{M}{fs.jd} = \frac{8,737.8 \times 100}{1,500(0.885)55}$$

$$= 11.96 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 12 = 10.59 เส้น)}$$

เส้นรอบรูปที่ต้องการทางด้านสั้น : \sum_o

$$\sum_o = \frac{V}{u.jd} = \frac{3 \times 23,300.8}{34.04(0.885 \times 55)}, \quad u = \frac{3.23\sqrt{fc'}}{d_b} = 34.04 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$= 42.18 \text{ ซม. (DB 12 = 11.18 เส้น, } As = 12.64 \text{ ซม.}^2)$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางด้านสั้น : $As_B = 12.64 \text{ ซม.}^2$ โดยแบ่งเป็นเหล็กเสริมด้านสั้น
 แถบกลาง และแถบริม ดังนี้

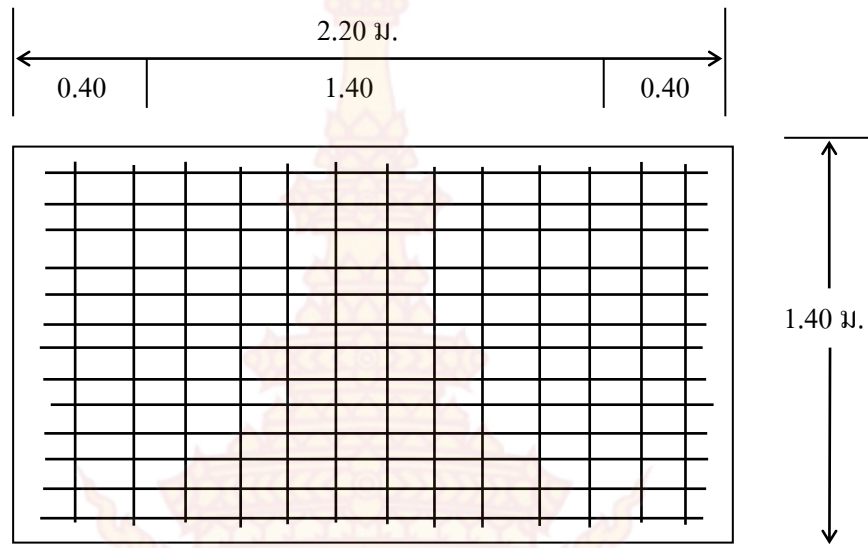
เหล็กเสริมแถบกลาง $As = \frac{2}{S+1}(As_B) = \frac{2}{\frac{2.20}{1.4} + 1}(12.64) = 9.83 \text{ ซม.}^2$

เลือกใช้ 9 DB 12 ($As = 10.17 \text{ ซม.}^2$)

เหล็กเสริมแถบริมแถบละ $As = \frac{12.64 - 9.83}{2} = 1.40 \text{ ซม.}^2$

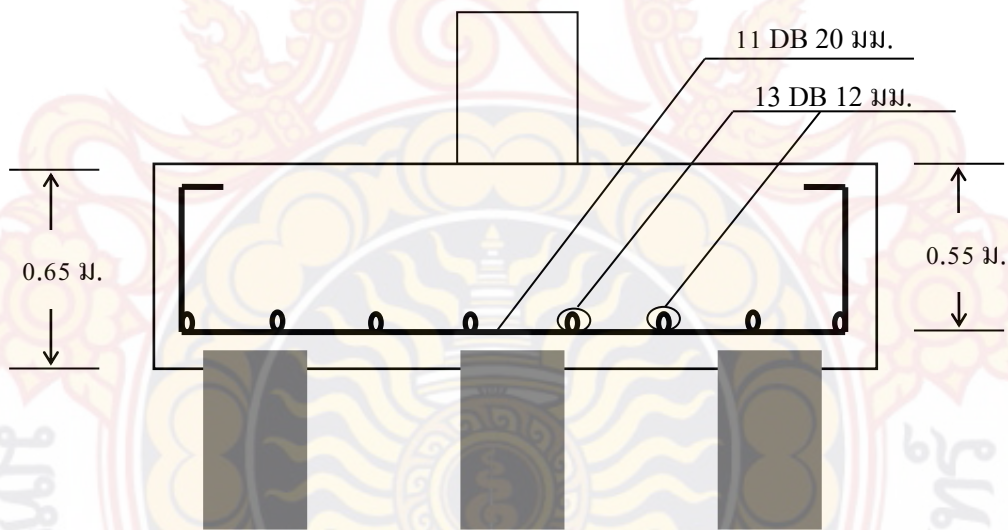
เลือกใช้ 2 DB 12 ($As = 2.26 \text{ ซม.}^2$)

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



ด้านยาว : 11 DB 20 มม.

ด้านสั้น : 13 DB 12 มม. (แถบกลาง 9 DB 12 มม.)



ตัวอย่างที่ 6 จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็มรับน้ำหนักจากเสาตามแนวแกน 96,000 กก. และ โมเมนต์ดัด 4,800 กก.-ม. ใช้เสาเข็ม I-22 (ขนาด 0.22x0.22x21.00 เมตร) รับน้ำหนักปลอดภัย 25,000 กก./ต้น

กำหนดให้ $f_c' = 160$ กก./ซม.², $f_y = 3,000$ กก./ซม.², ขนาดเสาตอม่อ : 0.50x0.50 ม.

ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

วิธีทำ

$$\text{น้ำหนักจากเสา} = 96,000 \text{ กก.}$$

$$\text{สมมติน้ำหนักฐานราก} = 6,720 \text{ กก.}$$

$$\text{น้ำหนักรวม} = 102,720 \text{ กก.}$$

$$\text{จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ} = \frac{102,720}{25,000} = 4.10 \text{ ต้น}$$

ใช้เสาเข็ม I-22 จำนวน 5 ต้น จัดวางระยะห่างเสาเข็ม

ดังรูป ขนาดฐานรากเท่ากับ 1.60 x 1.60 เมตร

น้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มรับ :

$$P' = \frac{102,720}{5} + \frac{4,800(0.50)}{4 \times (0.50)^2} = 22,944 \text{ กก.} < 25,000 \text{ กก.} \text{ ใช้ได้}$$

น้ำหนักสุทธิที่เสาเข็มแต่ละแฉกรับ :

$$P'_1 = \frac{102,720}{5} - \frac{4,800(0.50)}{4 \times (0.50)^2} = 18,144 \text{ กก.}$$

$$P'_2 = \frac{102,720}{5} = 20,544 \text{ กก.}$$

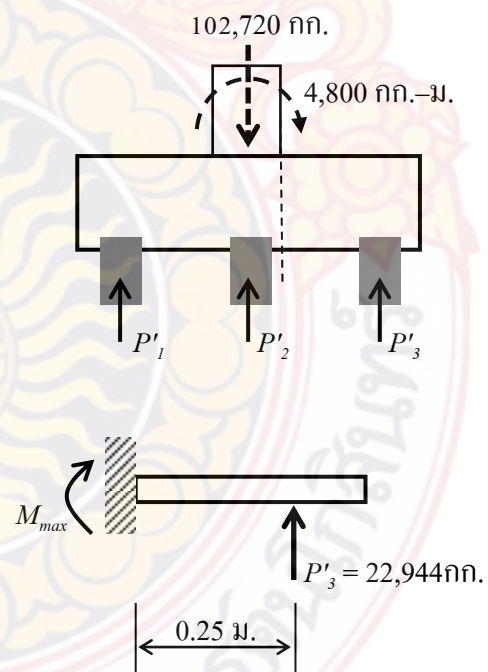
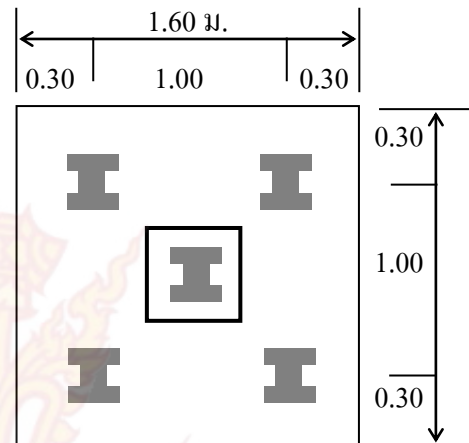
$$P'_3 = \frac{102,720}{5} + \frac{4,800(0.50)}{4 \times (0.50)^2} = 22,944 \text{ กก.}$$

ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$M_{max} = P'L = 2(22,944)0.25 = 11,472 \text{ กก.-ม}$$

ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ

$$n = 11, \quad k = 0.345, \quad j = 0.885, \quad R = 10.99 \text{ กก./ซม.}^2$$



หาความลึกประสิทธิภาพของฐานรากที่ต้องการ : d

$$d = \sqrt{\frac{M_{\max}}{Rb}} = \sqrt{\frac{11,472 \times 100}{10.99 \times 160}} = 25.54 \text{ ซม. ใช้ } d = 35.00 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฐานราก : v

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบคาน : v_c

$$v_c = 0.29\sqrt{f_c'} = 0.29\sqrt{160} = 3.66 \text{ กก./ซม.}^2$$

ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

$$\text{เข้ามาภายใน } 10 \text{ ซม. ; } V = \frac{1}{30}(x+15)P'$$

$$V = \frac{1}{30}(-10+15)(22,944) = 3,824 \text{ กก.}$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : } v = \frac{V}{bd}$$

$$v = \frac{2 \times 3,824}{(160)(35)} = 1.36 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c$$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีตแบบทงลุ : v_c

$$v_c = 0.53\sqrt{f_c'} = 0.53\sqrt{160} = 6.70 \text{ กก./ซม.}^2$$

ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากแนวหน้าตัดวิกฤต

$$\text{ออกไปภายนอก } 7.5 \text{ ซม. ; } V = \frac{1}{30}(x+15)P'$$

$$V = \frac{1}{30}(7.5+15)(20,544) = 15,408 \text{ กก.}$$

$$\text{หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น : } v = \frac{V}{bd}$$

$$v = \frac{4 \times 15,408}{(4 \times 85)(35)} = 5.17 \text{ กก./ซม.}^2 < v_c$$

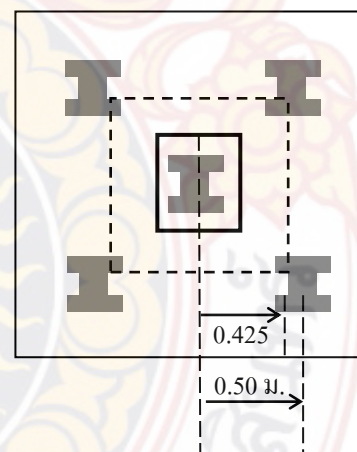
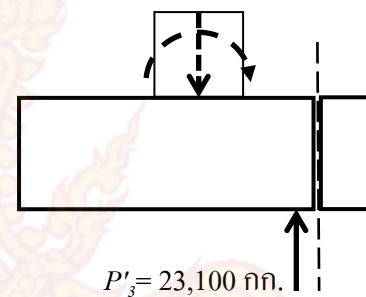
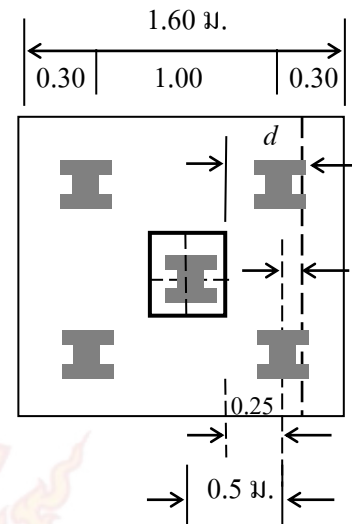
สรุปขนาดของฐานราก $1.60 \times 1.60 \times 0.45 \text{ ม.}$ ระยะ $d = 35.00 \text{ ซม.}$

น้ำหนักฐานราก : $1.60 \times 1.60 \times 0.45 \times 2,400 = 2,764.8 \text{ กก.} < 6720 \text{ กก.}$ ใช้ได้

ตรวจสอบน้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มรับ :

$$P'_3 = \frac{96,000 + 2,764.8}{5} + \frac{4,800(0.50)}{4 \times (0.50)^2} = 22,152.96 \text{ กก.}$$

ใช้ได้



ค่าโมเมนต์สูงสุดที่ขอบเสาตอม่อ : M_{max}

$$\begin{aligned} M_{max} &= P'L = 2(22,152.96)0.25 \\ &= 11,076.48 \text{ กก.-ม} \end{aligned}$$

คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม : A_s

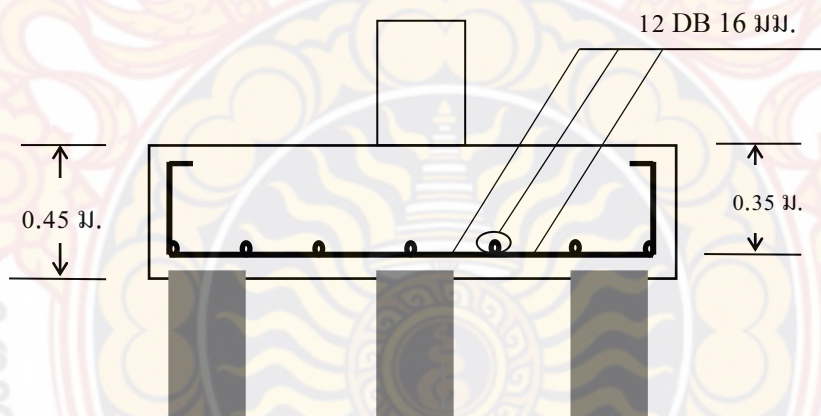
$$\begin{aligned} A_s &= \frac{M_{max}}{f_s \cdot j \cdot d} = \frac{11,076.48 \times 100}{1,500(0.885)35} \\ &= 23.83 \text{ ซม.}^2 \text{ (DB 16} = 11.86 \text{ เส้น)} \end{aligned}$$

เส้นรอบรูปของเหล็กเสริมที่ต้องการทางด้านยาว : \sum_o

$$\begin{aligned} \sum_o &= \frac{V}{u \cdot j \cdot d} = \frac{2 \times 22,152.96}{25.53(0.885 \times 35)}, \quad u = \frac{3.23 \sqrt{f_c'}}{d_b} = 25.53 \text{ กก./ซม.}^2 \\ &= 56.02 \text{ ซม. (DB 16} = 11.14 \text{ เส้น)} \end{aligned}$$

ดังนั้น วางเหล็กเสริมกระจายแบบสม่ำเสมอเท่ากันๆ ทั้งสองด้านจำนวน 12 DB 16 : $A_s = 24.12$ ซม.², $\sum_o = 60.31$ ซม.

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



แบบฝึกหัด

1. จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนดิน รับน้ำหนักตามแนวแกนจากเสาตอม่อ 15,000 กก. ขนาดเสาตอม่อ 0.20x0.20 ม. ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

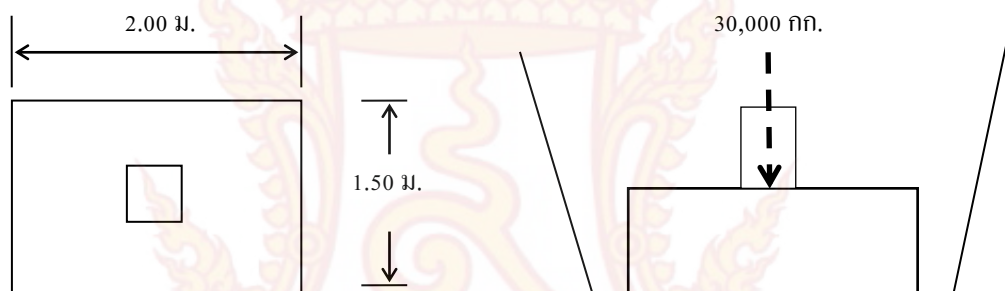
$$\text{กำหนดให้ } f_c' = 210 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{หน่วยแรงดันดินที่ยอมให้ เท่ากับ } 8,000 \text{ กก./ม.}^2$$

2. จงออกแบบฐานรากแผ่สี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนดินรับน้ำหนักตามแนวแกนจากเสาตอม่อ 30,000 กก. (รวมน้ำหนักฐานราก) ขนาดเสาตอม่อ 0.25x0.25 ม. ดังรูป ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

$$\text{กำหนดให้ } f_c' = 180 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{หน่วยแรงดันดินที่ยอมให้เท่ากับ } 12,800 \text{ กก./ม.}^2$$



3. จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนดิน รับน้ำหนักตามแนวแกนจากเสาตอม่อ 28,000 กก. และโมเมนต์ดัดเท่ากับ 3,200 กก.-ม. ขนาดเสาตอม่อ 0.30x0.30 ม. ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

$$\text{กำหนดให้ } f_c' = 210 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{หน่วยแรงดันดินที่ยอมให้เท่ากับ } 10,000 \text{ กก./ม.}^2$$

4. จงออกแบบฐานรากแผ่วางบนเสาเข็ม รับน้ำหนักตามแนวแกนจากเสาตอม่อ 13,500 กก. ขนาดเสาตอม่อ 0.20x0.20 ม. ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

$$\text{กำหนดให้ } f_c' = 150 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้เสาเข็มหกเหลี่ยมกลวง}$$

$$\text{ขนาด } \phi 6 \text{ นิ้ว ยาว 6 เมตร รับน้ำหนักปลอดภัย } 1,710 \text{ กก./ต้น}$$

5. จงออกแบบฐานรากวางบนเสาเข็ม รับน้ำหนักตามแนวแกนจากเสาตอม่อ 125,000 กก. และโมเมนต์ดัดเท่ากับ 5,500 กก.-ม. ขนาดเสาตอม่อ 0.40x0.40 ม. ใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. ในการออกแบบ

$$\text{กำหนดให้ } f_c' = 250 \text{ กก./ซม.}^2 \quad f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง}$$

$$\text{I-0.30x0.30x21.00 ม. รับน้ำหนักปลอดภัย } 35,000 \text{ กก./ต้น}$$

บรรณานุกรม

- กฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522 หมวด 5 กำลั้งวัตถุ และ น้ำหนักบรรทุก
- คู่มือการทดสอบหิน ทราช และคอนกรีต บริษัท ผลิตภัณฑ์ และวัตถุก่อสร้าง จำกัด พิมพ์ครั้งที่ 5 พ.ศ. 2552
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร คอนกรีตเทคโนโลยี คอนกรีตผสมเสร็จจีแพค พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2536
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2540. คอนกรีตทรงกระบอกหรือรูปทรงลูกบาศก์ โยธาสาร ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 หน้า 20–21 .
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551. การเลือก การทดสอบ และความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีต รูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 3 หน้า 27–30.
- ชนพล เหล่าสมาธิกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551. สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน การประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 4 จังหวัด อุบลราชธานี MAT-95.
- มงคล จิรวีระเดช การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก พิมพ์ครั้งที่สี่ พ.ศ. 2549
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลม มอก. 20–2543 กระทรวงอุตสาหกรรม
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กข้ออ้อย มอก. 24–2548 กระทรวงอุตสาหกรรม
- วินิต ช่อวิเชียร การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2545
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรง ใช้งาน พ.ศ. 2534
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้าง คอนกรีต พ.ศ. 2546
- สถาพร โภคา การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีหน่วยแรงใช้งาน บริษัท ไลบราวีรนาย จำกัด พ.ศ. 2544

สาโรจน์ คำรังสีต และสุวิมล สัจจวานิชย์, 2550. ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยในลักษณะบดร่วมต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีต วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3 หน้า 489–499.

สาโรจน์ คำรังสีต, 2558. ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีต วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 หน้า 125–133.

สาโรจน์ คำรังสีต, 2559. การใช้แผ่นยางแทนการใช้กำมะถันในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 หน้า 106–113.

อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551. ผลกระทบของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อกำลังอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต การประชุมวิชาการคอนกรีต ครั้งที่ 4 จังหวัดอุบลราชธานี MAT-96.

American Concrete Institute Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318) 2005.

American Society for Testing and Materials, ASTM. Annual Book of ASTM Standard, 2001, Volume 4.01 and 4.02

Edward G. Nawy, Reinforced Concrete : A Fundamental Approach, 6th ed., Pearson International Edition, 2009.



ภาคผนวก



ตารางที่ ผ.1 รายละเอียดเหล็กเสริม : พื้นที่หน้าตัด และเส้นรอบรูป

ขนาด (มม.)	$\sum A$: ซม. ² $\sum o$: ซม.	จำนวนเส้นของเหล็กเสริม									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RB 6	$\sum A$	0.28	0.57	0.85	1.13	1.42	1.70	1.98	2.26	2.55	2.83
-	$\sum o$	1.89	3.77	5.66	7.54	9.43	11.32	13.20	15.09	16.97	18.86
RB 9	$\sum A$	0.64	1.27	1.91	2.54	3.18	3.82	4.45	5.09	5.72	6.36
-	$\sum o$	2.83	5.66	8.49	11.32	14.14	16.97	19.80	22.63	25.46	28.29
RB 12	$\sum A$	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.78	7.91	9.04	10.17	11.30
DB 12	$\sum o$	3.77	7.54	11.31	15.08	18.86	22.63	26.40	30.17	33.94	37.71
RB 15	$\sum A$	1.77	3.54	5.31	7.08	8.85	10.62	12.39	14.16	15.93	17.70
-	$\sum o$	4.71	9.43	14.14	18.86	23.57	28.28	33.00	37.71	42.43	47.14
-	$\sum A$	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.09	20.10
DB 16	$\sum o$	5.03	10.06	15.09	20.12	25.14	30.17	35.20	40.23	45.26	50.29
RB19	$\sum A$	2.84	5.68	8.52	11.36	14.20	17.04	19.88	22.72	25.56	28.40
-	$\sum o$	5.97	11.94	17.91	23.88	29.86	35.83	41.80	47.77	53.74	59.71
-	$\sum A$	3.14	6.28	9.42	12.56	15.70	18.84	21.98	25.12	28.26	31.40
DB 20	$\sum o$	6.29	12.58	18.87	25.16	31.45	37.74	44.03	50.32	56.61	62.90
RB 22	$\sum A$	3.80	7.60	11.40	15.20	19.00	22.80	26.60	30.40	34.20	38.00
-	$\sum o$	6.91	13.83	20.74	27.66	34.57	41.48	48.40	55.31	62.23	69.14
RB 25	$\sum A$	4.91	9.82	14.73	19.54	24.55	29.46	34.37	39.28	44.19	49.10
DB 25	$\sum o$	7.86	15.71	23.57	31.43	39.28	47.14	55.00	62.86	70.71	78.57
-	$\sum A$	6.16	12.32	18.48	24.54	30.80	36.96	43.12	49.28	55.44	61.60
DB 28	$\sum o$	8.80	17.60	26.40	35.20	44.00	52.80	61.60	70.40	79.20	88.00

หมายเหตุ : RB : Round bar; เหล็กกลมผิวเรียบ DB : Deformed bar; เหล็กข้ออ้อย

$\sum A$: พื้นที่หน้าตัดรวม

$\sum o$: เส้นรอบวงรวม

ตารางที่ ผ.2 ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ n, k, j และ R

fc' (กก./ซม. ²)	n	fc (กก./ซม. ²)	fs (กก./ซม. ²)	k	j	R (กก./ซม. ²)
100	14	45	1,200	0.344	0.885	6.857
			1,500	0.295	0.901	5.999
			1,700	0.270	0.910	5.535
150	11	67.5	1,200	0.382	0.873	11.257
			1,500	0.331	0.890	9.941
			1,700	0.304	0.899	9.220
200	10	90	1,200	0.429	0.857	16.531
			1,500	0.375	0.875	14.766
			1,700	0.346	0.885	13.780
250	9	112.5	1,200	0.458	0.847	21.815
			1,500	0.403	0.866	19.623
			1,700	0.373	0.876	18.384
300	8	135	1,200	0.474	0.842	26.925
			1,500	0.419	0.860	24.313
			1,700	0.388	0.871	22.827

หมายเหตุ : $n = \frac{Es}{Ec}$, $k = \frac{1}{1 + \frac{fs}{n \cdot fc}}$, $j = 1 - \frac{k}{3}$, $R = \frac{1}{2} fc \cdot k \cdot j$

ตารางที่ ผ.3 ค่าความต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนของคานารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (คานากว้าง 15 ซม.)

ขนาดรูปตัด $b \times d$ (ซม. x ซม.)	ความลึก ประสิทธิภาพ d (ซม.)	น้ำหนักคาน (กก./ม.)	f_c' (กก./ซม. ²)	V_c (กก.)	$M_c = Rbd^2$ (กก./ซม. ²)		
					$f_s = 1,200$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,500$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,700$ (กก./ซม. ²)
15x30	25	108	150	1,332	1,055	932	864
			200	1,538	1,550	1,384	1,292
			250	1,719	2,045	1,840	1,724
			300	1,884	2,524	2,279	2,140
15x35	30	126	150	1,598	1,520	1,342	1,245
			200	1,846	2,232	1,993	1,860
			250	2,063	2,945	2,649	2,482
			300	2,260	3,635	3,282	3,082
15x40	35	144	150	1,865	2,068	1,827	1,694
			200	2,153	3,038	2,713	2,532
			250	2,407	4,008	3,606	3,378
			300	2,637	4,948	4,468	4,195
15x45	40	162	150	2,131	2,702	2,386	2,213
			200	2,461	3,967	3,544	3,307
			250	2,751	5,236	4,710	4,412
			300	3,014	6,462	5,835	5,479
15x50	45	180	150	2,344	3,269	2,887	2,678
			200	2,707	4,800	4,288	4,002
			250	3,026	6,335	5,699	5,339
			300	3,315	7,819	7,061	6,629
15x55	50	198	150	2,611	4,054	3,580	3,321
			200	3,014	5,954	5,318	4,963
			250	3,370	7,857	7,067	6,621
			300	3,692	9,697	8,756	8,221

หมายเหตุ : $f_c = 0.45 f_c'$,

$$V_c = 0.29 \sqrt{f_c'} (b \times d),$$

$$M_c = Rbd^2$$

ตารางที่ ผ.4 ค่าความต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนของคานารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (คานากว้าง 20 ซม.)

ขนาดรูปตัด $b \times d$ (ซม.× ซม.)	ความลึก ประสิทธิภาพ d (ซม.)	น้ำหนักคาน (กก./ม.)	f_c' (กก./ซม. ²)	V_c (กก.)	$M_c = Rbd^2$ (กก./ซม. ²)		
					$f_s = 1,200$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,500$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,700$ (กก./ซม. ²)
20×35	30	168	150	2,131	2,026	1,789	1,660
			200	2,461	2,976	2,658	2,480
			250	2,751	3,927	3,532	3,309
			300	3,014	4,847	4,376	4,109
20×40	35	192	150	2,486	2,758	2,436	2,259
			200	2,871	4,050	3,618	3,376
			250	3,210	5,345	4,808	4,504
			300	3,516	6,597	5,957	5,593
20×45	40	216	150	2,841	3,602	3,181	2,950
			200	3,281	5,290	4,725	4,409
			250	3,668	6,981	6,279	5,883
			300	4,018	8,616	7,780	7,305
20×50	44	240	150	3,126	4,359	3,849	3,570
			200	3,609	6,401	5,717	5,335
			250	4,035	8,447	7,598	7,118
			300	4,420	10,425	9,414	8,839
20×55	49	264	150	3,481	5,406	4,774	4,427
			200	4,019	7,938	7,090	6,617
			250	4,494	10,475	9,423	8,828
			300	4,922	12,929	11,675	10,962
20×60	54	288	150	3,836	6,565	5,798	5,377
			200	4,429	9,641	8,611	8,036
			250	4,952	12,722	11,444	10,722
			300	5,425	15,703	14,179	13,313

หมายเหตุ : $f_c = 0.45 f_c'$,

$$V_c = 0.29 \sqrt{f_c'} (b \times d),$$

$$M_c = Rbd^2$$

ตารางที่ ผ.5 ค่าความต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนของคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (คานกว้าง 25 ซม.)

ขนาดรูปตัด (ซม.× ซม.)	ความลึก ประสิทธิภาพ d (ซม.)	น้ำหนักคาน (กก./ม.)	f_c' (กก./ซม. ²)	V_c (กก.)	$M_c = Rbd^2$		
					$f_s = 1,200$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,500$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,700$ (กก./ซม. ²)
25×45	40	270	150	3,552	4,503	3,977	3,688
			200	4,101	6,612	5,906	5,512
			250	4,585	8,726	7,849	7,354
			300	5,023	10,770	9,725	9,131
25×50	44	300	150	3,907	5,448	4,812	4,463
			200	4,511	8,001	7,147	6,669
			250	5,044	10,558	9,498	8,898
			300	5,525	13,032	11,768	11,048
25×55	49	330	150	4,351	6,757	5,967	5,534
			200	5,024	9,923	8,863	8,271
			250	5,617	13,094	11,779	11,035
			300	6,153	16,162	14,594	13,702
25×60	54	360	150	4,795	8,206	7,247	6,721
			200	5,537	12,051	10,764	10,045
			250	6,190	15,903	14,305	13,402
			300	6,781	19,628	17,724	16,641
25×65	59	390	150	5,239	9,796	8,652	8,024
			200	6,049	14,386	12,850	11,992
			250	6,763	18,984	17,077	15,999
			300	7,409	23,432	21,159	19,865
25×70	63	420	150	5,594	11,170	9,864	9,149
			200	6,459	16,403	14,651	13,673
			250	7,222	21,646	19,471	18,242
			300	7,911	26,717	24,125	22,650

หมายเหตุ : $f_c = 0.45 f_c'$,

$$V_c = 0.29 \sqrt{f_c'} (b \times d),$$

$$M_c = Rbd^2$$

ตารางที่ ผ.6 ค่าความต้านทานโมเมนต์ของพื้นคอนกรีตรูปตั้ดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ความกว้าง 1.0 ม.)

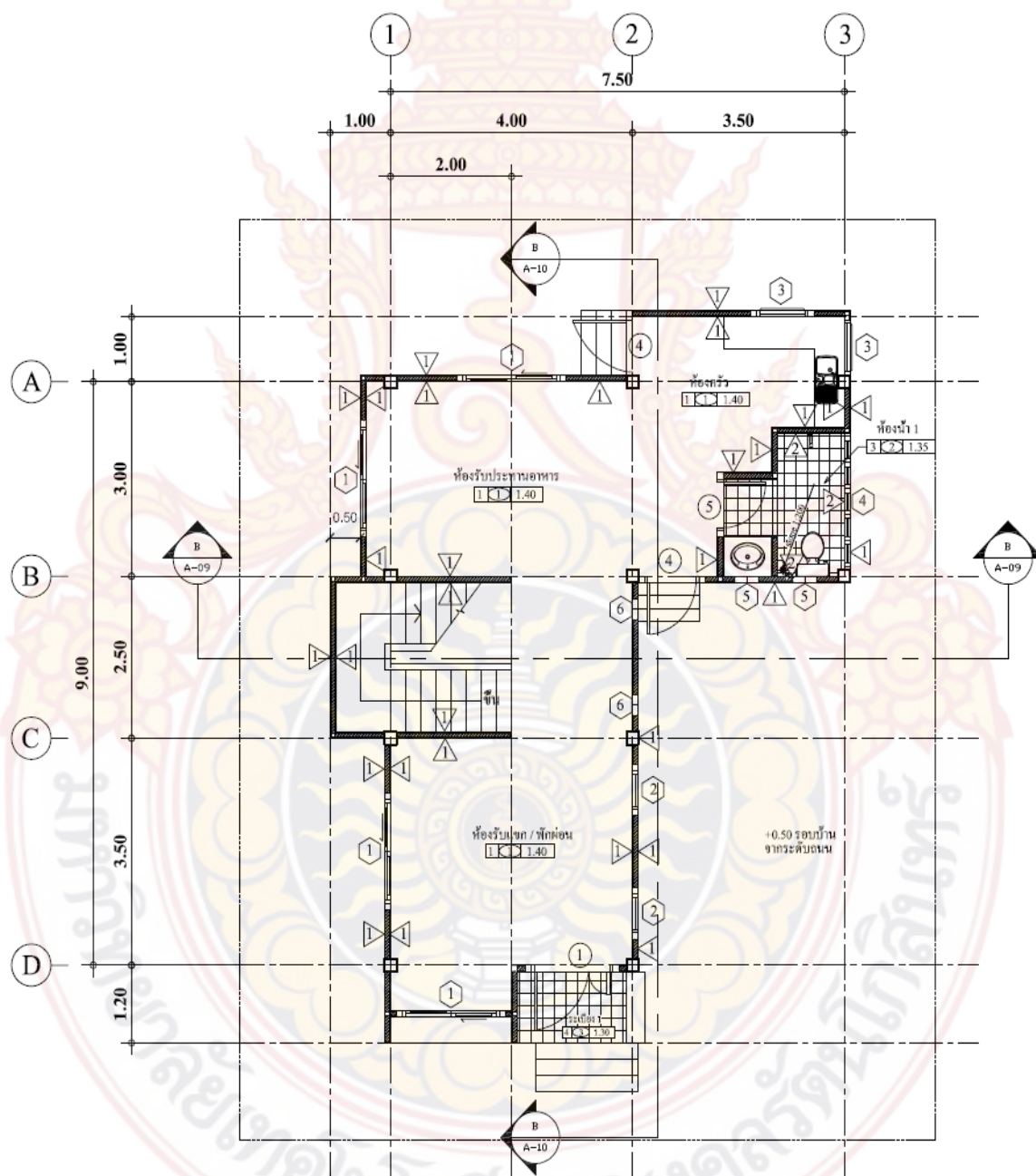
ความหนาพื้น (ซม.)	ความลึก ประสิทธิภาพ d (ซม.)	น้ำหนักพื้น (กก./ม. ²)	f_c' (กก./ซม. ²)	$M_c = Rbd^2$		
				$f_s = 1,200$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,500$ (กก./ซม. ²)	$f_s = 1,700$ (กก./ซม. ²)
8	6	192	150	405	358	332
			200	595	531	496
			250	785	706	662
			300	969	875	822
10	8	240	150	720	636	590
			200	1,058	945	882
			250	1,396	1,256	1,177
			300	1,723	1,556	1,461
12	10	288	150	1,126	994	922
			200	1,653	1,477	1,378
			250	2,181	1,962	1,838
			300	2,692	2,431	2,283
15	12	360	150	1,621	1,432	1,328
			200	2,380	2,126	1,984
			250	3,141	2,826	2,647
			300	3,877	3,501	3,287
20	17	480	150	3,253	2,873	2,665
			200	4,777	4,267	3,982
			250	6,304	5,671	5,313
			300	7,811	7,026	6,597
25	22	600	150	5,448	4,812	4,463
			200	8,001	7,147	6,669
			250	10,558	9,498	8,898
			300	13,032	11,768	11,048

หมายเหตุ : $f_c = 0.45 f_c'$, $M_c = Rbd^2$, $b = 1.0$ เมตร

ตัวอย่างรายการคำนวณโครงสร้างบ้านพักอาศัย

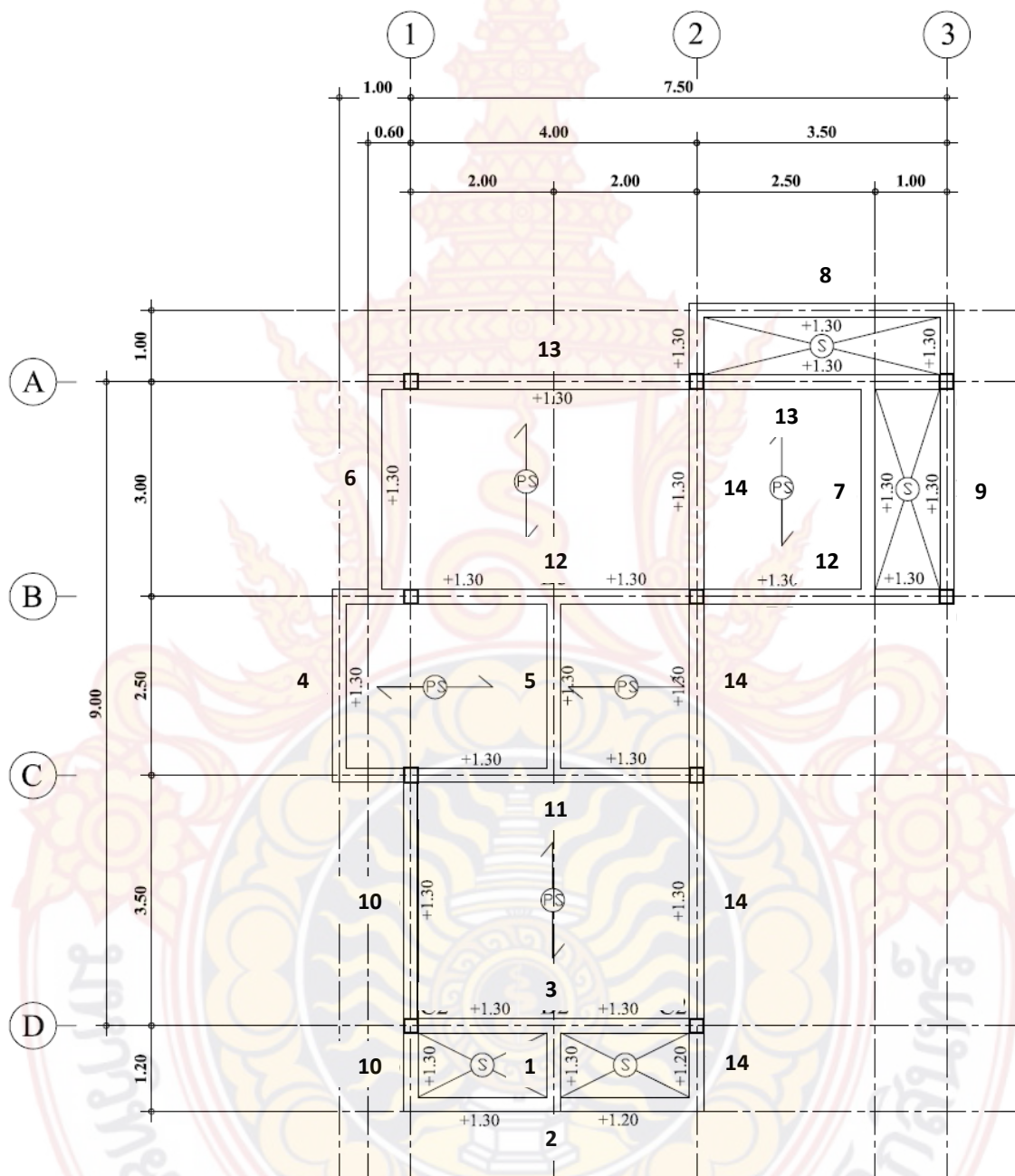
งานที่มอบหมายประจำภาคการศึกษา ให้คำนวณออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบ้านพักอาศัย โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. หาแบบรูปรายการบ้านพักอาศัยเป็นแบบทางสถาปัตยกรรม ประกอบด้วย แปลนพื้น รูปด้าน ทั้งสี่ด้าน และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น แบบแปลนพื้นชั้นที่ 1 ดังรูปข้างล่าง



แปลนพื้นชั้นที่ 1

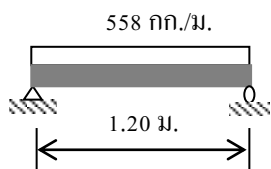
2. เขียนผังโครงสร้างคานเพื่อรองรับพื้นและผนังตามแนว Grid line โดยพิจารณาจากแบบรูปสถาปัตยกรรม พร้อมทั้งกำหนดชนิดของพื้นและระบุหมายเลขคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูป ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้เป็นพื้นสำเร็จรูป (PS) พื้นเสริมเหล็กทางเดียว (S) และคานจำนวน 14 ตัว



ผังโครงสร้างพื้นและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

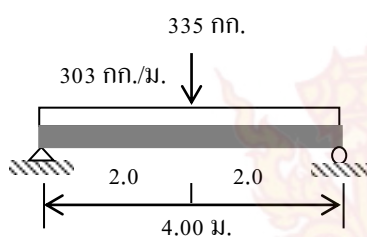
3. เขียนแบบจำลองทางโครงสร้างแล้วทำการถ่ายน้ำหนักจากพื้นและผนังลงคานรองรับ รวมทั้งน้ำหนักของคานเอง และทำการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อหาแรงภายใน ได้แก่ แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์คัต และแรงบิด (ถ้ามี)

คานหมายเลข 1



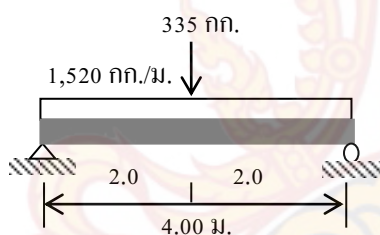
แรงปฏิกิริยา : 335 กก.
แรงเฉือน : 335 กก.
โมเมนต์คัต : 100.4 กก.-ม.

คานหมายเลข 2



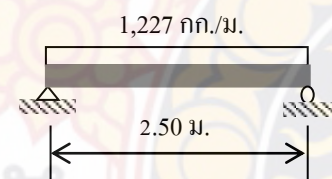
แรงปฏิกิริยา : 774 กก.
แรงเฉือน : 774 กก.
โมเมนต์คัต : 941 กก.-ม.

คานหมายเลข 3



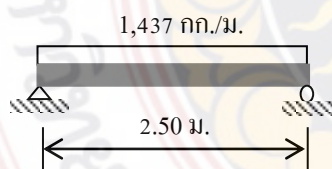
แรงปฏิกิริยา : 3,208 กก.
แรงเฉือน : 3,208 กก.
โมเมนต์คัต : 3,375 กก.-ม.

คานหมายเลข 4



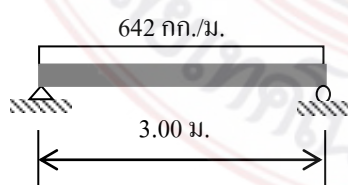
แรงปฏิกิริยา : 1,533 กก.
แรงเฉือน : 1,533 กก.
โมเมนต์คัต : 958 กก.-ม.

คานหมายเลข 5



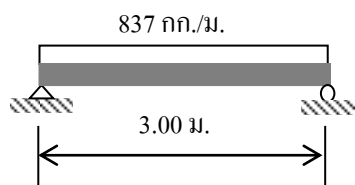
แรงปฏิกิริยา : 1,796 กก.
แรงเฉือน : 1,796 กก.
โมเมนต์คัต : 1,122 กก.-ม.

คานหมายเลข 6



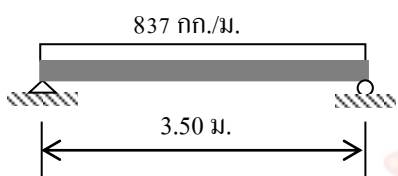
แรงปฏิกิริยา : 963 กก.
แรงเฉือน : 963 กก.
โมเมนต์คัต : 722 กก.-ม.

คานหมายเลข 7



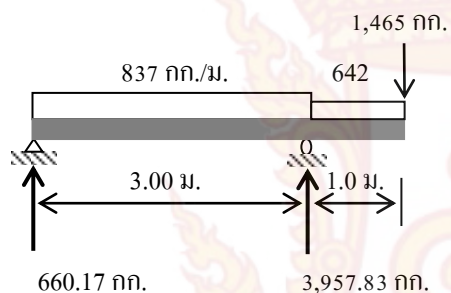
แรงปฏิกิริยา : 1,255 กก.
 แรงเฉือน : 1,255 กก.
 โมเมนต์ตัด : 942 กก.-ม.

คานหมายเลข 8

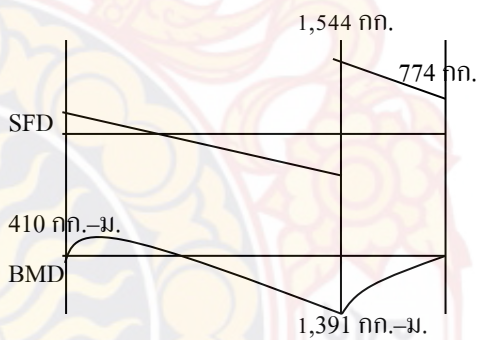
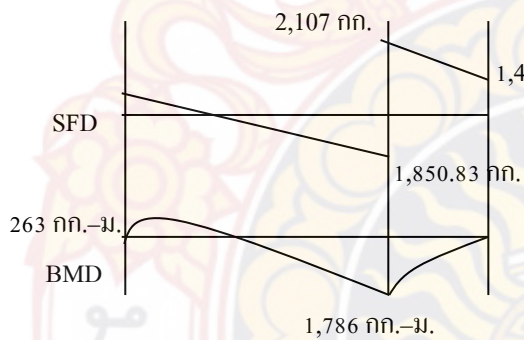
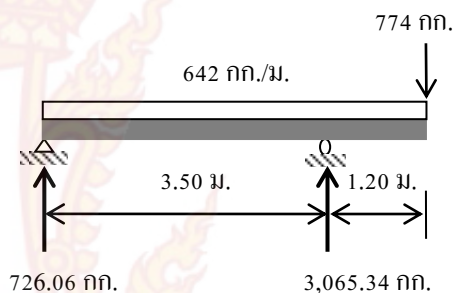


แรงปฏิกิริยา : 1,465 กก.
 แรงเฉือน : 1,465 กก.
 โมเมนต์ตัด : 1,282 กก.-ม.

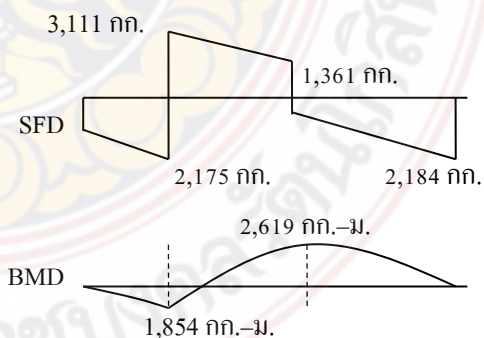
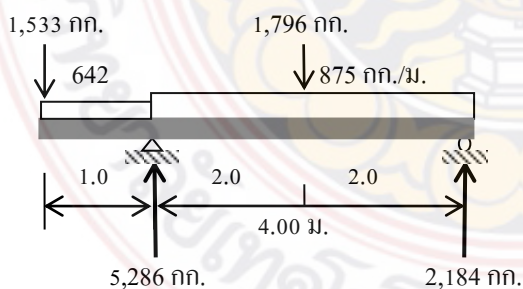
คานหมายเลข 9



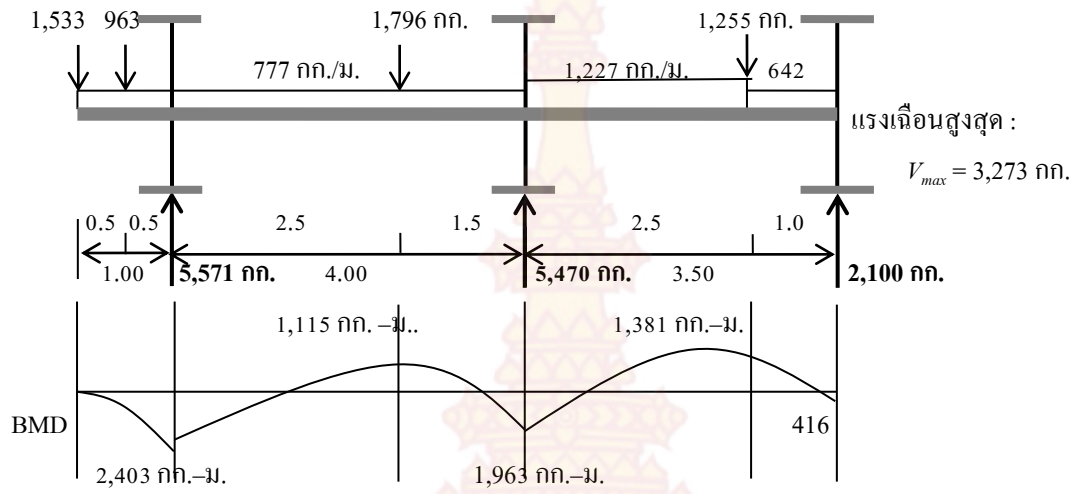
คานหมายเลข 10



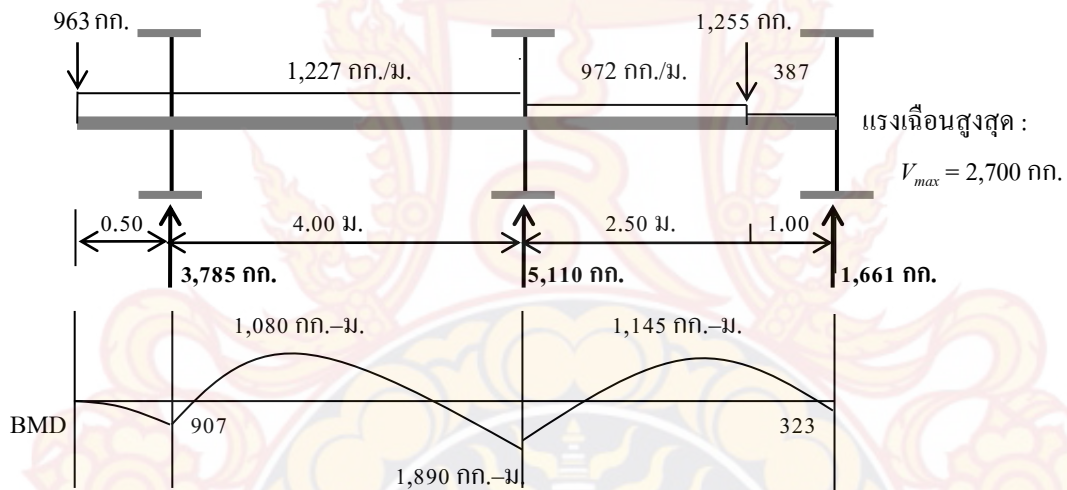
คานหมายเลข 11



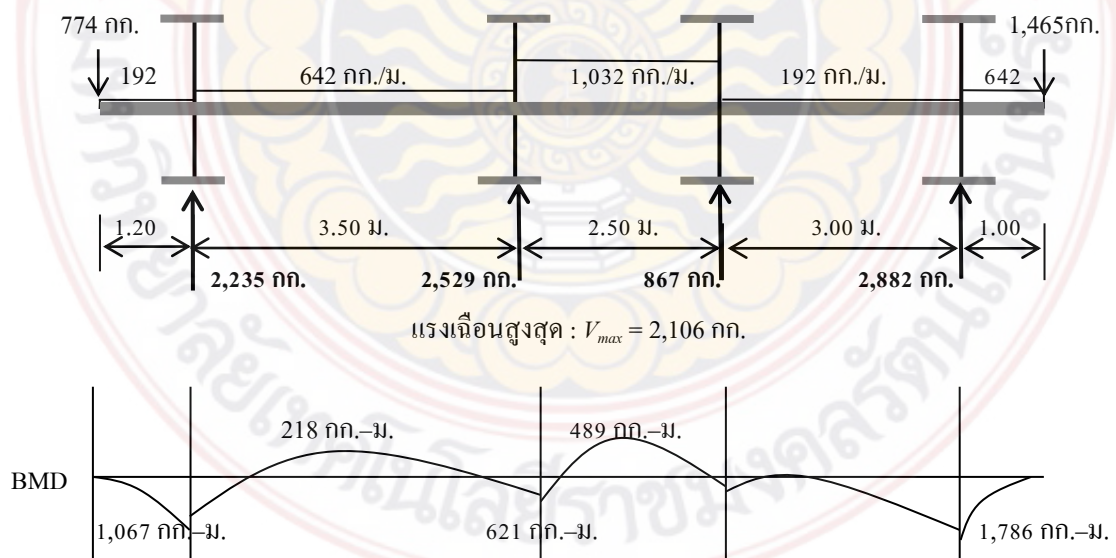
คำถามหมายเลข 12



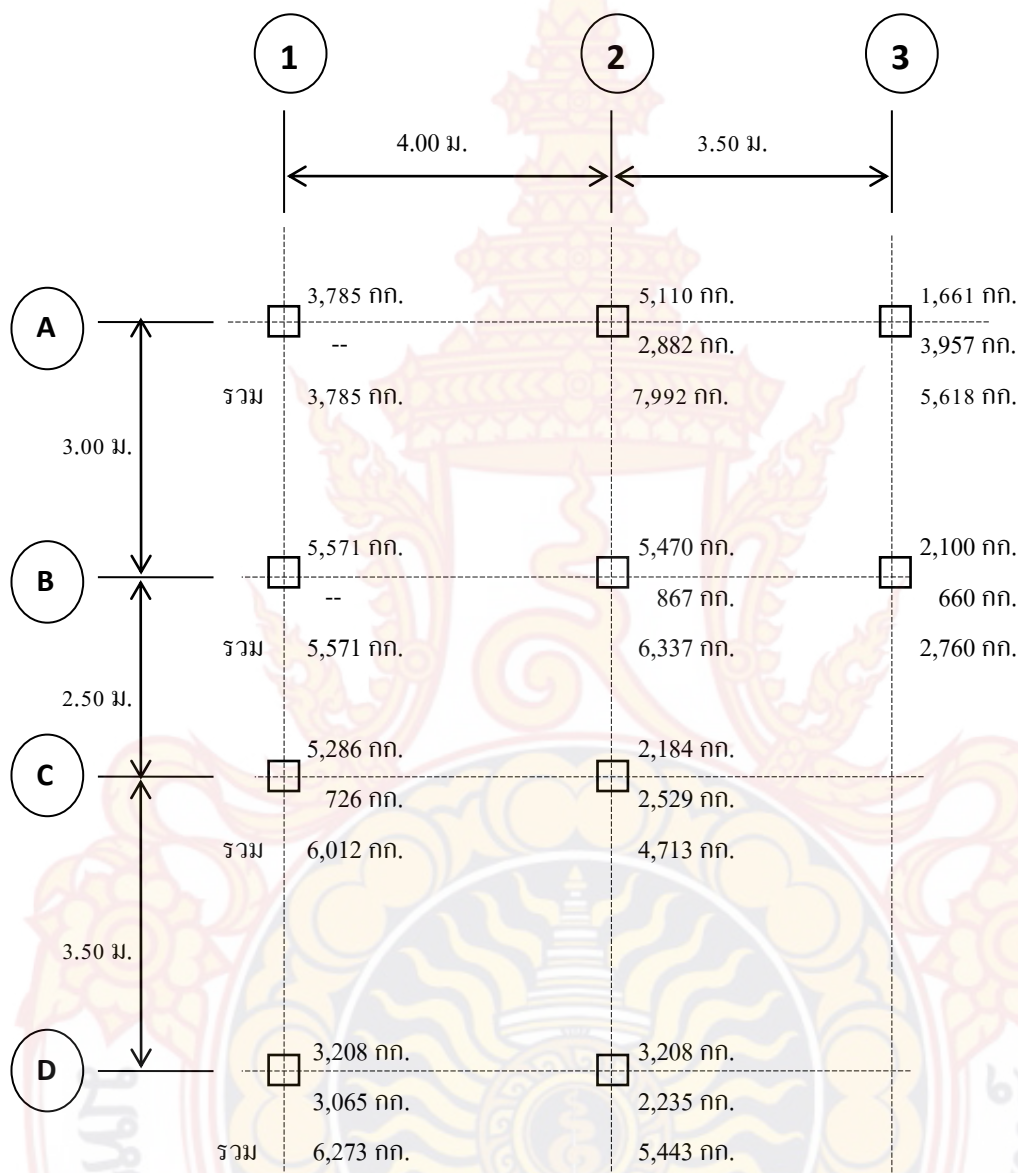
คำถามหมายเลข 13



คำถามหมายเลข 14



4. รวมน้ำหนักถ่ายลงเสา (ชั้นที่ 1) โดยพิจารณาจากแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง
ในชั้นตอนที่ 3 และเขียนตามแนว Grid line ดังนี้



ข้อสังเกต

ส่วนของโครงสร้างรองรับน้ำหนักชั้นที่ 1 คือ เสาตอม่อ แต่เสาเป็นองค์อาคารที่รับน้ำหนัก
บรรทุกทุกสะสมจากชั้นอื่นๆ ด้วย ดังนั้น การคำนวณออกแบบเสาตอม่อและฐานรากต้องรวมน้ำหนักชั้น 2
และชั้นหลังคาด้วย (กรณีเป็นบ้าน 2 ชั้น)

5. รายการคำนวณโครงสร้าง

รายการคำนวณโครงสร้าง

ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบ

1. คอนกรีต : $f_c' = 150 \text{ กก./ซม.}^2$

$f_c = 0.45f_c' = 67.5 \text{ กก./ซม.}^2$

2. เหล็กเสริม

เหล็กข้ออ้อย : $f_y = 3,000 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_s = 1,500 \text{ กก./ซม.}^2$

เหล็กกลม : $f_y = 2,400 \text{ กก./ซม.}^2$ $f_s = 1,200 \text{ กก./ซม.}^2$

3. ค่าคงที่สำหรับการออกแบบ :

ค่าคงที่	n	k	j	R
เหล็กข้ออ้อย	11	0.331	0.889	9.93
เหล็กกลม	11	0.382	0.872	11.24

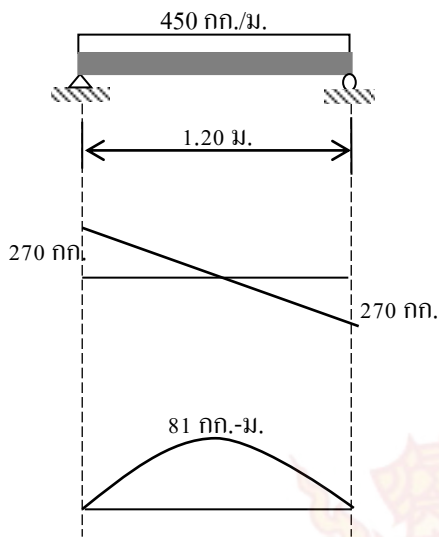
4. น้ำหนักบรรทุกจร (w_{LL}) :

ส่วนพักอาศัย ห้องน้ำ = 150 กก./ม.^2

หลังคา = 50 กก./ม.^2

5. แผ่นพื้นสำเร็จรูป (PS) เป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบท้องเรียบ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรได้ไม่น้อยกว่า 150 กก./ม.^2 เทคอนกรีตทับหน้าหนาไม่น้อยกว่า 5.0 เซนติเมตร เสริมเหล็ก ϕ 6 มม. @ 0.20 ม. หรือใช้ตะแกรงลวดเหล็กสำเร็จรูป (Wire mesh)

ออกแบบพื้น (S) : พื้นเสริมเหล็กทางเดียว



$$m = S/L : 1.5/4.0 = 0.3 < 0.5 : \text{One way slab}$$

ความหนาพื้นต่ำสุดของพื้นช่วงเดียว

$$t = L/20 = 1.2/20 = 0.06 \text{ ม. เลือกใช้ } 0.10 \text{ ม.}$$

น้ำหนักที่กระทำกับพื้น

$$w_{DL} = 0.10 \times 2,400 = 240 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{LL} = 150 \text{ กก./ม.}^2$$

$$w_{\text{วัสดุพื้น}} = 60 \text{ กก./ม.}^2$$

$$\text{น้ำหนักรวม : } w = 450 \text{ กก./ม.}^2$$

โมเมนต์ที่ต้านทานโดยคอนกรีต : M_c

$$M_c = Rbd^2 = 11.24(1.0)7.5^2$$

$$= 632.25 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

$$A_s = \frac{M_{max}}{f_s \times j \times d} = \frac{81 \times 100}{1,200(0.872)7.5} = 1.03 \text{ ซม.}^2$$

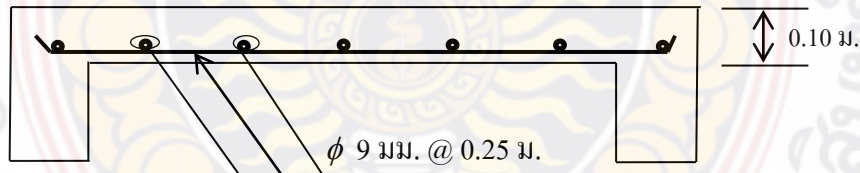
$$\text{เลือกใช้ } \phi 9 \text{ มม. @ } 0.25 \text{ ม. } (A_s = 2.54 \text{ ซม.}^2)$$

$$A_s' = 0.0025bt = 0.0025 \times 100 \times 10 = 2.50 \text{ ซม.}^2$$

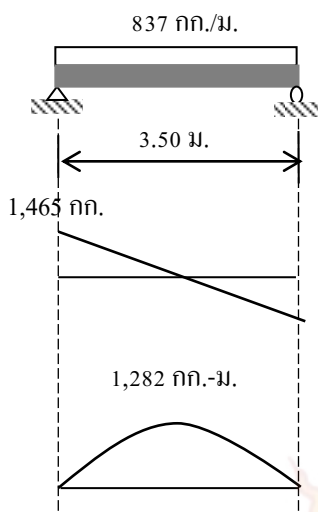
$$\text{เลือกใช้ } \phi 9 \text{ มม. @ } 0.25 \text{ ม. } (A_s = 2.54 \text{ ซม.}^2)$$

ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้น : v

$$v = \frac{V}{bd} = \frac{270}{(100)(7.5)} = 0.36 \text{ กก./ซม.}^2 < 0.29\sqrt{f_c'}$$



ออกแบบคาน B1 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 1, 2, 4, 5, 6, 7 และ 8)



เลือกขนาดคาน : 0.15x0.35 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.15)30^2 = 1,340 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

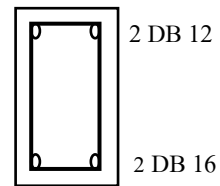
$$As = \frac{M_{max}}{fs \times j \times d} = \frac{1,340 \times 100}{1,500(0.889)30} = 3.20 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ 2 DB 16 ($As = 4.02 \text{ ซม.}^2$)

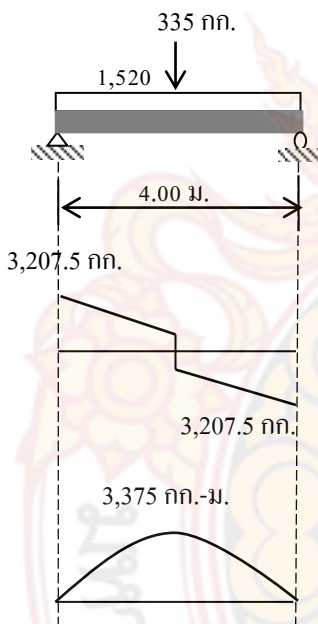
$$Vc = 0.29\sqrt{fc'bd} = 1,598 \text{ กก.} > V_{Max}$$

$$\text{เสริมเหล็กปลอกปริมาณต่ำสุด : } s = \frac{Av}{0.0015b}$$

เลือกใช้ ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.



ออกแบบคาน B2 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 3)



เลือกขนาดคาน : 0.20x0.40 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.20)35^2 = 2,432.85 \text{ กก.-ม.} < M_{max}$$

$$As_1 = \frac{2,432.85 \times 100}{1,500(0.889)35} = 5.21 \text{ ซม.}^2$$

$$As_2 = \frac{942.15 \times 100}{1,500(35-5)} = 2.09 \text{ ซม.}^2$$

$As = 7.30 \text{ ซม.}^2$ เลือกใช้ 4 DB 16 ($As = 8.04 \text{ ซม.}^2$)

$$As' = \frac{1}{2} As_2 \frac{(1-k)}{(k-\frac{d'}{d})} = 3.71 \text{ ซม.}^2$$

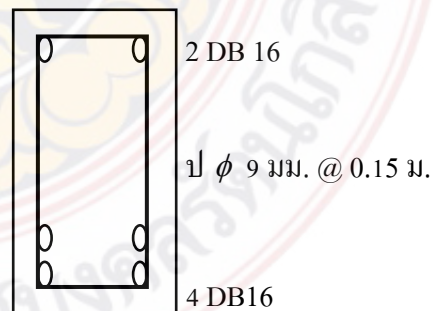
เลือก : 2 DB 16 ($As = 4.02 \text{ ซม.}^2$)

$$Vc = 0.29\sqrt{fc'bd} = 2,486 \text{ กก.} < V_{Max}$$

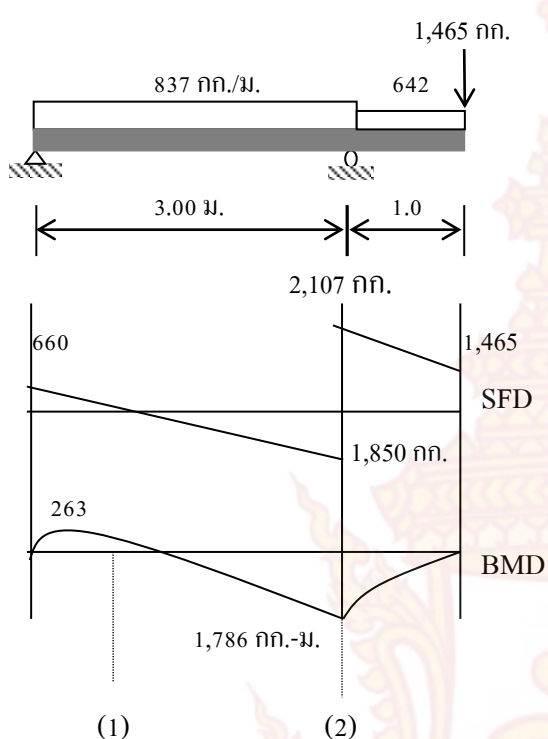
$$V' = 722 \text{ กก.}$$

$$s = \frac{Avfd}{V'} = 74 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.15 ม.



ออกแบบคาน B3 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 9 และ 10)



เลือกขนาดคาน : 0.20x0.35 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.20)30^2 = 1,787 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

$$As = \frac{M_{max}}{fs \times j \times d} = \frac{1,786 \times 100}{1,500(0.889)30} = 4.46 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ 2 DB 16 + DB 12

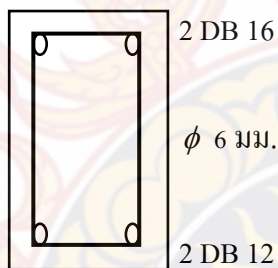
$$(As = 5.15 \text{ ซม.}^2)$$

$$Vc = 0.29\sqrt{fc}bd = 1,598 \text{ กก.} > V_{Max}$$

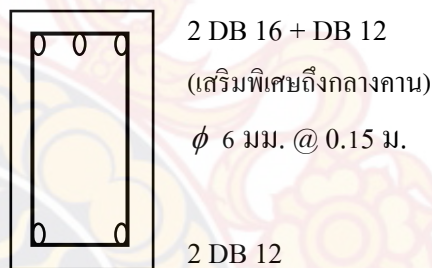
เสริมเหล็กปลอกปริมาณต่ำสุด :

$$s = \frac{Av}{0.0015b}$$

เลือกใช้ ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.



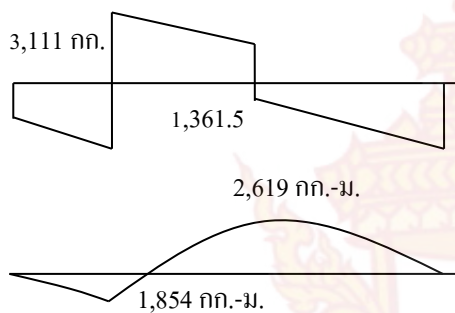
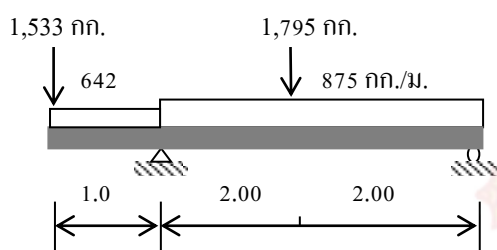
(1) - (1)



(2) - (2)



ออกแบบคาน B4 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 11)



เลือกขนาดคาน : 0.20x0.40 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.20)35^2 = 2,432.85 \text{ กก.-ม.} < M_{max}$$

ช่วง โมเมนต์บวก (+M)

$$As_1 = \frac{2,432.85 \times 100}{1,500(0.889)35} = 5.21 \text{ ซม.}^2$$

$$As_2 = \frac{186.15 \times 100}{1,500(35-5)} = 0.41 \text{ ซม.}^2$$

$As = 5.62 \text{ ซม.}^2$ เลือกใช้ 3 DB 16

$$As' = \frac{1}{2} As_2 \frac{(1-k)}{(k-\frac{d'}{d})} = 0.72 \text{ ซม.}^2$$

ช่วง โมเมนต์ลบ (-M)

$$As = \frac{M_{max}}{fs \times j \times d} = \frac{1,854 \times 100}{1,500(0.889)35} = 3.97 \text{ ซม.}^2 \text{ เลือกใช้ 2 DB 16}$$

$$Vc = 0.29\sqrt{fc'bd} = 2,486 \text{ กก.} < V_{Max}$$

$$V' = 625 \text{ กก.}$$

$$s = \frac{Avfvd}{V'} = 85.5 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.15 ม.

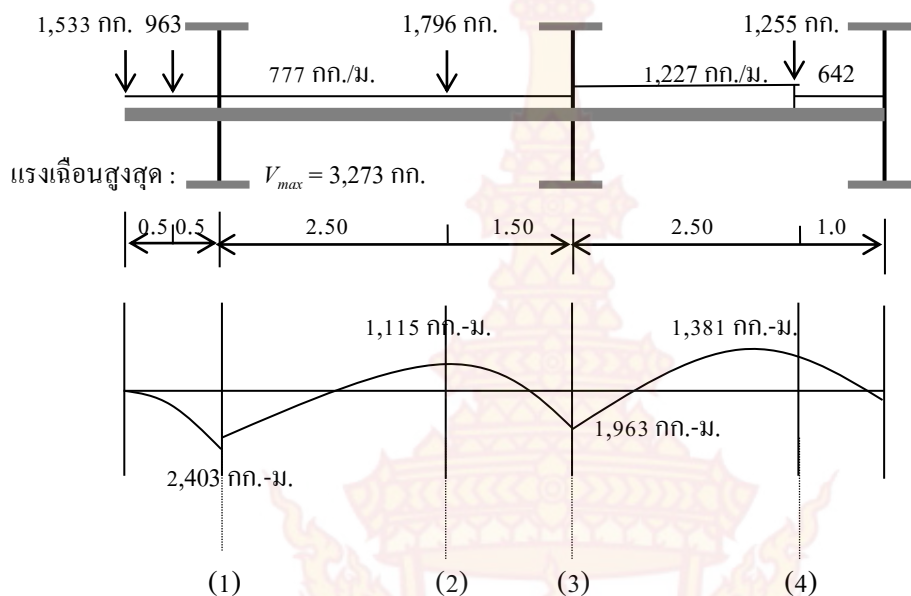


2 DB 16

ป ϕ 9 มม. @ 0.15 ม.

3 DB 16

ออกแบบคาน B5 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 12 และ 13)



เลือกขนาดคาน : 0.20x0.40 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.20)35^2 = 2,432 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

ช่วงโมเมนต์บวก (+M)

ช่วงโมเมนต์ลบ (-M)

$$As = \frac{1,381 \times 100}{1,500(0.889)35} = 2.33 \text{ ซม.}^2$$

$$As = \frac{2,403 \times 100}{1,500(0.889)35} = 5.14 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ 3 DB 12

เลือกใช้ 3 DB 16

$$As = \frac{1,963 \times 100}{1,500(0.889)35} = 4.20 \text{ ซม.}^2$$

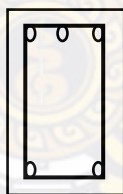
เลือกใช้ 2 DB 16 + 1 DB 12

$$Vc = 0.29\sqrt{fc'bd} = 2,486 \text{ กก.} < V_{Max}$$

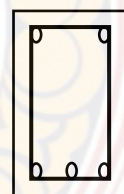
$$V' = 787 \text{ กก.}$$

$$s = \frac{Avfvd}{V'} = 67.7 \text{ ซม.}$$

เลือกใช้ ϕ 9 มม. @ 0.15 ม.



(1) - (1)



(2) - (2)

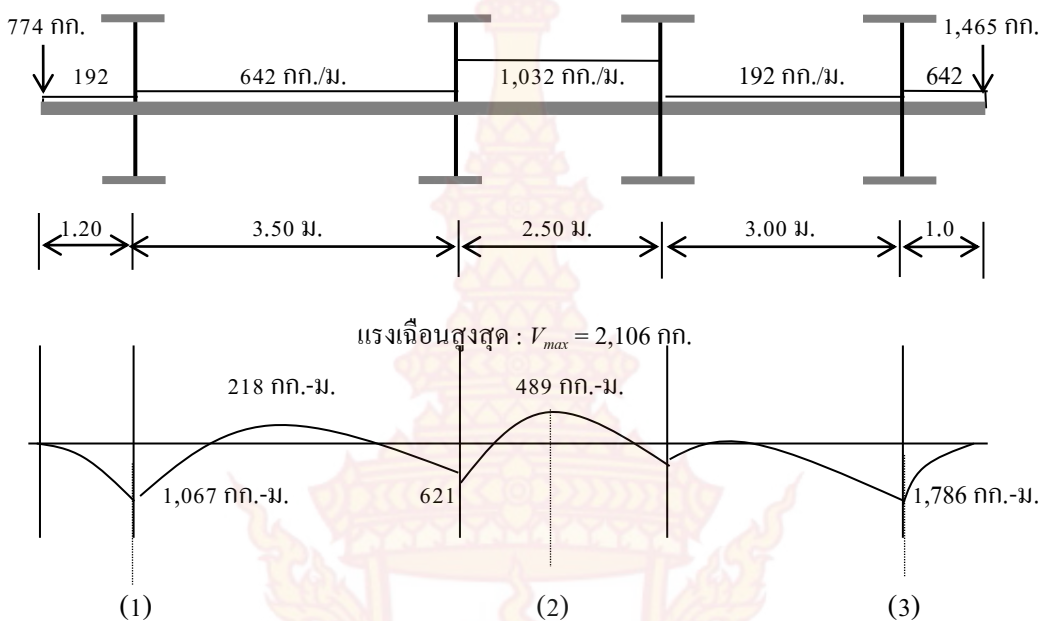


(3) - (3)



(4) - (4)

ออกแบบคาน B6 (ใช้สำหรับคานหมายเลข 14)



เลือกขนาดคาน : 0.20x0.35 ม.

$$Mc = Rbd^2 = 9.93(0.20)30^2 = 1,787 \text{ กก.-ม.} > M_{max}$$

ช่วงโมเมนต์บวก (+M)

ช่วงโมเมนต์ลบ (-M)

$$As = \frac{489 \times 100}{1,500(0.889)30} = 1.22 \text{ ซม.}^2$$

$$As = \frac{1,067 \times 100}{1,500(0.889)30} = 2.67 \text{ ซม.}^2$$

เลือกใช้ 2 DB 12

เลือกใช้ 3 DB 12

$$As = \frac{1,786 \times 100}{1,500(0.889)30} = 4.46 \text{ ซม.}^2$$

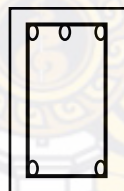
เลือกใช้ 4 DB 12

$$Vc = 0.29\sqrt{fc'bd} = 2,131 \text{ กก.} > V_{Max}$$

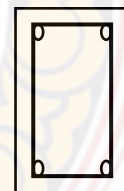
เสริมเหล็กปลอกปริมาณต่ำสุด :

$$s = \frac{Av}{0.0015b}$$

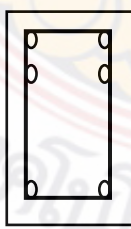
เลือกใช้ ϕ 6 มม. @ 0.15 ม.



(1) - (1)

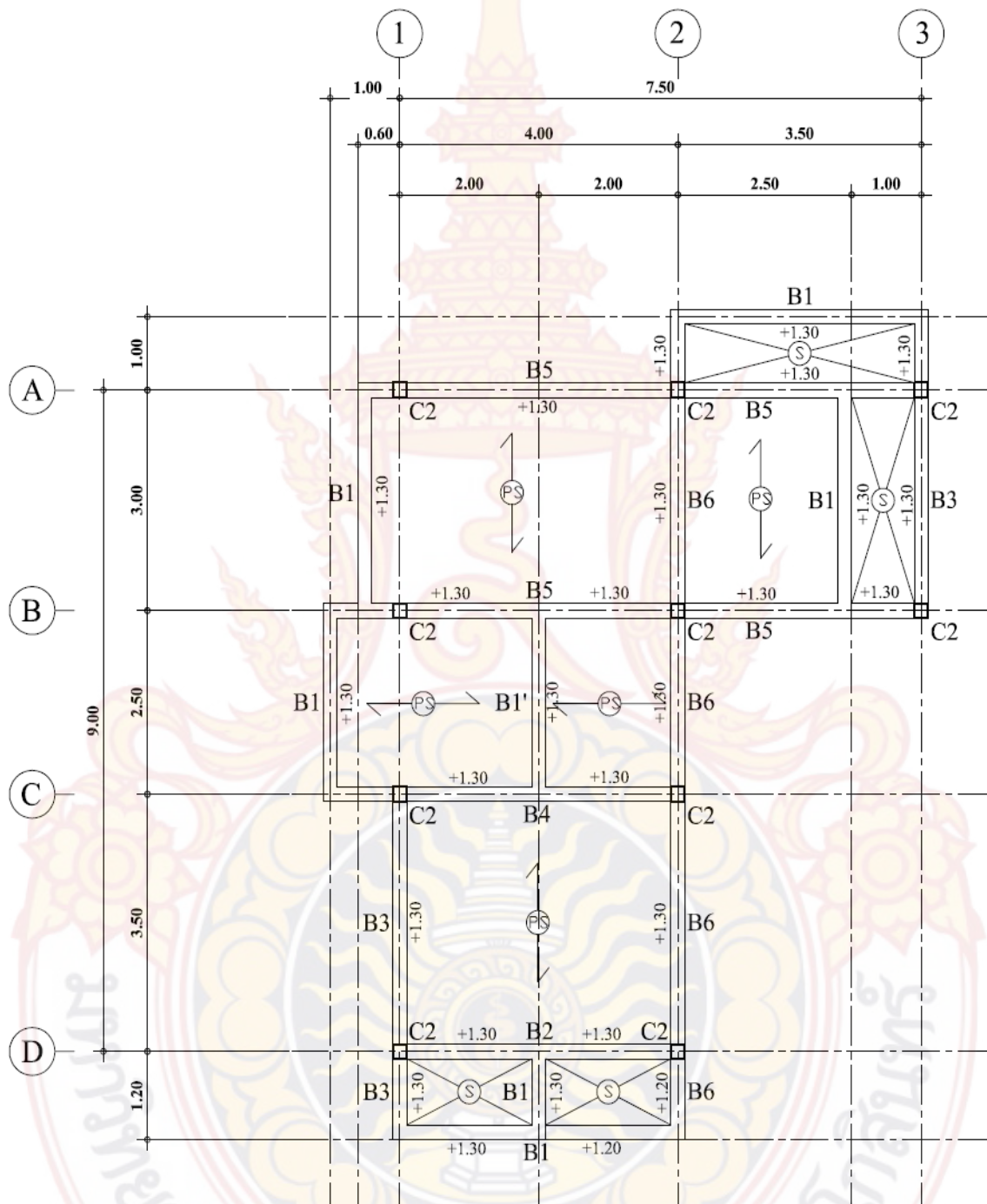


(2) - (2)



(3) - (3)

6. เขียนผังโครงสร้างพื้นและคานพร้อมระบุชื่อพื้นและคานที่ออกแบบ



ผังโครงสร้างพื้นและคานชั้นที่ 1

รายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ว.ส.ท. ให้ข้อกำหนดการดัดงอเหล็กเสริม และการจัดวางเหล็กเสริม เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแข็งแรงและสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน ปัจจุบันรายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมเหล็กสามารถหาข้อมูลได้จาก Internet ดังตัวอย่าง ต่อไปนี้

การดัดงอเหล็กเสริม

ข้องอ 180° หรือครึ่งวงกลม

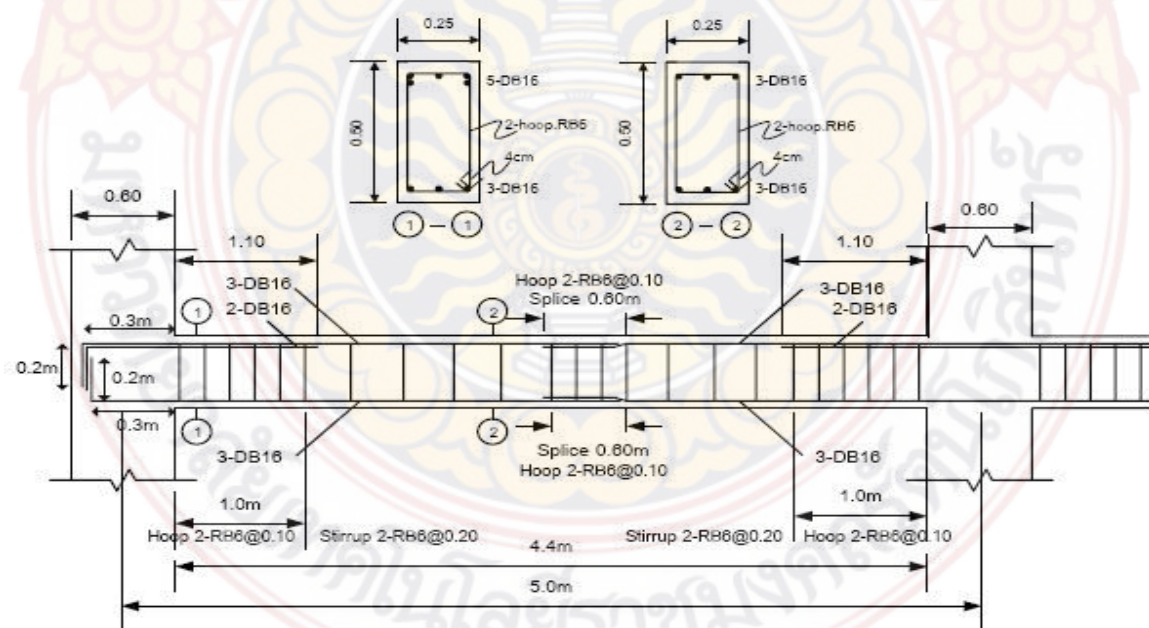
ข้องอ 90° หรือมุมฉาก

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของการดัดงอ

D = 6 db สำหรับเหล็กเส้นขนาด 6 มม. - 25 มม.
 D = 8 db สำหรับเหล็กเส้นขนาด 28 มม. - 36 มม.
 D = 10 db สำหรับเหล็กเส้นขนาด 44 มม. - 57 มม.

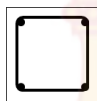
ขนาดเหล็ก	D (มม.)	ข้องอ 180°		ข้องอ 90°	
		G(มม.)	J(มม.)	G(มม.)	J(มม.)
RB9	55	110	73	120	150
DB10	60	120	80	130	160
DB12	75	130	99	160	200
DB16	100	160	132	210	260
DB20	120	190	160	260	320
DB25	150	240	200	320	400
DB28	225	330	281	380	550
DB32	255	370	319	430	620
DB36	290	420	362	480	800

เหล็กเสริมคาน

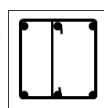
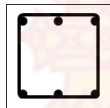


การจัดวางเหล็กเสริมเสา

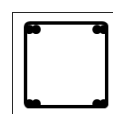
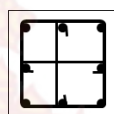
จำนวนเหล็กยื่น 4 เส้น



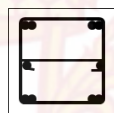
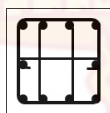
จำนวนเหล็กยื่น 6 เส้น



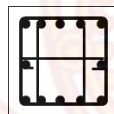
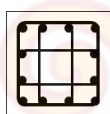
จำนวนเหล็กยื่น 8 เส้น



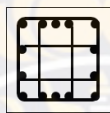
จำนวนเหล็กยื่น 10 เส้น



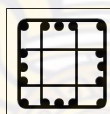
จำนวนเหล็กยื่น 12 เส้น



จำนวนเหล็กยื่น 14 เส้น



จำนวนเหล็กยื่น 16 เส้น



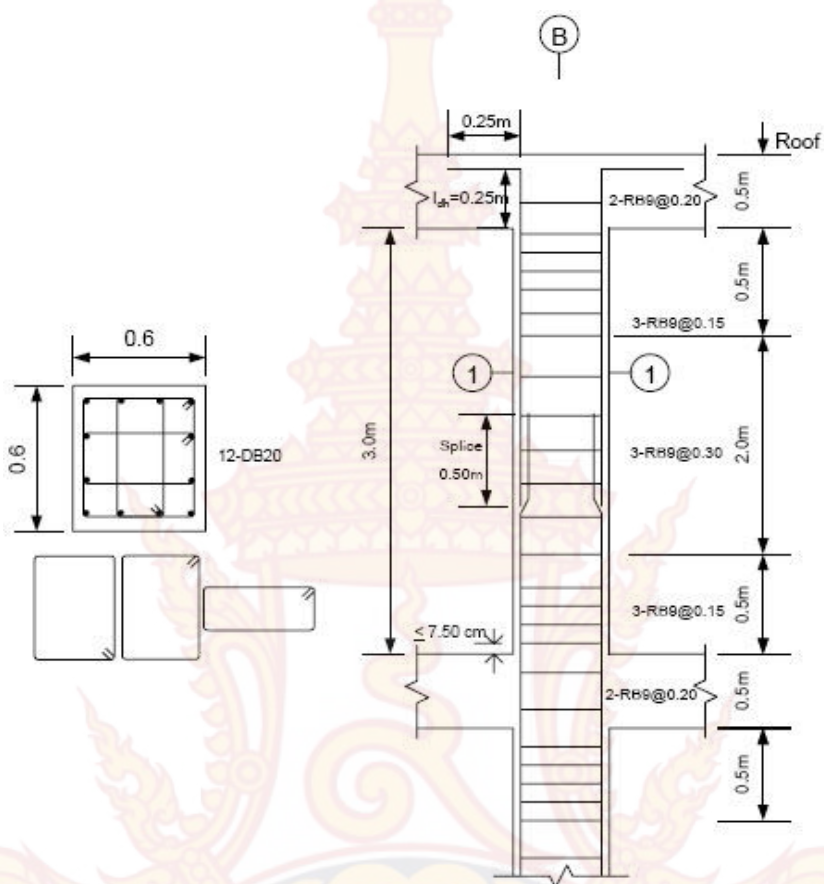
จำนวนเหล็กยื่น 18 เส้น



จำนวนเหล็กยื่น 20 เส้น



การจัดวางและต่อทาบเหล็กเสริมเสาเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว



การเสริมเหล็กฐานราก

