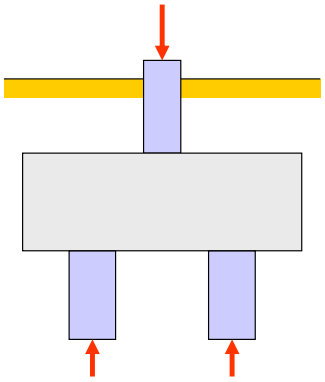
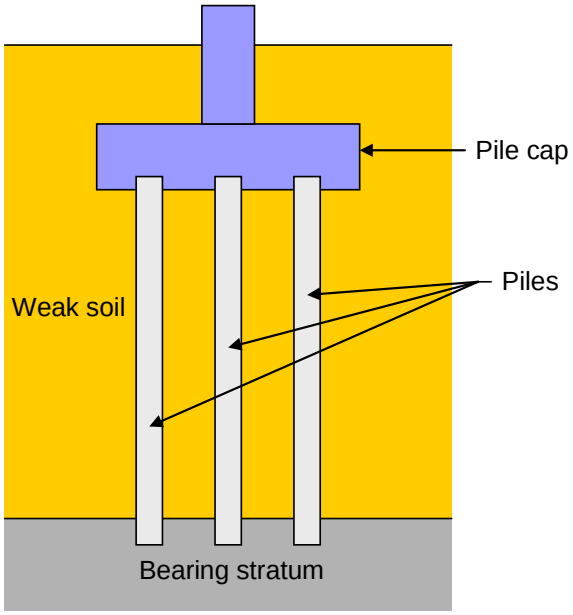


14

ฐานรากเสาเข็ม

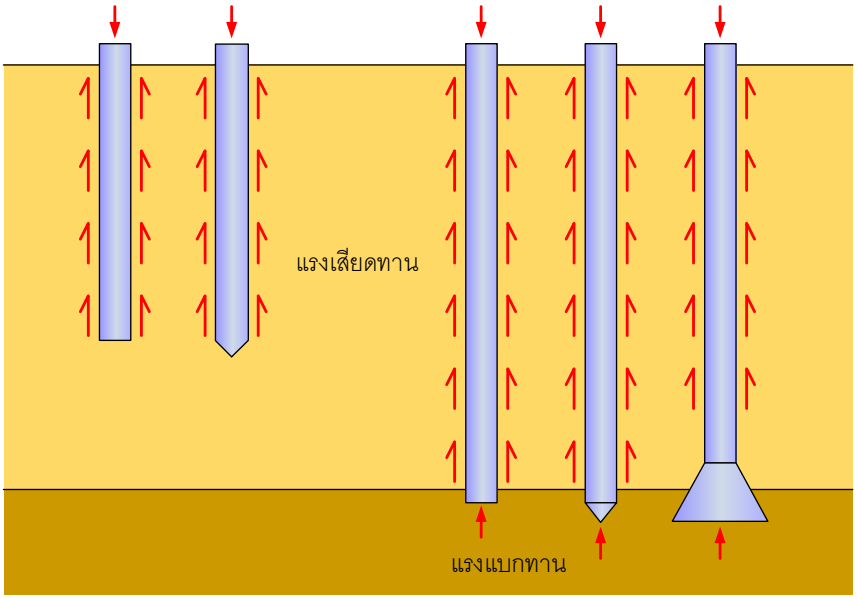
ในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีชั้นดินอ่อนรับน้ำหนักได้น้อยเช่นในเขตกรุงเทพมหานคร จะใช้เสาเข็มส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกลงไปยังชั้นดินที่มีความแข็งแรง ดังนั้นฐานรากจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงจากเสาลงสู่เสาเข็ม เรียกว่า ***ฐานรากเสาเข็ม (Pile Cap)***



รูปที่ 14.1 ฐานรากเสาเข็ม

กำลังของเสาเข็มในการรับน้ำหนักบรรทุกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ **ความฝืดหรือแรงเสียดทาน (Skin Friction)** ที่ผิวเสาเข็มและดินโดยรอบ กำลังในส่วนนี้จะขึ้นกับชนิดของดินและขนาดรูปร่างเสาเข็ม หรือเส้นรอบรูป กับความยาวของเสาเข็ม ส่วนใหญ่ในประเทศไทยมักนิยมใช้เข็นรูปตัว I เพราะมีเส้นรอบรูปมากกว่าหน้าตัดอื่น

กำลังอีกส่วนจะได้จาก **แรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End Bearing)** ซึ่งวางอยู่ในชั้นดินแข็งหรือหินที่รองรับปลายล่างของเสาเข็ม กำลังในส่วนนี้จะขึ้นกับความแข็งของชั้นดินที่รองรับและขนาดพื้นที่เสาเข็ม

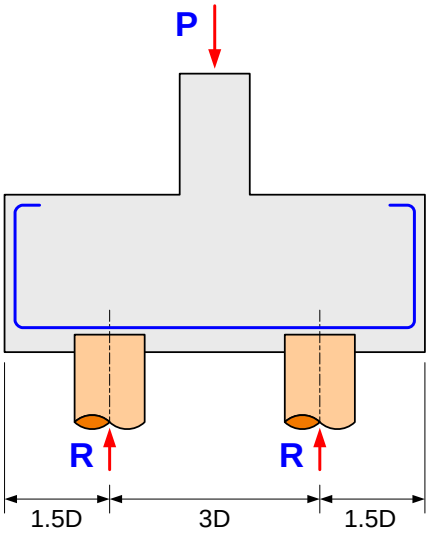


รูปที่ 14.2 เสาเข็มรับแรงเสียดทานและแรงแบกทาน

เสาเข็มจะแบ่งเป็น **เสาเข็มเจาะ (Bored Pile)** หน้าตัดกลมเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 35 ซม. ขึ้นไป และ เสาเข็มตอก ซึ่งเป็นคอนกรีตอัดแรงจะมีหน้าตัดหลายรูปแบบเช่น รูปตัวไอ, รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหกเหลี่ยมกลวง



รูปที่ 14.3 หน้าตัดเสาเข็ม

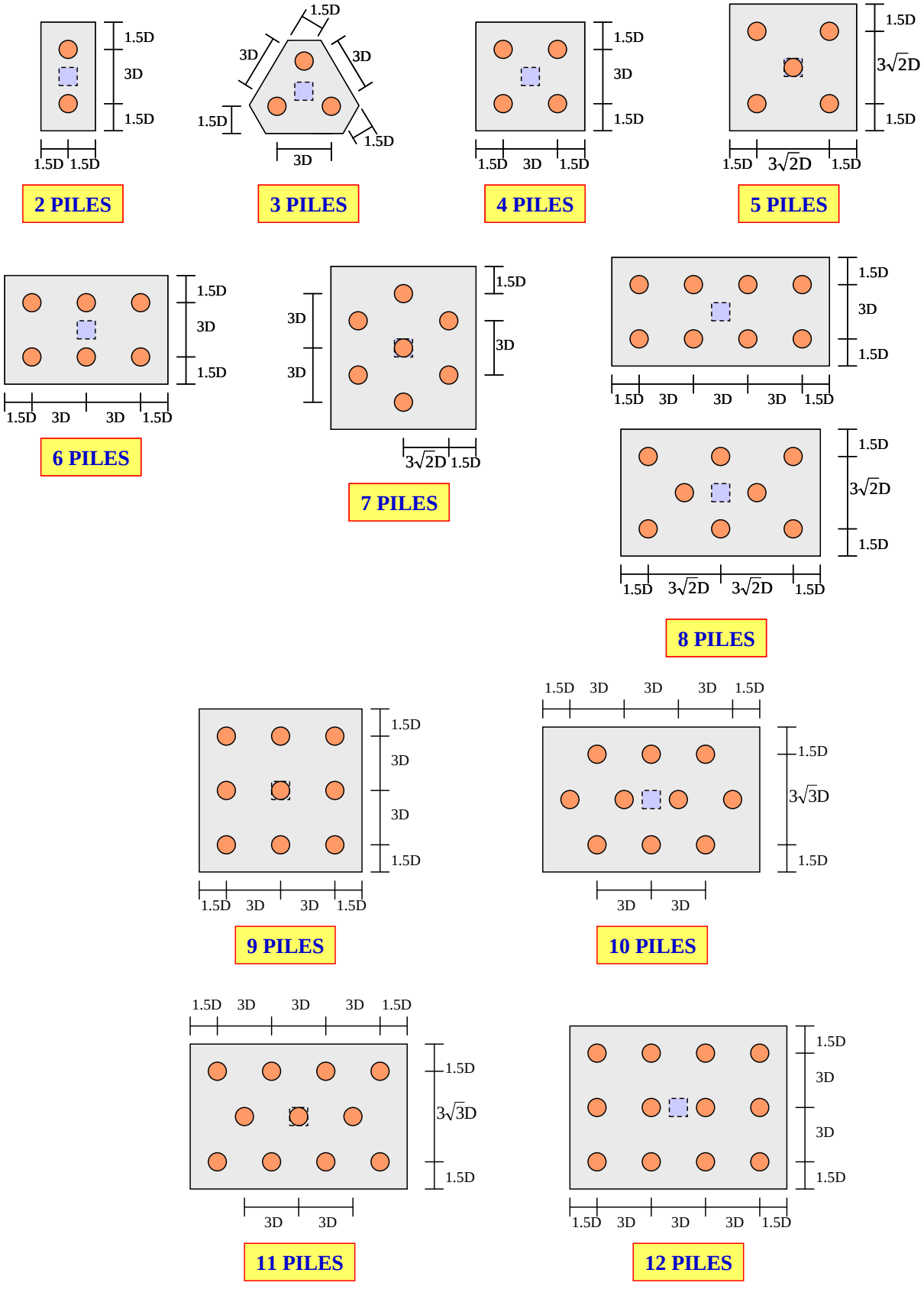


ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกจากเสา และแรงปฏิกิริยาต้านทานจากเสาเข็ม มีลักษณะเหมือนคานรับแรงกระทำเป็นจุด

ดังเช่นในรูปที่ 14.4 น้ำหนักบรรทุกจะทำให้ฐานแอ่นตัว จึงต้องเสริมเหล็กด้านล่าง และพยายามให้เสาเข็มอยู่ใกล้กันมากที่สุดเพื่อลดแรงภายในและจำกัดขนาดฐานราก โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะอยู่ที่ 3 เท่าของขนาดเสาเข็ม (D)

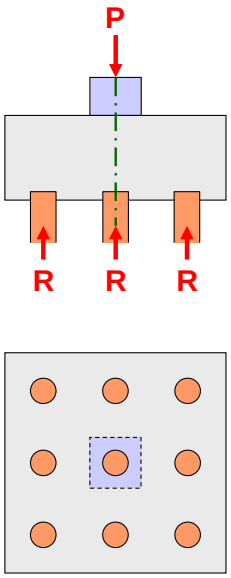
รูปที่ 14.4 แรงในฐานรากเสาเข็ม

ขนาดหรือจำนวนเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกจากเสา โดยรักษาระยะห่างระหว่างเสาเข็มสามเท่าของขนาดเข็ม (3D) รูปแบบของกลุ่มเสาเข็มจะมีได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 14.5



รูปที่ 14.5 รูปแบบการจัดวางเสาเข็ม

ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักตรงศูนย์



รูปที่ 14.6 แรงในเสาเข็ม

เสาเข็มจะถูกจัดวางอย่างสมมาตรดังเช่นในรูปที่ 14.6 ถ้าฐานรากมีความหนาเพียงพออาจสมมุติได้ว่าเสาเข็มทุกต้นรับน้ำหนักเท่ากันคือ

$$R = \frac{P}{n} \le R_a \qquad (14.1)$$

เมื่อ R = น้ำหนักบรรทุกที่กระจายลงเสาเข็มแต่ละต้น

P = น้ำหนักบรรทุกใช้งาน = $DL + LL$

n = จำนวนเสาเข็ม

R_a = น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

จำนวนเสาเข็มจะหาออกมาเป็นเลขจำนวนเต็มปัดขึ้นจาก

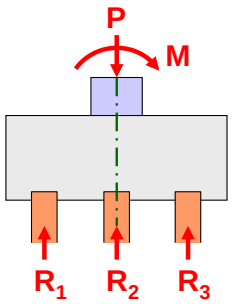
$$n = \frac{DL + LL}{R_a} \qquad (14.2)$$

โดยทั่วไปเสาเข็มจะถูกวางใกล้กันเพื่อลดค่าฐานรากหัวเข็ม แต่จะไม่สามารถวางได้ใกล้กว่า 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือน้อยกว่า 75 ซม. ได้ โดยทั่วไปเสาเข็มขนาด 30 ถึง 70 ตันจะวางห่างกัน 90 ซม.

การออกแบบฐานรากบนหัวเสาเข็มจะคล้ายกับการออกแบบฐานรากของเสาเดี่ยว โดยเริ่มจากการคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยจากเสาแล้วหารด้วยจำนวนเสาเข็มจะได้น้ำหนักประลัยที่รับโดยเข็มแต่ละต้น

$$R_u = \frac{1.4DL + 1.7LL}{n} \qquad (14.3)$$

ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักเยื้องศูนย์



รูปที่ 14.7 แรงในเสาเข็ม

ในกรณีที่มีโมเมนต์ถ่ายผ่านลงมาจากตอม่อเช่นเมื่อโครงสร้างรับแรงด้านข้างอันได้แก่แรงลมและแผ่นดินไหว

เสาเข็มแต่ละต้นจะรับน้ำหนักไม่เท่ากันโดยเสาเข็มทางด้านหนึ่งจะรับน้ำหนักมากกว่าอีกด้านหนึ่ง

$$R = \frac{P}{n} \pm \frac{M d_n}{\Sigma d_n^2} \le R_a \qquad (14.4)$$

เมื่อ R = น้ำหนักบรรทุกที่กระจายลงเสาเข็มแต่ละต้น

P = น้ำหนักบรรทุกใช้งาน = $DL + LL$

M = โมเมนต์ดัดใช้งาน

d_n = ระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นจากแกนศูนย์ถ่วงของกลุ่มเสาเข็ม

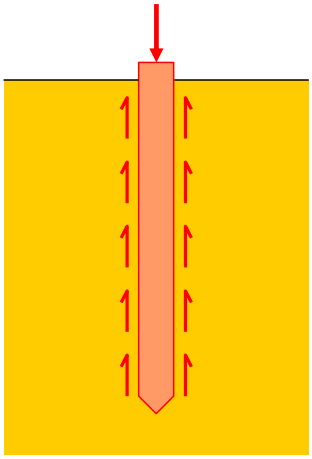
n = จำนวนเสาเข็ม

R_a = น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็ม

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานครที่เกี่ยวกับฐานราก

ในกรณีที่ไม่มีเอกสารแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของดิน

1. น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้บนชั้นดินเดิม ไม่เกิน 2 ตัน/ตร.ม.
2. หน่วยแรงฝืดที่ยอมให้ :
   - ดินที่ระดับความลึกไม่เกิน 7 เมตร
     หน่วยแรงฝืดที่ยอมให้ 600 กก./ตร.ม.
   - ดินที่ระดับความลึกเกิน 7 เมตร
     หน่วยแรงฝืดที่ยอมให้ 800 + 200L กก./ตร.ม.
     โดยที่ L คือความยาวส่วนที่เกิน 7 เมตร



ในกรณีที่มีเอกสารทดสอบคุณสมบัติดินหรือมีการทดสอบหากำลังของเสาเข็มในบริเวณก่อสร้างหรือข้างเคียง ให้ใช้กำลังเสาเข็มไม่เกินอัตราส่วนดังต่อไปนี้

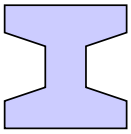
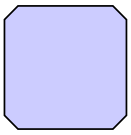
1. ไม่เกิน 0.40 เท่าของกำลังของเสาเข็มที่คำนวณจากคุณสมบัติดิน
2. ไม่เกิน 0.40 เท่าของกำลังของเสาเข็มที่คำนวณจากสูตรการตอกเข็ม
3. ไม่เกิน 0.50 เท่าของกำลังของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบกำลังสูงสุด

กำลังของเสาเข็ม

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เป็นเสาเข็มที่ได้การทำคอนกรีตอัดแรงโดยใช้เส้นลวดแรงดึงสูงขนาด 4 5 และ 7 ม.ม. ในการก่อสร้างโดยใช้เสาเข็มชนิดนี้จะใช้การตอกด้วยปั้นจั่นโดยอาศัยแรงตกกระแทกอย่างรุนแรงของตุ้มน้ำหนักเพื่อส่งเสาเข็มลงในดิน ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการตอกไม่ให้เสาเข็มเกิดการแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มจะขึ้นความลึกของการตอก

ลักษณะและชนิดของชั้นดินซึ่งควรมีการเจาะสำรวจและวิเคราะห์ตามหลักปฐพีกลศาสตร์ ขณะตอกจะต้องบันทึกจำนวนครั้งในการตอกต่อความลึกที่เข็มจมลงในดิน (Blow count) เพื่อตรวจสอบว่าปลายเข็มถึงชั้นดินที่มีกำลังตามต้องการหรือยัง น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มอัดแรงในตารางที่ 14.1 เป็นเพียงกำลังของตัวเสาเพื่อใช้ในการออกแบบฐานรากเท่านั้น

ตารางที่ 14.1 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

รูปตัด	รหัส	ขนาดเข็ม	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	เส้นรอบรูป (ซม.)	น้ำหนัก (กก./ม.)	น้ำหนักปลอดภัย (ตัน)
	I-18	0.18 m x 0.18 m	235	83	57	15
	I-22	0.22 m x 0.22 m	332	105	80	22
	I-26	0.26 m x 0.26 m	460	126	110	30
	I-30	0.30 m x 0.30 m	570	154	137	43
	I-35	0.35 m x 0.35 m	880	165	211	57
	I-40	0.40 m x 0.40 m	1235	180	296	80
	S-16	0.16 m x 0.16 m	256	64	61	15
	S-18	0.18 m x 0.18 m	324	72	78	21
	S-22	0.22 m x 0.22 m	484	88	116	30
	S-26	0.26 m x 0.26 m	676	104	160	43
	S-30	0.30 m x 0.30 m	900	120	216	50
	S-35	0.35 m x 0.35 m	1225	140	294	80
	S-40	0.40 m x 0.40 m	1600	160	384	100

เสาเข็มเจาะ เสาเข็มแบบตอกมักสร้างปัญหาในการก่อสร้างเพราะเข็มอาจแตกร้าวได้ ก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนซึ่งอาจก่อความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้างและรบกวนผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงอีกด้วย ดังนั้นในงานก่อสร้างในบริเวณชุมชนที่มีสภาพดินอ่อนจึงมักใช้เข็มเจาะ โดยจะใช้ปลอกเหล็กเสียบลงในดินแล้วตักดินออก ใส่เหล็กเสริมที่ผูกไว้ลงไป แล้วเทคอนกรีตตาม เนื่องจากเข็มเจาะอาจมีขนาดได้ใหญ่มาก จึงใช้เป็นฐานรากอาคารที่มีขนาดใหญ่และสูงมากได้อีกด้วย สำหรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของตัวเข็มเจาะอาจประมาณได้จากสูตรง่ายๆคือ

$$P_a = 0.25(0.85f'_cA_g) \qquad (14.5)$$

โดยทั่วไปแล้ววิศวกรโครงสร้างจะกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มและน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มที่ต้องการ (ตัน/ต้น) ซึ่งประมาณได้จากสมการ (14.5) จากนั้นเมื่อจะทำการก่อสร้างก็จะมาเจาะสำรวจวิเคราะห์ชั้นดินในบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง เพื่อหาความลึกที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็ม

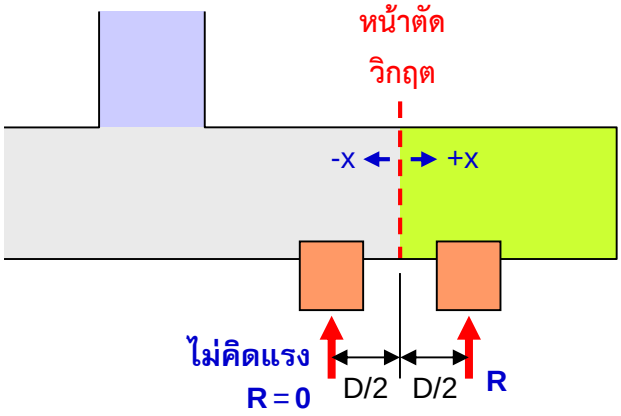
หน้าตัดวิกฤตรับการเฉือนในฐานรากเสาเข็ม

การเฉือนคาน : เช่นเดียวกับฐานรากแผ่รับเสาเดี่ยว ความลึกของฐานรากหัวเสามักจะถูกควบคุมโดยแรงเฉือน หน้าตัดวิกฤติจะเหมือนในฐานแผ่ จะต่างกันตรงที่แรงเฉือนที่เกิดจะมาจากแรงกระทำเป็นจุดจากเสาเข็มแทนที่จะเป็นแรงดันแบกทานสม่ำเสมอ

ดังนั้นจึงมีปัญหาว่าจะคำนวณหน้าตัดวิกฤติอย่างไรถ้าเส้นรอบรูปหน้าตักวิกฤติของเสาเข็มแต่ละต้นเกิดซ้อนทับกันในกรณีเช่นนี้ ACI พิจารณาถึงความเป็นจริงว่าแรงปฏิกิริยาของเสาเข็มนั้นจริงๆแล้วไม่ได้กระทำเป็นจุด แต่จะแผ่กระจายบนพื้นที่หัวเข็ม ดังนั้นสำหรับเสาเข็มที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D ให้คำนวณโดยยึดหลักดังนี้

1. แรงปฏิกริยาทั้งหมดจากเสาเข็มต้นใดก็ตามที่อยู่นอกหน้าตัดออกไป D/2 หรือมากกว่า ให้พิจารณาว่าทำให้เกิดแรงเฉือนที่หน้าตัดนั้น

2. แรงปฏิกริยาทั้งหมดจากเสาเข็มต้นใดก็ตามที่อยู่ในหน้าตัดเข้ามาไป D/2 หรือมากกว่า ให้พิจารณาว่าไม่ทำให้เกิดแรงเฉือนที่หน้าตัดนั้น



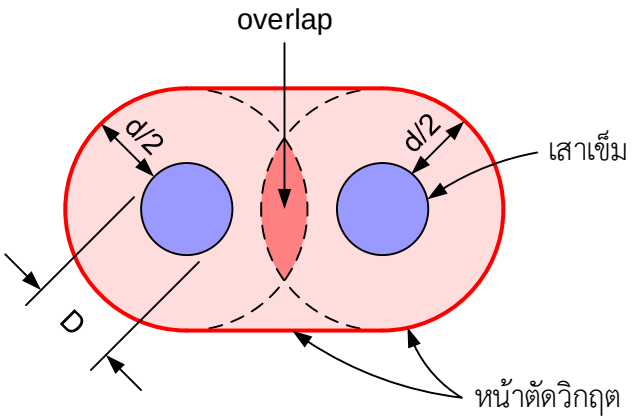
รูปที่ 14.8 การคิดแรงเฉือนบริเวณหน้าตัดวิกฤต

3. สำหรับเสาเข็มต้นใดก็ตามที่อยู่ระหว่างกลางของข้อหนึ่งและสอง ให้ทำการประมาณเชิงเส้นตรงระหว่างค่าเต็มที่ระยะ D/2 ภายนอกหน้าตัด และค่าศูนย์ที่ระยะ D/2 ภายในหน้าตัด

$$-D/2 \le x \le D/2: \qquad R' = \left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)R \qquad (14.6)$$

เมื่อ x คือระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตและศูนย์กลางเสาเข็ม มีค่าเป็นลบเมื่อเสาเข็มอยู่ภายในหน้าตัดวิกฤต และมีค่าเป็นบวกเมื่อเสาเข็มอยู่นอกหน้าตัดวิกฤต

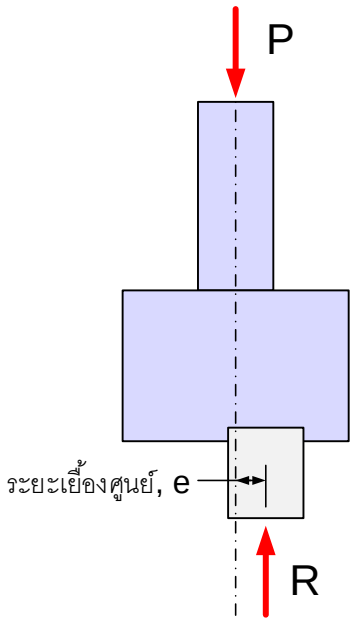
การเฉือนทะลุ : นอกจากการตรวจสอบแรงเฉือนทางเดียวและสองทางดังได้กล่าวมาแล้ว จะต้องตรวจสอบการเฉือนทะลุของเสาเข็มแต่ละต้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฐานรากที่มีเสาเข็มจำนวนน้อยแต่รับน้ำหนักมากๆ เส้นรอบรูปวิกฤติจะอยู่ที่ระยะ d/2 จากขอบเสาเข็ม อย่างไรก็ตามสำหรับฐานรากที่คอนข้างลึกและเข็มอยู่ใกล้กัน เส้นรอบรูปวิกฤติอาจซ้อนทับกัน ในกรณีเช่นนี้การแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่เส้นรอบรูปทั้งสองเสาเข็มซึ่งมีความยาวน้อยที่สุดดังในรูปที่ 14.9



รูปที่ 14.9 หน้าตัดวิกฤติสำหรับการเฉือนทะลุของเสาเข็มที่อยู่ใกล้กัน

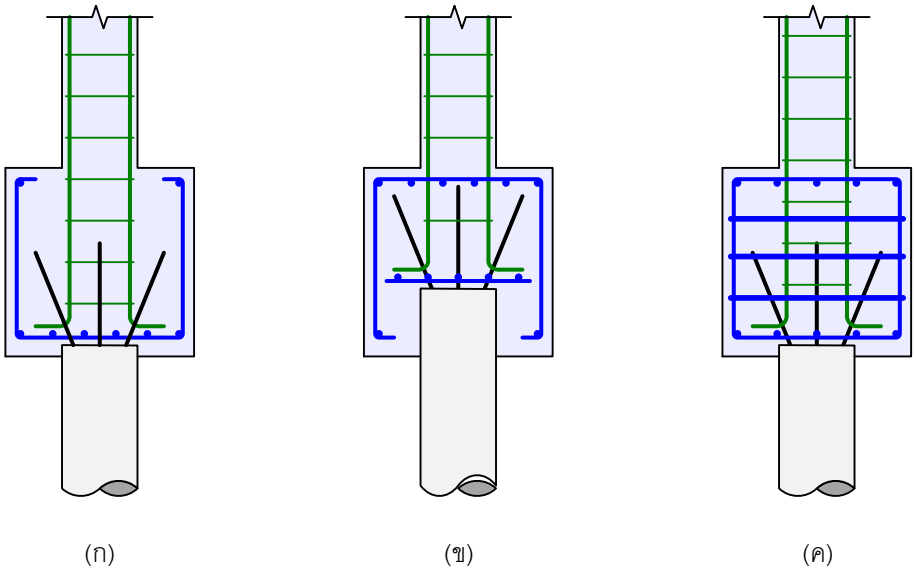
ฐานรากเสาเข็ม 1 ต้น F1

มักใช้ในอาคารขนาดเล็กและบ้านพักอาศัยที่มีน้ำหนักบรรทุกน้อย ฐานรากเสาเข็ม 1 ต้นจะวางเสาเข็มให้ตรงกับศูนย์กลางของตอม่อพอดี แต่มักจะมีปัญหาเนื่องจากการตอกเข็มมักจะเยื้องศูนย์หรือเมื่อมีแรงมากระทำทางด้านข้างทำให้เกิดการวิบัติดังในรูปที่ 14.10 โดยการเยื้องศูนย์ในแต่ละทิศทางไม่ควรเกิน 0.1D เมื่อ D คือขนาดของเสาเข็ม ถ้ามีค่าเกินต้องคำนวณปรับแก้ฐานรากและตอม่อเพื่อต้านทานโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



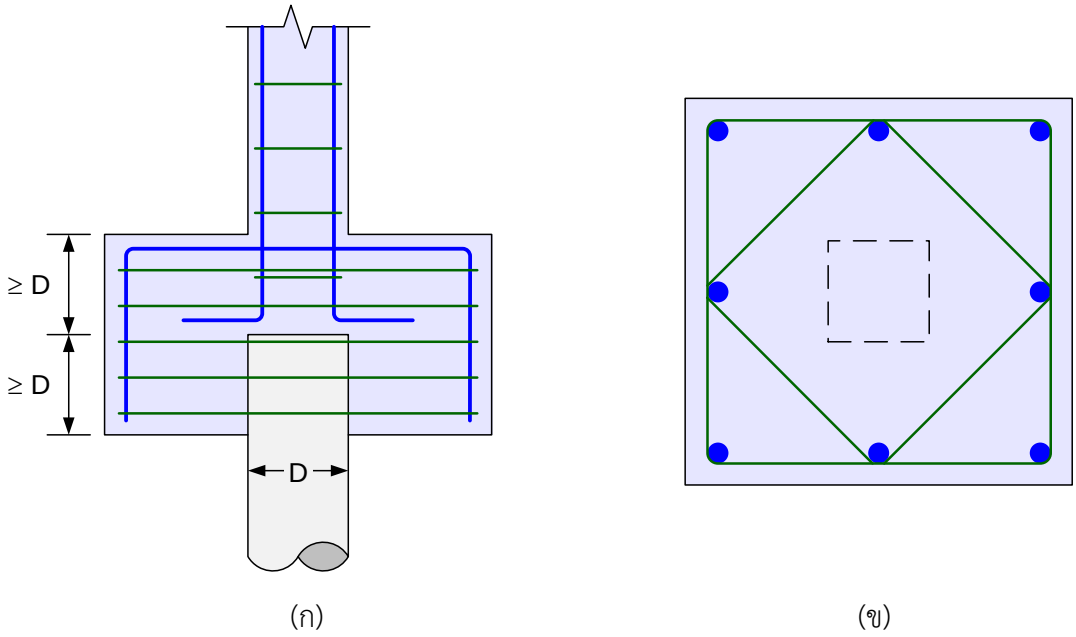
รูปที่ 14.10 การเยื้องศูนย์ของเสาเข็ม

การเสริมเหล็กในฐานรากเสาเข็มเดี่ยวมีหลายรูปแบบดังแสดงในรูป 14.11 คือ (ก) ทำตะแกรงรองรับอย่างเดียวซึ่งอาจเกิดปัญหาได้ง่ายเมื่อเกิดการเยื้องศูนย์ (ข) ทำโครงเหล็กครอบเป็นตะแกรงสองชั้น และ (ค) เพิ่มปลอกเหล็กด้านข้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่จุดต่อ



รูปที่ 14.11 รูปแบบการเสริมเหล็กในเสาเข็มหนึ่งต้น

จากในรูป 14.11(ข) ระยะที่หัวเสาเข็มฝังเข้าไปในฐานรากต้องไม่น้อยกว่าระยะ D โดยออกแบบตอม่อให้สามารถรับแรงจากน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์เพิ่มเติมจากการเยื้องศูนย์เท่ากับระยะเคิร์น B/6 เมื่อ B คือความกว้างด้านที่แคบของฐานราก



(ก) (ข)

รูปที่ 14.12 การเสริมเหล็กในฐานราก F1 เพื่อรองรับการเยื้องศูนย์

โมเมนต์ดัดจากการเยื้องศูนย์จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในฐานรากจึงต้องเสริมเหล็กปลอกโอบรัดดังในรูปที่ 14.12(ข) เหล็กปลอกที่นิยมใช้คือ 2-ป. RB9 @ 0.10 ม. เหล็กยืนใช้ตามความเหมาะสมกับขนาดฐานรากโดยระยะห่างเหล็กยืนต้องไม่เกิน 45 ซม.

ความกว้างฐานราก $B = 2D + 5C_1$ (14.7)

เมื่อ D คือขนาดเสาเข็ม และ C_1 คือระยะหุ้มคอนกรีต ฐานรากโดยทั่วไป $C_1 = 7.5$ ซม. และในพื้นที่กัดกร่อนสูงเช่นบริเวณชายทะเลหรือดินเค็มใช้ $C_1 = 10$ ซม.

ตัวอย่างที่ 14.1 ออกแบบฐานรากเสาเข็มตอก I – 0.30×0.30 ม. ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 40 ตัน/ต้น ตอม่อมีขนาด 0.30×0.30 ม.^{2} น้ำหนักบรรทุกคงที่ 18 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 14 ตัน กำลังคอนกรีต $f'_c = 240$ กก./ซม.^{2} กำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4{,}000$ กก./ซม.^{2}

วิธีทำ

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ $n = \dfrac{1.1(18+14)}{40} = 0.88 \rightarrow 1$ ต้น

ขนาดเสาเข็ม $D = 0.30$ เมตร

ระยะฝังเสาเข็มในฐานราก $\geq D = 0.30$ เมตร

ระยะหัวเข็มถึงผิวบนฐานราก $\geq D = 0.30$ เมตร

ความสูงฐานราก $H_f = 0.30 + 0.30 = 0.60$ เมตร

พื้นที่ก่อสร้างเป็นพื้นดินทั่วไป ระยะหุ้ม C = 0.075 เมตร

ความกว้างฐานราก B = 2D + 5C = 2(0.30) + 5(0.075) = 0.975 → 1.00 เมตร

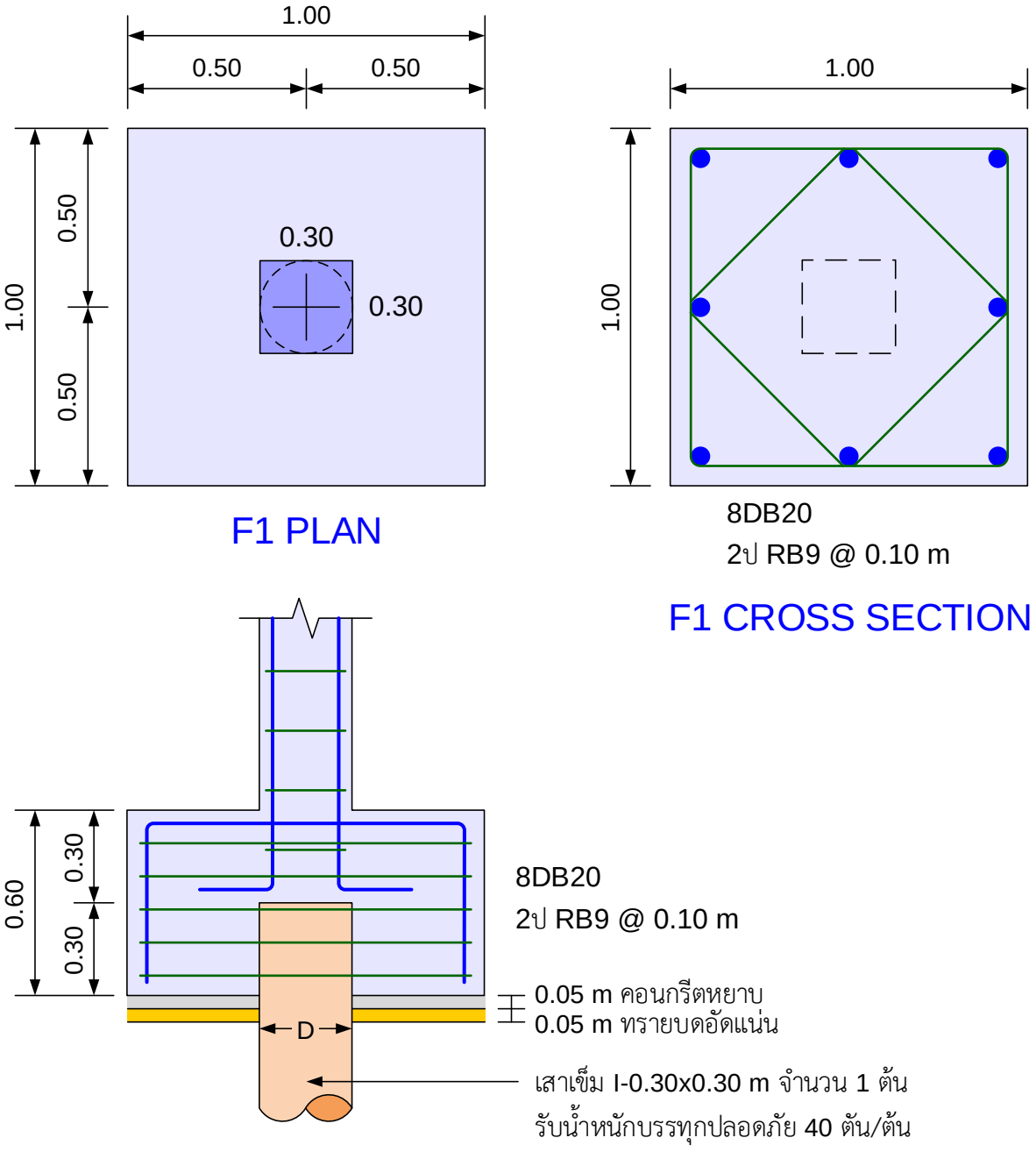
น้ำหนักฐานราก $W_f = 2.4 \times 0.6 \times 1.0^2 = 1.44$ ตัน

น้ำหนักบรรทุกรวม P = 18 + 14 + 1.44 = 33.44 ตัน < 40 ตัน **OK**

กำหนดเหล็กยืนและเหล็กปลอก โดยใช้เหล็กยืน 8DB20 ระยะหุ้มสองข้างๆละ 7.5 ซม.

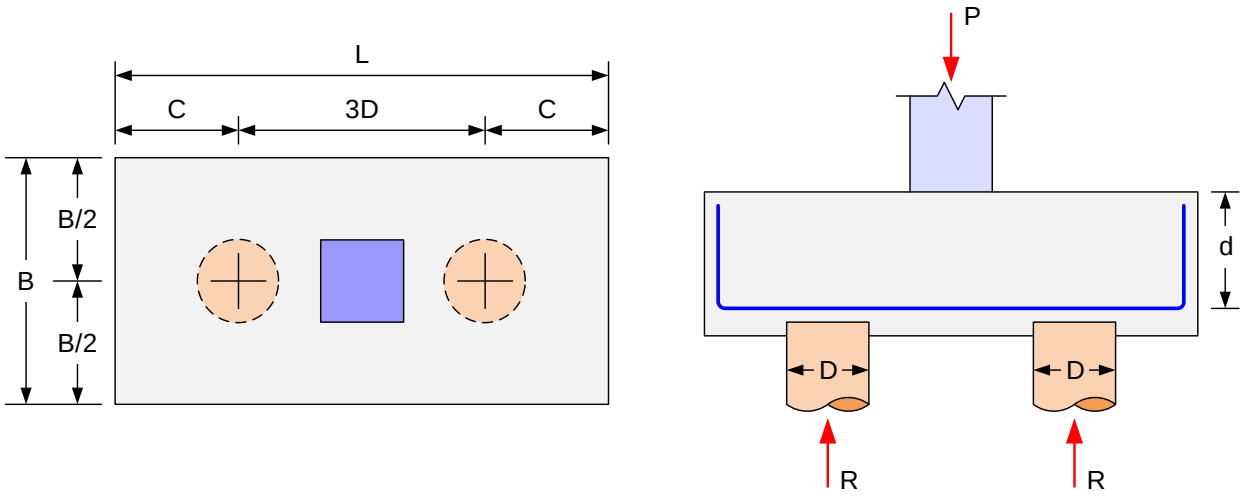
ระยะห่างเหล็กเสริม = (100 – 2(7.5) – 2.5)/2 = 41.25 ซม. < 45 ซม. **OK**

ดังนั้นใช้เหล็กยืน 8DB20 และเหล็กปลอก 2ป RB9 @ 0.10 ม.



รูปที่ 14.13 แบบรายละเอียดฐานราก F1 ในตัวอย่างที่ 14.1

รูปที่ 14.14 แสดงรูปแปลนและรูปด้านข้างของฐานรากบนเสาเข็มสองต้นซึ่งมีขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง D ฐานรากมีความลึกประสิทธิผล d

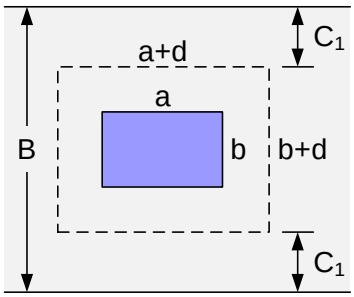


(ก) (ข)

รูปที่ 14.14 ฐานรากบนเสาเข็มสองต้น

ความกว้างของฐานราก B พิจารณาจากระยะ B/2 ต้องไม่น้อยกว่าขนาดเสาเข็ม D นั่นคือ

$$B \geq 2D \qquad (14.8)$$



นอกจากนั้นความกว้างฐานรากยังต้องไม่น้อยกว่าระยะจากเส้นรอบรูปการเฉือนทะลุออกมาข้างละ C_1 (ระยะหุ้ม) :

$$B \geq b + d + 2C_1 \qquad (14.9)$$

เมื่อ b = ความกว้างตอม่อ, d = ความลึกประสิทธิผลของฐานราก และ C_1 = 7.5 ซม. โดยทั่วไป และ 10 ซม.ในพื้นที่กัดกร่อนสูงเช่นบริเวณชายทะเลหรือดินเค็ม

ระยะห่างระหว่างเสาเข็มควรอยู่ระหว่าง 1.5D ถึง 3D ระยะ 3D จะให้ผลดีที่สุด

ระยะ C จากขอบฐานรากด้านข้างถึงเสาเข็ม ต้องไม่น้อยกว่าขนาดเสาเข็ม D

ความยาวฐานราก $L = 3D + 2C \qquad (14.10)$

ในการออกแบบฐานรากจะคิดเหมือนเป็นคานช่วงเดี่ยวที่มีแรงกระทำลงกลางช่วงจากเสาตอม่อและเสาเข็มทำหน้าที่เป็นจุดรองรับทั้งสองข้างโดยจะพิจารณาให้ต้านทานแรงคือ

1. **การเฉือนคาน** โดยใช้หน้าตัดวิกฤตที่ระยะ d จากขอบตอม่อ
2. **การเฉือนทะลุ** โดยใช้หน้าตัดวิกฤตที่ระยะ d/2 จากขอบตอม่อ
3. **การดัด** โดยใช้หน้าตัดวิกฤตที่ขอบตอม่อ และ ความลึกประสิทธิผล d

ตัวอย่างที่ 14.2 ออกแบบฐานรากเสาเข็มตอก I – 0.26×0.26 ม. ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 25 ตัน/ต้น ตอม่อมีขนาด 0.30×0.30 ม.^{2} น้ำหนักบรรทุกคงที่ 22 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 18 ตัน กำลังคอนกรีต f'_c = 240 กก./ซม.^{2} กำลังครากเหล็กเสริม f_y = 4,000 กก./ซม.^{2}

วิธีทำ

1. จัดขนาดฐานราก สมมุติน้ำหนักฐานราก 20%

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ $n = \dfrac{1.2(22+18)}{25} = 1.92 \rightarrow 2$ ต้น

ขนาดเสาเข็ม D = 0.26 เมตร,

ระยะห่างเสาเข็ม 3D = 3×0.26 = 0.78 → 0.80 เมตร

ระยะขอบ C ≥ D → 0.30 เมตร

ความยาวฐานราก L = 0.80 + 2×0.30 = 1.40 เมตร

ลองใช้ฐานรากหนา 40 ซม. → ความลึกประสิทธิผล d = 30 ซม.

ความกว้างฐานราก B ≥ 2D = 2×0.26 = 0.52 เมตร

B ≥ b + d + 2C_1 = 0.3+0.3+2×0.075 = 0.75 เมตร **ควบคุม**

ดังนั้นใช้ความกว้าง B = 0.80 เมตร แบ่งครึ่งที่ระยะ B/2 = 0.40 เมตร

น้ำหนักฐานราก W_f = 0.80×1.40×0.4×2.4 = 1.08 ตัน

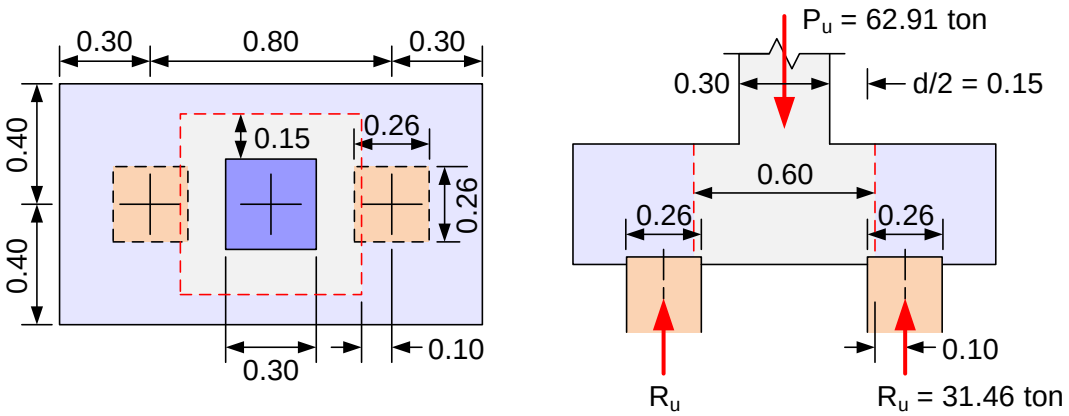
รวมน้ำหนักทั้งหมด P = 22+1.08+18 = 41.08 ตัน

น้ำหนักลงเข็ม R = 41.08/2 = 20.54 ตัน < 25 ตัน **OK**

น้ำหนักเพิ่มค่า P_u = 1.4(22+1.08) + 1.7×18 = 62.91 ตัน

แรงในเสาเข็ม R_u = 62.91/2 = 31.46 ตัน

2. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ ที่ระยะ d/2 = 15 ซม. จากขอบตอม่อ



รูปที่ 14.15 หน้าตัดวิกฤตเฉือนทะลุในตัวอย่างที่ 14.2

จากในรูปที่ 14.15 ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่นอกหน้าตัดวิกฤต 0.10 ม. (+x) น้อยกว่า D/2 = 0.26/2 = 0.13 ม. ดังนั้นปรับค่าแรงในเสาเข็ม R_u เป็น R'_u ตามสมการ (14.6)

แรงเฉือนทะลุ : $V_u = 2R'_u = 2R_u\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

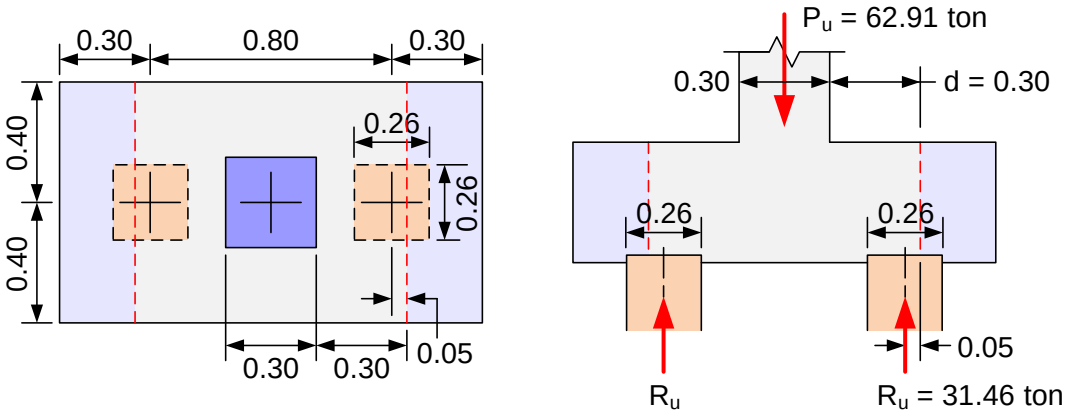
$= 2\times 31.46\left(\frac{1}{2}+\frac{0.10}{0.26}\right) = 55.66$ ตัน

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_0 = 4\times 0.60 = 2.40$ เมตร

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times 1.06\sqrt{240}\times 240\times 30/1{,}000$

$= 100.5$ ตัน $> V_u$ **OK**

3. ตรวจสอบการเฉือนคาน ที่ระยะ d = 30 ซม. จากขอบตอม่อ



รูปที่ 14.16 หน้าตัดวิกฤตเฉือนคานในตัวอย่างที่ 14.2

จากในรูปที่ 14.16 ศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ในหน้าตัดวิกฤต 0.05 ม. (-x) น้อยกว่า D/2 = 0.26/2 = 0.13 ม. ดังนั้นปรับค่าแรงในเสาเข็ม R_u เป็น R'_u ตามสมการ (14.6)

แรงเฉือนคาน : $V_u = R'_u = R_u\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

$= 31.46\left(\frac{1}{2}-\frac{0.05}{0.26}\right) = 9.68$ ตัน

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times 0.53\sqrt{240}\times 80\times 30/1{,}000$

$= 16.8$ ตัน $> V_u$ **OK**

4. ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด ความลึกประสิทธิผล d = 30 ซม.

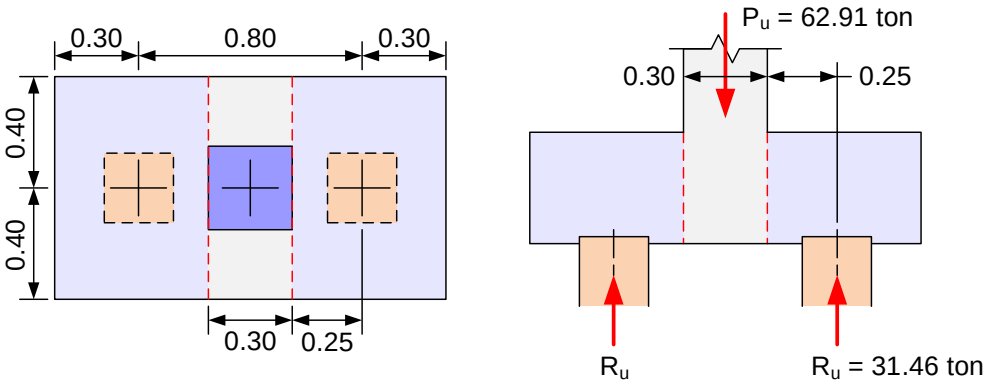
เหล็กเสริมด้านสั้น : ใช้ปริมาณเหล็กเสริมกันร้าว

$A_s = 0.0018\times 140\times 40 = 10.08$ ซม.^{2}

ใช้เหล็กเสริม **6-DB16** ($A_s = 6(2.01) = 12.06$ ซม.^{2})

ระยะห่าง s = (140 – 2×7.5)/5 = 25 ซม. < 3×40 = 120 ซม. **OK**

เหล็กเสริมด้านยาว : คำนวณโมเมนต์ที่หน้าตัดวิกฤตที่ผิวตอม่อ



รูปที่ 14.17 หน้าตัดวิกฤตการดัดในตัวอย่างที่ 14.2

โมเมนต์ดัด : $M_u = 31.46 \times 0.25 = 7.87$ ตัน-เมตร

$$R_n = \frac{7.87 \times 10^5}{0.9 \times 80 \times 30^2} = 12.15 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0031 < [\, \rho_{max} = 0.0197 \,]$$ **OK**

$A_s = \rho bd = 0.0031 \times 80 \times 30 = 7.44$ ซม.^{2}

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018 \times 80 \times 40 = 5.76$ ซม.^{2} $< A_s$ **OK**

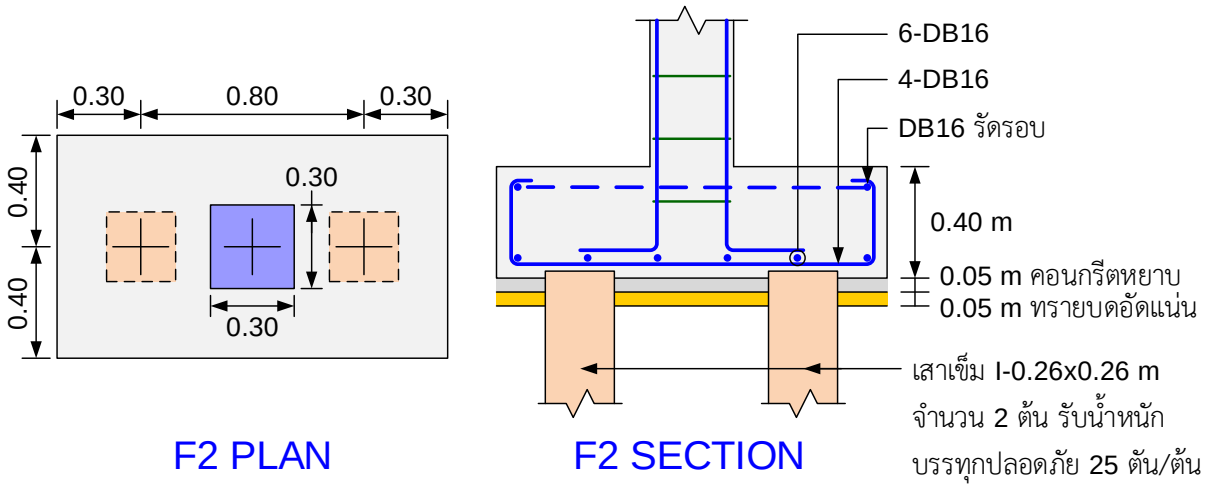
ใช้เหล็กเสริม **4-DB16** ($A_s = 4(2.01) = 8.04$ ซม.^{2})

ระยะห่าง $s = (80 - 2 \times 7.5)/3 = 21.7$ ซม. $< 3 \times 40 = 120$ ซม. **OK**

5. ตรวจสอบระยะฝังยึด

จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB16 : $l_d = 0.62$ ม.

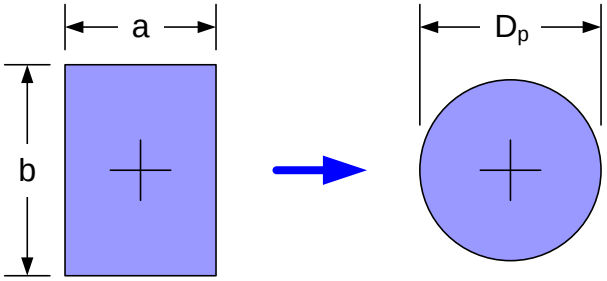
ความยาวเหล็กที่ฝังจริง $= (1.4 - 0.3)/2 - 0.075 = 0.475$ ม. $< l_d$ **ต้องงอฉาก**



รูปที่ 14.18 แบบรายละเอียดฐานราก F2 ในตัวอย่างที่ 14.2

ฐานรากเสาเข็ม 3 ต้น F3

เสาเข็ม 3 ต้นจะวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยมีตอม่ออยู่ตรงกลาง เพื่อความสะดวกในการคำนวณแรงเฉือน จะแปลงหน้าตัดตอม่อสี่เหลี่ยมเป็นวงกลมซึ่งมีพื้นที่เท่ากัน

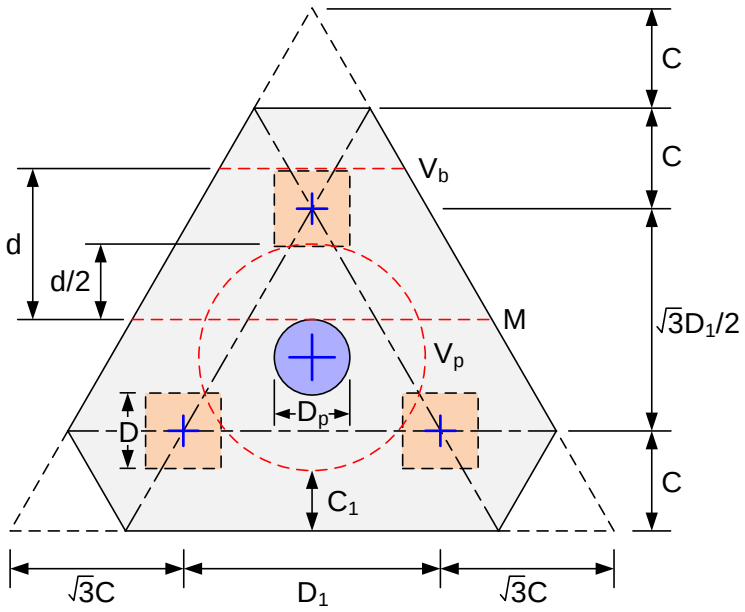


รูปที่ 14.19 การแปลงหน้าตัดเสาตอม่อไปเป็นหน้าตัดวงกลมพื้นที่เท่ากัน

$$ab = \frac{\pi}{4}D_p^2 \rightarrow D_p = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}} \qquad (14.11)$$

การเขียนแปลนฐานรากสามเหลี่ยม :

1. เขียนรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ละด้านยาว $D_1 = 3D$ เมื่อ D คือขนาดเสาเข็ม
2. ลากเส้นขนานด้านทั้งสามห่างออกไปเป็นระยะขอบ $C \geq D$
3. ตัดมุมสามเหลี่ยมรูปนอกเข้ามาเป็นระยะ C



รูปที่ 14.20 รูปแปลนฐานรากเสาเข็มสามต้น

แนวเส้นประวงกลม V_p สำหรับการเฉือนทะลุอยู่ห่างจากขอบตอม่อเท่ากับ d/2 โดยระยะห่างจากขอบฐานรากต้องไม่น้อยกว่าระยะหุ้ม C_1 ซึ่งถ้าคิดระยะจากศูนย์กลางตอม่อถึงขอบล่างฐานราก

$$\frac{D_p + d}{2} + C_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1\right)/3 + C$$

ดังนั้น $$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C - \frac{D_p + d}{2} \qquad (14.12)$$

ถ้าค่า C_1 ที่คำนวณได้จากสมการ (14.12) มีค่าน้อยกว่า 7.5 ซม. สำหรับกรณีทั่วไป และ 10 ซม. สำหรับกรณีกัดกร่อน ให้เพิ่มระยะ D_1 โดยแทนค่า C_1 ที่ต้องการลงในสมการ

$$D_1 = 2\sqrt{3}\left(\frac{D_p + d}{2} + C_1 - C\right) \qquad (14.13)$$

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่าลงตอม่อ $P_u = 1.4DL + 1.7LL$

แรงในเสาเข็มแต่ละต้น $R_u = P_u / 3$

การเฉือนทะลุ :

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p + d}{2} \qquad (14.14)$$

ถ้า $x \le -D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = 0$

ถ้า $-D/2 \le x \le D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u$

ความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤต

$$b_o = 2\pi\left(\frac{D_p + d}{2}\right) = \pi(D_p + d) \qquad (14.15)$$

กำลังเฉือนทะลุ $$\phi V_c = 1.06\phi\sqrt{f'_c}\, b_o d \qquad (14.16)$$

การเฉือนคาน : แนวเส้นประ V_b สำหรับการเฉือนคานอยู่ห่างจากขอบตอม่อเป็นระยะ d

ความยาว B_1 ของหน้าตัดวิกฤตคำนวณได้จากสูตร

$$B_1 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2} - d\right)}{\left(\frac{3D_1}{2\sqrt{3}} + 3C\right)} \qquad (14.17)$$

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2} - d \qquad (14.18)$$

ถ้า $x \le -D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = 0$

ถ้า $-D/2 \le x \le D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u$

กำลังเฉือนคาน $$\phi V_c = 0.53\phi\sqrt{f'_c}\,B_1 d \qquad (14.19)$$

โมเมนต์ดัด : แนวเส้นประ M สำหรับการดัดอยู่ที่ขอบตอม่อ

ความยาว B_2 ของหน้าตัดวิกฤตคำนวณได้จากสูตร

$$B_2 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}D_1}{2} + 3C\right)} \qquad (14.20)$$

โมเมนต์ดัด : $$M_u = R_u\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p}{2}\right) \qquad (14.21)$$

ตัวอย่างที่ 14.3 ออกแบบฐานรากเสาเข็มตอก S – 0.40×0.40 ม. ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น ตอม่อมีขนาด 0.40×0.60 ม.^{2} น้ำหนักบรรทุกคงที่ 100 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 80 ตัน กำลังคอนกรีต $f'_c = 240$ กก./ซม.^{2} กำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4{,}000$ กก./ซม.^{2}

วิธีทำ

1. จัดขนาดฐานราก สมมุติน้ำหนักฐานราก 20%

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ $n = \frac{1.2(100+80)}{75} = 2.88 \rightarrow 3$ ต้น

ฐานรากเสาเข็ม 3 ต้น แปลงหน้าตัดตอม่อเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง D_p

$$D_p = 2\sqrt{\frac{ab}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{40\times 60}{\pi}} = 55.3 \text{ ม.}$$

ขนาดต่างๆของฐานราก :

$D = 0.40$ ม. = ขนาดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ ม. = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3\times 0.40 = 1.20$ ม. = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10$ ม. = ระยะหุ้มคอนกรีต

สมมุติความลึกฐานราก = 0.40 ม. $\rightarrow$ ความลึกประสิทธิผล $d = 0.30$ ม.

ตรวจสอบระยะหุ้ม C_1 :

$$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}} + C - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.20}{2\sqrt{3}} + 0.40 - \frac{0.553 + 0.30}{2}$$

$= 0.32$ ม. > 0.10 ม. **OK**

พื้นที่ฐานราก A_F :

$$A_F = \frac{1}{2}\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right) - \sqrt{3}C^2$$

$$= \frac{1}{2}\left(1.20+2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\times 1.20+3\times 0.40\right)-\sqrt{3}\times 0.40^2$$

$= 2.62$ ตร.ม.

น้ำหนักฐานราก :

$W_f = 2.62\times 0.40\times 2.4 = 2.52$ ตัน

น้ำหนักบรรทุก :

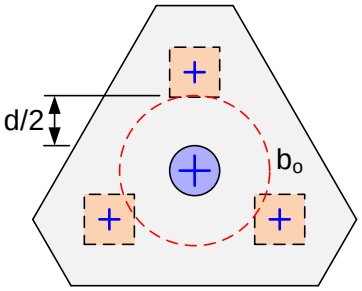
$P = 100 + 2.52 + 80 = 182.5$ ตัน

$R = 182.5/3 = 60.8$ ตัน $<$ กำลังเสาเข็ม 75 ตัน **OK**

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า :

$P_u = 1.4(100+2.52) + 1.7\times 80 = 279.5$ ตัน

$R_u = P_u/3 = 279.5/3 = 93.2$ ตัน



2. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}}-\frac{D_p+d}{2} = \frac{1.20}{\sqrt{3}}-\frac{0.553+0.30}{2} = 0.266 \text{ ม.} > [\, D/2 = 0.20 \text{ ม.} \,]$$

ดังนั้น $V_u = P_u = 279.5$ ตัน

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = \pi(D_p+d) = \pi(55.3+30) = 268$ ซม.

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times 1.06\sqrt{240}\times 268\times 30/1{,}000$

$= 112$ ตัน $<$ $[\, V_u = 279.5 \text{ ตัน} \,]$ **NG**

เพิ่มความหนาฐานราก โดยคำนวณความลึกประสิทธิผล d จากสูตร V_c

$$d = \frac{V_u}{1.06\phi\sqrt{f'_c}\, b_o} = \frac{279.5\times 10^3}{1.06\times 0.85\sqrt{240}\times 268} = 74.7 \text{ ซม.}$$

ลองฐานรากหนา = 0.90 ม. $\rightarrow$ ความลึกประสิทธิผล d = 0.80 ม.

ตรวจสอบระยะหุ้ม C_1 :

$$C_1 = \frac{D_1}{2\sqrt{3}}+C-\frac{D_p+d}{2} = \frac{1.20}{2\sqrt{3}}+0.40-\frac{0.553+0.80}{2}$$

$= 0.07$ ม. $<$ 0.10 ม. **NG**

ปรับระยะ D_1 :

$$D_1 = 2\sqrt{3}\left(\frac{D_p+d}{2}+C_1-C\right) = 2\sqrt{3}\left(\frac{0.553+0.80}{2}+0.10-0.40\right)$$

$= 1.304$ ม. $\rightarrow$ 1.35 ม.

พื้นที่ฐานราก A_F :

$$A_F = \frac{1}{2}\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}D_1 + 3C\right) - \sqrt{3}C^2$$

$$= \frac{1}{2}\left(1.35 + 2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\times 1.35 + 3\times 0.40\right) - \sqrt{3}\times 0.40^2$$

$= 2.96$ ตร.ม.

น้ำหนักฐานราก :

$$W_f = 2.96\times 0.90\times 2.4 = 6.39 \text{ ตัน}$$

น้ำหนักบรรทุก :

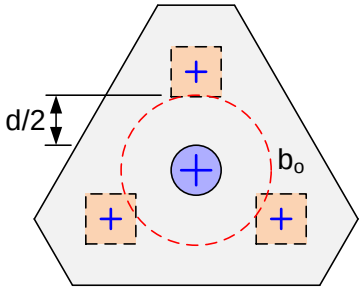
$$P = 100 + 6.39 + 80 = 186.4 \text{ ตัน}$$

$$R = 186.4/3 = 62.1 \text{ ตัน} < \text{กำลังเสาเข็ม } 75 \text{ ตัน}$$ **OK**

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า :

$$P_u = 1.4(100+6.39) + 1.7\times 80 = 285.0 \text{ ตัน}$$

$$R_u = P_u/3 = 285.0/3 = 95.0 \text{ ตัน}$$



3. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ (อีกครั้ง)

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}} - \frac{D_p + d}{2} = \frac{1.35}{\sqrt{3}} - \frac{0.553 + 0.80}{2} = 0.103 \text{ ม.} < [\, D/2 = 0.20 \text{ ม.} \,]$$

$$-D/2 \le x \le D/2 \rightarrow V_u = P_u\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{D}\right) = 285\left(\frac{1}{2} + \frac{0.103}{0.40}\right) = 215.9 \text{ ตัน}$$

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = \pi(D_p + d) = \pi(55.3 + 80) = 425$ ซม.

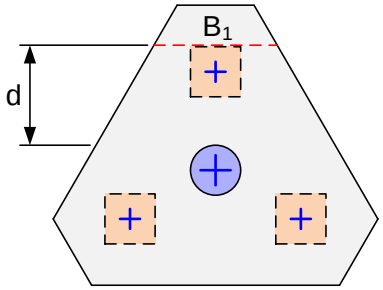
กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times 1.06\sqrt{240}\times 425\times 80/1{,}000$

$= 474.6$ ตัน $> [\, V_u = 279.5 \text{ ตัน} \,]$ **OK**

4. ตรวจสอบการเฉือนคาน

ความยาว B_1 ของหน้าตัดวิกฤตคำนวณได้จากสูตร

$$B_1 = \frac{\left(D_1 + 2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}} + 2C - \frac{D_p}{2} - d\right)}{\left(\frac{3D_1}{2\sqrt{3}} + 3C\right)}$$



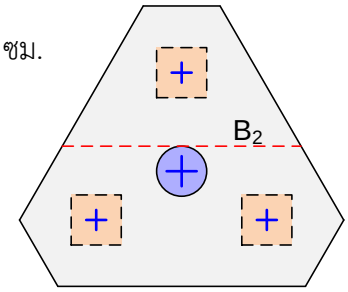
$$B_1 = \frac{\left(1.35+2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{1.35}{\sqrt{3}}+2\times 0.40-\frac{0.553}{2}-0.80\right)}{\left(\frac{3\times 1.35}{2\sqrt{3}}+3\times 0.40\right)} = 0.58 \text{ ม.}$$

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{\sqrt{3}}-\frac{D_p}{2}-d = \frac{1.35}{\sqrt{3}}-\frac{0.553}{2}-0.80 = -0.29 \text{ ม.}$$

$x \le -D/2 \rightarrow V_u = 0$ ดังนั้นฐานรากรับการเฉือนคานได้

5. ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด ความลึกประสิทธิผล d = 80 ซม.



ความยาว B_2 ของหน้าตัดวิกฤตคำนวณได้จากสูตร

$$B_2 = \frac{\left(D_1+2\sqrt{3}C\right)\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}}+2C-\frac{D_p}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}D_1}{2}+3C\right)}$$

$$B_2 = \frac{\left(1.35+2\sqrt{3}\times 0.40\right)\left(\frac{1.35}{\sqrt{3}}+2\times 0.40-\frac{0.553}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\times 1.35+3\times 0.40\right)} = 1.51 \text{ ม.}$$

โมเมนต์ดัด :

$$M_u = R_u\left(\frac{D_1}{\sqrt{3}}-\frac{D_p}{2}\right) = 95\left(\frac{1.35}{\sqrt{3}}-\frac{0.553}{2}\right) = 46.3 \text{ ตัน-เมตร}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi B_2 d^2} = \frac{46.3\times 10^5}{0.9\times 151\times 80^2} = 5.32 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right) = 0.0014 < [\,\rho_{max} = 0.0197\,] \quad \textbf{OK}$$

$$A_s = \rho B_2 d = 0.0014\times 151\times 80 = 16.9 \text{ ซม.}^2$$

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018B_2t = 0.0018\times 151\times 90 = 24.5 \text{ ซม.}^2 > A_s$

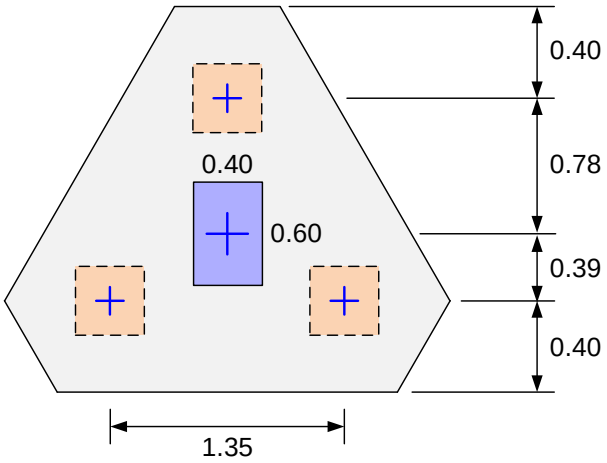
ใช้เหล็กเสริม **6-DB25** (A_s = 29.45 ซม.^{2})

6. ตรวจสอบระยะฝังยึด

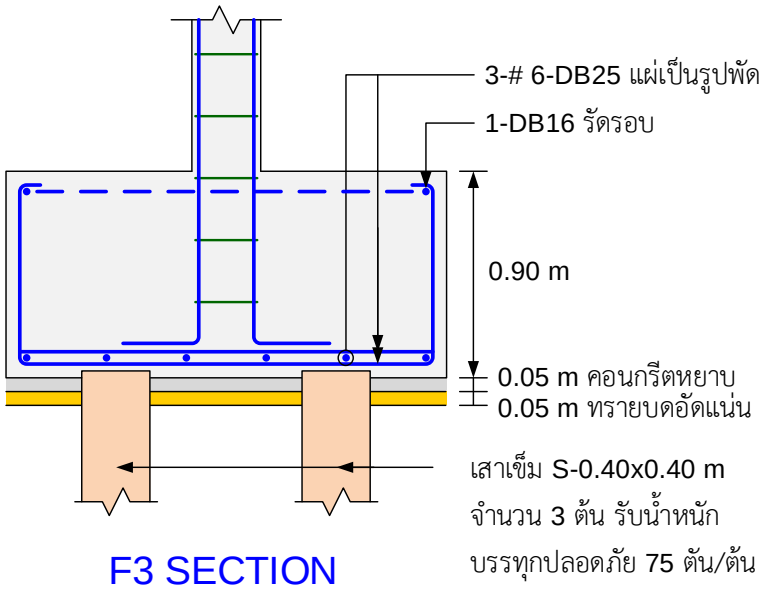
จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB25 : $l_d = 1.23$ ม.

ความยาวเหล็กที่ฝังจริง $= \frac{D_1}{\sqrt{3}}+C-\frac{D_p}{2}-0.10$

$= \frac{1.35}{\sqrt{3}}+0.40-\frac{0.553}{2}-0.10 = 0.803$ ม. $< l_d$ **ต้องงอฉาก**



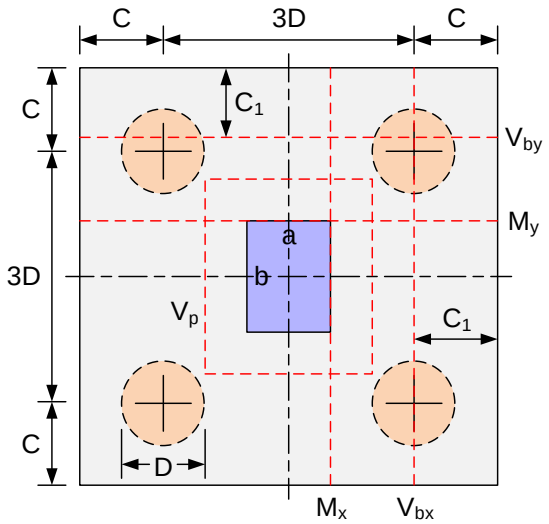
F3 PLAN



F3 SECTION

รูปที่ 14.21 แบบรายละเอียดฐานราก F3 ในตัวอย่างที่ 14.3

ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น F4



รูปที่ 14.22 ขนาดฐานเสาเข็ม 4 ต้น

ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นเป็นฐานรากที่มีเสถียรภาพดีเมื่อเทียบกับฐาน F1 และ F2 ก่อสร้างได้ง่ายกว่า F3

การกำหนดขนาดของฐานราก :

D = ขนาดเสาเข็ม

C ≥ D = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐาน

3D = ระยะห่างเสาเข็ม

3D+2C = ความกว้างยาวฐานราก

a, b = ขนาดเสาตอม่อ

C1 = ระยะหุ้มคอนกรีต = 0.075 ม. กรณีทั่วไป

= 0.10 ม. กรณีมีการกัดกร่อน

ในการออกแบบต้องตรวจสอบการเฉือนทะลุ (V_p), การเฉือนคาน (V_b) และโมเมนต์ดัด (M) ถ้าเสามีหน้ากว้าง a และ b ไม่เท่ากันต้องตรวจสอบทั้งสองทิศทาง ดังในรูปที่ 14.22

ตัวอย่างที่ 14.4 ออกแบบฐานรากเสาเข็มตอก S – 0.40×0.40 ม. ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 75 ตัน/ต้น ตอม่อมีขนาด 0.40×0.60 ม.^{2} น้ำหนักบรรทุกคงที่ 120 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 80 ตัน กำลังคอนกรีต $f'_c = 240$ กก./ซม.^{2} กำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4{,}000$ กก./ซม.^{2}

วิธีทำ

1. จัดขนาดฐานราก สมมุติน้ำหนักฐานราก 20%

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ $n = \dfrac{1.2(120+80)}{75} = 3.2 \rightarrow 4$ ต้น

ขนาดต่างๆของฐานราก :

$D = 0.40$ ม. = ขนาดเสาเข็ม

$C = D = 0.40$ ม. = ระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานราก

$D_1 = 3D = 3\times0.40 = 1.20$ ม. = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเสาเข็ม

$C_1 = 0.10$ ม. = ระยะหุ้มคอนกรีต

สมมุติความลึกฐานราก = 0.40 ม. $\rightarrow$ ความลึกประสิทธิผล $d = 0.30$ ม.

ความกว้างฐานราก $= D_1 + 2D = 1.20 + 2\times0.40 = 2.00$ ม.

น้ำหนักฐานราก :

$W_f = 2.00^2\times0.40\times2.4 = 3.84$ ตัน

น้ำหนักบรรทุก :

$P = 120 + 3.84 + 80 = 203.84$ ตัน

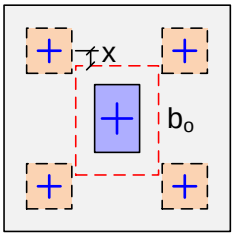
$R = 203.84/4 = 50.96$ ตัน < กำลังเสาเข็ม 75 ตัน **OK**

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า :

$P_u = 1.4(120+3.84) + 1.7\times80 = 309.4$ ตัน

$R_u = P_u/4 = 309.4/4 = 77.3$ ตัน

2. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ



หน้าตัดเสาตอม่อ 0.40×0.60 ม.: a = 0.40 ม., b = 0.60 ม.

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1 - a - d}{2} = \frac{1.20 - 0.40 - 0.30}{2} = 0.25 \text{ ม.} > [\, D/2 = 0.20 \text{ ม.} \,]$$

ถ้า $x \le -D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = 0$

ถ้า $-D/2 \le x \le D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right)$

ถ้า $x \ge D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u$

ในกรณีนี้ $x > D/2$ แรงเฉือนทะลุ $V_u = P_u = 309.4$ ตัน

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = 2(a+b+2d) = 2(40+60+2\times30) = 320$ ซม.

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times1.06\sqrt{240}\times320\times30/1{,}000$

$= 134.0$ ตัน $<$ [$V_u = 309.4$ ตัน] **NG**

กำลังเฉือนทะลุไม่เพียงพอ เพิ่มค่า d โดยพิจารณาจาก

$$\phi V_c = 1.06\phi\sqrt{f'_c}\,b_o d = V_u$$

$$1.06\phi\sqrt{f'_c}\times2(a+b+2d)d = V_u$$

แทนค่าตัวแปรแล้วแก้สมการกำลังสองเพื่อหาค่า d

$$d^2+50d-5445 = 0 \rightarrow d = 52.91 \text{ ซม.}$$

เลือกฐานรากหนา 70 ซม. ความลึกประสิทธิผล d = 60 ซม.

น้ำหนักฐานราก :

$$W_f = 2.00^2\times0.70\times2.4 = 6.72 \text{ ตัน}$$

น้ำหนักบรรทุก :

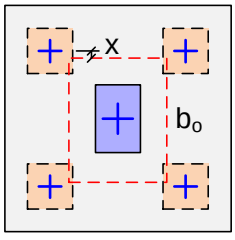
$$P = 120 + 6.72 + 80 = 206.72 \text{ ตัน}$$

$R = 206.72/4 = 51.68$ ตัน $<$ กำลังเสาเข็ม 75 ตัน **OK**

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า :

$$P_u = 1.4(120+6.72) + 1.7\times80 = 313.4 \text{ ตัน}$$

$$R_u = P_u/4 = 313.4/4 = 78.4 \text{ ตัน}$$



3. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ (อีกครั้ง)

ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1-a-d}{2} = \frac{1.20-0.40-0.60}{2} = 0.10 \text{ ม.} < [\, D/2 = 0.20 \text{ ม.} \,]$$

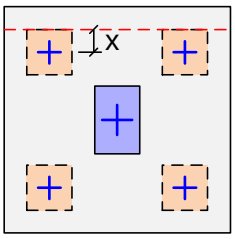
$$-D/2 \le x \le D/2 \rightarrow V_u = P_u\left(\frac{1}{2}+\frac{x}{D}\right) = 313.4\left(\frac{1}{2}+\frac{0.10}{0.40}\right) = 235.1 \text{ ตัน}$$

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = 2(a+b+2d) = 2(40+60+2\times60) = 440$ ซม.

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times1.06\sqrt{240}\times440\times60/1{,}000$

$= 368.5$ ตัน $>$ [$V_u = 309.4$ ตัน] **OK**

4. ตรวจสอบการเฉือนคาน

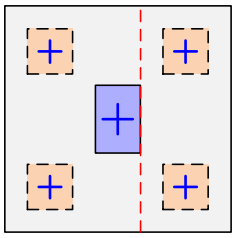


ระยะ x จากหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

$$x = \frac{D_1}{2} - \frac{a}{2} - d = \frac{1.20}{2} - \frac{0.40}{2} - 0.60 = -0.20 \text{ ม.}$$

$x \le -D/2 \rightarrow V_u = 0$ ดังนั้นฐานรากรับการเฉือนคานได้

5. ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด ความลึกประสิทธิผล d = 60 ซม.



โมเมนต์ดัด : (เหล็กเสริมแนวนอน)

$$M_u = 2R_u\left(\frac{D_1-a}{2}\right) = 2\times78.4\left(\frac{1.2-0.4}{2}\right)$$

$= 62.7$ ตัน-เมตร

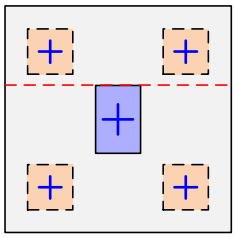
$$R_n = \frac{M_u}{\phi bd^2} = \frac{62.7\times10^5}{0.9\times200\times60^2} = 9.68 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right) = 0.0025 < [\ \rho_{max} = 0.0197\ ]$$ **OK**

$A_s = \rho bd = 0.0025\times200\times60 = 29.8$ ซม.^{2}

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times200\times70 = 25.2$ ซม.^{2} $< A_s$ **OK**

ใช้เหล็กเสริม **7-DB25** ($A_s = 34.36$ ซม.^{2})



โมเมนต์ดัด : (เหล็กเสริมแนวตั้ง)

$$M_u = 2R_u\left(\frac{D_1-b}{2}\right) = 2\times78.4\left(\frac{1.2-0.6}{2}\right)$$

$= 47.0$ ตัน-เมตร

$$R_n = \frac{M_u}{\phi bd^2} = \frac{47.0\times10^5}{0.9\times200\times60^2} = 7.26 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right) = 0.0019 < [\ \rho_{max} = 0.0197\ ]$$ **OK**

$A_s = \rho bd = 0.0019\times200\times60 = 22.2$ ซม.^{2}

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times200\times70 = 25.2$ ซม.^{2} $> A_s$

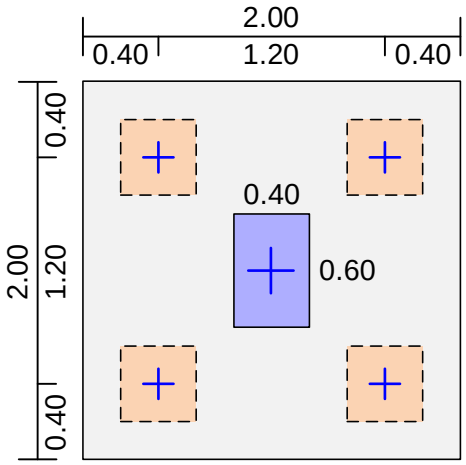
ใช้เหล็กเสริม **6-DB25** ($A_s = 29.45$ ซม.^{2})

6. ตรวจสอบระยะฝังยึด

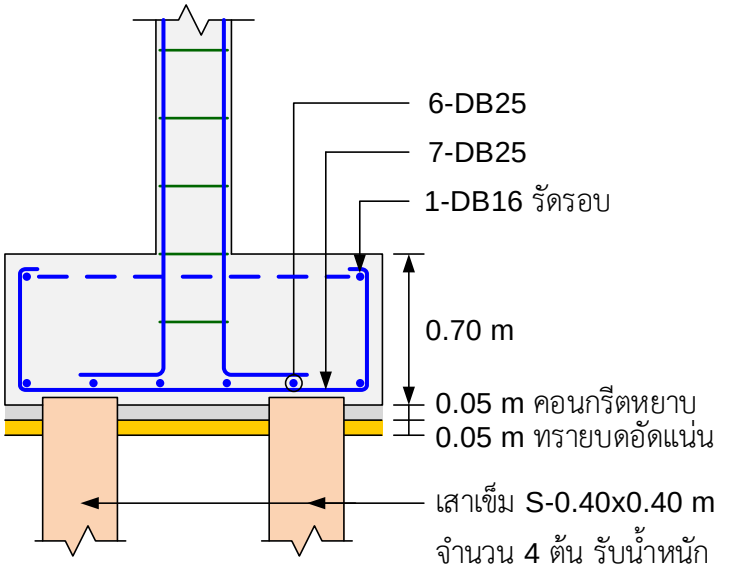
จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB25 : $l_d = 1.23$ ม.

ความยาวเหล็กที่ฝังจริง $= \frac{D_1}{2} + C - \frac{b}{2} - 0.10$

$= \frac{1.20}{2} + 0.40 - \frac{0.60}{2} - 0.10 = 0.60$ ม. $< l_d$ **ต้องงอฉาก**



F4 PLAN



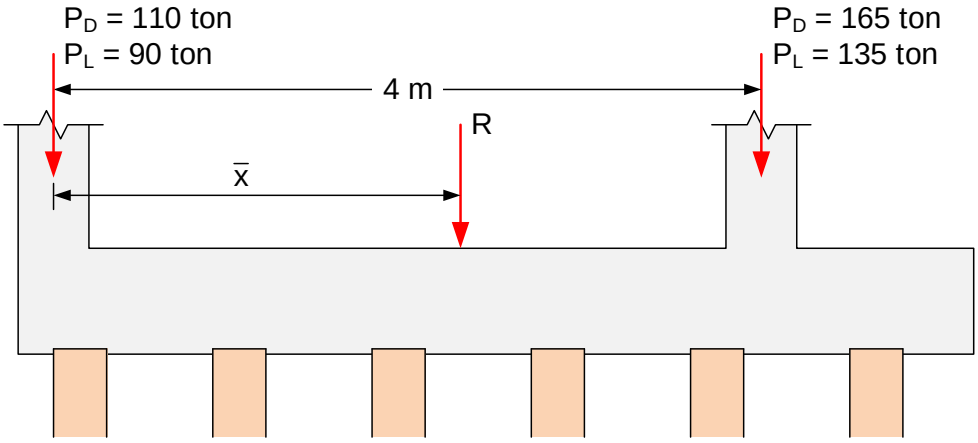
F4 SECTION

รูปที่ 14.23 แบบรายละเอียดฐานราก F4 ในตัวอย่างที่ 14.4

ฐานรากร่วมเสาเข็ม

คือฐานรากที่รองรับเสาตอม่อตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ใช้หลักการเช่นเดียวกับในบทที่แล้วคือจัดขนาดฐานรากซึ่งในคราวนี้จะเป็นจำนวนเสาเข็มเพื่อให้ศูนย์กลางของแรงต้านตรงกับแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกรวมที่กระทำจากเสาตอม่อ

ตัวอย่างที่ 14.5 ออกแบบฐานรากร่วมเพื่อรับเสาตอม่อสองต้น เสาต้นริมที่อยู่ชิดเขตรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ 110 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 90 ตัน เสาต้นในรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ 165 ตัน น้ำหนักบรรทุกจร 135 ตัน เสาตอม่อทั้งสองมีขนาด 0.40×0.40 ม. อยู่ห่างกัน 4 ม. เสาเข็มตอก S – 0.22×0.22 ม. ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ 30 ตัน/ต้น กำลังคอนกรีต $f'_c = 240$ กก./ซม.^{2} กำลังครากเหล็กเสริม $f_y = 4{,}000$ กก./ซม.^{2}



รูปที่ 14.24 ฐานรากร่วมเสาเข็มในตัวอย่างที่ 14.5

วิธีทำ

1. จัดขนาดฐานราก โดยให้ศูนย์ถ่วงเสาเข็มตรงกับแรงลัพธ์น้ำหนักบรรทุก

กำหนดตำแหน่งแรงลัพธ์ R โดยการหาโมเมนต์รอบศูนย์กลางเสาต้นริม :

$$(110+90+165+135)\ \bar{x} = (165+135)(4)$$

$$\bar{x} = 2.4 \text{ เมตร}$$

กำหนดให้ศูนย์กลางฐานราก(C.G.)อยู่ตำแหน่งเดียวกับ R :

ระยะจาก C.G. ถึงขอบฐานรากด้านซ้าย $= 2.4 + 0.4/2 = 2.6$ เมตร

ความยาวฐานราก, **L** $= 2 \times 2.6 =$ **5.2 เมตร**

เนื่องจากฐนรากร่วมมีขนาดใหญ่ สมมุติน้ำหนักฐานราก 30%

จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ $n = \dfrac{1.3(110+90+165+135)}{30} = 21.7 \rightarrow 22$ ต้น

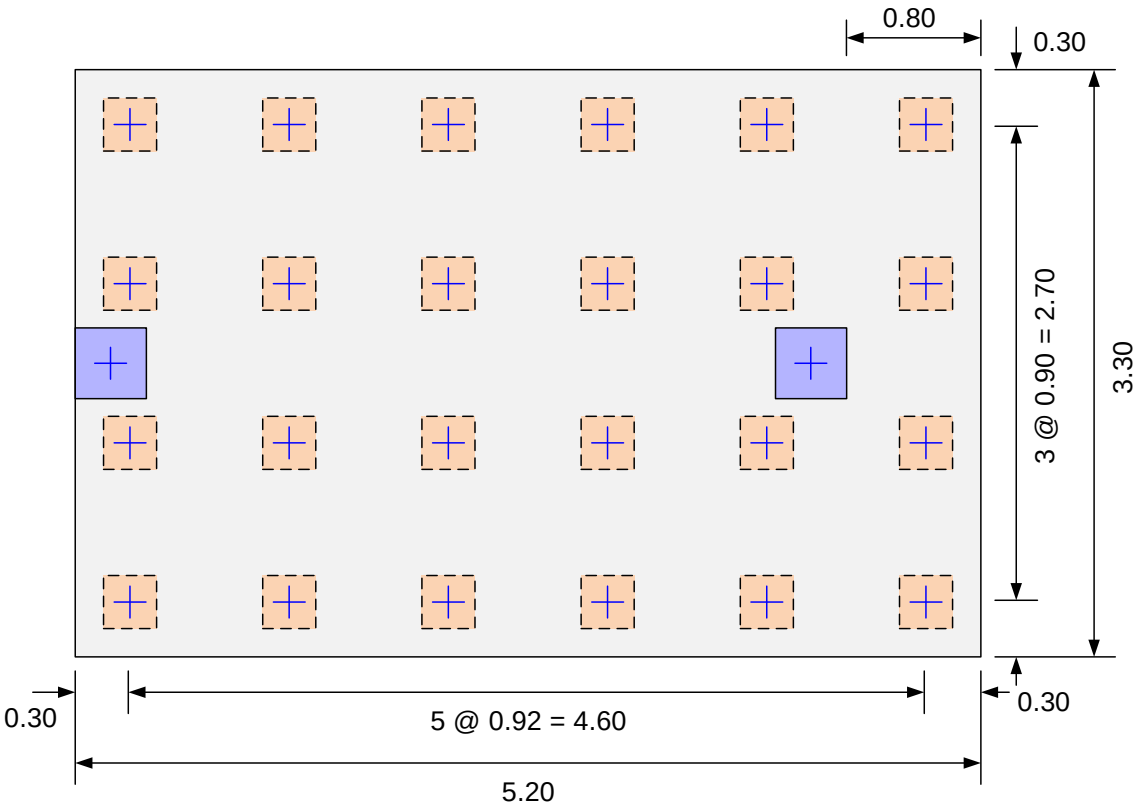
จัดเสาเข็ม 24 ต้น แบ่งเป็น 4 แถวๆละ 6 ต้น ระยะขอบ 0.30 เมตร

ทางด้านยาวจะได้ระยะห่างเสาเข็ม $= (5.2 - 2\times0.3)/5 = 0.92 > [3D = 0.90]$ **OK**

ทางด้านกว้างใช้ระยะห่างเข็ม 0.90 ม.

ความกว้างฐาน, **B** $= 3\times0.9 + 2\times0.3 =$ **3.3 เมตร**

สมมุติความลึกฐานราก $= 1.00$ ม. $\rightarrow$ ความลึกประสิทธิผล d $= 0.90$ ม. (ลองหลายครั้ง)



รูปที่ 14.25 การจัดวางเสาเข็มในตัวอย่างที่ 14.5

น้ำหนักฐานราก :

$$W_f = 5.2\times3.3\times1.00\times2.4 = 41.2 \text{ ตัน}$$

น้ำหนักบรรทุกรวม :

$$P = 110+90+165+135+41.2 = 541.2 \text{ ตัน}$$

$$R = 541.2/24 = 22.55 \text{ ตัน} < \text{กำลังเสาเข็ม } 30 \text{ ตัน}$$ **OK**

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า :

$$P_u = 1.4(110+165+41.2) + 1.7(90+135) = 825.2 \text{ ตัน}$$

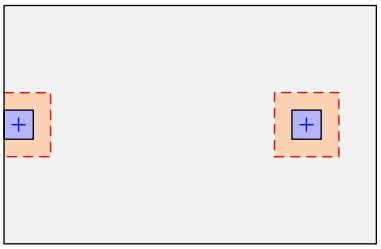
$$R_u = P_u/n = 825.2/24 = 34.4 \text{ ตัน}$$

2. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะกระจายแรงจากเสาเข็มเป็นแรงแผ่กระจาย

$$q_u = \frac{P_u}{A_f} = \frac{825.2}{5.20\times3.30} = 48.1 \text{ ตัน/ตร.ม.}$$

หน้าตัดวิกฤตรอบเสาตอม่อเป็นระยะ $d/2 = 0.45$ ม.



เสาต้นริมซ้าย :

$$P_{ucL} = 1.4\times110 + 1.7\times90 = 307 \text{ ตัน}$$

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = 2(40+45)+(40+90) = 300$ ซม.

แรงเฉือน : $V_u = 307 - 48.1(0.40+0.90)(0.40+0.45) = 254$ ตัน

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85 \times 1.06\sqrt{240} \times 300 \times 90 / 1{,}000$

$= 377$ ตัน $>$ [$V_u = 254$ ตัน] **OK**

เสาต้นใน :

$P_{ucI} = 1.4 \times 165 + 1.7 \times 135 = 460.5$ ตัน

เส้นรอบรูปการเฉือน : $b_o = 4(40+90) = 520$ ซม.

แรงเฉือน : $V_u = 460.5 - 48.1(0.40+0.90)^2 = 379$ ตัน

กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85 \times 1.06\sqrt{240} \times 520 \times 90 / 1{,}000$

$= 653$ ตัน $>$ [$V_u = 379$ ตัน] **OK**

3. แผนภูมิแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

แรงแผ่กระจายของเสาเข็มตลอดความยาว 5.20 เมตร

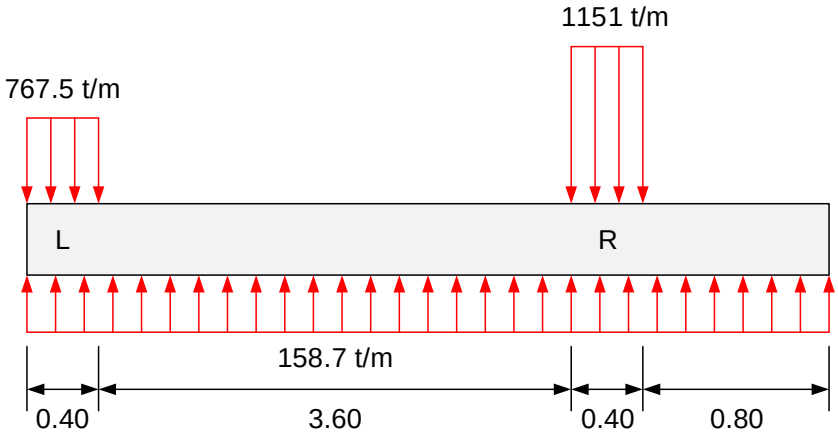
$$w_u = \frac{P_u}{5.20} = \frac{825.2}{5.20} = 158.7 \text{ ตัน/เมตร}$$

แรงแผ่กระจายบนเสาต้นริมซ้าย หน้าตัดเสายาว 0.40 เมตร

$$w_{ucL} = \frac{P_{ucL}}{0.40} = \frac{307}{0.40} = 767.5 \text{ ตัน/เมตร}$$

แรงแผ่กระจายบนเสาต้นใน หน้าตัดเสายาว 0.40 เมตร

$$w_{ucI} = \frac{P_{ucI}}{0.40} = \frac{460.5}{0.40} = 1151 \text{ ตัน/เมตร}$$



รูปที่ 14.26 แรงกระจายบนฐานรากร่วมเสาเข็มในตัวอย่างที่ 14.5

แผนภูมิแรงเฉือน :

จากขอบซ้ายสุดที่แรงเฉือนเป็น 0 ในช่วงเสาน้ำหนักกดลง 767.5 – 158.7 = 608.8 ตัน/เมตร

$$V_1 = 0 - 608.8\times0.40 = -243.5 \text{ ตัน}$$

ระหว่างขอบในเสาซึ่งห่างกัน 3.60 ม. ช่วงนี้มีแรงยกขึ้น 158.7 ตัน/เมตร

$$V_2 = -243.5 + 158.7\times3.60 = 327.8 \text{ ตัน}$$

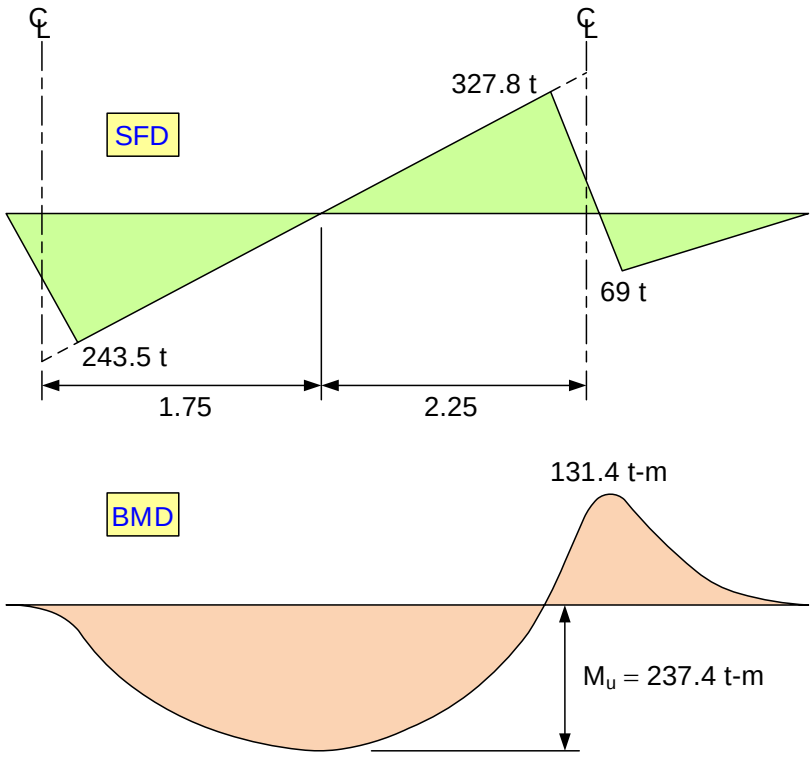
ในช่วงเสาต้นในน้ำหนักกดลง 1151 – 158.7 = 992.3 ตัน/เมตร

$$V_3 = 327.8 - 992.3\times0.40 = -69.0 \text{ ตัน}$$

ระหว่างขอบขวาเสาในถึงขอบฐานซึ่งห่างกัน 0.80 ม. ช่วงนี้มีแรงยกขึ้น 158.7 ตัน/เมตร

$$V_4 = -69.0 + 158.7\times0.40 = -5.52 \text{ ตัน} \rightarrow 0 \text{ ตัน}$$

เขียนแผนภูมิแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดได้ดังในรูปที่ 14.27



รูปที่ 14.27 แผนภูมิแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในฐานรากร่วมเสาเข็มในตัวอย่างที่ 14.5

2. ตรวจสอบการเฉือนคาน

จากแผนภูมิแรงเฉือนมากที่สุดอยู่ที่ขอบซ้ายของเสาต้นใน 327.8 ตัน

แรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตที่ระยะ d = 0.90 ม.จากขอบเสา

$$V_u = 327.8 - 158.7\times0.90 = 185.0 \text{ ตัน}$$

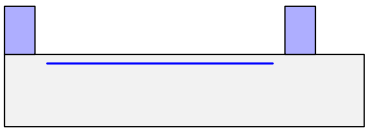
กำลังเฉือนคอนกรีต : $\phi V_c = 0.85\times0.53\sqrt{240}\times330\times90/1{,}000$

$$= 207.3 \text{ ตัน} > V_u$$ **OK**

5. ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด

เหล็กเสริมทางยาว :

โมเมนต์ลบ : (เหล็กเสริมบนที่กลางช่วง)



M_u = 237.4 ตัน-เมตร (จากแผนภูมิโมเมนต์ดัด)

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{237.4\times10^5}{0.9\times330\times90^2} = 9.87 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right) = 0.0025 < [\,\rho_{max} = 0.0197\,] \quad \textbf{OK}$$

$A_s = \rho bd = 0.0025\times330\times90 = 74.25$ ซม.^{2}

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times330\times100 = 59.4$ ซม.^{2} $< A_s$ **OK**

ใช้เหล็กเสริม **10-DB32** (A_s = 80.42 ซม.^{2})

ตรวจสอบระยะฝังยึด : (เหล็กบนเพิ่มความยาว 30%)

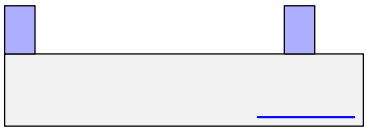
จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB32 :

$l_d = 1.3\times1.57 = 2.04$ ม.

โมเมนต์ลบมากที่สุดอยู่ที่ระยะ 1.95 เมตรจากขอบฐานข้างซ้าย ใช้ระยะหุ้ม 7.5 ซม.

ความยาวเหล็กที่ฝังจริง $= 1.95 - 0.075 = 1.875$ ม. $< l_d$ **ต้องงอฉาก**

โมเมนต์บวก : (เหล็กเสริมล่างที่ขอบขวาเสาต้นใน)



M_u = 131.4 ตัน-เมตร (จากแผนภูมิโมเมนต์ดัด)

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{131.4\times10^5}{0.9\times330\times90^2} = 5.46 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85f'_c}}\right) = 0.0014 < [\,\rho_{max} = 0.0197\,] \quad \textbf{OK}$$

$A_s = \rho bd = 0.0014\times330\times90 = 41.10$ ซม.^{2}

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times330\times100 = 59.4$ ซม.^{2} $> A_s$ **Control**

ใช้เหล็กเสริม **10-DB28** (A_s = 61.6 ซม.^{2})

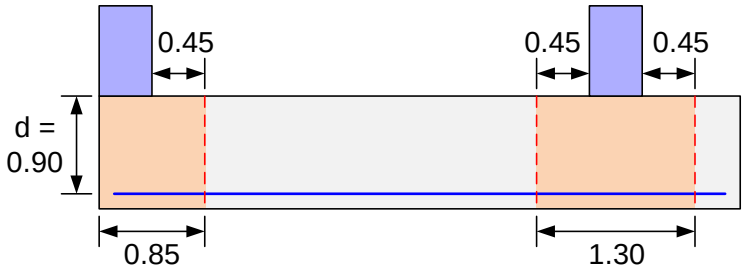
จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB28 : $l_d = 1.37$ ม.

โมเมนต์บวกมากที่สุดขอบขวาเสาต้นใน ระยะถึงขอบฐานราก 0.80 เมตร ใช้ระยะหุ้ม 7.5 ซม.

ความยาวเหล็กที่ฝังจริง $= 0.80 - 0.075 = 0.725$ ม. $< l_d$ **ต้องงอฉาก**

จากตารางที่ ก.6 ระยะฝังงอฉากของ DB28 = 0.57 ม. $<$ 0.725 ม. **OK**

เหล็กเสริมทางขวาง : คิดเป็นคานขวางใต้เสาตอม่อมีความกว้างจากขอบเสา d/2



รูปที่ 14.28 หน้าตัดคานขวางใต้เสาแต่ละต้นในตัวอย่างที่ 14.5

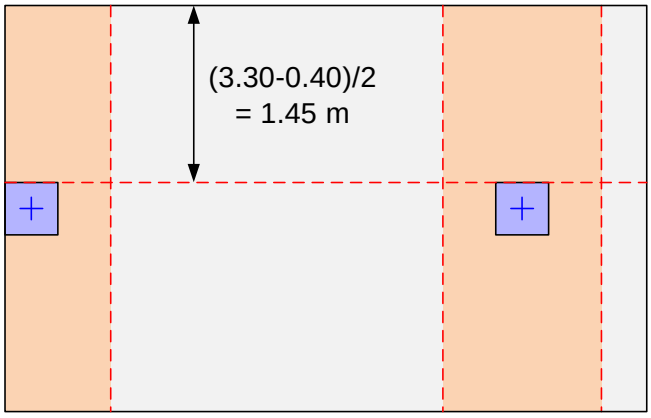
คานขวางที่เสาต้นริม :

ความกว้าง b = 0.40 + 0.90/2 = 0.85 ม.

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า P_{ucL} = 307 ตัน คิดเป็นน้ำหนักแผ่บนคานยาว 3.3 เมตร

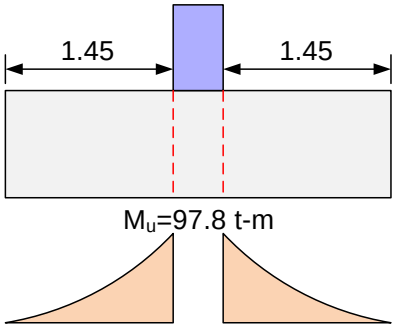
$$w_u = \frac{307}{3.3} = 93 \text{ ตัน/เมตร}$$

ระยะจากขอบตอม่อถึงขอบเสาดังในรูปที่ 14.29 คือ (3.30-0.40)/2 = 1.45 ม.



รูปที่ 14.29 ระยะในการคิดโมเมนต์ในคานขวางใต้เสาแต่ละต้นในตัวอย่างที่ 14.5

โมเมนต์บวก : (เหล็กเสริมล่างแนวตั้ง)



$$M_u = \frac{1}{2} \times 93 \times 1.45^2 = 97.8 \text{ ตัน-เมตร}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{97.8 \times 10^5}{0.9 \times 85 \times 90^2}$$

$$= 15.78 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0041 < [\, \rho_{max} = 0.0197 \,] \quad \textbf{OK}$$

$$A_s = \rho b d = 0.0041 \times 85 \times 90 = 31.45 \text{ ซม.}^2$$

เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018 \times 85 \times 100 = 15.3 \text{ ซม.}^2 < A_s$ **OK**

ใช้เหล็กเสริม **6-DB28** (A_s = 36.96 ซม.^{2})

จากตาราง ก.4 ระยะฝังยึดของ DB28 : l_d = 1.37 ม.

ความยาวเหล็กที่ฝังจริง = 1.45 – 0.075 = 1.375 ม. > l_d **OK**

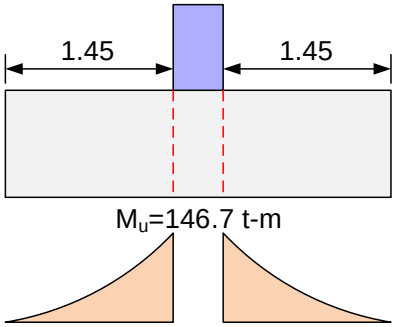
คานขวางที่เสาต้นใน :

ความกว้าง b = 0.40 + 0.90 = 1.30 ม.

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า P_{ucl} = 460.5 ตัน คิดเป็นน้ำหนักแผ่บนคานยาว 3.3 เมตร

$$w_u = \frac{460.5}{3.3} = 139.5 \text{ ตัน/เมตร}$$

โมเมนต์บวก : (เหล็กเสริมล่างแนวตั้ง)



$$M_u = \frac{1}{2}\times 139.5 \times 1.45^2 = 146.7 \text{ ตัน-เมตร}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{146.7\times 10^5}{0.9\times 130\times 90^2}$$

$$= 15.48 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0040 < [\ \rho_{max} = 0.0197\ ]$$ **OK**

$$A_s = \rho bd = 0.0040\times 130\times 90 = 46.8 \text{ ซม.}^2$$

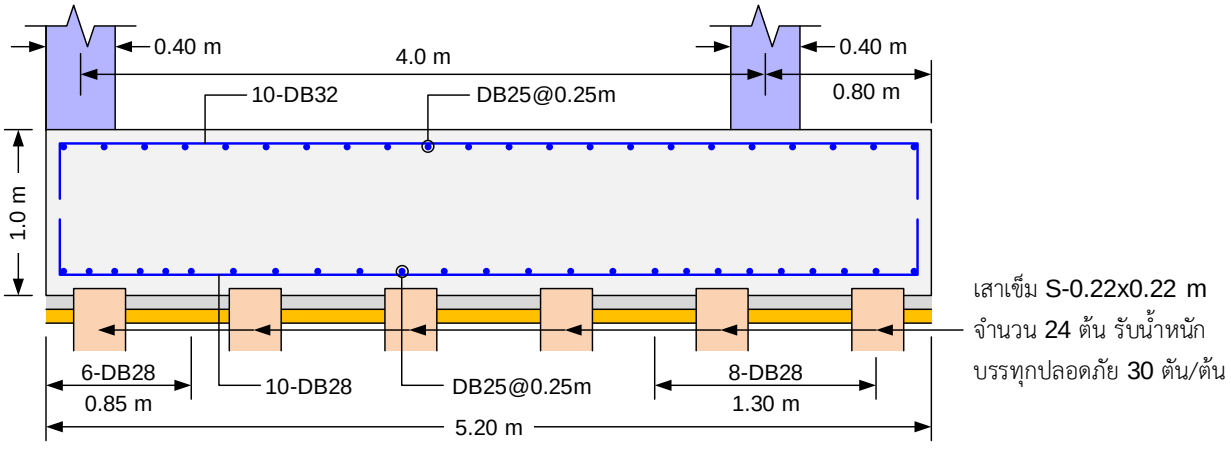
เหล็กกันร้าว $A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times 130\times 100 = 23.4$ ซม.^{2} < A_s **OK**

ใช้เหล็กเสริม **8-DB28** (A_s = 49.28 ซม.^{2})

เหล็กเสริมกันร้าว :

$$A_{s,min} = 0.0018bt = 0.0018\times 100\times 100 = 18 \text{ ซม.}^2$$

ใช้เหล็กเสริม **DB25@0.25m** (A_s = 19.64 ซม.^{2})



รูปที่ 14.30 แบบรายละเอียดฐานรากร่วมเสาเข็มในตัวอย่างที่ 14.5