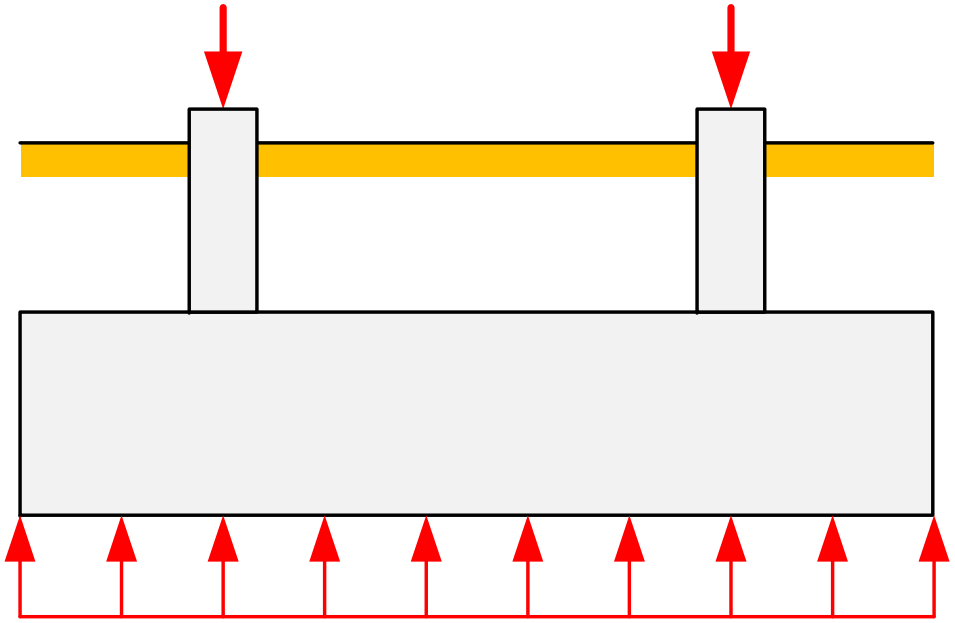
13

Footing Design 2

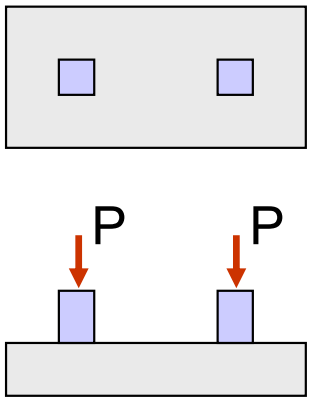


- Combined Footing
- Strap Footing

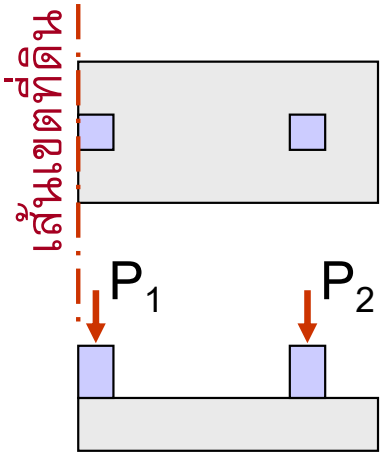
โดย ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช

ฐานรากร่วมรับเสาคู่

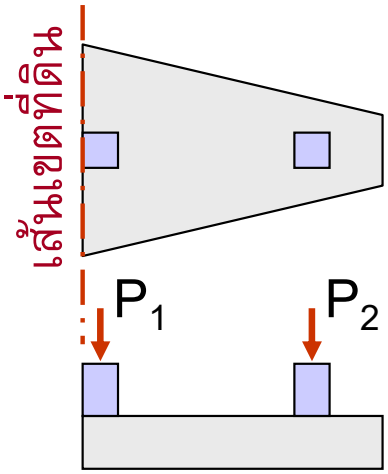
ในบางกรณีที่เสาอยู่ใกล้กันหรือเสาต้นนอกอยู่ชิดเส้นเขตที่ดิน จะทำฐานรากร่วมเพื่อให้น้ำหนักบรรทุกจากตอม่อตรงกับศูนย์ถ่วงฐานราก



ตอม่อ 2 ต้น
อยู่ใกล้กัน

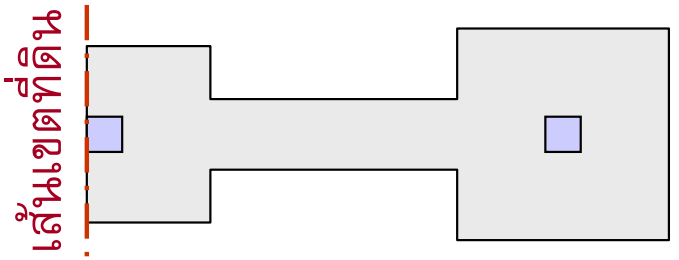


ตอม่อติดเขตที่ดิน
โดยที่ $P_1 < P_2$

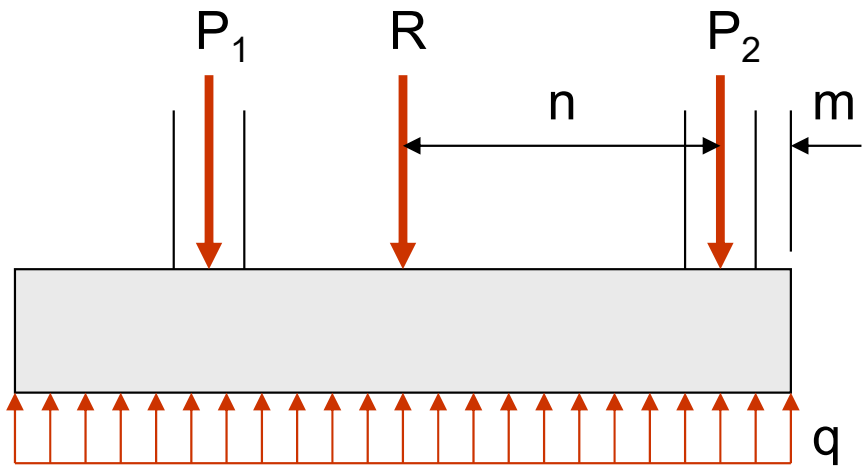


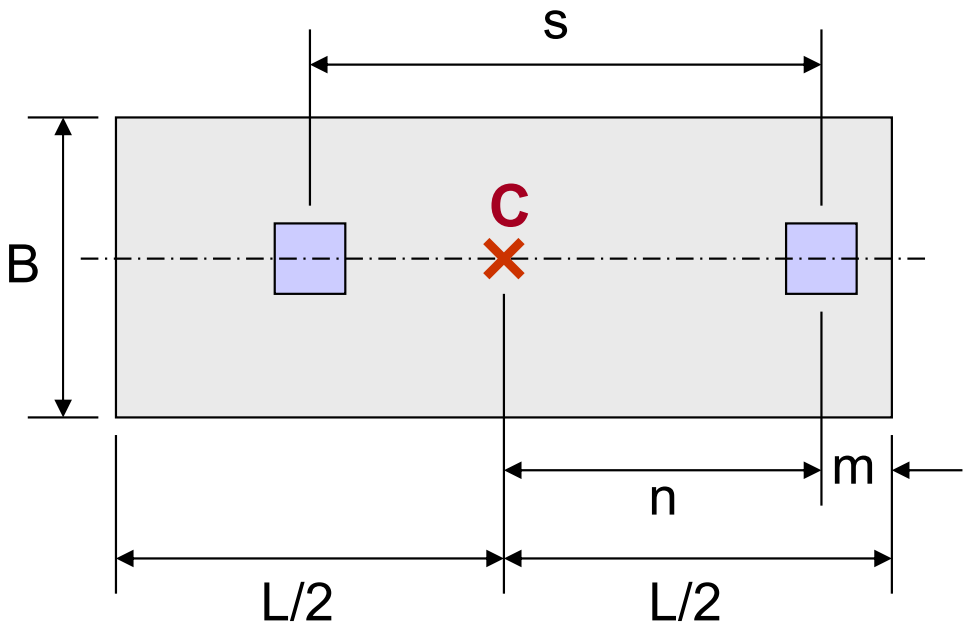
ถ้า $1/2 < P_2/P_1 < 1$
ใช้ฐานรากสี่เหลี่ยมคางหมู

ถ้า $P_2/P_1 < 1/2$ หรือฐานรากอยู่ห่างกัน
ใช้ฐานรากร่วมแบบมีคานเชื่อม



การกำหนดขนาดฐานรากร่วม





ตำแหน่ง **C** ของแรงลัพธ์ R ของน้ำหนัก P_1 และ P_2 :

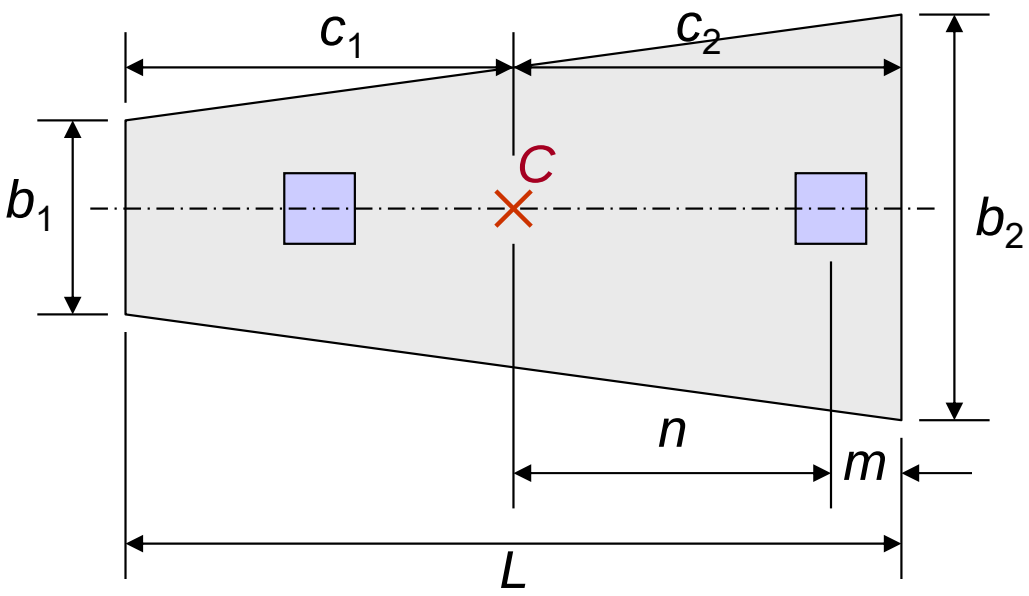
$$n = \frac{P_1 s}{P_1 + P_2} = \frac{P_1 s}{R}$$

จากจุด **C** กำหนดความยาวออกไปทั้งสองข้างเท่ากับ L/2 :

$$L = 2\,(m + n)$$

ความกว้างฐานราก :

$$B = \frac{P_1 + P_2 + W}{q\,L}$$

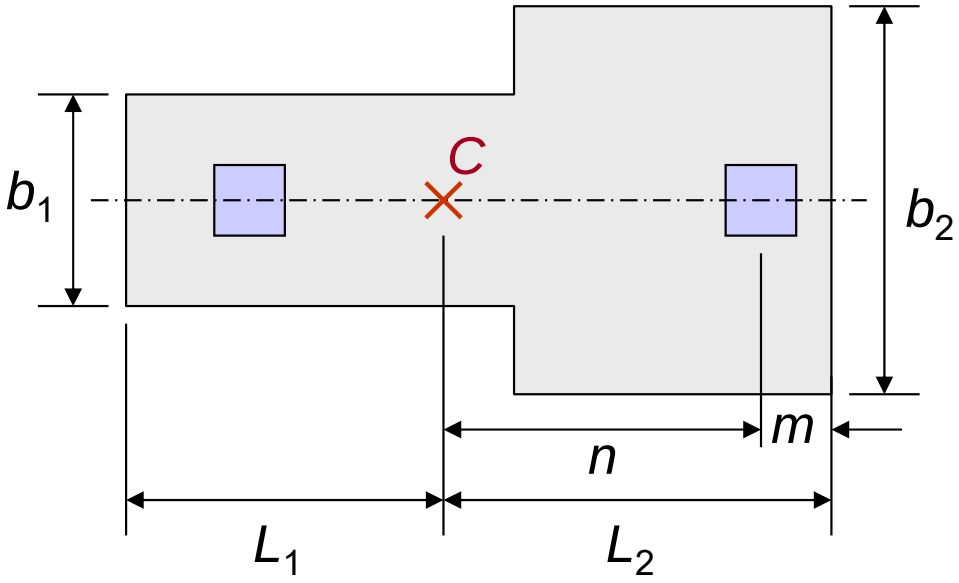


$$\frac{b_2}{b_1} = \frac{3(n+m)-L}{2L-3(n+m)}$$

$$(b_1+b_2) = \frac{2R}{q_e L}$$

$$c_1 = \frac{L(b_1+2b_2)}{3(b_1+b_2)}$$

$$c_2 = \frac{L(2b_1+b_2)}{3(b_1+b_2)}$$



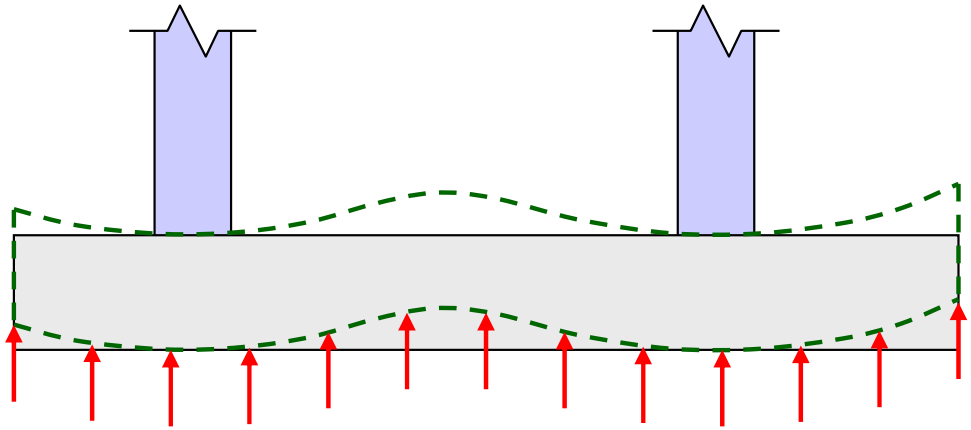
$$b_1 = \frac{2(n+m)-L_2}{L_1(L_1+L_2)}$$

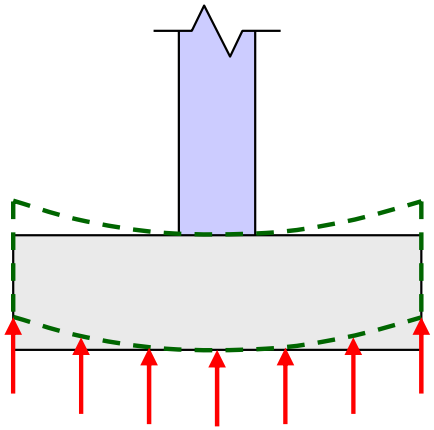
$$b_2 = \frac{R}{q_e L_2} - \frac{L_1 b_1}{L_2}$$

$$L_1 b_1 + L_2 b_2 = \frac{R}{q_e}$$

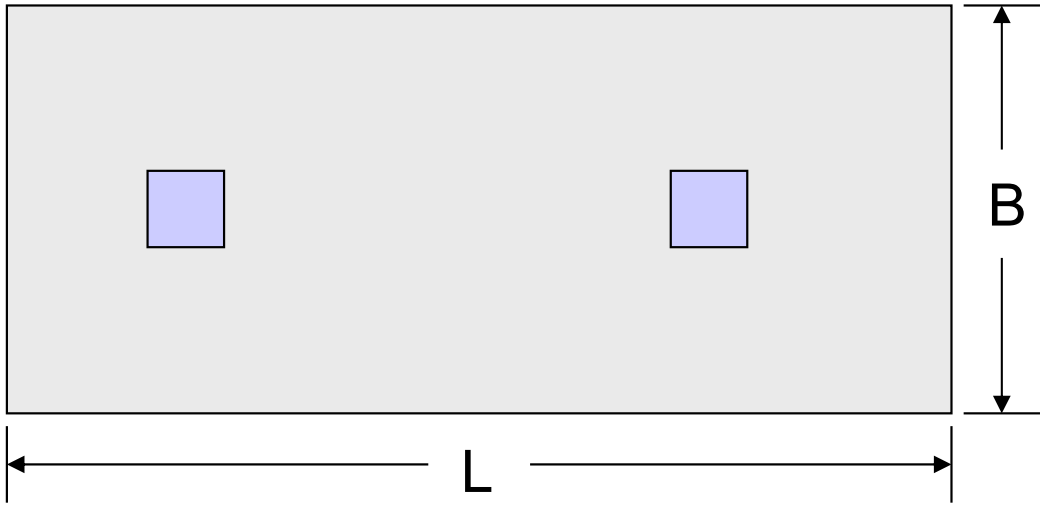
การโก่งแอ่นของฐานรากร่วม

เมื่อกำหนดฐานรากได้ตรงศูนย์กับแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุก หน่วยแรงดันดินใต้ฐานจะกระจายแบบแผ่สม่ำเสมอ ฐานรากจะมีการโก่งแอ่นดังในรูป



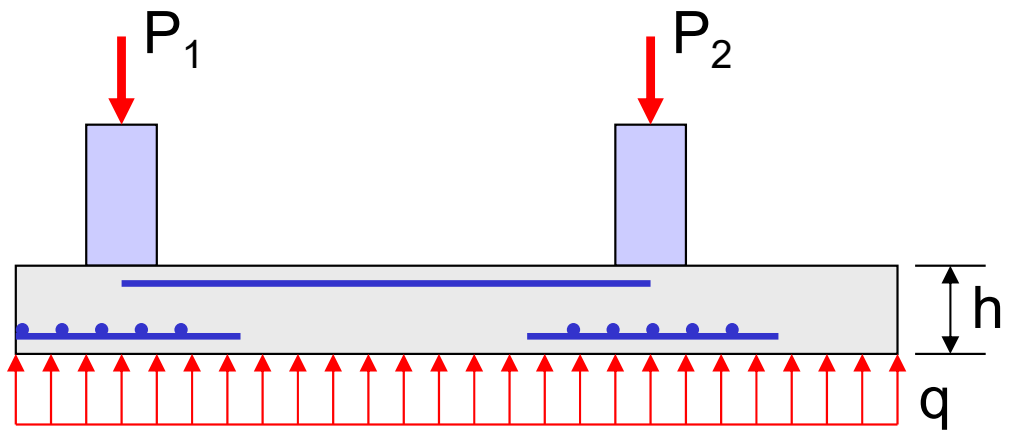


Side view

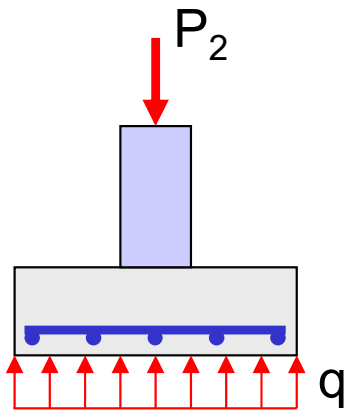


การเสริมเหล็กในฐานรากร่วม

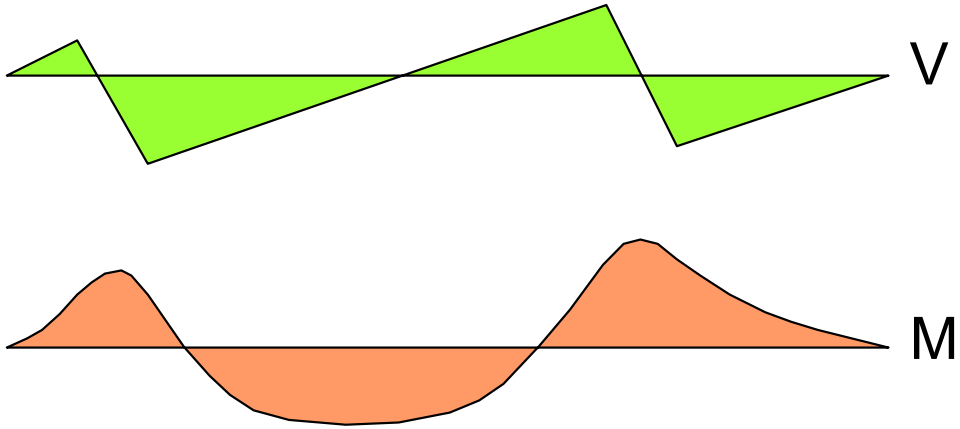
การเสริมเหล็กมีทั้งทางด้านยาวและด้านสั้น มีทั้งด้านบนและด้านล่าง ขึ้นกับแผนภูมิโมเมนต์ดัด



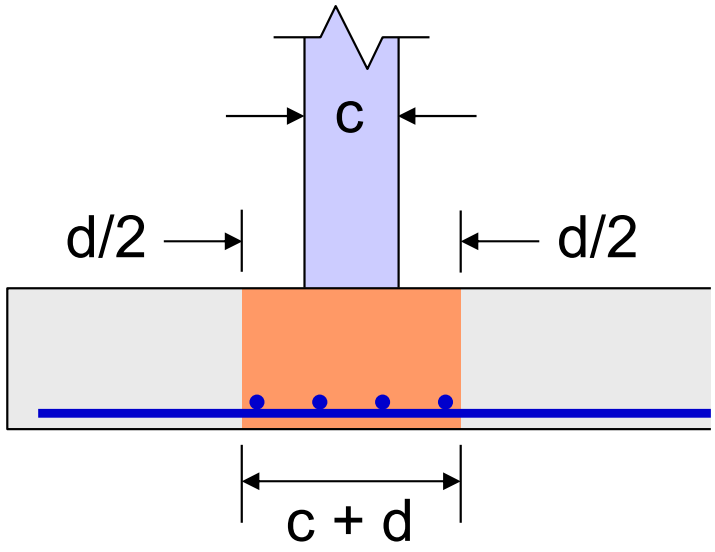
การเสริมเหล็กทางยาว

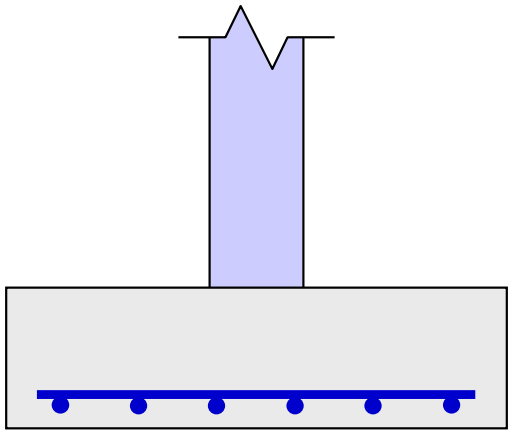


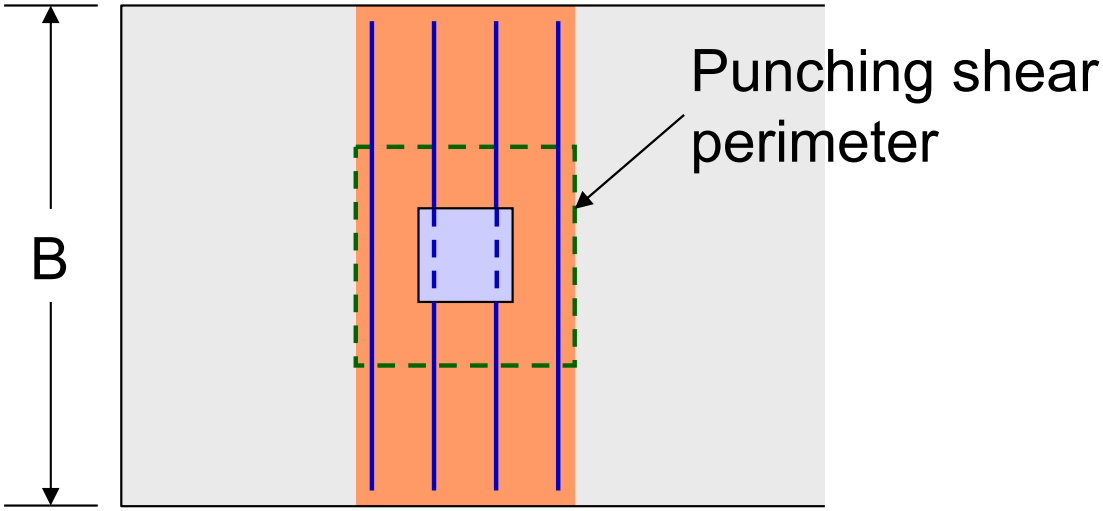
การเสริมเหล็กทางสั้น



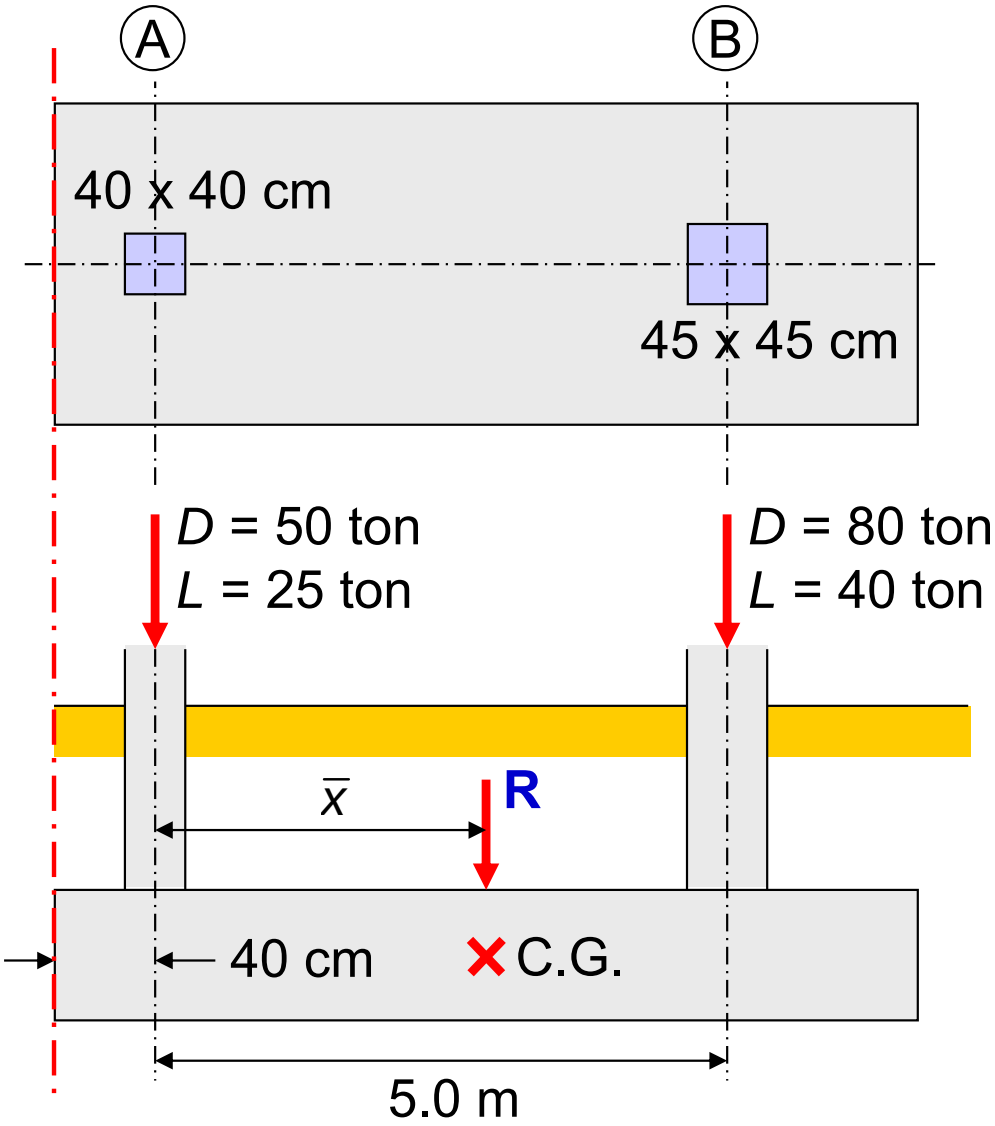
สำหรับในทิศทางสั้น น้ำหนักที่ถ่ายลงมาจากตอม่อจะกระจายลงในพื้นที่จำกัดเท่ากับความกว้างเสาตอม่อบวก **d/2** ในแต่ละข้าง







ตัวอย่างการออกแบบฐานรากร่วม เพื่อรองรับเสาตอม่อสองต้นห่างกัน 5 เมตร โดยมีเส้นขอบเขตที่ดินอยู่ห่างจากเสาต้นนอก 40 ซม. น้ำหน่วยแรงแบกทานของดินคือ 10 ตัน/ตร.ม. กำหนด f'_c = 240 กก./ซม.^{2} และ f_y = 4,000 กก./ซม.^{2}



วิธีทำ

1. ตำแหน่งแรงลัพธ์ R :

$$(75+120)\bar{x} = 120(5)$$

$$\bar{x} = 3.1\ \text{m}$$

2. ความยาวฐานราก L :

กำหนด C.G. อยู่ตรงกับ R

ระยะจาก C.G. ถึงขอบฐานรากข้างซ้าย

= 3.1 + 0.4 = 3.5 m

ความยาวฐานราก L = 2 x 3.5 = 7.0 m

3. ความกว้างฐานราก B : แรงดันดินที่ยอมให้ $q_a = 10$ ตัน/ตร.ม.

$$B = \frac{P_1 + P_2 + W}{q_a L} = \frac{(50 + 25 + 80 + 40) \times 1.15}{10 \times 7.0} = 3.21 \text{ m}$$

USE 3.3 m

ลองใช้ความหนาฐานราก 60 ซม. ความลึก d = 52 ซม.

น้ำหนักฐานราก $W = 0.6 \times 3.3 \times 7.0 \times 2.4 = 33.26$ ตัน

แรงดันใต้ฐานราก $q = \frac{50 + 25 + 80 + 40 + 33.26}{3.3 \times 7.0} = 9.88$ ตัน/ตร.ม.

$< q_a$ **OK**

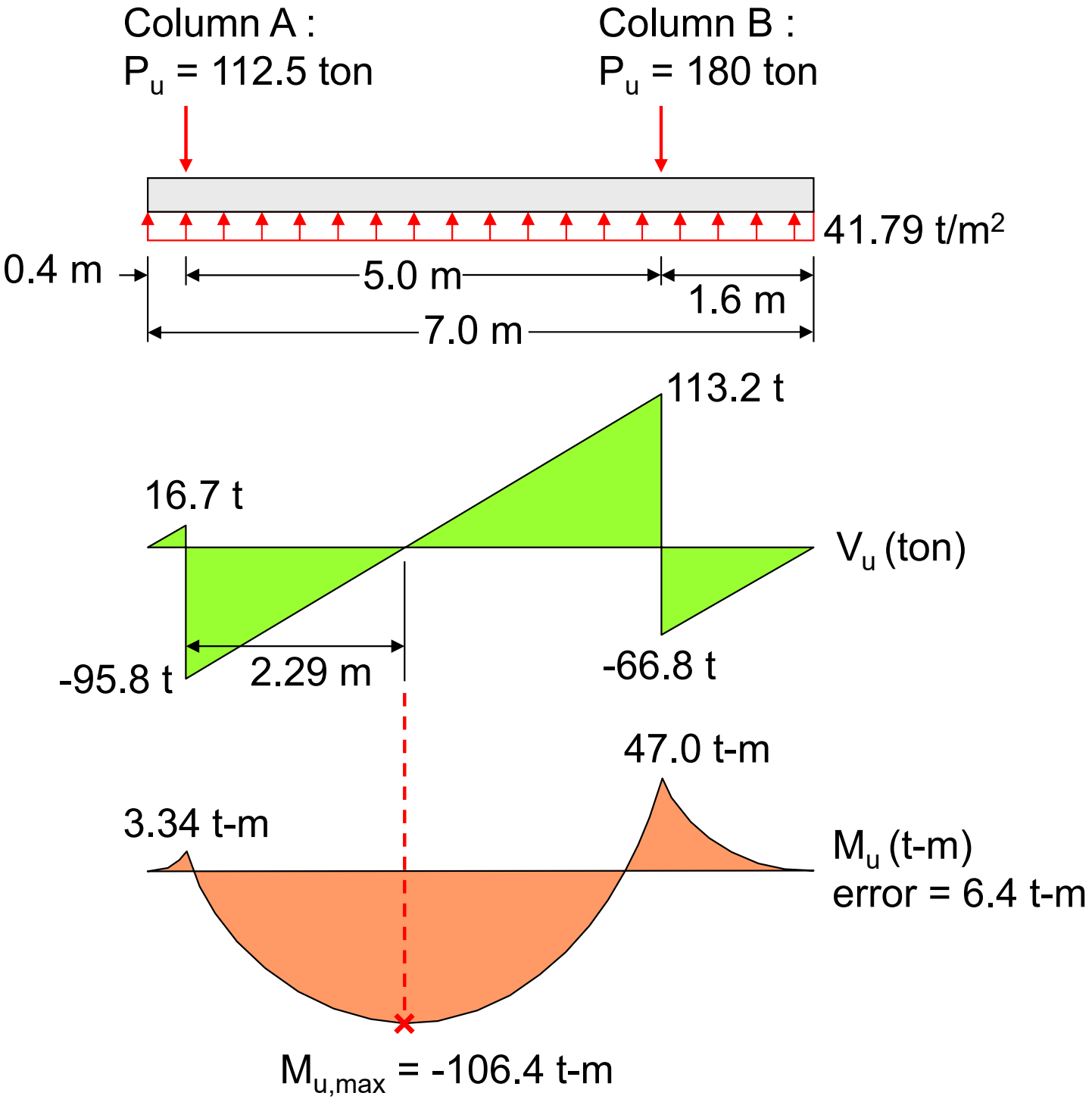
4. แผนภูมิแรงเฉือนและโมเมนต์ในทิศทางยาว

เสา A : $P_u = 1.4 \times 50 + 1.7 \times 25 = 112.5$ ตัน

เสา B : $P_u = 1.4 \times 80 + 1.7 \times 40 = 180$ ตัน

แรงดันดินประลัย : $q_{nu} = \frac{112.5 + 180}{7.0 \times 3.3} = 12.66$ ตัน/ตร.ม.

น้ำหนักแผ่ประลัย : $w_u = \frac{112.5 + 180}{7.0} = 41.79$ ตัน/ม.


Column A :
P_u = 112.5 ton
Column B :
P_u = 180 ton
41.79 t/m²
0.4 m
5.0 m
1.6 m
7.0 m
113.2 t
16.7 t
V_u (ton)
-95.8 t
2.29 m
-66.8 t
47.0 t-m
3.34 t-m
M_u (t-m)
error = 6.4 t-m
$M_{u,max}$ = -106.4 t-m

5. เหล็กเสริมทางยาวรับโมเมนต์ดัด

โมเมนต์ลบมากที่สุดกลางช่วง $-M_u$ = 106.4 ตัน-เมตร

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{106.4 \times 10^5}{0.9 \times 330 \times 52^2} = 13.6 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0035$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ: $A_s = \rho b d = 0.0035 \times 330 \times 52 = 60.1$ ซม.^{2}

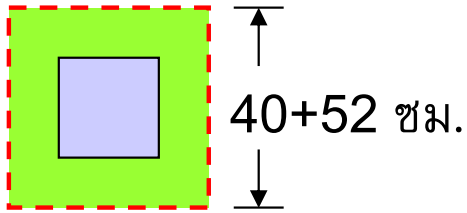
ปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด: $A_{s,min} = 0.0018 \times 330 \times 60 = 35.6$ ซม.$^2 < A_s$ **OK**

เลือกใช้เหล็ก **10 DB28** (A_s = 61.58 ซม.^{2})

สำหรับโมเมนต์บวก 47 และ 3.3 ตัน-ม. ใช้เหล็กน้อยที่สุด $A_{s,min}$

เลือกใช้เหล็ก **12 DB20** (A_s = 37.68 ซม.^{2})

6. ตรวจสอบการเฉือนทะลุ พิจารณาเสาแต่ละต้น ใช้แรงดัน q_{nu} = 12.66 ตัน/ตร.ม.

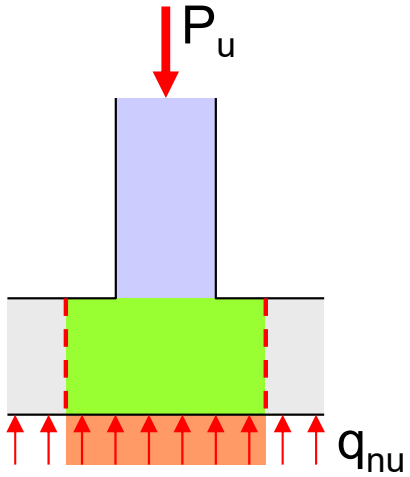


เสา A : $b_0 = 4(40+52) = 368$ ซม.

$V_u = 112.5 - 12.66 \times 0.92^2 = 101.8$ ตัน

$\phi V_c = 0.85 \times 1.06\sqrt{240} \times 368 \times 52/10^3$

$= 267$ ตัน $> V_u$ **OK**



เสา B : $b_0 = 4(45+52) = 388$ ซม.

$V_u = 180 - 12.66 \times 0.97^2 = 168.1$ ตัน

$\phi V_c = 0.85 \times 1.06\sqrt{240} \times 388 \times 52/10^3$

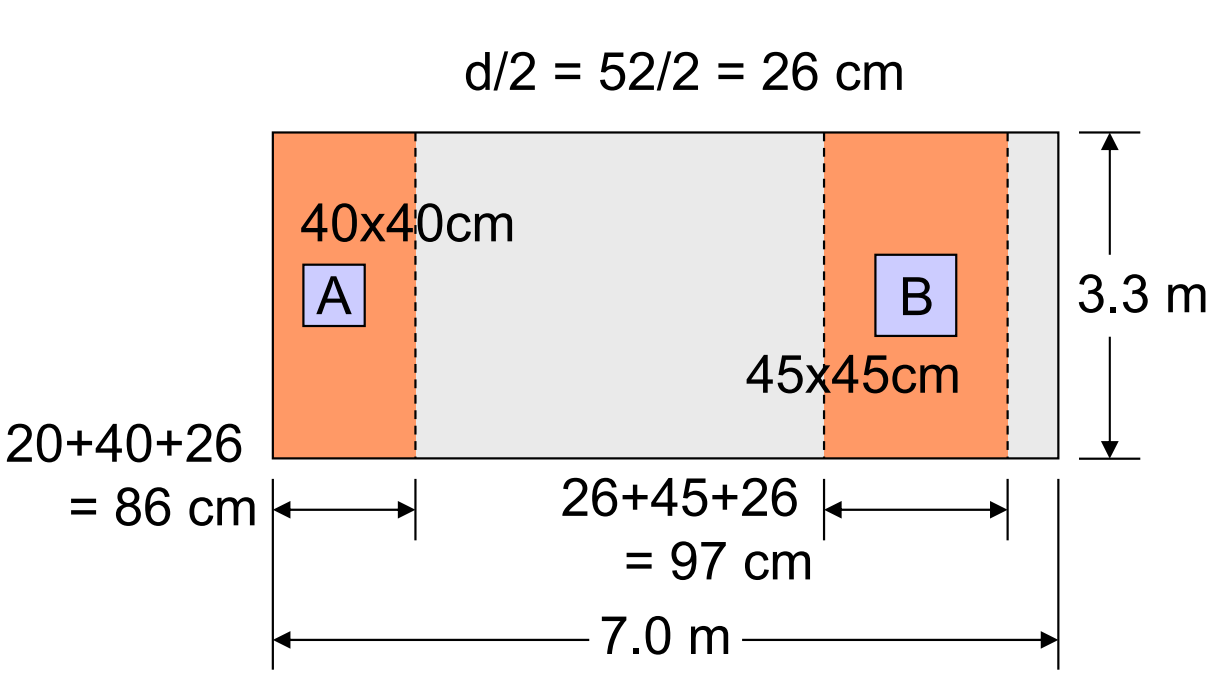
$= 282$ ตัน $> V_u$ **OK**

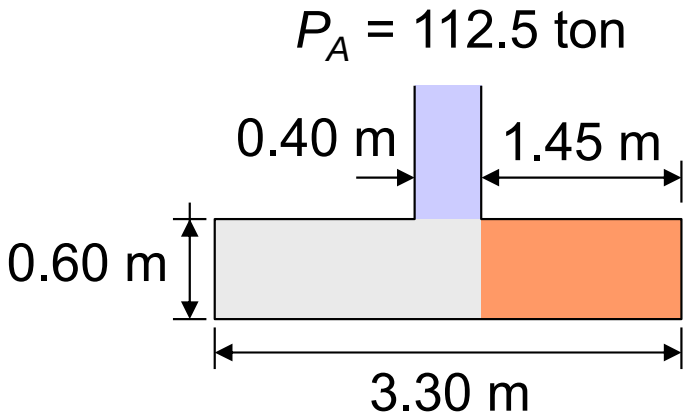
7. ตรวจสอบการเฉือนคาน จากแผนภูมิแรงเฉือน $V_{u,max}$ = 113.2 ตัน

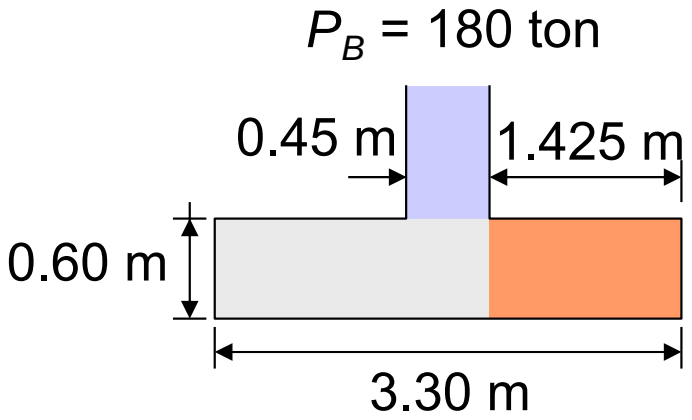
กำลังเฉือนของคอนกรีต: $\phi V_c = 0.85 \times 0.53\sqrt{240} \times 330 \times 52/10^3$

= 119.8 ตัน > V_u **OK**

8. ออกแบบเหล็กเสริมทางสั้น พิจารณาจากผิวเสาแต่ละต้นออกมาข้างละ **d/2**







เสา A : $b_e = 20+40+26 = 86$ ซม., $w_u = 112.5 / 3.3 = 34.1$ ตัน/ม.

$M_u = 34.1\times1.45^2/2 = 35.9$ ตัน-ม.

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{35.9\times10^5}{0.9\times86\times52^2} = 17.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0045$$

$A_s = \rho b d = 0.0045\times86\times52 = 20.1$ ซม.^{2}

เลือกใช้เหล็ก **7DB20** ($A_s = 21.98$ ซม.^{2})

เสา B : $b_e = 26+45+26 = 97$ ซม., $w_u = 180 / 3.3 = 54.5$ ตัน/ม.

$M_u = 54.5\times1.425^2/2 = 55.3$ ตัน-ม.

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{55.3\times10^5}{0.9\times97\times52^2} = 23.4 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y}\left(1-\sqrt{1-\frac{2R_n}{0.85 f'_c}}\right) = 0.0062$$

$A_s = \rho b d = 0.0062\times97\times52 = 31.3$ ซม.^{2}

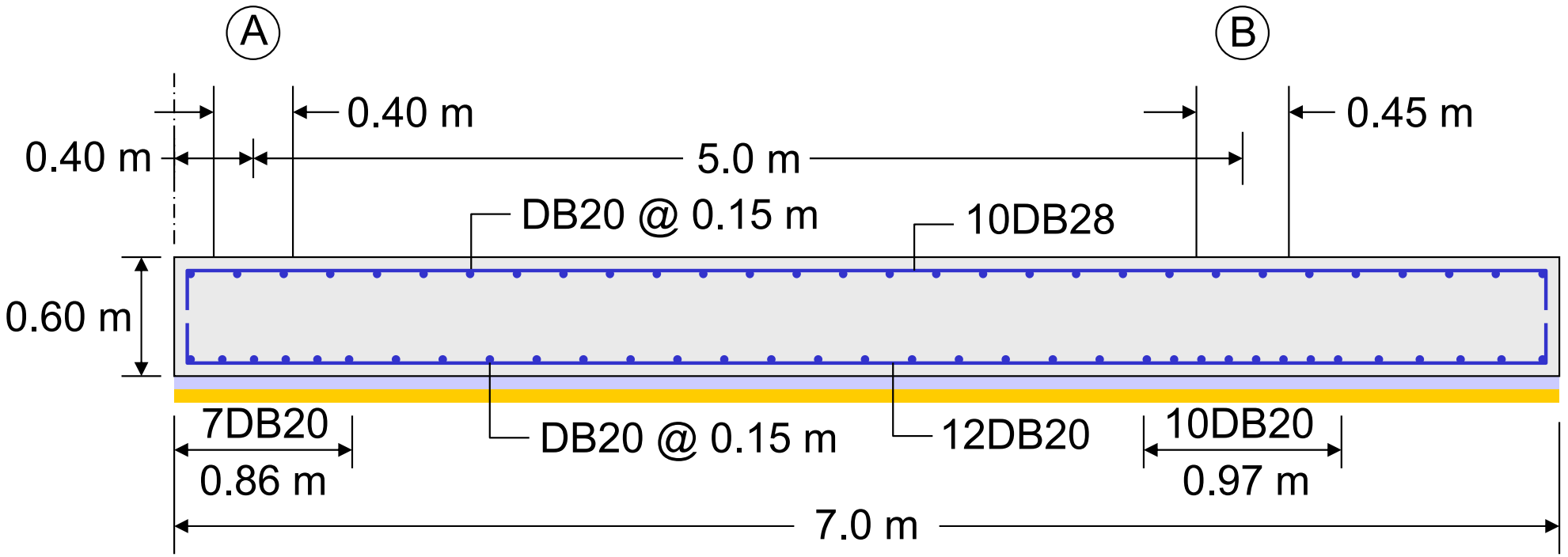
เลือกใช้เหล็ก **10DB20** ($A_s = 31.4$ ซม.^{2})

9. เหล็กเสริมต้านทานการแตกร้าว

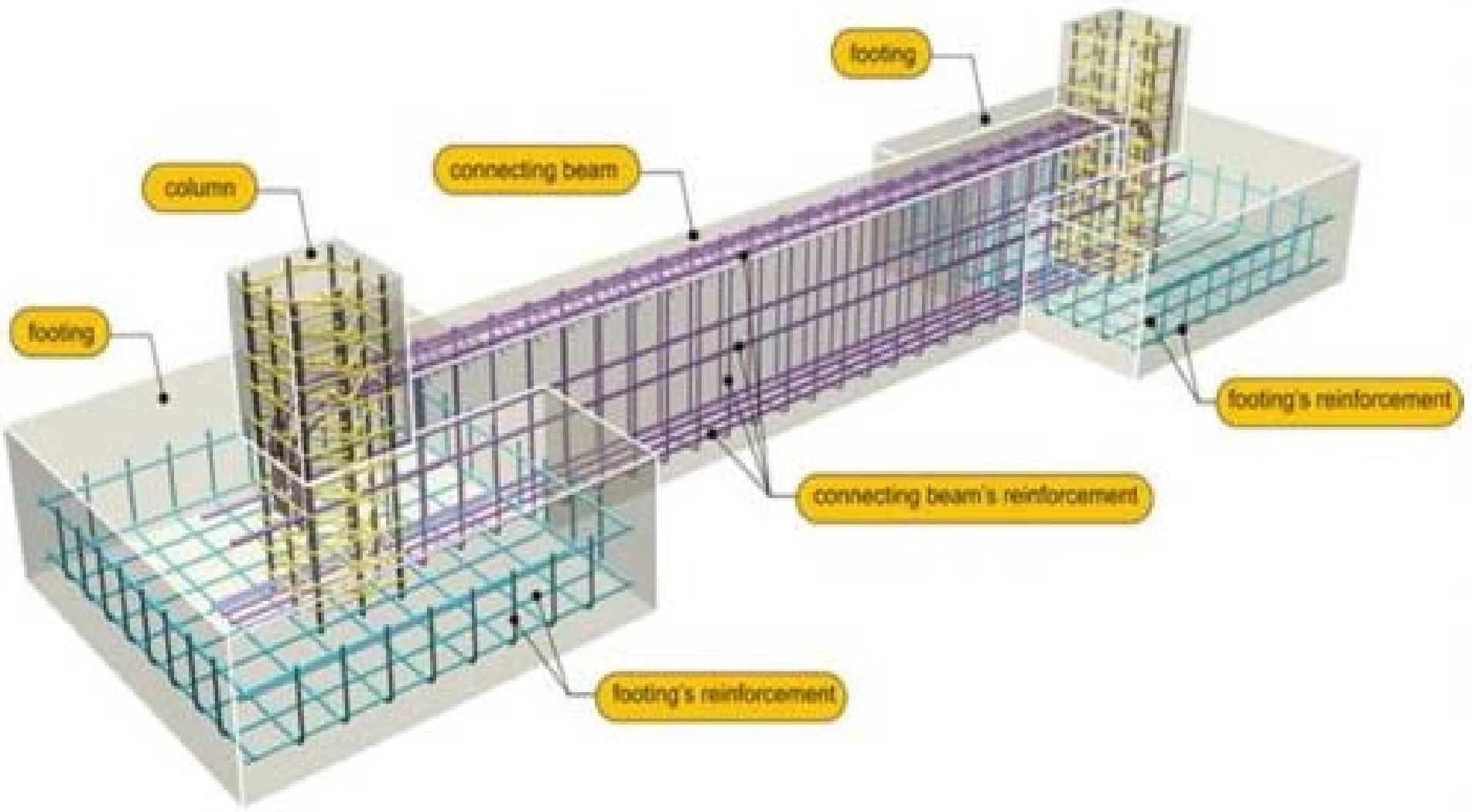
$A_s = 0.0018(100)(60) = 10.8\ cm^2$

USE DB20 @ 0.15

($A_s = 12.56\ cm^2/m$)

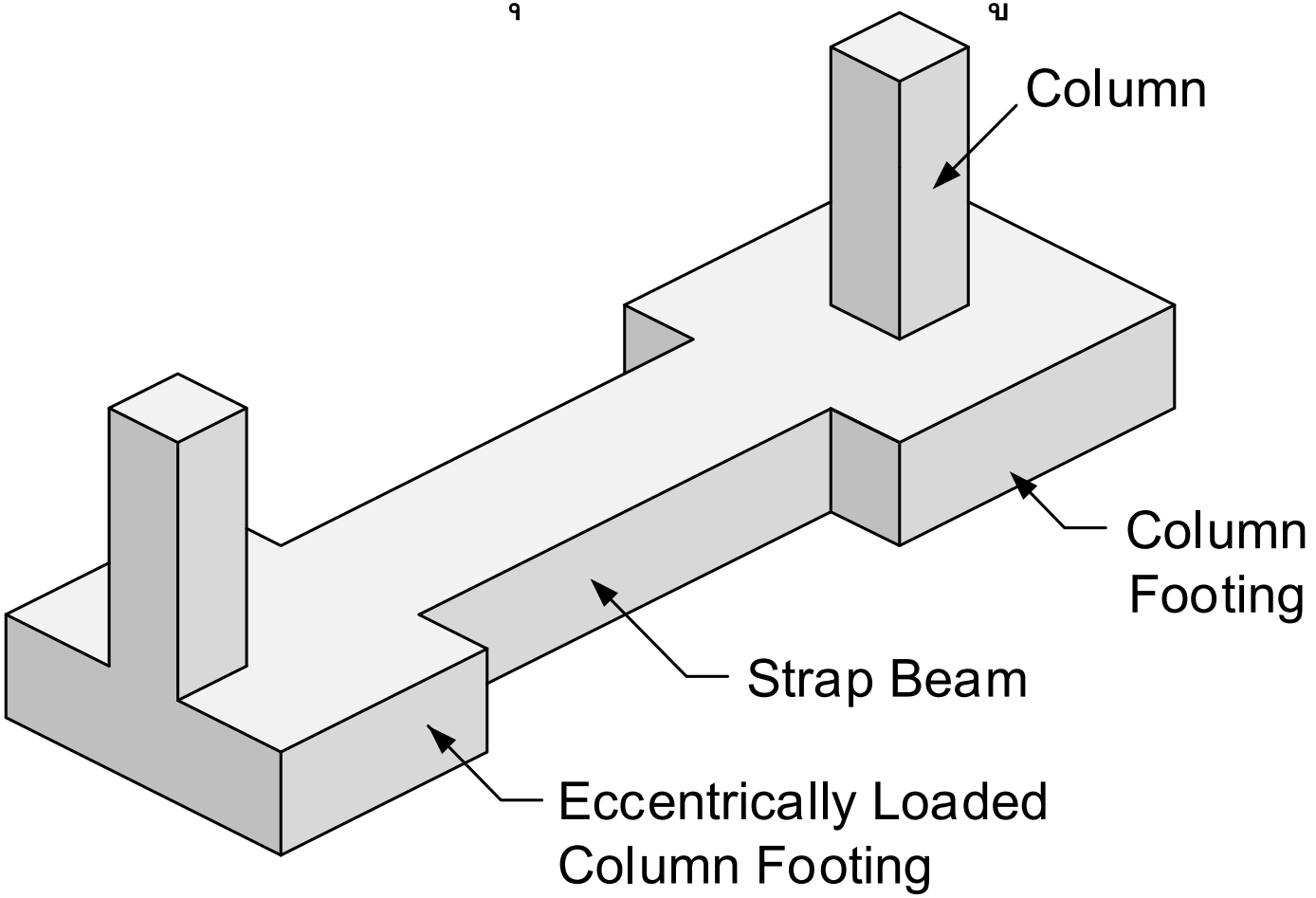


Strap Footing

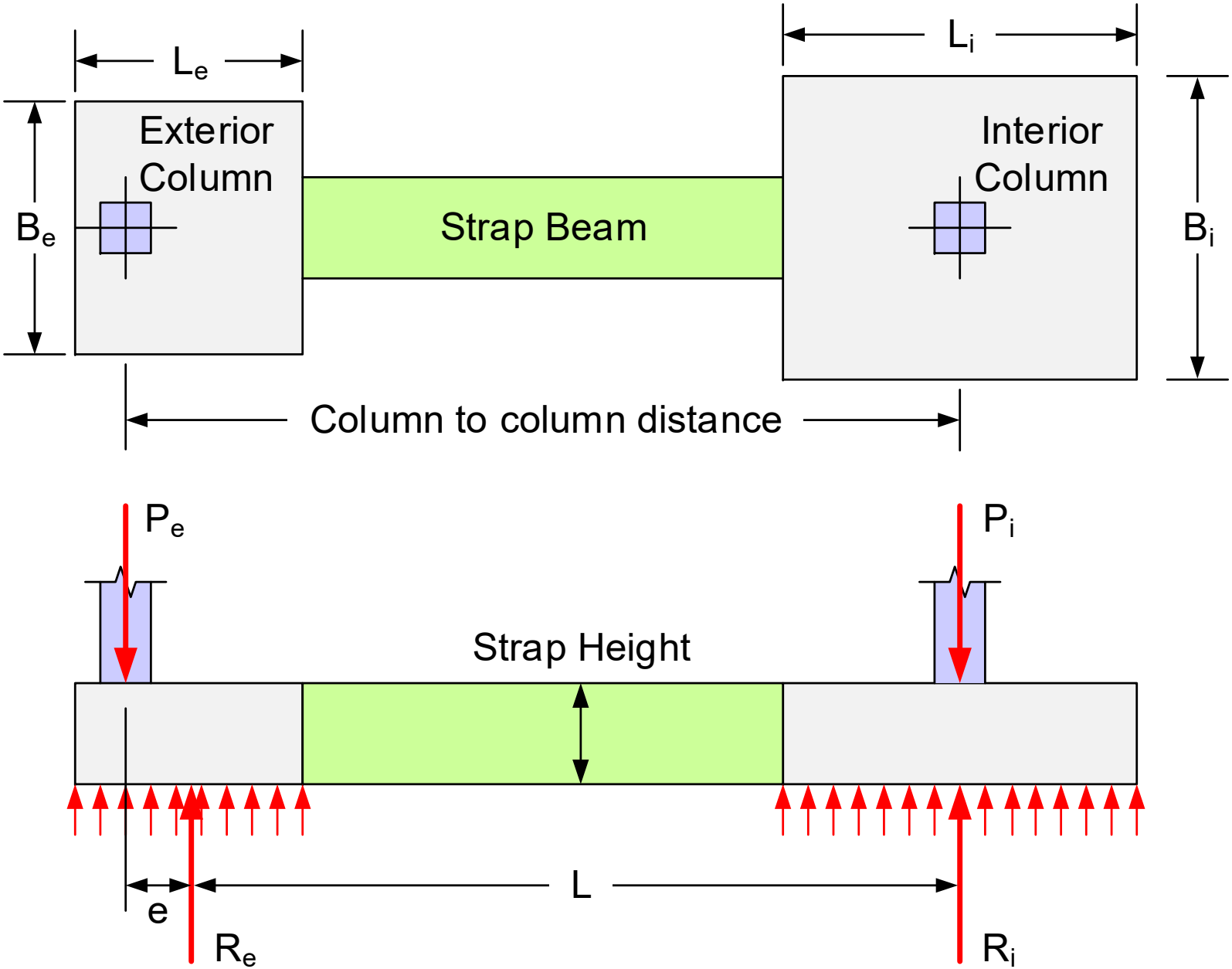


ฐานรากแบบมีคานยึดรั้ง (Strap footing)

เป็นการใช้คานเชื่อมต่อฐานรากเดี่ยวสองฐานเข้าด้วยกัน เนื่องจากเสาต้นนอกอยู่ไม่ตรงศูนย์ กลางฐานรากเพื่อไม่ให้ล้ำเขตที่ดิน ดังนั้นจึงต้องเชื่อมฐานรากของเสาต้นนอกเข้ากับฐานรากของเสาต้นในที่ใกล้ที่สุดเพื่อชดเชยการเยื้องศูนย์



น้ำหนักบรรทุกและแรงปฏิกิริยา

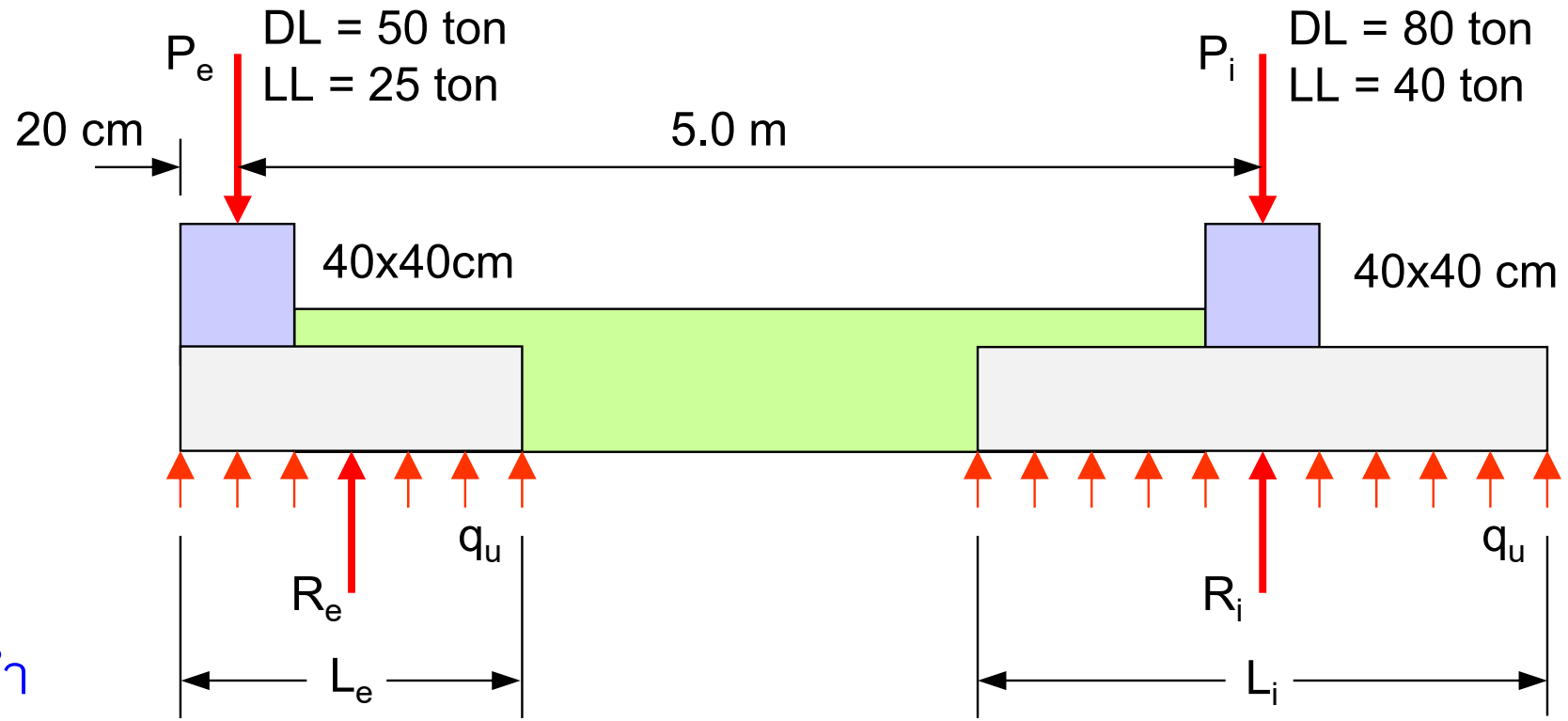


ขั้นตอนการออกแบบ

คานเชื่อมมักจะถูกก่อสร้างให้ไม่วางบนดินซึ่งจะทำให้โดยวางแบบรองท้องคานแล้วแกะแบบออกก่อนถมดิน ดังนั้นจึงสมมุติว่าไม่มีแรงดันดินกระทำบนคานเชื่อม วัตถุประสงค์ในการใช้คานเชื่อมก็เพื่อให้ได้แรงดันดินใต้แต่ละฐานรากที่สม่ำเสมอและใกล้เคียงกันเพื่อลดความแตกต่างในการเซตตัวให้น้อยที่สุด

- คำนวณตำแหน่งของแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกของเสาต้นริมและต้นใน
- จัดขนาดฐานรากทั้งสองให้ศูนย์ถ่วงพื้นที่ฐานรากตรงกับแรงลัพธ์ เพื่อให้แรงดันดินใต้ฐานกระจายสม่ำเสมอ
- ออกแบบฐานรากโดยใช้แรงดันดินที่คำนวณได้
- เขียนแผนภูมิแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดแล้วออกแบบคานเชื่อม

ตัวอย่างที่ 13.9 จงออกแบบฐานรากแบบมีคานเชื่อมในรูป กำหนดหน่วยแรงดันดินที่ยอมให้ 20 ตัน/ตร.ม. $f'_c = 240$ กก./ซม.^{2} $f_y = 4000$ กก./ซม.^{2}

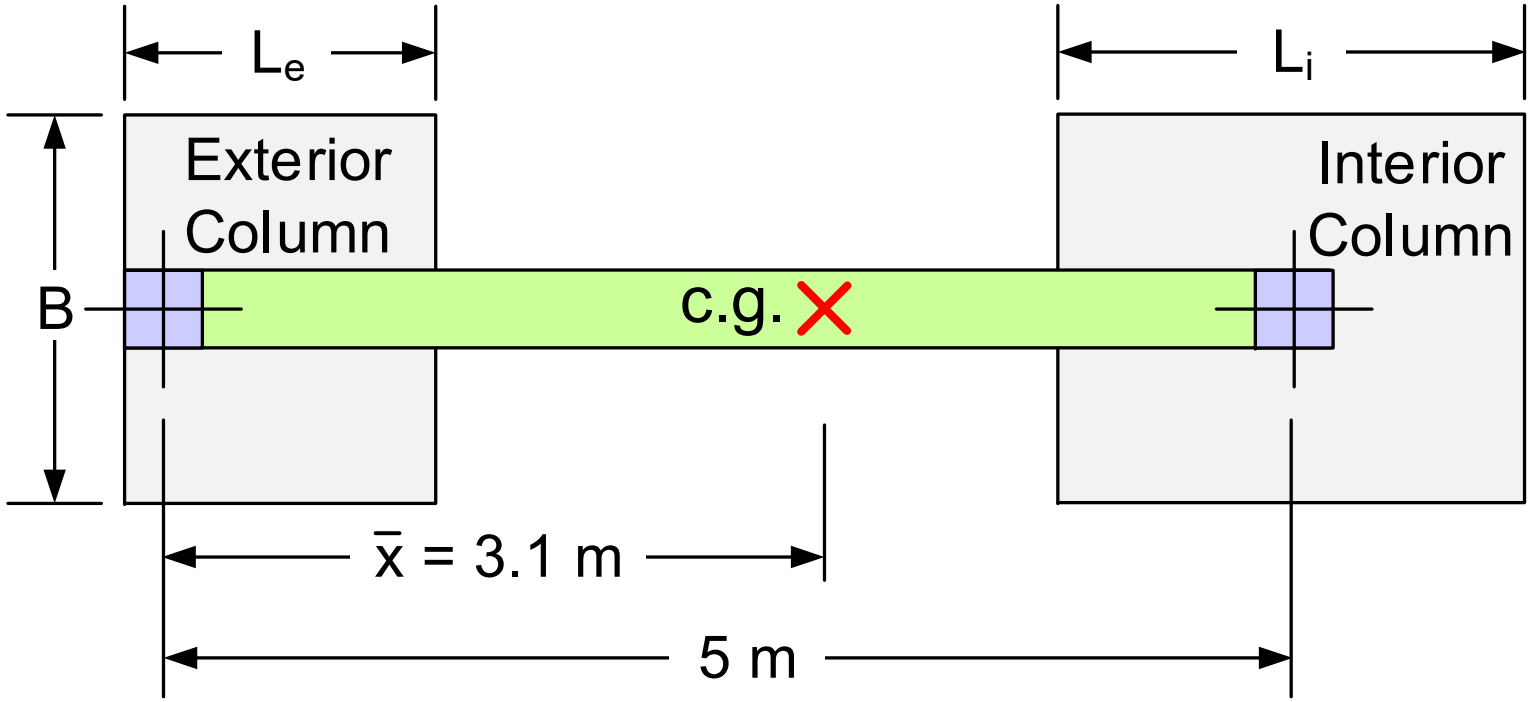


วิธีทำ

1. กำหนดตำแหน่งแรงลัพธ์ **R** โดยการหาโมเมนต์รอบศูนย์กลางเสาต้นนอก

$$(75+120)\,\bar{x} = 120(5)$$

$$\bar{x} = 3.1\text{ m from center of exterior column}$$



2. ขนาดฐานราก สมมุติฐานรากหนา = **40** ซม.

พื้นที่ฐานรากที่ต้องการ $= \frac{R}{q_a} = \frac{50+25+80+40}{20} = 9.75\ m^2$

สมมุติให้ฐานรากมีความกว้าง B เท่ากัน และยาว L_e และ L_i

พื้นที่ฐานรากรวม $B\,L_e + B\,L_i = 9.75\ m^2$

$[\Sigma M = 0]$ $B\,L_i\,(5.0) = (B\,L_e + B\,L_i)\,(3.1) = 9.75 \times 3.1 = 30.225$

ลองให้ B = 2.5 เมตร จะได้

$L_i = 30.225/(5.0\times2.5) = 2.42$ เมตร **ใช้ $L_i = 2.40$ เมตร**

$L_e = (9.75 - 2.5\times2.4)/2.5 = 1.5$ เมตร **ใช้ $L_e = 1.50$ เมตร**

ตรวจสอบ พื้นที่ฐานรากรวม $= 2.5\times2.4 + 2.5\times1.5 = 9.75$ เมตร ตามที่ต้องการ

3. ออกแบบฐานราก ทำเช่นเดียวกับฐานรากเดี่ยวทั้งสองฐานราก

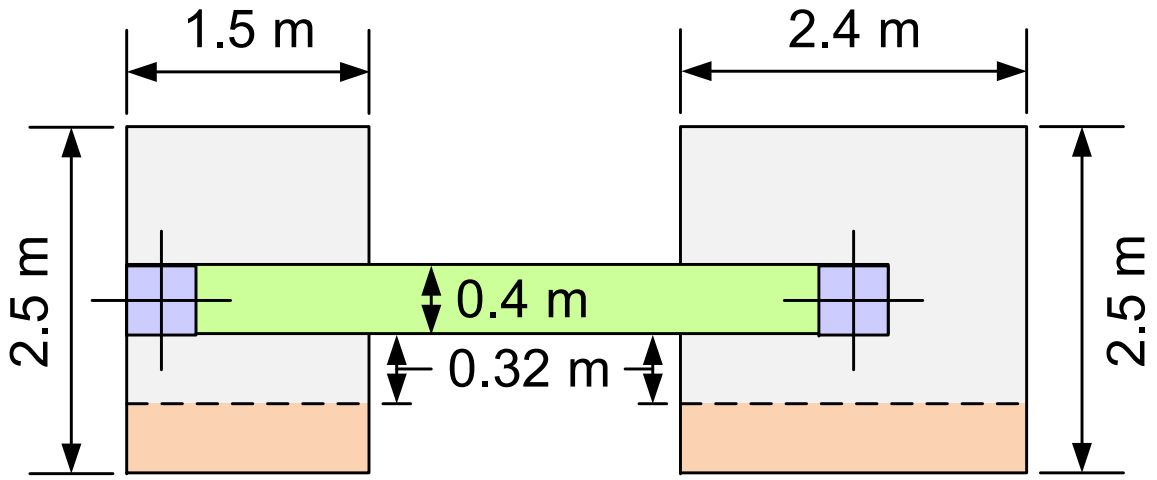
น้ำหนักประลัยจากเสาต้นนอก $= 1.4(50) + 1.7(25) = 112.5$ ตัน

น้ำหนักประลัยจากเสาต้นใน $= 1.4(80) + 1.7(40) = 180$ ตัน

แรงดันดินประลัย $q_u = \dfrac{112.5+180}{1.5\times2.5+2.4\times2.5} = 30.0$ t/m^2

การเฉือนทะลุไม่ต้องพิจารณาเนื่องจากมีคานยึดรั้ง

การเฉือนคาน : ความลึก **d = 32** ซม.



ฐานรากตัวนอก :

$$V_u = 30 \times 1.5\left[\left(\frac{2.5-0.4}{2}\right)-0.32\right] = 32.85 \text{ ton}$$

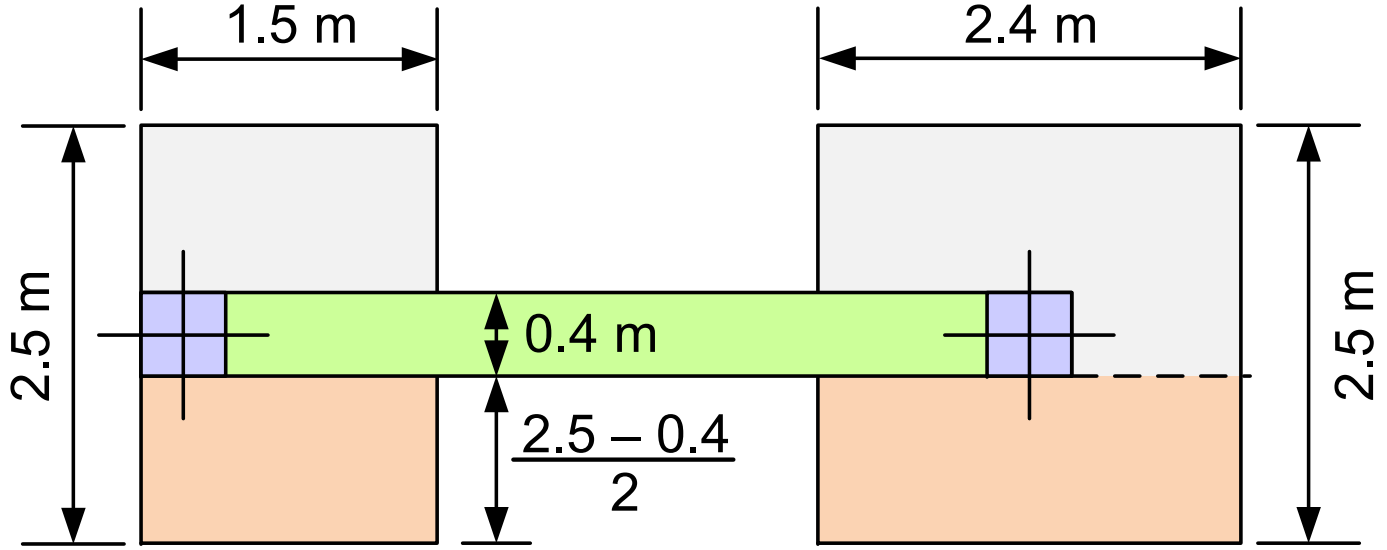
$$\phi V_c = 0.85 \times 0.53\sqrt{240} \times 150 \times 32 / 10^3 = 33.5 \text{ ton} > V_u \quad \textbf{OK}$$

ฐานรากตัวใน :

$$V_u = 30 \times 2.4\left[\left(\frac{2.5-0.4}{2}\right)-0.32\right] = 52.56 \text{ ton}$$

$$\phi V_c = 0.85 \times 0.53\sqrt{240} \times 240 \times 32 / 10^3 = 53.6 \text{ ton} > V_u \quad \textbf{OK}$$

โมเมนต์ดัด : $\rho_{min} = 0.0035, \quad \rho_{max} = 0.0197$



ฐานรากตัวนอก :

$$M_u = 30 \times \frac{1.5}{2} \times \left(\frac{2.5 - 0.4}{2} \right)^2 = 24.8 \text{ t-m}$$

$$R_n = \frac{24.8 \times 10^5}{0.9 \times 150 \times 32^2} = 17.9 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 \times 240}{4000} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 17.9}{0.85 \times 240}} \right) = 0.0047 \qquad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

$$A_s = 0.0047 \times 150 \times 32 = 22.56 \text{ cm}^2$$

USE 8DB20 (25.12 ซม.^{2})

ฐานรากตัวใน :

$$M_u = 30 \times \frac{2.4}{2} \times \left(\frac{2.5 - 0.4}{2} \right)^2 = 39.7 \text{ t-m}$$

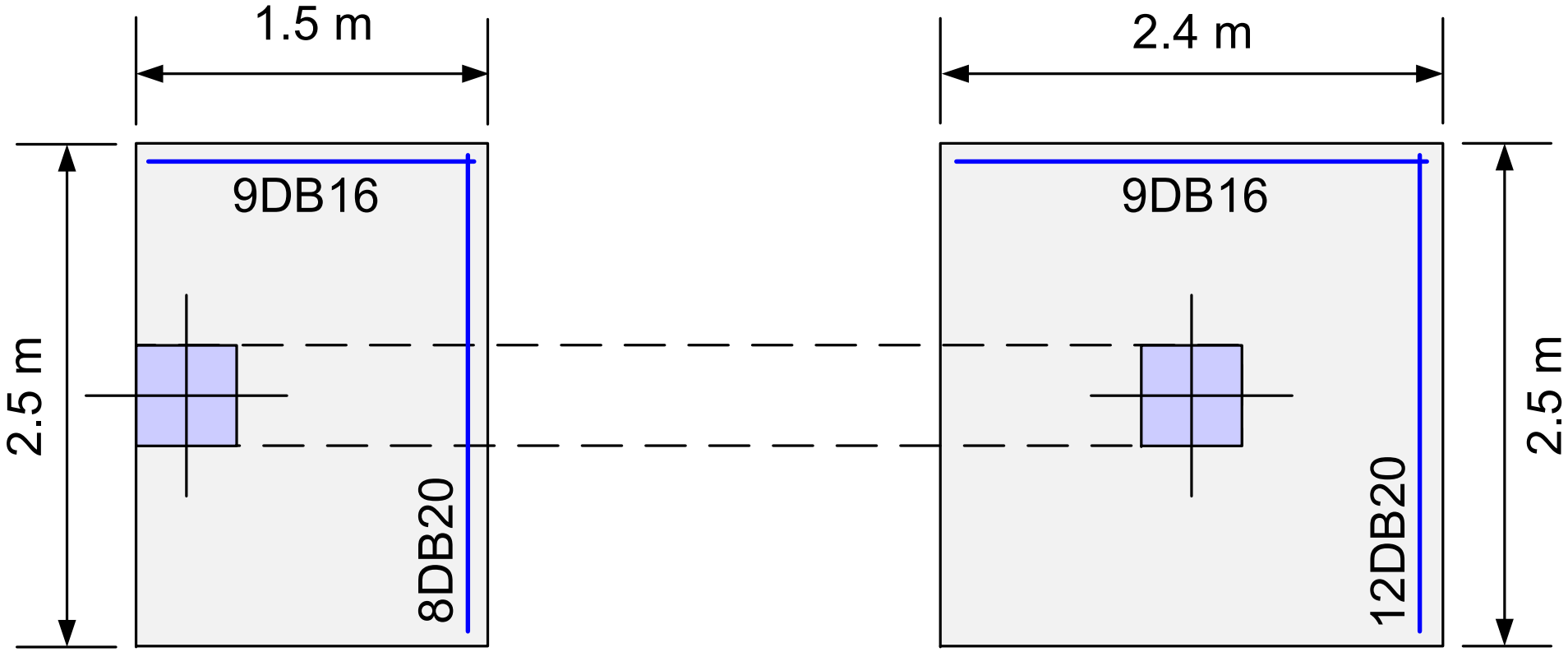
$$R_n = \frac{39.7 \times 10^5}{0.9 \times 240 \times 32^2} = 18.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 \times 240}{4000} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 18.0}{0.85 \times 240}} \right) = 0.0047 \qquad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

$$A_s = 0.0047 \times 240 \times 32 = 36.10 \text{ cm}^2 \qquad \textbf{USE 12DB20} \text{ (37.68 ซม.}^2\text{)}$$

เหล็กเสริมกันร้าวทางยาว :

$$A_s = 0.0018 \times 250 \times 40 = 18.00 \text{ cm}^2 \qquad \textbf{USE 9DB16} \text{ (18.09 ซม.}^2\text{)}$$

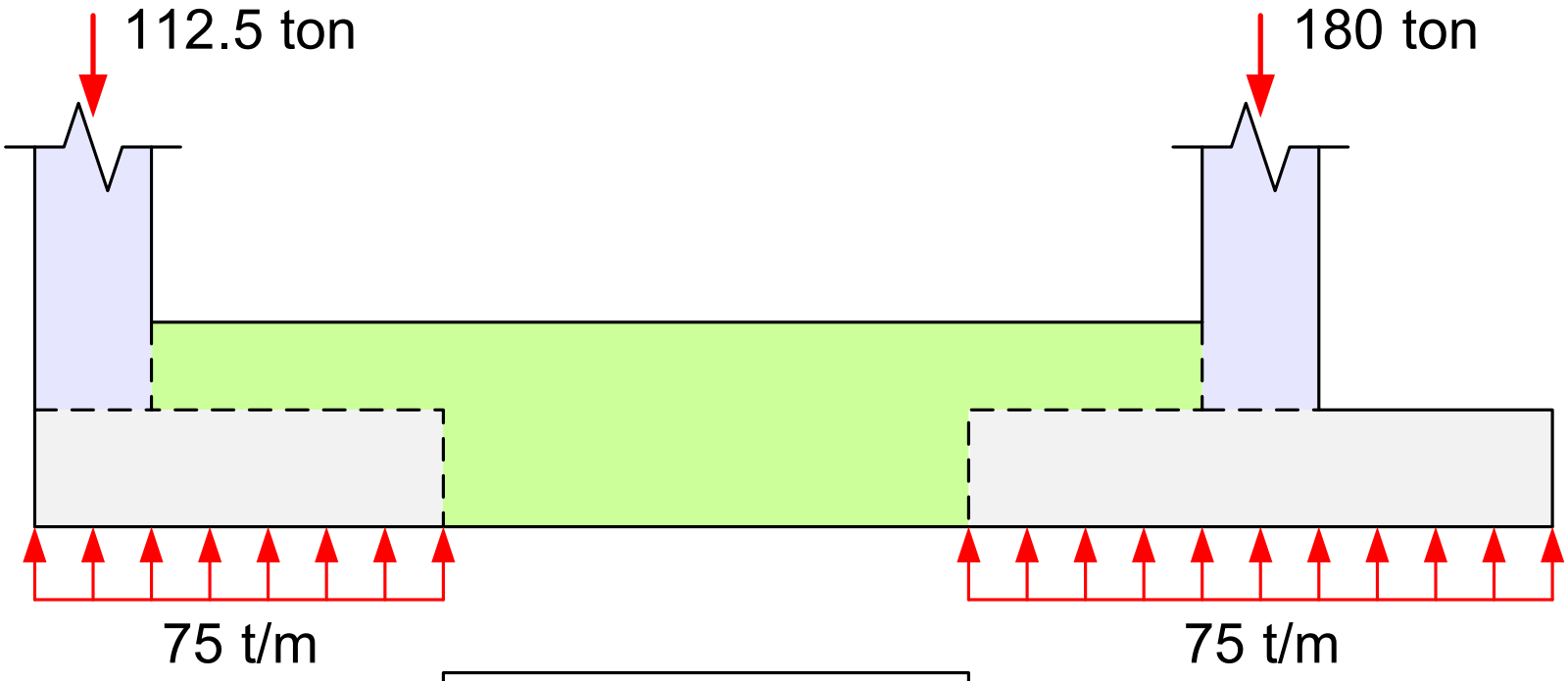


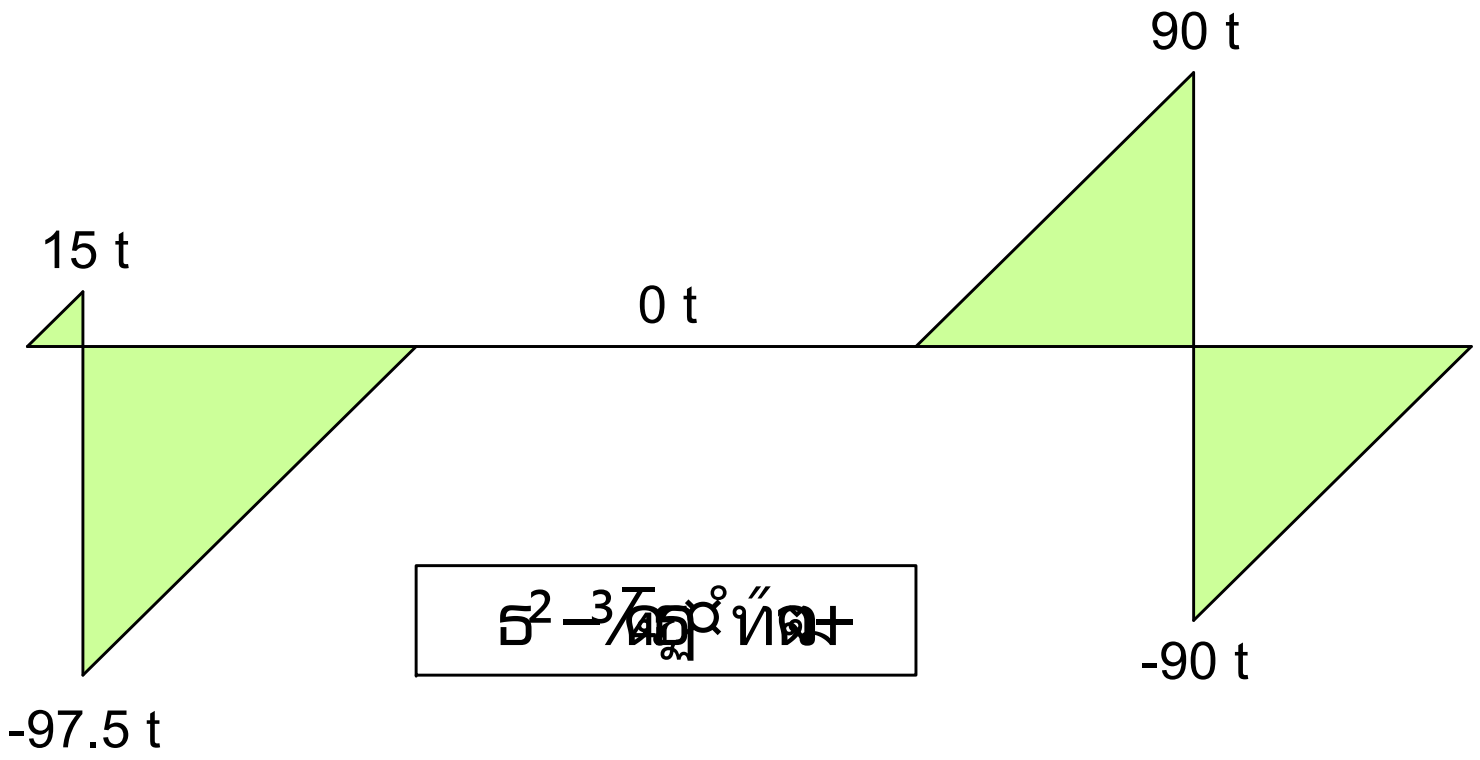
การเสริมเหล็กรับการดัดในฐานรากคานยึดรั้ง

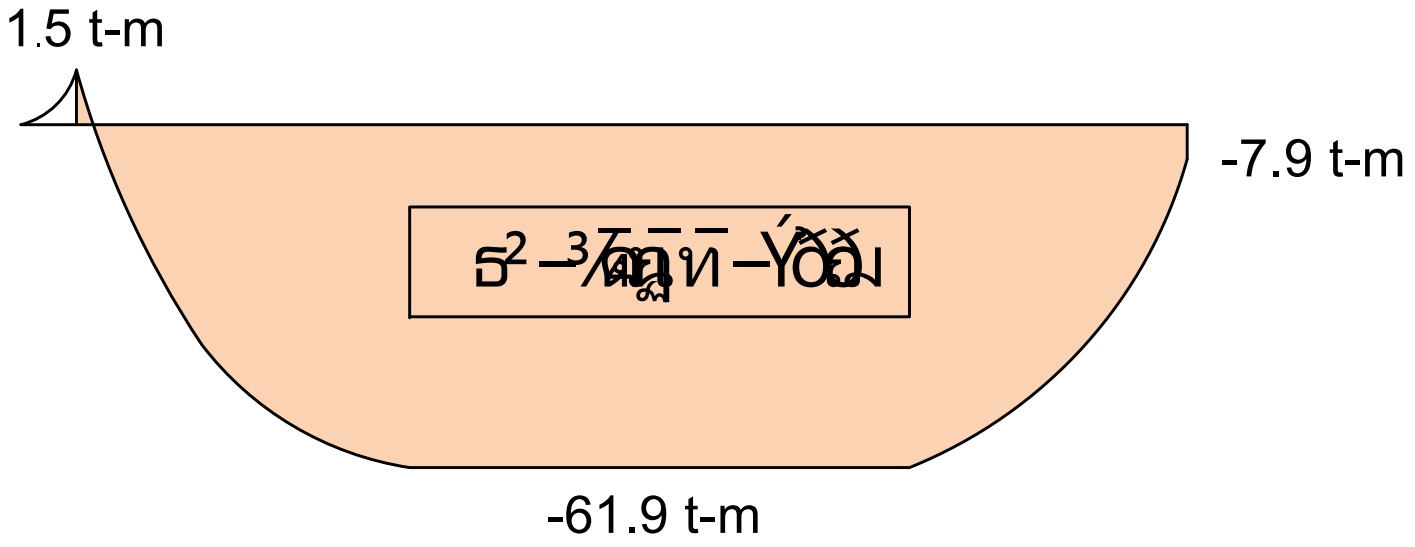
4. ออกแบบคานยึดรั้ง เพื่อรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน

ออกแบบโมเมนต์ดัด : $\rho_{min} = 0.0035,\ \rho_{max} = 0.0197$

น้ำหนักบรรทุกจากฐานราก = 30×2.5 = 75 ตัน/เมตร




90 t
15 t
0 t
-90 t
-97.5 t


1.5 t-m
-7.9 t-m
-61.9 t-m

จากแผนภูมิโมเมนต์ดัด โมเมนต์ลบมากที่สุดคือ 61.9 ตัน-เมตร

ลองใช้หน้าตัดคานยึดรั้ง 0.40 ม. × 1.00 ม. → **d = 90 ซม.**

$$R_n = \frac{61.9\times10^5}{0.9\times40\times90^2} = 21.2\ \text{kg/cm}^2$$

$$\rho = \frac{0.85\times240}{4000}\left(1-\sqrt{1-\frac{2\times21.2}{0.85\times240}}\right) = 0.0056 \qquad \rho_{min} < \rho < \rho_{max}$$

$$A_s = 0.0056\times40\times90 = 20.2\ \text{cm}^2 \qquad \textbf{USE 4DB28 } (24.63\ \text{ซม.}^2)$$

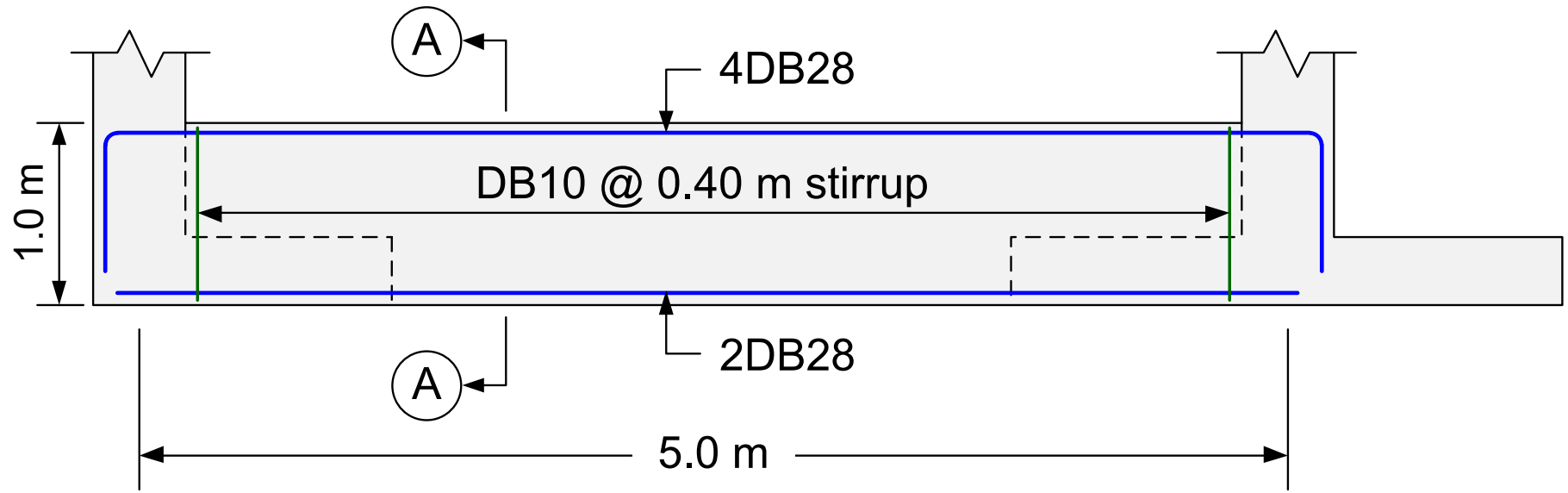
ออกแบบแรงเฉือน : จากแผนภูมิแรงเฉือน ที่ระยะ 0.90 ม. จากผิวเสาต้นริมไปทางขวา

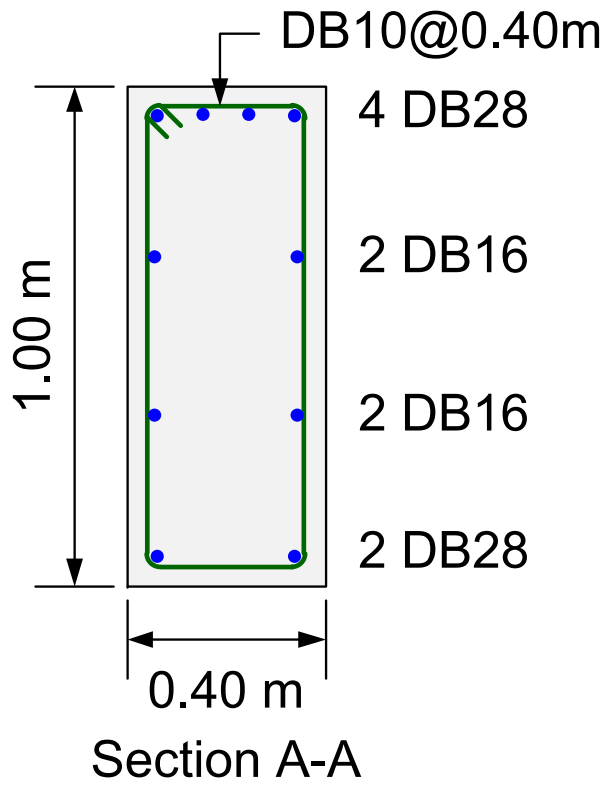
$$V_u = 97.5 - 75\times(0.2+0.9) = 15.0\ \text{ton}$$

$$\phi V_c = 0.85\times0.53\sqrt{240}\times40\times90/10^3 = 25.1\ \text{ton} > V_u \qquad \textbf{OK}$$

เหล็กปลอกน้อยที่สุด $\left(\min A_v = 3.5\frac{bs}{f_y}\right)$ $d/2 = 45$ ซม. < 60 ซม.

DB10 : $(A_v = 2(0.785) = 1.57\text{cm}^2)$ $s = \frac{1.57\times4{,}000}{3.5\times40} = 45\ \text{cm}$ **USE DB10 @ 0.40 m**





Section A-A

แบบรายละเอียดการเสริมเหล็กในคานยึดฐานราก