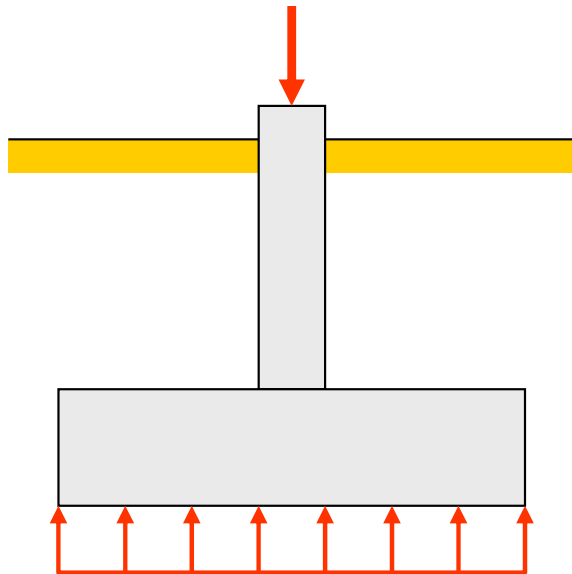


13

Reinforced Concrete Design II

Footing Design

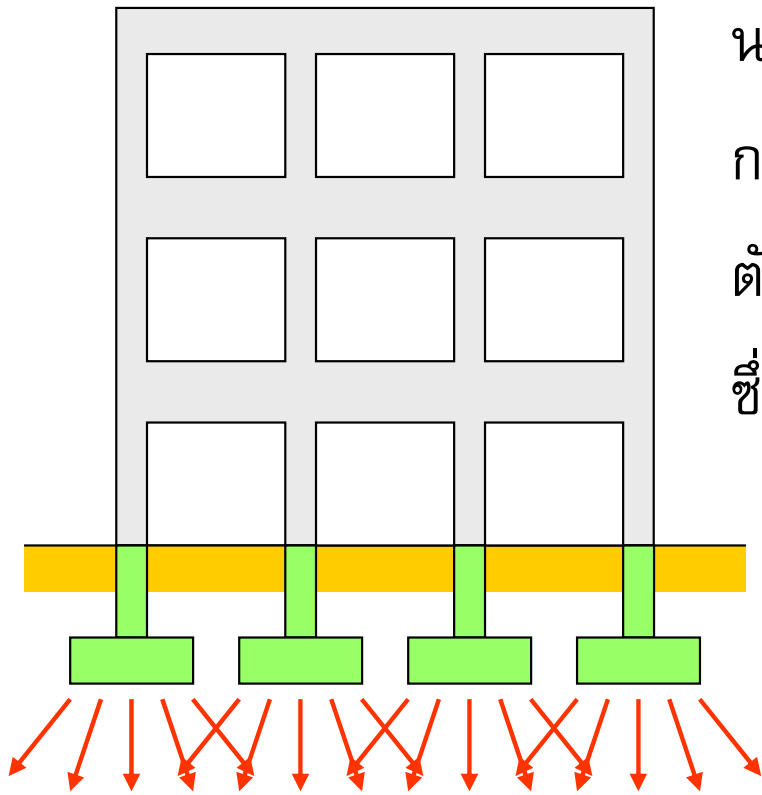


- ชนิดของฐานราก
- แรงดันแบกทานของดินใต้ฐานราก
- ฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกทุกเยื้องศูนย์กลาง
- ฐานรากรับผนัง
- ฐานรากรับเสาเดี่ยว

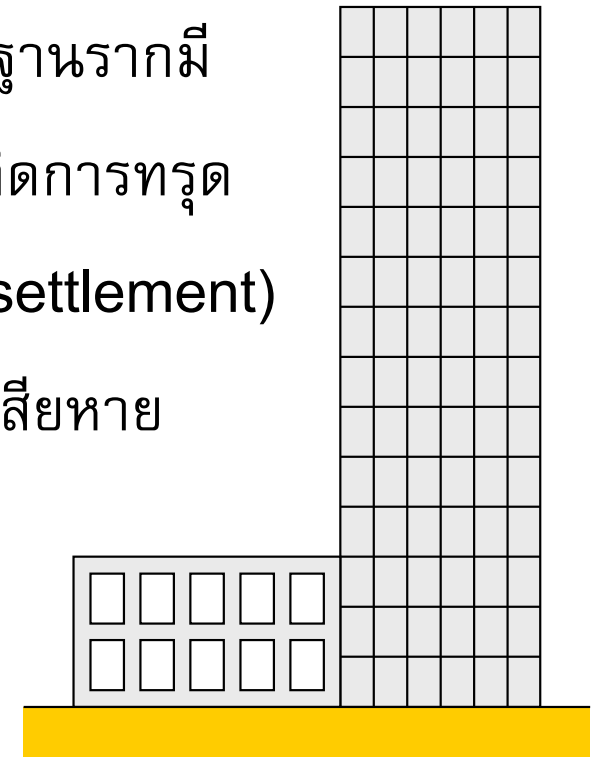
โดย ผศ.ดร.มงคล จิรวัชรเดช

ฐานรากของ โครงสร้าง

ฐานรากของโครงสร้างมีหน้าที่รับน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมด แล้วส่งถ่ายลงสู่พื้นดินอย่างปลอดภัยโดยไม่เกิดการวิบัติของดินหรือการทรุดตัวมากเกินไปกว่าค่ากำหนด

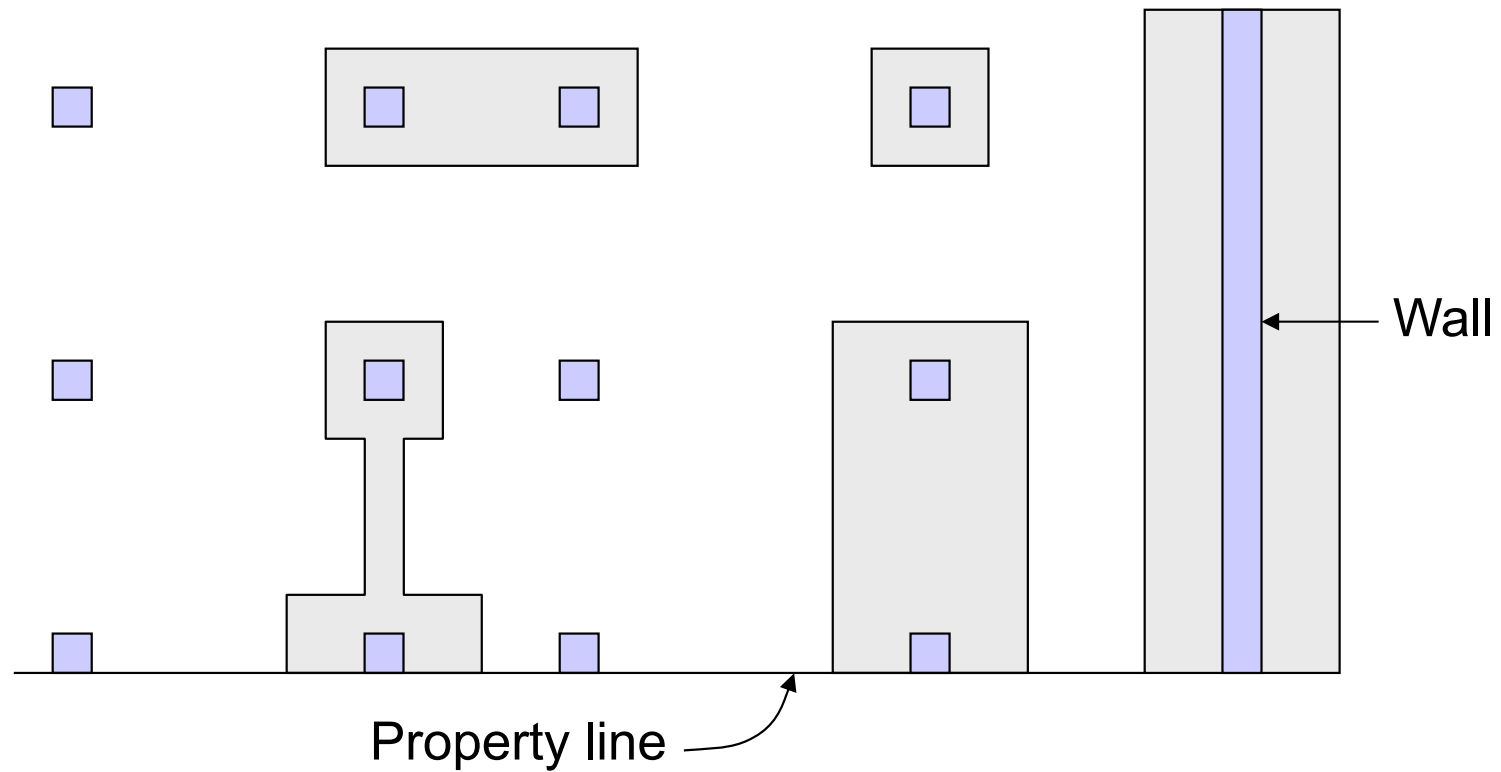


นอกจากนั้นยังต้องออกแบบให้ฐานรากมีการทรุดตัวเท่าๆกันเพื่อไม่ให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (differential settlement) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย



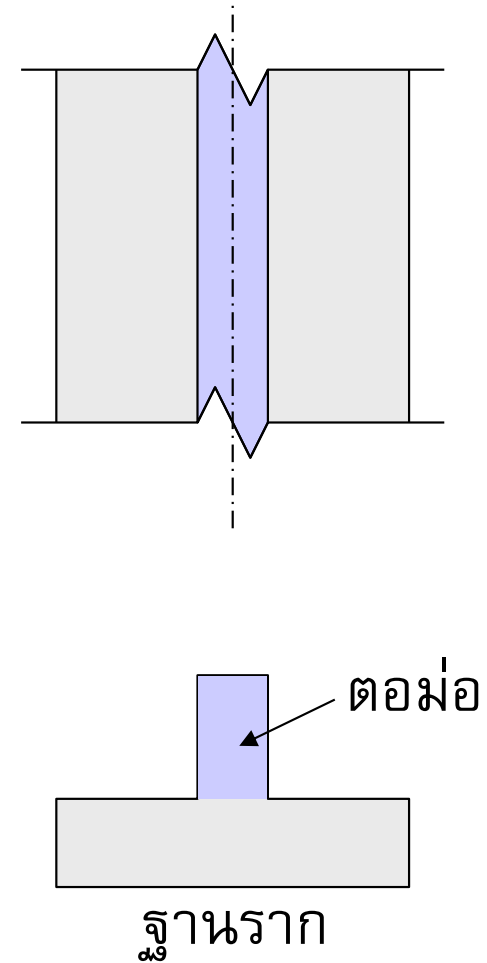
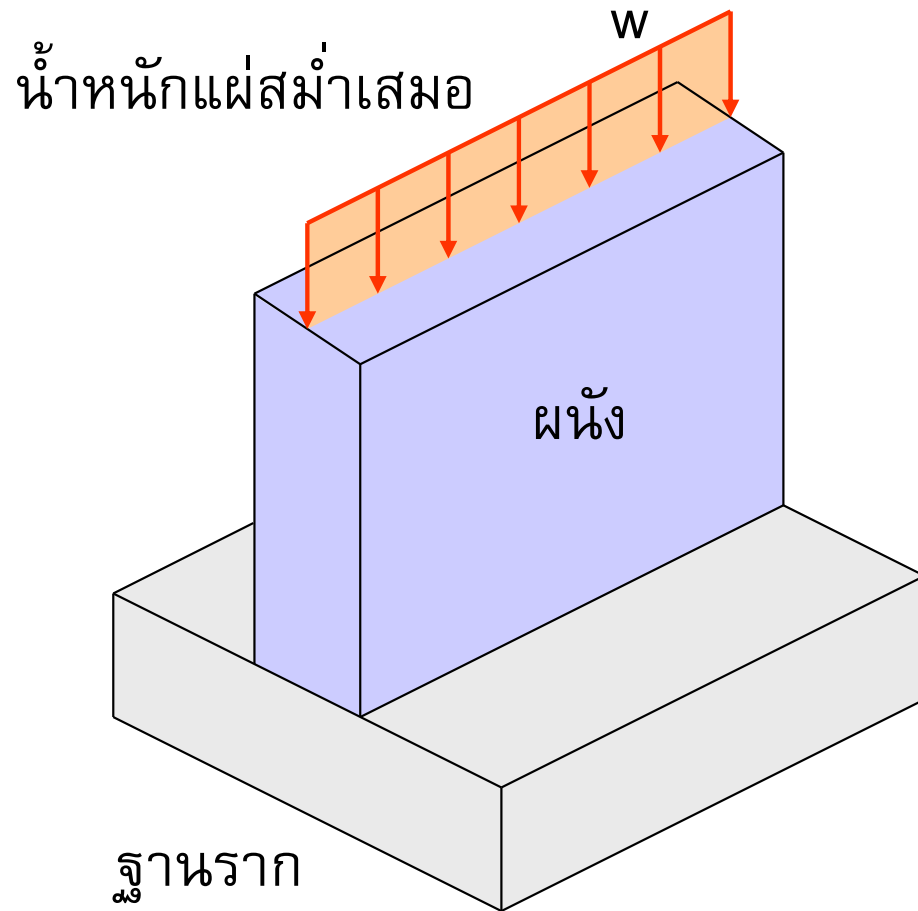
ชนิดของฐานราก

ชนิดของฐานรากจะขึ้นกับลักษณะของดิน และเสาที่ฐานรากรองรับ



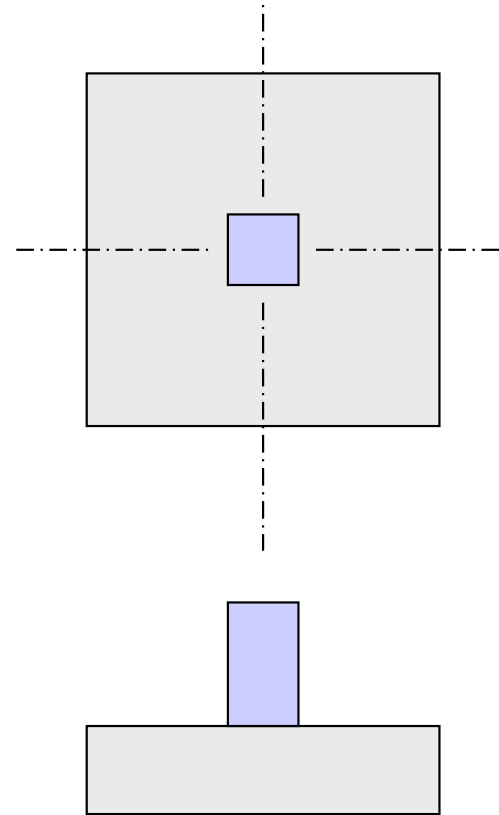
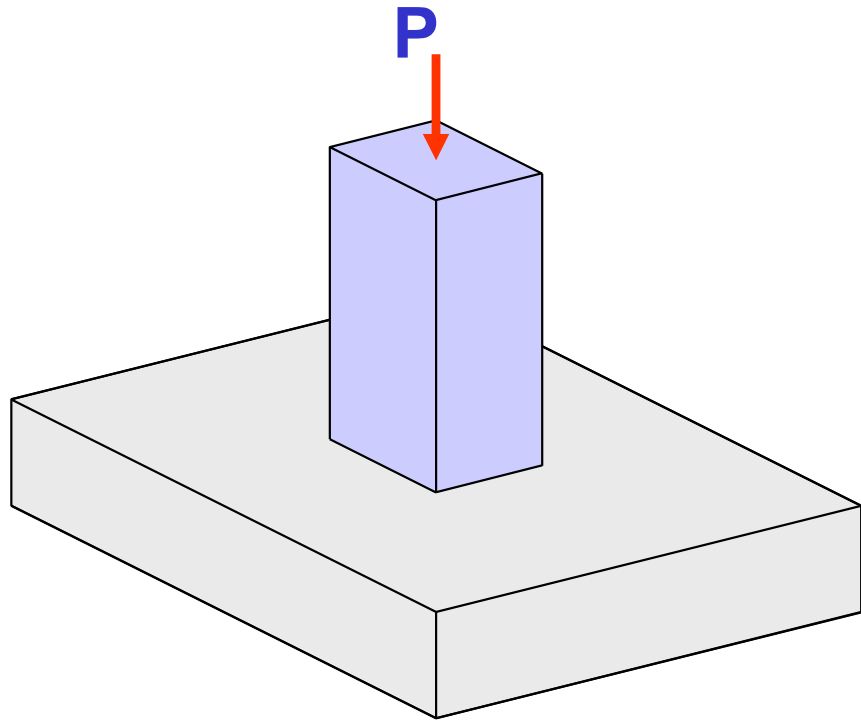
ฐานรากรับผนัง (wall footing)

มีการรับน้ำหนักทางเดียว คือยื่นออกไปทั้งสองข้างจากผนัง



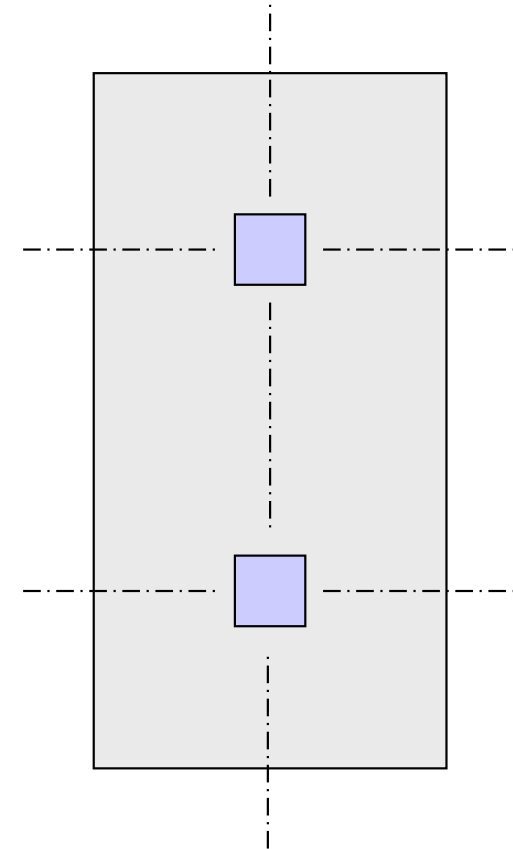
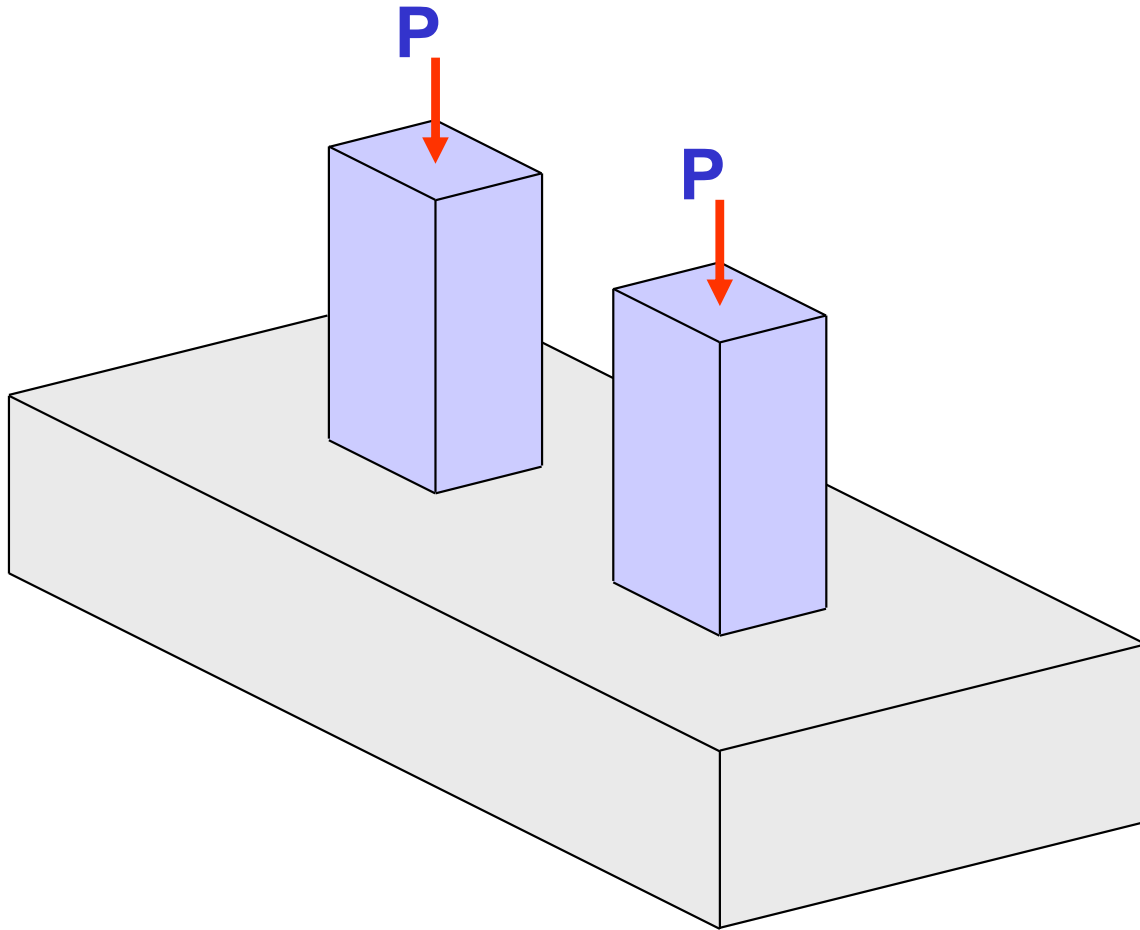
ฐานรากแผ่รับเสาเดี่ยว (spread footing)

มีการรับน้ำหนักสองทาง คือยื่นออกไปทั้งสองทิศทางจากเสาหนึ่งต้น

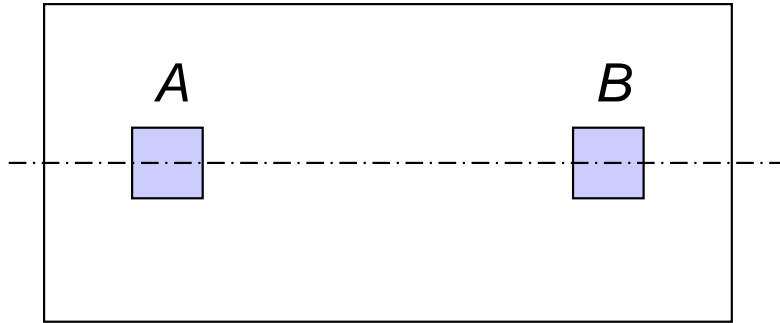


ฐานรากร่วม (combined footing)

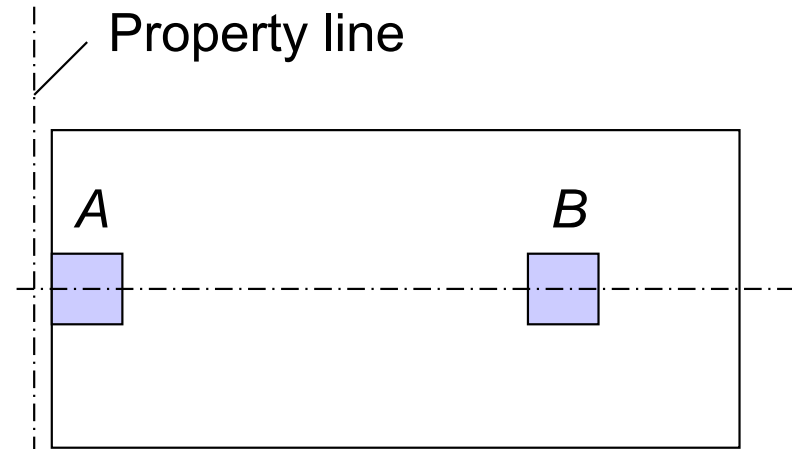
ใช้รับน้ำหนักจากเสาสองต้นหรือมากกว่า ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน



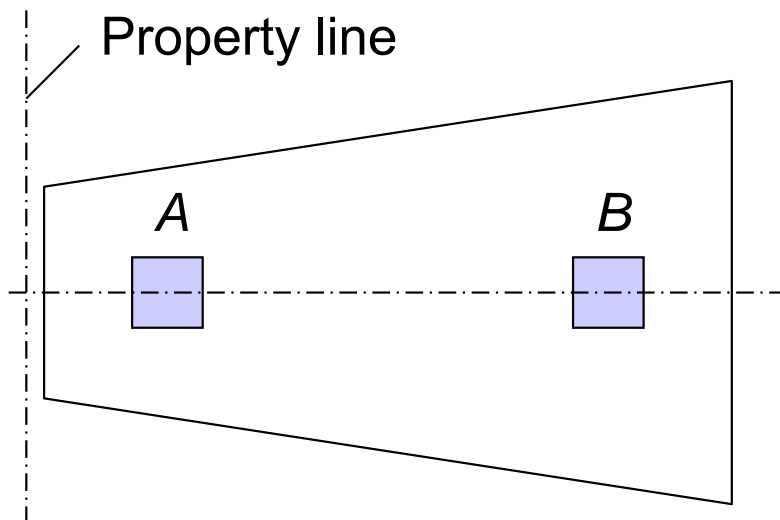
ฐานรากร่วมแบบต่างๆ



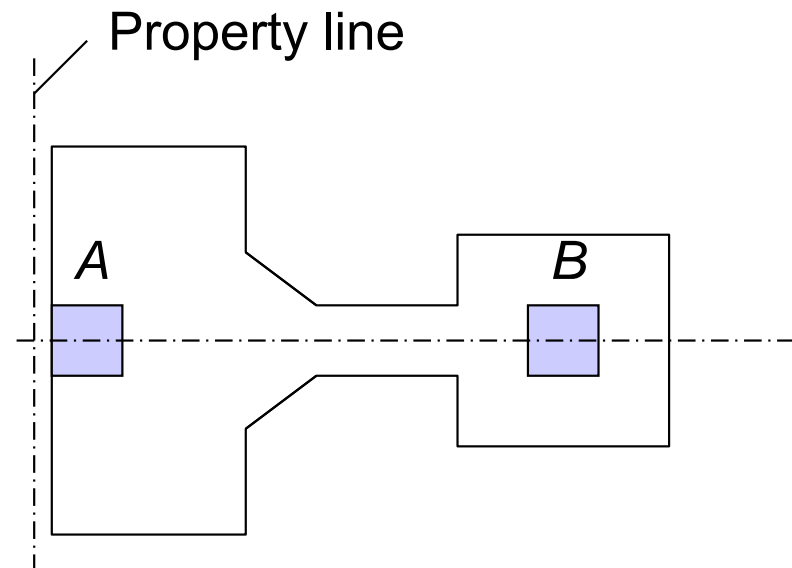
Rectangular, $P_A = P_B$



Rectangular, $P_A < P_B$

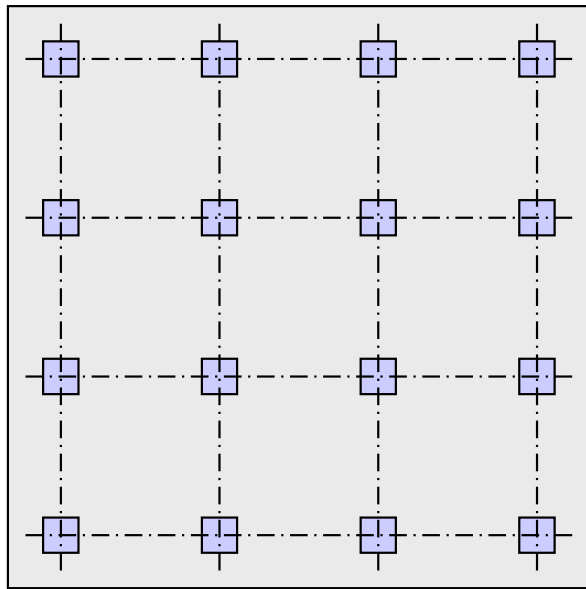


Rectangular, $P_A < P_B$

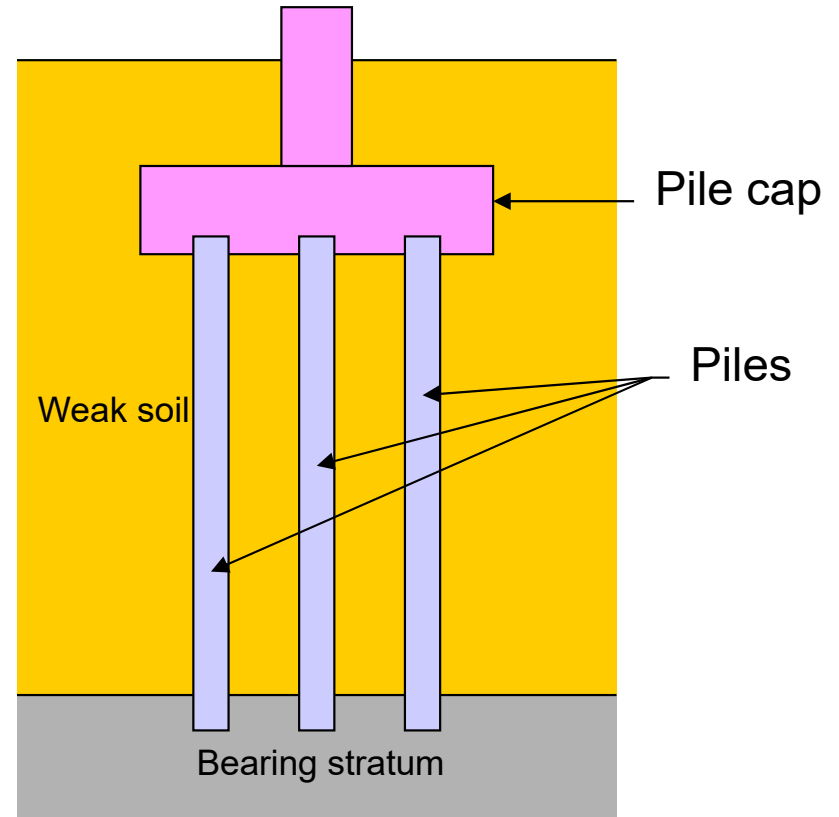


Strap or Cantilever

ฐานรากแบบอื่นๆ



ฐานรากปูพรม หรือฐานแผ่น
(mat footing)



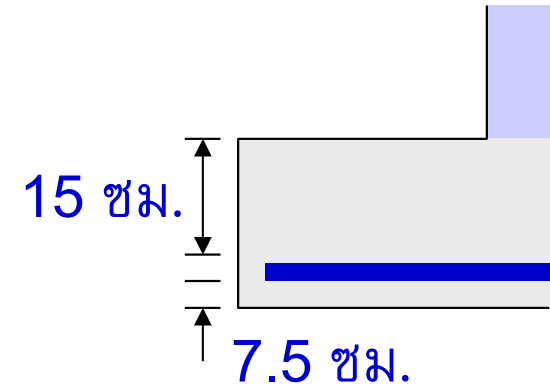
ฐานรากบนเสาเข็ม
(pile cap)

ข้อกำหนดในการออกแบบฐานราก

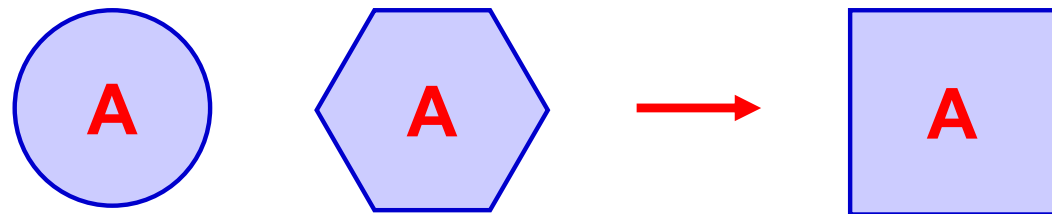
ว.ส.ท.

- ▶ ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งผิวคอนกรีตสัมผัสดินตลอดเวลา ดังนั้นใช้ระยะหุ้มคอนกรีตต่ำสุด **7.5** ซม.

- ▶ ความลึกของฐานรากเหนือเหล็กเสริมล่าง:
ต้องไม่น้อยกว่า **15** ซม. สำหรับฐานรากวางบนดิน และ
ต้องไม่น้อยกว่า **30** ซม. สำหรับฐานรากวางบนเสาเข็ม



- ▶ เสาตอม่อรูปกลมหรือรูปหลายเหลี่ยม อาจคิดเสมือนเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีพื้นที่เท่ากัน เพื่อใช้ในการกำหนดหน้าตัดวิกฤตของโมเมนต์ แรงเฉือน และการดึงยึดของเหล็กเสริม

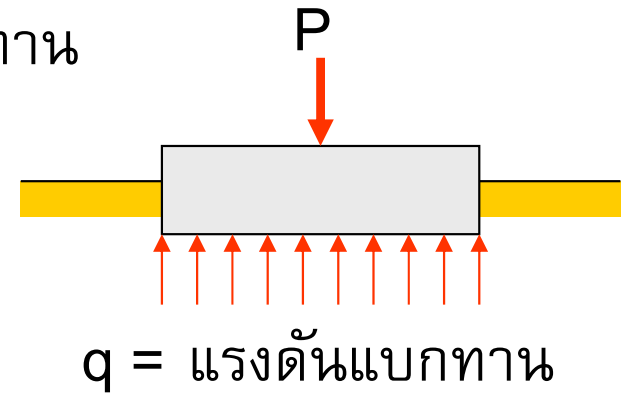


แรงดันแบกทานภายใต้ฐานราก

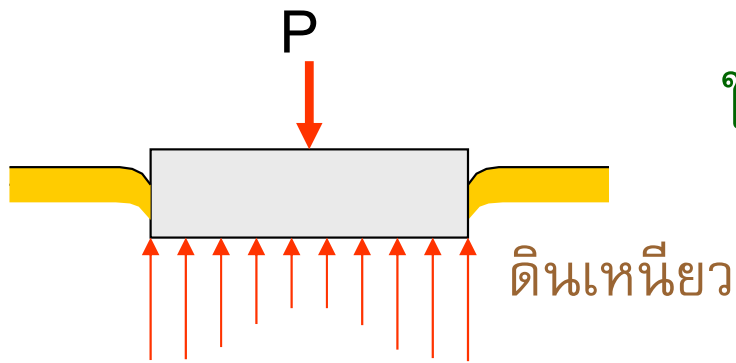
น้ำหนักบรรทุกทุกถ่ายผ่านฐานรากลงสู่ชั้นดินจะเกิดแรงดันแบกทาน

ถ้าน้ำหนักลงตรงศูนย์กลางฐานรากจะสมมุติให้แรงดันมีการ

แผ่กระจายสม่ำเสมอเท่ากันทั้งพื้นที่



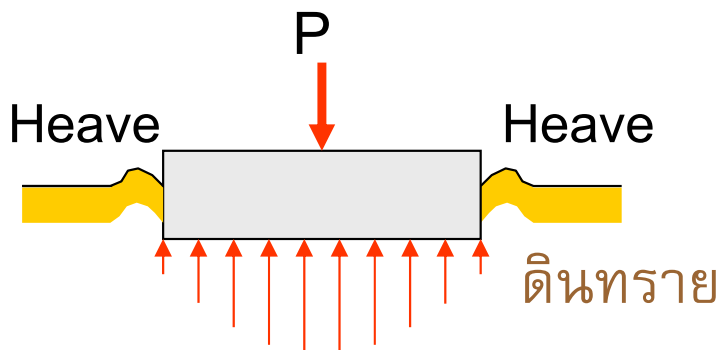
ในความเป็นจริงแล้วแรงดันไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก :



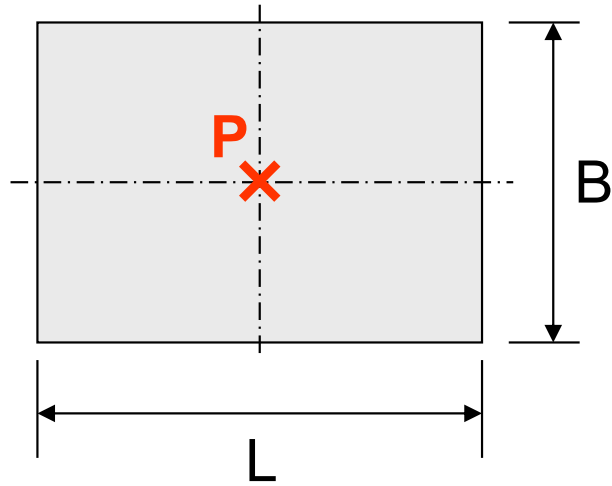
▶ ความยืดหยุ่นของฐานราก

▶ ความลึกของฐานรากใต้ผิวดิน

▶ ชนิดของดิน: ดินเหนียว หรือ ดินทราย



หน่วยแรงดันขั้นสุดของดิน



ฐานรากมีความกว้าง **B** ความยาว **L** รับน้ำหนักบรรทุก

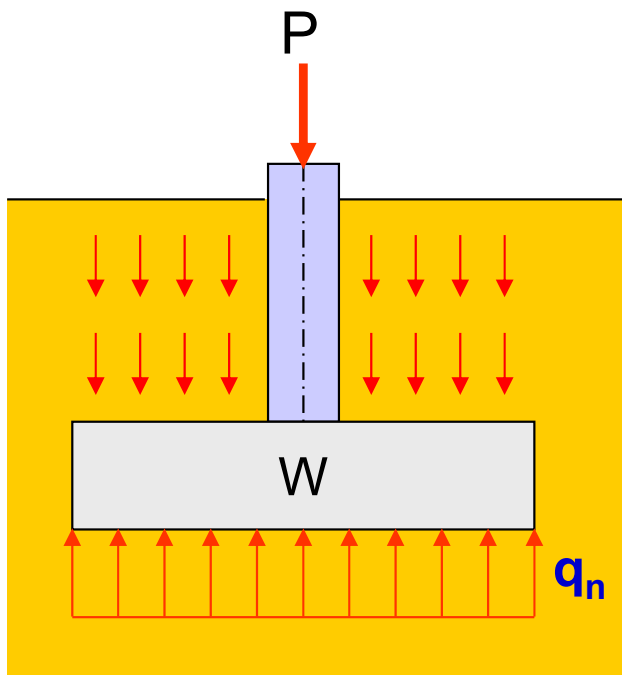
P กระทำลงกลางพื้นที่

แรงดันขั้นของดินใต้ฐานราก $q = (P + W) / BL$

โดยจะต้องไม่เกินแรงดันที่ยอมให้ของดิน $q \leq q_a$

แต่ในการคำนวณโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในฐานรากจะ

ใช้แรงดันขั้นสุดของดิน (net soil pressure : q_n)



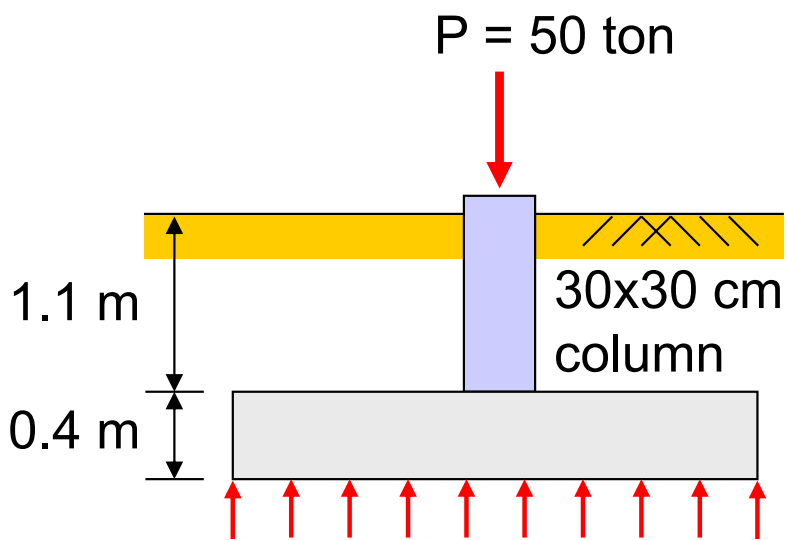
$$q_n = P / BL$$

เนื่องจากแรงดันขั้นบางส่วนถูกต้านโดยน้ำหนักดินถม

เหนือฐานราก

ตัวอย่าง : ฐานรากเดี่ยวรับน้ำหนักตรงศูนย์กลาง

เสาตอม่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานตามแนวแกนทั้งหมด 50 ตัน รองรับโดยฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส จงพิจารณาขนาดฐานรากและหน่วยแรงดันดินที่เกิดขึ้น กำหนดหน่วยแรงแบกทานดินที่ยอมให้ $q_a = 8.0$ ตัน/ตร.ม.



วิธีทำ สมมุติน้ำหนักฐานราก 10%

ขนาดพื้นที่ฐานรากที่ต้องการ:

$$A_{\text{req'd}} = \frac{50 \times 1.10}{8.0} = 6.88 \text{ ตร.ม.}$$

ใช้ฐานรากขนาด 2.7×2.7 ม. ($A = 7.29$ ตร.ม.)

ลองใช้ฐานรากหนา 0.4 ม. \rightarrow น้ำหนักฐานราก: $W = 0.4 \times 2.7^2 \times 2.4 = 7.0$ ตัน

หน่วยแรงดันขึ้นทั้งหมดของดิน: $q = (50 + 7) / 2.7^2 = 7.8$ ตัน/ตร.ม. $< q_a$ **OK**

หน่วยแรงดันขึ้นสุทธิของดิน: $q_n = 50 / 2.7^2 = 6.9$ ตัน/ตร.ม.

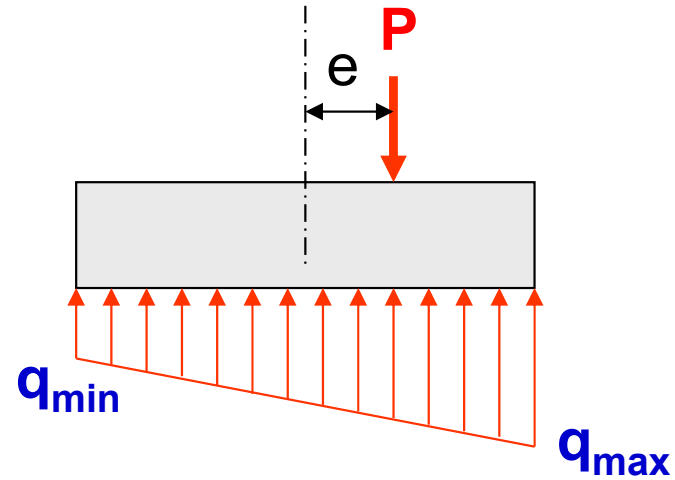
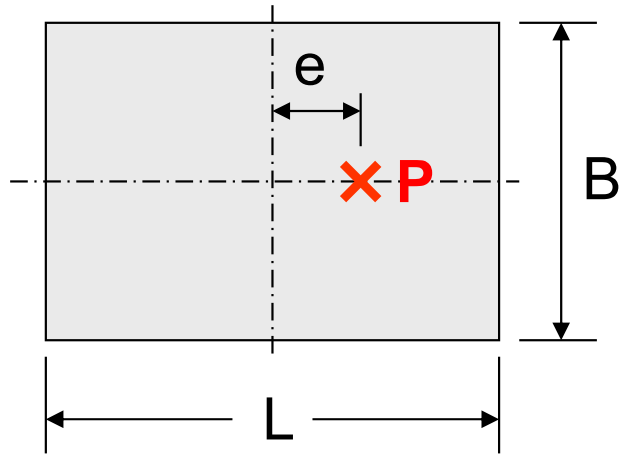
ตารางที่ 12.1 กำลังแบกทานของดินตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

| ประเภทดิน | กำลังแบกทาน (ตัน/ตร.ม.) |
|-----------------------------|----------------------------|
| ดินอ่อนหรือดินถมแน่นเต็มที่ | 2 |
| ดินปานกลางหรือทรายร่วน | 5 |
| ดินแน่นหรือทรายหยาบ | 10 |
| กรวดหรือดินดาน | 20 |
| หินดินดาน | 25 |
| หินปูนหรือหินทราย | 30 |
| หินอัคนีที่ยังไม่แปรสภาพ | 100 |

*ใช้ในกรณีไม่มีเอกสารรับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้แสดงผลการทดลองหรือการคำนวณ

ฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกทุกเยื้องศูนย์กลาง

ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกทุก P กระทำเยื้องศูนย์กลาง หรือฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกร่วมกับโมเมนต์ดัด



หน่วยแรงดันขึ้นของดินใต้ฐานราก q จะกระจายตัวแบบเชิงเส้นมีค่ามากที่สุด และน้อยที่สุดที่ของฐานราก

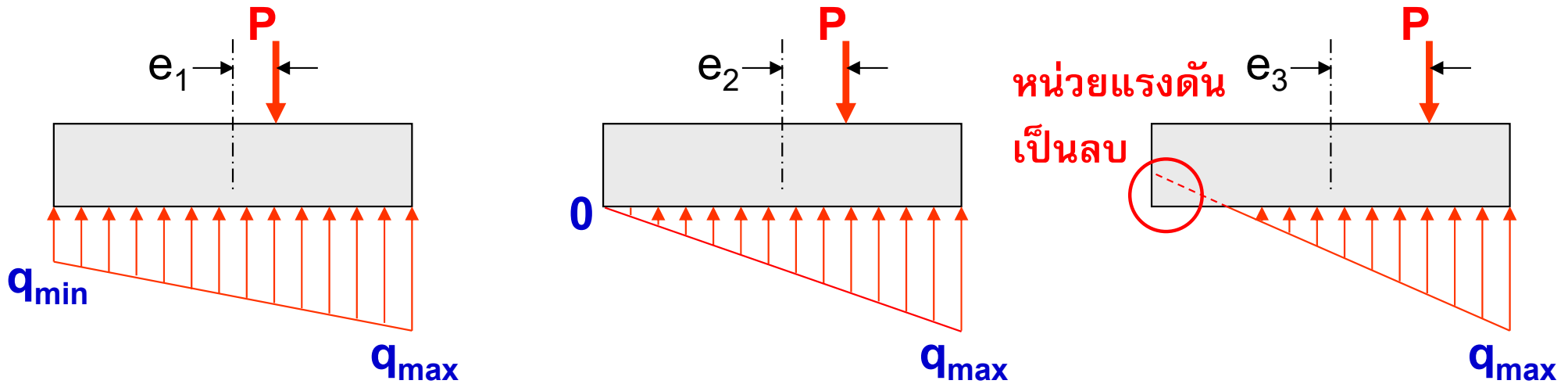
$$q_{\min} = \frac{P}{A} - \frac{Mc}{I} = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{BL^2}$$

$$q_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{BL^2} \leq q_a$$

$$c = L/2$$

$$I = BL^3/12$$

หน่วยแรงดันดินขึ้นที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ



พยายามหลีกเลี่ยงหน่วยแรงดันขึ้นของดินเป็นลบกลายเป็นหน่วยแรงดึง ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถส่งผ่านไปยังฐานรากได้ อาจทำให้ฐานรากพลิกคว่ำได้

เพื่อให้แรงดันใต้ฐานเป็นแรงอัดทั้งหมด กำหนดให้ $q_{\min} = 0$

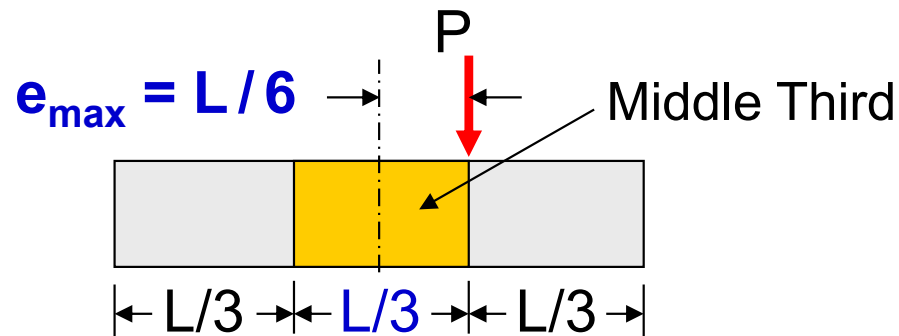
$$c = L/2$$

$$A = BL$$

$$I = BL^3/12$$

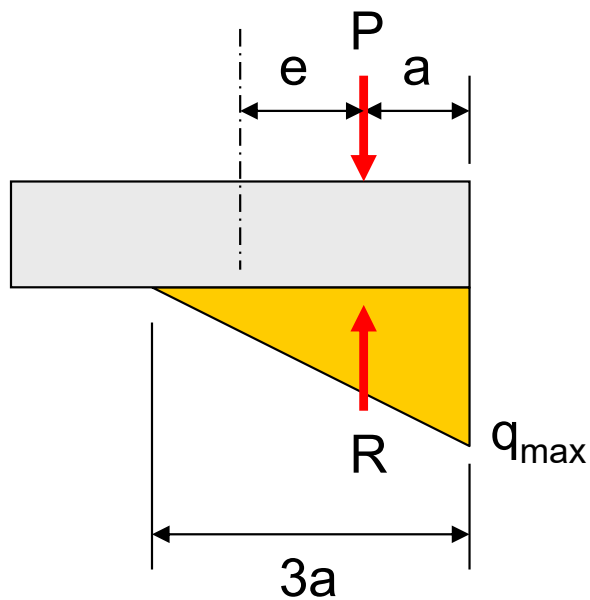
$$q_{\min} = \frac{P}{A} - \frac{Mc}{I} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{P}{A} = \frac{Pec}{I} \quad \rightarrow \quad e = \frac{I}{Ac}$$

$$e_{\max} = \frac{BL^3/12}{BL(L/2)} = L/6$$



เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลาง $e > L/6$

หน่วยแรงดันขึ้นของดินใต้ฐานจะกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยแรงลัพธ์ขึ้น R
จะตรงกับน้ำหนักบรรทุก P



หน่วยแรงดันขึ้นของดินมากที่สุดหาได้จาก

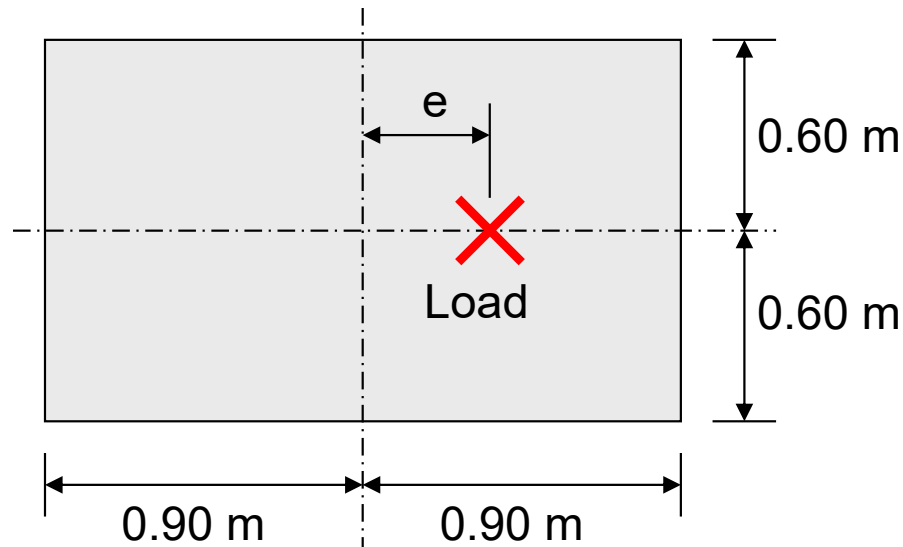
$$P = R = \frac{1}{2} \times 3a \times b \times q_{\max}$$

$$q_{\max} = \frac{2P}{3ab}$$

$$\text{เมื่อ } a = L/2 - e$$

ตัวอย่างที่ 13.1 ฐานรากขนาด 1.8 x 1.2 ม. รับน้ำหนักบรรทุกทุก 80 ตันกระทำที่ระยะเยื้องศูนย์กลางในแนวราบ 0.15 ม. จงพิจารณาแรงดันดินใต้ฐานราก แล้วคำนวณซ้ำอีกครั้งสำหรับระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.40 ม.

วิธีทำ $e = 0.15 \text{ ม.} < [1.8 / 6 = 0.30 \text{ ม.}]$



$$q_{\min} = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{BL^2}$$

$$= \frac{80}{1.2 \times 1.8} - \frac{6 \times 80 \times 0.15}{1.2 \times 1.8^2}$$

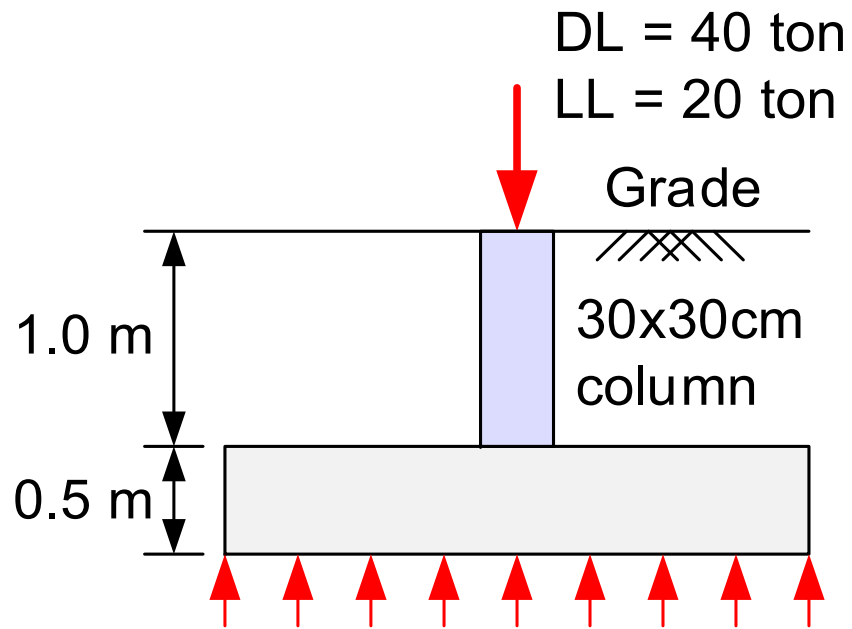
$$= 37.0 - 18.5 = 18.5 \text{ ตัน/ตร.ม.}$$

$$q_{\max} = 37.0 + 18.5 = 55.5 \text{ ตัน/ตร.ม.}$$

เนื่องจาก $e = 0.40 \text{ ม.} > [1.8/6 = 0.30 \text{ ม.}]$ ใช้สมการหน่วยแรงสามเหลี่ยม

$$a = 0.90 - 0.40 = 0.50 \text{ ม.} \rightarrow q_{\max} = \frac{2P}{3ab} = \frac{2 \times 80}{3 \times 0.5 \times 1.2} = 88.9 \text{ ตัน/ตร.ม.}$$

ตัวอย่างที่ 13.2 คำนวณแรงดันใต้ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5×2.5 ม. หน่วยน้ำหนักดิน $\gamma_s = 2.0$ ตัน/ลบ.ม. และคอนกรีต $\gamma_c = 2.4$ ตัน/ลบ.ม.



วิธีทำ น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดบนฐานราก

$$\text{น้ำหนักฐานราก} = (2.5^2)(0.5)(2.4) = 7.5 \text{ ตัน}$$

$$\text{น้ำหนักเสา} = (.3^2)(1.0)(2.4) = 0.2 \text{ ตัน}$$

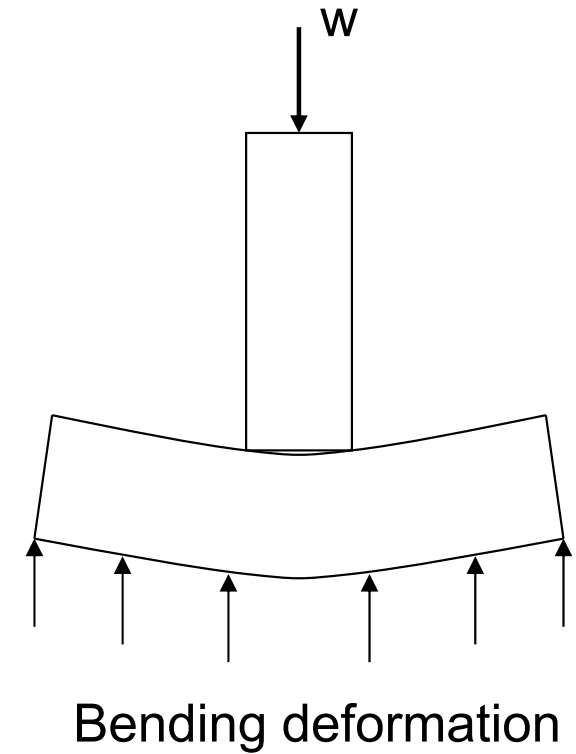
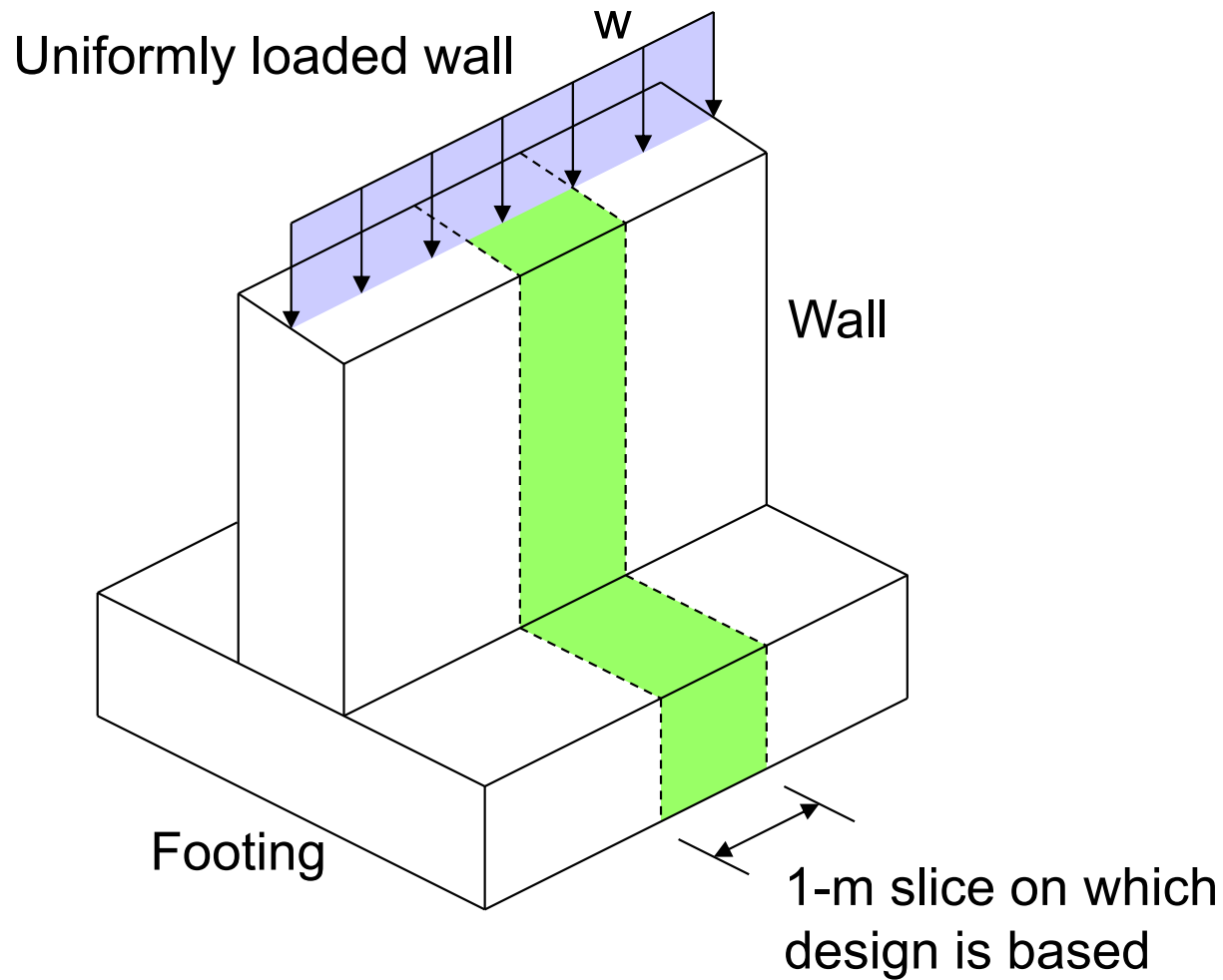
$$\text{น้ำหนักดิน} = (1.0)(2.5^2 - 0.3^2)(2.0) = 12.3 \text{ ตัน}$$

$$\text{น้ำหนักบรรทุก} = 40 + 20 = \underline{60} \text{ ตัน}$$

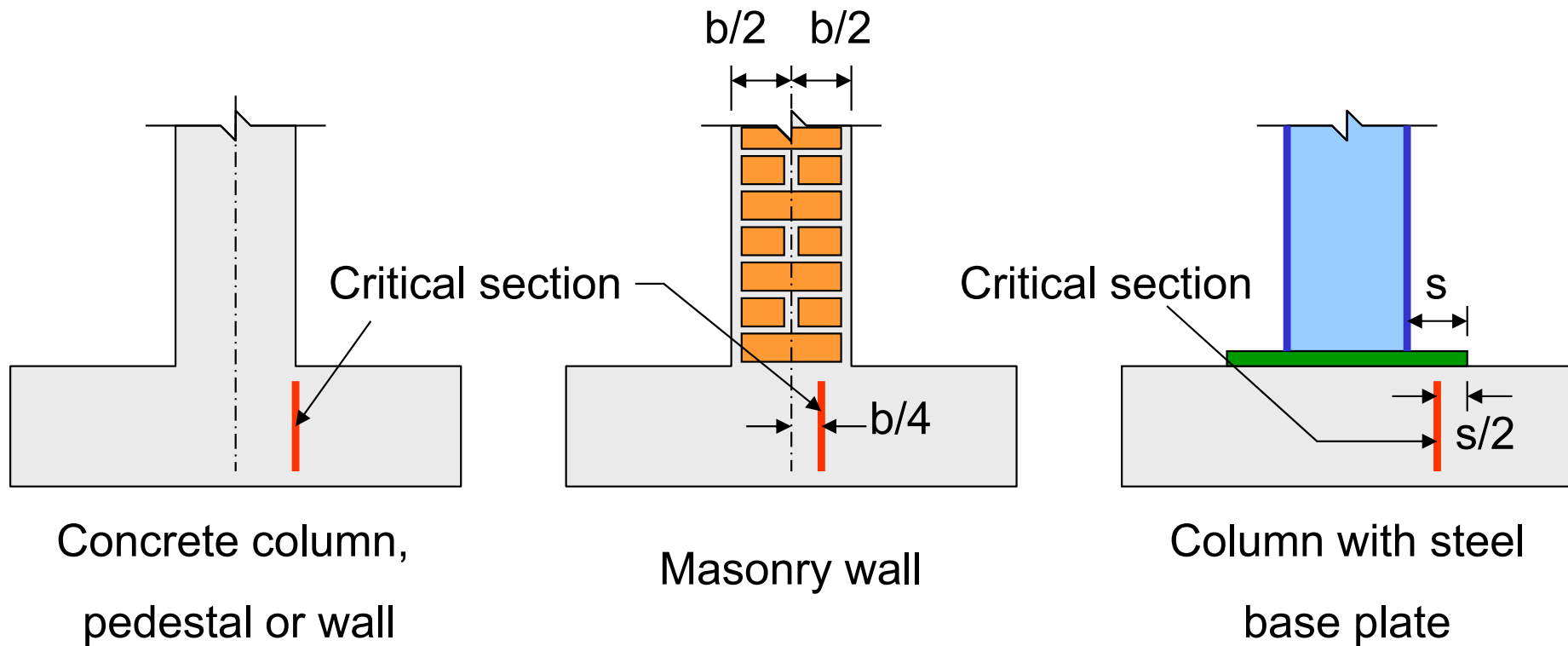
$$\text{น้ำหนักรวมทั้งหมด} = \underline{80} \text{ ตัน}$$

$$\text{แรงดันดินใต้ฐาน} \quad q = \frac{80}{2.5^2} = 12.8 \text{ ตัน/ตร.ม.} \quad \blacksquare$$

ฐานรากรับผนัง (Wall footing)

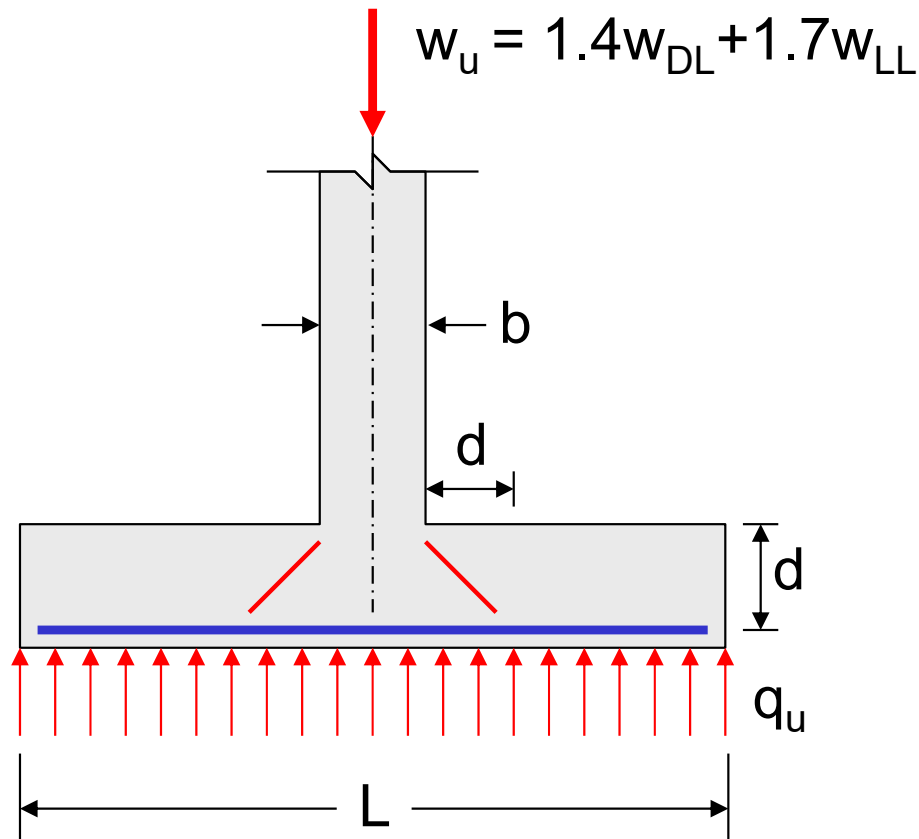


หน้าตัดวิกฤตสำหรับ โมเมนต์คด



- ▶ หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ขอบของตอม่อหรือกำแพง
- ▶ หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขอบและศูนย์กลางกำแพงก่ออิฐ
- ▶ หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างขอบตอม่อและขอบแผ่นเหล็กรองรับเสา

โมเมนต์และแรงเฉือนในฐานรากรับผนัง



$$\text{Required } L = (w_{DL} + w_{LL}) / q_a$$

q_a = Allowable soil pressure, t/m²

Factored wall load = w_u t/m

Factored soil pressure, $q_u = (w_u) / L$

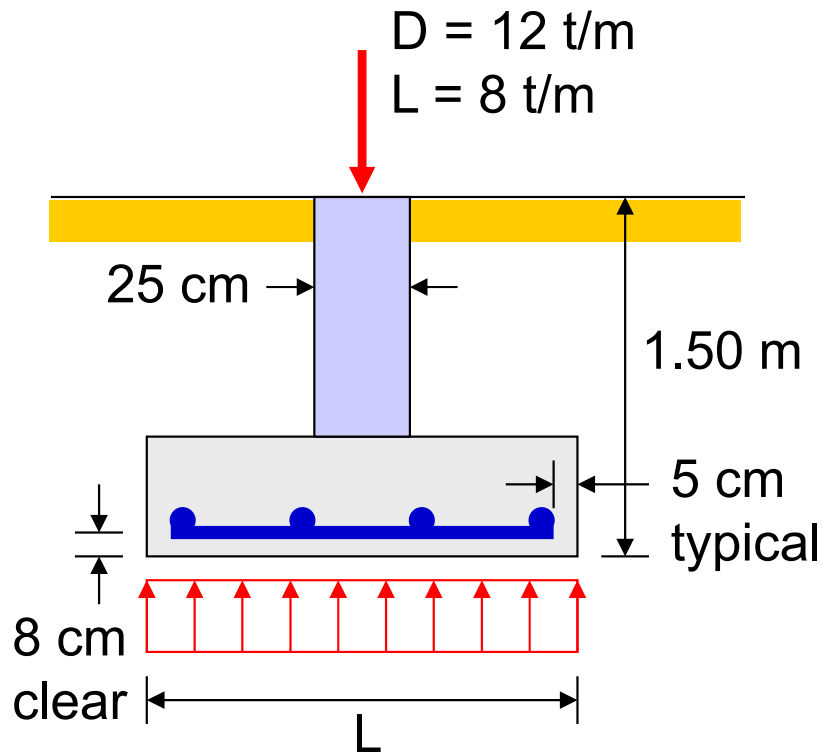
$$M_u = \frac{1}{2} q_u \left(\frac{L - b}{2} \right)^2 = \frac{1}{8} q_u (L - b)^2$$

$$V_u = q_u \left(\frac{L - b}{2} - d \right)$$

Min t = 15 cm for footing on soil, 30 cm for footing on piles

Min A_s = $(14 / f_y) (100 \text{ cm}) d$

ตัวอย่างที่ 13.3 ออกแบบฐานรากรับผนังเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ $w_D = 12$ ตัน/ม. และน้ำหนักบรรทุกจร $w_L = 8$ ตัน/ม. หน่วยแรงแบกทานของดินคือ 10 ตัน/ตร.ม. กำหนด $f'_c = 240$ กก./ชม.² และ $f_y = 4,000$ กก./ชม.²



วิธีทำ พิจารณาแถบกว้าง 1 เมตร

ความยาวฐานรากที่ต้องการ:

$$L = \frac{(D + L) + W}{q_a} = \frac{(12 + 8) \times 1.1}{10} = 2.2 \text{ เมตร}$$

USE 2.2 m

สมมติฐานรากหนา $t = 30$ ซม.

น้ำหนักฐานราก $W = 0.3 \times 2.2 \times 2.4 = 1.58$ ตัน/ม.

แรงดันขึ้นของดิน $q = (12 + 8 + 1.58) / 2.2 = 9.81 < [q_a = 10 \text{ ตัน/ตร.ม.}]$

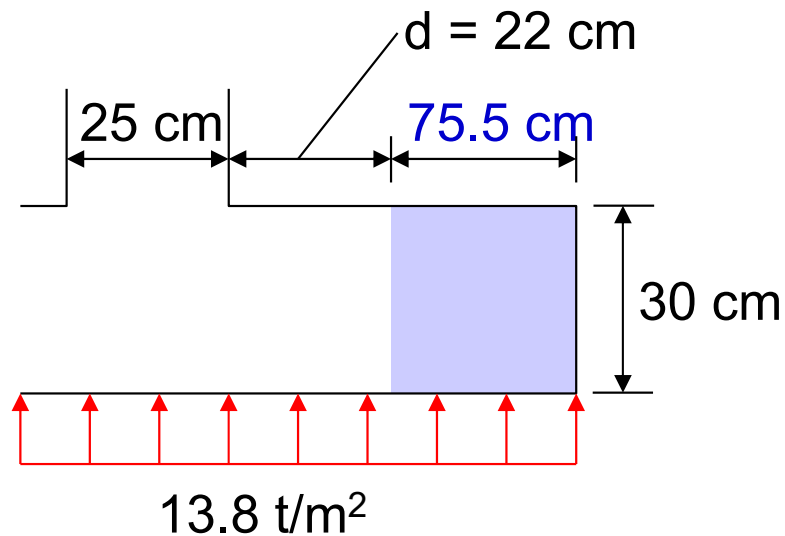
OK

ออกแบบโดยวิธีหน่วยกำลัง

SDM

แรงดันขึ้นสุทธิประลัยของดิน $q_{nu} = (1.4 \times 12 + 1.7 \times 8) / 2.2 = 13.8$ ตัน/ตร.ม.

ตรวจสอบการเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตระยะ d จากขอบตอม่อ



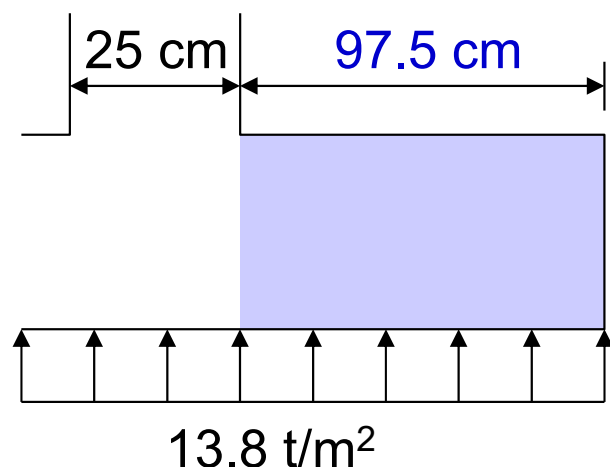
$$\begin{aligned} V_u &= q_u \left(\frac{L - b}{2} - d \right) \\ &= 13.8 \left(\frac{2.2 - 0.25}{2} - 0.22 \right) \\ &= 13.8 \times 0.755 = 10.42 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

กำลังเฉือนของหน้าตัดคอนกรีต: $\phi V_c = \phi 0.53 \sqrt{f'_c} b d$

$$= 0.85 \times 0.53 \sqrt{240} \times 100 \times 22 / 10^3$$

$$= 15.35 \text{ ตัน} > V \quad \text{OK}$$

ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด



$$\begin{aligned}
 M_u &= \frac{1}{2} q_u \left(\frac{L-b}{2} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \times 13.8 \times \left(\frac{2.2 - 0.25}{2} \right)^2 \\
 &= 13.8 \times 0.975^2 / 2 = 6.56 \text{ ตั๊น-ม.}
 \end{aligned}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{6.56 \times 10^5}{0.9 \times 100 \times 22^2} = 15.06 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right) = 0.0039$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ: $A_s = \rho b d = 0.0039 \times 100 \times 22 = 8.58 \text{ ชม.}^2$

ปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด: $\text{Min } A_s = 0.0018 \times 100 \times 30 = 5.4 \text{ ชม.}^2 < A_s$

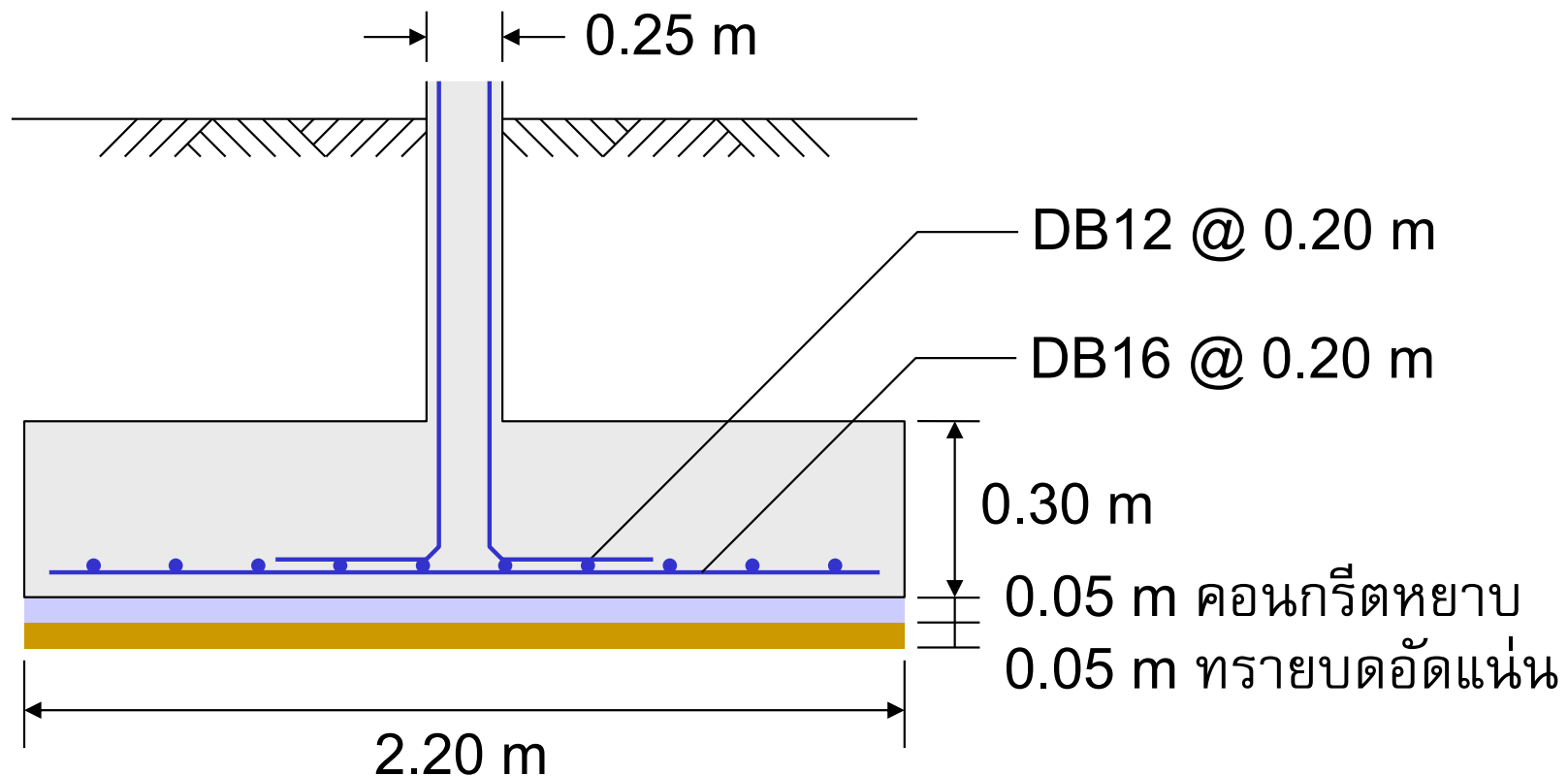
OK

เลือกใช้เหล็ก **DB16 @ 0.20** ($A_s = 10.05$ ซม.²/เมตร)

ออกแบบเหล็กตามยาว ใช้เพื่อต้านทานการแตกร้าว

$$A_s = 0.0018 \times 100 \times 30 = 5.4 \text{ ซม.}^2/\text{เมตร}$$

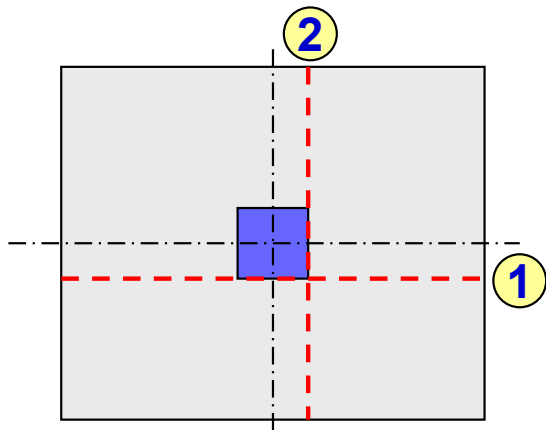
เลือกใช้เหล็ก **DB12 @ 0.20** ($A_s = 5.65$ ซม.²/เมตร)



ฐานรากรับเสาเดี่ยว

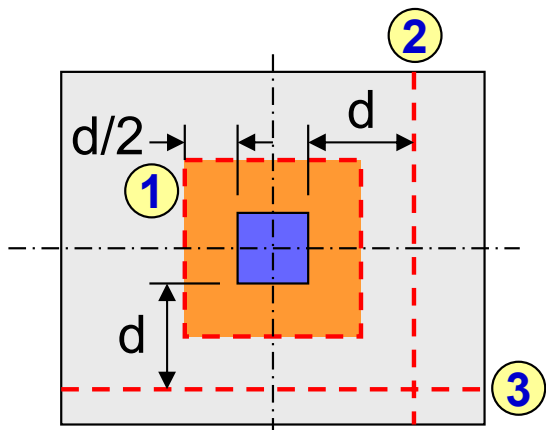
ฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาต้นเดียว ในการออกแบบต้องพิจารณาโมเมนต์ดัด การเฉือนคาน (beam shear) และการเฉือนทะลุ (punching shear)

หน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ดัด




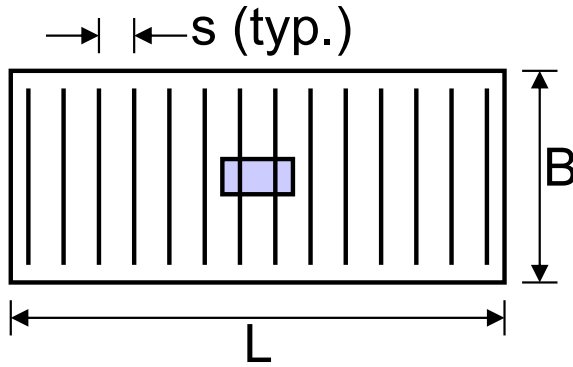
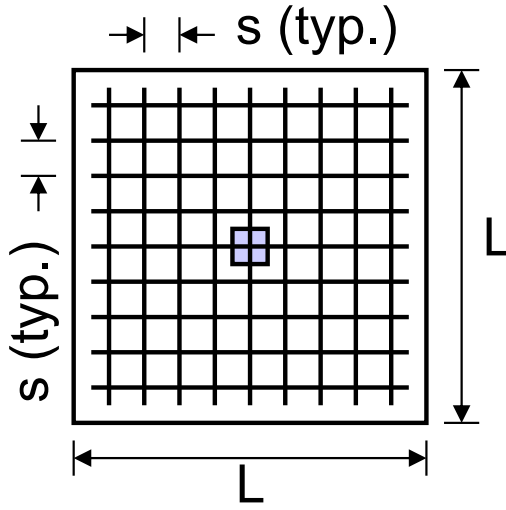
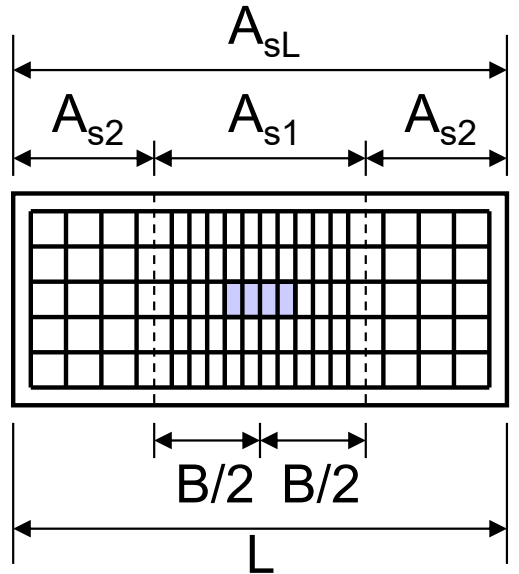
- 1 โมเมนต์ในทิศทางสั้น
- 2 โมเมนต์ในทิศทางยาว

หน้าตัดวิกฤตสำหรับการเฉือน



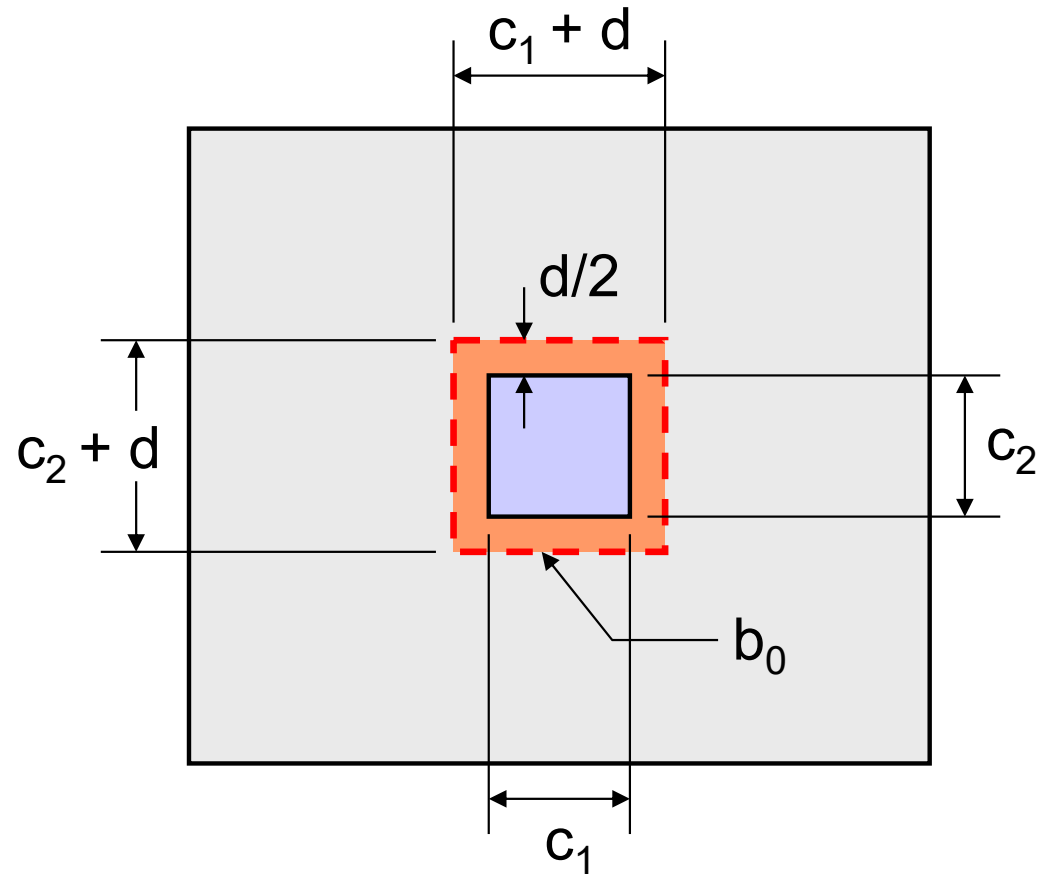
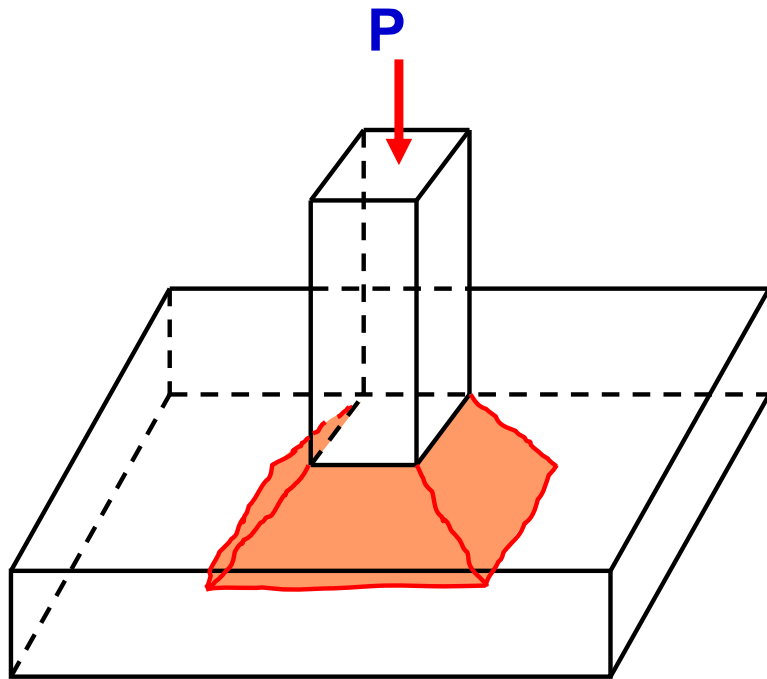
- 1 การเฉือนทะลุ
- 2 การเฉือนคานในทิศทางสั้น
- 3 การเฉือนคานในทิศทางยาว

การกระจายเหล็กเสริมรับการค้ำ

| Footing Type | Square Footing | Rectangular Footing |
|--------------|---|--|
| One-way |  |  |
| Two-way |  |  $A_{s1} = \left(\frac{2}{\beta + 1} \right) A_{sL}$ $A_{s2} = \frac{A_{sL} - A_{s1}}{2}$ $\beta = \frac{L}{B}$ |

แรงเฉือนสองทาง (แรงเฉือนทะลุ)

ต่อม่อเจาะทะลุฐานรากรอยร้าวเอียงเป็นรูปปิรามิต หน้าตัดวิกฤตใช้แนวเส้นรอบรูปห่างจากต่อม่อออกมาเป็นระยะ $d/2$



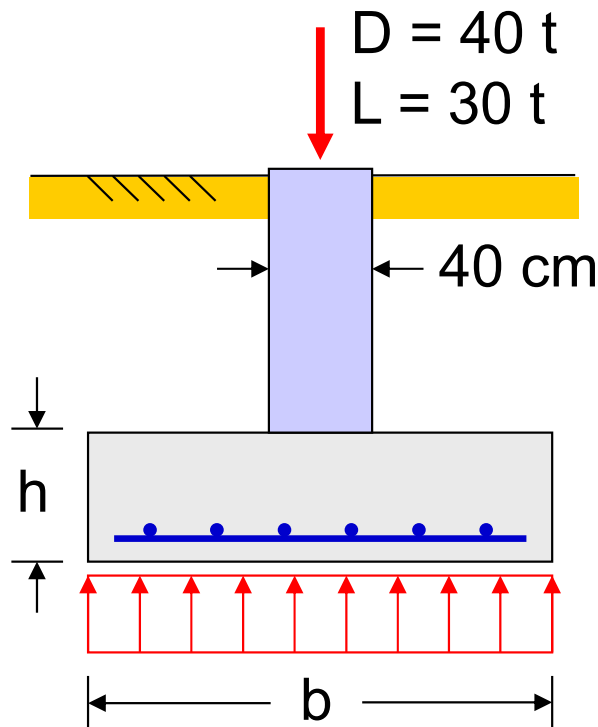
กำลังเฉือนทะลุ:

SDM

$$V_c = 1.06 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

ตัวอย่างการออกแบบฐานรากเดี่ยวสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จงออกแบบฐานรากเดี่ยวสี่เหลี่ยมจัตุรัสรับเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 ซม. เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ 40 ตัน และน้ำหนักบรรทุกจร 30 ตัน หน่วยแรงแบกทานของดินคือ 10 ตัน/ตร.ม. กำหนด $f'_c = 240$ กก./ชม.² และ $f_y = 4,000$ กก./ชม.²



วิธีทำ ขนาดฐานรากที่ต้องการ:

$$A = \frac{D + L + W}{q_a}$$
$$= \frac{(40 + 30) \times 1.1}{10} = 7.7 \text{ ตร.ม.}$$

เลือกฐานรากขนาด **2.8 x 2.8 ม. (A = 7.84 ตร.ม.)**

สมมุติฐานรากหนา $h = 40$ ซม. $\rightarrow d = 32$ ซม.

น้ำหนักฐานราก $W = 0.4 \times 2.8^2 \times 2.4 = 7.53$ ตัน

แรงดันขึ้นของดิน $q = (40 + 30 + 7.53) / 2.8^2 = 9.89 < [q_a = 10 \text{ ตัน/ตร.ม.}]$

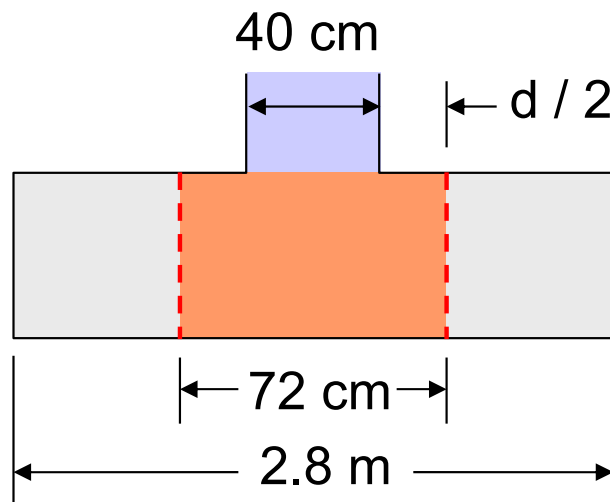
OK

ออกแบบโดยวิธีหน่วยกำลัง

SDM

แรงดันขึ้นสุทธิประลัยของดิน $q_{nu} = (1.4 \times 40 + 1.7 \times 30) / 2.8^2 = 13.65$ ตัน/ตร.ม.

การเฉือนทะลุที่หน้าตัดวิกฤตระยะ $d/2 = 16$ ซม. จากขอบตอม่อ



แรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดวิกฤต:

$$V_u = 13.65(2.8^2 - 0.72^2) = 99.9 \text{ ตัน}$$

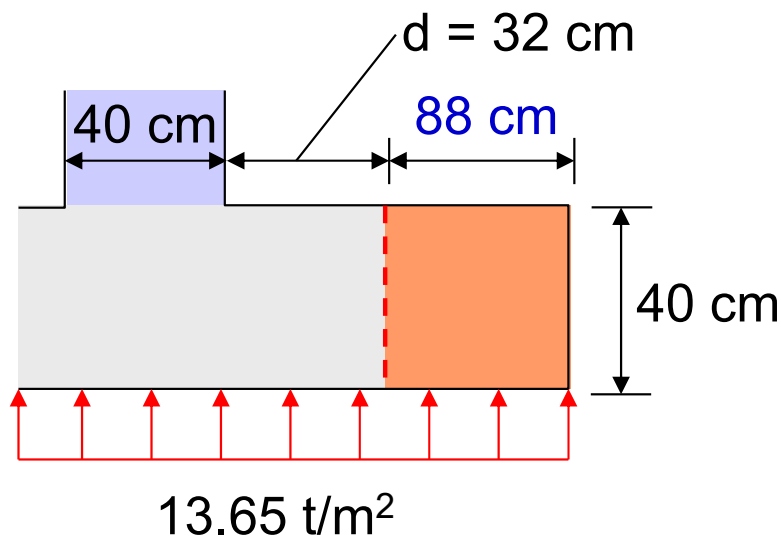
เส้นรอบรูป $b_0 = 4 \times 72 = 288$ ซม.

กำลังเฉือนคอนกรีต: $\phi V_c = 0.85 \times 1.06 \sqrt{240} \times 288 \times 32 / 10^3$

$$= 128.6 \text{ ตัน} > V_u$$

OK

ตรวจสอบการเฉือนคานที่หน้าตัดวิกฤตระยะ $d = 32$ ซม. จากขอบตอม่อ



แรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดวิกฤต:

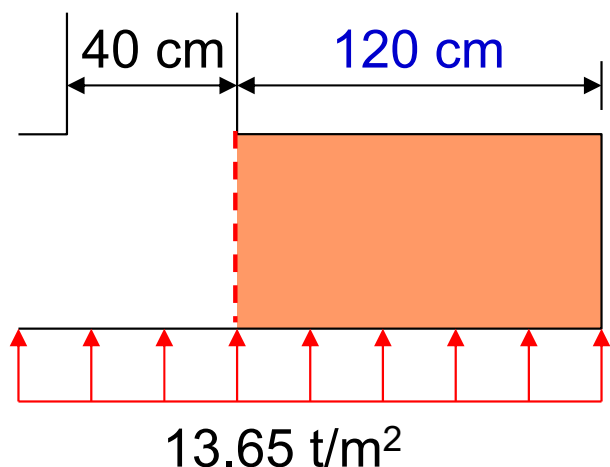
$$V_u = 13.65 \times 0.88 \times 2.8 = 33.6 \text{ ตัน}$$

กำลังเฉือนคอนกรีต:

$$\begin{aligned} \phi V_c &= 0.85 \times 0.53 \sqrt{240} \times 280 \times 32 / 10^3 \\ &= 62.5 \text{ ตัน} > V_u \end{aligned}$$

OK

ออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด



โมเมนต์ดัดประลัยที่หน้าตัดวิกฤต:

$$M_u = 13.65 \times 2.8 \times 1.2^2 / 2 = 27.5 \text{ ตัน-ม.}$$

$$R_n = \frac{27.5 \times 10^5}{0.9 \times 280 \times 32^2} = 10.66 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right) = 0.0027$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ: $A_s = \rho b d = 0.0027 \times 280 \times 32 = 24.2 \text{ ซม.}^2$

ปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด: $\text{Min } A_s = 0.0018 \times 280 \times 40 = 20.2 \text{ ซม.}^2 < A_s$

OK

เลือกใช้เหล็ก **13 DB16 #**
($A_s = 26.13 \text{ ซม.}^2$)

