

บทที่ 11

การออกแบบฐานรากเสาเข็มรับ แรงแผ่นดินไหว

ศ.ดร.อมร พิमानมาศ เลขานุการสภาวิศวกร

ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด

ปรีดา ไชยมหาวัน

ฐานรากเสาเข็มรับแรงแผ่นดินไหว

การออกแบบฐานรากเสาเข็มรับแรงทางข้างหรือฐานรากที่รับโมเมนต์นั้น เสาเข็มจะรับแรงไม่เท่ากัน เสาเข็มทางด้านที่โมเมนต์คดทำให้เกิดแรงอัด จะรับน้ำหนักมากที่สุด น้ำหนักที่เสาเข็มแต่ละต้นต้องรับ คำนวณได้จากสมการ

$$R_n = \frac{P}{n} + \frac{Md_n}{\sum d_n^2} \leq R_a$$

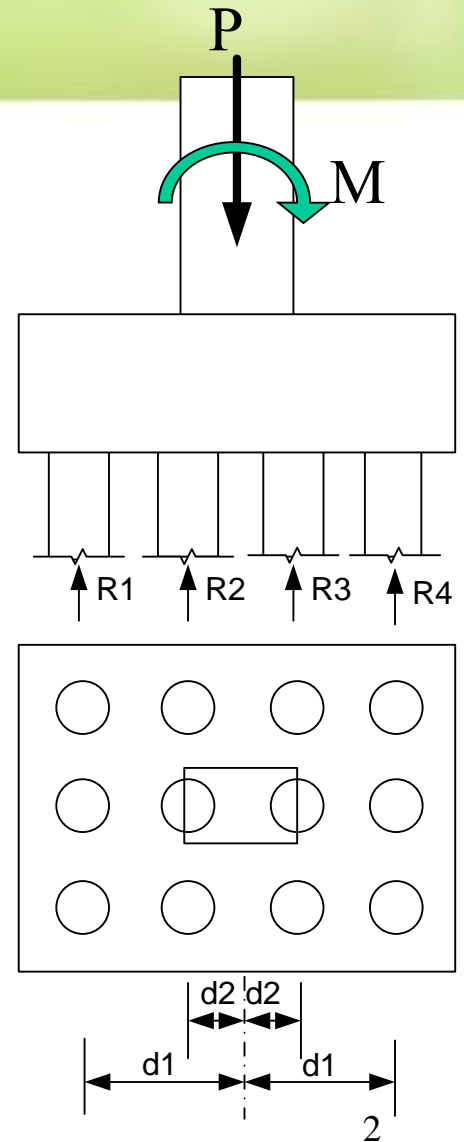
เมื่อ M เป็น โมเมนต์ที่กระทำกับเสาตอม่อ

P เป็นแรงในแนวตั้งที่ถ่ายลงเสาตอม่อ

d_n เป็นระยะห่างของเสาเข็มแต่ละต้นจากแกนศูนย์ถ่วงของกลุ่มเสาเข็ม

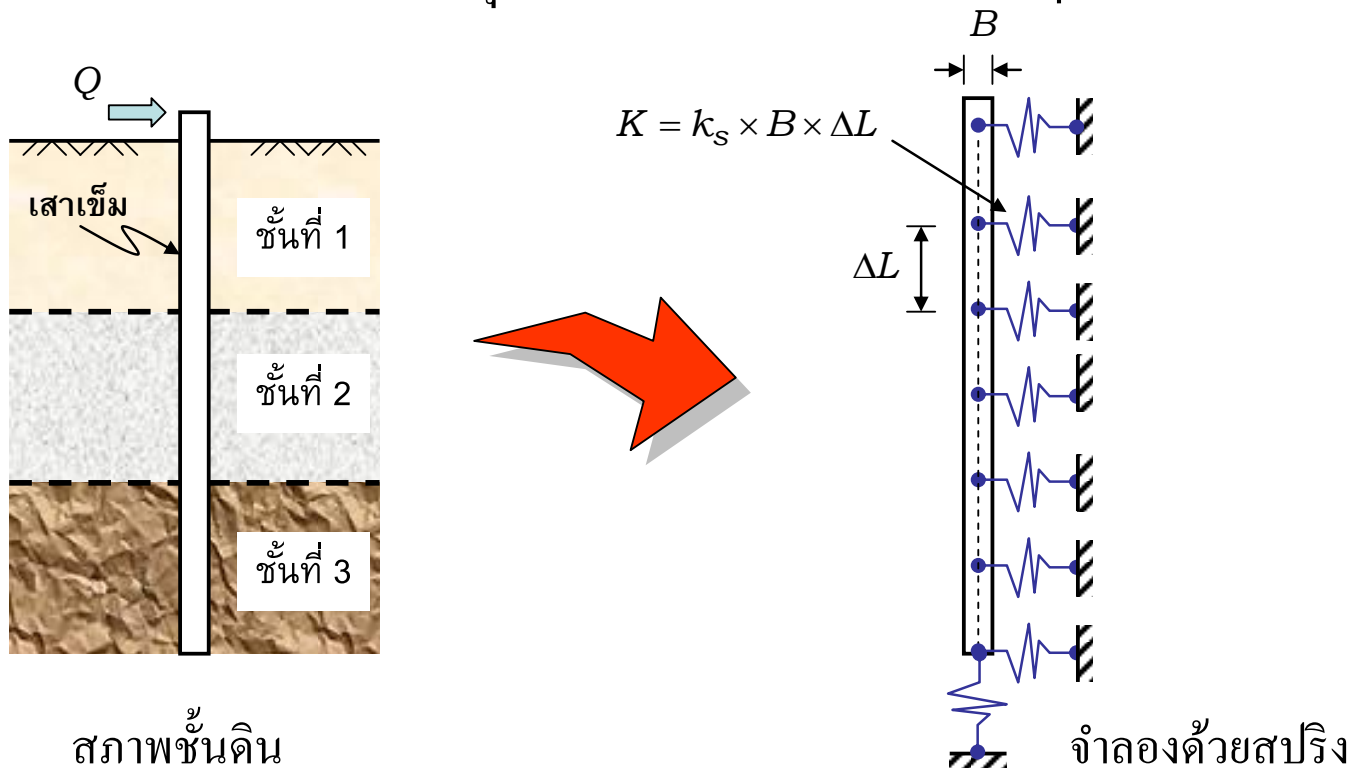
R_n แรงปฏิกิริยาที่เสาเข็มแต่ละต้น

R_a กำลังต้านทานเสาเข็มปลอดภัย



ฐานรากเสาเข็มรับแรงแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างในงานฐานรากเสาเข็มนั้น
ค่อนข้างจะมีความซับซ้อนกว่าฐานรากตื้น การวิเคราะห์จึงนิยมกระทำด้วยโปรแกรม
คอมพิวเตอร์โดยใช้สปริงแทนดิน ดังแสดงในรูป การวิเคราะห์โครงสร้างเสาเข็มที่
แทนด้วยสปริงมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้กับสภาพชั้นดินหลายๆชั้นได้



โมดูลัสต้านทานแรงแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction)

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มในกรณีที่ต้องรับแรงในแนวราบคือค่าสติฟเนสของสปริงที่แทนดิน เรียกว่าค่าโมดูลัสต้านทานแรงแนวราบของดิน (*Modulus of horizontal subgrade reaction*) k_s มีหน่วยเป็น แรง/ปริมาตร เช่น ตัน/ม.^3 ของดินดังนี้

$$K = k_s \times B \times \Delta L$$

K คือ สติฟเนสของสปริง

k_s คือ modulus of horizontal subgrade reaction

B คือ ความกว้างของเสาเข็ม

ΔL คือ ความยาวในพื้นที่รับพิคชอบ

เมื่อคำนวณสติฟเนสของสปริง (K) แต่ละชั้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในเสาเข็มเพื่อออกแบบการเสริมเหล็กในเสาเข็มต่อไป

โมดูลส์ต้านทานแรงแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction) สำหรับดินทราย

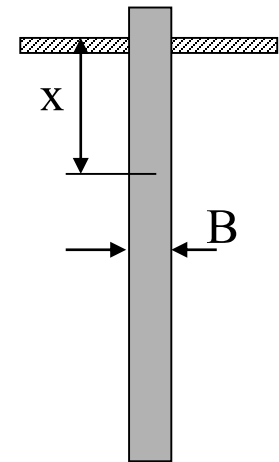
Terzaghi (1955) ได้เสนอสูตรการ k_s สำหรับ ดินทราย ซึ่งมีค่า

คำนวณ แปรตามความลึกของชั้นดิน โดยนิยามค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ (constant of horizontal subgrade reaction) หรือ n_h ซึ่งมีหน่วยเป็น “แรง/ปริมาตร” เช่น ตัน/ม.³ ทำให้เขียนค่าโมดูลส์ต้านทานแรงแนวราบของดิน ดังนี้

$$k_s = \frac{n_h x}{B}$$

x คือ ความลึก ณ จุดที่พิจารณา

B ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม



Constant of horizontal subgrade reaction สำหรับดินทราย

ค่า n_h สามารถประมาณได้จากค่าใน

ตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ค่า n_h ที่แนะนำโดย Davisson, M. T., 1970

ประเภท ของดิน	n_h (ตัน/ม. ³)
กรวด (Granular)	284 - 2,838
ตารางที่ 2 ค่า n_h ที่แนะนำสำหรับดินทราย [Prakash, S. & Sharma, H., 1990]	

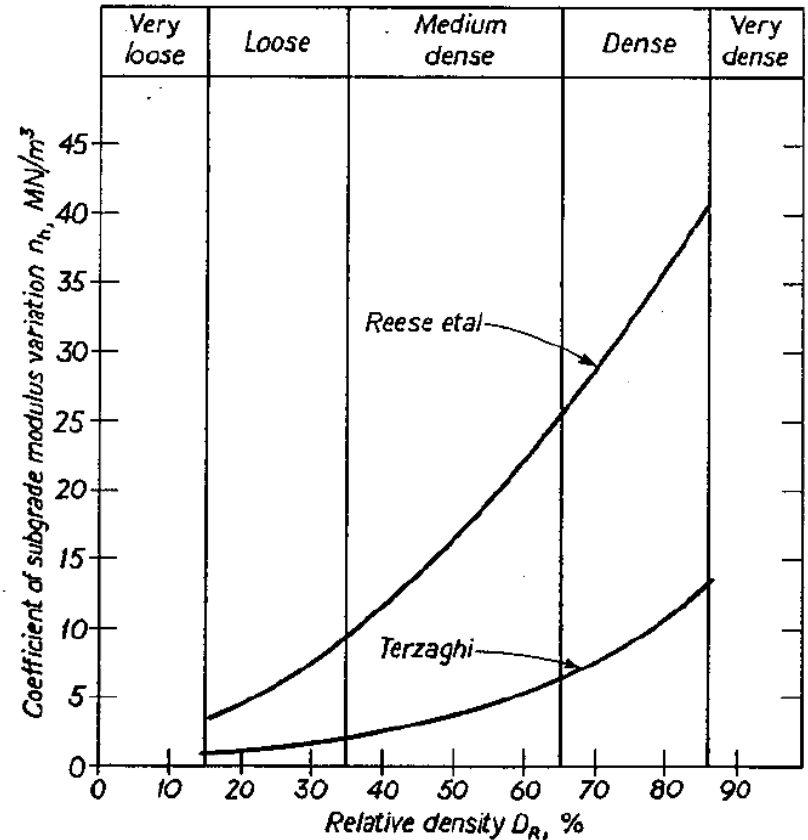
ความหนาแน่น สัมพัทธ์ (n_h)	หลวม (ตัน/ม. ³)	ปานกลาง (ตัน/ม. ³)	แน่น (ตัน/ม. ³)
Terzaghi (1955)	74 - 218	218 - 738	738 - 1,447
	56	1,520	2,540

Constant of horizontal subgrade reaction สำหรับดินทราย

ค่าที่แนะนำโดย Terzaghi และ Reese แสดงไว้ละเอียดขึ้นในรูปที่ 1 [Tomlinson, M. J., 1994] โดยค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถประมาณได้จากค่าต็มตอก (SPT-N value) ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ

ค่า SPT-N (ครั้งต่อ ฟุต)	ความ หนาแน่น สัมพัทธ์	สภาพ ดิน
0-4	0 - 0.2	หลวม มาก
4-10	0.2 - 0.4	หลวม



รูปที่ 1 ค่าคงที่สำหรับคำนวณแรงกดแนวราบ

โมดูลัสต้านทานแรงแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction) สำหรับดินเหนียว

สำหรับ ดินเหนียว ค่า k_s จะคงที่ตลอดชั้นดิน โดย Davisson, M. เสนอสูตรการคำนวณไว้ดังนี้

$$k_s = 67 \frac{S_u}{B}$$

S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)

มีหน่วยเป็น ตัน/ม.^2

B ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

ประสิทธิภาพในการรับแรงทางข้างของเสาเข็มกลุ่ม (Lateral load of pile groups)

- ในกรณีที่มีเสาเข็มมากกว่า 1 ต้น อยู่ในฐานเดียวกันหากเสาเข็มในฐานเรียงอยู่ชิดกันเกินไป กำลังของเสาเข็มแต่ละต้นที่คำนวณได้ จะมีกำลังที่ลดลง
- อย่างไรก็ตามก็ตีจากการวิจัยพบว่าหากระยะเรียงของเสาเข็มแต่ละต้นมีค่ามากพอ เช่น ประมาณ 6 – 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง เสาเข็มก็จะรักษากำลังแบบเสาเดี่ยวไว้ได้
- ในตารางที่ 3 และ 4 แสดงตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว ชั้นดินทรายเพื่อการคำนวณการเคลื่อนตัวทางข้างดังนี้

ประสิทธิภาพในการรับแรงทางข้างของเสาเข็มกลุ่ม (Lateral load of pile groups)

ตารางที่ 4 ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว

[Prakash, S. & Sharma, H., 1990] ^{เมื่อ} คือ ระยะเรียงของเสาเข็ม (ม.)

B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (ม.)

ระยะเรียงในทิศทางที่มีแรงกระทำ (S/B)	2 x 2	3 x 3	ค่าแนะนำ
3	0.4 2	0.3 9	0.40
3.5	0.5 0	0.4 2	0.45
4.0	0.5 7	0.4 4	0.50

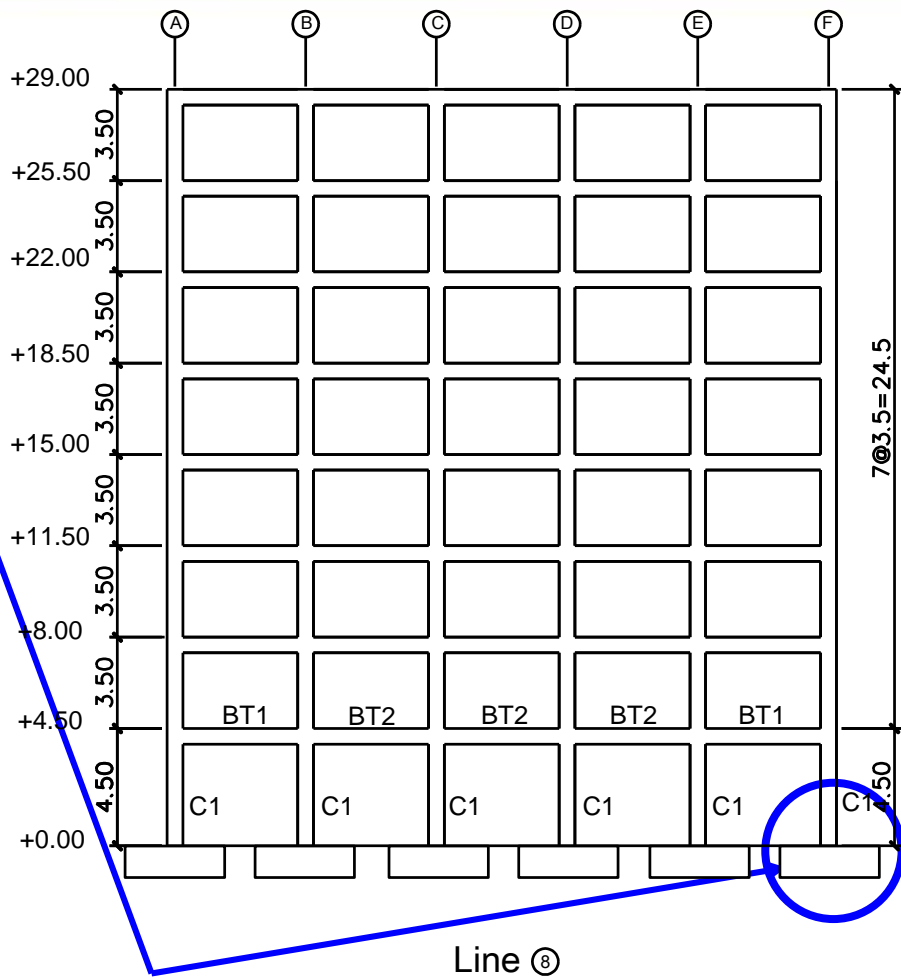
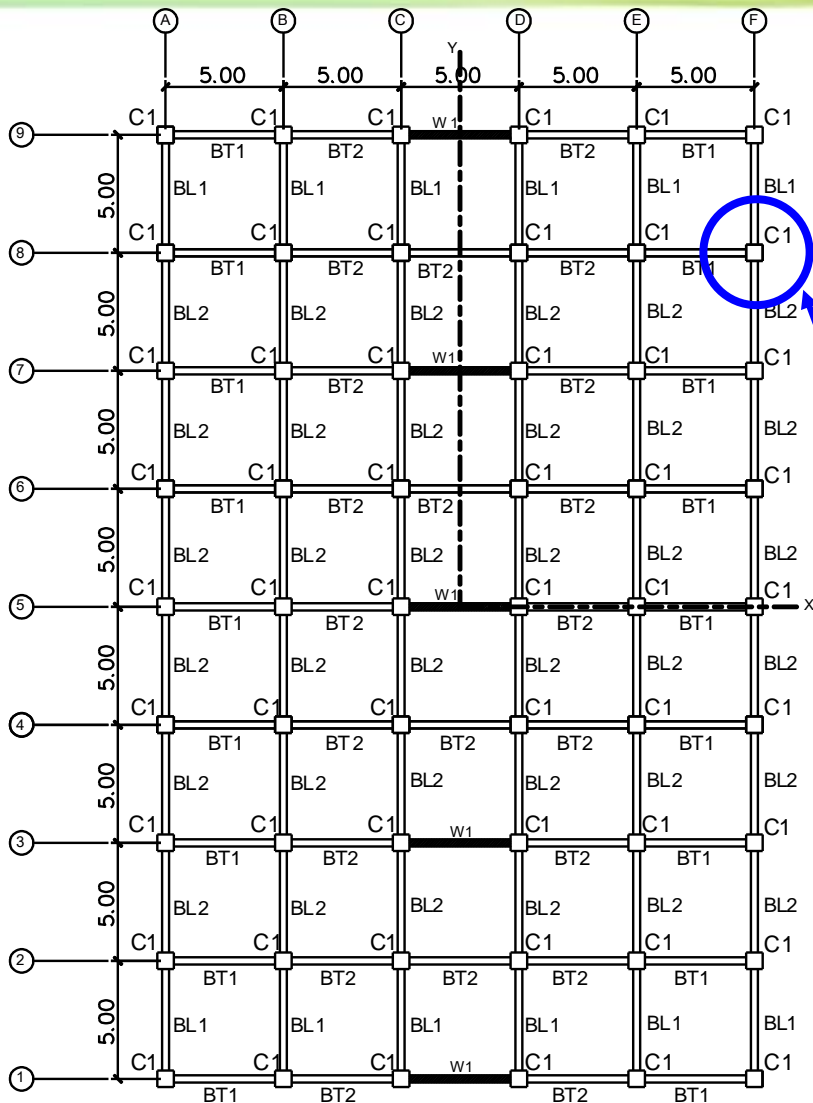
ประสิทธิภาพในการรับแรงทางข้างของเสาเข็มกลุ่ม (Lateral load of pile groups)

ตารางที่ 5 ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินทราย

[Prakash, S. & Sharma, H., 1990]

ระยะเรียงในทิศทางที่มีแรงกระทำ (S/B)	ตัวคูณลดกำลัง
3	0.50
4	0.60
5	0.68
6	0.70

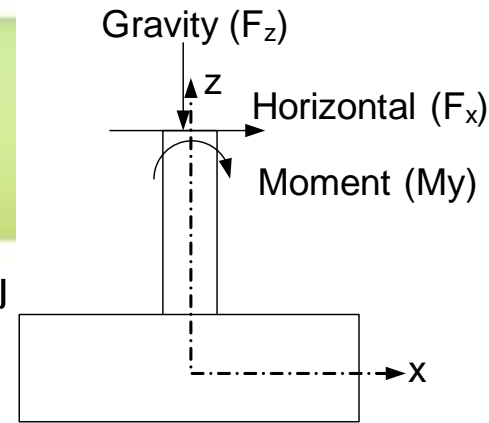
ตัวอย่างอาคารที่จะออกแบบฐานราก



ตำแหน่งฐานรากที่ต้องการออกแบบ

แรงปฏิกิริยาที่ฐานราก

นำแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทั้ง 3 กรณี มาออกแบบ โดยเพิ่มกรณีที่ 1 หน่วยแรงใช้งานด้วย เพื่อหาจำนวนเข็มที่ใช้



กรณี	Gravity (F_z) (ton)	Horizontal (F_x) (ton)	Moment (M_y) (ton-m)
1 ultimate load	251.49	-1.31	-1.91
1 service load	171.44	-0.88	-1.28
2 ขวา	206.08	-2.31	-7.52
2 ซ้าย	171.15	0.35	4.65
3 ขวา	137.68	-1.91	-7.02
3 ซ้าย	102.06	0.80	5.40

หาขนาดฐานรากจากจำนวนเสาเข็มที่ต้องใช้

Service load (F_z) = 171.44 ton

ประมาณน้ำหนักฐานราก = 10%

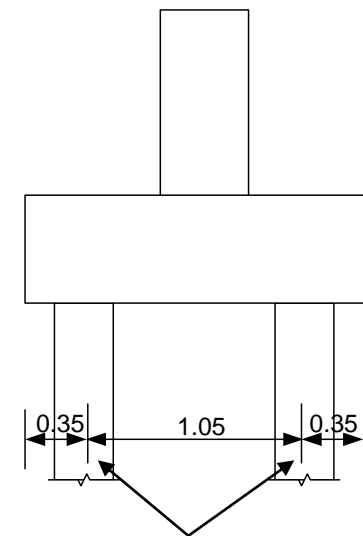
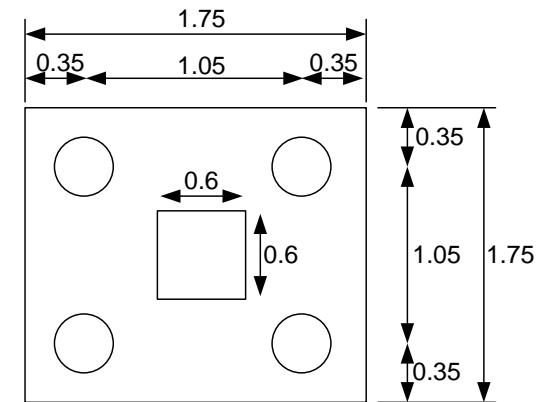
ดังนั้น น้ำหนักทั้งหมด = $171.44 \times 1.1 = 188.58$ ton

สมมุติใช้เสาเข็ม dia. 35 ซม. รับน้ำหนักปลอดภัย = 60 ตัน/ต้น

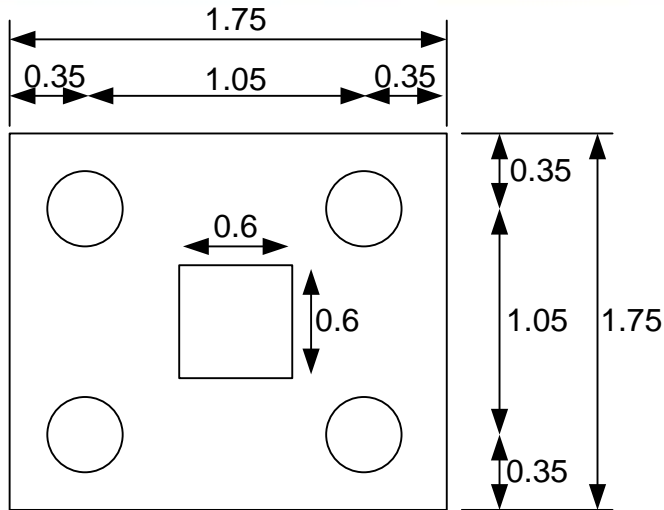
จำนวนเสาเข็ม = $188.58 / 60 = 3.14$ ต้น ใช้ 4 ต้น

จัดเสาเข็มตามรูป โดยใช้ระยะห่างศูนย์กลางเข็มเท่ากับ

$3d = 1.05$ m ดังนั้นขนาดฐานรากเท่ากับ 1.75×1.75 m



แบบแสดงฐานราก

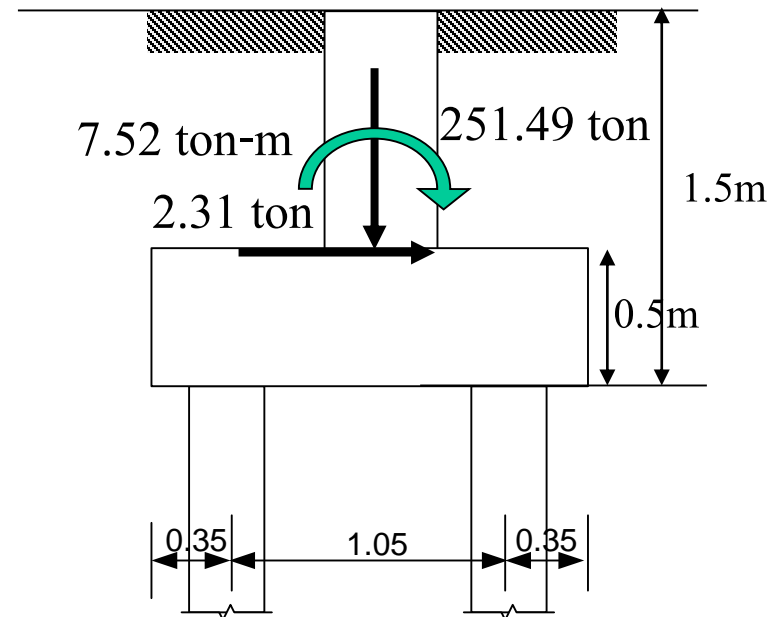


ฐานรากเดี่ยวขนาด 1.75x1.75 m หนา 0.5m

กำหนด $f'_c = 280$ ksc สำหรับ Pile cap

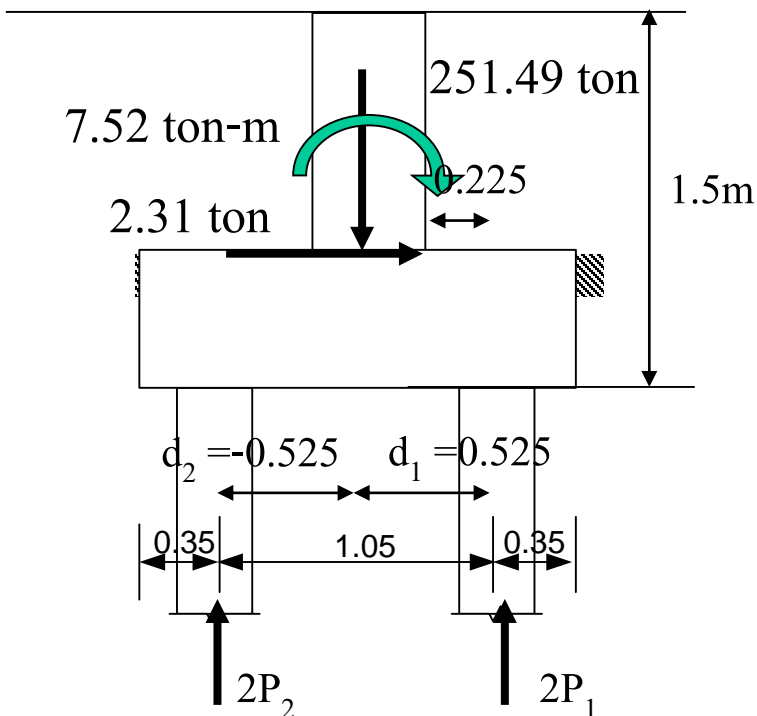
$f'_c = 350$ ksc สำหรับเสาเข็ม

$f_y = 4,000$ ksc



เสาเข็ม 4 ต้น dia. 35 cm ยาว 20.0 m
รับน้ำหนักปลอดภัยไม่น้อยกว่า 60 ton
และน้ำหนักประลัย 120 ton

ออกแบบฐานรากรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์



$$P_1 = \frac{P}{N} + \frac{Md_1}{\sum d^2}$$

$$= \frac{251.49}{4} + \frac{7.52 \times 0.525}{4 \times 0.525^2}$$

$$P_1 = 66.45 \text{ Ton} < 120 \text{ Ton OK}$$

$$P_2 = \frac{P}{N} + \frac{Md_2}{\sum d^2}$$

$$= \frac{251.49}{4} - \frac{7.52 \times 0.525}{4 \times 0.525^2}$$

$$P_2 = 59.29 \text{ Ton} < 120 \text{ Ton OK}$$

หาความลึกของฐานราก

$$\text{โมเมนต์ที่ขอบเสา (M_u)} = 2 \times 66.45 \times 0.225 = 29.90 \text{ ton-m}$$

$$\text{ความลึกฐานที่ต้องการ} \quad d = \sqrt{\frac{M_u}{\phi R_u b}}$$

$$b = 175 \text{ cm}$$

$$\text{สมมติ} \quad \rho = \rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = 0.0035$$

$$R_u = \rho f_y (1 - 0.59 \rho f_y / f'_c)$$

$$R_u = 0.0035 \times 4,000 (1 - 0.59 \times 0.0035 \times 4000 / 280) = 13.587 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{ความลึกฐานที่ต้องการ} \quad d = \sqrt{\frac{29.90 \times 1,000 \times 100}{0.9 \times 13.587 \times 175}} = 37.4 \text{ cm}$$

$$\text{เลือกความหนา} = 50 \text{ cm} \quad \text{ดังนั้น} \quad d = 50 - 7.5 - 2.0 / 2 = 41.5 \text{ cm} > 37.4 \text{ cm OK}$$

น้ำหนักทั้งหมดที่ถ่ายลงเสาเข็ม

$$\text{น้ำหนัก pile cap} = 1.75 \times 1.75 \times 0.5 \times 2.4 = 3.675 \text{ ton}$$

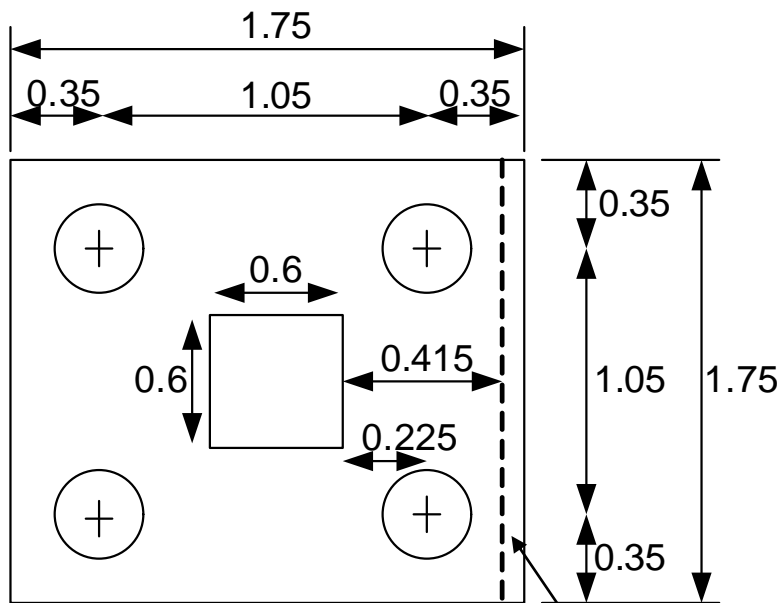
$$\text{แรงประลัยเพิ่มเติมที่ถ่ายลงเสาเข็มแต่ละต้น} = 1.4 \times 3.675 / 4 = 1.29 \text{ ton}$$

$$\text{นำไปบวกเพิ่มใน } P_1 = 66.45 + 1.29 = 67.74 \text{ ton}$$

$$\text{นำไปบวกเพิ่มใน } P_2 = 59.29 + 1.29 = 60.58 \text{ ton}$$

ตรวจสอบแรงเฉือนแบบคานกว้าง

พิจารณาแรงเฉือนแบบคานกว้างที่หน้าตัดซึ่งห่างจากขอบเสา = 41.5 cm



เนื่องจากศูนย์กลางของเสาเข็มอยู่ภายในหน้าตัดวิกฤตเข้ามาเป็นระยะเท่ากับ

$$41.5 - 22.5 = 19.0 \text{ cm} > d_p/2 = 17.5 \text{ cm}$$

แรงต้านของเสาเข็มจึงเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีผลในการพิจารณาแรงเฉือนแบบคานกว้าง

หน้าตัดวิกฤติแรงเฉือนแบบคานกว้าง

ตรวจสอบแรงเฉือนทะลุ

หน้าตัดวิกฤติของแรงเฉือนทะลุเกิดที่ระยะ $d/2$ จากขอบเสาตอม่อดังรูป

แรงต้านประสิทธิภาพของเสาเข็ม

$$P' = P(1/2 + x / (\text{pile diameter}))$$

$$P'_1 = 67.74 \times (1/2 + 1.75/35)$$

$$= 37.26 \text{ ton}$$

$$P'_2 = 60.58 \times (1/2 + 1.75/35)$$

$$= 33.32 \text{ ton}$$

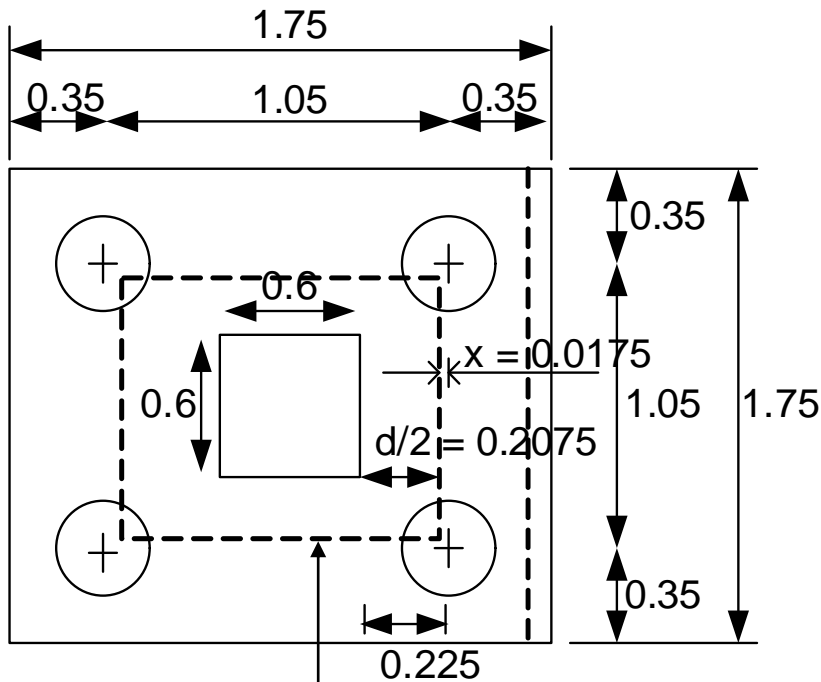
$$V_u = 2P'_1 + 2P'_2 = 2 \times 37.26 + 2 \times 33.32 = 141.16 \text{ ton}$$

$$b_0 = 4 \times (60 + 41.5) = 406.0 \text{ cm}$$

$$\phi V_c = 0.85 \times 1.06 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

$$\phi V_c = 0.85 \times 1.06 \times \sqrt{280} \times 406.0 \times 41.5 / 1,000 = 254.0 \text{ ton}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{OK ปลอดภัยจากแรงเฉือนทะลุ} \quad 20$$



หน้าตัดวิกฤติแรง
เฉือนทะลุ

ออกแบบเหล็กเสริมใน Pile cap แบบคานลึก

$$A_s = M_u / (\phi f_y j d) \quad \phi = 0.9$$

$$M_u = 2 \times 67.74 \times 0.225 = 30.48 \text{ Ton-m}$$

$$j d = 0.6h = 0.6 \times 50 = 30 \text{ cm}$$

$$A_s = 30.48 \times 1,000 \times 100 / (0.9 \times 4000 \times 30) = 28.2 \text{ cm}^2$$

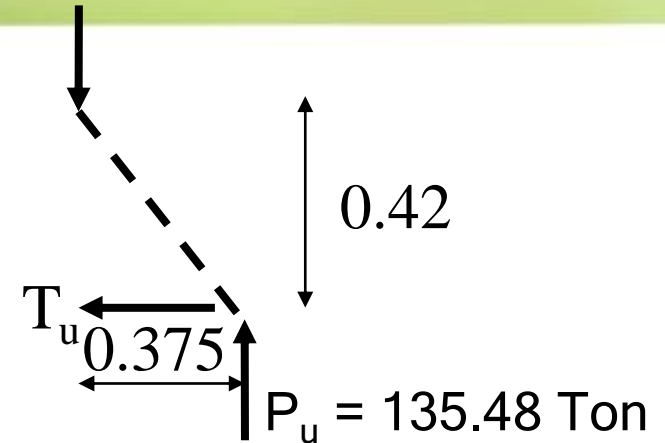
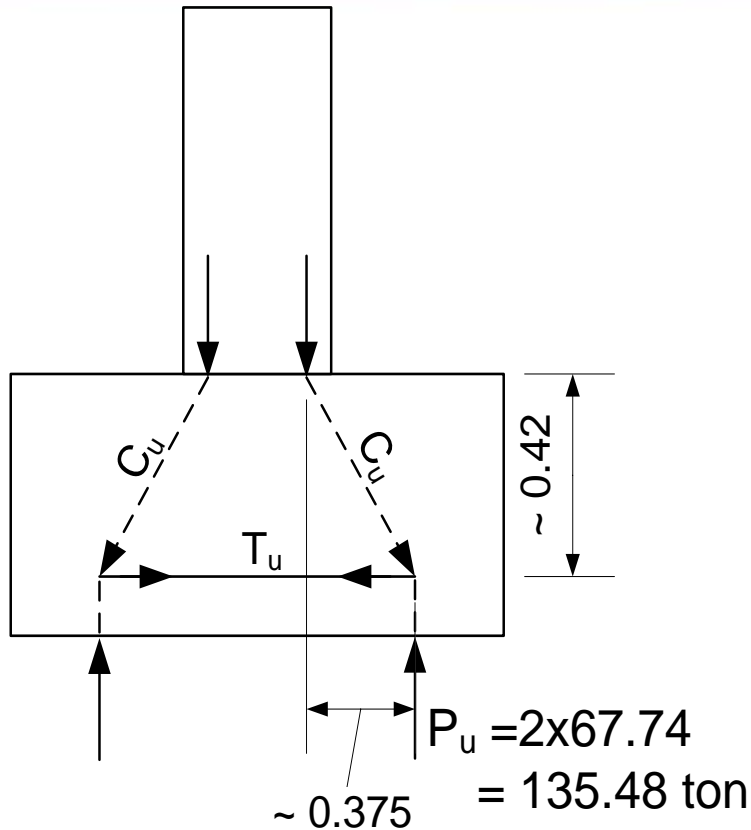
$$\rho_{\min} = 14/f_y = 0.0035$$

$$A_{s \min} = \rho b d = 0.0035 \times 175 \times 41.5 = 25.42 \text{ cm}^2 < A_s$$

ใช้ 11-DB20 $A_s = 34.6 \text{ cm}^2 > 28.2 \text{ cm}^2$ OK

หรือ # DB20@ 0.15 เป็นเหล็กเสริมล่าง

ออกแบบเหล็กเสริมใน Pile cap โดยใช้ strut and tie



$$\frac{T_u}{0.375} = \frac{138.04}{0.42}$$

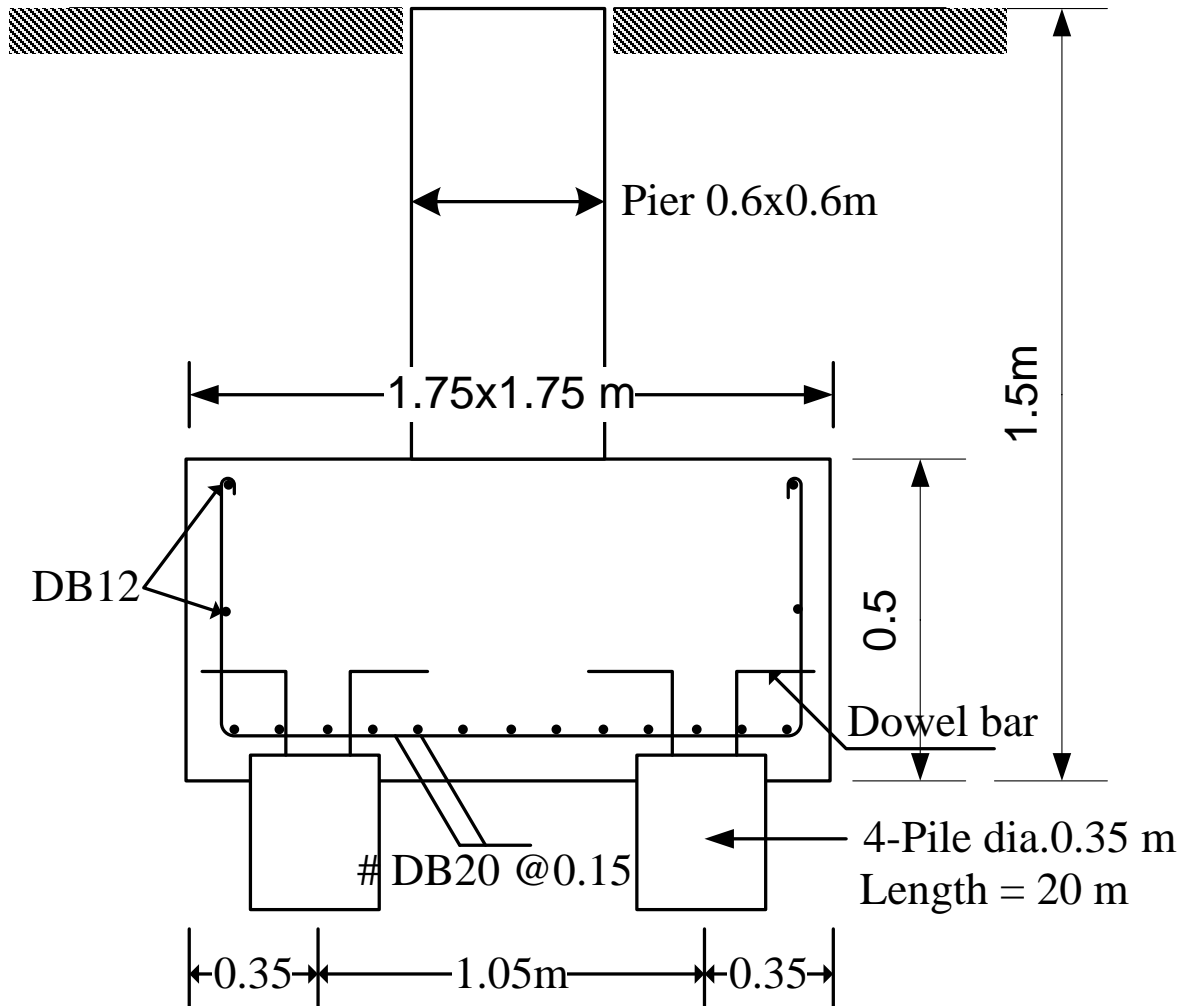
$$T_u = 121.0 \text{ Ton}$$

$$A_s = \frac{T_u}{\phi f_y} = \frac{121 \times 1,000}{0.9 \times 4,000} = 33.6 \text{ cm}^2$$

ใช้ 11-DB20 $A_s = 34.6 \text{ cm}^2$

หรือ # DB20@ 0.15 เช่นกัน ²²

รายละเอียดการเสริมเหล็ก



ออกแบบเสาเข็ม

แรงในแนวราบที่กระทำเสาเข็มแต่ละต้น สามารถคำนวณได้จาก แรงในแนวราบทั้งหมดหารด้วยจำนวนเสาเข็ม

$$F = 2.31/4 = 0.58 \text{ ton}$$

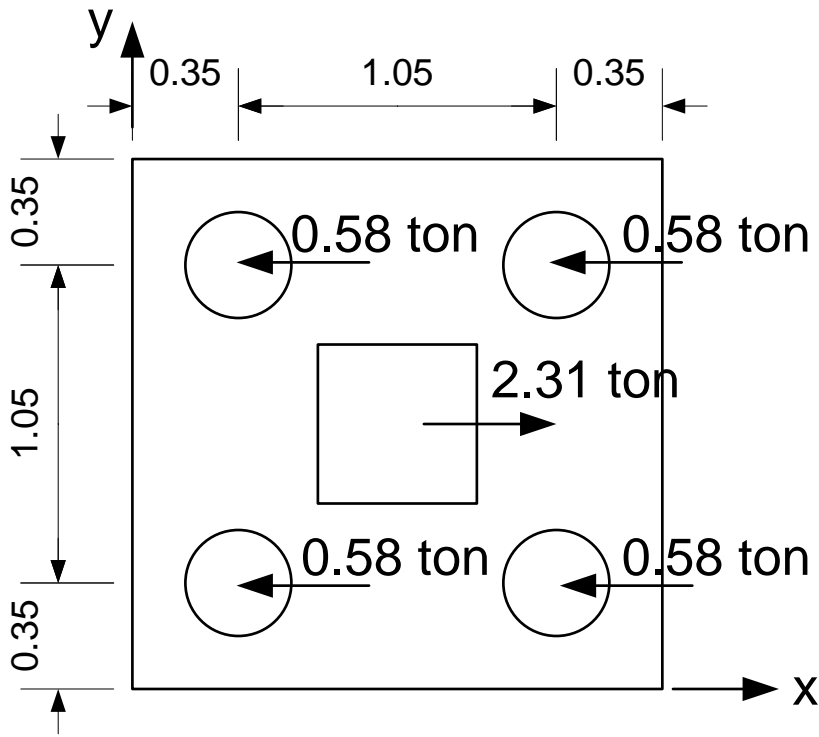
แต่เนื่องจากเป็นเข็มกลุ่มที่มีระยะเรียงห่างกัน 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (1.05m) ทำให้ต้องเพิ่มกำลังรับแรงกระทำทางข้างอีกด้วยการหารตัวคูณลดกำลัง

$$\text{ดินเหนียว} = 0.42$$

$$F = 0.58/0.42 = 1.38 \text{ ton}$$

$$\text{ดินทราย} = 0.50$$

$$F = 0.58/0.50 = 1.16 \text{ ton}$$



ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินเหนียว

กำหนดให้ ดินเหนียวแข็งมี $S_u = C_u = 15.2 \text{ ton/m}^2$

Modulus of subgrade reaction, $k_s = \frac{67S_u}{B}$

$$S_u = C_u = 15.2 \text{ ton/m}^2$$

$$B = \text{ความกว้างเสาเข็ม} = 0.35 \text{ m}$$

$$k_s = \frac{67 \times 15.2}{0.35} = 2,910 \text{ ton/m}^3$$

ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินเหนียว

คำนวณค่าสปริงในแนวราบของดินเหนียว

พิจารณาเสาเข็มที่ทุก ๆ ระยะ 1 เมตร แต่สำหรับที่จุดปลายบนสุดและล่างสุดของเสาเข็มกำหนดพื้นที่รับผิวดมเท่ากับ 0.5 ม.

ค่าสปริงในแนวราบของดิน (K) คำนวณได้จาก

$$K = k_s \cdot B \cdot \Delta L$$

k_s Modulus of subgrade reaction = 2,910 T/m³

B ความกว้างของเสาเข็ม (m) = 0.5 m

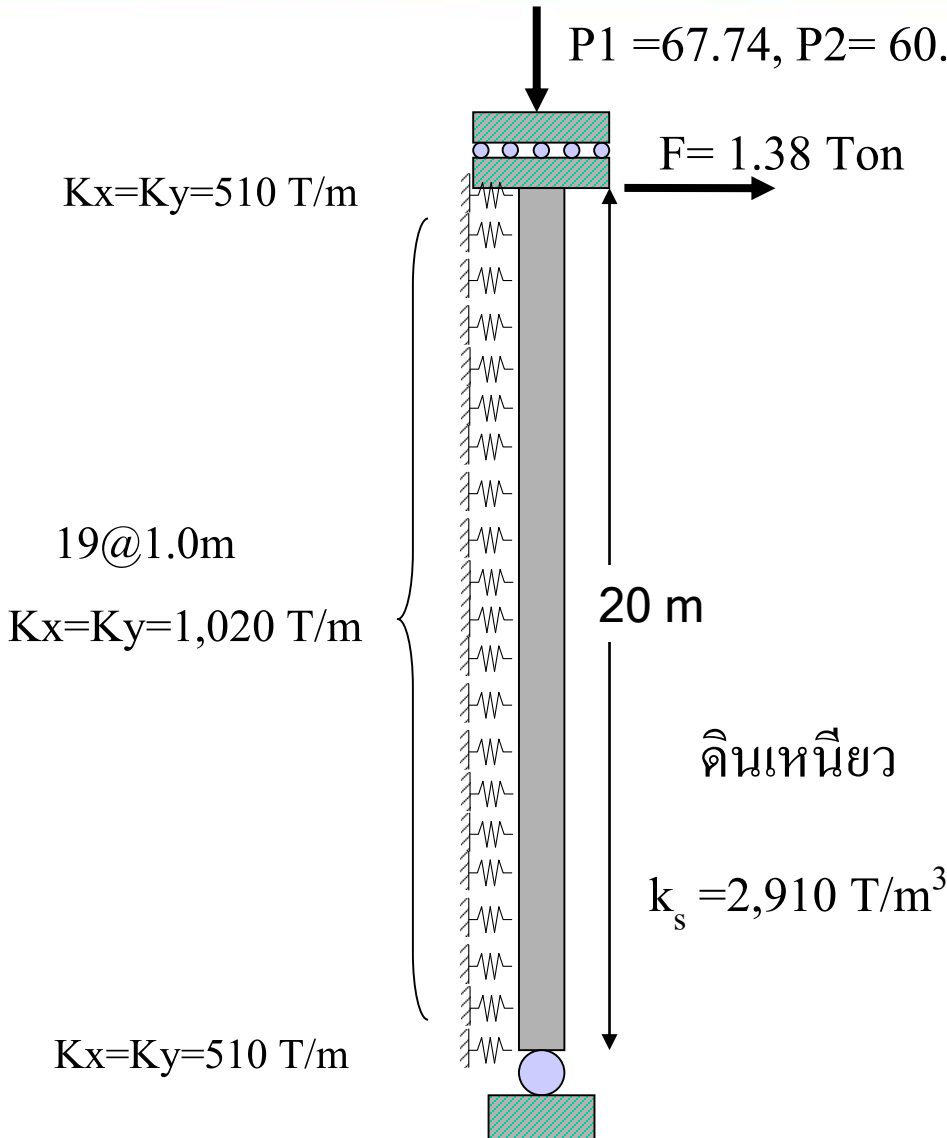
ΔL ความยาวในพื้นที่รับผิวดม = 0.5 m สำหรับปลายบนและล่างสุด

= 1.0 m สำหรับช่วงอื่น ๆ

$K_x = K_y = 2,910 \times 0.35 \times 1 = 1020 \text{ ton/m}^3$ สำหรับช่วง 1 เมตร

$K_x = K_y = 2,910 \times 0.35 \times 0.5 = 510 \text{ ton/m}^3$ สำหรับปลายบนและล่างสุด ²⁶

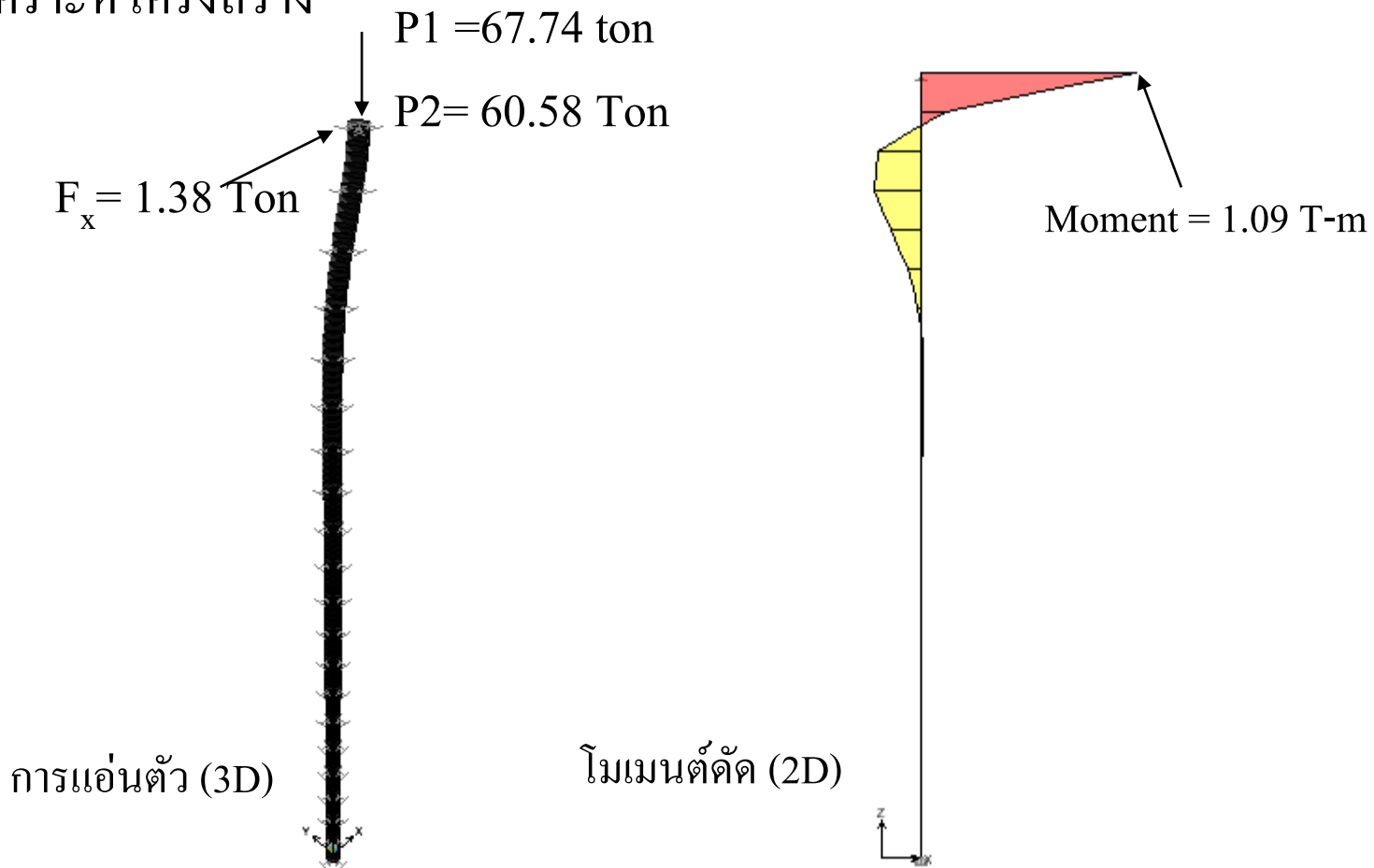
ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินเหนียว



- นำข้อมูลแรง F และ P ทั้ง 2 กรณี ไปออกแบบเสาเข็มกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 m ยาว 20 m
- ปลายบนเป็น roller guide ปลายล่างเป็น roller ด้านข้างเชื่อมด้วย spring
- เสาเข็มวางในดินเหนียวที่มีค่า spring กำหนดจาก modulus of horizontal subgrade reaction = $2,910 \text{ T/m}^3$
- แบ่งเสาเข็มเป็น 20 ช่วง ช่วงละ 1 เมตร
- ดังนั้น $k_x = k_y = K_s \times (d \times l_i) = 1,020 \text{ T/m}$
- สำหรับปลายบนและปลายล่าง = 510 T/m

ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินเหนียว

ผลการวิเคราะห์โมเมนต์คัตในเสาเข็มด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม
วิเคราะห์โครงสร้าง



ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินทราย

กำหนดให้ ดินทรายแน่นปานกลางมีค่า SPT ประมาณ 20-28 ครั้ง/ฟุต และมีค่า $n_h = 480.5$ ตัน/ม³

คำนวณค่าสปริงในแนวราบของดินทราย

Modulus of subgrade reaction สำหรับดินทรายมีค่าเปลี่ยนตามระดับความลึกของดิน สามารถคำนวณได้จาก

$$K = k_s \cdot B \cdot \Delta L = \frac{n_h}{B} \cdot x \cdot B \cdot \Delta L = n_h \cdot x \cdot \Delta L$$

x คือ ความลึก ณ จุดที่พิจารณา (ม.)

B คือ ขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

n_h 480.5 ton/m³

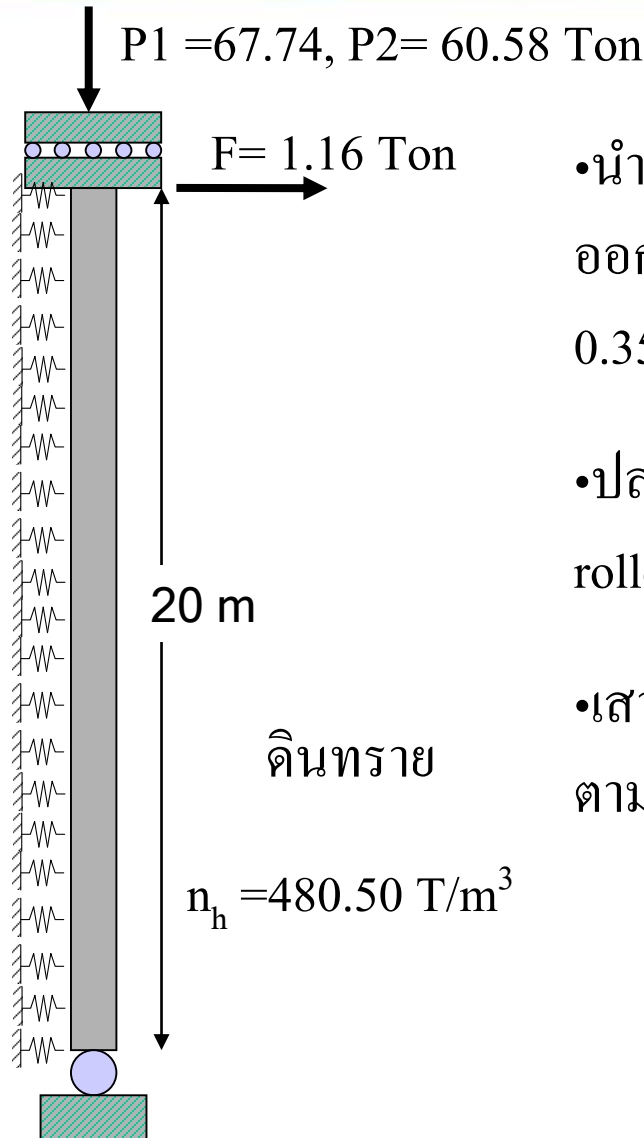
ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินทราย

ความลึก, x (m)	ความยาวรับผิวดชอบ, (ΔL)	สปริงของดิน, K (ton/m ³)
0	0.5	0.00
1.0	1.0	480.50
2.0	1.0	961.00
3.0	1.0	1441.50
4.0	1.0	1922.00
5.0	1.0	2402.50
6.0	1.0	2883.00
7.0	1.0	3363.50
8.0	1.0	3844.00
9.0	1.0	4324.50
10.0	1.0	4805.00

ความลึก, x (m)	ความยาวรับผิวดชอบ, (ΔL)	สปริงของดิน, K (ton/m ³)
11.0	1.0	5285.50
12.0	1.0	5766.00
13.0	1.0	6246.50
14.0	1.0	6727.00
15.0	1.0	7207.50
16.0	1.0	7688.00
17.0	1.0	8168.50
18.0	1.0	8649.00
19.0	1.0	9129.50
20.0	0.5	9610.00

ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินทราย

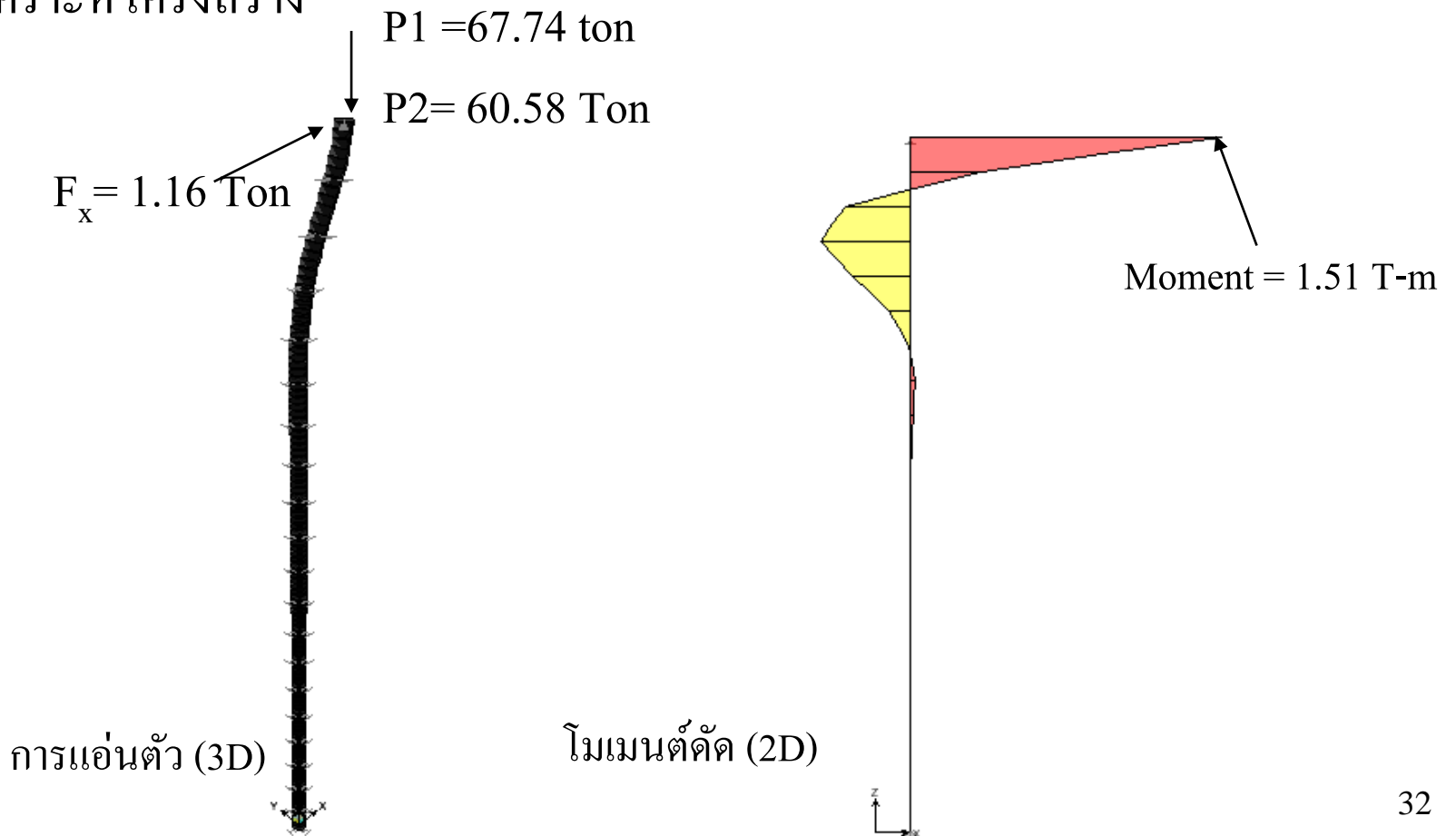
- k0=0.0 T/m
- K1=480.50 T/m
- k2=961.00 T/m
- k3=1441.50 T/m
- k4=1922.00 T/m
- k5=2402.00 T/m
- k6=2883.00 T/m
- k7=3363.00 T/m
- K8=3844.00 T/m
- k9=4324.50 T/m
- k10=4805.00 T/m
- k11=5285.50 T/m
- k12=5766.00 T/m
- K13=6246.50 T/m
- k14=6727.00 T/m
- K15=7207.50 T/m
- K16=7688.00 T/m
- k17=8168.50 T/m
- k18=8649.00 T/m
- k19=9129.50 T/m
- k20=9610.00 T/m



- นำข้อมูลแรง F และ P ทั้ง 2 กรณีไปออกแบบเสาเข็มกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 m ยาว 20 m
- ปลายบนเป็น roller guide ปลายล่างเป็น roller ด้านข้างเชื่อมด้วย spring
- เสาเข็มวางในดินทรายมีค่า spring เปลี่ยนตามความลึกของชั้นดิน ดังรูป

ออกแบบเสาเข็มกรณีอยู่ในชั้นดินทราย

ผลการวิเคราะห์โมเมนต์คัตในเสาเข็มด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม
วิเคราะห์โครงสร้าง



ขอบคุณครับ