

### วิศวกรรมฐานราก (Foundation Engineering)

เป็นวิชาที่วิศวกรโยธาทุกคน ควรจะทราบ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และประหยัด เนื่องจากเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับฐานรากของโครงสร้างทุกชนิด รวมถึงเรื่องแรงต่างๆที่ดินกระทำกับโครงสร้างส่วนที่สัมผัสกับดิน วิศวกร และผู้ที่ต้องการศึกษาวิชานี้ควรมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ วิชาปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) และการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Design) ซึ่งวิชาทั้งสองนี้เป็นวิชาวิศวกรรมหลักเฉพาะที่อยู่ในหลักสูตรของนักศึกษาวิศวกรรมโยธาทุกสถาบัน

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ได้พยายามเขียนอธิบายพื้นฐานของทฤษฎี หลักการต่างๆ และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

ฐานรากแบบค้ำ

ฐานรากแบบลึก

การทรุดตัวของฐานราก

แรงดันด้านข้างของดิน

กำแพงกันดินและเข็มพิค

เสถียรภาพของความลาด

นอกจากนี้ในหนังสือยังได้แนบตัวอย่าง และแบบฝึกหัดท้ายบท เพื่อให้ผู้ที่ต้องการศึกษาได้มีความเข้าใจในการนำไปใช้งานและได้ฝึกฝนในการออกแบบ ตรวจสอบ และคำนวณ

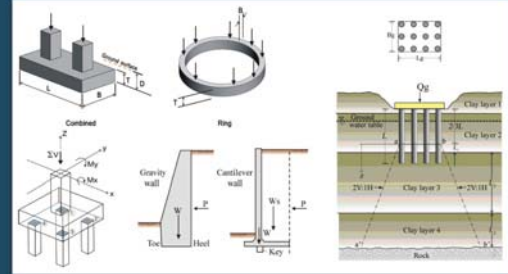
วิศวกรรมฐานราก

FOUNDATION ENGINEERING

ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ

240.-

# วิศวกรรมฐานราก FOUNDATION ENGINEERING



ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล จัณนา  
พิมพ์ครั้งที่ 3  
ISBN 974-416-978-8

## รายละเอียดและการสั่งซื้อ

หนังสือ **Foundation Engineering** หนากว่า 300 หน้า

โดย ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ ราคาปกติ 240 บาท

สั่งซื้อได้ ผ่านทาง mail [sntpp@hotmail.com](mailto:sntpp@hotmail.com) โดยแจ้งหมายเลขสมาชิกของ Tumcivil

**ลดราคาเหลือ 200 บาท + บวกค่าส่งลงทะเบียน หรือ EMS 40 บาท รวมเป็นเงิน = 240 บาท**

โอนเงินเข้าบัญชี **สนิท พิพิธสมบัติ**

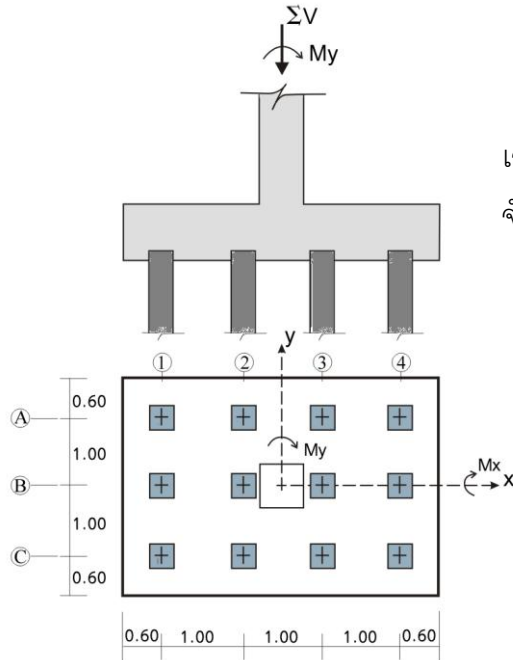
ธนาคารกรุงไทย สาขาถนนหน่วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เลขที่บัญชี **549-0-04805-0**

Scan ใบโอนเงิน พร้อมชื่อ ที่อยู่ เบอร์โทร ที่จะให้ส่งหนังสือที่ [sntpp@hotmail.com](mailto:sntpp@hotmail.com)

หรือ Fax ใบโอนเงิน พร้อมชื่อ ที่อยู่ เบอร์โทร ที่จะให้ส่งหนังสือที่ **053-215763**

หรือโทรสั่งได้โดยตรงที่ ผศ.สนิท ที่ **081-746-0151**

ตัวอย่างที่ 3.11 ฐานรากเสาเข็มกลุ่มจำนวน 12 ต้น จัดเรียงห่างกัน 1.0 เมตร ดังแสดงในรูป รับแรงกระทำในแนวดิ่ง 700 t  $M_x = 50$  t-m.  $M_y = 200$  t-m. จงหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับเนื่องจากแรงกระทำในแนวดิ่งและโมเมนต์



เสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40 x 0.40

จำนวน 12 ต้น

$$P_p = \frac{\sum V}{N} \pm \frac{(M_y)(d_{nx})}{\sum d_x^2} \pm \frac{(M_x)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

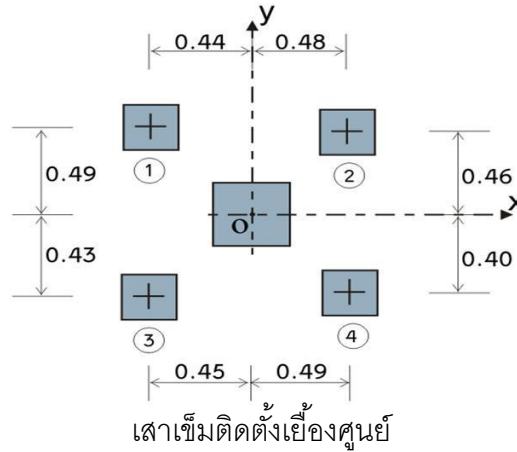
$$(\sum V)/(N) = 700/12 = 58.33 \text{ ตัน}$$

$$\sum d_x^2 = 6(1.5)^2 + 6(0.50)^2 = 15 \text{ m}^2$$

$$\sum d_y^2 = 8(1)^2 = 8 \text{ m}^2$$

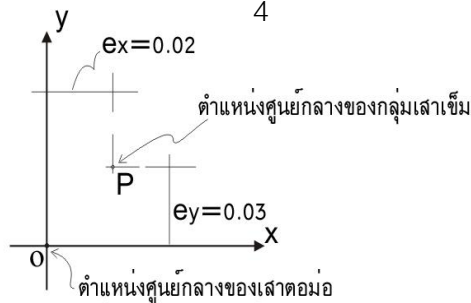
Pile no.	$d_{nx}$ (m)	$d_{ny}$ (m)	$\frac{(M_y)(d_{nx})}{\sum d_x^2}$ (t)	$\frac{(M_x)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$ (t)	$\frac{\sum V}{N}$ (t)	$P_p$ (t)
A-1	1.5	1.0	-20	6.25	58.33	44.58
A-2	0.5	1.0	-6.67	6.25	58.33	57.91
A-3	0.5	1.0	6.67	6.25	58.33	71.25
A-4	1.5	1.0	20	6.25	58.33	84.58
B-1	1.5	0	-20	0	58.33	38.33
B-2	0.5	0	-6.67	0	58.33	51.66
B-3	0.5	0	6.67	0	58.33	65.00
B-4	1.5	0	20	0	58.33	78.33
C-1	1.5	1.0	-20	-6.25	58.33	32.08
C-2	0.5	1.0	-6.67	-6.25	58.33	45.41
C-3	0.5	1.0	6.67	-6.25	58.33	58.75
C-4	1.5	1.0	20	-6.25	58.33	72.08

ตัวอย่างที่ 3.12 กำหนดระยะจากศูนย์กลางเสาตอม่อไปยังศูนย์กลางเสาเข็มหลังจากติดตั้งแล้ว คือ  $d'_x1 = 0.44$  ม.  $d'_x2 = 0.48$  ม.  $d'_x3 = 0.45$  ม.  $d'_x4 = 0.49$  ม.  
 $d'_y1 = 0.49$  ม.  $d'_y2 = 0.46$  ม.  $d'_y3 = 0.43$  ม.  $d'_y4 = 0.40$  ม.  
 จงหาระยะเยื้องศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มเทียบกับศูนย์กลางของเสาตอม่อ



$$\text{จากรูป } e_x = \frac{\sum d'_x}{N} = \frac{-0.44 + 0.48 - 0.45 + 0.49}{4} = 0.02\text{m.}$$

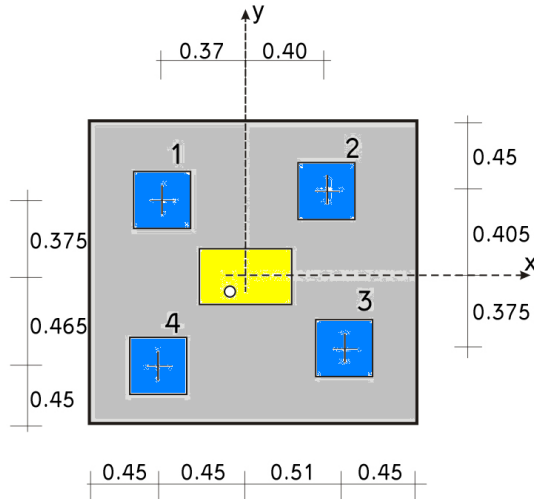
$$e_y = \frac{\sum d'_y}{N} = \frac{0.49 + 0.46 - 0.43 - 0.40}{4} = 0.03\text{m.}$$



แสดงตำแหน่งของศูนย์กลางเสาตอม่อเทียบกับตำแหน่งศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม

จากรูปข้างบนตำแหน่งศูนย์กลางเสาตอม่อจะไม่ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง  $e_x$  และ  $e_y$  ดังนั้นจะทำให้เกิดโมเมนต์รอบแกน x และ y โดยที่  $M_x = \sum V(e_y)$  และ  $M_y = \sum V(e_x)$  การคำนวณหาแรงในเสาเข็มแต่ละต้นในกรณีนี้จะทำคล้ายกับกรณีฐานรากเสาเข็มรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

ตัวอย่างที่ 3.13 ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น รับน้ำหนักจากเสา 200 ตัน กระทำที่จุดศูนย์กลางเสา เมื่อทำการตอกเสาเข็มและวัดระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มไปยังศูนย์กลางของฐานราก ได้ระยะดังแสดง จงหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ เสาตอม่อมีขนาด  $0.30 \times 0.50$  m



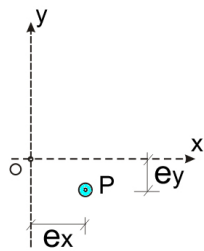
เสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัส  
ขนาด  $0.30 \times 0.30$  m.  
จำนวน 4 ต้น

### วิธีทำ

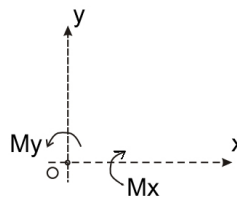
1. หาระยะเยื้องศูนย์กลาง เทียบกับ ศูนย์กลางฐานราก (จุด 0)

$$e_x = \frac{-0.37 + 0.40 - 0.45 + 0.51}{4} = 0.0225 \text{ m.}$$

$$e_y = \frac{-0.375 + 0.405 - 0.465 + 0.375}{4} = -0.015 \text{ m.}$$



ก)



ข)

2. หาโมเมนต์รอบแกน x และ แกน y

$$M_x = \sum V \cdot e_y = (200)(0.015) = 3 \text{ t-m. } M_y = \sum V \cdot e_x = (200)(0.0225) = 4.5 \text{ t-m.}$$

จากรูป ก) จุด 0 เป็นจุดศูนย์กลางของฐานราก จุด P เป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม ดังนั้น เมื่อย้ายแรงจากฐานราก  $\sum V$  ที่กระทำที่จุด 0 ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของฐานรากไปยังจุด P ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม จะได้โมเมนต์  $M_x$  และ  $M_y$  ดังแสดงในรูป ข

3. หาระยะจากศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มไปยังศูนย์กลางของเสาเข็มแต่ละต้น

คำนวณหาระยะจากจุด P ไปยังศูนย์กลางของเสาเข็มแต่ละต้นเป็นค่า  $d_{nx}$  และ  $d_{ny}$

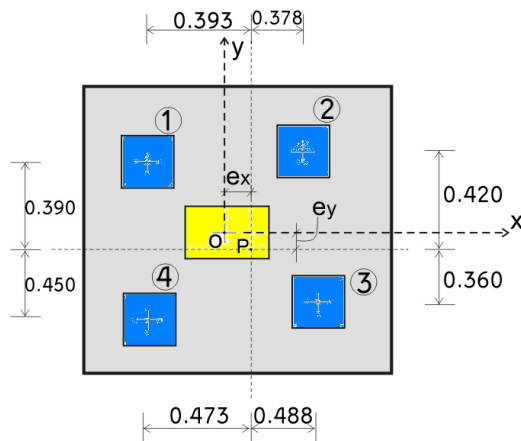
จากรูป  $dx_1 = 0.37+0.0225 = 0.393 \text{ m.}$   $dy_1 = 0.375 + 0.015 = 0.390 \text{ m.}$

$dx_2 = 0.40-0.0225 = 0.378 \text{ m.}$   $dy_2 = 0.405 + 0.015 = 0.420 \text{ m.}$

$dx_3 = 0.51-0.0225 = 0.488 \text{ m.}$   $dy_3 = 0.375 - 0.015 = 0.360 \text{ m.}$

$dx_4 = 0.45+0.0225 = 0.473 \text{ m.}$   $dy_4 = 0.465 - 0.015 = 0.450 \text{ m.}$

$\therefore \sum d_x^2 = 0.759 \text{ m}^2$   $\sum d_y^2 = 0.661 \text{ m}^2$



4. หาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ จากสมการ

$$P_p = \frac{\sum V}{N} \pm \frac{(My)(d_{nx})}{\sum d_x^2} \pm \frac{(Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

Pile no.	$d_{nx}$ (m)	$d_{ny}$ (m)	$\frac{(My)(d_{nx})}{\sum d_x^2}$ (t)	$\frac{(Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$ (t)	$\frac{\sum V}{N}$ (t)	$P_p$ (t)
1	0.393	0.390	2.33	1.77	50	54.10
2	0.378	0.420	-2.24	1.91	50	49.67
3	0.488	0.360	-2.89	-1.63	50	45.48
4	0.473	0.450	2.80	-2.04	50	50.76

หมายเหตุ 1.  $P_p$  เป็นแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ

2. เครื่องหมายบวกและลบ ของค่า  $\frac{(My)(d_{nx})}{\sum d_x^2}$  และ  $\frac{(Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$  ขึ้นกับ

ทิศทางของโมเมนต์ที่กระทำต่อเสาเข็มแต่ละต้น

### วิธีการทดสอบเสาเข็ม

วิธีการทดสอบเสาเข็มที่จะกล่าวถึงนี้ หมายถึงการทดสอบเสาเข็ม โดยใช้แรงกดเสาเข็มลงในแนวดิ่ง (Static Axial Compressive Load) ตามมาตรฐาน ASTM D1143 โดยเสาเข็มที่จะทดสอบควรจะต้องทดสอบเมื่อดินที่อยู่โดยรอบเสาเข็มกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อน กรณีเสาเข็มตอก ควรทดสอบหลังจากตอกเสาเข็มทดสอบแล้วไม่ต่ำกว่า 15-30 วัน กรณีเสาเข็มเจาะทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 30 วัน จึงจะเริ่มลงมือทดสอบได้



รูปที่ 3.15 การทดสอบเข็มโดยกดเสาเข็มลงในแนวดิ่ง

วิธีการเพิ่มน้ำหนักให้กับเสาเข็มที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1143 ได้แนะนำไว้ 7 วิธีคือ

#### 1. Standard Loading Procedure

การทดสอบแบบนี้จะเพิ่มน้ำหนักที่ทดสอบขึ้นครั้งละ 25 % จนถึง 200 % ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้ กรณีทดสอบเสาเข็มเดี่ยว หรือถึง 150% ของน้ำหนักที่ออกแบบ กรณีทดสอบเสาเข็มเป็นกลุ่ม ในแต่ละชั้น ที่เพิ่มน้ำหนัก ให้บันทึกค่าการทรุดตัว จนกระทั่งอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า 0.01 นิ้ว ต่อ ชั่วโมง (0.25 มม. ต่อ ชม.) กรณีการทรุดตัวเกินที่กำหนดให้คองน้ำหนักไว้ แต่การคองน้ำหนักนี้จะต้องไม่เกิน 2 ชั่วโมง การคืนน้ำหนักบรรทุกให้กระทำหลังจากทดสอบไปแล้ว 12 ชั่วโมง หากอัตราการทรุดตัวไม่มากกว่า 0.01 นิ้วต่อชั่วโมง (0.25 มม. ต่อชม.) หากอัตราการทรุดตัวเกินจากที่กำหนดไว้ ให้คองน้ำหนักดังกล่าวไว้ 24 ชั่วโมง จึงจะทำการคืนน้ำหนักโดยการถอนน้ำหนักออกทีละ 25% ของน้ำหนักที่ทดสอบสูงสุด โดยใช้เวลาในการถอนขึ้นละ 1 ชม.

### 3. Deep Foundation

## 2. Cyclic Loading

คือการทดสอบเป็นวงรอบซ้ำไปมา การเพิ่มน้ำหนักในช่วงแรกจะเหมือนกับการทดสอบวิธีที่ 1 เมื่อเพิ่มน้ำหนักเป็น 50, 100 และ 150 % ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้สำหรับเสาเข็มเดี่ยว หรือเท่ากับ 50 และ 100 % กรณีทดสอบเสาเข็มเป็นกลุ่ม คงน้ำหนักดังกล่าวไว้ 1 ชม. ในแต่ละครั้งที่ขึ้นน้ำหนักถึงค่าที่กำหนดไว้แล้ว ให้ทำการถอนน้ำหนักคืนกลับที่เดิมเหมือนตอนขึ้นน้ำหนัก คงน้ำหนักแต่ชั้นที่ถอนคืนไว้ 20 นาที เมื่อคืนน้ำหนักออกหมดแล้ว ให้เพิ่มน้ำหนักขึ้นให้มากกว่าเดิม ตามที่กำหนดไว้คือครึ่งละ 50 % ของน้ำหนักที่ออกแบบ

## 3. Loading in Excess of Standard Test Load

เมื่อทำการทดสอบเสาเข็มตามวิธีการในข้อ 1 แล้วเสาเข็มยังไม่เกิดการพิบัติ ให้ทำการเพิ่มน้ำหนักกดทับเสาเข็มใหม่ ชั้นละ 50 % ของน้ำหนักที่ออกแบบกรณีเข็มเดี่ยว และทำการเพิ่มน้ำหนักครึ่งละ 10 % ของน้ำหนักที่ออกแบบ กรณีเข็มกลุ่ม คงน้ำหนักในแต่ละชั้นไว้ 20 นาที การเพิ่มน้ำหนักนี้จะเพิ่มครึ่งละ 10 % ไปเรื่อย ๆ จนเสาเข็มจะเกิดการพิบัติ ถ้าไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักจนเสาเข็มพิบัติได้ ให้คองน้ำหนักที่สามารถเพิ่มได้สูงสุดไว้ 2 ชม. จึงทำการถอนน้ำหนักออก 4 ครั้ง เท่า ๆ กัน ในการถอนน้ำหนักแต่ละครั้งให้คองน้ำหนักไว้ 20 นาที

## 4. Constant Time Interval Loading

วิธีการนี้จะทดสอบเสาเข็มตามวิธีการในข้อ 1 แต่การเพิ่มน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นครึ่งละ 20 % ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้ และคองน้ำหนักในแต่ละชั้นไว้ 1 ชม. ทั้งขณะเพิ่ม และลดน้ำหนักลง

## 5. Constant Rate of Penetration

การทดสอบแบบนี้จะใช้ทดสอบเฉพาะเสาเข็มเดี่ยวเท่านั้น การทดสอบจะเพิ่มน้ำหนักให้กับเสาเข็มทดสอบ โดยให้อัตราการทุดตัวของเสาเข็มคงที่อยู่ในช่วง 0.01-0.05 นิ้วต่อนาที (0.25-1.25 มม. ต่อนาที) สำหรับเสาเข็มที่ตอกในชั้นดินเหนียว และ 0.03-0.10 นิ้วต่อนาที (0.75-2.5 มม. ต่อนาที) สำหรับเสาเข็มที่ตอกในชั้นทรายหรือกรวด การเพิ่มน้ำหนักจะกระทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเสาเข็มเกิดการพิบัติ

## 6. Quick load Test

การทดสอบแบบนี้จะใช้ทดสอบเฉพาะเสาเข็มเดี่ยวเท่านั้น การทดสอบจะเริ่มจากการเพิ่มน้ำหนักทดสอบขั้นขึ้นละ 10-15% ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้ และคงน้ำหนักในแต่ละขั้นไว้ 2 นาทีครึ่ง การเพิ่มน้ำหนักนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเสาเข็มเกิดการพิบัติหรือจนถึงน้ำหนักสูงสุดของแม่แรงที่ทดสอบ

## 7. Constant Settlement Increment

การทดสอบวิธีนี้จะใช้เฉพาะทดสอบเสาเข็มเดี่ยวเท่านั้น วิธีทดสอบจะเพิ่มน้ำหนักกดเพื่อให้เกิดค่าการทรุดตัวในแต่ละชั้น ประมาณ 1% ของขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม น้ำหนักที่กดลงบนเสาเข็ม จะต้องสามารถปรับให้ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นแต่ละชั้นเท่า ๆ กัน การเพิ่มน้ำหนักจะกระทำ จนกระทั่งค่าการทรุดตัวรวมของเสาเข็มมีค่าประมาณ 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือจนถึงความสามารถสูงสุดของแม่แรง

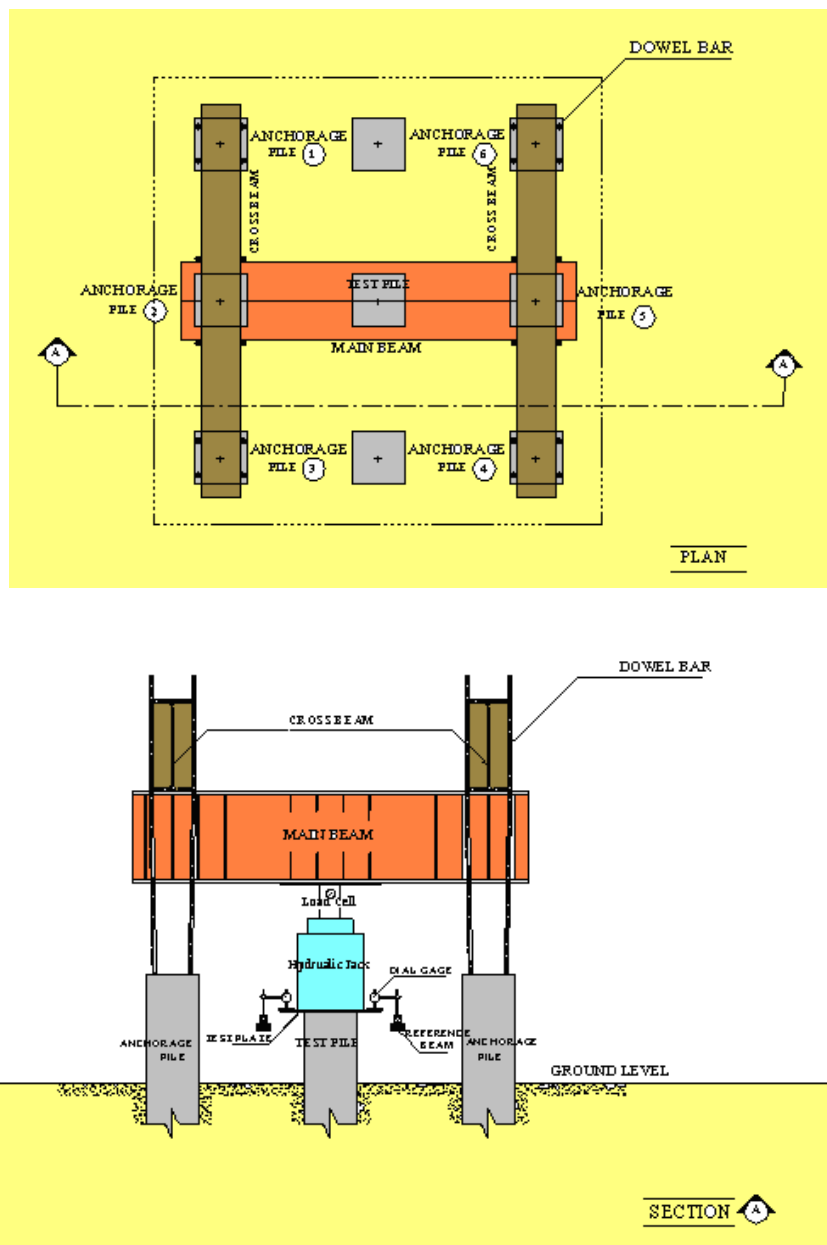
ในการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะต้องอ่านค่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบก่อน และหลังจากที่เพิ่มหรือลดน้ำหนักบรรทุกทุกครั้ง นอกจากนี้ยังต้องมีการจดบันทึกระยะถอนตัวของเสาเข็มเสมอ และอุณหภูมิขณะทดสอบทุกครั้ง que เพิ่มหรือลดน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากมาตรวัดค่าการทรุดตัวจะติดตั้งบนคานเหล็ก ซึ่งอาจมีการหดหรือขยายตัว และจะมีผลต่อการอ่านค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

วิธีการทดสอบเสาเข็มเพื่อหาค่าสูงสุด และค่าที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐาน จะมีหลายวิธี การเลือกทดสอบวิธีไหนจะขึ้นกับอุปกรณ์และเครื่องมือ และวัตถุประสงค์ของการทำข้อมูลไปใช้ อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมใช้คือ วิธีที่ 1 Standard Loading Procedure และวิธีที่ 6 Quick Load Test ในกรณีที่ต้องการน้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มจะรับได้



### การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาเข็ม

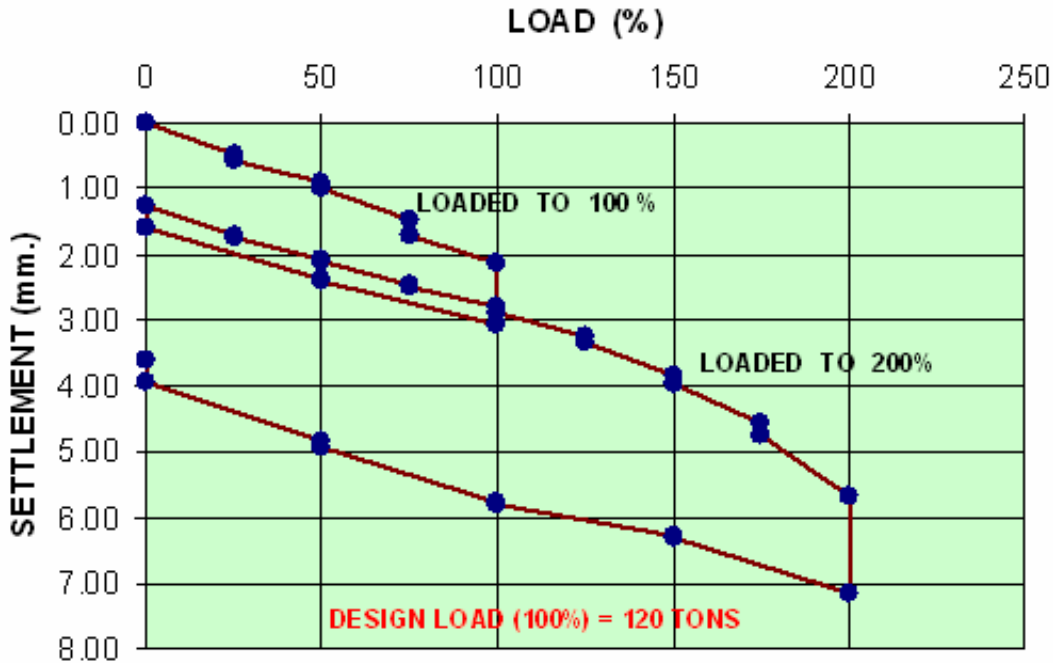
ในการทดสอบเสาเข็มจะใช้แม่แรงไฮดรอลิกซ์ ดันกับคานเหล็กซึ่งยึดติดกับเสาเข็มสมอ ดังแสดงในรูป และการวัดค่าการทรุดตัวจะใช้มาตรวัด (Dial gauge) จำนวน 4 ตัว ในการหาค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยมาตรวัดจะต้องติดบนคานอ้างอิง (Reference beam) ซึ่งติดตั้งห่างออกไปจากเสาเข็มทดสอบ จนไม่มีผลกระทบต่อารเคลื่อนตัวของดินโดยรอบเสาเข็ม



รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาเข็ม

### ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวเฉลี่ย

ในการทดสอบจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวเฉลี่ยที่อ่านจากมาตรวัด

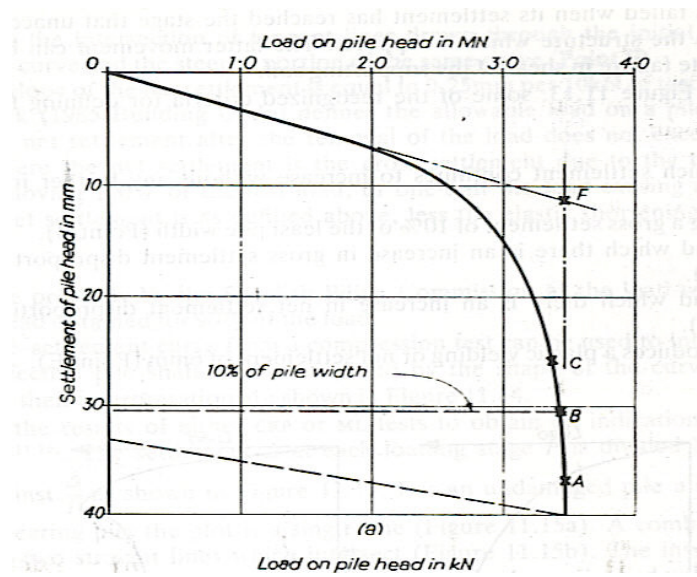


รูปที่ 3.17 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและค่าการทรุดตัว

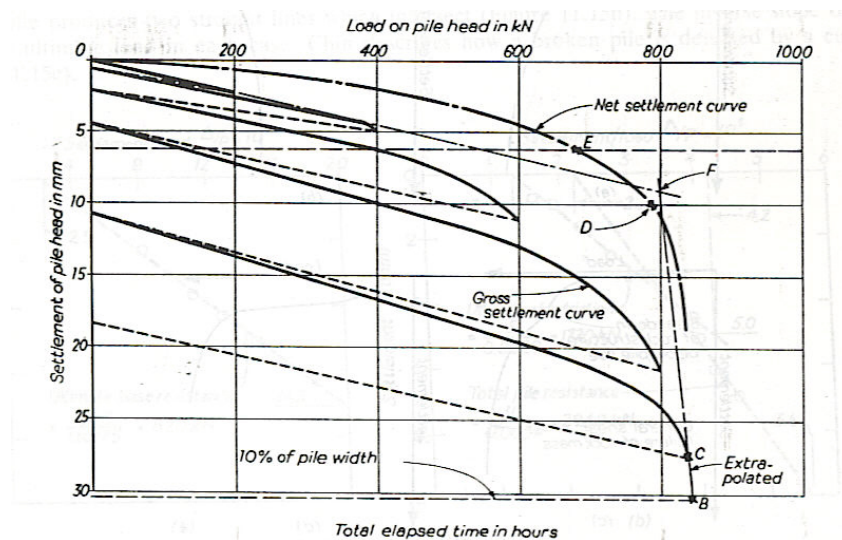
#### การพิบัติของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกดในแนวดิ่ง

แรงพิบัติของเสาเข็ม หมายถึง น้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มจะสามารถรับได้ ซึ่งสามารถหาได้จากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มโดยดูจากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการทรุดตัวของเสาเข็ม ลักษณะการพิบัติของเสาเข็มจากการทดสอบสามารถพิจารณาได้ว่า เสาเข็มจะพิบัติเมื่อ

1. มีการทรุดตัวเกิดขึ้นในเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงที่จุด A ของรูปที่ 3.18 (a)
2. น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าการทรุดตัวทั้งหมด (Gross settlement) เท่ากับ 10% ของด้านแคบของหน้าตัดเสาเข็ม ดังแสดงที่จุด B รูปที่ 3.18 (a)



a) Load-Settlement curve for CRP test on dense gravel



b) Load-Settlement curve for pile on stiff clay

รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

- โดยวิธี CRP test ซึ่งตอกในชั้นกรวดแน่น
- ผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็ง

3. น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าการทรุดตัวทั้งหมด (Gross settlement) ของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงที่จุด C รูปที่ 3.18 (a)

4. น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าการทรุดตัวสุทธิ (Net settlement) เพิ่มขึ้นไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงที่จุด D รูปที่ 3.18 (b)

5. น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการทรุดตัวถาวร หรือการทรุดตัวสุทธิ เท่ากับ 6 มม. ดังแสดงที่จุด E รูปที่ 3.18 (b)

6. น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการลากเส้นสัมผัส ของกราฟที่เขียนระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวทั้งหมด โดยลากเส้นจากส่วนที่ความชันน้อยในช่วงแรก และความชันมากขึ้นในช่วงหลังของการทดสอบมาตัดกัน ดังแสดงที่จุด F รูปที่ 3.18 (a)

7. น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าความชันของกราฟการทรุดตัวสุทธิ กับค่าน้ำหนักบรรทุก มีค่าเท่ากับ 25 มม. ต่อ 10 กิโลนิวตัน ของน้ำหนักทดสอบ

8. City of New York (1985 Building Code) ได้กำหนดน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม เท่ากับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าการทรุดตัวสุทธิ หลังจากถอนค้ำน้ำหนักออกทั้งหมดไม่เกิน 0.25 มม. ต่อ 10 กิโลนิวตัน โดยที่การทรุดตัวสุทธิจะเท่ากับ การทรุดตัวทั้งหมด ลบด้วย การทรุดตัวถาวร เมื่อถอนน้ำหนักจากการทดสอบถึง 100 % ของน้ำหนักที่ออกแบบ

9. ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมการก่อสร้างอาคารพ.ศ.2522 กำหนดกำลังแบกทานสูงสุดจากการทดสอบเสาเข็มได้แก่ น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัว 0.25 มม. ต่อ ตัน และหลังจากเอาน้ำหนักแบกทานออกหมดแล้ว เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การทรุดตัวที่ปรากฏต้องไม่เกิน 6 มม.

10. จากข้อกำหนดทั่วไปของ วสท. สำหรับงานก่อสร้างในหมวดเสาเข็มในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการทดลองบรรทุกน้ำหนัก ได้กำหนดการประลัยของเสาเข็มทดสอบเมื่อระยะทรุดตัวสูงสุดที่หัวเสาเข็มเกิน 12 มิลลิเมตร เมื่อรับน้ำหนัก 2 เท่าของ น้ำหนักบรรทุกใช้งาน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือระยะทรุดคงตัวหลังจากการคืนตัวเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกออกหมดแล้วมีค่าเกิน 6 มิลลิเมตร

### รายงานการทดสอบเสาเข็ม

เมื่อทำการทดสอบเสาเข็ม และต้องทำการรายงานผลการทดสอบ เพื่อให้ทราบข้อมูลต่าง ๆ ในขณะทดสอบ และข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น

1. ชื่อโครงการ สถานที่ตั้งโครงการ เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบ เป็นต้น
2. ข้อมูลเกี่ยวกับการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกับจุดที่ทดสอบเสาเข็ม
3. รูปแสดงการติดตั้ง เครื่องมือ ความสามารถของเครื่องมือ

4. วิธีการทดสอบ ข้อมูลที่อ่านจากการทดสอบ พร้อมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนัก และค่าการทรุดตัว น้ำหนักและระยะเวลาการทดสอบ การทรุดตัวและระยะเวลาการทดสอบ
5. ข้อมูลเกี่ยวกับเสาเข็มที่ทดสอบ และเสาเข็มสมอ เช่น ขนาด ความยาว ระดับหัวเสาเข็ม ปลายเสาเข็ม ข้อมูลการตอกเสาเข็ม น้ำหนักลูกตุ้ม ระยะเวลา ระยะจม จากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย ระยะเยื้องศูนย์ วันที่ทำการติดตั้งเสาเข็ม ตำแหน่งของเสาเข็มทดสอบในผังอาคาร น้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ เป็นต้น
6. ข้อมูลของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ เช่น ความสามารถของแม่แรงไฮดรอลิกซ์ ความละเอียดของมาตรวัด จำนวนมาตรวัดที่ติดตั้ง ไบสอปเทียบเครื่องมือวัด เป็นต้น
7. ข้อมูลอื่น ๆ เช่น วันที่เริ่มทำการทดสอบ และเสร็จสิ้นการทดสอบ ผู้ทดสอบ ข้อมูลเกี่ยวกับข้อกำหนดต่าง ๆ ของเสาเข็ม รูปถ่ายขณะทำการทดสอบ เป็นต้น

### **ความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม**

ตามบทกำหนดทั่วไปของ ว.ส.ท. สำหรับงานก่อสร้าง ได้กำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ยอมให้ของเสาเข็มทดสอบคือ

1. ร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่น้ำหนักบรรทุกไม่เปลี่ยนแปลง หรือ ณ จุดที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบค่อย ๆ ลดลงหรืออยู่คงที่ ขณะที่เสาเข็มทรุดตัวในอัตราสม่ำเสมอ
2. ร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่การทรุดตัวทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตรต่อตัน (1,000 กิโลกรัม) ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำอยู่
3. ร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดตัดกันระหว่างเส้นสัมผัสสองเส้น ซึ่งลากจากส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะทรุดตัว ทั้งนี้แล้วแต่ว่าค่าไหนจะน้อยกว่ากัน

จากข้อกำหนดดังกล่าวจะเห็นว่า เมื่อได้ข้อมูลการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มจากมาตรฐานที่กำหนดแล้ว สามารถหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย เพื่อนำไปใช้การออกแบบได้ โดยใช้อัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม

### **ความปลอดภัยในขณะทดสอบเสาเข็ม**

ในการทดสอบเสาเข็มจะต้องดูแลการทดสอบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในขณะทดสอบ การทดสอบมีข้อที่ควรระวังและต้องคอยสังเกต ได้แก่

1. เสาเข็มสมอถอน ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของเข็มสมอไม่สามารถต้านทานแรงที่เกิดจากการกดของเสาเข็มทดสอบ จะเกิดในกรณีที่ใช้เสาเข็มสมอสั้นเกินไป หรือจำนวนของเสาเข็มสมอไม่พอเพียง จึงต้องมีการคำนวณหาแรงเสียดทานของเสาเข็มจากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน

2. คานเหล็กที่ดันกับแม่แรงไม่สามารถรับน้ำหนักได้ ก่อนการทดสอบจะต้องมีการคำนวณให้เหล็กที่ยึดและคานเหล็กสามารถต้านทานแรงที่เกิดจากการทดสอบได้อย่างปลอดภัย แต่ถ้าเหล็กยึดดังกล่าวใช้งานมานาน เกิดจุดอ่อนอาจจะทำให้เหล็กยึดดังกล่าวขาดขณะทดสอบได้โดยเฉพาะจุดที่หักพับหรือจุดเชื่อมระหว่างเหล็กยึดคานกับเหล็กเสริมในเสาเข็มสมอ

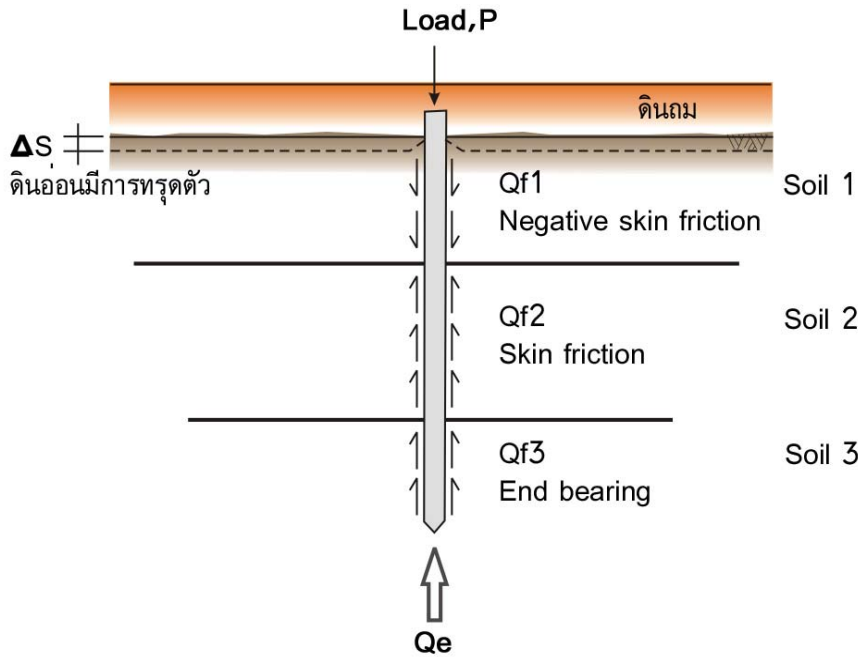
3. การตั้งแม่แรงไม่ได้ตั้ง หรือปรับระดับหัวเสาเข็มทดสอบไม่ได้ระดับ ทำให้เมื่อเพิ่มน้ำหนักทดสอบแล้ว คานเหล็กมีการโยก ไม่ได้ตั้ง และมีการเอียงศูนย์อาจจะทำให้คานล้มและเกิดอันตรายขึ้นได้ นอกจากนี้ในขณะทดสอบ หากเกิดสิ่งผิดปกติขึ้น ควรหยุดทำการทดสอบทันที เพื่อทำการตรวจสอบสิ่งที่จะเป็นอันตรายกับผู้ทดสอบ

### **กรณีที่เสาเข็มพิบัติ**

ในการทดสอบเสาเข็ม ปกติจะกำหนดให้ทดสอบถึง 2 – 2.5 เท่าของน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ หากทำการทดสอบเสาเข็มแล้วเกิดการพิบัติก่อนที่จะเพิ่มน้ำหนักถึง 2 – 2.5 เท่า ตามที่กำหนด อาจจะต้องมีการพิจารณาจำนวนเสาเข็มในแต่ละฐานของอาคารใหม่ โดยจะต้องคำนึงถึงค่าการทรุดตัว และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็มที่น้ำหนักใช้งานจริง นอกจากนี้อาจจะต้องมีการพิจารณาน้ำหนักของอาคารที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มอย่างละเอียดอีกครั้ง อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้ำหนักใช้งานจริงไม่ควรต่ำกว่า 1.75 – 1.80 และต้องคำนึงถึงการลดค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม เมื่อทำการติดตั้งเสาเข็มเป็นกลุ่มด้วย เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีนี้จะถือว่าการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

**3.3 แรงดูดลงของเสาเข็ม (Negative skin friction)**

ในกรณีที่ทำการติดตั้งเสาเข็ม ผ่านชั้นดินที่มีการทรุดตัว เช่นกรณีที่มีการถมดิน หรือระดับน้ำใต้ดินลดลงจากระดับปกติ จะทำให้มีการทรุดตัวในชั้นดิน ถ้าดินที่อยู่โดยรอบเสาเข็ม มีค่าการทรุดตัวมากกว่า เสาเข็ม จะทำให้เกิดแรงดูดลง (Negative skin friction) ซึ่งกรณีนี้ จะเกิดขึ้น ในชั้นดินอ่อน หรือทรายหลวม



รูปที่ 3.19 แรงดูดลงของเสาเข็ม

การคำนวณหาค่าแรงดูดลงของเสาเข็ม สามารถทำได้แบบเดียวกับการคำนวณหาค่าแรงต้านทานโดยรอบเสาเข็ม ชั้นดินที่เกิดแรงดูดลง ค่า Qf จะมีค่าลบ

จากรูปที่ 3.19 สมมุติมีชั้นดินถม ซึ่งทำให้ชั้นดินที่ 1 เกิดการทรุดตัวและเกิดค่าแรงดูดลงของเสาเข็ม Qf1 ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดังนี้ คือ

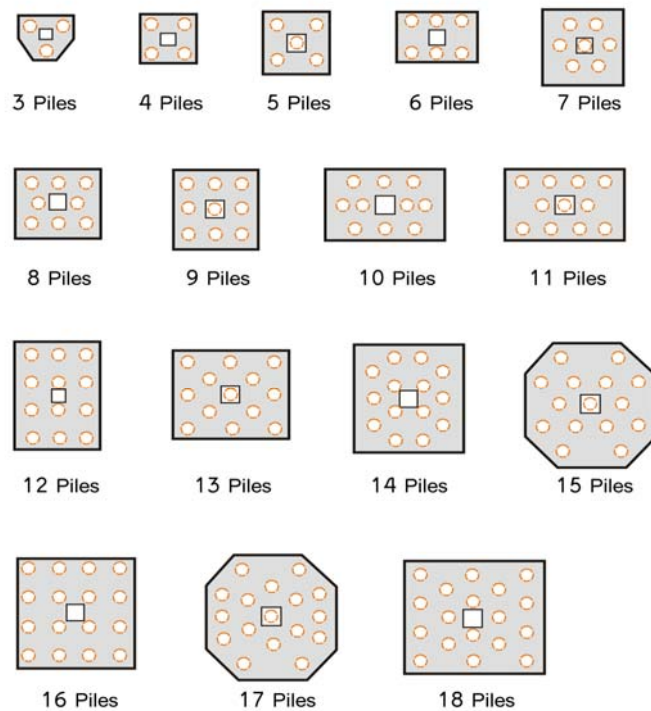
$$\begin{aligned}
 Q_{ult} &= \sum Q_f + Q_e \\
 &= (-Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}) + Q_e \dots\dots\dots(3.11)
 \end{aligned}$$

กรณีที่ทราบว่าจะเกิดแรงดูดลงของเสาเข็ม อาจป้องกันโดยใช้ปลอกเหล็กสวมรอบเสาเข็มในชั้นดินที่คาดว่าจะมีการทรุดตัว เพื่อป้องกันแรงดูดลงของเสาเข็ม แต่ในการคิดแรงต้านทานของดิน โดยรอบเสาเข็มจะต้องไม่คิดค่าแรงต้านทานของดินในชั้นนี้

### 3.4 เสาเข็มกลุ่ม (Pile group)

การใช้เสาเข็มสำหรับงานฐานรากของโครงสร้าง หากมีน้ำหนักกระทำลงสู่ฐานรากมากกว่าความสามารถของเสาเข็มเดี่ยวจะรับได้ จำเป็นจะต้องใช้เสาเข็มหลาย ๆ ต้น เพื่อรับน้ำหนักจากเสาของโครงสร้าง เมื่อมีการใช้เสาเข็มหลาย ๆ ต้น จะต้องมีการจัดรูปแบบของเสาเข็ม เพื่อให้เกิดโมเมนต์ในฐานรำน้อยที่สุด ได้แก่ ต้องพยายามจัดให้กลุ่มเสาเข็มอยู่ใกล้กับเสาดม้ม่มากที่สุด หรือจัดให้ฐานรากเสาเข็มเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือใกล้เคียงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมากที่สุด

ตัวอย่างการจัดรูปแบบของเสาเข็ม สำหรับจำนวนเสาเข็มต่อฐาน ต่าง ๆ กัน แสดงไว้ดังในรูปที่ 3.20



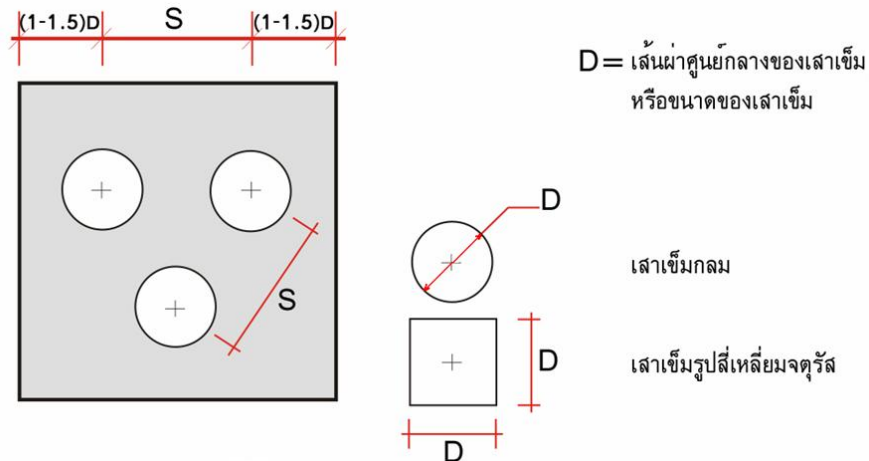
Typical configurations of pile caps

รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการจัดรูปแบบของเสาเข็มสำหรับฐานราก  
ที่มีจำนวนเสาเข็มต่าง ๆ กัน



**ระยะห่างของเสาเข็มกลุ่ม**

เสาเข็มของฐานรากเมื่อจัดเป็นกลุ่ม จะต้องจัดให้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอยู่ในช่วง 2-3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม และจัดให้มีระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานรากประมาณ 1-1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม



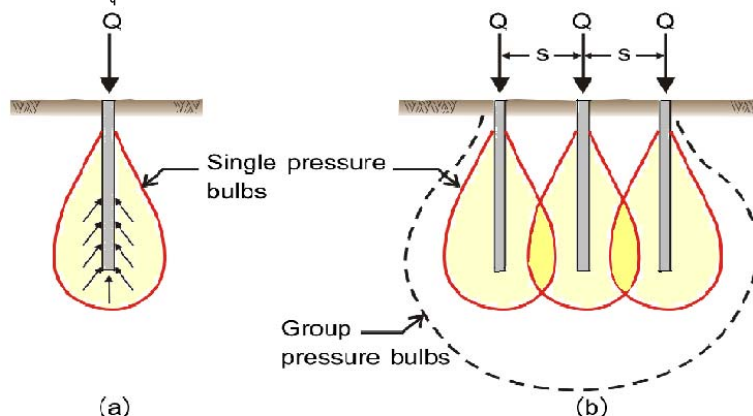
รูปที่ 3.21 แสดงระยะห่างของเสาเข็ม

จากรูปที่ 3.21  $S = 2$  ถึง  $3$  เท่าของ  $D$

เมื่อ  $S =$  ระยะระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลางเสาเข็ม

**ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม** (12 : 412)

เมื่อมีน้ำหนักระทำต่อเสาเข็มเดี่ยว น้ำหนักที่กระทำจะถ่ายลงสู่เสาเข็มและดินที่อยู่โดยรอบเสาเข็ม ทำให้หน่วยแรงในดินเป็นรูปกระเปาะ (Pressure bulk) เมื่อทำการตอกเสาเข็มเป็นกลุ่ม หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในรูปกระเปาะนี้จะซ้อนทับกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มลดลงจากเดิม



รูปที่ 3.22 หน่วยแรงในดินจะเพิ่มขึ้นเป็นรูปกระเปาะ

(a) กรณีเสาเข็มเดี่ยว (b) กรณีเสาเข็มกลุ่ม

ประสิทธิภาพของเสาเข็มเป็นกลุ่ม,  $E_g$  สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$E_g = \frac{Q_g}{(N)(Q_i)} \dots\dots\dots(3.12)$$

เมื่อ  $Q_g$  = ความสามารถในการรับน้ำหนักของกลุ่มเข็ม

$Q_i$  = ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

$N$  = จำนวนเสาเข็มในกลุ่ม

กรณีที่เสาเข็มเป็นเสาเข็มที่รับแรงเสียดทานด้านข้าง (Friction pile) ซึ่งเป็นเสาเข็มตอกในชั้นดินที่ไม่มี cohesion (Cohesionless soil) ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม  $E_g$  อาจจะมีค่ามากกว่า หรือ เท่ากับ 1 ได้ ( $E_g \geq 1$ ) เนื่องจากชั้นดินที่ไม่มี cohesion จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

กรณีเสาเข็มกลุ่มรับแรงเสียดทานด้านข้าง (Friction pile) ที่ตอกในชั้นดินที่มีความ cohesion (Cohesive soil) ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานของดิน โดยรอบกลุ่มของเสาเข็ม และ แรงต้านทานที่ปลายเข็ม ซึ่งกรณีนี้ค่าประสิทธิภาพของเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่า 1 ( $E_g < 1$ )

The AASHTO (1990) ได้แนะนำให้ใช้สมการของ **Converse-Labarre** ในการคำนวณประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มที่รับแรงเสียดทานด้านข้าง (friction pile) ดังแสดงในสมการที่ 3.13

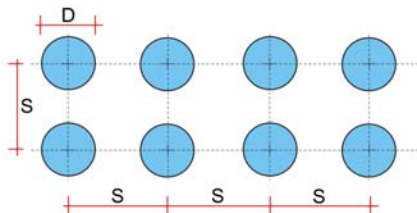
$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \dots\dots\dots(3.13)$$

โดยที่  $\theta = \tan^{-1} \frac{D}{S}$  หน่วยเป็นองศา

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม

$S$  = ระยะห่างของเสาเข็ม

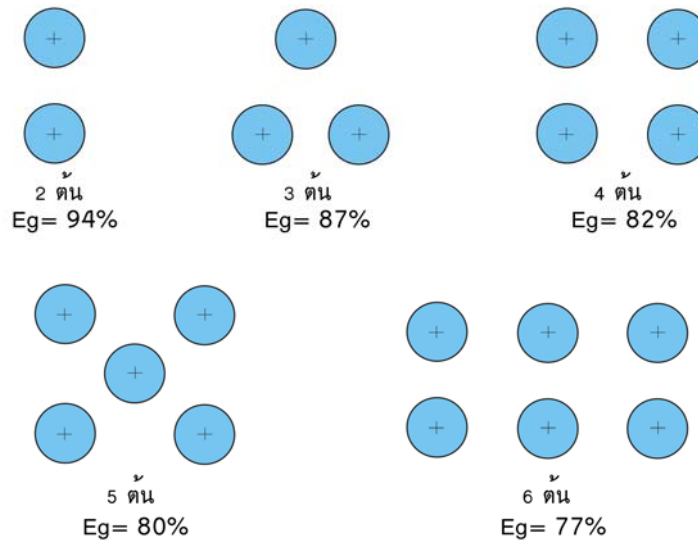
$m$  และ  $n$  = จำนวนเสาเข็มในแนวราบและแนวตั้ง



รูปที่ 3.23 การจัดรูปแบบกลุ่มเสาเข็ม เป็นแถวในแนวราบและแนวตั้ง

สมการของ Converse Labarre นี้จะใช้ได้เฉพาะกรณีที่จัดเสาเข็มเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถนับจำนวน m และ n ได้เท่านั้น

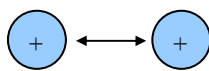
การหาประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มโดยวิธีของ Feld .J วิธีนี้จะสามารถหาประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มที่ติดตั้งในรูปแบบใด ๆ ได้ ไม่เฉพาะที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้หลัก การนับจำนวนเสาเข็มต้นที่ใกล้กับเสาที่พิจารณา และใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเสาเข็ม ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม โดยวิธีนี้จะกำหนดให้เสาเข็มมีประสิทธิภาพลดลง 1/16 เท่า ของเสาเข็มเดี่ยว เมื่อมีเสาเข็มต้นข้างเคียง 1 ต้น



รูปที่ 3.24 ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มโดยวิธีของ Feld .J

ตัวอย่างการหาประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม

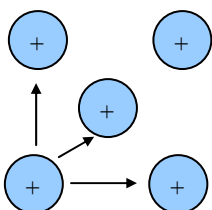
กรณีเสาเข็ม 2 ต้น



มีเสาเข็มต้นที่อยู่ใกล้กัน 1 ต้น ดังนั้นเสาเข็มแต่ละต้นจะต้อง

ลดกำลังลง 1/16 ∴  $Eg = 1 - \frac{2(1/16)}{2} = 0.938$  หรือ 94%

กรณีเสาเข็ม 5 ต้น



เสาเข็ม 4 ต้น (ต้นริม) มีเสาเข็มต้นที่อยู่ข้างเคียง 3 ต้น

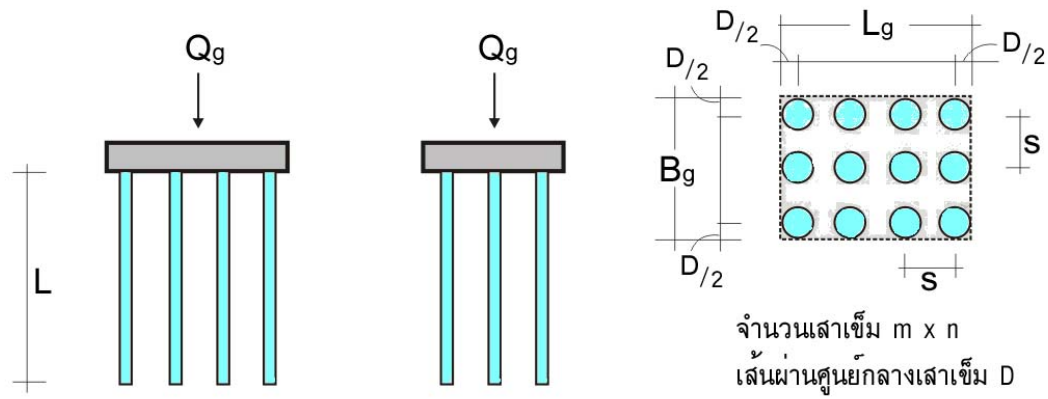
∴ ลดกำลังลง 3/16

เสาเข็ม 1 ต้น (ต้นกลาง) มีเสาเข็มต้นที่อยู่ข้างเคียง 4 ต้น

∴ ลดกำลังลง 4/16

∴  $Eg = 1 - \left[ \frac{4(3/16) + 1(4/16)}{5} \right]$   
 = 0.80 หรือ 80 %

ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม สามารถคำนวณได้จากการที่คิดว่าเมื่อกลุ่มเสาเข็มรับแรง ค่าของแรงเสียดทานของเสาเข็มจะเป็นเส้นรอบรูปรวมของกลุ่มเสา ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เสาเข็มกลุ่ม

จากรูป  $L_g = (m-1) S + D$

$B_g = (n-1) S + D$

จากสมการที่ 3.14

$$E_g = \frac{Q_g}{N Q_i} = \frac{2(L_g + B_g)L_f s}{N \pi D L_f s}$$

$$E_g = \frac{2(L_g + B_g)}{N \pi D} \dots \dots \dots (3.14)$$

จากรูป  $L_g = (m-1) S + D$

$B_g = (n-1) S + D$

$$\therefore E_g = \frac{2S(m-1+n-1)+4D}{\pi ND}$$

$$Eg = \frac{2S(m + n - 2) + 4D}{\pi ND} \dots\dots\dots(3.15)$$

Eg = ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม

m,n = จำนวนเสาเข็มในแนวตั้งและแนวนอน

N = จำนวนเสาเข็มทั้งหมด = m x n

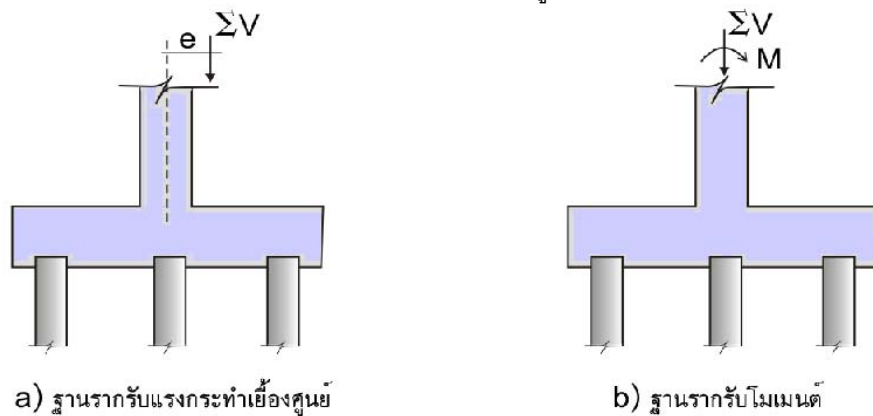
D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือ ขนาดของเสาเข็ม

fs = แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินที่สัมผัสโดยรอบ

L = ความยาวของเสาเข็ม

### 3.5 ฐานรากเสาเข็มรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

ฐานรากของเสาเข็มกลุ่ม เมื่อมีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric loading) หรือกรณีที่มีแรงกระทำตรงศูนย์กลางแต่มีโมเมนต์กระทำกับฐานราก จะต้องออกแบบให้เสาเข็มแต่ละต้นสามารถต้านรับแรงในแนวตั้ง และแรงที่เกิดจากการเยื้องศูนย์กลาง หรือโมเมนต์ได้โดยปลอดภัย



a) ฐานรากรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

b) ฐานรากรับโมเมนต์

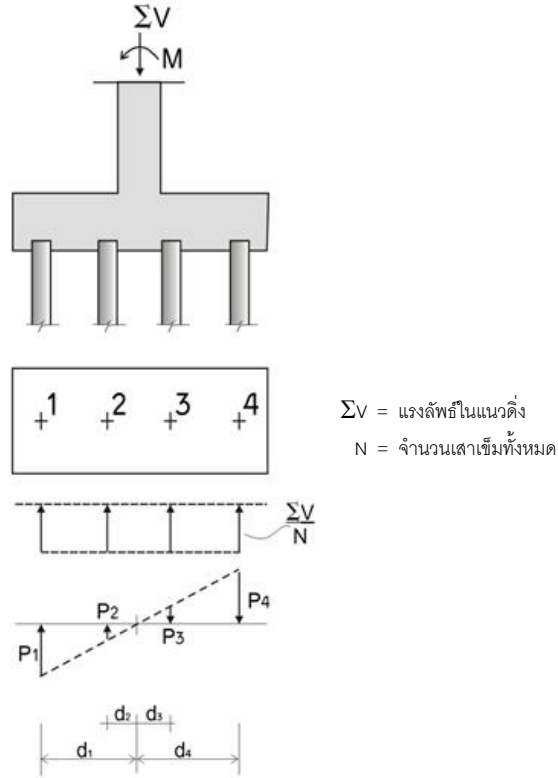
รูปที่ 3.26 ฐานรากรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางหรือฐานรากรับโมเมนต์

ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มเพื่อรับแรงในแนวตั้งและโมเมนต์ จะมีการตั้งสมมุติฐาน คือ

1. ฐานรากเสาเข็มจะสมมุติว่ามีสภาพแข็งเกร็ง (Rigid)
2. หัวเสาเข็ม (Pile top) จะยึดติดกับฐานรากในลักษณะจุดยึดหมุน (Hinge) โดยไม่มีการถ่ายโมเมนต์จากฐานรากลงสู่เสาเข็ม
3. เสาเข็มจะถือว่าเป็นเสาเข็มสั้น และอยู่ในสภาพยืดหยุ่น ดังนั้นการยืดหดตัวของเสาเข็มและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในระนาบเดียวกัน
4. เสาเข็มทั้งหมดในกลุ่มอยู่ในแนวตั้ง

จากสมมุติฐานดังกล่าว จะสามารถใช้ทฤษฎีของความยืดหยุ่น (Deformation Method) ในการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในฐานรากได้

การคำนวณหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับสามารถหาได้โดยสมการของทฤษฎี ความยืดหยุ่น



รูปที่ 3.27 แรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มแต่ละต้น เมื่อรับแรงในแนวตั้งและโมเมนต์

จากรูปที่ 3.27 แรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ

**ส่วนที่ 1** รับน้ำหนักจากแรงลัพธ์ที่กระทำในแนวตั้ง จะถือว่าแรงส่วนนี้จะถ่ายไปให้กับเสาแต่ละต้นเท่ากัน คือ

$$\frac{\Sigma V}{N}$$

**ส่วนที่ 2** รับน้ำหนักจากโมเมนต์ที่กระทำ เมื่อพิจารณาแรงจากโมเมนต์ที่ถ่ายลงสู่เสาเข็ม

$$\Sigma M = P_1d_1 + P_2d_2 + P_3d_3 + P_4d_4 \dots \dots \dots (3.16)$$

เมื่อ  $P_1, P_2, P_3, P_4$  = แรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับเนื่องจากโมเมนต์

$d_1, d_2, d_3, d_4$  = ระยะจากศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มไปยังเข็มแต่ละต้น

จากทฤษฎีความยืดหยุ่น  $\frac{P_1}{d_1} = \frac{P_2}{d_2} = \frac{P_3}{d_3} = \frac{P_4}{d_4} \dots\dots\dots(3.17)$

แทนค่า P1 ลงในสมการ (3.16)

$$\begin{aligned} \sum M &= P_1 d_1 + \frac{P_1 d_2^2}{d_1} + \frac{P_1 d_3^2}{d_1} + \frac{P_1 d_4^2}{d_1} \\ &= \frac{P_1}{d_1} (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2) \\ &= \frac{P_1}{d_1} \cdot \sum d^2 \\ \text{หรือ } P_1 &= \frac{\sum M \cdot d_1}{\sum d^2} \end{aligned}$$

เมื่อ  $P_1 =$  แรงที่เสาเข็มต้นที่ 1 รับ เนื่องจากโมเมนต์

$\sum d^2 =$  ผลรวมของระยะทางยกกำลังสองจากศูนย์กลางของกลุ่ม เสาเข็ม  
ไปยังศูนย์กลางของเสาเข็มแต่ละต้น

$\sum M =$  โมเมนต์ที่กระทำกับฐานราก

เมื่อรวมแรงทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันจะสามารถหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ คือ

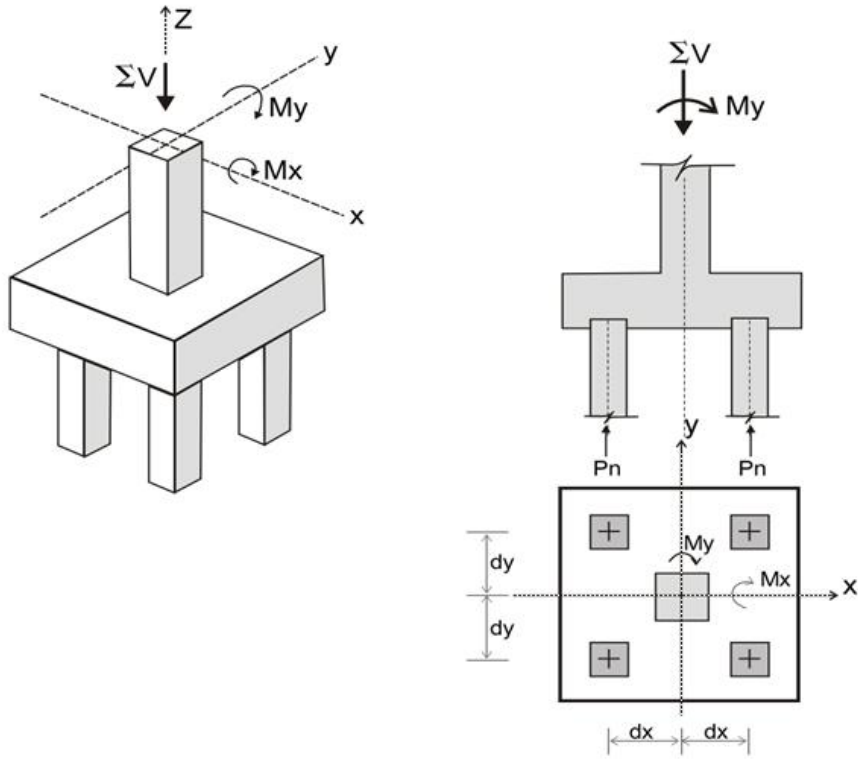
$$P_p = \frac{\sum V}{N} \pm \frac{\sum M \cdot d_n}{\sum d^2} \dots\dots\dots(3.18)$$

สมการที่ (3.18) จะใช้ได้ในกรณีที่มีโมเมนต์กระทำกับฐานรากในทิศทางเดียวกัน

จากการคำนวณ จะต้องพิจารณาเครื่องหมายบวกและลบ ในสมการหาค่าแรงในเสาเข็ม  
โดยพิจารณาจากทิศทางของโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

กรณีที่มีโมเมนต์ 2 ทิศทาง ทั้งแกน x และ แกน y ดังแสดง สมการของการหาแรงในเสาเข็มแต่ละต้น จะสามารถเขียนได้ คือ

$$P_p = \frac{\sum V}{N} \pm \frac{\sum Mydn_x}{\sum d_x^2} \pm \frac{\sum Mxdn_y}{\sum d_y^2} \dots\dots\dots(3.19)$$



รูปที่ 3.28 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มกรณีที่มีโมเมนต์รอบแกน x และ y

จากสมการการหาแรงในเสาเข็มแต่ละต้นดังแสดง จะใช้ในการหาแรงในเสาเข็มกรณีที่มีการจัดเรียงเสาเข็มกลุ่มในลักษณะเป็นแถวตรงกันทั้งแนวตั้งและแนวราบ โดยเสาเข็มจะต้องจัดเรียง ในลักษณะสมมาตรเท่านั้น ไม่สามารถใช้หาแรงในเสาเข็มกรณีตอกเสาเข็มในรูปแบบสามเหลี่ยมหรือรูปอื่น ที่ไม่สมมาตร ในแนวแกน x และ y ได้

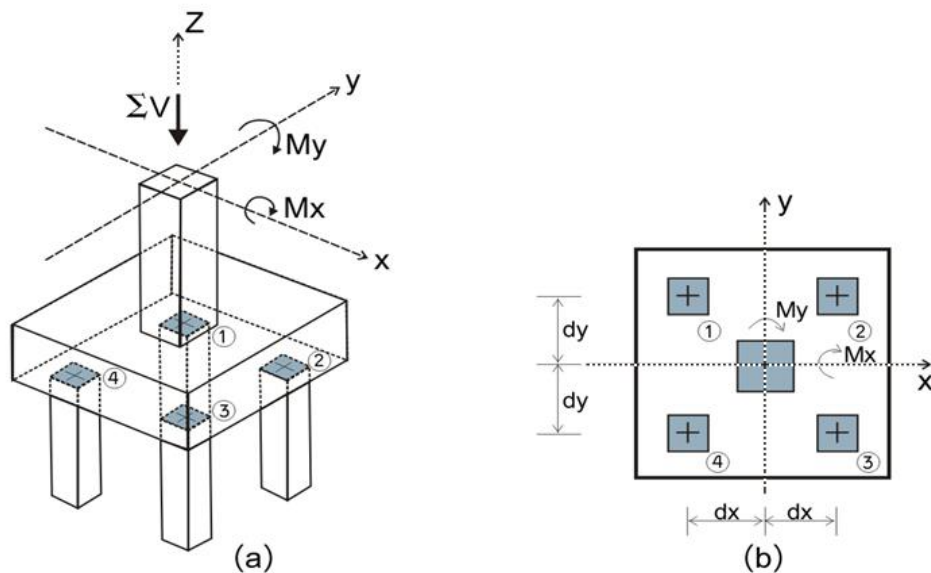


เมื่อ  $P_p =$  แรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ  
 $\sum V =$  ผลรวมของแรงในแนวดิ่งที่กระทำฐานราก  
 $N =$  จำนวนเสาเข็มทั้งหมด

$\sum M_x, \sum M_y =$  ผลรวมของโมเมนต์รอบแกน x และรอบแกน y  
 $d_{nx}, d_{ny} =$  ระยะจากศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มถึงศูนย์กลาง เสาเข็มในแนว  
 แกน x และ y

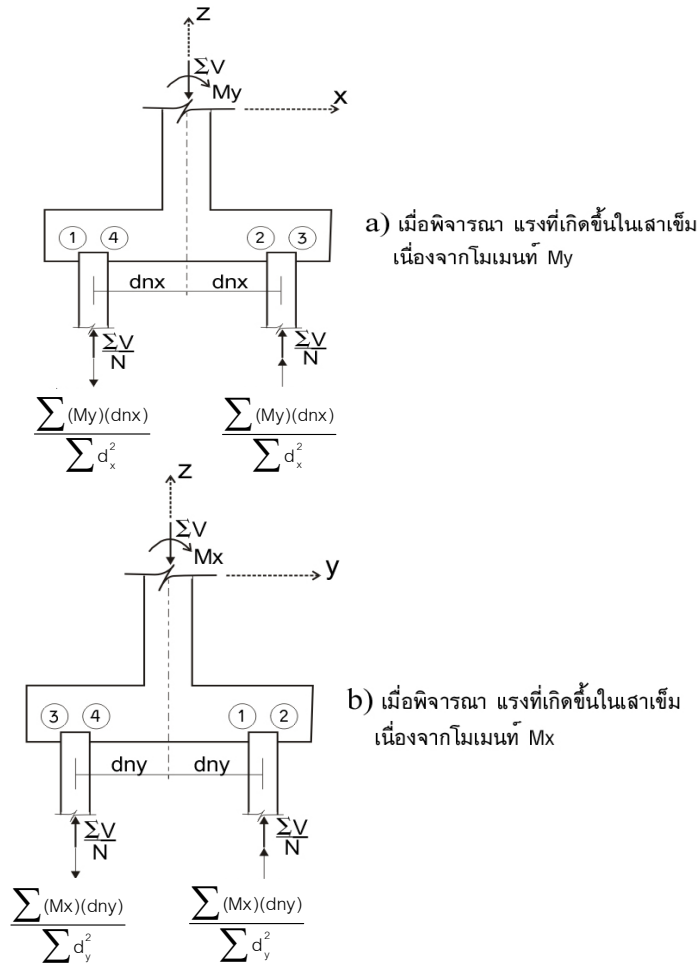
$\sum d_x^2, \sum d_y^2 =$  ผลรวมของระยะทางยกกำลังสองในแนวแกน x และ y

จากสมการที่ (3.18) และ (3.19) แรงที่เกิดจากโมเมนต์ที่อยู่ในเทอมที่ 2 และ 3 ของสมการ จะมีค่าเป็นบวกหรือลบ จะขึ้นกับทิศทางของโมเมนต์ว่าหมุนไปในทิศทางไหน



รูปที่ 3.29 แสดงแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับเนื่องจากแรงกระทำในแนวดิ่งและโมเมนต์รอบแกน x และ แกน y

จากรูปที่ 3.29 จะต้องพิจารณาเครื่องหมายบวกและลบ ของแรงที่เกิดในเสาเข็มแต่ละต้นที่จะต้องแทนลงในสมการ (3.19) ซึ่งหลักการที่จะพิจารณา สามารถที่จะหาได้จากรูปที่ 3.30 (a) และ (b)



รูปที่ 3.30 แสดงแรงในเสาเข็มที่เกิดจากโมเมนต์ Mx และ My

จากรูปที่ 3.29 และ 3.30 สามารถหาแรงในเสาเข็มแต่ละต้นได้ คือ

$$P_{p1} = \frac{\sum V}{N} - \frac{\sum (My)(d_{nx})}{\sum d_x^2} + \frac{\sum (Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

$$P_{p2} = \frac{\sum V}{N} - \frac{\sum (My)(d_{nx})}{\sum d_x^2} + \frac{\sum (Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

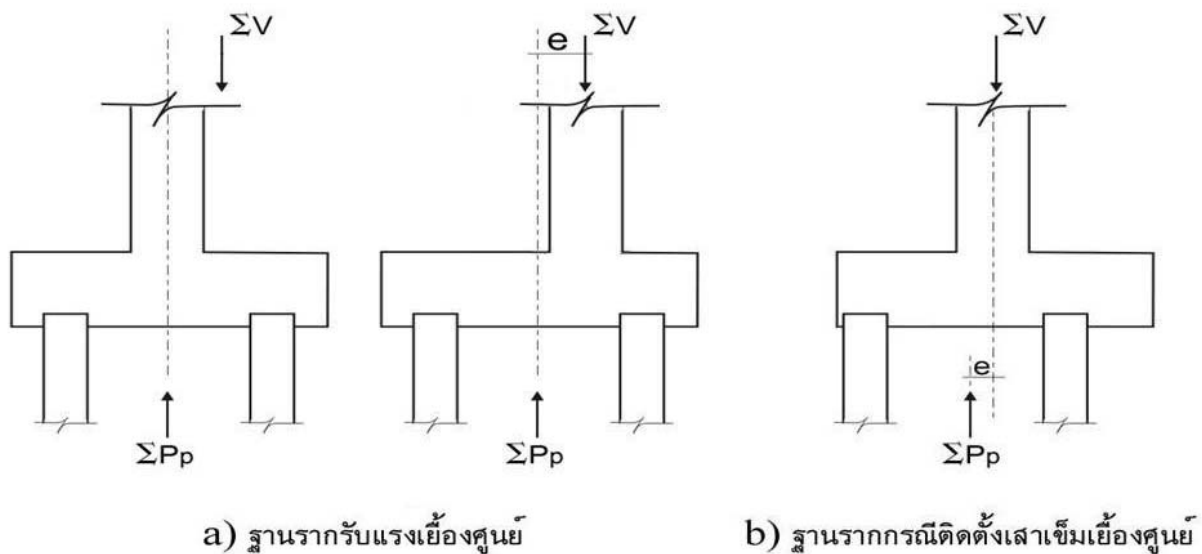
$$P_{p3} = \frac{\sum V}{N} - \frac{\sum (My)(d_{nx})}{\sum d_x^2} - \frac{\sum (Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

$$P_{p4} = \frac{\sum V}{N} - \frac{\sum (My)(d_{nx})}{\sum d_x^2} - \frac{\sum (Mx)(d_{ny})}{\sum d_y^2}$$

แรงในเสาเข็มต้นที่ 2 จะมีค่าสูงสุด และแรงในเสาเข็มต้นที่ 4 จะมีค่าต่ำสุด

### 3.6 ฐานรากเสาเข็มกรณีติดตั้งเสาเข็มเยื้องศูนย์กลาง

ในกรณีที่ติดตั้งเสาเข็มไม่ตรงตำแหน่งที่ระบุไว้ในแบบโครงสร้าง ถ้าเป็นเสาเข็มเดี่ยวปกติ จะยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ประมาณ 5 ซม. ซึ่งการที่เสาเข็มติดตั้งไม่ตรงกับตำแหน่งที่ระบุนี้จะทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้น เนื่องจากแรงที่ลงเสาตอม่อ ไม่ตรงกับแรงที่ดันขึ้นของเสาเข็มกรณีเสาเข็มเดี่ยว หรือไม่ตรงกับ จุดศูนย์กลางของกลุ่มเข็ม ในกรณีที่ติดตั้งเสาเข็มเป็นกลุ่ม



รูปที่ 3.31 ฐานรากรับแรงเยื้องศูนย์กลางและฐานรากกรณีเสาเข็มเยื้องศูนย์กลาง

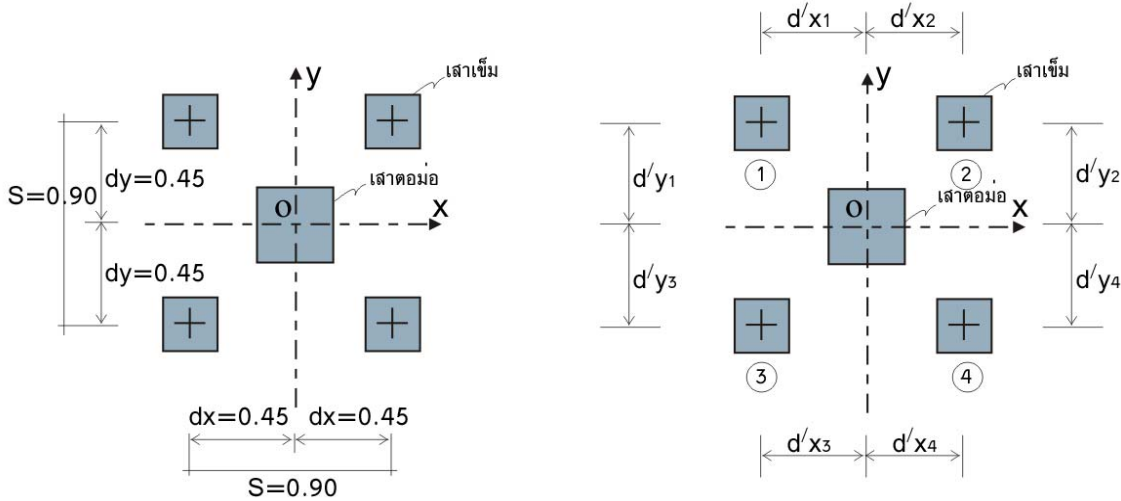
จากรูปที่ 3.31 a) ฐานรากรับแรงจากตอม่อ  $\Sigma V$  กระทำเยื้องศูนย์กลาง โดย  $e$  เป็นระยะเยื้องศูนย์กลางซึ่งห่างจากแรงลัพธ์ของแรงดันขึ้นของเสาเข็ม  $\Sigma P_p$  การหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับ สามารถหาได้จากสมการในหัวข้อที่ 3.5 สมการที่ (3.18) หรือ (3.19)

รูปที่ 3.31 b) เป็นกรณีที่แรงที่กระทำผ่านตอม่อกระทำตรงตำแหน่งศูนย์กลางฐานรากแต่ในการติดตั้งเสาเข็มแต่ละต้นไม่เป็นไปตามที่กำหนดให้ ศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มไม่ผ่านศูนย์กลางของฐานราก

ฐานรากทั้ง 2 กรณี สามารถหาค่าแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับได้โดยสมการเดียวกัน แต่ต้องหาจุดศูนย์กลางของเสาเข็มกลุ่ม หรือตำแหน่งแรงลัพธ์ที่ดันขึ้นของกลุ่มเสาเข็ม

**3.6.1 การหาจุดศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มที่ติดตั้งเอียงศูนย์กลาง**

กรณีของเสาเข็มขนาด  $\square 0.30 \times 0.30$  มีระยะห่างของเสาเข็มแต่ละต้น  $S = 3D$  หรือ 0.90 เมตร เมื่อใช้เสาเข็มสี่ต้น สามารถจัดตำแหน่งเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.32 (a)



a) ระยะห่างของเสาเข็มสำหรับฐานรากเสาเข็ม

เสาเข็ม 4 ต้น ตามแบบระยะ  $dx=dy=0.45$  เมตร

รูปที่ 3.32 แสดงระยะห่างของเสาเข็มตามแบบและเสาเข็มเมื่อติดตั้งเสร็จ

b) ระยะห่างของเสาเข็มเมื่อติดตั้งเสร็จ

เมื่อทำการติดตั้งเสาเข็ม ปรากฏว่าเกิดการคลาดเคลื่อนจากที่กำหนด ดังแสดงในรูป 3.32 (b)

จากรูปจะให้จุด 0 เป็นจุดศูนย์กลางของเสาตอม่อ และเสาเข็มแต่ละต้นที่ติดตั้งมีพิกัดที่วัดจากจุด 0 เป็น  $d'x$  และ  $d'y$  โดยให้คิดเครื่องหมาย บวก ลบ ของระยะตามทิศทางของตำแหน่งเสาเข็ม

ระยะเอียงศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มในแนวแกน x และ y สามารถหาได้โดยใช้สมการ (3.20) และ (3.21)

$$e_x = \frac{\sum d'x}{N} \dots\dots\dots(3.20)$$

$$e_y = \frac{\sum d'y}{N} \dots\dots\dots(3.21)$$

โดยที่  $e_x$  และ  $e_y$  เป็นระยะเอียงศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มในแนวแกน x และ y

$\sum d'x$  และ  $\sum d'y$  เป็นผลรวมของระยะที่วัดจากจุด 0 ไปยังเสาเข็มแต่ละต้น ในแนวแกน x และ แกน y โดยให้คิดเครื่องหมาย บวก ลบ ตามตำแหน่งของเสาเข็ม

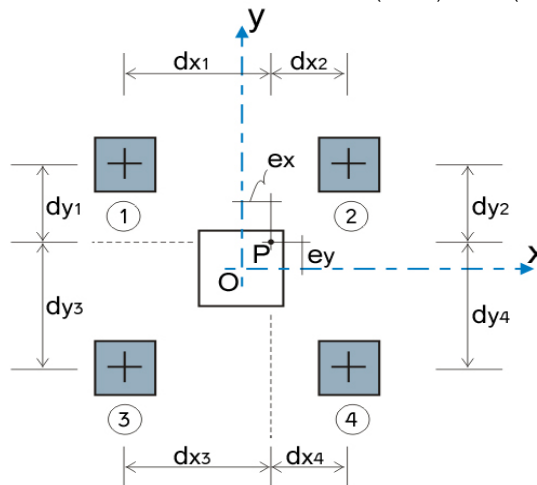
$N =$  จำนวนเสาเข็มทั้งหมด

### 3.6.2 การหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับกรณีติดตั้งเสาเข็มเยื้องศูนย์กลาง

การหาแรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับกรณีนี้จะใช้สมการ (3.18) เช่นเดียวกับกรณีฐานรากรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง แต่ในการหาค่า  $dx$  และ  $dy$  จะต้องหาจากศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม หรือ จุด P ตามรูปที่ 3.33

#### ขั้นตอนการหาแรงที่เสาเข็ม แต่ละต้นรับกรณีติดตั้งเสาเข็มเยื้องศูนย์กลาง

1. ตรวจสอบระยะเยื้องศูนย์กลางของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็มเทียบกับจุดศูนย์กลางของเสาตอม่อ
2. หาศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม หรือระยะ  $e_x$  และ  $e_y$  โดยใช้สมการที่ (3.20) และ (3.21)
3. หาระยะจากจุดศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็มไปยังเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเป็นค่า  $dx$  และ  $dy$
4. หาค่าโมเมนต์รอบแกน  $x$  และรอบแกน  $y$  โดย  $M_x = \sum V(e_y)$  และ  $M_y = \sum V(e_x)$
5. หาค่าผลรวมของระยะทางยกกำลังสอง  $\sum d_x^2$  และ  $\sum d_y^2$
6. หาค่า  $P_p$  แรงที่เสาเข็มแต่ละต้นรับโดยสมการ (3.18) และ (3.19)



รูปที่ 3.33 แสดงระยะ  $dx$  และ  $dy$  กรณีตอกเสาเข็มเยื้องศูนย์กลาง

จากรูป 3.33 จุด P เป็นศูนย์กลางของกลุ่มเสาเข็ม การหาระยะ  $dx_n$  และ  $dy_n$  จะต้องวัดระยะจากจุด P ออกไป ทั้งในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ดังแสดงในรูป จุด O จะเป็นจุดที่น้ำหนักจากเสาตอม่อกระทำลงสู่ฐานราก

### วิศวกรรมฐานราก (Foundation Engineering)

เป็นวิชาที่วิศวกรโยธาทุกคน ควรจะทราบ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และประหยัด เนื่องจากเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับฐานรากของโครงสร้างทุกชนิด รวมถึงเรื่องแรงต่างๆที่ดินกระทำกับโครงสร้างส่วนที่สัมผัสกับดิน วิศวกร และผู้ที่ต้องการศึกษาวิชานี้ควรมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ วิชาปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) และการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Design) ซึ่งวิชาทั้งสองนี้เป็นวิชาวิศวกรรมหลักเฉพาะที่อยู่ในหลักสูตรของนักศึกษาวิศวกรรมโยธาทุกสถาบัน

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ได้พยายามเขียนอธิบายพื้นฐานของทฤษฎี หลักการต่างๆ และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

ฐานรากแบบค้ำ

ฐานรากแบบลึก

การทรุดตัวของฐานราก

แรงดันด้านข้างของดิน

กำแพงกันดินและเข็มพิค

เสถียรภาพของความลาด

นอกจากนี้ในหนังสือยังได้แบบตัวอย่าง และแบบฝึกหัดท้ายบท เพื่อให้ผู้ที่ต้องการศึกษาได้มีความเข้าใจในการนำไปใช้งานและได้ฝึกฝนในการออกแบบ ตรวจสอบ และคำนวณ

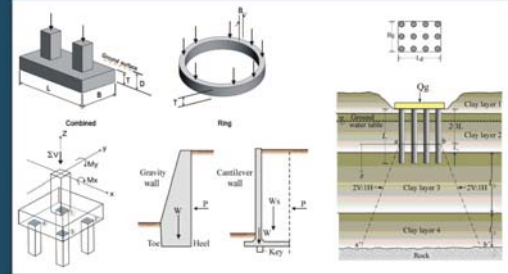
วิศวกรรมฐานราก

FOUNDATION ENGINEERING

ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ

240.-

# วิศวกรรมฐานราก FOUNDATION ENGINEERING



ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล จัณนา  
พิมพ์ครั้งที่ 3  
ISBN 974-416-978-8

## รายละเอียดและการสั่งซื้อ

หนังสือ **Foundation Engineering** หนากว่า 300 หน้า

โดย ผศ.สนิท พิพิธสมบัติ ราคาปกติ 240 บาท

สั่งซื้อได้ ผ่านทาง mail [sntpp@hotmail.com](mailto:sntpp@hotmail.com) โดยแจ้งหมายเลขสมาชิกของ Tumcivil

**ลดราคาเหลือ 200 บาท + บวกค่าส่งลงทะเบียน หรือ EMS 40 บาท รวมเป็นเงิน = 240 บาท**

โอนเงินเข้าบัญชี **สนิท พิพิธสมบัติ**

ธนาคารกรุงไทย สาขาถนนหน่วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เลขที่บัญชี **549-0-04805-0**

Scan ใบโอนเงิน พร้อมชื่อ ที่อยู่ เบอร์โทร ที่จะให้ส่งหนังสือที่ [sntpp@hotmail.com](mailto:sntpp@hotmail.com)

หรือ Fax ใบโอนเงิน พร้อมชื่อ ที่อยู่ เบอร์โทร ที่จะให้ส่งหนังสือที่ **053-215763**

หรือโทรสั่งได้โดยตรงที่ ผศ.สนิท ที่ **081-746-0151**