

## การออกแบบฐานรากเสาเข็มและแผ่นพื้นโดยมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

### Optimal Design of Pile Foundation and Slab on Pile

นายพงศภัค กาญจนธนาเลิศ นายณัฐจักรชัย คำกรุหนันทกานต์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

#### บทคัดย่อ

ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มและแผ่นพื้นนั้น วิศวกรจะต้องออกแบบให้มีกำลังรับแรงมากเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย โดยน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นจะถูกถ่ายผ่านเสาเข็มลงไปยังชั้นดินที่แข็งแรงกว่า ในการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็มมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลากหลายตัวแปร และมีข้อจำกัดของตัวแปรจำนวนมาก การออกแบบเพื่อให้ได้ราคาต่ำที่สุดและมีความปลอดภัยจึงสามารถทำได้ยาก ปัญญาประดิษฐ์จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็มโดยมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมต่างๆ โปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นสำหรับออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็มโดยการออกแบบแผ่นพื้นไร้คาน ออกแบบด้วยวิธี Direct Design Method ตามมาตรฐาน ACI318-14 [1] งานวิจัยนี้นำเสนอผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB และ MS Excel โดยใช้อัลกอริทึมที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 อัลกอริทึม ได้แก่ Genetic Algorithm, fmincon, patternsearch, Firefly และ Evolutionary ทำการวิเคราะห์ด้วยลักษณะของพื้นที่ที่ต่างกัน 2 แบบ คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสและพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีสภาพชั้นดินที่แตกต่างกัน 3 สภาพ และน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน 2 แบบ โดยจะนำเสนอผลที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึมมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากทุกอัลกอริทึม

คำสำคัญ: การออกแบบแผ่นพื้นบนเสาเข็ม, การหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, โปรแกรม MATLAB

#### 1. บทนำ

โครงสร้างพื้นวางบนเสาเข็ม (Slab on Pile) ทำหน้าที่ในการถ่ายแรงที่กระทำบนพื้นลงไปยังชั้นดินที่ ลึกและแข็งแรงกว่า ซึ่งพื้นจะทำหน้าที่ถ่ายแรงเข้าสู่เสาเข็มโดยตรงโดยไม่ต้องมีคานมารองรับ เนื่องจากบางพื้นที่มีชั้นดินที่อ่อน โดยเฉพาะชั้นดินในกรุงเทพฯ จัดว่าเป็นชั้นดินที่มีกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) ค่อนข้างต่ำหรือเป็นพื้นที่ต้องการกำลังรับน้ำหนักมากกว่าปกติ เช่น พื้นที่จอดรถ

หรือ พื้นโรงงาน การเลือกโครงสร้างแผ่นพื้นวางบนดินอาจมีกำลังแบกทานไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ทำให้โครงสร้างพื้นวางบนเสาเข็มจึงเป็นทางเลือกในการก่อสร้างเพื่อลดปัญหาการทรุดตัวที่อาจเกิดจากกำลังแบกทานของดินบริเวณพื้นผิวที่ไม่เพียงพอหรือการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว (Consolidation) เป็นต้น

ในการออกแบบโครงสร้างพื้นวางบนเสาเข็มจะมีการออกแบบ 2 ส่วนหลักๆ คือ การออกแบบแผ่นพื้น และการออกแบบกำลังรับแรงของเสาเข็ม โดยที่ตัวแปรแต่ละตัวในการออกแบบจะเป็นตัวแปรที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน การเปลี่ยนแปลงตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งก็จะส่งผลต่อตัวแปรอื่นๆ รวมไปถึงราคาค่าวัสดุก่อสร้างรวมด้วย เช่น การเพิ่มระยะห่างของเสาเข็มก็จะทำให้ให้ใช้จำนวนเสาเข็มน้อยลง แต่เสาเข็มแต่ละต้นจะรับน้ำหนักมากขึ้น ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเสาเข็มที่ต้องการมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อปริมาณเหล็กเสริมในพื้น เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างของเสาเข็ม เป็นการเพิ่มระยะช่วงคานของพื้น ทำให้ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในพื้นมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ปริมาณเหล็กเสริมมากขึ้นตามไปด้วย รวมไปถึงแรงเฉือนในพื้น เมื่อระยะช่วงคานมากขึ้นก็จะเกิดหน่วยแรงเฉือนแบบคาน (Beam Shear) และ แรงเฉือนทะลุ (Punching Shear) ในพื้นมากขึ้น ทำให้อาจจะต้องเพิ่มความหนาของพื้นเพื่อให้หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่เกินหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของแผ่นพื้น เป็นต้น ซึ่งตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ ล้วนส่งผลต่อราคาวัสดุก่อสร้างรวมของทั้งโครงการทั้งสิ้น

#### 2. การคำนวณกำลังรับแรงของเสาเข็ม

สำหรับเสาเข็มต้นเดียว กำลังรับแรงของเสาเข็มขึ้นกับแรงเสียดทานที่บริเวณผิวของเสาเข็ม (Skin Friction) และ กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) โดยสำหรับดินกรุงเทพฯ กำลังรับแรงของเสาเข็มส่วนมากจะมาจากแรงเสียดทานที่บริเวณผิวเสาเข็ม เนื่องจากดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวอ่อน กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็มจึงมีค่าน้อย กำลังรับแรงของเสาเข็มจะมีตัวแปรและสูตรที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของดิน ตามงานวิจัย A Review on Design of Pile Foundations in Bangkok [2]

### 2.1 กำลังรับแรงของเสาเข็มที่ยอมให้

$$F_{allow} = \frac{(F_s + F_e)}{FS} - W_p \quad (1)$$

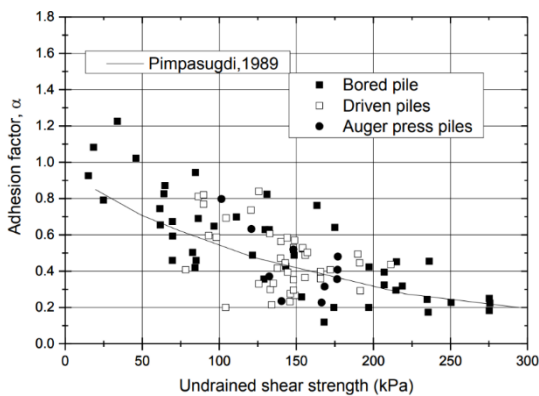
เมื่อ  $F_s$  คือ กำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม,  $F_e$  คือกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็ม,  $W_p$  คือน้ำหนักของเสาเข็ม และ  $FS$  คืออัตราส่วนความปลอดภัยควรใช้ค่าไม่ต่ำกว่า 2

### 2.2 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

สามารถหาได้จากค่า Undrained Shear Strength ดังสมการที่ 2

$$f_s = \alpha S_u \quad (2)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ adhesion factor,  $S_u$  คือ Undrained Shear Strength โดยที่ค่า  $\alpha$  สามารถหาได้จากสมการที่ 3 ที่ได้จากการ Fit Curve กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor ( $\alpha$ ) และ Undrained Shear Strength ( $S_u$ ) (Pimpasugdi, 1989) [3]

$$\alpha = -0.3904 + \left( \frac{1.3872}{1 + \left( \frac{S_u}{212.692} \right)^{0.924}} \right) \quad (3)$$

### 2.3 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินทราย

$$f_s = K_s \cdot R \tan(\phi') \cdot \sigma_v' \quad (4)$$

เมื่อ  $K_s = 1 - \sin \phi'$ ,  $\sigma_v'$  คือ Effective Overburden Pressure และ  $R$  คือ Reduction Ratio สามารถหาค่าได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Reduction Ratio ของชั้นดินทรายกรุงเทพฯ

Type	All sands	SM	SC
All types	0.88	0.92	0.59
Polymer	1.00	1.01	0.73
Bentonite	0.68	0.72	0.56

### 2.4 หน่วยแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

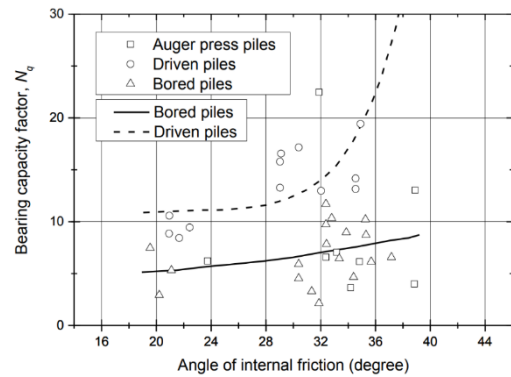
สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5 โดยควรใช้หน่วยแรงแบกทานสูงสุดไม่เกิน 12 MPa เพื่อความปลอดภัย

$$q_e = 9S_u \leq 12MPa \quad (5)$$

### 2.5 หน่วยแรงแบกทานของเสาเข็มในชั้นดินทราย

$$q_e = \sigma_v' N_q \leq 12MPa \quad (6)$$

เมื่อ  $N_q$  คือ Bearing Capacity Factor สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 7 ที่ได้จากการ Fit Curve กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frictional Angle ( $\phi$ ) และ Bearing Capacity Factor ( $N_q$ ) ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

(After Sambhandharaksa, 1989) [4]

$$N_q = 9.6389 - \left( \frac{4.6841}{1 + \left( \frac{\phi}{33.1086} \right)^{5.2491}} \right) \quad (7)$$

### 3. การออกแบบแผ่นพื้น

ในการออกแบบแผ่นพื้นโดยใช้วิธี ACI318-14 : Direct Design Method ได้มีการกำหนดความหนาพื้นขั้นต่ำเพื่อรองรับ Service Condition ไม่ให้มีการแอ่นตัวของพื้นเกินกำหนด ทั้งนี้ผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ความหนาดังกล่าวนี้ได้ แต่ต้องมีการตรวจสอบการแอ่นตัวไม่ให้เกินค่าที่ยอมรับได้ ความหนาของพื้นขั้นต่ำสำหรับแผ่นพื้นประเภทไม่มีแบนหัวเสา (Drop panel) ได้มีการกำหนดไว้เป็นอัตราส่วนซึ่งขึ้นกับค่า Yield Stress ของเหล็กดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาขั้นต่ำสำหรับแผ่นพื้น

Without drop panel			
$\geq 12.5\text{cm}$			
Yield Stress	Exterior panel		Interior panel
	Without edge beams	With edge beams	
2800	$l_n / 33$	$l_n / 36$	$l_n / 36$
4200	$l_n / 30$	$l_n / 33$	$l_n / 33$

### 3.1 ข้อจำกัดในการใช้งานวิธี Direct Design Method

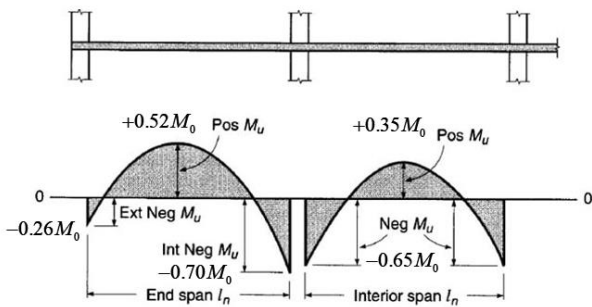
1. แผ่นพื้นในแต่ละทิศทางต้องมีความต่อเนื่องกันอย่างน้อย 3 ช่วง
2. แผ่นพื้นต้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นไม่เกิน 2 (Two-Way Slab)
3. ความยาว Span ในช่วงที่ติดกันห่างกันได้ไม่เกิน 33% ของความยาวช่วงที่ยาวกว่า
4. ตำแหน่งศูนย์กลางของเสาในแนวเดียวกันเยื้องกันได้ไม่เกิน 10% ของความยาวช่วง
5. แผ่นพื้นต้องรับน้ำหนักบรรทุกจรไม่เกิน 3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่
6. ต้องมีระยะ Clear Span มากกว่า 65% ของระยะ Span

### 3.2 การกระจายโมเมนต์เข้าสู่ Design Strip

สำหรับวิธี Direct Design Method จะกำหนดให้ใช้ค่าโมเมนต์กึ่งกลางช่วงในการคูณค่าสัมประสิทธิ์เพื่อกระจายโมเมนต์เข้าไปที่ช่วงพื้น โดยโมเมนต์กึ่งกลางช่วง สามารถหาได้จากสมการที่ 8

$$M_0 = \frac{w_u l_2' l_n^2}{8} \quad (8)$$

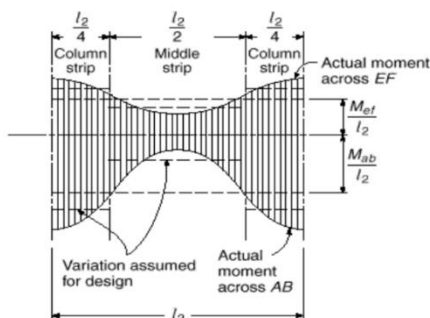
- เมื่อ  $l_2'$  คือ ความกว้างของ Design Strip  
 $l_n$  คือ ความยาวช่วง Clear Span  
 $w_u$  คือ Factored Load ที่กระทำต่อโครงสร้าง



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์การกระจายโมเมนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ [5]

### 3.3 การกระจายโมเมนต์เข้าสู่ Column Strip และ Middle Strip

เนื่องจากใน Column Strip เป็นบริเวณที่มีเสาคือเป็นจุดรองรับ ทำให้การกระจายตัวของโมเมนต์ใน Design Strip ไม่ได้กระจายสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด แต่จะมีการถ่ายโมเมนต์เข้าบริเวณ Column Strip มากกว่า Middle Strip ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกระจายตัวของโมเมนต์ในแถบกลางและแถบเสา

การกระจายตัวของโมเมนต์เข้าสู่ Column Strip สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3 สำหรับแผ่นพื้นที่ไม่มีความภายในพิจารณากรณี  $\alpha = 0$  และแผ่นพื้นที่ไม่มีความขอบพิจารณากรณี  $\beta_t = 0$

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์การกระจายโมเมนต์เข้าสู่ Column Strip

	$l_2/l_1$		
	0.5	1.0	2.0
Interior negative moment $\alpha_{f1} l_2/l_1 = 0$ $\alpha_{f1} l_2/l_1 \geq 1$	75	75	75
	90	75	45
Exterior negative moment $\alpha_{f1} l_2/l_1 = 0$ $\alpha_{f1} l_2/l_1 \geq 1$	$\beta_t = 0$ 100	$\beta_t = 0$ 100	$\beta_t = 0$ 100
	$\beta_t \geq 2.5$ 75	$\beta_t \geq 2.5$ 75	$\beta_t \geq 2.5$ 75
Positive moment $\alpha_{f1} l_2/l_1 = 0$ $\alpha_{f1} l_2/l_1 \geq 1$	$\beta_t = 0$ 100	$\beta_t = 0$ 100	$\beta_t = 0$ 100
	$\beta_t \geq 2.5$ 90	$\beta_t \geq 2.5$ 75	$\beta_t \geq 2.5$ 45

### 3.4 การออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ในแผ่นพื้น

ค่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จะถูกนำมาออกแบบเพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ โดยใช้สมการที่ 9-11

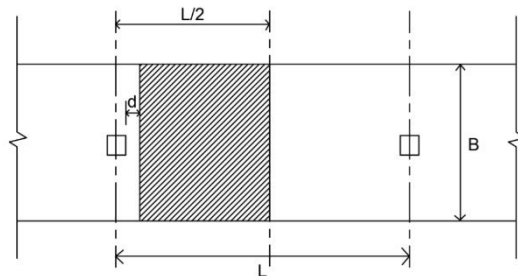
$$A_{s,req} = \rho b d \quad (9)$$

$$\rho = \frac{0.85 f_c'}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2M_u}{0.85 \phi f_c' b d^2}} \right) \quad (10)$$

$$\rho_{min} = \max \left\{ \frac{0.25 \sqrt{f_c'}}{f_y}, \frac{1.4}{f_y} \right\} \quad (11)$$

- เมื่อ  $A_{s,req}$  คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ต้องการเพื่อรับโมเมนต์  
 $\rho$  คือ อัตราส่วนเหล็กเสริม  
 $\rho_{min}$  คือ อัตราส่วนเหล็กเสริมขั้นต่ำ ( $\rho \geq \rho_{min}$ )  
 $\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลัง ใช้ค่า = 0.9  
 $b$  คือ ความกว้างของหน้าตัดออกแบบ  
 $d$  คือ Effective Depth ของหน้าตัดออกแบบ

### 3.5 การออกแบบรับแรงเฉือนแบบคาน



รูปที่ 5 พื้นที่รับแรงที่ทำให้เกิดแรงเฉือนแบบคาน

พิจารณาจากรูปที่ 5 Beam Shear ที่เกิดขึ้นจะมีหน้าตัดวิกฤติที่ระยะ Effective Depth (d) จากผิวของเสา จึงสามารถคำนวณหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดได้จากสมการที่ 12 โดยที่ค่า C คือ ขนาดของเสาในทิศทางเดียวกับความยาวช่วงคาน (L)

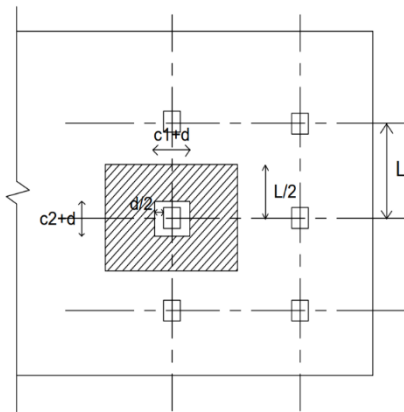
$$v_u = \frac{w_u B \left( \frac{L}{2} - \frac{c}{2} - d \right)}{B d} \quad (12)$$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของแรงเฉือนแบบคานสามารถหาได้จากสมการที่ 13

$$\phi v_c = 0.85 \cdot 0.53 \sqrt{f_c'} \geq v_u \quad (13)$$

### 3.6 การออกแบบรับแรงเฉือนทะลุ

เป็นแรงเฉือน 2 แกน (Two-Way Shear) จะเกิดขึ้นบริเวณรอบหัวเสา โดยจะมีหน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ระยะ  $d/2$  จากผิวของเสา พื้นที่รับแรง  $w_u$  ที่ทำให้เกิด Punching Shear เป็นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 พื้นที่รับ  $w_u$  ที่ทำให้เกิด Punching Shear

จากรูปที่ 6 สามารถคำนวณหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดได้ดังสมการที่ 13

$$v_u = \frac{w_u [L_1 L_2 - (c_1 + d)(c_2 + d)]}{b_0 d} \quad (13)$$

เมื่อ  $b_0 = 2(c_1 + d + c_2 + d)$

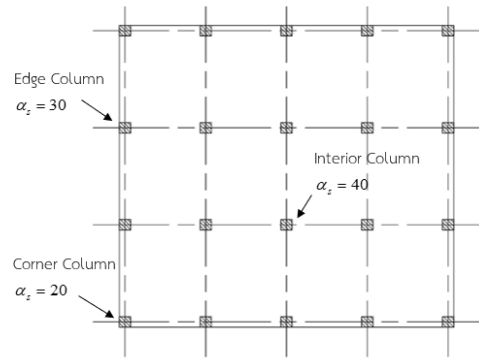
หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของ Punching Shear สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14-16 โดยให้เลือกใช้ค่าที่น้อยที่สุดใน 3 สมการ

$$\phi v_c = 0.85 \cdot 1.06 \sqrt{f_c'}$$

$$\phi v_c = 0.85 \cdot \left( 0.53 + \frac{1.06}{\beta_c} \right) \sqrt{f_c'}$$

$$\phi v_c = 0.85 \cdot \left( 0.53 + \frac{0.265 \alpha_s d}{b_0} \right) \sqrt{f_c'}$$

เมื่อ  $\beta_c$  คืออัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของหน้าตัดเสา  $\alpha_s$  คือ ค่าตัวประกอบแรงเฉือนทะลุ ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของเสา ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่า  $\alpha_s$  ของเสาที่ตำแหน่งต่างๆ

## 4. การ Optimization

### 4.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ, ตัวแปรนำเข้า, ข้อจำกัดของตัวแปรและฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4 ตัวแปรออกแบบ

Design Variable			
Variable	LB	UB	Remark
x1	1.05	Bx/3	ระยะห่างเสาเข็มในแนวแกน x
x2	1.05	By/3	ระยะห่างเสาเข็มในแนวแกน y
x3	0.125	0.6	ความหนาของแผ่นพื้น
x4	0.35	1.5	เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
x5	0	60	ความยาวของเสาเข็ม

การกำหนดขอบเขต (Boundary) ของตัวแปรที่ใช้ออกแบบต้องพิจารณาตามความเหมาะสม ไม่ควรมากเกินไปหรือน้อยเกินไป เพราะการกำหนดขอบเขตจะส่งผลถึงคำตอบที่ได้ โดยสำหรับปัญหานี้พจน์นี้มีหลักการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบดังนี้

1.ระยะห่างของเสาเข็มในแนวแกน X และ Y ( $S_x, S_y$ ) พิจารณาค่าขอบเขตล่างจาก ระยะห่างของเสาเข็มไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม เพื่อป้องกันผลที่เกิดจาก Stress bulb ที่อาจจะซ้อนทับกันและทำให้กำลังของดินต่ำกว่าที่ออกแบบ และพิจารณาขอบเขตบนจากความยาวของพื้นที่ในแต่ละแนวหารด้วย 3 เนื่องจากข้อกำหนดของ ACI สำหรับการใช้วิธี Direct Method ในการออกแบบแผ่นพื้น สามารถใช้ได้ในกรณีแผ่นพื้นมีความยาวช่วงต่อเนื่อง (Continuous Span) ตั้งแต่ 3 ช่วงขึ้นไป

2.ความหนาของแผ่นพื้น ( $t$ ) พิจารณาขอบเขตล่างจากตารางที่ 2 ซึ่งกำหนดความหนาของพื้นขั้นต่ำไว้ที่ 12.5 cm และพิจารณาขอบเขตบนจากความเป็นไปได้ในการก่อสร้างจริง

3.เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ( $D$ ) พิจารณาจากขนาดของเสาเข็มจริงในท้องตลาด

4.ความยาวของเสาเข็ม ( $L$ ) พิจารณาให้อยู่ในช่วง Soil Profile ที่มีข้อมูล

ตารางที่ 5 ตัวแปรนำเข้า

Input Variable		
Variable	Symbol	Unit
ความยาวของพื้นที่ที่ออกแบบในแนวแกน x	Bx	m
ความยาวของพื้นที่ที่ออกแบบในแนวแกน y	By	m
น้ำหนักบรรทุกจร	LL	Kg/m <sup>2</sup>
ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	$f_c'$	Ksc
ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก	$f_y$	Ksc
ค่า Load Factor สำหรับออกแบบ	DL Factor, LL Factor	-
ระยะหุ้มของเหล็กเสริม	Covering	m
ขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้	DB	mm
อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับเสาเข็ม	FS	-
ราคาเหล็กเสริมต่อหน่วยน้ำหนัก	-	Baht/kg
ราคาคอนกรีตต่อหน่วยปริมาตร	-	Baht/m <sup>3</sup>
ค่าพารามิเตอร์ของชั้นดิน	-	-

ตารางที่ 6 ข้อจำกัดของตัวแปรในการ Optimization

ข้อจำกัดของตัวแปร (Constraint)		
No	Constraint	Remark
Cons 1	$C_1 = v_{u1} - \phi v_{c1} \leq 0$	Beam Shear (Interior Strip X-Direction)
Cons 2	$C_2 = v_{u2} - \phi v_{c2} \leq 0$	Beam Shear (Interior Strip Y-Direction)
Cons 3	$C_3 = v_{u3} - \phi v_{c3} \leq 0$	Beam Shear (Exterior Strip X-Direction)
Cons 4	$C_4 = v_{u4} - \phi v_{c4} \leq 0$	Beam Shear (Exterior Strip Y-Direction)
Cons 5	$C_5 = v_{u5} - \phi v_{c5} \leq 0$	Punching Shear
Cons 6	$Loadperpile - F_{allow} \leq 0$	ตรวจสอบกำลังรับแรงของเสาเข็ม
Cons 7	$F_{allow} - F_{allowcon} \leq 0$	ตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสาเข็ม
Cons 8	$3D - S_x \leq 0$	ระยะห่างเสาเข็มมากกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
Cons 9	$3D - S_y \leq 0$	ระยะห่างเสาเข็มมากกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
Cons 10	$\frac{\min(S_x, S_y)}{30} - t \leq 0$	ความหนาของพื้นขั้นต่ำของ ACI318
Cons 11	$\left[ 1 - \frac{2M_u}{0.85 \cdot 0.9 \cdot f_c' \cdot b d^2} \right] \geq 0$	ตรวจสอบค่าโมเมนต์ในสควอร์รูทห้ามติดลบ

#### 4.2 การเลือกตัวอย่างในการออกแบบ

การเลือกตัวอย่างชั้นดินและปัญหาในการ Optimization ในงานวิจัยนี้จะเลือกทั้งหมด 3 ตัวอย่างชั้นดิน และเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของแผ่นพื้นให้มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า รวมไปถึง Live Load ที่ใช้ในการออกแบบ เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมคำนวณที่เขียนใน Excel ทำให้สามารถใส่ค่าชั้นดินได้มากที่สุดเพียง 5 ชั้น จึงทำให้ต้องมีการปรับค่าชั้นดิน โดยรวมชั้นดินบางชั้นเข้าด้วยกัน นำค่าพารามิเตอร์มาเฉลี่ยตามความหนาของชั้นจะได้ดิน 3 ประเภทที่มีความแข็งต่างกัน คือ S3 มีความแข็งมากที่สุด ถัดมาคือ S2 และ S1 มีความแข็งลดลงมาตามลำดับตามลำดับ

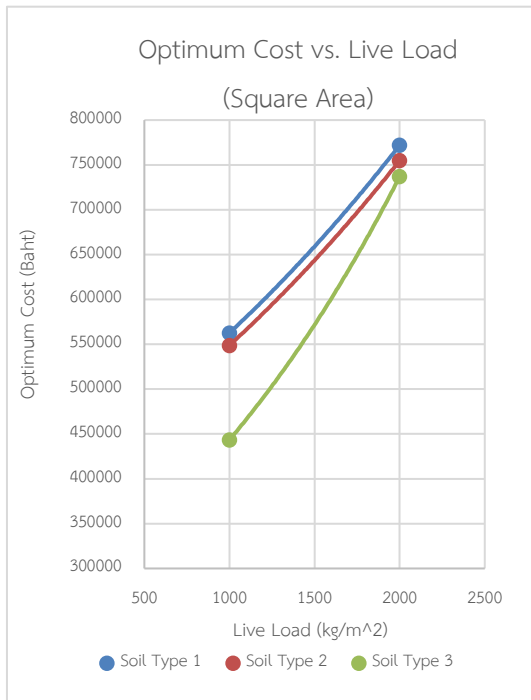
ตารางที่ 7 ตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา

No	Area Type	Bx (m)	By (m)	Soil Type	Live Load	$f_y$	$f_c'$	FS
1	Square	20	20	S1	1000	3900	240	3
2					2000			
3				S2	1000			
4					2000			
5				S3	1000			
6					2000			
7	Rectangular	25	16	S1	1000			
8					2000			
9				S2	1000			
10					2000			
11				S3	1000			
12					2000			

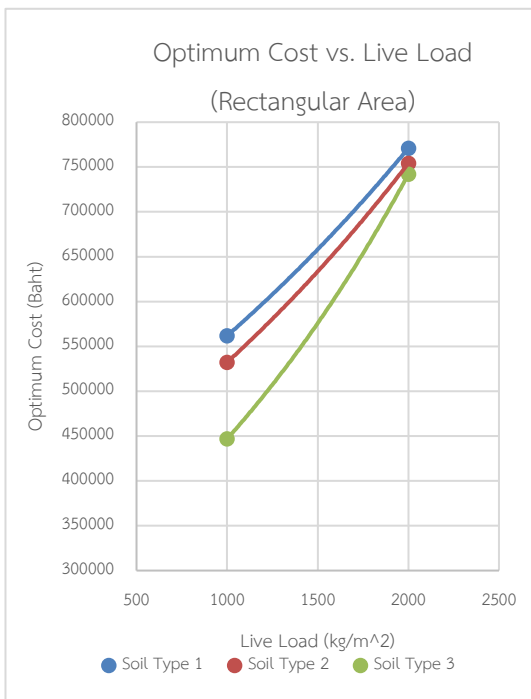
#### 4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการ Optimization

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการ Optimization จะทำโดยการรันแต่ละ Algorithm ทั้งหมด 100 ครั้งโดยใช้ค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันทั้งหมด 100 ค่า โดยจะต้องมีการตรวจสอบว่าค่าที่รันได้ผ่านข้อกำหนดของตัวแปร (Constraint) หรือไม่ ซึ่งถ้าเขียนโค้ดได้ถูกต้อง Constraint ของคำตอบจะผ่านทุกค่า หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่าง Algorithm ว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันมากเพียงใด โดยมีการจัดทำกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละ Algorithm

## 5. สรุปผลการวิจัย

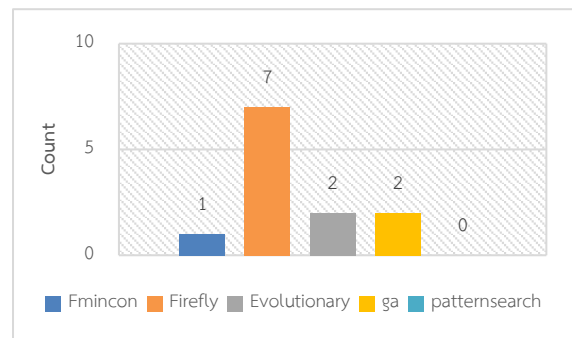


รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างราคาที่เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุก โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ชั้นดินทั้งหมด 3 แบบ สำหรับพื้นที่แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



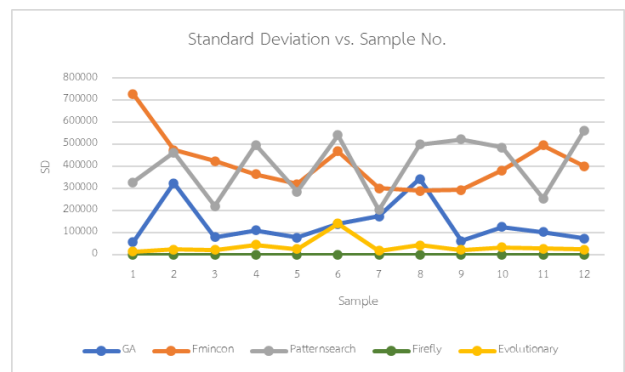
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างราคาที่เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุก โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ชั้นดินทั้งหมด 3 แบบ สำหรับพื้นที่แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบที่ประหยัดที่สุดของโครงสร้างแผ่นพื้นวางบนเสาเข็ม โดยมีตัวแปรที่ออกแบบคือ ระยะห่างของเสาเข็มในแนวแกน X และ Y, ความหนาของพื้น, เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มและความยาวของเสาเข็ม นำตัวแปรทั้งหมดนี้มาคำนวณหาราคาวัสดุก่อสร้างที่ต่ำที่สุดผ่าน 2 โปรแกรม 5 อัลกอริทึม ได้แก่ โปรแกรม Excel: Evolutionary และ โปรแกรม MATLAB: Genetic Algorithm, Fmincon, Patternsearch และ Firefly ทดลองออกแบบทั้งหมด 12 ตัวอย่างโดยใช้แต่ละอัลกอริทึมและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันได้ผลคือ อัลกอริทึม Firefly ได้ผลค่า Minimum มากที่สุดทั้งหมด 7 ตัวอย่าง รองลงมาคืออัลกอริทึม Evolutionary และ Genetic Algorithm ได้ค่า Minimum ที่ 2 ตัวอย่าง อัลกอริทึม Fmincon 1 ตัวอย่าง และอัลกอริทึม Patternsearch 0 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟจำนวนตัวอย่างที่แต่ละอัลกอริทึมได้ค่า Minimum

ผลการวิจัยพบว่าแต่ละอัลกอริทึมจะมีความแปรปรวนของข้อมูลไม่เท่ากัน โดยที่อัลกอริทึม Fmincon มีความแปรปรวนสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย SD = 412021, Patternsearch, GA, Evolutionary, Firefly มีค่าเฉลี่ย SD = 405660, 139356.4, 36829.26 และ 6.87E-10 ตามลำดับ



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่า Standard Deviation ของอัลกอริทึม ที่ sample ต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการออกแบบของตัวอย่างทั้ง 12 ตัวอย่างพบว่าทั้ง 12 ตัวอย่างมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ได้จากการ Optimization = 0.35 เมตร ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่ขอบเขตล่าง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าสำหรับการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็ม มีตัวแปรเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ส่งผลกระทบต่อค่าวัสดุก่อสร้างรวมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลโดยแบ่งประเภทตามประเภทของพื้นที่ คือ สี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบจะมีราคาวัสดุก่อสร้างรวมทั้งสูงขึ้นและเมื่อเปลี่ยนชั้นดินเป็นชั้นดินที่อ่อนกว่าจะทำให้ราคาวัสดุก่อสร้างรวมสูงขึ้น

ดังรูปที่ 8 และ 9 ซึ่งสอดคล้องกับหลักความเป็นจริงว่าหากมีน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นหรือดินที่รองรับมีกำลังน้อยก็ควรใช้โครงสร้างที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น และมีราคาที่เหมาะสม

นอกจากนี้ผลการวิจัยยังพบว่าหากออกแบบตามหลักความปลอดภัยเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงราคาวัสดุก่อสร้างรวม อาจทำให้มีราคาวัสดุก่อสร้างรวมที่สูงกว่าการออกแบบโดยคำนึงถึงต้นทุนและความปลอดภัย ได้ถึง 3-4 เท่า ดังนั้นการออกแบบที่ดีจึงควรคำนึงถึงปัจจัยทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้ออกแบบได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาไปประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

1. ผู้ที่สนใจสามารถนำโค้ดโปรแกรม MATLAB หรือโปรแกรม Excel ไปใช้ประกอบในการออกแบบให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็ม ให้ออกแบบได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ผู้ที่สนใจสามารถนำโค้ดและอัลกอริทึมต่างๆ ไปพัฒนาประยุกต์ใช้กับงานออกแบบด้านอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำลงและมีโอกาสได้งานมากขึ้น

ทั้งนี้อัลกอริทึมต่างๆ มีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การนำอัลกอริทึมอันใดอันหนึ่งไปใช้ จึงควรศึกษาถึงข้อจำกัดและการใช้งานของอัลกอริทึมนั้นอย่างถี่ถ้วนก่อน จึงจะสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้องและเต็มประสิทธิภาพ

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบที่ประหยัดที่สุดของโครงสร้างแผ่นพื้นบนเสาเข็ม สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทางและแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย รวมถึงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิทรากร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยเป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง

[1] American Concrete Institute. (1822). ACI 318-

14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary Paperback.

[2] T. Boonyatee, J. Tongjarukae, T. Uaworakunchai and B. Ukritchon. (2015). A review on design of pile foundation in Bangkok. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 46.

[3] Pimpasugdi, S. (1989) "Performance of bored, driven and auger press piles in Bangkok subsoil", Master thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.

[4] Sambhandharaksa, S. (1989) "Recent Piling Practice in Bangkok Plain", Proceedings of the Seminar on Engineering for Coastal Development, Bangkok, Vol. 4, pp 5-105 to 5-118.

[5] Madeh Izat Hamakareem. Two Way Slab Design by Direct Design Method as per ACI 318-11. Retrieved 28 April, from <https://theconstructor.org/structural-engg/two-way-slab-design-direct-design-method-aci-318/14444>

[6] Boonchai Ukritchon, Suraparb Keawsawasvong. (2016). A practical method for the optimal design of continuous footing using ant-colony optimization. Acta Geotechnica Slovenica, 2016/2, 45-55.

[7] Iztok Fister, Iztok Fister Jr., Xin-She Yang, Janez Brest. (2013). A comprehensive review of firefly algorithms. Swarm and Evolutionary Computation 13 (2013) 34–46

[8] Saribas, A., Erbatur, F. (1996). Optimization and sensitivity of retaining structures. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 122, 8, 649-656.

[9] Sira Ekabut. (2020). สอนใช้ Excel Solver เพื่อช่วย Optimize และตัดสินใจเชิงธุรกิจ. Retrieved May 5, from <https://www.thepexcel.com/solver-optimize-business/>

[10] Xin-She Yang and Kingshi He, (2013). 'Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications', Int. J. Swarm Intelligence, Vol. 1, No. 1, pp. 36–50. DOI: 10.1504/IJSI.2013.055801

[11] Yong Ma. (2010). Schematic of the local-minima problem in FWI. Retrieved April 20, from [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-local-minima-problem-in-FWI-The-data-misfit-has-spurious-local-minima\\_fig1\\_267820876](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-local-minima-problem-in-FWI-The-data-misfit-has-spurious-local-minima_fig1_267820876)

[12] ยอดพล ผลสงเคราะห์. (2555). A study to determine optimal thicknesses for reinforced concrete flat slab with 3d plate finite element method using csi safe program, Retrieved May 2, from <http://dspace.spu.ac.th/bitstream/123456789/4405/1/Yod%20Complete%20Thesis%20Final.pdf>

[13] เอกราช ประกอบกิจ. (2558). การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อยในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.