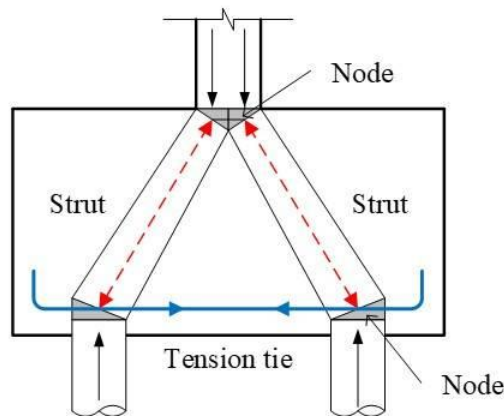
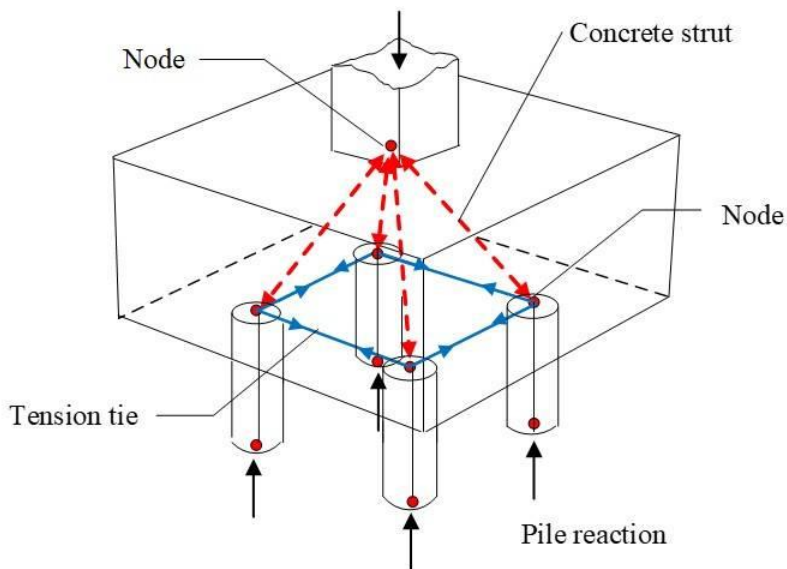


การออกแบบฐานรากบนเสาเข็มมีความปลอดภัยเพียงไร

HOW SAFE IS THE DESIGN OF PILE CAPS

รองศาสตราจารย์ ดร.ปณัสนัยชัย เชษฐโชติศักดิ์^๑

^๑สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ความเชี่ยวชาญ : วิศวกรรมโครงสร้าง, คอนกรีตเสริมเหล็ก



1. บทนำ

ฐานรากบนเสาเข็ม (รูปที่ 1) เป็นองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากเสาต่อม่อลงสู่ กลุ่มของเสาเข็ม การออกแบบฐานรากบนเสาเข็มตามข้อกำหนดของ ACI นั้นมีหลักการคล้ายกับการออกแบบฐานราก วางบนดิน กล่าวคือมีการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนทางเดียว แรงเฉือนสองทาง และค่านวมโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งวิกฤตเหมือนกัน เพียงแต่ต่างกันตรงที่ การออกแบบฐานรากบนเสาเข็มนั้นสมมุติว่า เสาเข็มส่งถ่ายแรงปฏิกิริยาเข้าสู่ฐานรากแบบเป็นแรงกระทำแบบจุด ในขณะที่ฐานรากบนดินนั้นรับแรงปฏิกิริยาจากดินใต้ฐานรากแบบน้ำหนักกระจาย หลักการนี้ ใช้กันมายาวนานจนปัจจุบันก็ยังคงใช้อยู่ อย่างไรก็ตาม มีหลักฐานทางวิชาการหลายชิ้น [1–4] ที่แสดงให้เห็นว่า การออกแบบฐานรากบนเสาเข็มนั้นอาจมีความไม่ปลอดภัยในบางกรณี และมีคำแนะนำให้ใช้แบบจำลอง แชนค้ำยันและแชนยึด (strut-and-tie model, STM) สำหรับการออกแบบของอาคารประเภทนี้ด้วย วิธี STM มีสมมุติฐานคือ กำหนดให้ฐานรากบนเสาเข็มถูกแทนที่ด้วยระบบโครงข้อมุมสามมิติ ประกอบไปด้วยแชนค้ำยันรับแรงอัด (strut) ซึ่งเทียบได้กับส่วนของคอนกรีตฐานราก และแชนยึดรับแรงดึง (tie) เทียบเท่ากับเหล็กเสริมเอกในฐานราก วิธีออกแบบนี้ ยังนำไปประยุกต์ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ที่มีช่วงสั้น ได้แก่ คานลิกและแป้นหูช้าง [5] ข้อต่อเสา-คาน [6] และกำแพงเตี้ยรับแรงเฉือน [7] เป็นต้น

ในบทความนี้ได้รวบรวมวิธีออกแบบฐานรากบนเสาเข็มได้แก่ 1) การออกแบบตามวิธีดั้งเดิมของ ACI 318-14 [8] 2) การออกแบบตาม BS 8110 [9] และ 3) การออกแบบด้วย STM จากนั้นประเมินความปลอดภัยของแต่ละวิธี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยของผู้เขียน [4]



รูปที่ 1 ฐานรากบนเสาเข็ม

2. วิธีการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม

2.1 การออกแบบตามวิธีดั้งเดิมของ ACI

ACI 318-14 [8] แบ่งประเภทการออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ การคำนวณเหล็กเสริมเอก และการตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนของฐานรากโดยใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับแผ่นพื้นและฐานรากวางบนดิน ส่วนการกำหนดจำนวนของเสาเข็มนั้น ให้คำนวณจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานที่กระทำกับฐานราก และ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของ เสาเข็มตามหลักกลศาสตร์ของดิน

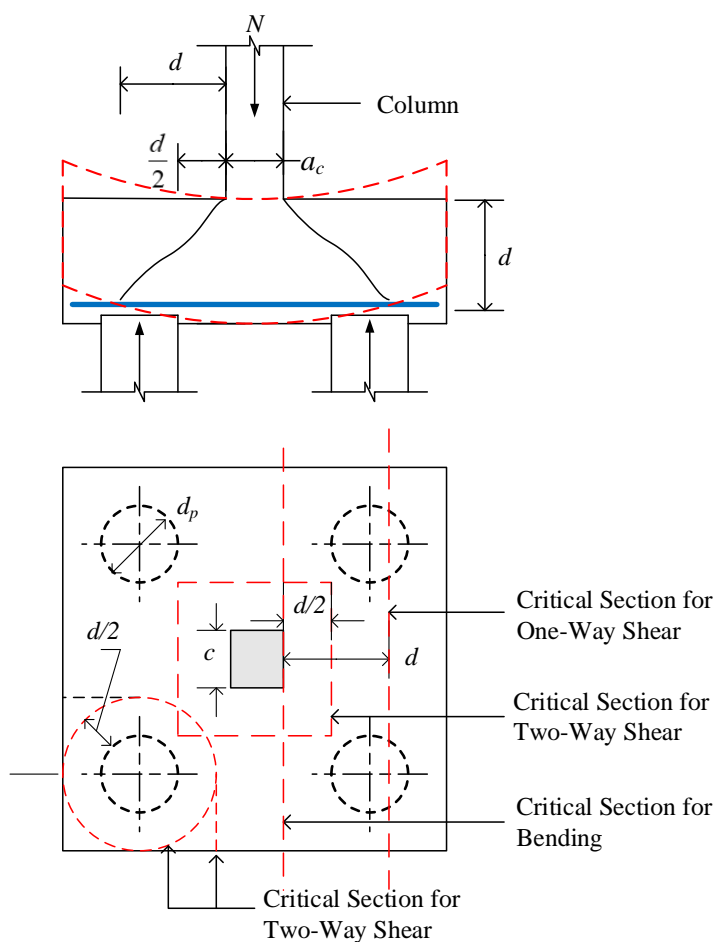
2.1.1 การคำนวณโมเมนต์ดัด

การคำนวณโมเมนต์ดัดในฐานรากมีสมมุติฐานคือกำหนดให้แรงปฏิกิริยาจากเสาเข็มกระทำที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเสาเข็ม และโมเมนต์ดัดประลัยสำหรับออกแบบฐานราก M_u นั้นคำนวณจาก ผลคูณระหว่างแรงปฏิกิริยาจากเสาเข็มกับระยะจากศูนย์ของเสาเข็มถึงตำแหน่งขอบเสาต่อม่อ โดยที่

$$M_u \leq \phi_f M_n$$

(1)

เมื่อ M_n คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของฐานราก และ ϕ_f คือตัวคูณลดกำลังสำหรับโมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.90 นอกจากนี้ เหล็กเสริมเอกรับแรงดัดในฐานรากจะต้องฝังด้วยความยาว ระยะฝังอย่างเพียงพอที่จะถ่ายแรงได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงยึดหน่วง



รูปที่ 2 หน้าตัดวิฤกฤตสำหรับการคำนวณแรงเฉือนตาม ACI 318-14

2.1.2 การคำนวณแรงเฉือน

สำหรับการตรวจสอบแรงเฉือนตาม ACI 318-14 [8] แบ่งย่อยได้อีก 2 ส่วน คือ การตรวจสอบแรงเฉือนทางเดียวตาม **สมการที่ 2** แรงเฉือนเจาะทะลุรอบเสาต่อม่อ และ เสาเข็มตาม **สมการที่ 3** โดยพิจารณาหน้าตัดวิฤกฤต ตามรูปที่ 2

$$V_u \leq \phi_v V_c = \phi_v \min \left(0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho \frac{V_u d}{M_u}, 0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho, 0.29\lambda\sqrt{f'_c} \right) b_f d \quad (2)$$

$$V_u \leq \phi_v V_c = \phi_v \min \left(0.33\lambda\sqrt{f'_c}, 0.17\lambda \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c}, 0.083\lambda \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \sqrt{f'_c} \right) b_o d \quad (3)$$

เมื่อ V_u คือ แรงเฉือนที่คูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุก V_c คือกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีต f'_c คือ กำลังของคอนกรีตทรงกระบอก หน่วยเป็นเมกะพาสคัล (MPa) λ คือตัวคูณสำหรับสะท้อนการลดสมบัติของคอนกรีตมวลเบา (สำหรับคอนกรีตมวลเบา $\lambda = 0.75$ สำหรับคอนกรีตปกติ $\lambda = 1.0$) ρ คือ ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัด α_s คือค่าคงที่ 40 30 20 สำหรับเสาภายใน เสาต้นริม และเสาต้นมุม ตามลำดับ β_c คืออัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างของหน้าตัดเสา b_f คือ ความกว้างของฐานราก d คือ ความลึกประสิทธิผลของฐานราก b_o คือความยาวเส้นรอบรูปของเสาตอม่อ หรือเสาเข็ม ในแต่ละกรณี และ ϕ_v คือตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงเฉือนเท่ากับ 0.75

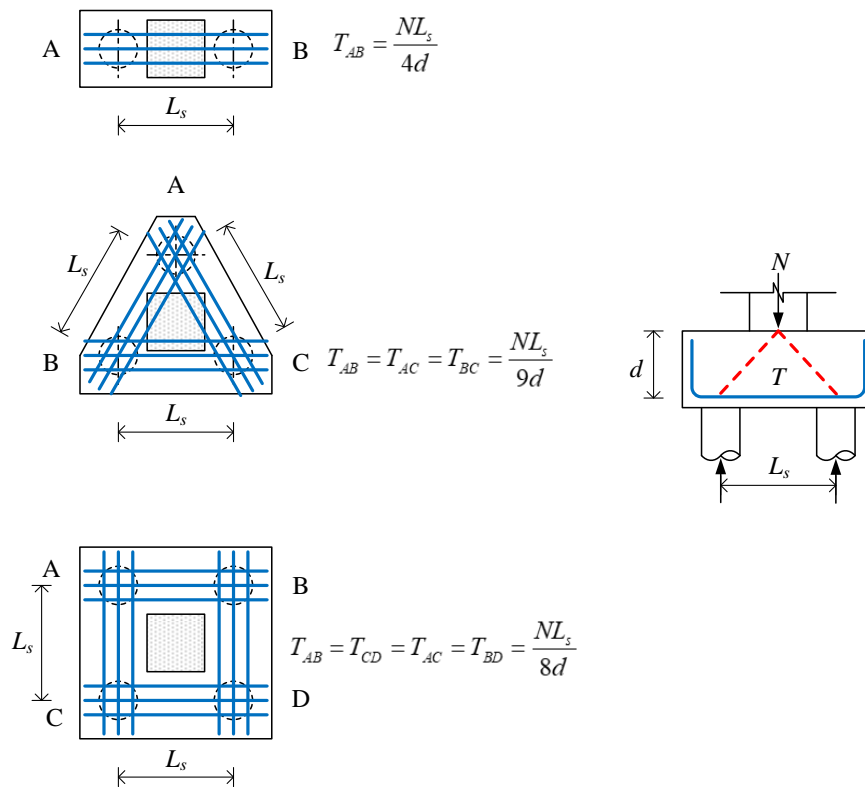
2.2 วิธีโครงข้อหมุนตาม BS 8110

การคำนวณออกแบบตาม BS 8110 [9] มีหลักการพื้นฐานคือ สมมุติให้ฐานรากถูกจำลองเป็นโครงข้อหมุนสามมิติ เช่นในกรณี ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น จำลองให้เป็นโครงข้อหมุนรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อจะถ่ายผ่านชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงดัดซึ่งเรียกว่า แขนค้ำยัน (strut) ส่วนล่างของโครงข้อหมุนจะเป็นชิ้นส่วนรับแรงดัดเรียกว่า แขนยึด (tie) ซึ่งจำลองมาจากเหล็กเสริมเอกของฐานราก จากหลักของสมดุล สามารถคำนวณปริมาณเหล็กเสริมเอกของฐานรากซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกประลัย N ได้ดังสมการที่ 4

$$A_{sd} = \frac{NL_s}{8d f_y / \gamma_m} \quad (4)$$

โดยที่ A_{sd} และ f_y คือ เนื้อที่หน้าตัดและกำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมเอกในทิศทางที่พิจารณาตามลำดับ γ_m คือ อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับวัสดุซึ่งในกรณีของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 1.05 L_s คือระยะห่างระหว่างเสาเข็มตามรูปที่ 3 ทั้งนี้ สำหรับฐานรากที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเกินกว่า 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ให้พิจารณาเหล็กเสริมที่กระจายอยู่ภายในระยะ 1.5 เท่าของ

เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มวัดจากศูนย์กลางเสาเข็ม เป็นแกนยึดในแบบจำลองโครงข้อหมุน ในรูปที่ 3 แสดงการคำนวณแรงดึงในแกนยึด T สำหรับฐานรากรูปแบบต่างๆ ดังนั้น สามารถคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัด ได้ คือ $A_{sd} = T / (f_y / \gamma_m)$

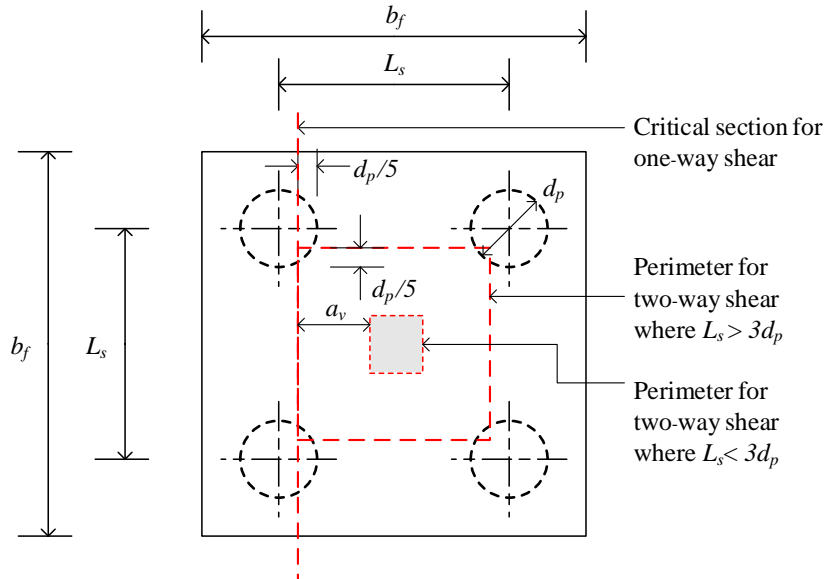


รูปที่ 3 วิธีโครงสร้างข้อหมุนตาม BS 8110

สำหรับการคำนวณออกแบบต้านทานแรงเฉือนตาม BS 8110 [9] จะมีแนวทางการตรวจสอบแรงเฉือนทางเดียวและแรงเฉือนสองทางเช่นเดียวกันกับวิธีดั้งเดิมของ ACI แต่ต่างกันรายละเอียด ดังสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับดังนี้

$$V \leq (0.79(100A_{sd}/b_v d)^{1/3} (400/d)^{1/4} (2d/a_v)(f_{cu}/25)^{1/3}) / \gamma_m b_v d \tag{5}$$

$$V \leq 0.8\sqrt{f_{cu}} b_o d \tag{6}$$



รูปที่ 4 หน้าตัดวิกฤตสำหรับการคำนวณแรงเฉือนตาม BS 8110

สมการที่ 5 มีขีดจำกัดคือ $f_{cu} \leq 40$ เมกะพาสคัล โดยที่ $(f_{cu}/25)^{1/3} \geq 1$ $100A_{sd}/b_v d \leq 3$ และ $(400/d)^{1/4} \leq 0.67$ โดยที่ f_{cu} คือกำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์หน่วยเป็น เมกะพาสคัล a_v คือระยะระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงของเสาตามรูปที่ 4 ทั้งนี้ สำหรับฐานรากที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม b_v ในสมการที่ 5 กำหนดให้มีค่าเท่ากับความกว้างของฐานราก b_f แต่ถ้าไม่ b_v จะมีค่าเท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม γ_m คือ อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับวัสดุคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.25 สำหรับสมการที่ 6 ค่าของพจน์ $0.8\sqrt{f_{cu}}$ จะต้องไม่เกินกว่า 5 เมกะพาสคัล และ b_o จะมีค่าเท่ากับความยาวเส้นรอบรูปของเสาตอม่อเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ถ้าไม่ b_o จะมีค่าตามเส้นรอบรูปหน้าตัดวิกฤตตามรูปที่ 4

2.3 แบบจำลองแขนค้ำยันและแขนยึด

นอกจากการออกแบบตามวิธีดั้งเดิมแล้ว มาตรฐาน ACI 318-14 [8] ยังได้กำหนดให้ใช้วิธี STM เป็นทางเลือกสำหรับฐานรากบนเสาเข็มอีกด้วย วิธีนี้มีรูปแบบคล้ายกันกับวิธีโครงข้อหมุนตาม BS 8110 [9] กล่าวคือ สมมุติให้ส่วนของคอนกรีตฐานรากถูกจำลองเป็นแขนค้ำยันคอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กเสริมเอกถูกจำลองเป็นแขนยึดรับแรงดึง แต่เพิ่มเติมจุดต่อ (node) เข้าไปในแบบจำลองด้วย

ซึ่งจุดต่อนั้นทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนในแบบจำลอง ตัวอย่าง STM สำหรับฐานรากบนเสาเข็ม 4 ต้น การคำนวณออกแบบด้วยวิธีนี้ จะต้องคำนึงถึงกำลังของชิ้นส่วนทั้ง 3 ประเภทด้วยคือ F_{us} แรงในแกนค้ำยันคอนกรีต F_{ut} แรงในแขนยึด และ F_{un} แรงในจุดต่อ ดังสมการที่ 7 ถึง 9 ตามลำดับ

$$F_{us} \leq \phi f_{ce} A_{str} \quad (7)$$

$$F_{ut} \leq \phi f_y A_{ts} \quad (8)$$

$$F_{un} \leq \phi f_{ce} A_{nz} \quad (9)$$

เมื่อ A_{str} คือพื้นที่หน้าตัดของแกนค้ำยันคอนกรีตซึ่งหาได้จากการพิจารณา ขนาดของจุดต่อ A_{ts} คือ เนื้อที่หน้าตัดของแขนยึด A_{nz} คือพื้นที่หน้าตัดของจุดต่อ f_y คือ กำลังดึงที่จุดครากของแขนยึด ซึ่งในที่นี้หมายถึงเหล็กเสริมเอกในฐานราก f_{ce} คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพของแกนค้ำยันคอนกรีต และจุดต่อ ดังสมการที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

$$f_{ce} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (10)$$

$$f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (11)$$

ในสมการที่ 10 $\beta_s = 0.60$ สำหรับกรณีของฐานรากบนเสาเข็มที่ไม่เสริมเหล็กปลอกเหมือนในคานได้ (กรณีฐานรากบนเสาเข็มตั้งแต่ 3 ต้นขึ้นไป) ทำให้แกนค้ำยันรับแรงอัดนั้นปราศจากเหล็กเสริม ส่วนในสมการที่ 11 $\beta_n = 1.0$ สำหรับกรณีจุดต่อแบบรับแรงอัดทั้งหมด (จุดต่อด้านบนของฐานราก) และ $\beta_n = 0.60$ สำหรับกรณีจุดต่อแบบมีแรงดึง 1 ทิศทาง (จุดต่อด้านล่างของฐานราก) A_{str} คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนค้ำยันโดยพิจารณาจากขนาดของจุดต่อด้านบนและด้านล่างตามรูปที่ 5 ดังสมการที่ 12

$$A_{str} = \min \left(\frac{\pi d_p}{4} (2(h-d) \cos \theta_s + d_p \sin \theta_s), \sqrt{2} c (h_c \cos \theta_s + c/\sqrt{2} \sin \theta_s) \right) \quad (12)$$

เมื่อ

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{jd}{a}$$

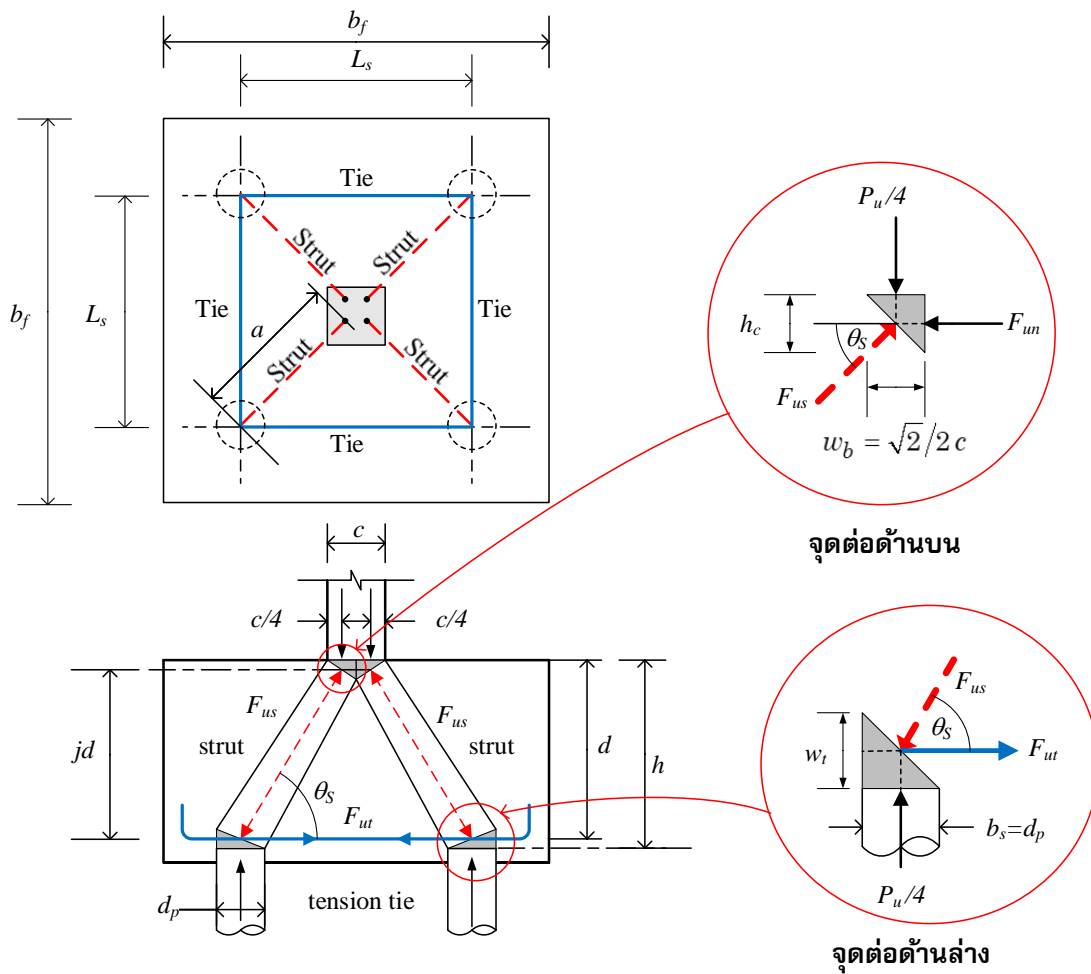
(13)

และ

$$jd = h - w_t/2 - h_c/2$$

(14)

โดยที่ h_c และ w_t คือความสูงของจุดต่อที่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับ ซึ่งหาได้จากกำลังของจุดต่อในสมการที่ 9 และ 11



รูปที่ 5 STM สำหรับฐานรากบนเสาเข็มตาม ACI 318-14

3. การวิเคราะห์ความปลอดภัย

ความน่าจะเป็นของการวิบัติของโครงสร้างใดๆ นั้นสามารถวัดได้ด้วย ดัชนีความปลอดภัย (safety index หรือ reliability index, β) ทั้งนี้ค่ามากของ β หมายถึง ระดับความปลอดภัยสูง ซึ่งในบทความนี้จะใช้ β สำหรับการวัดระดับความปลอดภัยของการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม ในที่นี้ ส่วนต่างของความปลอดภัย (g) ซึ่งพิจารณาจากผลต่างของความต้านทานของโครงสร้าง (R) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (D) และน้ำหนักบรรทุกจร (L) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g = R - D - L \quad (15)$$

โดยที่ตัวแปรทุกตัวในสมการที่ 15 ได้นำมาพิจารณาเป็นตัวแปรสุ่ม (random variable) กรณีที่ g มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าส่วนของโครงสร้างนั้นปลอดภัย ดังนั้นความน่าจะเป็นของการวิบัติของโครงสร้าง p_F สามารถนิยามได้ดังนี้

$$p_F = \text{Prob}(g < 0) \quad (16)$$

และ ดัชนีความปลอดภัย β สามารถเขียนในรูปแบบของความน่าจะเป็นของการวิบัติของโครงสร้าง p_F ได้ดังนี้

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_F) \quad (17)$$

เมื่อ Φ^{-1} คือส่วนผกผันของฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (inverse standard normal distribution function) สำหรับฟังก์ชันในสภาวะสุดขีดซึ่งมีพื้นฐาน สำหรับสมการออกแบบในรูปแบบสภาวะสุดขีดตามข้อกำหนดนานาชาติโดยทั่วไป จะต้องเป็นไปตาม

$$\phi R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n \quad (18)$$

โดยที่ ϕ , γ_D และ γ_L คือ ตัวคูณลดกำลัง ตัวคูณเพิ่มค่าสำหรับน้ำหนักคงที่ และน้ำหนักจร ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 1 ส่วน R_n , D_n และ L_n คือ ค่าที่ระบุของความต้านทานของโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุกคงที่ และ น้ำหนักบรรทุกจร ตามลำดับ ตัวแปรสุ่ม R ในสมการที่ 15 ได้พิจารณาความต้านทานระบุขององค์อาคาร R_n ร่วมกับความไม่แน่นอนจาก 3 ปัจจัย อันได้แก่ ความไม่แน่นอนจากกำลังวัสดุ ความไม่แน่นอนจากกระบวนการก่อสร้าง และ ความไม่แน่นอนจากวิธีการคำนวณออกแบบ ส่วน ตัวแปรสุ่ม D และ L ได้พิจารณาถึงความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ตามลำดับ จากนั้นใช้กระบวนการจำลองสถานการณ์ Monte Carlo simulations โดยใช้จำนวนตัวอย่างสุ่มทั้งสิ้น 100,000 ตัวอย่างสร้างตัวแปรสุ่มทั้งหมดในสมการที่ 15 และคำนวณความน่าจะเป็นในการวิบัติ และดัชนีความปลอดภัยตามสมการที่ 16 และ 17 ตามลำดับ รายละเอียดสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ใน Chetchotisak และ Teerawong [4] และ Nowak และ Collins [10]

4. ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัย

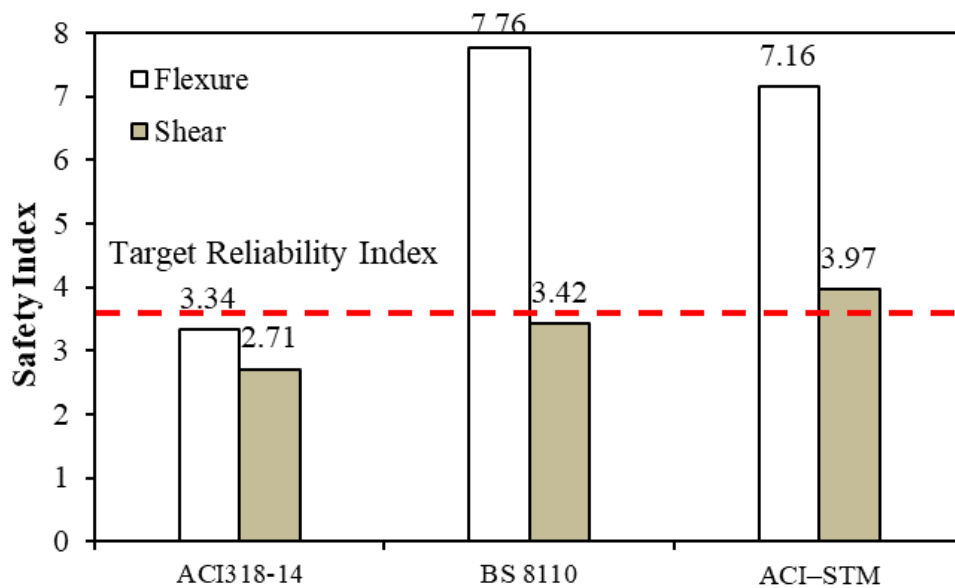
ในการประเมินจะใช้ดัชนีความปลอดภัยเป้าหมาย (target reliability index) ตาม Nowak และ Collins [6] เท่ากับ 3.5 ซึ่งเทียบเท่ากับความน่าจะเป็นในการวิบัติ $1/4350$ โดยมีระดับความปลอดภัยเพียงพอสำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงที่จะวิบัติจากแรงเฉือน ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยแสดงในรูปแบบของดัชนีความปลอดภัยซึ่งคำนวณจากตามสมการที่ 17 ได้ในรูปที่ 6 พบว่าการออกแบบต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนตามวิธีการดั้งเดิมของ ACI 318-14 [8] มีค่าดัชนีความปลอดภัย 3.34 และ 2.71 ตามลำดับ ในขณะที่ วิธีโครงข้อมุมตาม BS 8110 [9] และ แบบจำลอง STM ตาม ACI 318-14 [8] นั้นให้ค่าดัชนีความปลอดภัยที่มากกว่า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า วิธีการดั้งเดิมของ ACI 318-14 [8] มีระดับความปลอดภัยน้อยกว่าสองวิธีหลัง

ตารางที่ 1 ตัวคูณเพิ่มค่าน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณลดกำลัง

มาตรฐานการออกแบบ	ตัวคูณเพิ่มค่าน้ำหนักบรรทุก		ตัวคูณลดกำลัง	
	γ_D	γ_L	ϕ_f	ϕ_v
ACI 318-14	*1.2	1.6	0.90	0.75
BS 8110	1.4	1.6	**0.87	**0.80
ACI-STM	*1.2	1.6	0.75	0.75

*กรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำเพียงอย่างเดียว $\gamma_D = 1.4$

**สำหรับ BS 8110 จะใช้ γ_m เป็นอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับวัสดุ ซึ่งเทียบเท่าเป็นตัวคูณลดกำลังคือ $\phi = 1/\gamma_m$



รูปที่ 6 ดัชนีความปลอดภัยของการออกแบบฐานรากบนเสาเข็ม

ตารางที่ 2 แสดงค่าตัวคูณลดกำลังที่เสนอแนะ โดยการวิเคราะห์ครั้งใหม่ และกำหนดค่าดัชนีความปลอดภัยเป้าหมายเท่ากับ 3.5 พบว่าวิธีการดั้งเดิมของ ACI 318-14 [8] ควรจะปรับค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับการออกแบบต้านทานแรงดัดและแรงเฉือนเป็น 0.85 และ 0.60 ตามลำดับ สำหรับวิธีโครงสร้างหมุนตาม BS 8110 [9] และแบบจำลอง STM ตาม ACI 318-14 [8] ควรจะปรับปรับค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับการออกแบบต้านทานแรงดัดเป็น 1.00 ทั้งสองวิธี และสำหรับการออกแบบต้านทานแรงเฉือนควรจะปรับปรับค่าตัวคูณลดกำลังเป็น 0.75 และ 0.80 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตัวคูณลดกำลังที่นำเสนอ

มาตรฐานการออกแบบ	ตัวคูณลดกำลัง	
	ϕ_f	ϕ_v
ACI 318-14	0.85	0.60
BS 8110	1.00	0.75
ACI-STM	1.00	0.80

ในความเห็นของผู้เขียน แม้ว่าวิธี STM ของ ACI จะมีความสมเหตุผล และมีระดับความปลอดภัยที่ค่อนข้างสูง แต่มีความยุ่งยากในการสร้างรูปแบบทางเรขาคณิตอยู่พอสมควร อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบในเชิงปฏิบัติ และยังคงต้องการ การพัฒนาวิธีออกแบบให้เรียบง่ายกว่านี้ ส่วนวิธีโครงข้อหมุนตาม BS 8110 [9] นั้นมีความซับซ้อนน้อยกว่า กล่าวคือใช้แบบจำลองโครงข้อหมุนสำหรับการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมเอก และใช้การตรวจสอบแรงเฉือน ณ ตำแหน่งหน้าตัดวิกฤต คล้ายๆ กันกับวิธีดั้งเดิมของ ACI 318-14 [8] นอกจากนี้วิธีโครงข้อหมุนตาม BS 8110 [9] (**รูปที่ 3**) ยังสามารถประยุกต์ใช้กับฐานรากบนเสาเข็มหลายต้น ได้ง่ายกว่าวิธี STM ของ ACI 318-14 [8] ซึ่งรายละเอียดและตัวอย่างการคำนวณสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ใน Bhatt และคณะ [11]

เอกสารอ้างอิง

[1] Adebar, P., Kuchma, D., & Collins, M. P. (1990). Strut-and-tie models for the design of pile caps: An experimental study. *ACI Structural Journal*, 87(1), 81-92. DOI: 10.14359/2945.

[2] Adebar, P., & Zhou, Z. (1996). Design of deep pile caps by strut-and-tie models. *ACI Structural Journal*, 93(4), 1-12. DOI: 10.14359/9703.

[3] Chetchotisak, P., Yindeesuk, S., & Teerawong, J. (2017). Interactive strut-and-tie-model for shear strength prediction of RC pile caps. *Computers and Concrete*, 20(3), 339-348. DOI: 10.12989/cac.2017.20.3.329.

[4] Chetchotisak, P., & Teerawong, J. (2019). Reliability-based assessment of rc pile cap design methods and proposals for their strength resistance factors. *KSCE Journal of Civil Engineering*. DOI 10.1007/s12205-019-0079-1.

- [5] Chetchotisak, P., Teerawong, J., & Yindeesuk, S. (2022). Modified interactive strut-and-tie modeling of reinforced concrete deep beams and corbels. *Structures*, 45, 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.116>.
- [6] Chetchotisak, P., Arjsri, E., & Teerawong, J. (2020). Strut-and-tie model for shear strength prediction of RC exterior beam-column joints under seismic loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 1525–1546. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00756-4>.
- [7] Chetchotisak, P., Chomchaipol, W., Teerawong, J., & Shaingchin, S. (2022). Strut-and-tie model for predicting shear strength of squat shear walls under earthquake loads. *Engineering Structures*, 256, 114042. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114042>.
- [8] ACI Committee 318. (2014). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary, Detroit: American Concrete Institute.
- [9] British Standards Institution. (1997). Structural use of concrete, part 1: code of practice for design and construction, BS 8110-1, London, UK.
- [10] Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2000). *Reliability of structures*. McGraw Hill New York, USA.
- [11] Bhatt, P., Macginley, T. J., & Choo, B. S. (2006). *Reinforced concrete: Design theory and examples*. CRC Press, New York, USA.

เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.ปณัสชัย เชนฐ์โชติศักดิ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีและโท สาขาวิศวกรรมโยธาจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ปริญญาเอกสาขาวิชา วิศวกรรมโยธา จาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น มีความสนใจทางด้าน การออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณไร้ความต่อเนื่อง แบบจำลองแขนค้ำยันและแขนยึด และ การทำนายกำลังรับแรงเฉือนขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแผ่นดินไหว

การอ้างอิงบทความ (citation)

ปณัสนัยชัย เชษฐโชติศักดิ์ (2566), "การออกแบบฐานรากบนเสาเข็มมีความปลอดภัยเพียงไร (How safe are our pile caps)," *วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, บทความหมายเลข TCA_M 160307, กันยายน-ธันวาคม, 15 หน้า.

Chetchotisak, P. (2023) "How safe are our pile caps," *TCA Magazine, Thailand Concrete Association*, Vol.16, Issue 3, Paper ID TCA_M 160307, Sep. – Dec., 15 pages.