บทที่ 4

การให้ขนาด

บทนำ

เมื่อสามารถสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์หาแรงในสตรัท-ไทได้แล้ว สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการให้ขนาด(Dimensionning) ซึ่งหมายถึงการหาขนาดของสตรัท, ไทและโนดซึ่งสอดคล้องกับรูปร่าง(Geometry)ของแบบจำลองและขนาดของจุดรองรับ แล้วตรวจสอบหน่วยแรงอัดของคอนกรีตให้อยู่ภายใต้กำลังที่กำหนด นอกจากนี้ยังรวมถึงตรวจสอบการยึดรั้งให้เหมาะสม ขั้นตอนสุดท้ายคือการให้รายละเอียดการเสริมเหล็ก(Detaling)ที่สอดคล้องตามพฤติกรรมของแรงภายใน

โนด(node)

ในส่วน D-regions มักจะประกอบด้วยโนดสองประเภทคือ โนดเดี่ยว(Singular Node) และ โนดกระจาย(Smeared Node) จากการที่โนดเดี่ยวเป็นลักษณะหน่วยแรงที่พุ่งเข้ามารวมกันเหมือนคอขวด ดังนั้นบริเวณนี้จึงเกิดหน่วยแรงขึ้นสูงทำให้ต้องสนใจในการตรวจสอบเป็นพิเศษ สำหรับโนดกระจายนั้นจะไม่วิกฤตเท่าโนดเดี่ยวเนื่องมาจากปริมาณคอนกรีตที่อยู่ล้อมรอบมันมีอยู่มาก ส่วนใหญ่แล้วถ้าบริเวณโนดได้รับการตรวจสอบว่าปลอดภัยทั้งด้านกำลังอัดและการยึดรั้งของเหล็กเสริม นั้นหมายความว่าทั้งส่วนของ D-regions จะมีความปลอดภัยตามไปด้วย

โนดเดี่ยวเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดสมดุลของแรงจากสตรัทหรือไทที่พุ่งเข้ามาจากทิศทางใดๆ ซึ่งบริเวณโนดนั้นทิศทางของแนวแรงเดิมจะถูกเปลี่ยนทันทีทันใดบนขอบเขตพื้นที่เล็กๆ โนดเดี่ยวเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น บริเวณน้ำหนักกระทำแบบจุด, จุดรองรับและแรงกระทำแบบจุดที่เกิดจากการเสริมเหล็กโดยติดแผ่นเหล็กยึดรั้ง, การงอขอหรือดัดโค้งเป็นห่วง

การหาขนาดของโนดจะต้องอยู่บนพื้นฐานการสมดุลกันของแรงต่างๆอย่างปลอดภัยโดยพิจารณาขนาดจากรูปร่างของแรงและทิศทางของสตรัทที่มากระทำ รวมทั้งการจัดเรียงเหล็กเสริมภายในโนดและขนาดของแผ่นรองรับ(Bearing Plate),แผ่นเหล็กเหล็กยึดรั้ง(Anchor Plate)ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการกำหนดขนาดของโนด

สำหรับการตรวจสอบกำลังแรงอัด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโนดจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าจำกัดกำลังคอนกรีตที่ให้ไว้ สภาพนี้จะสอดคล้องโดยอัตโนมัติสำหรับกำลังทั้งหมดของโนดถ้าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามแนวเส้นขอบ(Boundary Line)ของโนดไม่เกินค่าจำกัดกำลังและการยึดรั้งของเหล็กเสริมดีพอ บางทีผลของการยึดรั้งก็ทำให้โนดเกิดการร้าวขึ้นมา ดังนั้นการร้าวจะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงด้วย

ในกรณีโนดที่มีไทรับแรงดึง จะต้องมั่นใจว่าภายในโนดมีระยะสำหรับการยึดรั้งอย่างเพียงพอ โดยการยึดรั้งจะเริ่มขึ้นที่บริเวณหน้าตัดที่แนวสตรัทมาเจอกับเหล็กเสริมและครอบครุมไปถึงผิวนอกสุดอีกด้านหนึ่งของตัวสตรัท แต่ถ้าระยะยึดรั้งน้อยกว่าระยะที่ต้องการ วิธีการแก้ไขอาจทำได้โดยขยายความยาวของเหล็กเสริมผ่านออกไปนอกส่วนของพื้นที่โนดดังแสดงในรูป 4.1ก หรือการเปลี่ยนแรงดึงทั้งหมดให้เป็นแรงอัดจากด้านหลังก็สามารถทำได้โดยการเชื่อมเหล็กเสริมติดกับแผ่นเหล็กยึดรั้งดังแสดงในรูป 4.1ข ซึ่งกรณีนี้จะต้องตรวจสอบแรงดัดที่เกิดขึ้นในตัวแผ่นเหล็กและรอยเชื่อมต่อกับเหล็กเสริมด้วย การยึดรั้งยังทำได้อีกหลายแบบเช่น การงอขอ(Hook) , การทำเป็นห่วง(Loop)

<u>การหาขนาดของโนด</u>

รูปร่างทางเรขาคณิตของโนด จะถูกกำหนดโดยขนาดและทิศทางของแรงอัดหรือแรงดึงที่พุ่งเข้ามา แนวแรงที่พุ่งเข้ามาอาจจะมาจากหลายทิศทางซึ่งทำให้โนดมีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมใดๆที่มีความกว้างของแต่ละด้านแตกต่างกันไป สำหรับโนดที่มีแรงอัดอย่างเดียวเช่น CCC-node ถ้าสมมติให้เส้นขอบของโนดตั้งฉากกับแนวแรงลัพธ์ที่พุ่งเข้ามาและกำหนดให้หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันทุกด้าน ดังนั้นสามารถกำหนดความกว้างของแต่ละด้านของโนดให้มีความสัมพันธ์กับแรงลัพธ์ได้ดังนี้ $w_1 : w_2 : w_3 = C_1 : C_2 : C_3$ ดังแสดงในรูปที่ 4.2ก,ข ซึ่งสามาถนำไปกำหนดความกว้างของแผ่นเหล็กรองรับหรือแผ่นเหล็กยึดรั้งได้ต่อไป สำหรับ CCT-node เนื่องจากมีส่วนของไทรับแรงดึงเข้ามาดังนั้นลักษณะการเสริมเหล็กชั้นเดียวหรือหลายชั้นจะมีส่วนในการกำหนดรูปร่างของโนดดังนี้

ในรูป 4.2ค,ง เป็นตัวอย่างของ CCT-node ที่มีมุมเอียงของสตรัท θ , ความกว้างของแผ่นเหล็กรองรับ w_1, ความกว้างของสตรัท w_2 , ความกว้างของแนวการเสริมเหล็ก w_3 โดยหน่วยแรงอัดที่เกิดใต้แผ่นรองรับเท่ากับ σ_1 และที่เกิดด้านของสตรัท σ_2 ดังนั้นสมการสมดุลของแรงแนวดิ่งจะเป็น

$$\sigma_1 w_1 = (\sigma_2 w_2)\sin\theta \qquad (4.1)$$

รูป 4.2ค แสดงการเสริมเหล็กชั้นเดียวจึงมีค่าความกว้าง w_3 น้อยมาก จากรูปเรขาคณิตจะได้

$$w_2 = w_1 \sin\theta \tag{4.2}$$

และเมื่อแทนค่าลงในสมการข้างบน

$$\sigma_1 = \sigma_2 \sin^2\theta \tag{4.3}$$

รูป 4.2ง แสดงการเสริมเหล็กหลายชั้นทำให้ความกว้างของ w_3 มีค่าใดๆ จากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตพบว่า

$$w_2 = w_1 \sin\theta + w_3 \cos\theta \tag{4.4}$$

แทนค่าลงไปในสมการสมดุลของแรงจะได้

$$\sigma_1 = \sigma_2 (1 + (w_3/w_1)\cot\theta) \sin^2\theta \tag{4.5}$$

จากสมการที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อรู้ความกว้างของแผ่นรองรับและความกว้างของแนวการเสริมเหล็กรวมทั้งมุมเอียงของสตรัท ก็สามารถหาความกว้างของสตรัทโดยอัตโนมัติซึ่งสามารถแสดงให้เห็นด้วยกราฟรูปที่ 4.3

จากสมการ 4.5 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดใต้จุดรองรับกับหน่วยแรงอัดบริเวณขอบโนดด้านสตรัทซึ่งสามารถแสดงด้วยกราฟรูปที่ 4.4

<u>กำลังของโนด</u>

การตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่โนดสามารถทำได้โดยพิจารณาหน่วยแรงอัดที่เกิดตามแนวเส้นขอบของโนดจะต้องไม่ให้เกินค่าจำกัดกำลังที่กำหนด กรณีที่โนดประกอบด้วยแรงอัดเพียงอย่างเดียวค่าจำกัดของกำลังจะมีค่าสูงกว่าโนดที่มีส่วนของแรงดึงไทเข้ามา ทั้งนี้เป็นเพราะแรงดึงจากเหล็กเสริมมีผลทำให้เกิดการร้าวของคอนกรีตขึ้น มีผู้วิจัยเสนอกำลังของโนดไว้ดังนี้

Collins, Mitchell[2] (1984 Canadian Code) จำกัดค่ากำลังของโนดไว้ดังนี้

$f_{ce} = 0.85 f'_c$ (สำหรับโนดล้อมรอบด้วยแรงอัดสตรัท)

$f_{ce} = 0.75 f'_c$ (สำหรับโนดที่มีส่วนของแรงดึงไทเข้ามาหนึ่งทิศทาง)

$f_{ce} = 0.60 f'_c$ (สำหรับโนดที่มีส่วนของแรงดึงไทเข้ามามากกว่าหนึ่งทิศทาง)

CEB 1990[7] จำกัดค่ากำลังของโนดไว้ดังนี้

$f_{ce} = 0.85[1-f'_c/2500]f'_c$ (สำหรับโนดที่ล้อมรอบด้วยแรงอัดสตรัท)

$f_{ce} = 0.65[1-f'_c/2500]f'_c$ (สำหรับโนดที่มีส่วนของไทเข้ามายึดรั้ง)

กรณีโนดมีส่วนของไทเข้ามายึดรั้ง แต่มีมุมระหว่างสตรัทกับไทมากกว่า 55^0 และการเรียงเหล็กเสริมในส่วนของโนดมีการออกแบบอย่างพิถีพิถัน(จัดเรียงหลายชั้นและมีเหล็กตามขวาง) ทาง CEB อนุญาติให้ใช้ค่ากำลังคอนกรีตได้สูงขึ้นเท่ากับ $f_{ce} = 0.85[1-f'_c/2500]f'_c$

Schalich,Shafer,Jenerwein[1] จำกัดค่ากำลังของโนดโดย $f_{ce} = 0.60f'_c$ สำหรับกรณีทั่วไปและเท่ากับ $0.40f'_c$ เมื่อเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่เป็นพิเศษ

*สำหรับค่ากำลังที่นำไปใช้ในการออกแบบนั้นจะต้องพิจารณาถึงค่า Partial Factor และ Material Resistant Factor ที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 ของแต่ละ Code

<u>สตรัท</u>

สำหรับแบบจำลองสตรัท-ไท สตรัทถูกกำหนดให้เป็นหน่วยแรงอัดตามแกน(Uniaxial Compression) จะมีลักษณะเป็นรูปแท่ง(Prismatic), รูปพัด(Fan) หรือรูปขวด(Bottle) สำหรับกรณีรูปขวดนั้นจะมีหน่วยแรงดึงตามขวางเกิดขึ้น กรณีที่ไม่ได้เสริมเหล็กรับแรงดึงแนวขวางอย่างเพียงพอหน่วยแรงดึงดังกล่าวจะมีผลทำให้เกิดการวิบัติในสตรัทคอนกรีตเร็วขึ้น จากหลักการที่ให้ไว้ในเรื่องของโนดคือถ้าโนดได้รับการตรวจสอบอย่างปลอดภัยแล้วส่วนทั้งหมดของ D-region จะปลอดภัยตามไปด้วย นั้นหมายความว่าอาจจะไม่จำเป็นต้องตรวจสอบกำลังของสตรัทก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับบางกรณีก็จำเป็นต้องตรวจสอบกำลังของสตรัทด้วยเช่นกัน

<u>ขนาดของสตรัท</u>

ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นขนาดของสตรัทและโนดในแบบจำลอง การหาขนาดของสตรัทจำเป็นต้องรู้รูปร่างของแบบจำลองทั้งหมดก่อน เช่น มุมเอียงของแนวสตรัท(θ) , ระยะแขนของแรงคู่ควบภายใน(z) และขนาดของแรงอัดที่เกิดขึ้นภายในตัวสตรัทเอง โดยมีข้อพิจารณาว่าขนาดของสตรัทจะต้องไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินที่กำหนดไว้ เมื่อขนาดของสตรัทปลอดภัยแล้ว ก็จะใช้ความสัมพันธ์ของรูปเรขาคณิตเพื่อกำหนดขนาดอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่น ความกว้างของการเรียงเหล็กเสริม, ขนาด

ของแผ่นเหล็กยึดรั้ง(Anchor Plate) และแผ่นรองรับ(Bearing Plate) หรืออาจจะต้องทำย้อนกลับเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในทุกกรณี สำหรับความสัมพันธ์ของรูปเรขาคณิตในรูปที่ 4.2 จะเป็นดังนี้

$$w_2 = w_1 sin\theta + w_3 cos\theta \qquad (4.6)$$

เมื่อกำหนด มุมเอียงของสตรัท θ , ความกว้างของสตรัทแนวทแยง w_2 , ความกว้างของแผ่นรองรับ w_1, แนวการเสริมเหล็ก w_3

<u>กำลังของสตรัท</u>

กำลังของสตรัทจะเป็นดังสมการ $f_{ce} = \nu f'_c$ เมื่อ ν คือแฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังมีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งพิจารณาจากผลการลดลงของกำลังคอนกรีตเนื่องมาจากการร้าวของสตรัท, ความเครียดดึงหรือหน่วยแรงดึงตามขวาง

Collins, Mitchell[2] (1984 Canadian Code) จำกัดค่ากำลังของสตรัทไว้ดังนี้

$$f_{ce} = \frac{f'_c}{0.8 + 170\varepsilon_1} \qquad (4.7)$$

เมื่อ ε_1 คือค่าเฉลี่ยของความเครียดแนวขวางกับสตรัท ซึ่งหาค่าโดยประมาณจากสมการ

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + \frac{(\varepsilon_s + 0.002)}{\tan^2\theta} \qquad (4.8)$$

เมื่อ ε_s คือค่าเฉลี่ยของความเครียดดึงในเหล็กเสริมที่พาดผ่านสตรัทด้วยมุมเอียง θ กับแนวแกนของสตรัท การหาค่า ε_s สามารถหาได้จาก $\varepsilon_s = T/A_sE_s$ หรืออาจจะใช้ค่าเชิงอนุรักษ์ได้โดยให้ $\varepsilon_s = f_y/E_s$

CEB Code 1990[5] จำกัดค่ากำลังของสตรัทไว้ดังนี้

กรณีสตรัทที่ไม่เกิดการร้าว $f_{ce} = 0.85[1-f'_c/2500]f'_c$ (4.9)

กรณีสตรัทร้าว $f_{ce} = 0.65[1-f'_c/2500]f'_c$ (4.10)

Schalich,Shafer,Jenerwein[1] จำกัดค่ากำลังของสตรัทไว้ดังนี้

กรณีสตรัทที่ไม่เกิดการร้าว $f_{ce} = 1.0f'_c$ (4.11)

กรณีสตรัทร้าว $f_{ce} = 0.8f'_c$ (4.12)

*สำหรับค่ากำลังที่นำไปใช้ในการออกแบบนั้นจะต้องพิจารณาถึงค่า Partial Factor และ Material Resistant Factor ที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 ของแต่ละ Code

การยึดรั้ง(Anchorage)

ในแบบจำลองสตรัท-ไท การยึดรั้งหมายถึงการที่เหล็กเสริมที่รับแรงดึงพยายามส่งถ่ายแรงไปที่คอนกรีตโดยไม่ทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นเกิดการวิบัติ การยึดรั้งมักจะพบบริเวณโนดซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้ การยึดรั้งแบบเส้นตรง, การงอขอ(Hook), การทำเป็นห่วงหรือการเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ด้านหลังของโนด สำหรับระยะยึดรั้งแบบเส้นตรงหมายถึงระยะความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยว(Bond) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 CEB Code 1990 แสดงวิธีการหาระยะยึดรั้งพื้นฐาน l_b ดังนี้

$$l_b = \frac{d_b}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \tag{4.13}$$

โดยที่ d_b คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก, f_{yd} คือหน่วยแรงออกแบบของเหล็กเสริม,และ f_{bd} คือหน่วยแรงยึดเหนี่ยวออกแบบคำนวนได้จาก

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \tag{4.14}$$

เมื่อ η_1 พิจารณาจากชนิดของเหล็กเสริม
สำหรับเหล็กผิวเรียบมีค่าเท่ากับ 1.0 , เหล็กข้ออ้อยมีค่าเท่ากับ 2.25

η_2 พิจารณาจากตำแหน่งของเหล็กเสริมระหว่างการเทคอนกรีต
เท่ากับ 1.0 เมื่อเกิดสภาพการยึดเหนี่ยวที่ดีคือ เหล็กเสริมทุกเส้นมีมุมเอียง 45^0-90^0 กับแนวราบระหว่างเทคอนกรีต หรือกรณีเหล็กเสริมที่เอียงน้อยกว่า 45^0 แต่มีระยะสูงจากผิวล่างแบบอย่างน้อย 250มม.และห่างจากผิวบนของชั้นคอนกรีตอย่างน้อย300 มม. สำหรับกรณีอื่นหรือการใช้แบบหล่อ Slip form กำหนดค่าเท่ากับ 0.7

η_2 พิจารณาจากขนาดของเหล็กเสริม

เท่ากับ 1.0 เมื่อ $\phi < 32$ มม.

เท่ากับ 132- d_b/100 เมื่อ $\phi > 32$ มม.

f_{ctd} คือหน่วยแรงดึงออกแบบของคอนกรีต

การกำหนดค่ากำลังดึง CEB 1990 กำหนดจากแรงดึงในแนวแกนโดยจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งการคำนวนค่า f_{ctd} ในกรณีนี้จะใช้ค่าขอบเขตล่างของกำลังดึง $f_{ctk,min}$ สามารถคำนวนได้จาก

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} f_c'^{2/3}}{\gamma_c} \tag{4.15}$$

เมื่อ α_{ct} = 0.44 สำหรับ $f_{ctk,min}$ และ คือ γ_c ค่าแฟคเตอร์ลดค่ากำลังสำหรับคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.5 ความยาวของระยะยึดรั้งสุทธิ $l_{b,net}$ สามารถคำนวนได้ดังนี้

$$l_{b,net} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_b \frac{A_{s,cal}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,\min} \tag{4.16}$$

เมื่อ

$A_{s,cal}$ คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กที่ต้องการ

$A_{s,ef}$ คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กที่ใส่เข้าไป

α_1, α_2, α_3, α_4, α_5 คือสัมประสิทธิ์ที่ให้ไว้ในตารางข้างล่าง อธิบายได้ดังนี้

α_1 ค่าสัมประสิทธิแสดงรูปร่างของเหล็ก(เส้นตรง, งอขอ, ทำเป็นห่วง)

α_2 ค่าสัมประสิทธิจากอิทธิพลของการเสริมเหล็กตามขวางที่เชื่อมตลอดระยะยึดรั้ง $l_{b,net}$ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กตามขวางต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.6d_b

α_3 ค่าสัมประสิทธิการโอบโดยคอนกรีต

α_4 ค่าสัมประสิทธิการโอบโดยเหล็กเสริมตามขวาง

α_5 ค่าสัมประสิทธิผลของแรงดันตามแนวขวางที่กระทำกับระนาบการแตกแยกตลอดช่วงความยาวของระยะยึดรั้ง

$l_{b,net}$ คือค่าจำกัดที่กำหนดเพื่อให้แน่ใจถึงระยะยึดรั้งต่ำสุด, และเพื่อผลของความคลาดเคลื่อน

ต้องมากกว่าค่าที่สูงสุดของ 0.3l_b , 10d_b , 10 ซม. สำหรับเหล็กรับแรงดึง

ต้องมากกว่าค่าที่สูงสุดของ 0.6l_b , 10d_b , 10 ซม. สำหรับเหล็กรับแรงอัด

ค่าสัมประสิทธิ ($\alpha_3\alpha_4\alpha_5$) จะต้องมีค่ามากกว่า 0.7 สำหรับเหล็กข้ออ้อยและเท่ากับ 1.0 สำหรับเหล็กเส้นกลม

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ α_1, α_2, α_3, α_4, α_5

แฟคเตอร์จากผลของ	ชนิดการยึดรั้ง	เหล็กเสริม	
		รับแรงดึง	รับแรงอัด
รูปร่างของเหล็กเสริม	—	$\alpha_1 = 1.0$	$\alpha_1 = 1.0$
	⌐ L ⊏	$\alpha_1 = 0.7^*$	$\alpha_1 = 1.0$
การเชื่อมเหล็กตามขวาง	⌐ L ⊏	$\alpha_2 = 0.7$	$\alpha_2 = 0.7$
การโอบของคอนกรีต	—	$\alpha_3 = 1\text{-}0.15(c_d\text{-}d_b)/d_b$ โดย $0.7 < \alpha_3 < 1.0$	$\alpha_1 = 1.0$
	⌐ L ⊏	$\alpha_3 = 1\text{-}0.15(c_d\text{-}d_b)/d_b$ โดย $0.7 < \alpha_3 < 1.0$	
การโอบโดยเหล็กเสริมตามขวาง	⌐ L ⊏	$\alpha_4 = 1\text{-}K\lambda^{**}$ โดย $0.7 < \alpha_4 < 1.0$	$\alpha_3 = 1.0$
การโอบจากแรงดันด้านขวาง	⌐ L ⊏	$\alpha_5 = 1\text{-}0.0039p$ โดย $0.7 < \alpha_5 < 1.0$	

* ถ้า $c_d > 3d_b$,มิเช่นนั้น $\alpha_1 = 1.0$

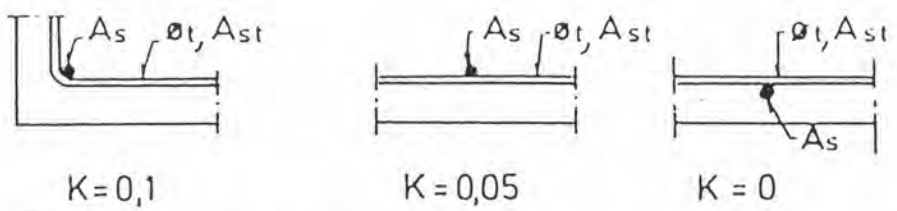
** $\lambda = \dfrac{\sum A_{st} - \sum A_{st,\min}}{A_s}$

$\sum A_{st}$ คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามขวางตลอดระยะยึดรั้ง $l_{b,net}$

$\sum A_{st,min}$ คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามขวางต่ำสุด $=0.25A_g$สำหรับคาน,และ = 0 สำหรับพื้น

A_s พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ยึดรั้ง(หนึ่งเส้น) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด

K คือค่าดังนี้



เหล็กเสริมตามขวางต้องกระจายตลอดระยะ $l_{b,net}$ ในกรณีระยะยึดรั้งของแรงดึง

p แรงดันตามขวาง(กก./ซม^2)ที่สภาวะประลัยตลอด $l_{b,net}$ ที่ตั้งฉากกับระนาบของการแตก

<u>รายละเอียดการเสริมเหล็ก</u>

การให้รายละเอียดในการเสริมเหล็กเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการออกชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการให้รายละเอียดที่ดีนั้นผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างอย่างถูกต้อง มิใช่ทำไปตามสูตรหรือข้อกำหนดในมาตรต่างๆเท่านั้น และในบางกรณีข้อกำหนดในมาตรฐานก็ควบคุมไปไม่ถึง ปัจจุบันหลักการสตรัท-ไทสามารถทำให้ผู้ออกแบบเข้าใจพฤติกรรมของแรงภายในโครงสร้างได้ดี คือเมื่อทราบถึงบริเวณที่มีการกระจายของหน่วยแรงอัดหรือแรงดึงก็จะใส่เหล็กเสริมที่สอดคล้องกับตำแหน่งนั้นๆโดยไม่สูญเสีย การให้รายละเอียดจะต้องพิจารณาถึงตำแหน่ง, การจัดเรียง และการยึดรั้ง

รายละเอียดการยึดรั้ง ในรูปที่ 4.7ก แสดงให้เห็นไอดีลไลซ์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะเห็นฟังก์ชั่นของการเสริมเหล็กได้อย่างชัดเจน เหล็กปลอกถูกใช้ในการยึดคานเอาไว้ในทิศทางแนวขวาง โดยปลายแต่ละด้านยึดติดแน่นกับแผ่นเหล็กที่ช่วยกระจายแรงดึงแบบจุดจากเหล็กปลอกออกไปตลอดความยาวคาน แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกสมดุลกับส่วนประกอบแนวดิ่งของแรงในสตรัท สำหรับบริเวณส่วนท้ายติดแผ่นรองรับเพื่อกระจายแรงดึงจากเหล็กตามยาวไปตลอดความลึกส่วนท้าย ทำให้สมดุลกับแรงอัดที่มาจากสตรัทแนวทแยง ในการทำรายละเอียดที่เหมาะสมในรูป 4.7ข เหล็กตามยาวยึดรั้งบริเวณส่วนท้ายทำหน้าที่คล้ายกับแผ่นเหล็กในรูป 4.7ก ส่วนในรูปที่ 4.7ค เป็นรายละเอียดของการยึดรั้งที่ไม่ดี

สำหรับในรูปที่ 4.8 จะไม่มีการเสริมเหล็กยึดรั้งส่วนท้ายเหมือนที่กล่าวมา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกระจายหน่วยแรงอัดจะเป็นรูปพัด ซึ่งไม่ต้องการเหล็กยึดรั้งส่วนบนอีก แต่แรงในสตรัทจะพุ่งมารวมกันบริเวณส่วนล่างเหนือจุดรองรับ ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่สูงและมีผลทำให้แรงดึงแนวราบในเหล็กเสริมสูงตามไปด้วย ซึ่งจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังอัดคอนกรีตและออกแบบการยึดรั้งให้ปลอดภัย สำหรับการยึดรั้งที่ดีต้องมั่นใจว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กจะถูกส่งถ่ายได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ทำให้เกิดการแตกตามยาวในคอนกรีต CEB Code 1990[5] แสดงรายละเอียดของการยึดรั้งไว้ในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีการยึดรั้งต่างๆดังนี้

ยึดรั้งแบบเส้นตรง (Straight anchorage)
ยึดรั้งแบบงอโค้ง (Curved anchorage) เช่น งอขอ(Hook), งอโค้ง(Bend), ทำเป็นห่วง(Loop)
ยึดรั้งโดยการเชื่อมติดกับเหล็กตามยาว
ยึดรั้งโดยใช้อุปกรณ์ เช่น เชื่อมติดกับแผ่นเหล็ก

รายละเอียดการเสริมเหล็กปลอก เมื่อแรงเฉือนถูกต้านด้วยกลไกตามแบบจำลองสตรัท-ไท พบว่าที่จุดหมุนดังรูป 4.10 แรงอัดในสตรัทแนวทแยงจะถูกต้านไว้ด้วยแรงแนวราบและแนวดิ่งจากเหล็กเสริมด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเหล็กปลอกซึ่งเป็นแรงดึง จะเกิดหน่วยแรงเต็มที่เท่ากันตลอดช่วง

ความสูงระหว่างคอร์ดบน-ล่าง ซึ่งหมายความว่าไม่มีการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอร์ด ดังนั้นการยึดรั้งที่ปลายของเหล็กปลอกทั้งสองด้านต้องถูกพิจารณาอย่างเหมาะสม ในรูปที่ 4.7ก แสดงไอดีลไลท์ของการยึดรั้งเหล็กปลอก CEB Code 1990[5] แนะนำการยึดรั้งของเหล็กปลอกในรูปที่ 4.11

การยึดรั้งด้วยการงอขอ(Hook) 150^0-180^0 สำหรับเหล็กเสริมผิวเรียบ

การยึดรั้งด้วยการดัดงอ(Bend) 90^0-150^0 สำหรับเหล็กเสริมข้ออ้อย

การยึดรั้งจะถูกพิจาณาแบบเต็มประสิทธิภาพถ้า

- ส่วนที่เป็นเส้นตรงจากการโค้งงอมีความยาวน้อย

  5∅ หรือ 50 มม. โดยมีมุมความโค้ง 150^0 หรือมากกว่า ดังแสดงในรูป 4.11ก

  100∅ หรือ 70 มม. โดยมีมุมความโค้ง 90^0 หรือมากกว่า ดังแสดงในรูป 4.11ข

- ถ้าบนช่วงความยาวของการยึดรั้งมีสภาพดังนี้

  มีการเชื่อมขาเหล็กปลอกติดกับเหล็กแนวขวางที่มี ∅ > 0.7เท่าของเหล็กปลอกสองจุด ดังรูป 4.11ค หรือเชื่อมติดกับเหล็กหนึ่งจุดแต่มี ∅ > 1.4เท่าของเหล็กปลอกดังรูป 4.11ง การเชื่อมสามารถต้านแรงเฉือนได้อย่างน้อย $0.3f_{sy}A_s$ ของเหล็กปลอกเมื่อทดสอบแบบเปลือย และอย่างน้อย $0.5f_{sy}A_s$ ของเหล็กใหญ่สุดเมื่อทดสอบในคอนกรีต

เนื่องจากเหล็กปลอกจะทำให้เกิดแรงดึงกระทำแบบจุดที่ปลายบน-ล่าง ดังนั้นการใช้เหล็กตามยาวที่มีขนาดใหญ่รอดผ่านส่วนงอของเหล็กปลอกก็จะมีส่วนช่วยในการกระจายแรงแบบจุดดังกล่าวได้ สำหรับบริเวณโซนรับแรงอัดที่คอร์ดบนจะเป็นประโยชน์แก่เหล็กปลอกที่ผ่านเข้ามายึดรั้ง แต่กรณีเมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักประลัย พบว่าแนวแกนสะเทินจะเข้าใกล้ผิวด้านที่เป็นแรงอัดเป็นเหตุให้ระยะของการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวลดลง ดังนั้นที่ปลายบนจึงควรยึดติดแน่นกับเหล็กตามยาวด้วย

ระยะห่างของเหล็กปลอกตามแนวคาน มีผลสำคัญต่อการกระจายแรงอัดแนวทแยง ในรูปที่ 4.7ค เป็นการทำรายละเอียดที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากจัดวางระยะห่างของเหล็กปลอกมากเกินไป ทำให้เหล็กตามยาวไม่สามารถกระจายแรงแบบจุดจากเหล็กปลอกได้ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการการวิบัติก่อนกำหนด นอกจากนั้นการจัดระยะเหล็กปลอกที่ห่างเกินไปจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ไม่สม่ำเสมอในสตรัทแนวทแยงดังแสดงในรูป 4.8ข ซึ่งจะมีค่าสูงบริเวณตำแหน่งของเหล็กปลอกเท่านั้น มีผลทำให้สตรัทเกิดความวิบัติขึ้นก่อนกำหนดเมื่อเทียบกับการจัดเรียงเหล็กปลอกที่เหมาะสมในรูปที่ 4.8ก Collins, Mitchell[7] แนะนำว่าระยะห่างเหล็กปลอก $s < z/3tan\theta$

ระยะห่างขาเหล็กปลอกในแนวหน้าตัดคาน มีผลต่อการกระจายของแรงภายในเช่นกัน ในรูป4.12ก เป็นคานที่มีหน้าตัดแคบ ตำแหน่งขาของเหล็กปลอกที่ใกล้กับผิวทั้งสองด้านจะแสดงระนาบของสตรัท-ไท ระยะที่ไม่ห่างกันนี้จะทำให้การกระจายของหน่วยแรงอัดแนวทแยงเกิดได้เต็มหน้าตัด แต่สำหรับคาน

กว้างในรูปที่ 4.12ข ขาของเหล็กปลอกที่ห่างกันบนหน้าตัด ทำให้แรงอัดจากสตรัทพุ่งไปรวมกันที่ขอบนอกทั้งสองบริเวณส่วนล่างของเหล็กปลอก หน่วยแรงที่สูงบริเวณดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการแตกของคอนกรีตก่อนกำหนด ดังนั้นในการแก้ไขจะต้องเพิ่มขาของเหล็กปลอกในช่วงกลางดังรูป 4.12ค เพื่อให้การกระจายของแรงอัดจากสตรัทมีค่าเท่าๆกันตลอดหน้าตัด

การเสริมเหล็กตามยาวในคานลึก การเสริมเหล็กตามยาวในคานธรรมดาทั่วไปจะวางเหล็กไว้ใกล้กับผิวแรงดึง แต่ในคานลึกนั้นจากทฤษฎีอีลาสติกแสดงให้เห็นว่าการกระจายหน่วยแรงดึงในโซนที่ลึกมาก ดังนั้นการเสริมเหล็กจึงต้องกระจายอยู่ในช่วงดังกล่าวด้วยมิใช่วางชิดผิวแรงดึงเท่านั้นดังรูป4.13 สำหรับกำลังประลัยของคานลึกจะขึ้นอยู่กับกลไกสตรัท-ไท ซึ่งมีผลให้เหล็กที่รั้งไว้ที่ปลายสตรัททั้งสองจะเกิดแรงดึงเกือบเท่ากันตลอดความยาวช่วงมิใช่ที่หน้าตัดของโมเมนต์สูงสุดเท่านั้น ดังนั้นปริมาณเหล็กที่คำนวนได้จะนำไปใช้เท่ากันตลอดช่วงระหว่างจุดรองรับทั้งสอง และที่ปลายจะต้องได้รับการยึดรั้งอย่างดี

การเสริมเหล็กปลอกในคานลึก เหล็กปลอกในคานลึกไม่ใช่ส่วนสำคัญในการรับแรงเฉือน เพราะแรงเฉือนเกือบทั้งหมดจะถูกแบกรับไว้ด้วยสตรัทคอนกรีตและถ่ายแรงสู่จุดรองรับโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามจะต้องเสริมเหล็กต่ำสุดไว้ด้วยซึ่งทาง ACI Code ได้กำหนดปริมาณเหล็กต่ำสุดทั้งในทิศทางแนวดิ่ง A_v และทิศทางแนวราบ A_{vh} ไว้ดังนี้

$$A_v > 0.0015 b_w s$$

$$A_{vh} > 0.0025 b_w s_h$$

เมื่อ b_w คือความกว้างของคาน และ $s < d/5$ หรือ 45 ซม., $s_h < d/3$ หรือ 45 ซม.

รายละเอียดการเสริมเหล็กในฐานราก ปัจจุบันการเสริมเหล็กรับแรงดึงหลักในฐานรากจะวางกระจายตลอดทั้งความกว้างของหน้าตัด แต่สำหรับการออกแบบตามหลักการสตรัท-ไท ส่วนของแรงดึงหลักจะอยู่บริเวณแนวระหว่างหัวเสาเข็มเท่านั้นเพื่อยึดรั้งกับสตรัทแนวทะแยงให้เกิดสมดุลของแรงตามแบบจำลอง ดังนั้นสำหรับการเสริมเหล็กรับแรงดึงหลักจึงควรวางให้สอดคล้องกับแรงดึงในแบบจำลองดังแสดงในรูป 4.14

ข้อพิจารณาป้องกันผลของการโก่งเดาะด้านข้าง

ในการออกแบบด้วยแบบจำลองสตรัท-ไท จะคิดผลของหน่วยแรงในระนาบที่กำลังออกแบบเท่านั้น และเพื่อป้องกันผลกระทบของการโก่งเดาะด้านข้าง จึงจำเป็นต้องจำกัดค่าสัดส่วนของโครงสร้างที่จะออกแบบไว้ดังนี้

คาน เมื่อคานเพรียวยาวได้รับน้ำหนักกระทำในแนวดิ่ง การวิบัติของคานอาจเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพด้านข้าง(Lateral Instability)ก่อนที่จะวิบัติเนื่องจากการดัดโดยตรง ดังนั้นในการออกแบบเพื่อป้องกันการโก่งเดาะด้านข้าง ทาง British Code110 ได้เสนอการจำกัดค่าสัดส่วนของคานไว้ดังนี้

1) สำหรับคานที่เป็นจุดรองรับธรรมดาหรือคานต่อเนื่อง มีความยาวช่วงระหว่างจุดยึดรั้งด้านข้าง l

$$l/b < 60 \quad \text{และ} \quad ld/b^2 < 250$$

2) สำหรับคานยื่น มีการยึดรั้งด้านข้างเฉพาะที่จุดรองรับเท่านั้น

$$l/b < 25 \quad \text{และ} \quad ld/b^2 < 100$$

คานลึก คานลึกที่มีความหนาน้อยๆ เมื่อเทียบกับความสูงและขาดการยึดรั้งด้านข้างที่ดีพอ เมื่อได้รับน้ำหนักในแนวดิ่ง อาจเกิดการโก่งตัวด่านข้างจนเป็นสาเหตุของการวิบัติก่อนการวิบัติในระนาบที่ออกแบบไว้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการโก่งตัวด้านข้าง ทาง ACI Code ได้จำกัดสัดส่วนของคานลึกที่มีความสูง h และมีความหนา t ไว้ดังนี้

$$h/t < 25$$

เสา เสายาวที่มีขนาดหน้าตัดน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวเสา จะมีกำลังรับน้ำหนักน้อยกว่าเสาสั้น ทั้งนี้เพราะเสายาวจะเกิดการโก่งเดาะร่วมกับแรงตามแกนทำให้เกิดการวิบัติเร็วกว่าในเสาสั้น ดังนั้นสำหรับการออกแบบด้วยหลักการสตรัท-ไท เพื่อป้องกันการโก่งเดาะด้านข้างจึงต้องจำกัดสัดส่วนของเสาที่จะออกแบบให้เป็นเสาสั้นเท่านั้น

$$h/t < 15$$

การทำนายกำลังรับแรงเฉือนและปริมาณเหล็กปลอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถทำนายปริมาณเหล็กปลอกต้านแรงเฉือนที่ต้องการตามการออกแบบด้วยทฤษฎีสตรัท-ไทและ ACI Code ได้ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเสริมเหล็กปลอก($A_v f_y/bsf'_c$) กับกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด(V/bdf'_c) สำหรับทฤษฎีสตรัท-ไทจะกำหนดให้สตรัทมีค่ามุมเอียงที่แตกต่างกันไป จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้สตรัทมีค่ามุมเอียงมากจะมีผลให้ความต้องการเหล็กปลอกมากตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะความสัมพันธ์ของเหล็กปลอกต่อหน่วยความยาวเป็นไปตามสมการ

$$\frac{A_v f_y}{s} = \frac{V}{z\cot\theta}$$

โดยหลักการสตรัท-ไทจะไม่คิดกำลังรับแรงดึงจากคอนกรีต ดังนั้นแรงดึงแนวดิ่งทั้งหมดจะถูกต้านไว้ด้วยแรงเหล็กปลอก ในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟจะเริ่มจากพิกัด (0,0) ในขณะที่การออกแบบด้านแรงเฉือนตาม ACI Code จะคิดว่าหน้าตัดคอนกรีตมีส่วนช่วยแบกรับแรงเฉือนที่เกิด โดยจำกัดค่า $V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd$ และเหล็กปลอกรับแรงเฉือนส่วนที่เหลือคือ $V_s = V - V_c$ โดยกำหนดให้สตรัทมีมุมเอียง 45 องศาเท่านั้น

$$\frac{A_v f_y}{s} = \frac{V}{d}$$

การเตรียมข้อมูลในตารางที่ 4.1 กำหนดให้ f'_c เท่ากับ 300 กก/ซม^2, $z = 0.9d$ และกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคอนกรีตเท่ากับ $0.53\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้นสำหรับ ACI Code

$$V = 0.53\sqrt{f'_c}bd + V_s$$

ในเทอมที่ไม่มีหน่วย

$$\frac{V}{bdf'_c} = \frac{0.53\sqrt{f'_c}}{f'_c} + \frac{A_v f_y}{bsf'_c}$$

$$\frac{A_v f_y}{bsf'_c} = \frac{V}{bdf'_c} - 0.0305$$

สำหรับตามหลักการสตรัท-ไท

$$V_s = V$$

$$\frac{A_v f_y}{bsf'_c} = \frac{V}{(z/d)\cot\theta\, bdf'_c} = \frac{V}{0.9\cot\theta\, bdf'_c}$$

ในการทำนายความต้องการเหล็กปลอกพบว่าในกรณีที่มุมเอียงของสตรัทมีค่าแตกต่างจาก 45 องศา เพียงเล็กน้อย จะต้องการปริมาณเหล็กปลอกมากกว่าของ ACI Code ทั้งนี้เป็นเพราะทาง ACI Code คิดให้หน้าตัดคอนกรีตช่วยรับแรงเฉือนด้วย แต่ถ้าในกรณีที่สตรัทมีค่ามุมเอียงต่ำๆและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงจะพบว่าวิธีการสตรัท-ไทจะต้องการปริมาณเหล็กปลอกน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.15

<u>ทำนายกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกไม่มีเหล็กปลอก</u>

ในกรณีการทำนายกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นส่วนที่ไม่มีเหล็กปลอก จะใช้ตัวอย่างคานลึกในรูปที่ 4.16ก ซึ่งมีความยาว l และความลึก h ได้รับน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอที่ผิวบน q การหากำลังรับแรงเฉือนสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวนโดยกำหนด h = 1.00 ม และเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคาน l = 1, 2, 3, 4, 5 ม. โดยกำหนดจุดรองรับเท่ากับ 0.2 ม. และระยะวางเหล็กเสริมล่าง d = $0.9h$ และให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีต f'_c = 300 กก./ซม^2

<u>วิธีการสตรัท-ไท</u> กรณี l/h = 2

จากกราฟมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ = 56 องศา

ขนาดของสตรัทที่สัมผัสกับโนด $w_2 = w_1 sin\theta + w_3 cos\theta$

$= 20 sin\ 56^\circ + 20 cos 56^\circ$

= 27.76 ซม.

จากสมการสมดุลของแรงแบบโครงข้อหมุน แรงอัดในสตรัทแนวทแยงจะมีความสัมพันธ์กับแรงเฉือนดังนี้

$$C_1 = V/sin\theta$$

เมื่อกำหนดให้กำลังรับแรงอัดในสตรัทเท่ากับ $0.6f'_c$ ก็สามารถหาแรงสูงสุดในสตรัทได้

$$C_1 = 0.6 f'_c bw$$

$$= 0.6*300*20*27.76$$

$$= 99936 \text{ กก.}$$

ดังนั้นสามารถรับแรงเฉือนมากที่สุดที่จุดรองรับได้เท่ากับ

$$V_1 = 99936 sin 56^\circ = 82850 \text{ กก.}$$

หรือ $$\frac{V_1}{bdf'_c} = 0.153$$

วิธีการ ACI Code

ทาง ACI Code ให้พิจารณาแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤติที่ระยะ $0.15l_n$ จากผิวจุดรองรับ ตามตัวอย่างกรณี $l/h = 2$, l_n = 2 - 0.1 -0.1 = 1.8 ม. ; $0.15l_n$ = 0.27 ม.

กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดวิกฤติ

$$V_c = (3.5 - 2.5\frac{M_u}{V_u d})(0.5\sqrt{f'_c} + 176\frac{V_u d}{M_u})bd$$

เมื่อ $V_c = (3.5 - 2.5\frac{M_u}{V_u d}) \leq 2.5$

ที่หน้าตัดวิกฤติ

$$V_u = \frac{ql}{2} - q(0.15l_n + 0.1)$$

$$M_u = \frac{ql}{2}(0.15l_n + 0.1) - \frac{q(0.15l_n + 0.1)^2}{2}$$

$$\frac{M_u}{V_u d} = \frac{0.37 - 0.37^2/2}{(1-0.37)0.9}$$

$$= 0.532$$

ดังนั้น 3.5-2.5x0.532 = 2.17 < 2.5 OK

เมื่อกำหนดให้อัตราการเสริมเหล็กล่าง ρ = 0.01

$$V_c = 2.17(0.5\sqrt{300} + 176*0.01/2.17)(20)(90)$$

$$= 36994 \text{ กก.}$$

เมื่อเทียบกับวิธีการสตรัท-ไท โดยเปลี่ยนให้เป็นแรงเฉือนที่ตำแหน่งเดียวกันคือที่จุดรองรับ

$$V_1 = 36994*(1)/(1-0.15*1.8-0.1) = 58720 \text{ กก.}$$

หรือ $\frac{V_1}{bdf'_c} = 0.109$

คำนวนซ้ำโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน l/h เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5 ก็จะได้ผลในตารางที่ 4.2 ซึ่งสามารถนำไปพล๊อตกราฟเปรียบเทียบได้ในรูปที่ 4.16ข