บทที่ 3

การสร้างแบบจำลอง

บทนำ

ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการใช้แบบจำลองสตรัท-ไท ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆที่กล่าวไว้ในบทที่แล้ว สำหรับในบทนี้จะเน้นเนื้อหาลงไปในเรื่องการสร้างแบบจำลอง(Modeling) ซึ่งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากที่สุด เพราะแบบจำลองที่ถูกต้องจะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งและทิศทางของแรงอัดและแรงดึงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างชัดเจน ทำให้ผู้ออกแบบสามารถเข้าใจพฤติกรรมของแรงภายในที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นข้อมูลในการตรวจสอบกำลังคอนกรีตและหาปริมาณเหล็กเสริมได้เหมาะสม การสร้างแบบจำลองจะถูกแบ่งแยกออกเป็นแบบจำลองของ B-regions และ D-regions โดยมีตัวอย่างโครงสร้าง คาน เสา คานลึกและคานมีช่องเปิด, ฐานรากและเสา เพื่อใช้อธิบายในการทำความเข้าใจต่อไป

การเริ่มสร้างแบบจำลอง

ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตหลังจากได้รับน้ำหนักกระทำ จะเกิดการกระจายของหน่วยแรงภายในตามทฤษฎีอีลาสติก ซึ่งเมื่อพิจารณาในทิศทางของหน่วยแรงหลัก (Principal Stress) จะเป็นหน่วยแรงอัดและแรงดึงเท่านั้น โดยมีทิศทางมุมเอียงกับแนวราบที่แตกต่างกัน ดังนั้นการสร้างรูปร่างของแบบจำลองสตรัท-ไท จึงอาศัยค่าเฉลี่ยของทิศทางหน่วยแรงหลักที่มีขนาดใหญ่เป็นตัวกำหนดมุมเอียงของชิ้นส่วนสตรัทหรือไทในแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าแบบจำลองสตรัท-ไทเป็นเพียงการจำลองการจำลองการกระจายของหน่วยแรงภายในออกมาเป็นรูปร่างต่างๆเท่านั้น แบบจำลองไม่สามารถทดแทนหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นจริงได้ทั้งหมด แต่ทำขึ้นเพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์หาแรงภายในและเพียงพอสำหรับการตรวจสอบกำลังคอนกรีตและหาปริมาณเหล็กเสริม

สำหรับโครงสร้างที่ประกอบด้วย B-regions เป็นส่วนใหญ่ เช่นโครงสร้างคาน ซึ่งมีการกระจายความเครียดที่หน้าตัดเป็นไปตามหลักการของเบอร์นูลลี ดังนั้นแบบจำลองสตรัท-ไทมาตรฐานที่นำมาใช้กับส่วนนี้ จะเป็นลักษณะเหมือนของโครงข้อหมุน(Truss)ที่กำหนดมุมเอียงของสตรัทแนวทะแยงได้แตกต่างกันไป

สำหรับโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยส่วนของ D-regions เกือบทั้งหมด เช่น คานลึก จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทของแต่ละกรณีๆไป โดยอาศัยการพิจารณาทิศทางของหน่วยแรงหลักตามทฤษฎีอีลาสติกซึ่งได้มาจากโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์ร่วมกับประสพการณ์ของผู้ออกแบบ

สำหรับบริเวณที่เกิดหน่วยแรงสูงๆ จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทให้เป็นไปตามแรงภายในที่ปรากฏตามทฤษฎีอีลาสติกเพื่อให้เกิดความเหนียวในโครงสร้าง แต่สำหรับบริเวณที่มีหน่วยแรงปลานกลางหรือค่อนข้างต่ำ ทิศทางของสตรัทและไทในแบบจำลองเบี่ยงเบนได้บ้างจากการกระจายหน่วยแรงที่ปรากฏตามทฤษฎีอีลาสติก เช่น การจัดวางตำแหน่งของเหล็กเสริมอาจจะต้องกระทำในทิศทางที่เหมาะสมกับสภาพการปฏิบัติจริง ดังนั้นจำเป็นต้องแก้ไขทิศทางของชิ้นส่วนไทในแบบจำลองไปบ้าง กรณีดังกล่าวโครงสร้างเมื่อได้รับแรงกระทำก็จะปรับกลไกของแรงภายในตัวเองไปสู่ระบบแบบจำลองที่สมมติขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในทุกกรณีแบบจำลองสุดท้ายที่ถูกเลือกจะต้องถูกวิเคราะห์และตรวจสอบความปลอดภัยเสมอ

วิธีการสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาจากแนวกระจายแรงตามทฤษฎีอีลาสติก(Elasticity) จะไม่สามารถวิเคราะห์น้ำหนักประลัยที่เกิดขึ้นจริงได้ ซึ่งการหาน้ำหนักประลัยดังกล่าวจำเป็นต้องใช้การประยุกต์ทฤษฎีพลาสติก(Plasticity) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ถูกสร้างตามทฤษฎีอีลาสติกจะมีประโยชน์คือ จะปลอดภัยในช่วงสภาพของการใช้งาน(Serviceability) และภายใต้น้ำหนักประลัย แต่ถ้ามีเหตุผลที่ต้องการจะสร้างแบบจำลองเพื่อจะหาน้ำหนักปละลัยจริงๆ ก็สามารถจะทำได้ง่ายเพียงแต่เลื่อนตำแหน่งสตรัทหรือไทในทิศทางที่เป็นการเพิ่มแรงต้านทานของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้น เช่น การเพิ่มระยะแขนของแรงภายใน (Internal Level Arm)

<u>คาน</u>

สำหรับการออกแบบโครงสร้างคานด้วยวิธีของแบบจำลองสตรัท-ไท ซึ่งทฤษฎีนี้สมมติให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึง ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดคาน เช่นแรงเฉือน, แรงดัด จะถูกต้านทานไว้ด้วยแรงอัดหรือแรงดึงภายในเท่านั้น ในรูปที่ 3.1ข แสดงให้เห็นว่าแรงเฉือนจะถูกต้านทานไว้ด้วยส่วนประกอบแนวดิ่งของแรงอัดแนวทแยง D โดยสมมติให้เกิดหน่วยแรงอัด f_d กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดคาน และทิศทางของหน่วยแรงอัดหลักนี้ถูกแสดงด้วยมุมเอียง θ กับแนวราบและกำหนดให้มีค่าเท่ากันตลอดความลึกของคานดังรูป 3.1ค ดังนั้นแนวแรงที่เกิดขึ้นภายในสามารถจำลองให้เห็นได้โดยใช้แบบจำลองสตรัท-ไทในรูปที่ 3.1ง ซึ่งในแบบจำลองดังกล่าวประกอบไปด้วยส่วนของคอร์ครับแรงอัด, คอร์ครับแรงดึง ที่ขนานกับผิวของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยมีส่วนของสตรัทแนวทแยงเอียงเป็นมุมเดียวกับหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น และส่วนของไทแนวขวางทำหน้าที่รับแรงดึงแนวดิ่ง จากสมดุลของแรงในรูปที่ 3.2ก แรงอัดแนวทแยงและแรงในแนวราบจะมีค่าดังนี้

$$D = \frac{V}{\sin\theta} \tag{3.1}$$

และส่วนประกอบแนวราบของแรงในสตรัท D จะถูกทำให้สมดุลด้วยแรงดึงในคอร์ดบน-ล่างดังแสดงในรูป 3.2ข ดังนั้นแรงเฉือนที่หน้าตัดใดๆเป็นผลให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงในคอร์ดบน-ล่างดังนี้

$$N_v = \frac{D\cos\theta}{2} = \frac{V\cot\theta}{2} \tag{3.2}$$

ในรูป 3.3ก,ข แสดงให้เห็นขนาดของสตรัทซึ่งถูกกำหนดด้วยความกว้างให้มีค่าเท่ากับ z $cos\theta$ ดังนั้นหน่วยแรงอัดหลักแนวทแยงที่เกิดขึ้นจะมีค่า

$$f_d = \frac{D}{bz\cos\theta} = \frac{V}{bz\sin\theta\cos\theta} \tag{3.3}$$

โดยที่ b คือความกว้างของคาน, z คือระยะห่างระหว่างคอร์ดบน-ล่าง
สำหรับแรงดึงแนวดิ่งต่อหน่วยความยาวมีค่าดังนี้

$$t = \frac{V}{z\cot\theta} \tag{3.4}$$

และเมื่อกำหนดให้ A_v คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกมีระยะห่างกันเท่ากับ s ดังแสดงในรูป 3.3ค ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กปลอกกับแรงเฉือนจะหาได้จากสมการ

$$\frac{A_v f_y z\cot\theta}{s} = V \tag{3.5}$$

สำหรับการสร้างแบบจำลองคาน อาจจะเลือกกำหนดมุมเอียงของสตรัทโดยพิจารณาควบคู่ไปกับกำลังอัดของสตรัทคอนกรีตแนวทแยง ซึ่ง Collins, Mitchell[2] เสนอการจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตแนวทแยง โดยพิจารณาผลของค่าความเครียดดึงหลัก (Principal Tensile Strain) ε_1 ซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวแนวทแยงขนานกับแนวแรงอัดดังแสดงในรูป 3.4 การเพิ่มของค่าความเครียดดึง ε_1 จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ดังสมการ

$$f_{ce} = \frac{f'_c}{0.8+170\varepsilon_1} \leq f'_c \tag{3.6}$$

ในรูปที่ 3.4ก แสดงให้เห็นความเครียดต่างๆที่เกิดบนชิ้นส่วนของคานดังนี้ ε_1 ความเครียดดึงในแนวตั้งฉากกับแนวแรงอัดหลัก, ε_2 ความเครียดอัดในแนวทิศทางเดียวกับแรงอัดหลัก, ε_x ความเครียดตามแนวแกนคานที่กึ่งกลางความลึกหน้าตัด, ε_t ความเครียดตามแนวขวาง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึง ε_1 กับความเครียดตามแนวแกนคาน ε_x เป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0.002)/\tan^2\theta \qquad (3.7)$$

สำหรับค่า ε_x อนุญาติให้ใช้เท่ากับ 0.002 สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับแรงดัด, แรงเฉือน สำหรับกรณีที่มีแรงอัดตามแกนรวมอยู่ด้วย สามารถกำหนดค่า ε_x ได้ต่ำลงเท่ากับ 0.001 ซึ่งมีผลทำให้ค่าความเครียดดึง ε_1 ต่ำลงตามไปด้วย ในรูป 3.5 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε_1 เมื่อกำหนดสตรัทเอียงด้วยมุมต่างๆ พบว่าเมื่อมุมเอียงมีค่าต่ำ ε_1 จะมีค่าสูง และเมื่อแทนค่า ε_1 ในสมการที่ 3.6 จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำ ตัวอย่าง เช่นค่าในตารางที่ 3.1 เมื่อกำหนด $\varepsilon_x = 0.002$ ที่มุมเอียงของสตรัทเท่ากับ 15 องศา จากสมการที่ 3.7 ε_1 จะมีค่าเท่ากับ 0.0577 ส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเหลือเพียงแค่ $0.09f'_c$ ในทางตรงข้ามสำหรับกรณีที่สตรัทมีค่ามุมเอียงมากๆ ค่า ε_1 จะมีค่าน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.6

สำหรับหน่วยแรงอัดแนวทแยง f_d ที่เกิดขึ้นบนสตรัทคอนกรีต จากสมการที่ 3.3 ค่าหน่วยแรงอัดแนวทแยงดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมเอียงของสตรัทที่กำหนด ในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดมุมเอียงของสตรัทเท่ากับ 45 องศา หน่วยแรงอัดแนวทแยงจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ $2V/bz$ และกรณีที่มุมแตกต่างจาก 45 องศาออกไปมากก็จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด f_d กับแรงเฉือนตามสมการ 3.3 เมื่อแทนค่า f_d ด้วยกำลังรับแรงอัด f_{ce} ที่มุมเอียงของสตรัทต่างๆ จะสามารถหาค่าแรงเฉือนที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในสตรัทคอนกรีต จากรูปที่ 3.8 เมื่อกำหนดให้สตรัทมีค่ามุมเอียงต่ำๆ กำลังรับแรงเฉือนของคานจะมีค่าต่ำด้วย และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำหนดให้สตรัทมีมุมเอียงมากขึ้น จนกระทั่งถึงมุมเอียงประมาณ 55-60 องศา กำลังรับแรงเฉือนของคานจะมีค่าสูงที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงมากกว่านี้ สำหรับในการออกแบบคานเมื่อทราบแรงเฉือน เพื่อมิให้เกิดการวิบัติในสตรัทคอนกรีต จึงควรกำหนดมุมเอียงของสตรัทภายใต้เส้นกราฟในรูปที่ 3.8 และการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนจะต้องให้ต่ำกว่าจุดที่สมดุลกับกำลังรับแรงอัดของสตรัทคอนกรีต เพื่อให้เกิดการคลากของเหล็กเสริมก่อนที่จะเกิดการวิบัติในคอนกรีต

การเลือกมุมเอียง (θ) ของตัวสตรัทแนวทแยง

ในการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไท ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลอง คือมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง (θ) ซึ่งขนาดมุมนี้ควรจะมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับแนวกระจายของหน่วยแรงอัดหลักตามทฤษฎีอีลาสติก แต่อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบสามารถที่จะเลือกมุม θ เท่าไรก็ได้ โดยปกติแล้วสำหรับคานทั่วไป รอยร้าวเบื้องต้นจะฟอร์มตัวที่มุมประมาณ 45^0 แต่ถ้ามีการใส่ปริมาณเหล็กปลอกที่เหมาะสม รอยร้าวที่เกิดขึ้นใหม่จะฟอร์มตัวด้วยมุมเล็กกว่านั้น พาดผ่านรอยร้าวที่เกิดขึ้นในตอนแรก มีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอการจำกัดค่ามุมเอียงของตัวสตรัทแนวทแยงไว้ดังนี้ Thurlimann[6] เสนอให้มุม $\tan\theta$ อยู่ระหว่าง 0.5 และ 2 (θ อยู่ระหว่าง 26.6^0-63.4^0) โดยศึกษาจากรูปร่างเรขาคณิตของรอยร้าวที่เกิดขึ้น, 1978 CEB Model Code ได้ลดช่วงของ $\tan\theta$ ลงให้อยู่ระหว่าง 3/5 และ 5/3 (θ ระหว่าง 31^0- 59^0), Rogowsky[18] แนะนำให้ θ อยู่ในช่วง 25^0-65^0 , 1990 CEB Model Code[7] เสนอให้ควรเลือกในช่วง 18.4^0-45^0 , Collins, Michell ไม่ได้จำกัดค่ามุม θ แต่ไปจำกัดค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต f_{ce} ให้เป็นฟังก์ชั่นกับ θ ดังแสดงในสมการที่ 3.6

ค่า z (ระยะห่างระหว่างคอร์ครับแรงอัดกับคอร์ครับแรงดึง)

ตำแหน่งที่เกิดแรงดัดในส่วน B-regions แรงคู่ภายในจะถูกแทนด้วยแรงดึงในเหล็กเสริมและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่ถูกสมมติให้กระจายอยู่ในโซนรับแรงอัด จากการกระจายหน่วยแรงอัดจริงเป็นรูปสี่เหลี่ยม-พาราโบลิค ดังรูป 3.9ก ทาง ACI และ CEB อนุญาติให้ใช้การกระจายหน่วยแรงแบบสม่ำเสมอกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 3.9ข และจำกัดค่าหน่วยแรงอัดในการออกแบบเท่ากับ f_{ce} ซึ่งมีค่าประมาณ $0.85f'_c$ ค่า z ในแบบจำลองหมายถึงระยะห่างระหว่างคอร์ครับแรงอัดและคอร์ครับแรงดึง ซึ่งก็คือแขนโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานเพื่อต้านแรงดัดที่กระทำบนหน้าตัดเดียวกัน หาได้จากระยะจุดกึ่งกลางของความลึกกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าถึงตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริม $z = d\text{-}a/2$ ในการวิเคราะห์ออกแบบด้วยแบบจำลองสตรัท-ไท ค่า z จะถูกหาจากจุดที่เกิดแรงดัดสูงสุด แล้วกำหนดให้เท่ากันตลอดช่วงความยาวคาน

วิธีการออกแบบคาน การวิเคราะห์ออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไท สามารถทำได้สองวิธีคือ 1) วิธีพิจารณาทุกชิ้นส่วนของแบบจำลอง (Full Member Design) 2) พิจารณาที่หน้าตัด (Sectional Design)

1) วิธีพิจารณาทุกชิ้นส่วนของแบบจำลอง วิธีการนี้เป็นการสร้างแบบจำลองโครงข้อหมุนขึ้นมาทั้งระบบดังรูป 3.11 โดยให้รูปร่างสอดคล้องและลงตัวกับช่วงความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้างที่จะออกแบบ ถ้าน้ำหนักกระทำกระจายสม่ำเสมอ ก็จะถูกแทนที่ด้วยน้ำหนักกระทำแบบจุดเทียบเท่ากระจาย

ลงตามโนดต่างๆตลอดช่วงความยาวของแบบจำลอง แต่ถ้าเป็นน้ำหนักกระทำแบบจุด การสร้างรูปร่างของแบบจำลองต้องกำหนดให้มีตำแหน่งของโนดตรงกับตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ เพื่อให้สามารถถ่ายแรงเข้าสู่โครงข้อหมุนได้ จากนั้นแรงภายในจะถูกพิจารณาจากสภาพสมดุล ซึ่งสามารถจะวิเคราะห์ได้ในทุกชิ้นส่วนของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าวิธีนี้ค่อนข้างจะใช้เวลามากในการสร้างแบบจำลองทั้งระบบรวมทั้งการวิเคราะห์หาแรงในทุกชิ้นส่วน หรือในกรณีที่น้ำหนักกระทำเปลี่ยนไปหรือมีน้ำหนักกระทำแบบจุดเพิ่มขึ้น ขบวนการสร้างรูปร่างของแบบจำลองรวมทั้งการวิเคราะห์แรงภายในจะต้องทำกันใหม่ ซึ่งค่อนข้างจะยุ่งยากและเสียเวลาในการออกแบบแต่ละครั้ง นอกจากนี้การแทนที่น้ำหนักกระทำสม่ำเสมอด้วยน้ำหนักแบบจุดเทียบเท่ากระทำที่โนดต่างๆ จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ด้วย

สำหรับที่บริเวณจุดรองรับซึ่งเป็นส่วนของ D-region จะมีการกระจายหน่วยแรงอัดรูปพัด ด้วยมุมเอียงที่แตกต่างกันดังแสดงในรูป 3.10ก มุมเอียง θ_1 ของสตรัทบริเวณนี้จะมีความชันมากกว่ามุมเอียงของสตรัทภายใน θ ซึ่งอาจจะใช้มุมเฉลี่ยที่สามารถทดแทนการกระจายของแรงอัดรูปพัดดังกล่าว ในการพิจารณารูป 3.11 เพื่อให้เกิดอัตราของแรงดึงแนวดิ่งต่อหน่วยความยาวที่เท่ากันตลอดช่วง $z\cot\theta$ และมีผลถึงการกระจายเหล็กปลอกที่สม่ำเสมอในช่วงดังกล่าว Marti[3] และ Schlaich et al[1] กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ_1 และมุม θ ดังนี้

$$\cot\theta_1 = \frac{\cot\theta}{2} \tag{3.8}$$

2) <u>วิธีพิจารณาที่หน้าตัด</u> วิธีการนี้เป็นการพิจารณาแรงที่หน้าตัด เช่น แรงเฉือน, แรงดัด ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาทั้งหมด เพียงแค่กำหนดมุมเอียงของสตรัทที่ต้องการในแต่ละช่วงความยาวดังแสดงในรูป 3.12 จากนั้นก็ใช้สมการที่หามาจากสมการโครงข้อหมุน เพื่อวิเคราะห์แรงภายในที่ต้องการ โดยสามารถแยกกันพิจารณาได้ เช่น แรงดัดจะมีผลกับแรงในคอร์ดบน-ล่าง แรงเฉือนจะมีผลกับแรงในสตรัทแนวทแยงและเพิ่มแรงดึงในคอร์ดบน-ล่าง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

ก. <u>คอร์ดรับแรงอัด</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_c = \frac{M}{z} - \frac{V}{2}\cot\theta \tag{3.9}$$

แรงต้านทาน $$F_{rc} = f^*_{cd1}\, A_c \tag{3.10}$$

z = ระยะระหว่างคอร์ดบน-ล่าง

f^*_{cd1} = ค่าจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ร้าว

ข. <u>คอร์ดรับแรงดึง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_t = \frac{M}{z} + \frac{V}{2}\cot\theta \quad (3.11)$$

แรงต้านทาน $$F_{rt} = A_s f_{yd} \quad (3.12)$$

ค. <u>คอร์ดรับแรงอัดแนวทแยง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_{cw} = \frac{V}{\sin\theta} \quad (3.13)$$

แรงต้านทาน $$F_{rcw} = f^*_{cd2} b.z.\cos\theta \quad (3.14)$$

f^*_{cd2} = ค่าจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตที่ร้าวหรือมีเหล็กเสริมพาดผ่าน ดังรูปที่ 3.4ค

ง. <u>คอร์ดรับแรงดึงแนวขวาง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_{tw} = V \quad (3.15)$$

แรงต้านทาน $$F_{rtw} = \frac{A_s f_{yd}.z.\cot\theta}{s} \quad (3.16)$$

s = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

จะเห็นได้ว่าวิธีพิจารณาหน้าตัด เป็นวิธีที่สะดวกมากกว่าเนื่องจากไม่ต้องสร้างรูปร่างของแบบจำลองทั้งระบบขึ้นมาและไม่ต้องพิจารณาถึงความลงตัวและความสอดคล้องกับตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ เพียงแต่วิเคราะห์โครงสร้างหาแรงที่หน้าตัดแล้วใช้สมการโครงข้อหมุนเพื่อพิจารณาแรงในชิ้นส่วนของแบบจำลองเท่านั้น นอกจากนี้การปรับแก้แบบจำลอง เช่น เปลี่ยนขนาดมุมเอียงของสตรัท ก็สามารถทำได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการพิจารณาที่หน้าตัด จะไม่นำไปใช้กับส่วนของ D-regions

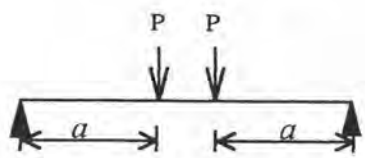
<u>การวิเคราะห์หาแบบจำลองที่ดีที่สุด</u>

Schlaich, Schafer, Jennewein[1] เสนอว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดจะต้องมีพลังงานสะสมต่ำสุด (Minimum Strain Ennergy) รวมทั้งต้องประหยัดเหล็กเสริมด้วย สำหรับโครงสร้างคาน มุมเอียง

ของสตรัท θ คือตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการกำหนดพฤติกรรมของแรงภายในแบบจำลอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลโดยการสร้างแบบจำลองให้มีมุมเอียงของสตรัทแตกต่างกัน 6 แบบดังแสดงในรูป 3.13 แล้ววิเคราะห์หาพลังงานสะสมและปริมาณการเสริมเหล็กในตารางที่ 3.3 จากนั้นนำข้อมูลที่วิเคราะห์มาเขียนกราฟในรูป 3.14 พบว่าแบบจำลองสตรัท-ไทที่มีมุมเอียงประมาณ 30-40 องศา จะให้ค่าพลังงานสะสมต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน จากตารางการวิเคราะห์ผลของพลังงานพบว่า พลังงานสะสมในคอนกรีตจะมีค่าน้อยกว่าในเหล็กเสริมมาก ดังนั้นถ้าแบบจำลองที่ดีที่สุดคือแบบจำลองที่มีพลังงานสะสมต่ำสุด ก็อาจสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ต้องการปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดคือแบบจำลองที่ดีที่สุดด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการประหยัดเหล็กเสริมอยู่แล้วในการออกแบบทั่วไป

สำหรับที่กล่าวมาข้างบนเป็นการวิเคราะห์โดยพิจารณาทุกชิ้นส่วนของแบบจำลอง ซึ่งถูกจำกัดด้วยเรื่องการสร้างรูปร่างของแบบจำลองให้ลงตัว และในกรณีที่เป็นน้ำหนักกระจายแบบสม่ำเสมอ จะพบปัญหาในการกระจายน้ำหนักลงตามโนดต่างๆ ให้ได้สัดส่วนที่สมดุลกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์มุมเอียงของสตรัทที่ให้ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งซึ่งสะดวกกว่า คืออินทิเกรตจากแรงที่หน้าตัด (M, V) ตลอดความยาวช่วง

1. กรณีน้ำหนักกระทำแบบจุด สามารถหาปริมาตรเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกในช่วง a ได้ดังสมการต่อไปนี้



<u>เหล็กตามยาว(เหล็กล่าง)</u>

แรงดึงในเหล็กล่างที่ระยะ x

$$T_x = \frac{M_x}{z} + \frac{V_x \cot\theta}{2}$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กรับแรงดึง

$$A_{sx} = \frac{\frac{M_x}{z} + \frac{V_x \cot\theta}{2}}{f_y}$$

ปริมาตรเหล็กเสริมที่ระยะ x

$$Volume_x = A_{xx}\,dx = \frac{\frac{M_x}{z} + \frac{V_x \cot\theta}{2}}{f_y} \cdot dx$$

ปริมาตรเหล็กเสริมตลอดช่วง a

$$Volume_{0\to a} = \int_0^a \frac{\frac{M_x}{z} + \frac{V_x \cot\theta}{2}}{f_y} \cdot dx$$

แทนค่า $M_x = Px$, $V_x = P$

$$Volume_{0\to a} = \int_0^a \frac{\frac{Px}{z} + \frac{P\cot\theta}{2}}{f_y} \cdot dx$$

$$= \frac{\frac{Px^2}{2z} + \frac{Px\cot\theta}{2}}{f_y}$$

$$= \frac{\frac{Pa^2}{2z} + \frac{Pa\cot\theta}{2}}{f_y}$$

$$= \frac{Pa}{f_y}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{a}{z}\right) + \frac{\cot\theta}{2}\right)$$

<u>เหล็กปลอก</u>

แรงดึงในเหล็กปลอกต่อช่วงความยาวหนึ่งหน่วย

$$t = \frac{V}{z\cot\theta}$$

พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก

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

ปริมาตรเหล็กปลอกต่อหน่วยความยาว

$$Volume = \frac{V}{f_y \cdot z\cot\theta} \cdot z$$

ปริมาตรเหล็กปลอกตลอดช่วง a และแทนค่า $V = P$

$$Volume = \frac{Pa}{f_y \cdot \cot\theta} = \frac{Pa}{f_y} \cdot \frac{1}{\cot\theta}$$

ปริมาตรเหล็กรวมทั้งหมดในช่วง a = ปริมาตรเหล็กตามยาว + ปริมาตรเหล็กปลอก

$$Volume_{total} = \frac{Pa}{f_y} \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a}{z}\right) + \frac{\cot\theta}{2} + \frac{1}{\cot\theta}\right) \tag{3.17}$$

สมการข้างบนแสดงให้เห็นว่าปริมาตรเหล็กเสริมเป็นฟังก์ชั่นกับตัวแปร θ ดังนั้นเพื่อหาปริมาตรเหล็กน้อยสุด โดยการดิฟเฟอร์เรนชิเอทเทียบกับมุม θ ให้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\theta}\left(\frac{Pa}{f_y}\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a}{z}\right) + \frac{\cot\theta}{2} + \frac{1}{\cot\theta}\right)\right) &= 0 \\ \frac{-\cos ec^2\theta}{2} + \sec^2\theta &= 0 \\ \frac{\sin^2\theta}{\cos^2\theta} &= \frac{1}{2} \\ \theta &= 35.2^0 \end{aligned} \tag{3.18}$$

ในการพิจารณาหาปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด พบว่าเมื่อกำหนดให้มุมเอียงของสตรัทแนวทแยงเท่ากับ 35.2 องศา จะเป็นมุมที่ต้องการเหล็กเสริมน้อยที่สุด

จากผลการวิเคราะห์พบว่ามุมเอียงของสตรัทแนวทแยงซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลอง จะมีผลกระทบต่อแรงภายในที่เกิดขึ้น ดังนี้

ก) ถ้ามุม θ น้อยๆ แรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีค่าน้อยตาม แต่แรงที่เกิดขึ้นในแนวราบและแรงในตัวสตรัทจะมีค่ามาก ส่งผลให้ต้องเสริมเหล็กตามยาวมาก แต่เหล็กปลอกน้อย

ข) ถ้ามุม θ มากๆ แรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีค่ามาก แต่แรงที่เกิดขึ้นแนวราบและแรงในตัวสตรัทจะมีค่าน้อย ส่งผลให้ต้องเสริมเหล็กปลอกมาก แต่เหล็กตามยาวน้อย

ค) สำหรับผลรวมของปริมาตรเหล็กเสริมที่ต้องการ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนดให้มุมเอียงของสตรัทมีค่าเท่ากับ 35.2 องศา

ง) หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นบนสตรัทแนวทแยง จะมีค่าต่ำสุดเมื่อกำหนดให้สตรัทเอียง 45 องศา ซึ่งหน่วยแรงอัดดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ $\frac{2V}{b \cdot z}$

จ) กำลังรับแรงอัดของสตรัทจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อสตรัทมีมุมเอียงมากขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นตามข้อง) พบว่าหน้าตัดคานจะรับกำลังอัดแนวทแยงได้สูงสุดเมื่อกำหนดให้สตรัทเอียงเป็นมุม 55-60 องศา โดยยอมให้รับแรงเฉือนได้สูงสุดประมาน $V = 0.32f'_c bz$ ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในสตรัทคอนกรีต

<u>คานลึก</u>

คานลึกคือชิ้นส่วนคอนกรีตที่มีสัดส่วนความยาวช่วงกับความลึกไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ความหนาของคานมีค่าน้อย น้ำหนักกระทำและแรงปฏิกิริยาจะอยู่ในระนาบของชิ้นส่วนซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความเค้นในระนาบ(Plane Stress) สำหรับ ACI กำหนดคานที่มีอัตราส่วนช่วงยาวต่อความลึก $l_n/h < 5$ กรณีน้ำหนักกระทำแบบจุด ค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึก $a/h < 2$ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในก่อนร้าวสามารถหาได้จากทฤษฎีอีลาสติกโดยใช้วิธีการไฟไนท์เอลีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าระนาบความเครียดที่หน้าตัดจะไม่เป็นเส้นตรงหลังจากได้รับน้ำหนักกระทำ ทั้งนี้เป็นเพราะผลของหน่วยแรงเฉือนที่สูง ดังนั้นหน่วยแรงจากการดัดจึงไม่กระจายเป็นเส้นตรงแม้ในช่วงอีลาสติกก็ตาม สำหรับคานลึกที่ได้รับน้ำหนักกระทำที่ผิวบน จากการพิจารณาทิศทางของหน่วยแรงหลัก (Principal Stress) แสดงให้เห็นว่าแรงอัดพุ่งมาจากบริเวณน้ำหนักกระทำเข้าสู่จุดรองรับโดยตรง น้ำหนักถูกส่งถ่ายไปที่จุดรองรับโดยอาศัยสตรัทแนวทแยง และการร้าวก็เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน สำหรับบริเวณที่มีการตัดกันของแรงจากสตรัทหรือไทถูกกำหนดให้เป็นโนดซึ่งเป็นลักษณะของจุดหมุน(Pined Joint) และส่วนปลายของสตรัทก็ถูกยึดรั้งไว้ด้วยแรงดึงไทเพื่อให้เกิดสมดุลของแรงที่โนด รูปร่างของคานลึกจะมีผลสำคัญในการกำหนดกลไกกำลังรับแรงเฉือน

ในการออกแบบคานลึกในปัจจุบันโดยใช้สูตรของ ACI Code จะพิจารณาเป็นลักษณะของแรงที่หน้าตัด โดยการออกแบบด้านแรงดัดจะใช้หลักการเดียวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่ต้องการแล้วจัดเรียงไว้ใกล้กับผิวรับแรงดึง ส่วนการออกแบบด้านแรงเฉือนจะพิจารณาเฉพาะแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤติที่ระยะ $0.15l_n$ จากผิวของจุดรองรับสำหรับกรณีได้รับน้ำหนักแบบกระจายสม่ำเสมอ และ $0.5a$ สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำแบบจุด โดยกำหนดให้กำลังรับแรงเฉือนมาจากหน้าตัดคอนกรีต V_c ซึ่งถ้ามีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นสูงกว่ากำลังการแบกรับของหน้าตัดคอนกรีต ก็จะออกแบบให้เหล็กรับแรงส่วนที่เหลือ สูตรของ ACI มิได้อยู่บนพื้นฐานของแรงภายในแบบจำลองที่เกิดขึ้นจริง ส่วนการออกแบบคานลึกโดยใช้แบบจำลองสตรัท-ไทจะมีความเหมาะสมมากกว่าเพราะอาศัยการจำลองพฤติกรรมของแรงภายในที่เกิดขึ้นจริง และสามารถตรวจสอบกำลังต้านทานได้สอดคล้องมากกว่า การออกแบบด้วยหลักการสตรัท-ไทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับคานลึกลักษณะต่างๆกันได้ เช่น คานลึกที่มีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกใดๆ หรือคานลึกที่ได้รับน้ำหนักกระทำแบบต่างๆ

การสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทสำหรับคานลึก เนื่องจากคานลึกเป็นลักษณะของ D-regions คือเกิดหน่วยแรงภายในแบบสับสนไม่เป็นไปตามสมมติฐานของเบอร์นูลลี ดังนั้นจึงไม่มีแบบจำลองมาตรฐานที่เป็นโครงข้อหมุนเหมือนกับใน B-regions จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทเป็นกรณีๆไป ขึ้นอยู่กับแรงกระทำ, แรงปฏิกิริยาและรูปร่างของชิ้นส่วน สามารถทำได้สามวิธีคือ 1) พิจารณาจากแนวการกระจายของหน่วยแรงภายใน(Stress Trajectories) 2) วิธีการพิจารณาเส้นทางของแรง (Load Path Method) 3) นำแบบจำลองพื้นฐานที่รู้อยู่แล้วไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่กำลังออกแบบ

การพิจารณาจากทิศทางของหน่วยแรงภายในตามทฤษฎีอีลาสติก สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลีเมนต์วิเคราะห์และแสดงผลขนาดและทิศทางของหน่วยแรงหลักเป็นกราฟฟิค ข้อมูลดังกล่าวจะนำไปใช้ในการกำหนดตำแหน่งและทิศทางของชิ้นส่วนสตรัท-ไทในแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม

<u>วิธีพิจารณาเส้นทางของแรง (Load Path Method)</u>

วิธีนี้เป็นการพิจารณาแนวทางเดินของแรงภายในชิ้นส่วนกับแรงภายนอก เช่น น้ำหนักกระทำ, แรงปฏิกิริยา หรือแรงที่มาจากส่วนของ B-regions ที่อยู่ใกล้เคียง การเริ่มกำหนดแนวเส้นทางของแรงภายในชิ้นส่วน ก็ต้องมั่นใจก่อนว่าสภาพรอบนอกของส่วน D-region มีความสมดุลของแรงอยู่แล้ว ตัวอย่างในรูปที่ 3.15, 3.16 แสดงให้เห็นชิ้นส่วนได้รับแรงกระทำมาจากส่วนของ B-regions ที่อยู่ใกล้เคียง มีลักษณะเป็นหน่วยแรงกระจายเป็นเส้นตรง(p) ไดอะแกรมของหน่วยแรงนี้จะถูกแบ่งเพื่อให้เกิดสมดุลกับแรงที่คู่กันแต่อยู่ด้านตรงข้าม จากนั้นจึงลากเส้นทางของแรงโดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางมวลของไดอะแกรมหน่วยแรงกระทำที่ถูกแบ่งแล้วพุ่งไปรวมกันที่แรงกระทำแบบจุดหรือบริเวณจุดรองรับ การกำหนดเส้นทางเดินดังกล่าวที่เชื่อมโยงกันระหว่างแต่ละคู่จะต้องไม่พาดผ่านซึ่งกันและกันและมีแนวโน้มว่าจะใช้ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างด้านตรงกันข้าม ทิศทางของมันจะต้องเป็นทางเดียวกับน้ำหนักกระทำหรือแรงปฏิกิริยา

มีบางกรณีที่ไดอะแกรมของหน่วยแรงไม่สอดคล้องกับการสร้างทางเดินของแรงที่อธิบายไว้ข้างต้น คือมีทั้งหน่วยแรงอัดและแรงดึง เมื่อพิจารณาถึงสภาพสมดุลโดยการแบ่งไดอะแกรมของหน่วยแรงให้สมดุลกับแรงปฏิกิริยา จะทำให้มีไดอะแกรมหน่วยแรงส่วนที่เหลือ ซึ่งจะให้ผลของทางเดินเข้าไปในโครงสร้างแล้ววนกลับ (U-turn) แรงดังกล่าวมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้าม ดังแสดงด้วยแรง B ในรูป 3.16 หลังจากตรวจสอบสภาพสมดุลและเขียนเส้นทางของแรง ต่อจากนั้นก็คือการแทนที่ด้วยชิ้นส่วนสตรัทและไทสำหรับแรงอัดและแรงดึง และเพื่อให้เกิดสมดุลของแรงภายในจำเป็นต้องเพิ่มชิ้นส่วนสตรัทและไทลงไประหว่างโนด

1170240922

ในขณะที่กำลังดำเนินการลงตำแหน่งของชิ้นส่วนสตรัท,ไท จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการปฏิบัติจริงในสนาม คือการจัดวางเหล็กเสริมซึ่งแทนชิ้นส่วนไท จะสะดวกมากกว่าถ้าได้จัดวางในลักษณะขนานกับผิวคอนกรีตด้านใดด้านหนึ่งโดยควรหลีกเลี่ยงการกำหนดชิ้นส่วนไทแนวเอียง ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามหลักการข้างบน จะสอดคล้องเฉพาะกรณีน้ำหนักกระทำแบบนั้นๆ ในกรณีเปลี่ยนลักษณะน้ำหนักกระทำใหม่ รูปร่างของแบบจำลองอาจจะต้องเปลี่ยนแปลงไป สำหรับกรณีสร้างแบบจำลองที่ซับซ้อน การใช้วิธีพิจารณาเส้นทางของแรงร่วมกับการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีลาสติกไฟไนท์อีลีเมนต์จะให้ผลลัพท์ที่ดีขึ้นในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลอง

ในการวิจัยนี้ได้แสดงการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไท โดยนำโปรแกรมไฟไนท์เอลีเมนต์มาประยุกต์เพื่อหาการกระจายหน่วยแรงอัดและแรงดึงภายในตามทฤษฎีอีลาสติก แล้วนำผลลัพธ์ไปกำหนดตำแหน่งของสตรัท, ไทและโนดในแบบจำลองของคานลึกที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันไป เช่น รูปร่างคานลึก, ประเภทของน้ำหนักกระทำ, ตำแหน่งของน้ำหนักกระทำแบบจุด, ขนาดของแผ่นรองรับ(Bearing Plate) , ตำแหน่งของช่องเปิด

<u>คานลึกรับน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอที่ผิวบน</u>

คานลึกในรูปที่ 3.17ก มีความยาว l และความสูง h ได้รับน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอที่ผิวบน โดยกำหนดให้จุดรองรับ(Support Bearing)มีขนาดเท่ากับ l_1 สำหรับการวิเคาะห์เพื่อหาแบบจำลองสตรัท-ไท จะกำหนดให้ตัวแปร h/l เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.5-1.5 และให้สัดส่วนความกว้างของจุดรองรับต่อความยาวคาน l_1/l เท่ากับ 1/20 , 1/10 และ 1/5 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์เพื่อหาการกระจายของหน่วยแรงหลัก(Principal Stress)แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.17ข จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดจะพุ่งจากผิวด้านบนที่น้ำหนักกระทำโดยมีทิศทางเป็นแนวดิ่งในช่วงแรกและเกิดหน่วยแรงอัดแนวราบที่ตั้งฉากกัน หลังจากผ่านลงมาถึงประมาณกลางความลึกของคาน หน่วยแรงดังกล่าวจะลู่รวมกันแยกลงสู่จุดรองรับทั้งสองด้าน จะสังเกตได้ว่าหน่วยแรงอัดจะมีค่าสูงมากๆบริเวณเหนือจุดรองรับ สำหรับหน่วยแรงดึงจะเกิดบริเวณใกล้กับผิวด้านล่างโดยมีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดรองรับทั้งสองด้านและกระจายเหนือจุดรองรับพาดผ่านหน่วยแรงอัด ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคานจะมีหน่วยแรงแนวราบ σ_x กระจายดังแสดงในรูปที่ 3.17ค ซึ่งพบว่าแม้ในช่วงอีลาสติกการกระจายของความเครียดตามยาวจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง การหาตำแหน่งของแรงลัพธ์จึงต้องพิจาณาเป็นกรณีๆไปโดยการอินทิเกรต จากข้อมูลแสดงตำแหน่งและทิศทางของหน่วยแรงที่กระจายอยู่ภายใน จะสามารถสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทได้ดังแสดงในรูปที่ 3.17ง หน่วยแรงอัดแนวดิ่งในช่วงบนถูกแทนด้วยสตรัทสองชิ้นซึ่งมีตำแหน่งตรงกับศูนย์กลางมวลของน้ำหนักทั้งสองด้าน หน่วยแรงอัดแนวราบในช่วงบนจะถูกแทนด้วยสตรัทแนวราบซึ่งมีตำแหน่งตรงกับแรงอัดลัพธ์ที่พิจารณาจาก σ_x ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคาน จุดตัดกันของสตรัทแนวดิ่งและแนวราบจะเป็นปลายของสตรัทแนวทแยงที่พุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้าน หน่วยแรงดึงที่

กระจายอยู่ในตอนล่างถูกแทนด้วยชิ้นส่วนไทซึ่งมีตำแหน่งตรงกับแรงดึงลัพธ์ที่หน้าตัดกลางความยาวคาน ไทจะพุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้านเพื่อยึดรั้งให้เกิดสมดุลของแรงที่โนด ดังนั้นสำหรับการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองจำลองจึงต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งของแรงลัพธ์ภายในก่อน เช่น ตำแหน่งของแรงดึงลัพธ์ที่ห่างจากผิวล่าง (t), ระยะห่างระหว่างแขนของแรงคู่ควบภายใน(z) และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่า t/h จะลดลงเมื่อ h/l มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.18ก สำหรับอัตราส่วน z/l จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.336 - 0.637 ดังแสดงในรูป 3.18ข โดยมีอัตราการเพิ่มในช่วงแรกเมื่อ h/l ประมาณเท่ากับ 0.5 - 1.2 และเริ่มมีค่าคงที่เมื่อ h/l มีค่ามากกว่า 1.2 ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะค่าหน่วยแรง σ_x จะมีค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์ที่ระยะใกล้ๆกับผิวบนของชิ้นส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.17จ สำหรับมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะมีค่าอยู่ในช่วง 55-72 องศา โดยมีค่าคงที่เมื่อ h/l มากๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18ค

กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดของจุดรองรับเท่ากับ 1/20, 1/10 และ 1/5 พบว่าค่า t/h จะมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.18ก แต่สำหรับค่า z/l และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะแตกต่างกัน คือ เมื่อจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ z/l และ θ มีค่ามากขึ้นด้วย

เมื่อทราบรูปร่างของแบบจำลองแล้ว ก็สามารถหาขนาดของแรงอัดและแรงดึงภายในของสตรัทและไทได้จากสมการสมดุลแบบโครงข้อหมุน ในรูปที่ 3.19 แสดงอัตราส่วนของขนาดของแรงต่อน้ำหนักทั้งหมดพบว่าเมื่อ h/l มากขึ้นแรงภายในจะมีขนาดน้อยลงจนกระทั่งคงที่ และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของจุดรองรับ พบว่าเมื่อขนาดของจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีผลให้ขนาดของแรงภายในแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ากรณีที่จุดรองรับเล็กๆ

<u>คานลึกรับน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอที่ด้านล่าง</u>

คานลึกในรูปที่ 3.20ก มีความยาว l และความสูง h ได้รับน้ำหนักกระทำแบบสม่ำเสมอที่ด้านล่าง โดยกำหนดให้จุดรองรับ(Support Bearing)มีขนาดเท่ากับ l_1 สำหรับการวิเคาะห์เพื่อหาแบบจำลองสตรัท-ไท จะกำหนดให้ตัวแปร h/l เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.5-1.5 และให้สัดส่วนความกว้างของจุดรองรับต่อความยาวคาน l_1/l เท่ากับ 1/20 , 1/10 และ 1/5 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์เพื่อหาการกระจายของหน่วยแรงหลักแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.20ข จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดกระจายเป็นส่วนโค้งโดยมีปลายของส่วนโค้งนั้นค้ำอยู่บนจุดรองรับทั้งสองด้าน สำหรับหน่วยแรงดึงจะ

กระจายอยู่ในช่วงล่างมีทิศทางจากตำแหน่งน้ำหนักกระทำพุ่งเข้าสู่ชิ้นส่วนคานโดยหยุดอยู่ประมาณกึ่งกลางความลึกของคาน และยังมีอีกส่วนหนึ่งที่กระจายอยู่ในแนวราบขนานกับผิวของชิ้นส่วนตอนล่างมีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดรองรับทั้งสองด้าน ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคานจะมีหน่วยแรงแนวราบ σ_x กระจายดังแสดงในรูปที่ 3.20ค ซึ่งพบว่าแม้ในช่วงอีลาสติกการกระจายของความเครียดตามยาวจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง การหาตำแหน่งของแรงลัพธ์จึงต้องพิจาณาเป็นกรณีๆไปโดยการอินทิเกรต จากข้อมูลแสดงตำแหน่งและทิศทางของหน่วยแรงที่กระจายอยู่ภายใน จะสามารถสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทได้ดังแสดงในรูปที่ 3.20ง หน่วยแรงอัดที่เป็นส่วนโค้งถูกแทนด้วยสตรัทสามชิ้น โดยตำแหน่งของสตรัทแนวราบจะมีตำแหน่งตรงกับแรงอัดลัพธ์ที่พิจารณาจาก σ_x ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคาน หน่วยแรงดึงที่พุ่งมาจากผิวล่างจะถูกแทนด้วยไทในแนวดิ่งสองชิ้น จุดตัดกันของไทแนวดิ่งและสตรัทแนวราบจะเป็นปลายของสตรัทแนวทแยงที่พุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้าน หน่วยแรงดึงที่กระจายอยู่ในตอนล่างถูกแทนด้วยชิ้นส่วนไทซึ่งมีตำแหน่งตรงกับแรงดึงลัพธ์ที่หน้าตัดกลางความยาวคาน ไทจะพุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้านเพื่อยึดรั้งให้เกิดสมดุลของแรงที่โนด ในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองจำลองจึงต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งของแรงลัพธ์ภายในก่อน เช่น ตำแหน่งของแรงดึงลัพธ์ที่ห่างจากผิวล่าง (t), ระยะห่างระหว่างแขนของแรงคู่ควบภายใน(z) และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.6 พบว่า t/h จะลดลงเมื่อ h/l มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.21ก สำหรับอัตราส่วน z/l จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.336 - 0.637 โดยมีอัตราการเพิ่มในช่วงแรกเมื่อ h/l ประมาณเท่ากับ 0.5 - 1.2 และเริ่มมีค่าคงที่เมื่อ h/l มีค่ามากกว่า 1.2 ขึ้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.21ข สำหรับมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะมีค่าอยู่ในช่วง 48-65 องศา โดยมีค่าคงที่เมื่อ h/l มากๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.21ค

กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดของจุดรองรับเท่ากับ 1/20, 1/10 และ 1/5 พบว่าค่า t/h จะมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.21ก แต่สำหรับค่า z/l และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะแตกต่างกัน คือ เมื่อจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ z/l และ θ มีค่ามากขึ้นด้วย และถ้าสังเกตจากกราฟในรูปที่ 3.21ค พบว่าในช่วง h/l น้อย มุม θ จะแตกต่างกันมากและเมื่อ h/l มาก มุม θ จะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามกรณี

การหาขนาดของแรงอัดและแรงดึงภายในของสตรัทและไทสามารถพิจารณาได้จากสมการสมดุลแบบโครงข้อหมุน ในรูปที่ 3.22 แสดงอัตราส่วนของขนาดของแรงต่อน้ำหนักทั้งหมดพบว่าเมื่อ h/l มากขึ้น แรงภายในจะมีขนาดน้อยลงจนกระทั่งคงที่ และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของจุดรองรับ พบว่าเมื่อขนาดของจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีผลให้ขนาดของแรงภายในแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ากรณีที่จุดรองรับเล็กๆ

คานลึกรับน้ำหนักกระทำแบบจุดที่ผิวบน

คานลึกในรูปที่ 3.23ก มีความยาว l และความสูง h ได้รับน้ำหนักกระทำแบบจุดที่ผิวบนตำแหน่งกลางความยาวคาน โดยกำหนดให้จุดรองรับมีขนาดเท่ากับ l_1 และขนาดความกว้างของน้ำหนัก l_2 สำหรับการวิเคาะห์เพื่อหาแบบจำลองสตรัท-ไท จะกำหนดให้ตัวแปร h/l เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.5-1.0 และให้สัดส่วนความกว้างของจุดรองรับต่อความยาวคาน l_1/l เท่ากับ 1/20 , 1/10 และ 1/5 เช่นเดียวกับสัดส่วนความกว้างของน้ำหนักต่อความยาวคาน l_2/l ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์เพื่อหาการกระจายของหน่วยแรงหลักแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.23ข พบว่าระหว่างจุดที่น้ำหนักกระทำกับจุดรองรับทั้งสองด้านจะมีหน่วยแรงขนาดใหญ่กระจายอยู่โดยมีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดทั้งสอง จะสังเกตได้ว่าบริเวณใกล้กับจุดรองรับหรือใกล้กับน้ำหนักกระทำจะเกิดหน่วยแรงอัดที่สูงมาก ทั้งนี้เป็นเพราะหน่วยแรงอัดที่กระจายอยู่ในชิ้นส่วนลู่เข้ามารวมกันที่บริเวณดังกล่าวลักษณะเหมือนคอขวด ส่วนที่ใกล้กับผิวล่างมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นขนานกับผิวของชิ้นส่วนโดยมีปลายพุ่งเข้าหาจุดรองรับทั้งสอง ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคานจะมีหน่วยแรงแนวราบ σ_x กระจายดังแสดงในรูปที่ 3.23ค ซึ่งสามารถอินทิเกรตหาตำแหน่งของแรงอัดและแรงดึงลัพธ์ได้ จากข้อมูลแสดงตำแหน่งและทิศทางของหน่วยแรงที่กระจายอยู่ภายใน จะสามารถสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทได้ดังแสดงในรูปที่ 3.23ง หน่วยแรงอัดที่กล่าวไว้ข้างต้นจะถูกแทนด้วยสตรัทโดยมีปลายอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของน้ำหนักที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนและศูนย์กลางของสตรัทในแนวราบที่พิจารณาจาก σ_x ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคาน สำหรับหน่วยแรงดึงที่กระจายอยู่ในตอนล่างถูกแทนด้วยชิ้นส่วนไทซึ่งมีตำแหน่งตรงกับแรงดึงลัพธ์ที่หน้าตัดกลางความยาวคาน ไทจะพุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้านเพื่อยึดรั้งให้เกิดสมดุลของแรงที่โนด ดังนั้นสำหรับการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองจำลองจึงต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งของแรงลัพธ์ภายในก่อน เช่น ตำแหน่งของแรงดึงลัพธ์ที่ห่างจากผิวล่าง (t), ตำแหน่งของแรงอัดลัพธ์ที่ห่างจากผิวบน (c), ระยะห่างระหว่างแขนของแรงคู่ควบภายใน(z) และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.7 พบว่า t/h และ c/h จะลดลงเมื่อ h/l มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.24, 3.25 กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดของจุดรองรับเท่ากับ 1/20, 1/10 และ 1/5 พบว่าเมื่อ l_1/l มีค่าน้อย จะให้ค่า t/h ที่ต่ำกว่ากรณีที่ l_1/l มีค่ามาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.24 ในทางกลับกันค่า c/h กลับมีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.25

สำหรับอัตราส่วนความกว้างของน้ำหนัก l_2/l เท่ากับ 1/20, 1/10 และ 1/5 จะมีผลดังนี้คือเมื่อ l_2/l มีค่ามาก ค่า t/h จะน้อยลง แต่ในทางกลับกันจะมีผลให้ค่า c/h มีค่ามากขึ้น

การหาขนาดของแรงอัดและแรงดึงภายในของสตรัทและไทสามารถพิจารณาได้จากสมการสมดุลแบบโครงข้อหมุน ในรูปที่ 3.26 แสดงอัตราส่วนของขนาดของแรงต่อน้ำหนักกระทำพบว่าเมื่อ h/l มาก

ขึ้นแรงภายในจะมีขนาดน้อยลง และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของจุดรองรับ l_1 และขนาดของน้ำหนัก l_2 พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

<u>คานลึกรับน้ำหนักกระทำแบบจุดที่ด้านล่าง</u>

คานลึกในรูปที่ 3.27ก มีความยาว l และความสูง h ได้รับน้ำหนักกระทำแบบจุดที่ด้านล่างตำแหน่งกลางความยาวคาน โดยกำหนดให้จุดรองรับมีขนาดเท่ากับ l_1 และขนาดความกว้างของน้ำหนัก l_2 สำหรับการวิเคาะห์เพื่อหาแบบจำลองสตรัท-ไท จะกำหนดให้ตัวแปร h/l เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0.5-1.0 และให้สัดส่วนความกว้างของจุดรองรับต่อความยาวคาน l_1/l เท่ากับ 1/20 , 1/10 และ 1/5 เช่นเดียวกับสัดส่วนความกว้างของน้ำหนักต่อความยาวคาน l_2/l ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์เพื่อหาการกระจายของหน่วยแรงหลักแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.27ข จากตำแหน่งของจุดที่น้ำหนักกระทำจะเกิดหน่วยแรงดึงแผ่กระจายออกไปในชิ้นส่วนคานลึกเป็นลักษณะรูปพัดโดยไปหยุดอยู่ที่บริเวณช่วงกลางความลึกของคานและมีหน่วยแรงดึงเพียงเล็กน้อยที่ขนานกันผิวล่าง สำหรับหน่วยแรงอัดจะกระจายเป็นส่วนโค้งโดยมีปลายของส่วนโค้งนั้นค้ำอยู่บนจุดรองรับทั้งสองด้าน จะสังเกตได้ว่าบริเวณเหนือจุดรองรับมีหน่วยแรงอัดที่สูงมาก ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคานจะมีหน่วยแรงแนวราบ σ_x กระจายดังแสดงในรูปที่ 3.27ค ซึ่งสามารถอินทิเกรตหาตำแหน่งของแรงอัดและแรงดึงลัพธ์ได้จากข้อมูลแสดงตำแหน่งและทิศทางของหน่วยแรงที่กระจายอยู่ภายใน จะสามารถสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทได้ดังแสดงในรูปที่ 3.27ง หน่วยแรงอัดที่เป็นส่วนโค้งจะถูกแทนด้วยสตรัทสามชิ้น โดยตำแหน่งของสตรัทแนวราบจะมีตำแหน่งตรงกับแรงอัดลัพธ์ที่พิจารณาจาก σ_x ที่หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคาน หน่วยแรงดึงที่พุ่งมาจากตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำแล้วแผ่เป็นรูปพัดทั้ง 180 องศา ถูกแทนด้วยชิ้นส่วนไทสองชิ้นที่มีมุมเอียงระหว่างแนวราบและระหว่างตัวมันเองเท่ากับ 60 องศา จุดตัดกันของไททั้งสองชิ้นและสตรัทแนวราบจะเป็นปลายของสตรัทแนวทแยงที่พุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสอง หน่วยแรงดึงที่กระจายอยู่ในตอนล่างถูกแทนด้วยชิ้นส่วนไทซึ่งมีตำแหน่งตรงกับแรงดึงลัพธ์ที่หน้าตัดกลางความยาวคาน ไทจะพุ่งเข้าสู่จุดรองรับทั้งสองด้านเพื่อยึดรั้งให้เกิดสมดุลของแรงที่โนด ดังนั้นสำหรับการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองจำลองจึงต้องวิเคราะห์หาตำแหน่งของแรงลัพธ์ภายในก่อน เช่น ตำแหน่งของแรงดึงลัพธ์ที่ห่างจากผิวล่าง (t), ระยะห่างระหว่างแขนของแรงคู่ควบภายใน(z) และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.8 พบว่า t/h จะลดลงเมื่อ h/l มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.28 สำหรับอัตราส่วน z/l จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.347 - 0.596 สำหรับมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะมีค่าอยู่ในช่วง 51-80 องศา โดยทั้ง z/l และ θ จะมีอัตราเพิ่มลดลงเมื่อ h/l มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.29, 3.30

กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดของจุดรองรับเท่ากับ 1/20, 1/10 และ 1/5 พบว่าเมื่อ l_1/l มีค่าน้อย จะให้ค่า t/h ที่สูงกว่ากรณีที่ l_1/l มีค่ามาก แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.28 แต่สำหรับค่า z/l และมุมเอียงของสตรัทแนวทแยง θ จะเป็นลักษณะแปรผันตามกันคือเมื่อจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ z/l และ θ มีค่ามากขึ้นด้วย

สำหรับอัตราส่วน l_2/l จะมีผลดังนี้คือเมื่อ l_2/l มีค่ามาก ค่า t/h และ θ ก็จะมากตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันจะมีผลให้ค่า z/l มีค่าน้อยลง

การหาขนาดของแรงอัดและแรงดึงภายในของสตรัทและไทสามารถพิจารณาได้จากสมการสมดุลแบบโครงข้อหมุน ในรูปที่ 3.31 แสดงอัตราส่วนของขนาดของแรงต่อน้ำหนักกระทำพบว่าเมื่อ h/l มากขึ้น แรงภายในจะมีขนาดน้อยลง และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของจุดรองรับ พบว่าเมื่อขนาดของจุดรองรับมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีผลให้ขนาดของแรงภายในแบบจำลองมีค่าน้อยกว่ากรณีที่จุดรองรับเล็กๆ

<u>คานลึกมีช่องเปิด(Openning)</u>

สำหรับช่องเปิดในชิ้นส่วนโครงสร้างคานลึกนั้น จะเป็นตัวขัดขวางการกระจายของหน่วยแรงภายในซึ่งไม่สามารถส่งถ่ายผ่านช่องเปิดนั้นได้โดยตรง ทำให้เกิดการหักเหของหน่วยแรงอ้อมไปรอบๆ ช่องเปิดนั้น สำหรับกรณีที่ช่องเปิดนั้นอยู่ในตำแหน่งที่มีการกระจายหน่วยแรงภายในค่อนข้างต่ำ ช่องเปิดดังกล่าวก็จะไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเดิมมากนัก แต่ในทางกลับกันถ้าอยู่ในตำแหน่งที่มีการกระจายหน่วยแรงภายในสูง ก็จะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของแรงภายในโดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมให้สอดคล้องกับความต้องการดังกล่าว การออกแบบในปัจจุบันยังไม่มีความชัดเจนในเรื่องการหาปริมาณเหล็กเสริม เพียงแต่ให้เสริมกันร้าวและเหล็กที่ทดแทนปริมาณที่ขาดหายไปเท่านั้น แต่การออกแบบด้วยสตรัท-ไทจะสามารถหาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการได้อย่างชัดเจน

สำหรับหลักการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทของคานลึกที่มีช่องเปิดมีหลักการดังนี้ คือประการแรกต้องพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเดิมที่ไม่มีช่องเปิดว่าตำแหน่งช่องเปิดนั้นขัดขวางเส้นทางของแนวสตรัท,ไทในแบบจำลองเดิมหรือไม่ ถ้าไม่ขัดขวางก็สามารถที่จะใช้แบบจำลองเดิมได้แต่ต้องตรวจสอบขนาดใหม่ให้สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.32

ถ้าช่องเปิดนั้นมีตำแหน่งสมมาตรในโครงสร้างและไม่ขัดขวางเส้นทางของสตรัทที่พุ่งเข้าสู่จุดรองรับโดยตรง สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยใช้แบบจำลองเดิมแล้วเลื่อนตำแหน่งของสตรัทหรือไทขึ้น-ลงเพื่อหลบช่องเปิดดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3.32

ถ้าช่องเปิดนั้นขัดขวางเส้นทางสตรัทที่พุ่งเข้าสู่จุดรองรับโดยตรง จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองบริเวณรอบๆช่องเปิดเพื่อให้สอดคล้องกับการกระจายของหน่วยแรงที่เปลี่ยนไป สำหรับแบบจำลองพื้นฐานของโครงสร้างที่มีช่องเปิดแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.33 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดที่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อมาพบช่องเปิดก็จะเกิดการหักเหออกไปรอบๆมัน การหักเหดังกล่าวทำให้เกิดหน่วยแรงดึงตามขวางบริเวณขอบด้านหน้าและหลังของช่องเปิดนั้นเพื่อยึดรั้งให้เกิดสมดุลของแรงภายใน สำหรับแบบจำลองสตรัท-ไทแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.33ค ช่องเปิดในคานลึกก็เช่นเดียวกัน คือเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ขัดขวางเส้นทางของสตรัทดังรูปที่ 3.34ก พบว่ามีการกระจายของหน่วยแรงหลักดังรูปที่ 3.34ข จะเห็นได้ว่าปรากฏหน่วยแรงดึงตามขวางเกิดขึ้นที่ด้านหน้าและหลังช่องเปิดเดียวกัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทได้ดังรูปที่ 3.34ค หรืออาจจะประยุกต์เป็นรูปที่ 3.34ง เพื่อต้องการวางแนวชิ้นส่วนไทขนานกับขอบของช่องเปิดเพื่อความสะดวกในการก่อสร้างจริง

เมื่อตำแหน่งของช่องเปิดอยู่ชิดกับมุมล่างดังแสดงในรูปที่ 3.35 และบริเวณเหนือจุดรองรับไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับสตรัทแนวทะแยง คงมีแต่สตรัทในแนวดิ่งเท่านั้น ดังนั้นชิ้นส่วนไทจึงไม่จำเป็นต้องพุ่งเข้ามายึดรั้งที่จุดรองรับ แต่สามารถหยุดไว้ข้างๆช่องเปิดดังแสดง หรือกรณีที่ช่องเปิดอยู่ใกล้กับผิวด้านบนของชิ้นส่วนดังแสดงในรูป 3.36ก แสดงให้เห็นว่าด้านล่างของช่องเปิดนั้นมีหน่วยแรงดึงขนาดใหญ่กระจายอยู่ ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ในรูปที่ 3.36ข สำหรับการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทของช่องเปิดกาณีอื่นๆสามารถทำได้โดยใช้หลักการและแบบจำลองพื้นฐานในรูปที่ 3.34, 3.35, 3.36 ไปประยุกต์กับคานลึกแบบต่างๆได้

ฐานราก (Pile caps)

ฐานรากคือโครงสร้างที่มีฟังก์ชั่นในการถ่ายเทน้ำหนักจากเสาลงสู่เสาเข็ม การออกแบบในปัจจุบันยังไม่ได้ทำให้ผู้ออกแบบเข้าใจพฤติกรรมของแรงภายในที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับหลักการสตรัท-ไทสามารถทำให้เข้าใจพฤติกรรมได้มากกว่า

การออกแบบฐานรากของ ACI Code จะพิจารณาเป็นลักษณะของแรงที่หน้าตัด(Sectional Forces)เหมือนกับพื้นสองทาง(Two-Way Slab) ขบวนการออกแบบแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ 1) การออกแบบด้านแรงดัด จะใช้หลักการแบบเดียวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่ต้องการแล้วจัดเรียงแบบกระจายสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด 2) การออกแบบด้านแรงเฉือน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการคำนวนความลึกต่ำสุดของฐานรากโดยพิจารณาจากสองเงื่อนไขคือพฤติกรรมของคาน เป็นลักษณะ

การเฉือนแบบคานและพฤติกรรมสองทางเป็นลักษณะการเฉือนทะลุ ในกรณีแรกหน้าตัดวิกฤติจะอยู่ที่ตำแหน่ง d จากผิวเสา , ส่วนในกรณีหลังหน้าตัดวิกฤติจะอยู่ที่ตำแหน่ง d/2 จากแนวเส้นรอบรูปของเสา

หลักการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทจะพิจารณาการไหลของแรงภายในทั้งระบบ ดีกว่าการพิจารณาเฉพาะที่หน้าตัดวิกฤติเท่านั้น เส้นทางของแรงในคอนกรีตจะถูกส่งถ่ายจากเสาผ่านสตรัทคอนกรีตลงสู่ฐานรากโดยตรงแสดงให้เห็นด้วยแบบจำลองในรูปที่ 3.37, 3.38 ในขณะที่ไททำหน้าที่ยึดรั้งที่ปลายสตรัทบริเวณเหนือหัวเสาเข็มให้เกิดสมดุลของแรง โซนที่คอนกรีตและไทมาเจอกันเรียกว่าโนด

Adebar, Kuchma, Collins[22] ได้ศึกษาผลการทดสอบฐานราก(Pile caps) แล้วเปรียบเทียบกับค่าทำนายของ ACI ให้ค่าแตกต่างจากผลการทดสอบมาก ทั้งนี้เป็นเพราะ ACI ทำนายผลโดยให้ความสำคัญเฉพาะกับความลึกประสิทธิผล d แต่ละทิ้งผลกระทบของการกระจายเหล็กในแนวราบ สำหรับการทำนายด้วยหลักการสตรัท-ไทโดยหาน้ำหนักประลัยจากกำลังของหน่วยแรงกด(Bearing Stress) ใต้เสาเท่ากับ $0.85f'_c$ จะได้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่า และยังพบอีกว่าการวิบัติของฐานรากเป็นแบบแรงเฉือนคือวิบัติในตัวสตรัทรับแรงอัด โดยที่สตรัทนั้นได้รับแรงดึงตามขวางจากเหล็กเสริมที่ผ่านตัวสตรัทบริเวณโนดเหนือเสาเข็ม เป็นสาเหตุทำให้กำลังรับแรงอัดของสตรัทลดลง

การกำหนดรูปร่างแบบจำลองสตรัท-ไท สามารถพิจารณาจากการกระจายของหน่วยแรงภายในตามทฤษฎีอีลาสติกซึ่งวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์ เนื่องจากโครงสร้างฐานรากมีลักษณะการกระจายแรงแบบสามมิติ สำหรับในการสร้างแบบจำลองนี้จะพิจารณาเป็นระนาบสองมิติ โดยแยกพิจารณาสองครั้งในระนาบที่ตั้งฉากกัน แล้วสร้างแบบจำลองขึ้นในแต่ละด้าน ในงานวิจัยนี้เสนอแบบจำลองไว้สามกรณีคือ กรณีระนาบที่เป็นมีเข็ม 2 ต้น, 3 ต้นและ 4 ต้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับฐานรากแบบต่างๆในรูปที่ 3.39 โดยในทุกแบบจำลองจะกำหนดระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับสามเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม(D) และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเสา(b) และความหนาของฐานราก(h) คืออัตราส่วนความกว้างของเสาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม b/D เท่ากับ 1, 1.5, 2 และกำหนดอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม h/D เท่ากับ 2, 3

ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลีเมนต์เพื่อหาการกระจายของหน่วยแรงหลัก(Principal Stress) แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.40 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดขนาดใหญ่จะพุ่งออกจากเข็มแต่ละต้นเข้ามารวมกันที่บริเวณใต้เสา โดยมีหน่วยแรงดึงขนาดใหญ่กระจายอยู่ใกล้และขนานกับผิวล่าง แบบจำลองสตรัท-ไทของฐานรากแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3.41 การกำหนดรูปร่างของแบบจำลองจะได้จากเส้นที่ตัดกันระหว่างแนวศูนย์กลางของน้ำหนักแนวดิ่งตัดกับตำแหน่งของแรงอัดและแรงดึงลัพธ์แนวราบที่หน้าตัดใต้เสาคือระยะ c และ h ตามลำดับซึ่งแสดงค่าไว้ในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.42, 3.43, 3.44

เมื่อทราบรูปร่างของแบบจำลองแล้ว ก็สามารถหาขนาดของแรงอัดและแรงดึงภายในได้จากสมการสมดุลแบบโครงข้อหมุน รูปที่ 3.42ง, 3.43ง, 3.44ง แสดงอัตราส่วนของแรงต่อน้ำหนักจากเสา พบว่าเมื่อฐานรากมีความหนามาก (*h/D* มาก) แรงภายในจะมีค่าต่ำลง และเมื่อความกว้างของเสามาก (*b/D* มาก) แรงภายในก็จะมีค่าต่ำลงเช่นกัน

เสา

เสาเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงในแนวแกนและอาจเกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดขึ้นพร้อมกัน การออกแบบเสาตามปัจจุบัน จะพิจารณาที่หน้าตัดซึ่งเกิดโมเมนต์ขึ้นสูงสุดแล้วทำการออกแบบหน้าตัดดังกล่าวให้สามารถต้านทานแรงที่เกิดขึ้นได้ แต่สำหรับการออกแบบด้วยแบบจำลองสตรัท-ไท จะทำการพิจารณาแรงภายในที่เกิดขึ้นตลอดช่วงความสูงของเสาทำให้เข้าใจการกระจายของแรงภายในได้ดีกว่า ซึ่งสามารถหาปริมาณเหล็กเสริมที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงความสูงนั้นได้ถูกต้อง

เนื่องจากเสาส่วนใหญ่เป็นลักษณะของ B-regions ซึ่งสามารถใช้แบบจำลองสตรัท-ไทมาตรฐานเหมือนกับที่ใช้กับโครงสร้างคาน แต่กรณีของเสาจะรวมผลของแรงอัดตามแกนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งทำให้สมการหาแรงในคอร์ดต่างๆเปลี่ยนแปลงไป และสำหรับในช่วงที่โมเมนต์ดัดมีค่าน้อยๆ และแรงตามแกนมีขนาดใหญ่ที่จะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิว หรือแรงลัพธ์อยู่ในช่วงของเคอร์น(Kern)ของหน้าตัด ดังนั้นช่วงดังกล่าวสามารถแทนแรงลัพธ์ด้วยสตรัทเดี่ยวดังแสดงในรูป 3.45 สำหรับในช่วงที่เกิดแรงดึงที่ผิวด้านใดด้านหนึ่ง แบบจำลองมาตรฐานที่เป็นลักษณะโครงข้อหมุนจะถูกนำมาใช้ จะสังเกตได้ว่าแรงอัดที่กระจายอยู่ทั้งหน้าตัดจะหักเหไปกระทำต่อหน้าตัดที่แคบลงในส่วนของคอร์ดรับแรงอัดของแบบจำลอง สำหรับแรงที่เกิดขึ้นในคอร์ดต่างๆของแบบจำลองสามารถหาได้จากแรงที่หน้าตัดดังนี้

ก. คอร์ดรับแรงอัด

แรงที่เกิดขึ้น $$F_c = \frac{M}{z} + \frac{N(z - z_s)}{z} - \frac{V}{2}\cot\theta \qquad (3.19)$$

แรงต้านทาน $$F_{rc} = f^*_{cd1} A_c \qquad (3.20)$$

z = ระยะระหว่างคอร์ดบน-ล่าง

z_s = ระยะจากแนวแรง N ถึงแนวเหล็กเสริม

f^*_{cd1} = ค่าจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ร้าว

ข. <u>คอร์ครับแรงดึง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_t = \frac{M}{z} - \frac{N(z_s)}{z} + \frac{V}{2}\cot\theta \quad (3.21)$$

แรงต้านทาน $$F_{rt} = A_s f_{yd} \quad (3.22)$$

ค. <u>คอร์ครับแรงอัดแนวทแยง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_{cw} = \frac{V}{\sin\theta} \quad (3.23)$$

แรงต้านทาน $$F_{rcw} = f^*_{cd2} b.z.\cos\theta \quad (3.24)$$

f^*_{cd2} = ค่าจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตที่ร้าวหรือมีเหล็กเสริมพาดผ่าน ดังรูปที่ 3.4ค

ง. <u>คอร์ครับแรงดึงแนวขวาง</u>

แรงที่เกิดขึ้น $$F_{tw} = V \quad (3.25)$$

แรงต้านทาน $$F_{rtw} = \frac{A_s f_{yd}.z.\cot\theta}{s} \quad (3.26)$$

s = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

<u>แบบจำลองที่ดีที่สุด</u>

เนื่องจากไม่มีหลักการที่เป็นหนึ่งเดียวในการกำหนดรูปร่างของแบบจำลอง จึงทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดรูปร่างขึ้นมาได้หลายแบบ แต่อย่างไรก็ตาม Schlaich, Shafer, Jennewein[1] ได้แนะนำว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดจะต้องแสดงถึงเส้นทางแนวแรงและการยืดหดตัวน้อยที่สุด โดยพิสูจน์ได้จากสูตรข้างล่างนี้

$$\sum F_i l_i \varepsilon_{mi} = \text{minimum} \quad (3.27)$$

เมื่อ F_i = แรงในตัวสตรัทหรือไท i

l_i = ความยาวของชิ้นส่วน i

ε_i = ค่าเฉลี่ยของความเครียดในชิ้นส่วน i

สูตรข้างบนพิสูจน์มาจากหลักการพลังงานน้อยที่สุด (Principal of Minimum Strain Energy) ของพฤติกรรมอีลาสติกเชิงเส้น จากหลักการนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกกำจัดแบบจำลองที่ไม่ต้องการออกไป เช่นในรูปที่ 3.46ข แสดงให้เห็นการสร้างแบบจำลองที่จะเกิดพลังตามสูตรข้างบนได้มากกว่ารูป 3.46ก ดังนั้นจึงเป็นแบบจำลองที่ไม่เหมาะสม ทั้งนี้การเลือกสร้างแบบจำลองที่ดีนั้นควรจะประหยัดเหล็กเสริมด้วย โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนไทในแบบจำลองสั้นที่สุด ซึ่งหมายความว่าพยายามหันไปใช้ประโยชน์จากหน้าตัดคอนกรีตรับแรงอัดมากกว่าการกำหนดชิ้นส่วนรับแรงดึง รวมทั้งการสร้างแบบจำลองที่ดีต้องคำนึงถึงความสะดวกในแง่ของการปฏิบัติงานก่อสร้างด้วย เช่นปรับเปลี่ยนแนวไทเพื่อให้การเสริมเหล็กแนวขนานกับผิวคอนกรีต