

บทที่ 3

การสอบทวนข้อกำหนดกำลังต้านแรงเฉือน

ข้อกำหนดเกี่ยวกับกำลังต้านทานแรงเฉือนทั่วไป

จากบทความของ Cardenas, et al. (1973) ได้กล่าวถึงพื้นฐานและการพัฒนาข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบกำลังต้านทานแรงเฉือนของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้หลักการต้านทานแรงเฉือนของคานในเอกสารเกี่ยวกับแรงเฉือนและรอยร้าวในแนวทแยง (ACI – ASCE Committee 326(426), 1962) กำลังรับแรงเฉือนประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นแรงเฉือนที่แบกรับโดยคอนกรีต และ อีกส่วนหนึ่งเป็นแรงเฉือนที่แบกรับโดยเหล็กเสริม ในกรณีที่แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่คอนกรีตสามารถแบกรับได้

1. กำลังรับแรงเฉือนแบกรับโดยคอนกรีต

เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่ารอยแตกในแนวทแยงของคานคอนกรีตมี 2 ชนิด คือ web-shear และ flexure-shear โดยรอยแตกร้าวแบบ web-shear เกิดขึ้นเมื่อน่วยแรงเฉือนนั้นทำให้เกิดความเค้นดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่ $0.33\sqrt{f'_c}$ สำหรับรอยแตกแบบ flexure-shear คอนกรีตจะมีรอยแตกร้าวในแนวนอนเนื่องจากแรงดัดเมื่อความเค้นดึงนั้นมีค่า $0.50\sqrt{f'_c}$ และรอยแตกร้าวจะขยายมาเกิดขึ้นในแนวทแยงเมื่อมีความเค้นเฉือนเกิดขึ้น $0.05\sqrt{f'_c}$

สำหรับผนังหน้าต่างดัดสี่เหลี่ยมและไม่มีการแตกร้าว ความเค้นเฉือนมากที่สุด (v_{max}) เนื่องจากแรงเฉือน (V) ที่มากกระทำคือ

$$v_{max} = \frac{3V}{2l_w h} \quad (3.1)$$

โดยที่

h คือ ความสูงของผนัง

l_w คือ ความกว้างของผนัง

บนหน้าต่างผนังที่รับแรงตามแนวแกน (N) และแรงเฉือน (V) จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงแบบ web-shear เมื่อความเค้นเฉือนมากที่สุดทำให้เกิดความเค้นดึงในแกนหลักถึงค่า $0.33\sqrt{f'_c}$ ตามความสัมพันธ์ในสมการ (3.2)

$$\frac{3V}{2l_w h} = 0.33\sqrt{f'_c} \sqrt{1 + \frac{N/l_w h}{0.33\sqrt{f'_c}}} \quad (3.2)$$

สมการ (3.2) สามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ (3.3)

$$\frac{3V}{2l_w h} = 0.33\sqrt{f'_c} + 0.3 \frac{N}{l_w h} \quad (3.3)$$

จากแนวคิดของการกำหนดความเค้นเฉือนระบุแบกรับโดยคอนกรีต (v_c) มีค่าเท่ากับ V/hd และการสมมุติความลึกประสิทธิภาพ d เท่ากับ $0.8l_w$ สมการ (3.3) จะเปลี่ยนเป็น

$$v_c \approx 0.25\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{4l_w h} \quad (3.4)$$

สมการ (3.4) ได้นำไปใช้ในมาตรฐาน ACI318 บทที่ 11 ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1971 และยังคงใช้ต่อมาถึงปัจจุบัน สำหรับผนังเตี้ยที่มีแรงตามแนวแกน N กระจำน้อยมาก สมการ (3.4) จะลดรูปเป็น

$$v_c \approx 0.25\sqrt{f'_c} \quad (3.5)$$

สำหรับรอยแตกร้าวในแนวทแยงแบบ flexure – shear ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่เกิดรอยแตกร้าวจากแรงดัดแล้วในบริเวณที่หน้าตัดสูงไม่เกิน $l_w/2$ จากฐาน ความเค้นเฉือนระบุแบกรับโดยคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ

$$v_c \approx 0.05\sqrt{f'_c} + \frac{0.10l_w \left(f'_c + 2 \frac{N_u}{l_w h} \right)}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \quad (3.6)$$

ป.
ท
1095
6711
2557

15189606



กำลังรับแรงเฉือนโดยคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยกว่าจากการพิจารณาสมการ (3.4) และสมการ (3.6) อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงเฉือนจะต้องไม่น้อยกว่า $1/6 \sqrt{f'_c}$ ซึ่งเป็นค่า กำลังรับแรงเฉือนแบบ flexure – shear ต่ำสุด

14 SEP 2010

2. กำลังรับแรงเฉือนแบกรับโดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เหล็กเสริมจะช่วยแบกรับแรงเฉือนโดยพิจารณาจากวิธีการวิเคราะห์ "Truss Analogy" ซึ่งรายงานของ ACI – ASCE Committee 326(426) (1962) แสดงไว้ว่ากำลังรับแรงเฉือนแบกรับโดยเหล็กเสริม (v_s) มีค่าดังนี้

$$v_s = \rho_n f_y \quad (3.7)$$

โดยที่

ρ_n คือ อัตราส่วนของพื้นที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนต่อพื้นที่คอนกรีตตั้งฉากกับพื้นที่เหล็กเสริม

f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

สำหรับผนังเตี้ย เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนที่ใช้อาจมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ระบุในสมการ (3.7) อย่างไรก็ตามเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้งจะช่วยรับแรงเฉือน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด shear-friction เนื่องจากข้อมูลการทดสอบไม่เพียงพอต่อการพัฒนาข้อกำหนดสำหรับผนังเตี้ย จำนวนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้งจึงต้องกำหนดให้มีเท่ากับจำนวนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอนเมื่อ h_w/L_w มีค่าน้อยกว่า 0.5 ส่วนเมื่อ h_w/L_w มีค่ามากกว่า 2.5 ความต้องการเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยสุดคือ 0.0025 เท่าของพื้นที่รับแรงทั้งหมด

ข้อกำหนดเกี่ยวกับกำลังต้านทานแรงเฉือนจากแรงแผ่นดินไหว

มาตรฐาน ACI318-05 ได้เสนอข้อกำหนดพิเศษเกี่ยวกับกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวไว้ในบทที่ 21 โดยกำลังต้านแรงเฉือน V_n จะมีค่าตามสมการ (3.8)

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (3.8)$$

โดยที่

α_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1/4 สำหรับ $h_w/L_w \leq 1.5$, เท่ากับ 1/6 สำหรับ $h_w/L_w \geq 2.0$ และจะผันแปรเชิงเส้นระหว่าง 1/4 ถึง 1/6 สำหรับ h_w/L_w ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 (โดยที่ h_w คือความสูงผนัง และ L_w คือความกว้างผนัง)

A_{cv} คือ พื้นที่รับแรงทั้งหมดของหน้าตัดคอนกรีต โดยพิจารณาความหนาของผนัง และความยาวของหน้าตัดในทิศทางแรงเฉือน

ρ_n คือ อัตราส่วนของพื้นที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวขนานต่อพื้นที่คอนกรีตตั้งฉากกับพื้นที่เหล็กเสริม

กำลังต้านแรงเฉือนที่ให้อไว้ในสมการ (3.8) เพื่อป้องกันการวิบัติแบบแรงดึงในแนวทแยง (Diagonal tension failure) และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติแบบอัดแตกของคอนกรีตในส่วนผนัง (Web crushing failure) จึงได้กำหนดค่าแรงเฉือนสูงสุดจำกัดไว้ตามสมการ (3.9) สำหรับผนังหลายช่วง และ สมการ (3.10) สำหรับผนังช่วงเดียว

$$V_n \leq (2/3) A_{cv} \sqrt{f'_c} \quad (3.9)$$

$$V_n \leq (5/6) A_{cv} \sqrt{f'_c} \quad (3.10)$$

การสอบทวนข้อกำหนดกำลังต้านแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง

แนวคิดเกี่ยวกับการสร้างสมการของกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง นั้นมาจากการวิเคราะห์ความเค้นที่กำหนดให้มีเพียงหน่วยแรงเฉือนกระทำเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาความเค้นตามขวาง (ในแกน x) ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งได้ทำการศึกษาเมื่อ 30 กว่าปีที่ผ่านมามีเครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นในผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสม การศึกษานี้จึงได้นำผนังตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างต่างๆ กันมาทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นและนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในมาตรฐาน ACI318-05 เกี่ยวกับกำลังต้านแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง

1. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพจะใช้วิธีกำหนดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement method) วิธีการนี้จะสร้างและแก้สมการสมดุลของแรงกระทำภายนอกที่อยู่ในรูปของระยะการเคลื่อนที่ของจุดต่อชิ้นส่วน เมื่อทราบระยะการเคลื่อนที่ของจุดต่อแรงภายในและการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งใดๆ ของแต่ละชิ้นส่วนจะสามารถคำนวณได้

(Bathe, 1996) ในการสร้างสมการสมดุลสามารถทำได้โดยใช้หลักการของงานสมมติซึ่งให้ไว้ว่า เมื่อวัตถุที่อยู่ในสภาวะสมดุลมีระยะการเคลื่อนที่สมมติเล็กๆที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของฐานรองรับ งานสมมติภายในทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับงานสมมติภายนอกทั้งหมด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int_V \delta \mathbf{u}_B^T \mathbf{f}_B dV + \int_S \delta \mathbf{u}_S^T \mathbf{f}_S dS + \sum_i \delta \mathbf{U}_i^T \mathbf{F}_i \quad (3.11)$$

โดยที่

$\delta \mathbf{u}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สมมติ

$\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ คือ ความเครียดสมมติ

$\mathbf{f}_B, \mathbf{f}_S, \mathbf{F}_i$ คือ แรงกระทำเชิงปริมาตร, แรงกระทำเชิงพื้นผิว และ แรงกระทำเป็นจุด

$\delta \mathbf{u}_B, \delta \mathbf{u}_S, \delta \mathbf{U}_i$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สมมติที่สัมพันธ์กับแรง $\mathbf{f}_B, \mathbf{f}_S, \mathbf{F}_i$ ตามลำดับ

$\boldsymbol{\sigma}$ คือ ความเค้นที่สัมพันธ์กับความเครียดที่เกิดขึ้นจริง

ในการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งใดๆในแต่ละชิ้นส่วนจะถูกประมาณจากค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ โดยการใช้เมตริกซ์ประมาณค่าการเคลื่อนที่ดังสมการ

$$\mathbf{u}^{(m)}(x, y) = \mathbf{H}^{(m)}(x, y) \mathbf{U} \quad (3.12)$$

โดยที่

$\mathbf{u}^{(m)}$ คือ ค่าการเคลื่อนที่สำหรับชิ้นส่วน m

$\mathbf{H}^{(m)}$ คือ เมตริกซ์ประมาณค่าการเคลื่อนที่สำหรับชิ้นส่วน m

\mathbf{U} คือ เวกเตอร์ขององค์ประกอบของค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อของชิ้นส่วน m

ความเครียดในชิ้นส่วน $\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}$ หาได้จากค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อโดยใช้เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ $\mathbf{B}^{(m)}$ ดังสมการ

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}(x, y) = \mathbf{B}^{(m)}(x, y) \mathbf{U} \quad (3.13)$$

จากค่าความเครียดในชิ้นส่วน $\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}$ จะนำมาหาค่าความเค้นในชิ้นส่วน $\boldsymbol{\sigma}^{(m)}$ โดยอาศัยเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด $\mathbf{C}^{(m)}$ ดังสมการ

$$\boldsymbol{\sigma}^{(m)} = \mathbf{C}^{(m)} \boldsymbol{\varepsilon}^{(m)} \quad (3.14)$$

เมื่อนำค่าจากสมการ (3.12) (3.13) และ (3.14) ทั้งระบบจริงและระบบสมมติลงในสมการ (3.11) แล้วทำการจัดรูปจะได้สมการ

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (3.15)$$

โดยที่

\mathbf{K} คือ เมทริกซ์สติฟเนสเมื่อรวมทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

\mathbf{R} คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำซึ่งประกอบด้วย ค่าของแรงที่จุดต่อเทียบเท่าเนื่องจากแรงเชิงปริมาตร (\mathbf{R}_B) ค่าของแรงที่จุดต่อเทียบเท่าเนื่องจากแรงเชิงพื้นผิว (\mathbf{R}_S) และ เวกเตอร์ของแรงกระทำเป็นจุด (\mathbf{R}_C) โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{K} = \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C}^{(m)} \mathbf{B}^{(m)} dV^{(m)} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{R}_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}_B^{(m)} dV^{(m)} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{R}_S = \sum_m \int_{S^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}_S^{(m)} dS^{(m)} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{F} \quad (3.19)$$

แม้ว่าสมการ (3.11) จะเป็นจริงทั้งวัสดุแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น แต่สมการ (3.15) จะใช้ได้กับปัญหาของวัสดุเชิงเส้นเท่านั้น เนื่องจากสมการนี้สมมติให้เมทริกซ์สติฟเนสไม่ขึ้นกับค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อ ดังที่เห็นในสมการ (3.16) ว่าเมทริกซ์สติฟเนสจะสามารถหาได้จากเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและระยะการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อที่สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงกระทำสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ (3.15) อย่างไรก็ตามถ้าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น หรือถ้าหากวัสดุเกิดการเคลื่อนที่หรือเกิดความเครียดสูงๆ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด หรือเมทริกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่จะไม่คงที่และขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุในขณะนั้น ในกรณีนี้เมตริกซ์สติเฟนสและสมการสมดุลที่เกี่ยวข้องจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ทำให้การวิเคราะห์ต้องใช้กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำเพื่อหาจุดสมดุลที่แท้จริง ขั้นตอนการแทนค่าวนซ้ำสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดแรงกระทำที่จุดต่อ (\mathbf{R})
2. คำนวณระยะการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ (\mathbf{U}_i) จากสมการ (3.15)
3. คำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ในข้อ 2 โดยใช้สมการ (3.14) และนำค่าความเค้นมาคำนวณแรงกระทำ (\mathbf{F}_i) ที่ทำให้เกิดความเค้นนี้จากสมการ (3.20)

$$\mathbf{F}_i = \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \boldsymbol{\sigma}_i^{(m)} dV \quad (3.20)$$

4. ตรวจสอบสมดุลของแรงโดยการคำนวณผลต่างของแรงกระทำที่จุดต่อและแรงกระทำเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ ดังแสดงในสมการ (3.21) หากค่าผลต่างนี้มีค่ามากหมายความว่าโครงสร้างไม่อยู่ในสมดุลและต้องทำการคำนวณวนซ้ำโดยการคำนวณการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นจากสมการ (3.22) ซึ่งจะนำไปสู่ค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อที่ใกล้จุดสมดุลของโครงสร้างมากขึ้นโดยคำนวณได้จากสมการ (3.23) เพื่อกลับไปคำนวณแรง \mathbf{F}_i ใหม่ในขั้นตอนที่ 3 และวนซ้ำจนกระทั่งโครงสร้างอยู่ในสมดุล

$$\Delta \mathbf{F}_i = \mathbf{R} - \mathbf{F}_i \quad (3.21)$$

$$\mathbf{K}_{i+1} \Delta \mathbf{U}_{i+1} = \Delta \mathbf{F}_i \quad (3.22)$$

$$\mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{U}_i + \Delta \mathbf{U}_{i+1} \quad (3.23)$$

โดยที่

$\Delta \mathbf{F}_i$ คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำที่จุดต่อที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรง

$\Delta \mathbf{U}_{i+1}$ คือ การกระจัดที่เพิ่มขึ้น

2. แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกพัฒนา มาอย่างต่อเนื่อง คอนกรีตจะถูกสมมติให้เป็นวัสดุเนื้อเดียวโดยพิจารณาว่ารอยแตกร้าว นั้นกระจาย ไปทั่วชิ้นส่วนคอนกรีต (Smear crack concrete model) ในการวิเคราะห์จะนำความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองที่ได้กล่าวในบทที่ 2 มาพิจารณา ตามแนวแกนของความเครียดหลัก (Rotating crack model) หรือพิจารณาตามแนวแกนที่เกิดรอย แตกร้าวของคอนกรีต (Fixed crack model) สำหรับเหล็กเสริมจะกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนที่รับแรง ตามแนวแกนเท่านั้น โดยอาจจำลองให้กระจายตามชิ้นส่วนคอนกรีต (Smear reinforcing steel) หรือเป็นชิ้นส่วนข้อหมุน (Truss element) โดยมีปลายชิ้นส่วนที่โยงยึดกับจุดของชิ้นส่วนคอนกรีต (Discrete reinforcing steel model) ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองคอนกรีตแบบรอยแตก กระจายทั่วชิ้นส่วนและพิจารณาตามแนวแกนความเครียดหลัก ในส่วนของเหล็กเสริมจะจำลองให้ เป็นชิ้นส่วนข้อหมุน

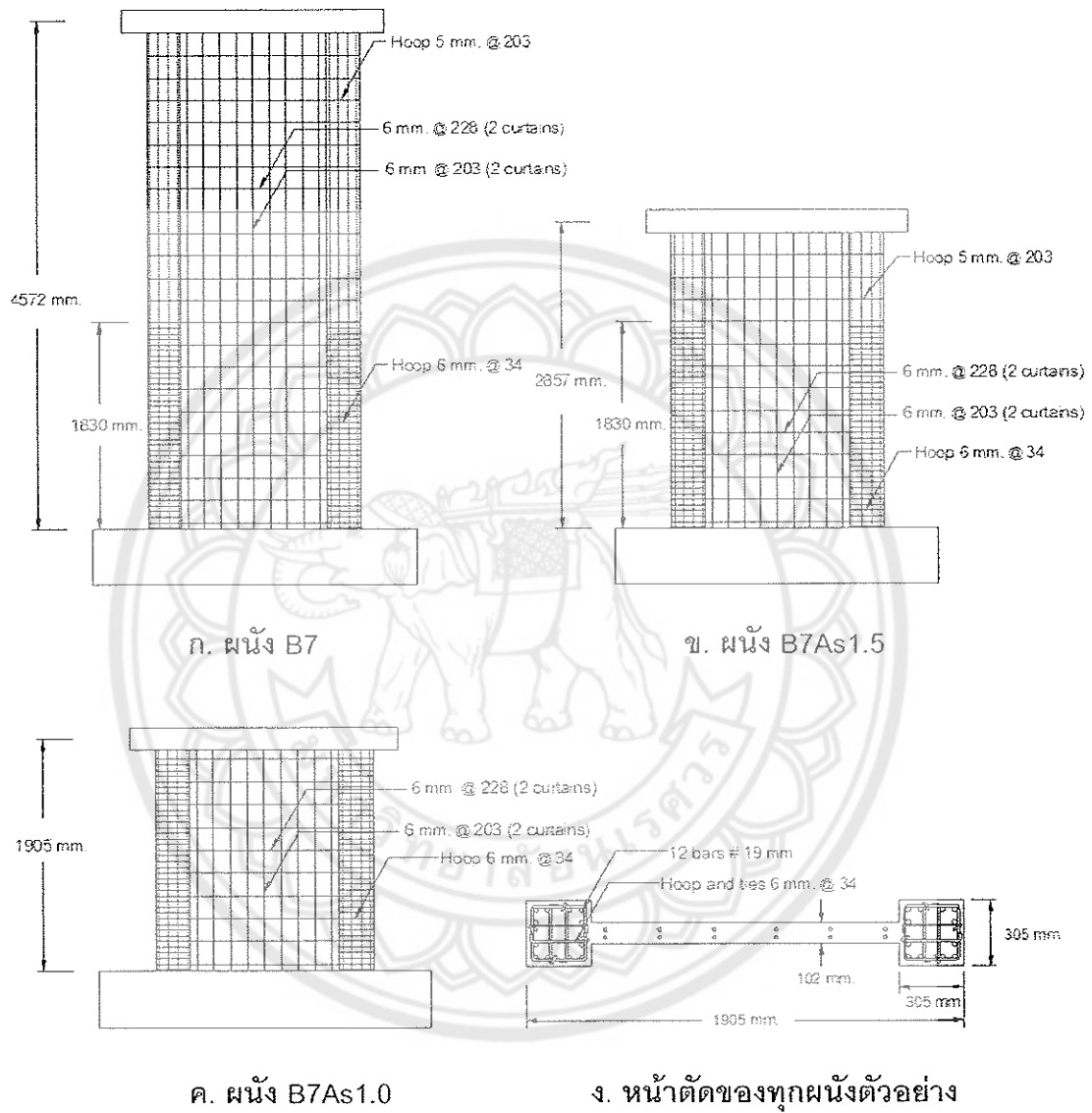
สำหรับการศึกษานี้ได้พัฒนาโปรแกรมย่อยของแบบจำลองวัสดุเพื่อใช้ในการ วิเคราะห์โครงสร้างร่วมกับโปรแกรมหลัก FINITE (Lopaz, et al., 1997) โดยใช้กระบวนการทางไฟ ไนต์เอลิเมนต์แบบวิธีรวมผลสถิติเฟสโดยตรงทำการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดย ระเบียบวิธีการทำซ้ำของนิวตัน – ราฟสัน ในการวิเคราะห์จะเริ่มจากการให้แรงตามแนวแกนคงที่ และเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ (Displacement control)

3. การเปรียบเทียบกำลังต้านแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง

ผนังตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ การศึกษานี้ได้เลือกผนังตัวอย่าง B7 ทดสอบโดย Oesterle, et al. (1979) มาทำการวิเคราะห์ ภาพ 12 แสดงขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็ก ของผนัง B7 และตาราง 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุและกำลังต้านแรงเฉือนตามข้อกำหนด ACI 318-05 ผนังตัวอย่างนี้ได้ทำการทดสอบโดยให้แรงตามแนวแกนคงที่เท่ากับ 1,193 kN และให้แรง ด้านข้างแบบวัฏจักร ผนัง B7 นี้มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 2.4 และเนื่องจากมีเหล็ก ตามยาวในเสามากจึงทำให้ผนังนี้มีกำลังรับแรงดัด (Flexural strength) ที่สูงกว่ากำลังรับแรงเฉือน แบบแตกร้าวในแนวทแยงที่ให้ไว้ในข้อกำหนด ACI318-05 กล่าวคือแรงด้านข้างที่ทดสอบได้มีค่า 980 kN สูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยงตามข้อกำหนด ACI318-05 ซึ่งมีค่า 824 kN

เพื่อทำการศึกษาผลของอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนังต่อกำลังรับแรง เฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง ผนังตัวอย่าง B7 นี้จึงถูกนำมาลดความสูงลงเพื่อให้มีอัตราส่วน ความสูงต่อความกว้างเท่ากับ 1.5 และ 1.0 เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ ผนังดังกล่าวจะยังคงมีการ

เสริมเหล็กในรูปแบบเดิมและจะถูกอ้างอิงถึงในการศึกษานี้ด้วยชื่อ B7As1.5 และ B7As1.0 ดังแสดง
ในภาพ 12(ข) และ 12(ค) ตามลำดับ

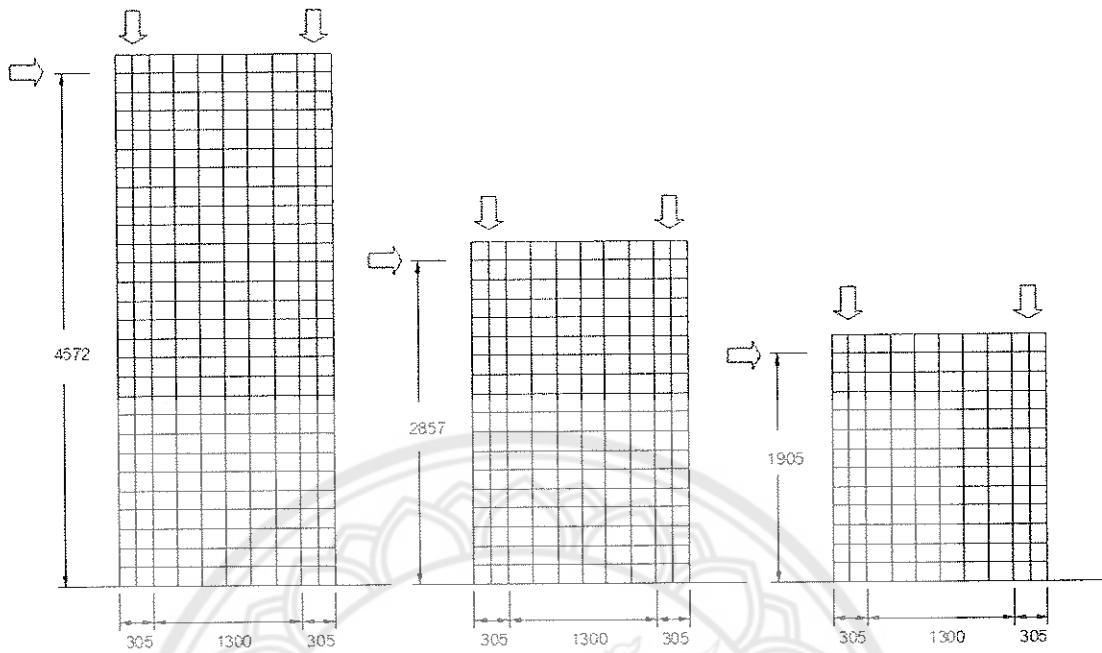


ภาพ 12 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของผนังตัวอย่าง B7

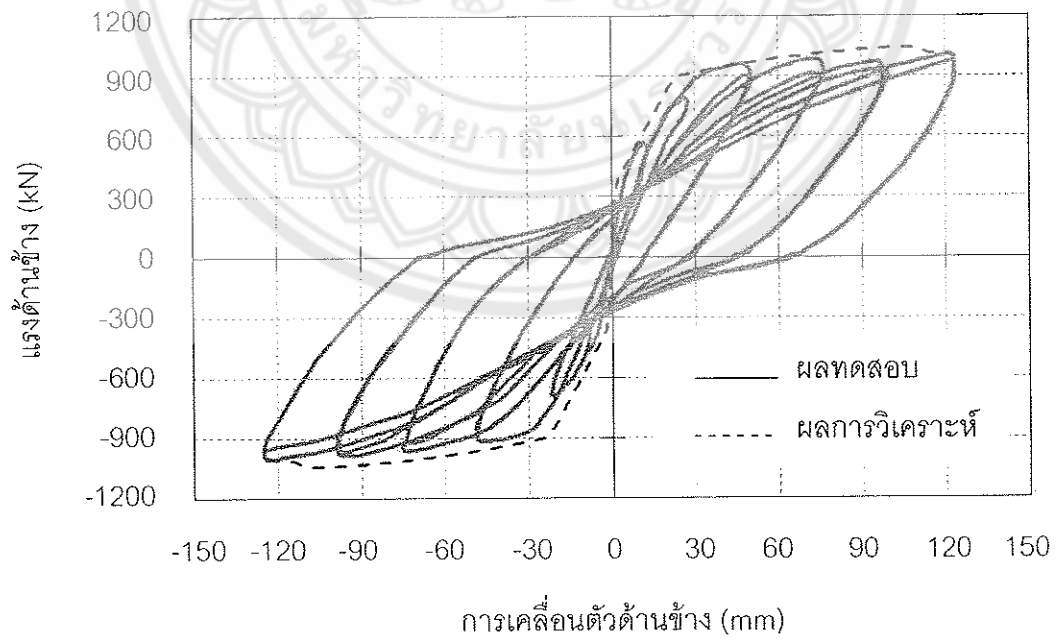
ตาราง 2 คุณสมบัติของวัสดุและกำลังต้านแรงเฉือนของผนัง B7

ข้อมูล	ค่า
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)	49.3
กำลังครากของเหล็กเสริม	
- เหล็กเสริมตามยาวในเสา (MPa)	457.9
- เหล็กเสริมรับแรงเฉือน (MPa)	489.6
อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง	2.4
สัมประสิทธิ์ α_c	0.167
อัตราส่วนเหล็กเสริมในแนวนอน	0.0063
กำลังรับแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยง (kN)	824
แรงต้านข้างสูงสุดจากการทดสอบ (kN)	980

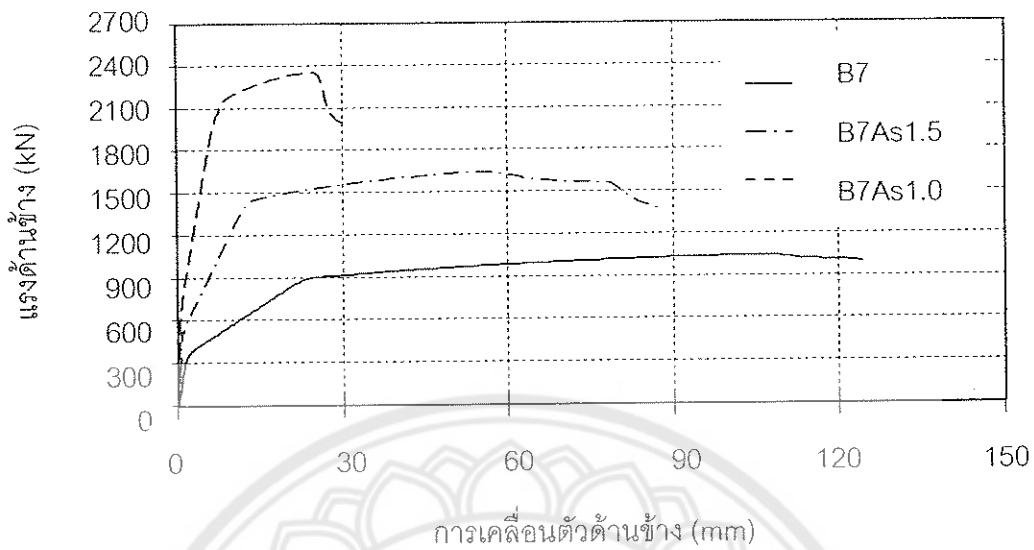
ภาพ 13 แสดงการจำลองผนังตัวอย่าง โดยคอนกรีตถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม และเหล็กเสริมถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนข้อหมุนโดยมีปลายชิ้นส่วนที่จุดของชิ้นส่วนคอนกรีต ภาพ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการทดสอบและจากการวิเคราะห์ของผนัง B7 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าสติเฟนส กำลังรับแรงต้านข้าง และการเคลื่อนตัวด้านข้าง สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี ภาพ 15 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผนังตัวอย่างที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างต่างๆ จะเห็นได้ว่าผนังที่มีความสูงลดลงจะมีกำลังรับแรงต้านข้างสูงขึ้นแต่จะมีความเหนียวลดลง



ภาพ 13 แบบจำลองชิ้นส่วนคอนกรีต



ภาพ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้างของผนัง B7



ภาพ 15 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้างของผนังตัวอย่าง

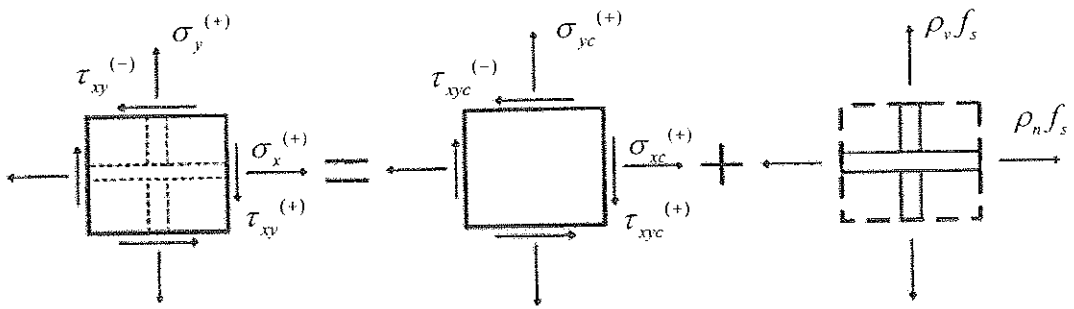
ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนคอนกรีตในแนวแกนความเครียดหลัก (แกน $r-d$ ในภาพ 16(ง)) พร้อมมุมของแกนความเครียดเทียบกับแกนพิกัดฉาก และความเค้นในเหล็กเสริม ในชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยชั้นส่วนคอนกรีตและชั้นส่วนเหล็กเสริมทั้งตามยาวและตามขวางตามภาพ 16 ค่าความเค้นรวมตามแนวแกนทั้งหมด ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) จะประกอบด้วยความเค้นที่แบกรับโดยชั้นส่วนของคอนกรีต ($\sigma_{x,c}, \sigma_{y,c}, \tau_{xy,c}$) และความเค้นที่แบกรับโดยเหล็กเสริมตามสมการ

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_{x,c} + \rho_n f_{s,n} \\ \sigma_y &= \sigma_{y,c} + \rho_v f_{s,v} \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy,c}\end{aligned}\quad (3.24)$$

โดยที่

ρ_n, ρ_v คือ อัตราส่วนพื้นที่เหล็กเสริมต่อพื้นที่คอนกรีตที่ตั้งฉากกับหน้าตัดเหล็กเสริมตามขวางและตามยาว ตามลำดับ

$f_{s,n}, f_{s,v}$ คือ ความเค้นของเหล็กเสริมตามขวางและตามยาว ตามลำดับ



ก. ชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก

ข. ชั้นส่วนคอนกรีต

ค. ชั้นส่วนเหล็กเสริม



ง. ชั้นส่วนคอนกรีต (แกน r - d)

ภาพ 16 ความเค้นในชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองวัสดุคอนกรีตจะถูกนำมาพิจารณาตามแนวแกนความเค้นดหลัก (แกน $r-d$ ในภาพ 16(ง)) ดังนั้นค่าความเค้นในคอนกรีตที่ได้จากการวิเคราะห์จะอยู่ในแนวแกน $r-d$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(\sigma_r, \sigma_d, 0)$ ซึ่งแปลงค่าความเค้นนี้ให้อยู่ในแกนพิกัดฉาก (แกน $x-y$) จะได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \sigma_{x,c} &= \sigma_d \sin^2 \theta + \sigma_r \cos^2 \theta \\ \sigma_{y,c} &= \sigma_d \cos^2 \theta + \sigma_r \sin^2 \theta \\ \tau_{xy,c} &= (\sigma_r - \sigma_d) \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \tag{3.25}$$

โดยที่

σ_r, σ_d คือ ความเค้นในแกนความเค้นดหลัก (แกน $r-d$)

σ_x, σ_y คือ ความเค้นในแกนพิกัดฉาก (แกน $x-y$)

τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนในแกนพิกัดฉาก

θ คือ มุมของแกนความเครียดเทียบกับแกนพิกัดฉาก

เมื่อนำความสัมพันธ์ของค่าความเค้นในคอนกรีตตามสมการ (3.25) แทนในสมการ (3.24) จะได้ความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนรูปเป็น

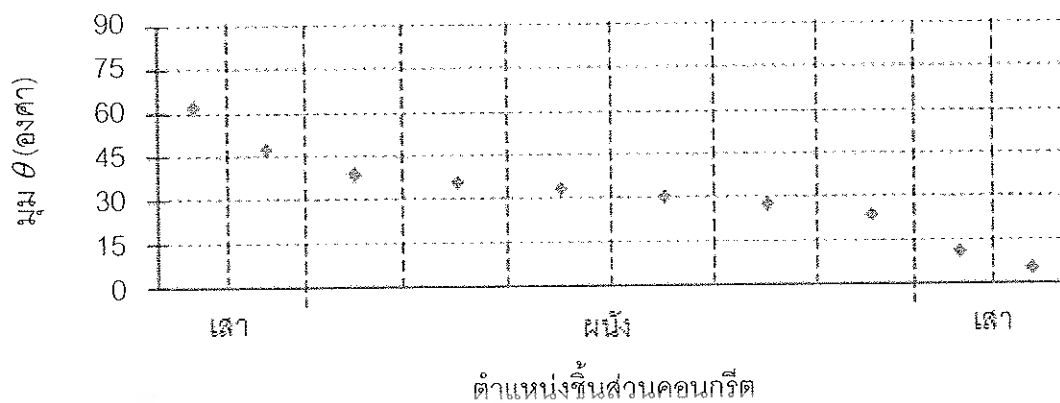
$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_d \sin^2 \theta + \sigma_r \cos^2 \theta + \rho_n f_{s,n} \\ \sigma_y &= \sigma_d \cos^2 \theta + \sigma_r \sin^2 \theta + \rho_v f_{s,v} \\ \tau_{xy} &= (\sigma_r - \sigma_d) \sin \theta \cos \theta\end{aligned}\quad (3.26)$$

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่แบกรับโดยคอนกรีต และหน่วยแรงเฉือนที่แบกรับโดยเหล็กเสริม จึงต้องแปลงความเค้นในแกน x (σ_x) ในสมการ (3.26) ให้อยู่ในรูปของความเค้นในแกนความเครียดหลัก (σ_d) ได้ดังสมการ

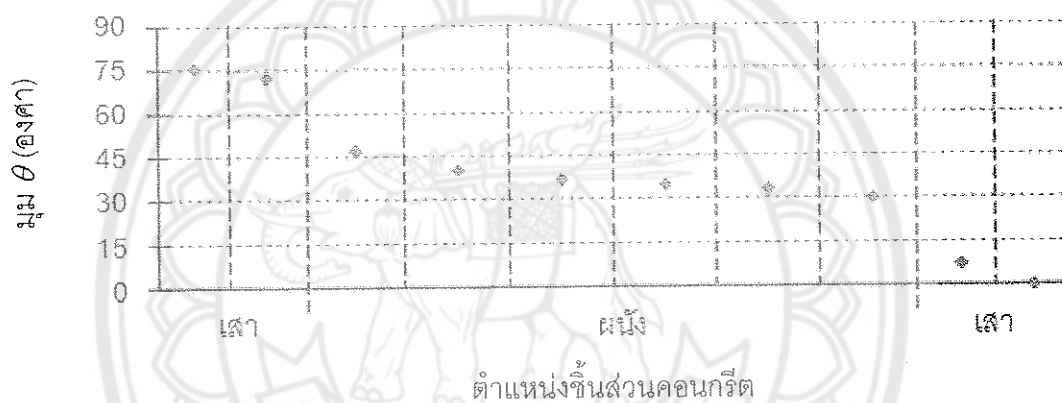
$$\sigma_d = \frac{\sigma_x - \sigma_r \cos^2 \theta - \rho_n f_{s,n}}{\sin^2 \theta}\quad (3.27)$$

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยงของ ACI318-05 ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ ณ จุดที่ให้แรงดัดข้างสูงสุดจะถูกนำมาพิจารณา โดยให้ความสนใจที่หน้าตัดครึ่งความสูงของแต่ละผนังตัวอย่าง ($h_w/2$) ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเกิดรอยแตกร้าวในทแยงเกิดขึ้น

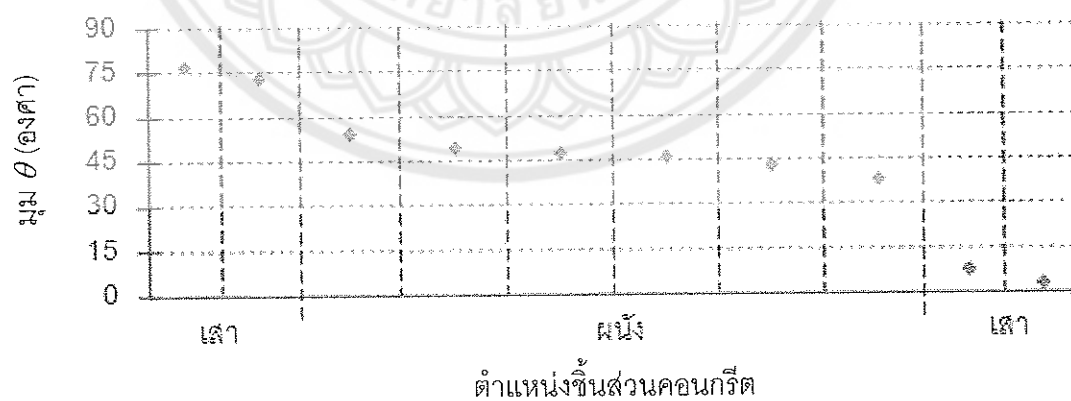
$$\tau_{xy} = \frac{(\sigma_r - \sigma_x) + \rho_n f_{s,n}}{\tan \theta}\quad (3.28)$$



ก. ผนังตัวอย่าง B7



ข. ผนังตัวอย่าง B7As1.5



ค. ผนังตัวอย่าง B7As1.0

ภาพ 17 การกระจายตัวของขนาดมมของแกนความเครียดเทียบกับแกนพิักัดฉาก

ภาพ 17 แสดงมุมผลต่างของแกนความเครียดหลักเทียบกับแกนพิกัดฉาก (θ) ของแต่ละชั้นส่วนคอนกรีตในผนังตัวอย่างต่างๆ จะเห็นได้ว่ามุมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30, 38 และ 45 องศา สำหรับผนัง B7, B7As1.5 และ B7As1.0 ตามลำดับ ค่ามุม θ นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความกว้างลดลง จากการพิจารณาสมการ (3.28) การกำหนดค่ามุม θ เท่ากับ 45 องศา จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนในเชิงปลอดภัยกว่าการใช้มุม 30 หรือ 38 องศา ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดให้ค่า θ เท่ากับ 45 องศา และความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.28) จะลดรูปลงเป็น

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_x) + \rho_n f_{s,n} \quad (3.29)$$

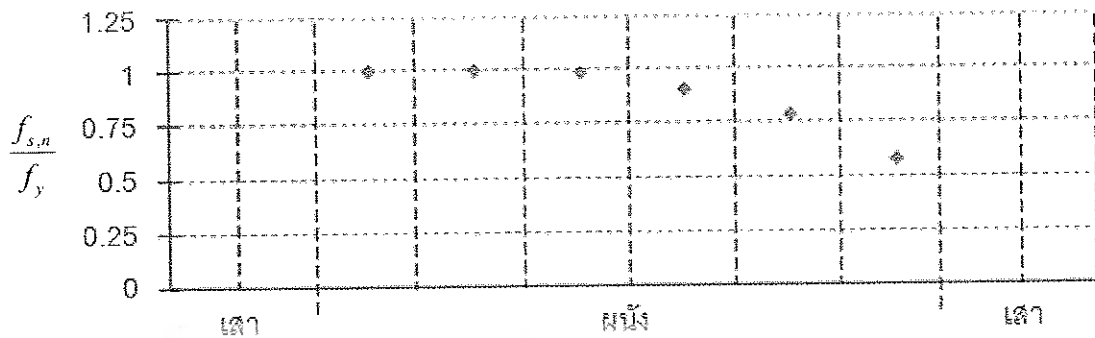
3.1 กำลังต้านแรงเฉือนแบกรับโดยคอนกรีต

ในข้อกำหนด ACI318-05 ให้ค่าความเค้นตามขวาง (σ_x) ในผนังมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากพิจารณาว่าไม่มีแรงภายนอกกระทำต่อผนังในแนวแกนตามขวาง (แกน x) และกำหนดให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงแตกร้าวในแนวทแยงประมาณ $\alpha_c \sqrt{f'_c}$ โดยที่ค่า α_c นั้นมีค่าเท่ากับ 1/4 สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างน้อยกว่า 1.5, เท่ากับ 1/6 สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างมากกว่า 2.0 และจะแปรผันเชิงเส้นระหว่าง 1/4 ถึง 1/6 สำหรับ อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างระหว่าง 1.5 ถึง 2.0

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบจึงได้นำค่าความเค้น ($\sigma_r - \sigma_x$) ที่หน้าตัดครึ่งความสูงของผนังจากการวิเคราะห์มาแสดงในภาพ 18 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตในผนัง B7, B7As1.5 และ B7As1.0 จะสามารถแบกรับแรงเฉือนได้ประมาณ 3.9, 7.6 และ 16.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าข้อกำหนด ACI318-05 ที่ให้ไว้เท่ากับ 1.2 MPa สำหรับผนัง B7 และ 1.8 MPa สำหรับผนัง B7As1.5 และ B7As1.0 ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากผนังเดี่ยวจะมีค่าความเค้นตามขวาง (ความเค้นในแกน x) มากกว่าผนังที่สูง ซึ่งค่าความเค้นตามขวางนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีเสาด้านข้างโอบรัดผนังระหว่างเสาไว้ ดังนั้นข้อกำหนด ACI318-05 ที่ตั้งสมมติฐานว่าค่าความเค้นตามขวางเป็นศูนย์นั้นจึงเป็นไปได้ในทางที่ให้ความปลอดภัยมาก โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้กับผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กเดี่ยวที่มีเสาโอบรัดด้านข้างที่แข็งแรง

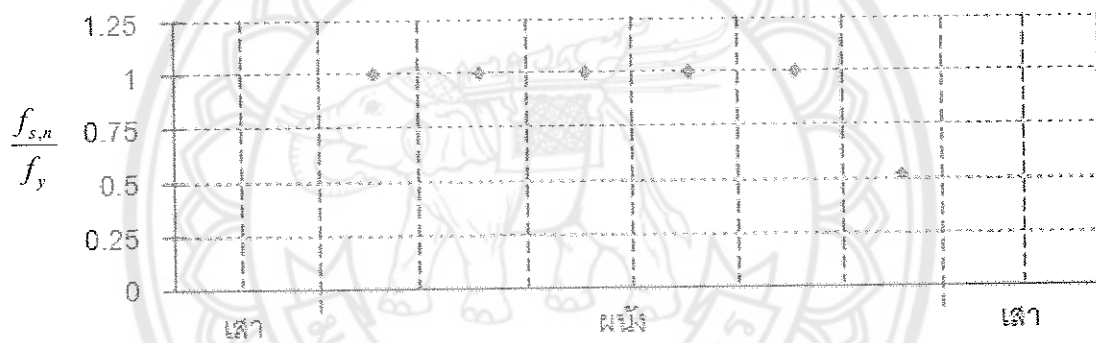
3.2 กำลังต้านแรงเฉือนแบกรับโดยเหล็กเสริม

ภาพ 19 แสดงค่าความเค้นของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวนอน โดยแสดงในรูปของค่าสัดส่วนของความเค้นในเหล็กเสริม $f_{s,n}$ ต่อ กำลังครากของเหล็กเสริม f_y ซึ่งพบว่าเหล็กเสริมในทุกผนังตัวอย่างเกิดการคราก และ สอดคล้องกับข้อกำหนด ACI318-05 ที่ให้ใช้กำลังครากของเหล็กเสริมในการคำนวณกำลังต้านแรงเฉือนแบกรับโดยเหล็กเสริมในการออกแบบ



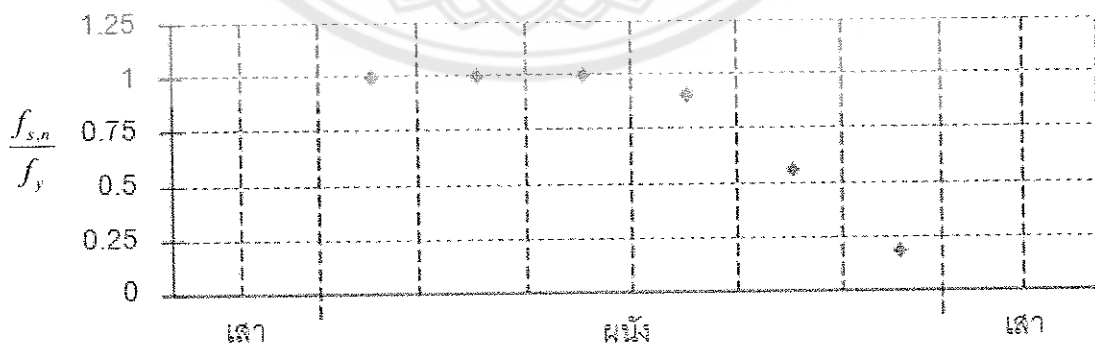
ตำแหน่งชั้นส่วนคอนกรีต

ก. ผนังตัวอย่าง B7



ตำแหน่งชั้นส่วนคอนกรีต

ข. ผนังตัวอย่าง B7As1.5



ตำแหน่งชั้นส่วนคอนกรีต

ค. ผนังตัวอย่าง B7As1.0

ภาพ 19 ความเค้นในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของผนังตัวอย่าง

จากการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยงของผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างข้อกำหนด ACI318-05 และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าข้อกำหนด ACI318-05 ให้กำลังรับแรงเฉือนแบบแตกร้าวในแนวทแยงในเชิงที่ปลอดภัยมาก เนื่องจากไม่พิจารณาค่าความเค้นตามขวางที่เกิดขึ้นในผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ได้ศึกษาผนังตัวอย่างที่มีรูปร่างแบบหัวค้อน (Barbell shape) ซึ่งมีเสาด้านข้างที่แข็งแรงโอบรัดผนังไว้ และ อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างในช่วงระหว่าง 1.0 - 2.4 สำหรับผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราความสูงต่อความกว้างมากกว่านี้และผนังที่ไม่มีเสาด้านข้างโอบรัดผนังไว้อาจจะได้ค่าความเค้นตามขวางลดลงและสอดคล้องกับข้อกำหนด ACI 318-05 ยิ่งขึ้นได้

การสอบทวนข้อกำหนดของกำลังต้านแรงเฉือนแบบอัดแตกของคอนกรีตในส่วนผนัง

ผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงด้านข้างกระทำจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการดัด (Flexural displacement) และ การบิดเฉือน (Shear distortion) ผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการออกแบบอย่างเหมาะสมจะต้องควบคุมไม่ให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนซึ่งจะเกิดการเสียกำลังในการรับน้ำหนักอย่างฉับพลัน หรือกล่าวในทางตรงข้ามจะต้องออกแบบให้ผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กวิบัติเนื่องจากแรงดัดซึ่งผนังสามารถเคลื่อนตัวทางด้านข้างได้โดยที่ไม่เสียกำลังได้ระดับหนึ่งก่อนเกิดการวิบัติ (Oesterle, et al., 1979) ในส่วนของการออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้ผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนแบบอัดแตกของคอนกรีตในส่วนผนัง (Web crushing failure) มาตรฐาน ACI318-05 จึงได้กำหนดกำลังรับแรงเฉือนจำกัดไว้ที่ $(2/3) A_c \sqrt{f'_c}$ สำหรับผนังหลายช่วง และ $(5/6) A_c \sqrt{f'_c}$ สำหรับผนังช่วงเดียว

เพื่อสอบทวนกำลังรับแรงเฉือนจำกัดที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ACI318-05 การศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกผนังกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กจากงานวิจัยที่ทำการทดสอบผนังโดยให้รับแรงด้านข้างและเกิดการวิบัติแบบอัดแตกของคอนกรีตในส่วนผนัง (Web crushing failure) มาจำนวน 9 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนัง B2 และ B5 จากงานวิจัยของ Oesterle, et al. (1976) ผนัง B6, B7, B8 และ B9 จากงานวิจัยของ Oesterle, et al. (1979) ผนัง W1 และ W2 จากงานวิจัยของ Sittipunt, Lukkunaprasit and Pattarattanakul (2001) และผนัง WC150 จากงานวิจัยของ Shaingchin, Lukkunaprasit and Wood (2007) มาศึกษาเปรียบเทียบกับข้อกำหนด

ตาราง 3 การเปรียบเทียบแรงดันทันข้างสูงสุดที่ได้จากการทดสอบผนังกับกำลังรับแรงเฉือนจำกัดที่หาได้ในมาตรฐาน ACI318-05

ผู้วิจัย	ผนังตัวอย่าง	f_c (MPa)	กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (kN)		
			แรงดันทันข้างสูงสุด (kN) (1)	$2/3\sqrt{f_c} A_c$ (2)	$5/6\sqrt{f_c} A_c$ (1)/(2) (1)/(3)
Oesterle, et al. (1976)	B2	53.57	704	944	1180
	B5	45.27	762	868	1085
	B6	21.81	825	602	753
Oesterle, et al. (1979)	B7	49.30	980	906	1132
	B8	41.93	978	835	1044
	B9	44.06	977	856	1070
Sittipunt, Lukkunaprasit and Pattararattanakul (2001)	W1	36.60	491	605	756
	W2	35.80	608	598	748
Shaingchin, Lukkunaprasit and Wood (2007)	WC150	27.30	870	679	849
					1.28

ตาราง 3 เปรียบเทียบแรงต้านข้างสูงสุดที่ได้จากการทดสอบผนังจำนวน 9 ตัวอย่างกับค่ากำลังรับแรงเฉือนจำกัดที่ให้ไว้ในข้อกำหนด ACI318-05 จะเห็นว่าในตัวอย่างผนัง B2, B5 และ W1 นั้นมีกำลังรับแรงเฉือนจำกัดตามสมการ (3.9) และ (3.10) ให้ค่าที่สูงกว่าแรงต้านข้างสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งไม่ปลอดภัยต่อการนำไปออกแบบ แต่ในบางตัวอย่าง เช่น ผนัง B6, WC150 นั้นมีค่ากำลังรับแรงเฉือนจำกัดที่ต่ำกว่าค่าแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ จึงมีข้อสังเกตว่าการกำหนดกำลังรับแรงเฉือนจำกัดเช่นนี้อาจจะไม่ใช่วิธีการที่ดีมากนัก

