บทที่ 4
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ต้องการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงร่วมระหว่างผนังทึบกับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนโดยประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM E 519-02 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลอบผนังทึบเปล่าและผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนและส่วนที่สองเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของผนังทึบและผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือน ด้วยการวิเคราะห์โดยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000

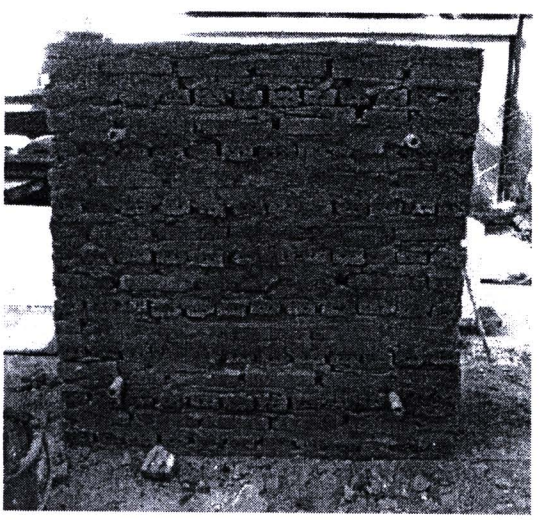
ดังที่กล่าวมาแล้วในบทนำสาเหตุที่ต้องแบ่งการศึกษาเป็นสองส่วนเนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้ไม่สามารถสังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบหลังการแตกร้าวได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมหลังการแตกร้าวผู้ศึกษาจึงได้สร้างแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการแตกร้าวของผนังทึบด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปในบทนี้

4.1 การทดสอบพฤติกรรมของผนังทึบรับแรงเฉือน

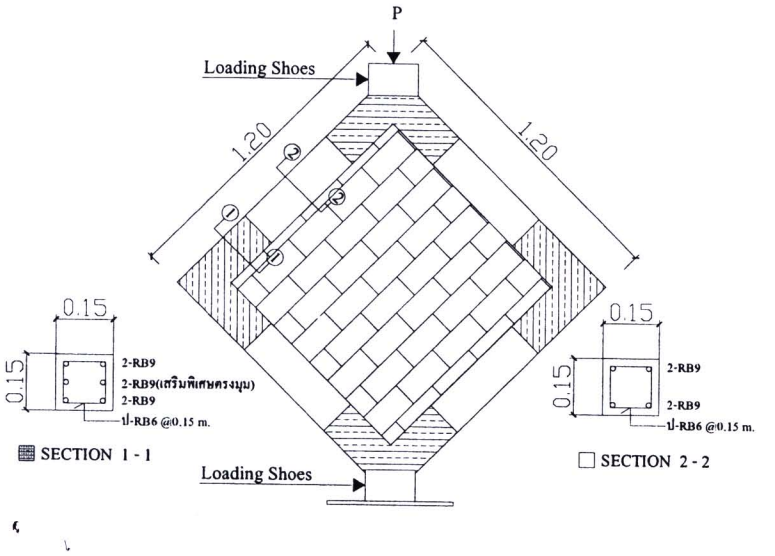
การทดลอบผนังทึบเปล่าและผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงร่วมระหว่างผนังทึบกับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนโดยประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM E 519-02 ในการทดสอบจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่งเป็นผนังทึบเปล่า และกลุ่มที่สองเป็นผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยผนังทึบทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีขนาด 90 × 90 ซม^2. ซึ่งผนังทึบก่อด้วยอิฐมอญ มีขนาดเฉลี่ย 6.15 × 13.6 × 3.2 ซม^3.และเป็นการก่อแบบเต็มแผ่น ผนังทึบทั้งสองด้านฉาบด้วยยิปซั่ม มีหน่วยแรงอัดประลัยของก้อนอิฐทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67-03a คือ 67 กก/ซม^2 และหน่วยแรงอัดประลัยปริซึมทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E447 - 92 B คือ 37.38 กก/ซม^2 สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ค่าหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้มีค่าเท่ากับ 90 กก/ซม^2 เหล็กเสริมคอนกรีตเป็นเหล็กชนิดเส้นกลมผิวเรียบ จำนวน 4 เส้น มีค่าหน่วยแรงดึง ณ จุดคราก 2,400 กก/ซม^2 และโมดูลัสยืดหยุ่น คือ 2,040,000 กก/ซม^2 สำหรับลักษณะของผนังทึบเปล่าที่ไม่มีการโอบรัด และผนังทึบที่มีการโอบรัดของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2

ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่หนึ่ง ประกอบด้วยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 3 ตัวอย่าง คือ UCF1, UCF2 และ UCF3 โดยตัวอย่างทั้งหมดมีขนาดเท่ากันและใช้วัสดุทั้งหมดชนิดเดียวกัน สำหรับตัวอย่างทดสอบ UCF1 และ UCF2 ได้ถูกติดตั้งไดอัลเกจ (dial gage) เพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวราบและแนวดิ่งรูปแบบเดียว คือ แบบเกจวัดยาว (long gage length) ส่วนตัวอย่างทดสอบ UCF3 ใช้ไดอัลเกจเพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวราบและแนวดิ่งสองรูปแบบ คือ แบบเกจวัดยาวและเกจวัดสั้น (short gage length)

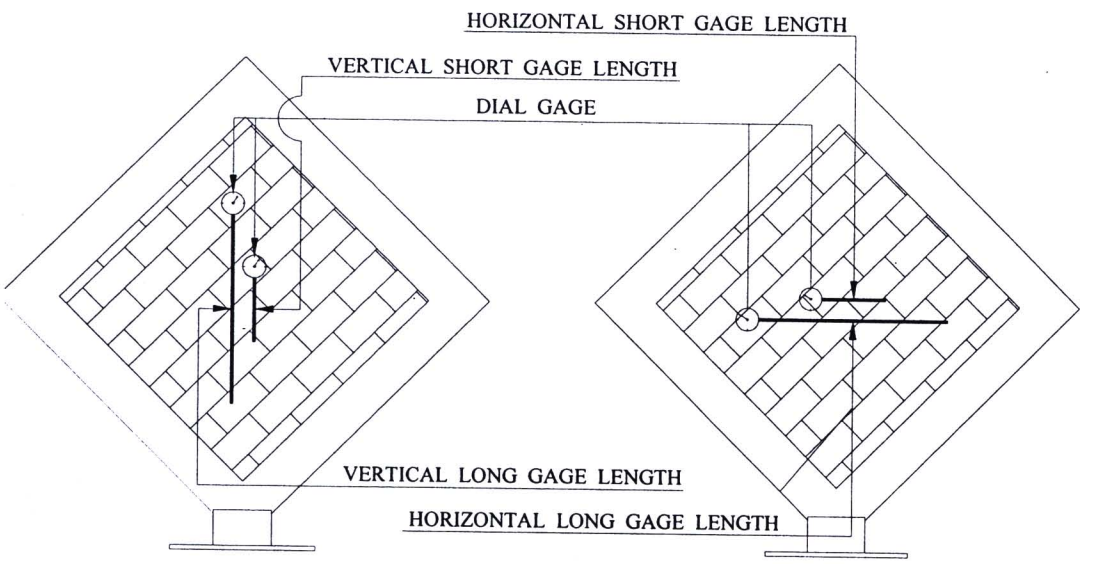
ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่สอง มีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่าง คือ CF1, CF2 และ CF3 โดยตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่างที่สองมีขนาด 120 x 120 ซม^2. (วัดจากขอบนอกถึงขอบนอกเมื่อวัดรวมโครงข้อแข็ง) และสำหรับผนังทึบเปล่าที่ถูกโอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดของผนังที่บเท่ากับ 90 x 90 ซม^2. และใช้วัสดุทั้งหมดชนิดเดียวกัน สำหรับตัวอย่าง CF1 ติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวราบและแนวดิ่งรูปแบบเดียว คือ แบบเกจวัดยาว ตัวอย่างทดสอบ CF2 และ CF3 ติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวราบและแนวดิ่งสองรูปแบบ คือ แบบเกจวัดยาวและแบบเกจวัดสั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.3 สำหรับค่าความละเอียดของไดอัลเกจและความยาวของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่หนึ่งและกลุ่มที่สอง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 (ผนังทึบเปล่าที่ไม่มีการโอบรัด)



ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 (ผนังทึบที่มีการโอบรัด)



ภาพที่ 4.3 การติดตั้งไดอัลเกจแบบเกจวัดยาวและแบบเกจวัดสั้น

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของไดอัลเกจและความยาวของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2

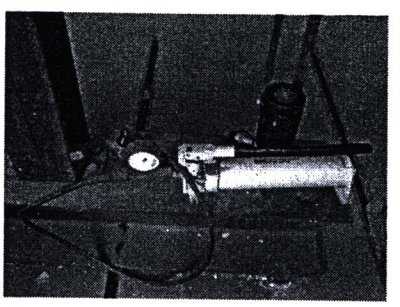
ตัวอย่างทดสอบ	Long gage length (cm.)	Short gage length (cm.)	ความละเอียดของไดอัลเกจ (mm.)
UCF1	80.7[a] , 83.2[b]	-	0.001
UCF2	82.0[a] , 82.5[b]	-	0.001
UCF3	82.2[a] , 82.5[b]	40.0[a] , 42.0[b]	0.001
CF1	85.5[a] , 86.0[b]	-	0.001
CF2	86.0[a] , 90.0[b]	47.0[a] , 40.0[b]	0.001
CF3	76.0[a] , 82.5[b]	44.5[a] , 45.5[b]	0.001

[a]ความยาวของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวราบ

[b]ความยาวของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวดิ่ง

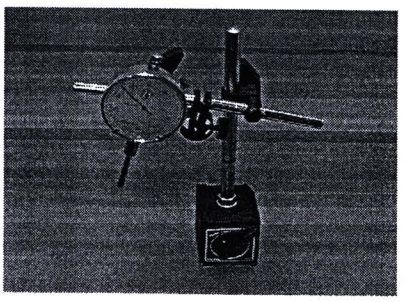
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) อุปกรณ์ให้แรงกับชิ้นตัวอย่างทดสอบ hydraulic jack ใช้ร่วมกับ load cell และ data logger ดังแสดงในภาพที่ 4.4



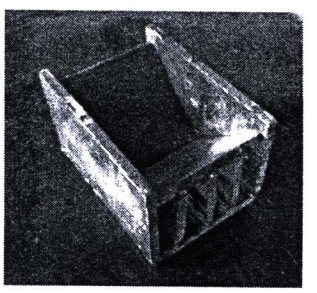
ภาพที่ 4.4 อุปกรณ์ให้แรงกับชิ้นตัวอย่างทดสอบ

2) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ ไดอัลเกจที่มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.5



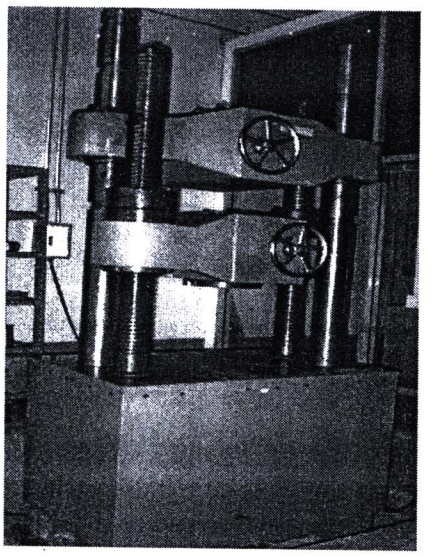
ภาพที่ 4.5 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ ไดอัลเกจ

3) อุปกรณ์ถ่ายแรงให้กับตัวอย่างทดสอบ loading shoes จำนวน2 อัน ดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 อุปกรณ์ถ่ายแรงให้กับตัวอย่างทดสอบ

4) Universal Testing Machine ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 อุปกรณ์ Universal Testing Machine

4.1.2 วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของกำแพงก่ออิฐขนาดเล็กตามมาตรฐาน ASTM 447

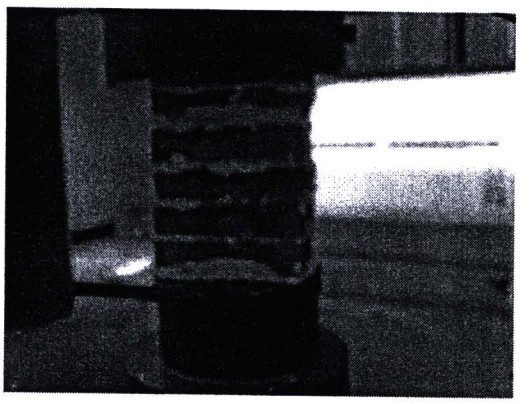
1) ทำการปรับผิว (capping) อิฐก้อนล่างสุดของ Prism 1 ด้าน ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำการปรับผิวคือ ปูนพลาสเตอร์และน้ำ โดยใช้อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก การปรับผิวนี้จะมีความหนาประมาณ 3 mm และจะต้องมีความลาดเอียงไม่เกิน 0.076 mm ต่อ 406.4 mm จากนั้นทำการบ่มปูนพลาสเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการก่อ Prism

2) นำก้อนอิฐตัวอย่างที่จะถูกก่อเป็น Prism แช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดการดูดซึมน้ำของอิฐจากปูนก่อ (Mortar)

3) ทำการผสมปูนก่อ ในการทดสอบนี้ กำหนดให้ปูนก่อมีเปอร์เซ็นต์การไหล (Percent flow) เท่ากับ 100% ถึง 115% ส่วนผสมของปูนก่อผสมเสร็จต่อทรายเท่ากับ 1:3 โดยปริมาตรโดยใช้น้ำ 70% ของน้ำหนักปูนก่อผสมเสร็จ ปูนก่อผสมเสร็จที่ใช้ในการทดสอบคือปูนตราเสือ ซึ่งถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต ปูนก่อที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องใช้ภายในเวลา 3 ชั่วโมง

4) ทำการก่อ Prism จำนวน 5 ชุด โดยวางอิฐแบบ Stretcher และมีรอยต่อแบบ Flush joint ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ให้ได้ Prism ที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h / t) เท่ากับ

3.00 ความหนาของรอยต่อของ Prism จะเป็นแบบไม่มีการตรวจสอบ (Uninspected prism) โดยขึ้นอยู่กับช่างผู้ก่อ กำหนดให้รอยต่อมีความหนา 1 cm



ภาพที่ 4.8 การก่อ Prism เพื่อทดสอบหาหน่วยแรงอัด

5) การบ่มหลังการก่อ สำหรับ Prism ที่ไม่มีการตรวจสอบ การบ่มหลังการก่อจะเป็นแบบตั้งทิ้งไว้ในอาคารจนถึงวันที่การทดสอบ

6) ทำการปรับผิวอิฐก้อนบนสุดของ Prism ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชม.

7) ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดที่ 7 วันและ 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine บันทึกค่าของแรงกดอัดและค่าการหดตัวของ Prism ตลอดการทดสอบ

8) นำผลการทดสอบที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดประลัย (Ultimate compressive stress) ของ Prism จากสมการ

$$f_m = \frac{F}{A} \tag{4.1}$$

โดยที่

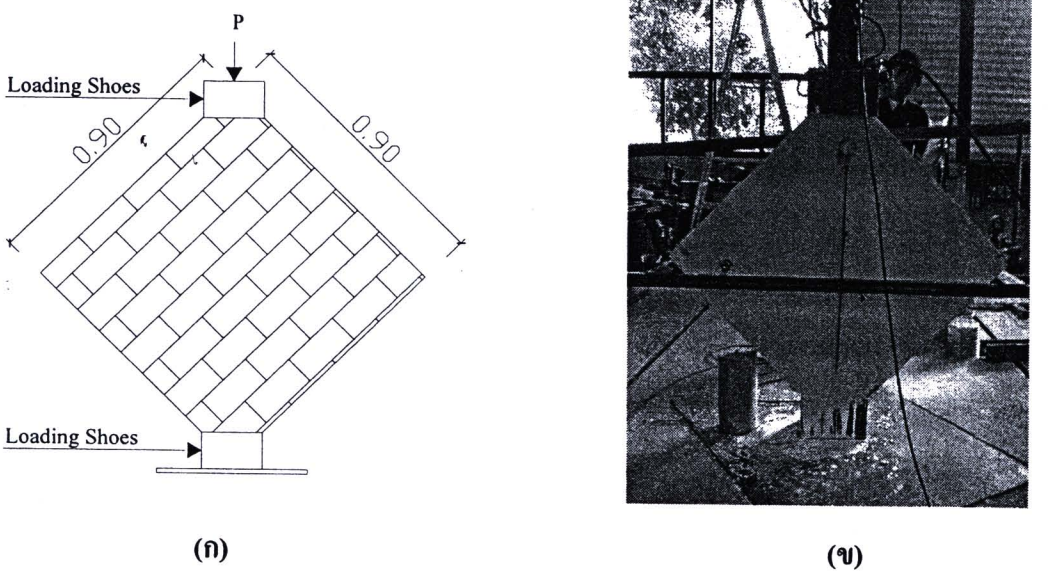
f_m = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของ Prism มีหน่วยเป็น N /m^2 หรือ Pa

F = แรงกระทำสูงสุด มีหน่วยเป็น N

A = พื้นที่เฉลี่ยของผิวด้านบนและล่างของตัวอย่างทดสอบที่รองรับแรงกดอัด มีหน่วยเป็น m^2

4.1.3 วิธีการทดสอบผนังทึบเปล่าและผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนตามมาตรฐาน ASTM 447-92B

1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบพร้อมอุปกรณ์ให้แรง โดยปรับตัวอย่างทดสอบให้ได้ระดับและติดตั้ง loading shoes ที่มุมบนและล่างของตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นจึงติดตั้งอุปกรณ์ให้แรง ดังแสดงในภาพที่ 4.9(ก) - (ข)



(ก) (ข)

ภาพที่ 4.9 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบผนังทึบเปล่า

2) ให้แรงกับตัวอย่างทดสอบจาก hydraulic jack แล้วส่งถ่ายผ่าน loading shoes ที่มุมบนของตัวอย่างทดสอบโดยใช้วิธีการควบคุมแรง (load control) ซึ่งเพิ่มแรงครั้งละ 5 กิโลนิวตัน แล้วค้างแรงไว้ 2 นาที จนตัวอย่างทดสอบวิบัติ แต่ในตัวอย่างทดสอบผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กจะให้แรง 2 รอบ คือ ขั้นตอนแรกให้แรงในรอบที่หนึ่งไปจนถึงจุดที่ผนังทึบภายใต้การโอบรัดโดยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กวิบัติ หลังจากนั้นจะคลายแรงออกจนหมด จึงทำการให้แรงในรอบที่สองใหม่จนโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่โอบรัดผนังทึบวิบัติ

3) อ่านค่าการเสียรูปและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวดิ่งและแนวนอน โดยอ่านจากไดอัลเกจที่ติดตั้งในตัวอย่างทดสอบและการอ่านไดอัลเกจทำการอ่าน 2 ครั้ง คือเมื่อให้แรงกับเมื่อค้างแรงไว้ 2 นาที โดยค่าการเสียรูปที่นำไปใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสียรูปคือค่าการเสียรูปที่อ่านจากการค้างแรงกระทำ 2 นาที และไม่ใช้ค่าเฉลี่ย

4) สังเกตการเกิดรอยแตกร้าวทุกครั้งที่เพิ่มแรงให้กับตัวอย่างทดสอบพร้อมกับบันทึกรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น

5) หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสียรูปสัมพัทธ์ เพื่อเปรียบเทียบผลของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 สำหรับการเสียรูปสัมพัทธ์คำนวณได้ดังสมการที่ 4.2

$$\delta_r = \delta_t - \delta_b \tag{4.2}$$

เมื่อ δ_r คือ การเสียรูปสัมพัทธ์ (มม.)

δ_t คือ การเสียรูป ณ ตำแหน่งบนสุดของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (มม.)

δ_b คือ การเสียรูป ณ ตำแหน่งล่างสุดของเกจวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (มม.)

6) ค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือนของผนังทึบเปล่ากับผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n} \tag{4.3}$$

เมื่อ S_s คือ หน่วยแรงเฉือนบนพื้นที่สุทธิ, MPa

P คือ แรงกระทำ, N

A_n คือ พื้นที่สุทธิของตัวอย่าง, mm^2 คำนวณได้จาก

$$A_n = \left(\frac{w+h}{2}\right)tn \tag{4.4}$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของตัวอย่าง, mm

h คือ ความสูงของตัวอย่าง, mm

t คือ ความหนาทั้งหมดของตัวอย่าง, mm

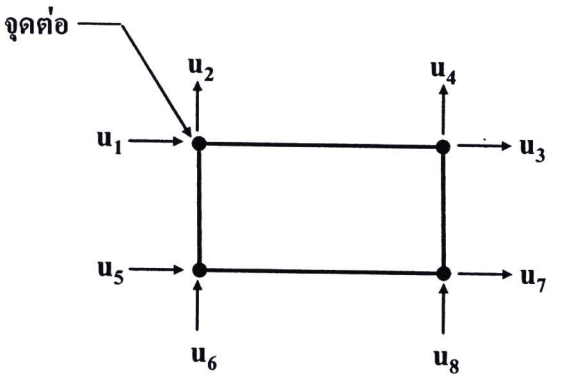
n คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดของอิฐ(เป็นเลขทศนิยม)

4.2 การวิเคราะห์โดยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000

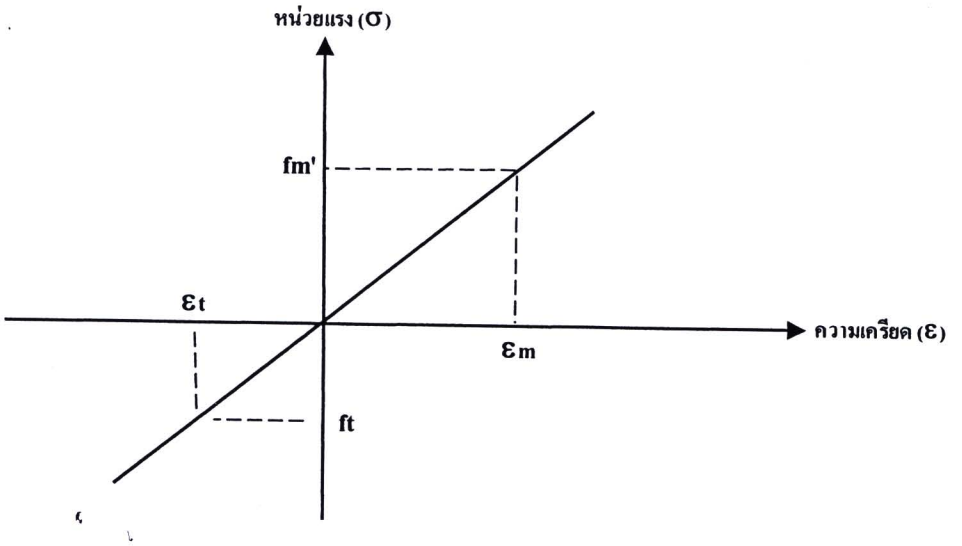
สำหรับการวิเคราะห์โดยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 ในการศึกษานี้ ใช้การจำลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้น เพื่อจำลองพฤติกรรมของผนังทึบภายใต้แรงเฉือน สำหรับชิ้นส่วนและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองจะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 แบบจำลองผนังทึบเปล่า

แบบจำลองพฤติกรรมของผนังทึบเปล่าที่จำลองในโปรแกรม SAP2000 ที่ใช้มี 2 แบบ คือ กลุ่มแรกเป็นชิ้นส่วนผนังทึบที่ถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นเท่านั้นและถูกจำลองโดยชิ้นส่วนแบบ Plane Stress Element แต่ละชิ้นส่วนมีจุดต่อ 4 จุด (Four-node Quadrilateral Element) และมีดีกรีอิสระ 2 ดีกรีต่อจุดต่อ โดยกำหนดให้มีขนาดชิ้นส่วนย่อยแต่ละชิ้นส่วนประมาณ 9 x 9 ซม^2. ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และกำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ของแบบจำลองผนังทึบรับแรงเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังแสดงในภาพที่ 4.11 โดยที่ f'_m คือ หน่วยแรงอัดประลัยของผนังทึบ ε_m คือ ความเครียดอัดประลัยของผนังทึบ f_t คือ หน่วยแรงดึงประลัยของผนังทึบ ε_t คือ ความเครียดดึงประลัยของผนังทึบ



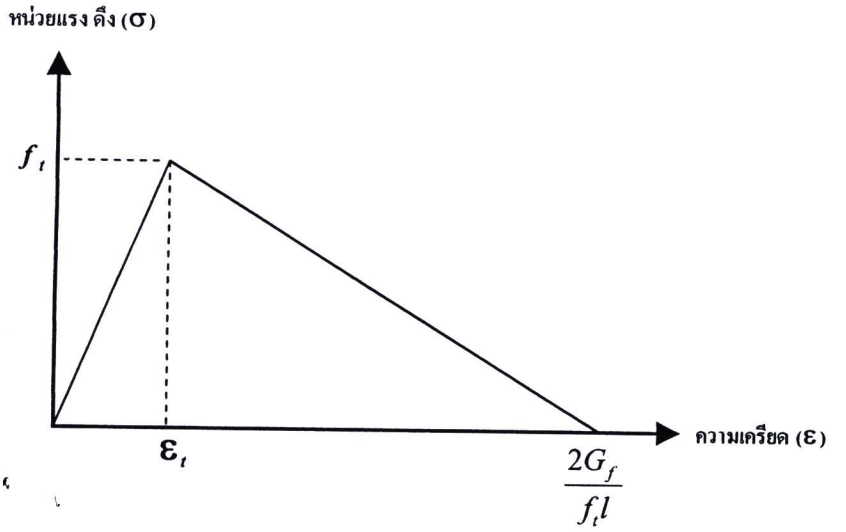
ภาพที่ 4.10 Four-node Quadrilateral Plane Stress Element ที่ใช้ในการจำลองผนังทึบเปล่า



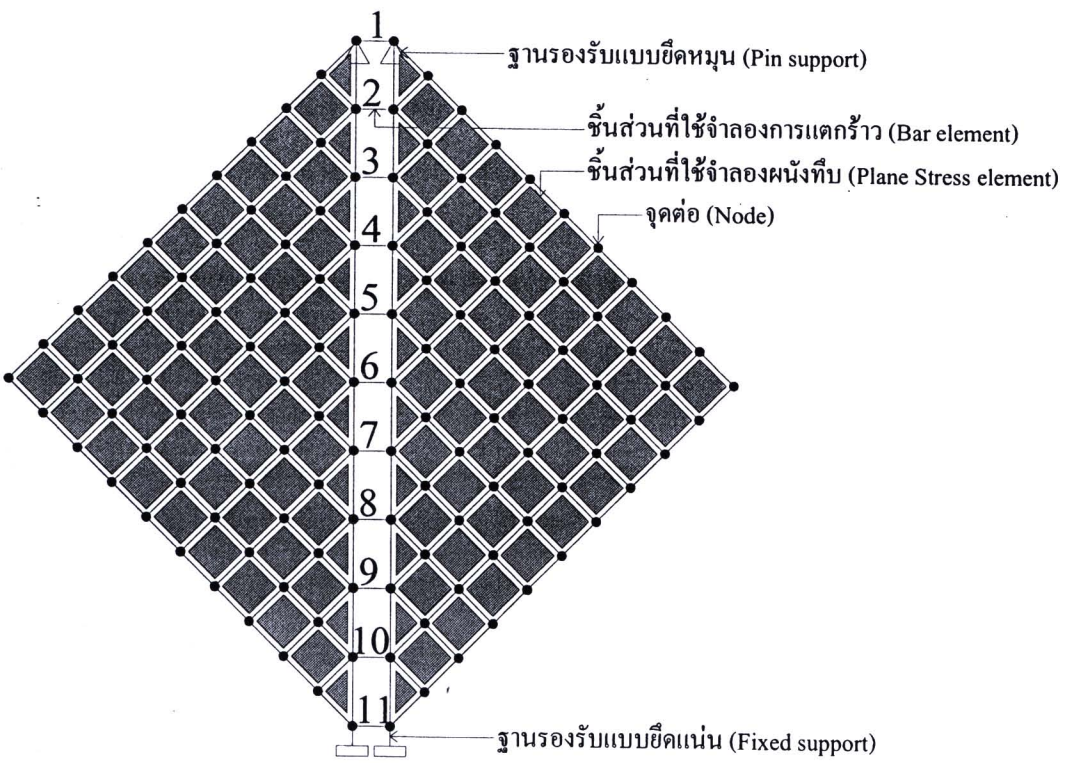
ภาพที่ 4.11 คุณสมบัติของแบบจำลองชิ้นส่วนแบบระนาบ

สำหรับกลุ่มที่สองจะใช้ชิ้นส่วนย่อยแบบ Bar element ในการจำลองพฤติกรรมการแตกร้าว โดยที่แต่ละชิ้นส่วนมีจุดต่อ 2 จุดและมีดีกรีอิสระ 2 ดีกรีต่อจุดต่อ มีความยาว (l) 1 ซม. มีพื้นที่หน้าตัด 190.8 ตร.ซม. ดังแสดงในภาพที่ 4.12 สำหรับพฤติกรรมของชิ้นส่วนแบบแท่งที่จำลองการเกิดการแตกร้าวนั้นกำหนดให้เลยพิกัดยืดหยุ่น การแตกร้าวในผนังทึบขึ้นอยู่กับพลังงานการแตกร้าว (Fracture Energy: G_f) โดยสมมติเท่า 0.10 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.13 สำหรับกำลังรับแรงดึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของหน่วยแรงอัดประลัย แบบจำลองของผนังทึบเปล่าที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.14

ภาพที่ 4.12 ชิ้นส่วนแบบแท่ง (Bar element) ที่ใช้ในการจำลองการแตกร้าวอย่างง่าย



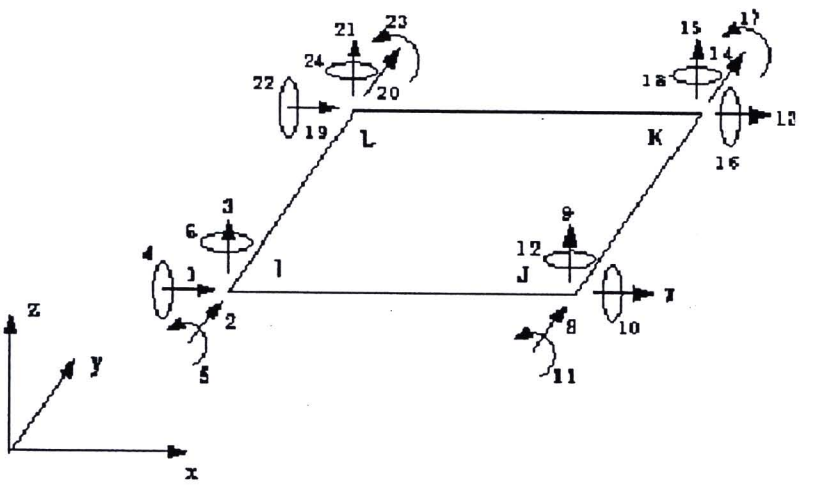
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่ใช้ในชิ้นส่วนแบบแท่ง



ภาพที่ 4.14 แบบจำลองผนังทึบสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000

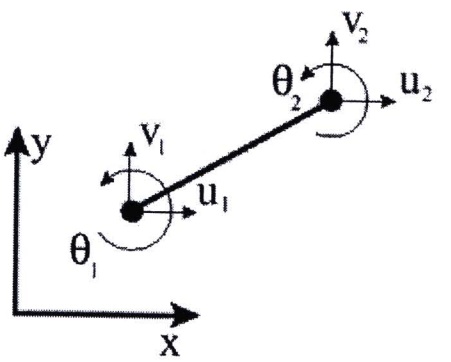
4.2.2 แบบจำลองผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีแบบจำลอง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่งชิ้นส่วนผนังทึบ โดยแบบจำลองของผนังทึบในหัวข้อนี้จะจำลองคล้ายกับหัวข้อ 4.2.1 กล่าวคือ มีการจำลองชิ้นส่วนผนังทึบแบบยืดหยุ่นและชิ้นส่วนจำลองการแตกร้าว แต่สิ่งที่แตกต่างจากหัวข้อ 4.2.1 คือแบบจำลองชิ้นส่วนของผนังทึบจะใช้แบบจำลองชิ้นส่วนแบบ Shell Element มีขนาดชิ้นส่วนโดยประมาณ 9 x 9 ซม. ซึ่งชิ้นส่วนลักษณะนี้สามารถจำลองพฤติกรรมในลักษณะที่เป็นระนาบ 2 มิติ หรือ 3 มิติก็ได้ แต่ละชิ้นส่วนแบบ Shell มีจุดต่อ 4 จุด และมีดีกรีอิสระ 6 ดีกรีต่อจุดต่อ ดังแสดงในภาพที่ 4.15 โดยกำหนดให้คุณสมบัติของแบบจำลองผนังทึบในหัวข้อที่ 4.2.2 มีคุณสมบัติเหมือนแบบจำลองผนังทึบหัวข้อที่ 4.2.1 ทุกประการ

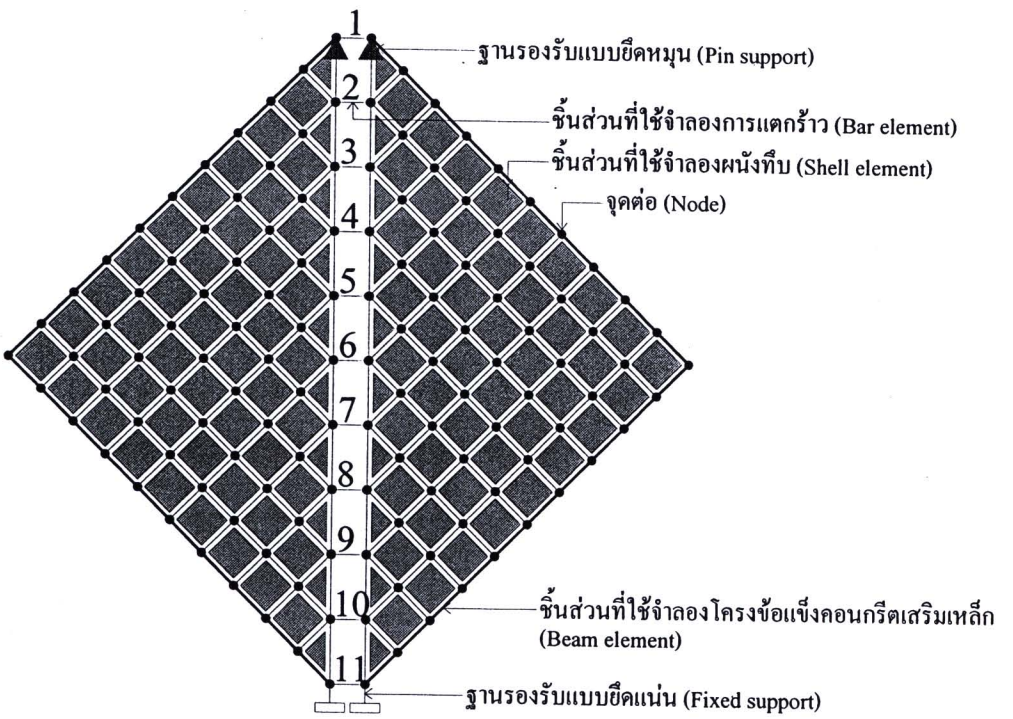


ภาพที่ 4.15 ชิ้นส่วนแบบ Shell Element มีจุดต่อ 4 จุด

สำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่โอบรัดผนังทึบจะถูกจำลองโดยชิ้นส่วนแบบ Beam Element โดยเป็นชิ้นส่วนที่มีจุดต่อ 2 จุด มีดีกรีอิสระ 3 ดีกรีต่อจุดต่อ มีพื้นที่หน้าตัด 190.8 ตารางเซนติเมตร เสริมเหล็กมีพื้นที่หน้าตัดรวม 2.54 ตารางเซนติเมตร (4-RB9) ดังแสดงในภาพที่ 4.16 แบบจำลองของผนังทึบเปล่าที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.17 ในการศึกษาครั้งนี้การใช้โปรแกรม SAP2000 สามารถกำหนดให้พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปตามข้อกำหนดของ FEMA356



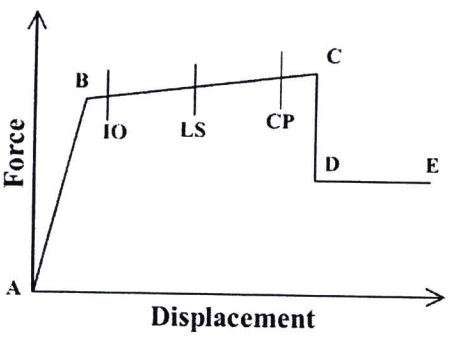
ภาพที่ 4.16 ชิ้นส่วนแบบคานมีจุดต่อ 2 จุด



ภาพที่ 4.17 แบบจำลองผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000

4.2.3 การกำหนดคุณสมบัติของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับคุณสมบัติของแบบจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กจะกำหนดให้ไปตามข้อกำหนดใน FEMA356 ดังแสดงในภาพที่ 4.18 และ 4.19 สำหรับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้จำลองพฤติกรรมของผนังทึบและผนังทึบที่โอบรัดด้วยโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.18 แบบจำลองพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก (FEMA356, 2000)

จากภาพที่ 4.18 จุด A คือ จุดที่ไม่มีแรงและการเคลื่อนที่

จุด B คือ จุดคราก

จุด C คือ จุดรับแรงสูงสุดโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี pushover

จุด D คือ จุดแสดงกำลังที่เหลือจากจุดรับแรงสูงสุด

จุด E คือ จุดวิบัติของโครงสร้าง

Table 6-7 *Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams*

Conditions			Modeling Parameters[3]			Acceptance Criteria[3]				
			Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians				
						Performance Level				
							Component Type			
							Primary		Secondary	
			a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP
i. Beams controlled by flexure[1]										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf.[2]	$\frac{V}{b_w d\sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
ii. Beams controlled by shear[1]										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span[1]										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint[1]										
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

1. When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.
2. "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ $d/3$, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_s) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.
3. Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.

ภาพที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน FEMA356

สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผนังทึบที่ใช้ในแบบจำลองในหัวข้อที่ 2.1และ2.2 คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 (El-Dakhakhni et. al, 2003)

$$E_\theta = \frac{1}{\frac{(\cos\theta)^4}{E_0} + \left(\frac{-2\upsilon_{0-90}}{E_0} + \frac{1}{G}\right)(\cos\theta)^2(\sin\theta)^2 + \frac{(\sin\theta)^4}{E_{90}}} \quad (4.1)$$

โดยที่ E_θ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของผนังทึบ

E_{90} คือ มีค่าเท่ากับ 850 เท่าของหน่วยแรงอัดของผนัง (Chin Kong Seah, 1998)

E_0 คือ มีค่าเท่ากับ $0.8E_{90}$ (Chin Kong Seah, 1998)

G คือ มีค่าเท่ากับ $0.4E_{90}$ (Chin Kong Seah, 1998)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง

	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	หน่วยแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	หน่วยแรงดึง (กก./ตร.ซม.)	หน่วยแรง ณ จุดราก (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ซม.)	อัตราส่วนปัวร์ซอง
ผนังก่ออิฐ	29729	37	4	-	1800	0.19[1]
คอนกรีต	143441	90	10	-	2323	0.15[1]
รอยแตกร้าว	29429	37	4	-	1800	0.19[1]
เหล็กเสริม	2040000	-	-	2400	7850	0.30

([1] รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ , 2543)

4.2.4 วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000

1) การวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 ใช้วิธีการควบคุมการเสียรูป โดยกำหนดให้มุมบนสุดมีฐานรองรับแบบยึดหมุน (Pin Support) เพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ โดยการเคลื่อนที่ที่ให้กับตัวอย่างทดสอบเป็นการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเท่านั้น

2) การวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 กำหนดให้แบบจำลองรับน้ำหนักตายตัว (Dead Load) ก่อนหลังจากนั้นจึงให้มีการเสียรูปของจุดต่อตามที่กำหนดให้

3) การวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อ 4.2.1 กำหนดให้แบ่งค่าการเคลื่อนเป็น 500 ส่วน โดยค่าการเคลื่อนรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.20 เซนติเมตร สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อ 4.2.2 กำหนดให้แบ่งค่าการเคลื่อนเป็น 100 ส่วน โดยค่าการเคลื่อนรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร

4) การวิเคราะห์แบบจำลองในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 กำหนดให้ใช้การวิเคราะห์แบบเลยพิกัดยืดหยุ่นทุกกรณี โดยใช้พารามิเตอร์แบบ Unloading Entire Structure และมีรอบการกระทำซ้ำต่อหนึ่งขั้นตอน (iteration per step) เท่ากับ 40