



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การทำอิฐก่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับโบราณสถานในประเทศไทย

Homogenisation of Masonry for Historical Thai Monuments

นามผู้วิจัย

นางสาว เนาวรัตน์ มุ่งเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ทรงพล จารุวิศิษฐ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทำอิฐก้อนให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับโบราณสถานในประเทศไทย

Homogenisation of Masonry for Historical Thai Monuments

โดย

นางสาวเนาวรัตน์ มุ่งเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนาวรัตน์ มุ่งเจริญ 2554: การทำอิฐก่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับโบราณสถานในประเทศไทย ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ เบญจพล เวทย์วิวัฒน์, Ph.D. 63 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการทำอิฐก่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับโบราณสถานในประเทศไทย โดยทำการวิเคราะห์อิฐที่ก่อเป็นลักษณะวางไขว้ ทำแบบจำลอง 1 หน่วย เพื่อจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ภายในที่เกิดขึ้น และทำการวิเคราะห์สมดุลการเคลื่อนที่เพื่อสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ โดยทำการทดสอบปูนก่อที่ใช้กับโบราณสถานในประเทศไทยเพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐที่ทราบค่าแล้ว เพื่อหาค่ามอดูลัสของอิฐก่อจากสมการที่ตั้งขึ้น และนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ Thayaparan (1982) และการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนค่ามอดูลัสของอิฐต่อปูนก่อที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในแนวแกน X, Y และ Z ที่ได้จากสมการที่สร้างขึ้นมีค่า 37470.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยมีค่า X, Y และ Z เป็น 39062.5, 48359.24 และ 58962.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกัน และสามารถหากราฟแสดงความสัมพันธ์ของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อแตกต่างกันไปเทียบกับผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

Nawarut Mungcharoen 2011: Homogenisation of Masonry for Historical Thai Monuments. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Benjapon Wethyavivorn, Ph.D. 63 pages.

This research presented the analytical model of Masonry for Historical Thai Monuments. This masonry type is placed across. A process for analytical model is choose unit cell for simulate a behavior of moving units within that occurred. The analysis of the moving to created equilibrium equation used to calculate the elastic modulus of the masonry. The mortar is quick lime and modulus of elastic from the experiment testing result. Then analyzed with the elastic modulus of brick known values to determine the modulus of the masonry cause from the equation which was newly established. The result are compared with values obtained from the Thayaparan's equation (1982) and finite element model result to compare the ratio between the modulus of the brick and mortar to cause a different ratio.

The analysis concluded that the elastic modulus along the axis X, Y and Z from the equation that was created has value 37470.33 kilograms per square centimeter and the elastic modulus values derived from analytical model of the X, Y and Z are 39,062.5, 48,359.24 and 58,962.26 kilograms per square centimeter, respectively. Which are accordingly. And can show graphs of the relationship of modulus of elasticity with masonry cause the different ratio elastic modulus between the modulus of the brick and mortar from analytical model and finite element model result.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เวทย์วิวัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ สั่งสอน ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือ ทั้งในส่วนของ การศึกษา การทำวิทยานิพนธ์ การทดสอบวัสดุ ค่าใช้จ่ายบางส่วนที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย อันเป็น ประโยชน์อย่างสูงต่อตัวข้าพเจ้าทั้งในช่วงที่ทำการวิจัยและต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ทรงพล จารุวิศิษฐ์ กรรมการที่ปรึกษาที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ ให้ความรู้ และจริยธรรม แก่ข้าพเจ้าอยู่เสมอ

ขอขอบคุณนายช่างเพทาย ทิวะเวชและคุณ ไชยวัฒน์ ชูชัยมงคลา ที่ได้อำนวยความสะดวก ในด้านการใช้อุปกรณ์ในสถานที่ทดสอบและช่วยให้คำแนะนำในการทดสอบปูนก่อ

ขอขอบคุณ เพื่อน และพี่น้อง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในเรื่องต่างๆจนทำให้งานวิจัย นี้สามารถดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้สนับสนุนด้านการศึกษาโดยตลอดจน ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในที่สุด

เนาวรัตน์ มุ่งเจริญ

มิถุนายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	24
ผล	24
วิจารณ์	37
สรุปและข้อเสนอแนะ	39
สรุป	39
ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	40
ภาคผนวก	41
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	63

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และขีดจำกัดในการทดสอบ	3
2	แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	5
3	ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย	23
4	ผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อ	25
5	ค่าอัตราส่วนมอดูลัสของการยึดหยุ่นระหว่างค่าที่ได้จากผลของไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย กับ อิฐ	37
ตารางผนวกที่		
1	การทดสอบแรงอัดของปูนก่อโดยละเอียดแต่ละก้อน (เฉพาะช่วงที่ค่าแรงกดสูงสุด)	42
2	สรุปผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อ	43
3	การเคลื่อนที่ของปูนก่อระหว่างทำการทดสอบ (เฉพาะช่วงที่การเคลื่อนที่สูงสุด)	46
4	ผลการวิเคราะห์ 20 สมการเพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อ	50
5	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 3	51
6	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 6	53
7	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 10	55
8	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 30	57
9	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 60	59
10	ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยึดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 100	61

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การขีดเหนี่ยวธรรมดา	5
2	การขีดเหนี่ยวแบบอังกฤษ	8
3	การขีดเหนี่ยวแบบเฟลมิช	8
4	การเลือกแบบจำลอง 1 หน่วยในแต่ละแบบการขีดเหนี่ยว	9
5	รายละเอียดส่วนต่างๆของแบบจำลอง 1 หน่วย	9
6	การวิเคราะห์ใน โมเดล ไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง 1 หน่วย	10
7	การเคลื่อนตัวของแบบจำลอง 1 หน่วยในทิศทางต่างๆ	11
8	การกระจายความเค้นแนวแกนหลักในทิศทางแกน X	12
9	การกระจายความเค้นแนวแกนหลักในทิศทางแกน Y	12
10	สัญลักษณ์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของแบบจำลอง 1 หน่วย	13
11	การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนตัวในแนวแกน X	13
12	การหาความเค้นเฉลี่ยแกนหลักในอัฐ	14
13	การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน XY	15
14	การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน XZ	16
15	การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน YZ	16
16	การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	17
17	แบบหล่อบรีเคท	19
18	แบบหล่อมอร์ตขนาด 2.5 นิ้ว x 2.5 นิ้ว x 2.5 นิ้ว	20
19	เครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine	21
20	ภาพก่อนตัวอย่างทดสอบแรงอัดที่ทำการติด Strain gauge	22
21	ภาพระหว่างใช้งานเครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine	24
22	แสดงการวิบัติของก้อนตัวอย่าง	24
23	ก. รูปการขีดเหนี่ยวแบบอังกฤษ ข. รูปการแบ่งแบบจำลอง 1 หน่วย	27
24	การเคลื่อนที่ของแบบจำลอง 1 หน่วย ในทิศทางต่างๆจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	27
25	ก. รูปภาพแสดงการรับแรงในแนวแกน X ข. การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นภายในอัฐก่อ	28
26	การเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน X	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27 ก. รูปภาพแสดงการรับแรงในแนวแกน Y ข. การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นภายในอิฐก่อ	29
28 การเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน Y	29
29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุก่อกับอิฐ ระหว่าง micro mechanical model กับ โมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์	37
ภาพผนวกที่	
1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของปูนก่อ	45
2 สมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในทิศทางแกน X	47
3 การกระจายความเครียดภายในก้อนอิฐ	47
4 สมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y	49

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

U_m	= อัตราส่วนปีกของกึ่งของปูนก่อ
E_m	= โมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐก่อ
E_j	= โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุประสาน
E_b	= โมดูลัสความยืดหยุ่นของอิฐ
δ	= อัตราส่วนระหว่างความหนาของอิฐและความหนาทั้งหมดของอิฐก่อ
T	= ความหนาทั้งหมดของอิฐก่อ
T_b	= ความหนาของอิฐ
P_{Max}	= แรงกดสูงสุดที่เกิดขึ้น
Δ	= การเสยรูปในชั้นทดสอบ
E_m	= ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ
l	= ความยาวครึ่งหนึ่งของก้อนอิฐ
h	= ความสูงครึ่งหนึ่งของก้อนอิฐ
t	= ความหนาครึ่งหนึ่งของปูนก่อ
σ_{xx}^0	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่กระทำต่ออิฐก่อ
σ_{yy}^0	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่กระทำต่ออิฐก่อ
σ_{zz}^0	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่กระทำต่ออิฐก่อ
σ_{xx}^1	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
σ_{xx}^2	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
σ_{xx}^3	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
σ_{xx}^{-b}	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
σ_{xy}^1	= ความเค้นเฉือนในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
σ_{yy}^1	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
σ_{yy}^2	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
σ_{yy}^3	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
σ_{yy}^b	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
σ_{zz}^1	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
σ_{zz}^2	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
σ_{zz}^3	= ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- σ_{zz}^b = ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 \mathcal{E}_{xx}^1 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{xx}^2 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 \mathcal{E}_{xx}^3 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 \mathcal{E}_{xx}^{-b} = ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 \mathcal{E}_{xy}^1 = ความเครียดเฉือนในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{yy}^1 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{yy}^2 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 \mathcal{E}_{yy}^3 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 \mathcal{E}_{yy}^b = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 \mathcal{E}_{zz}^1 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{zz}^2 = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 \mathcal{E}_{zz}^b = ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ

การทำอิฐก้อนให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับโบราณสถานในประเทศไทย

Homogenisation of Masonry for Historical Thai Monuments

คำนำ

วัสดุทางโบราณสถานในประเทศไทยทั้งในศาสนาพุทธและฮินดู ตั้งแต่สมัยพุทธศตวรรษที่ 11 - 12 จนถึงปัจจุบัน ส่วนใหญ่ใช้อิฐ หิน และดิน เป็นวัสดุก่อสร้างหลัก และจากการสำรวจพบว่า ร้อยละ 80 ของโบราณสถานใช้อิฐเป็นวัสดุก่อสร้างหลักทั้งสิ้น ในปัจจุบัน การก่อสร้างหรือซ่อมแซมโบราณสถาน ต้องคำนึงถึงความสวยงามและคงอยู่ของศิลปกรรมโบราณ ทำให้อิฐก้อนถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างและซ่อมแซมในหลากหลายสถานที่

อิฐก้อน (Masonry) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอิฐ (Brick, Block, etc.) และปูนก่อ (Lime) ซึ่งในการก่อสร้างสถานที่ที่แตกต่างกัน ก็มีส่วนผสมและการจัดวางแนวอิฐที่แตกต่างกัน ตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และทดสอบการวางแนวในลักษณะต่างๆ เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งานที่แตกต่างกันไป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของอิฐก้อนที่ใช้ในงานโบราณสถานในประเทศไทย ซึ่งลักษณะการก่ออิฐเป็นแบบวางไขว้หรือลักษณะการยึดเหนี่ยวแบบอังกฤษ โดยทำการวิเคราะห์แบบจำลองขนาดเล็กเป็นแบบจำลองสามมิติโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อดูการเคลื่อนที่ และนำมาวิเคราะห์ในทางทฤษฎี จนได้สมการ ซึ่งจากการทดสอบจะทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่างๆที่สามารถนำไปใช้ในสมการ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ กับค่าที่ได้จากการโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และสรุปค่าคุณสมบัติของอิฐก้อนจากการวางแนวแบบไขว้ เพื่อไปใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอิฐก่อที่ประกอบด้วยอิฐโบราณและปูนขาวในลักษณะการวางตัวแบบวางไขว้

- เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ

- เพื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตการศึกษา

ทดสอบคุณสมบัติของปูนขาวและอิฐก่อที่ใช้ในงานโบราณสถานเพื่อนำค่าคุณสมบัติไปใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและทางไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลของอิฐก่อในลักษณะการวางตัวแบบไขว้ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสองวิธี

การตรวจเอกสาร

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้กำหนดประเภท ขนาดและคุณลักษณะที่
ต้องการของอิฐก่อสร้างสามัญขนาดเล็ก (อิฐมอญ) และขนาดใหญ่ โดยแบ่งประเภทของอิฐก่อสร้าง
สามัญไว้ 2 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ผิวไม่สู้
เรียบ ทำด้วยมือหรือเครื่องจักร เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังหรือกำแพงที่ฉาบปูน

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใหญ่กว่าอิฐมอญ
ผิวหน้าเรียบ มีร่องสำหรับยึดปูนก่อด้วยเครื่องจักร เหมาะสำหรับก่อผนังหรือกำแพง

ขนาดและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับอิฐประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ความคลาด
เคลื่อนที่ยอมให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้และขีดจำกัดในการทดสอบ

ประเภทที่	ขนาด(มม.)			ขีดจำกัดในการทดสอบอิฐจำนวน 20 แผ่น(มม.)		
	ยาว	กว้าง	หนา	ยาว	กว้าง	หนา
1	140 ± 5	65 ± 3	140 ± 2	2700 ถึง 2900	1240 ถึง 1360	760 ถึง 840
	160 ± 5	65 ± 3	140 ± 2	3100 ถึง 3300	1240 ถึง 1360	760 ถึง 840
	190 ± 5	90 ± 3	140 ± 2	3700 ถึง 3900	1740 ถึง 1860	760 ถึง 840
	190 ± 5	90 ± 3	140 ± 2	3700 ถึง 3900	1740 ถึง 1860	1260 ถึง 1340
2	190 ± 5	90 ± 3	140 ± 2	3700 ถึง 3900	1740 ถึง 1860	1740 ถึง 1860

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517)

ส่วนผสมและวิธีทำ

อิฐประเภทที่ 1 หรืออิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียวหรือดินโคลน และวัสดุอื่นๆ เช่น แกลบ ทราช ขี้เถ้า อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายๆอย่างรวมกันแล้วแต่ความเหมาะสม ถ้าเป็นการทำด้วยมือจะใช้ดินเหนียวผสมกับทรายหรือแกลบ หรือใช้ดินโคลนผสมกับแกลบย่ำผสมน้ำอัดลงในแบบพิมพ์ไม้ ซึ่งวางอยู่บนลานดินที่เรียบ โดยโรยแกลบบนลานดินและภายในแบบพิมพ์ เพื่อกันไม่ให้ดินผสมติดแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบ ยกแบบพิมพ์ไม้ออกผึ่งไว้กลางลานดินให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา หากเป็นการทำด้วยเครื่องจักรจะใช้ดินเหนียวผสมกับทรายหรือแกลบนำเข้าเครื่อง ฟันน้ำ นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นแผ่นอิฐ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

อิฐประเภทที่ 2 หรืออิฐขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว และวัสดุอื่นๆ เช่น ทราย โดยใช้ดินเหนียวผสมกับทราย ย่ำผสมน้ำ อัดลงในแบบไม้ ปาดให้เรียบ แล้วยกแบบไม้ออกหรือนำเข้าเครื่อง นวด อัด ริด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่าแผ่นอิฐเล็กน้อย ผึ่งก้อนดินที่เตรียมไว้ให้มีความชื้นพอสมควร นำเข้าเครื่องอัดให้แน่นเป็นก้อนอิฐตามขนาดที่ต้องการ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

คุณลักษณะที่ต้องการ

- ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต้องมีขนาดตามตารางที่ 1 โดยมีลักษณะและคุณสมบัติอื่นๆ ดังต่อไปนี้
 - เผาสุกและมีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น
 - มีความแข็งแรงทนทานตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2
 - มุมทุกมุมควรเป็นมุมฉาก
 - รูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ
 - เนื้อแน่นและไม่มีการแตกร้าว

คุณสมบัติทางกายภาพ

แรงอัด (Compressive Strength) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2

การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ประเภทที่	ยาว x กว้าง x หนา เซนติเมตร	แรงอัดต่ำสุด กก./ซม. ²	การดูดซึมน้ำสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักอิฐ
1	14.0 x 6.5 x 4.0	35.7	25
	16.0 x 6.5 x 4.0	35.7	25
	19.0 x 9.0 x 4.5	152.8	25
2	19.0 x 9.0 x 6.5	152.8	15
	19.0 x 9.0 x 9.0	152.8	15

*หมายเหตุ ปัจจุบันได้มี มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545 อิฐก่อสร้างสามัญได้แบ่งประเภทอิฐก่อสร้างสามัญ ตามชั้นคุณภาพ ก ข และ ค ซึ่ง อิฐประเภทที่ 1 คือ อิฐชั้นคุณภาพ ก และ ข อิฐประเภทที่ 2 คือ อิฐ ชั้นคุณภาพ ข และ ค

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517)

อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและจังหวัดใกล้เคียง ส่วนใหญ่เป็นอิฐที่ผลิตในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ชาติชาย (2539) ได้ศึกษาตัวอย่างอิฐจากโบราณสถานต่างๆในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยาพบว่าอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา มีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และชนิดทางจุลสัณฐานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความคล้ายคลึงกัน และมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตลอดสมัยอยุธยา อย่างไรก็ตามมีตัวอย่างอิฐบางตัวเมื่อพิจารณาทางด้านโบราณคดีและสถาปัตยกรรมของโบราณสถานแล้ว

น่าสงสัยว่าอาจจะเป็นอิฐคนละสมัยหรือเป็นอิฐที่นำมาเสริมเติมภายหลัง แต่ก็สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจน โดยวิธีวิเคราะห์ปริมาณธาตุ อีกประการหนึ่งคือผลการศึกษาร่องรอยประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านคุ่มพลี บริเวณริมคลองสระบัว ซึ่งอยู่ด้านเหนือของเกาะเมืองอยุธยา มีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่สมัยอยุธยา แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีการผลิตอิฐที่สืบทอด นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์อิฐโดยวิธี Thin Section พบว่าอิฐส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ไมกา ซึ่งพบว่าเป็นแร่ที่ปะปนในดินซุดทำม่วงและราชบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวที่แพร่กระจายอยู่บริเวณสองฝั่งลำน้ำตอนบนของเกาะเมืองอยุธยาเท่านั้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแหล่งผลิตอิฐแหล่งใหญ่ที่สุดในสมัยอยุธยาน่าจะเป็นบริเวณริมคลองสระบัว

มอดาร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

สมชาติ (2540) ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาวนั่นเอง เพราะมีความแข็งแรงพอสมควร มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงโบราณสถาน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งและทึบตันสูง มีการหดตัวมากและขาดความยืดหยุ่น

การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ในการทำปูนหมัก เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูงเพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาว ใหญ่บ้างเล็กบ้าง เรียกว่าปูนดิบ ซึ่งจะนำไปดำเนินการเป็นมอร์ต้าต่อไป

การหมักปูนดิบ คือทำให้ปูนดิบดูดน้ำ แล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว ถ้าปูนดิบที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็ก ๆ ก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาของก้อนปูนขาวในน้ำ นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่ น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆจนกว่าปฏิกิริยาจะหยุด เมื่อปฏิกิริยาหยุดและน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร้อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ได้น้ำ ให้ น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5

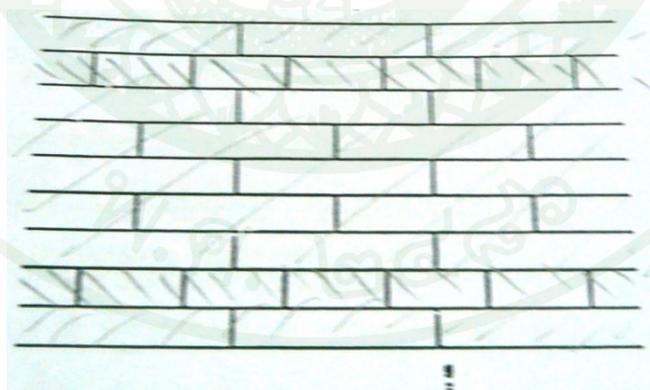
เซนติเมตร เป็นอย่างน้อย และหมักทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน แต่ถ้าจะให้มีความเหนียวมากขึ้น ต้องหมักไว้ 60 วันขึ้นไป ปูนหมักนี้สามารถหมักเก็บไว้เป็นปี ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆจะแข็งตัว แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้ เมื่อผสมน้ำแล้วทำให้ได้ที่

การผสมปูนกับทราย เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ขาวโดยปริมาตรต่างๆ เช่น ปูนซีเมนต์ขาว : ปูนหมักร่อนแล้ว : ทรายหยาบ เป็น 1 : 2 : 9 ส่วน เป็นต้น

การวิเคราะห์อิฐก่อในทางทฤษฎี

การยึดเหนี่ยวในผนังอิฐก่อ คือการเรียงอิฐให้เป็นชั้นเพื่อความมุงหมายในการยึดเหนี่ยวระหว่างทุกส่วนของผนังที่มีความหนามากกว่าแผ่นหนึ่ง โยการกระทำของน้ำหนักอิฐก่อที่อยู่เหนือนั้นไป การยึดเหนี่ยวที่ใช้ทั่วไปสำหรับสิ่งก่อสร้างของอิฐมีดังนี้

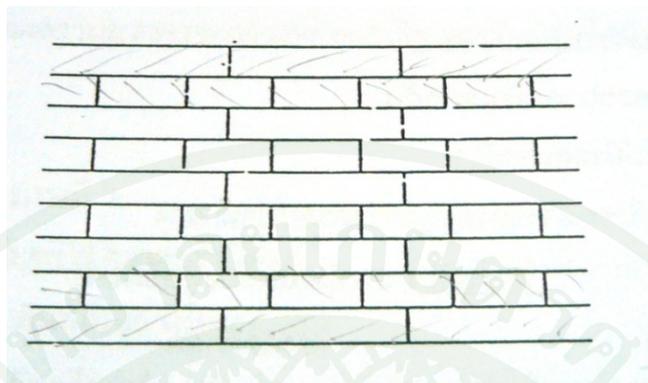
การยึดเหนี่ยวธรรมดา (Common Bond) คือ การเรียงอิฐตามความยาวของแผ่นอิฐ (Stretchers) 4-5 ชั้น (Courses) แล้วเรียงอิฐตามความกว้างของแผ่นอิฐ (Headers) 1 ชั้น โดยมีอิฐเรียงตามความยาวแผ่นอยู่ชั้นบนสุดและล่างสุด



ภาพที่ 1 การยึดเหนี่ยวธรรมดา

ที่มา : เอกสารประกอบการเรียนวิชา Material and Testing ม.เกษตรศาสตร์
(2547)

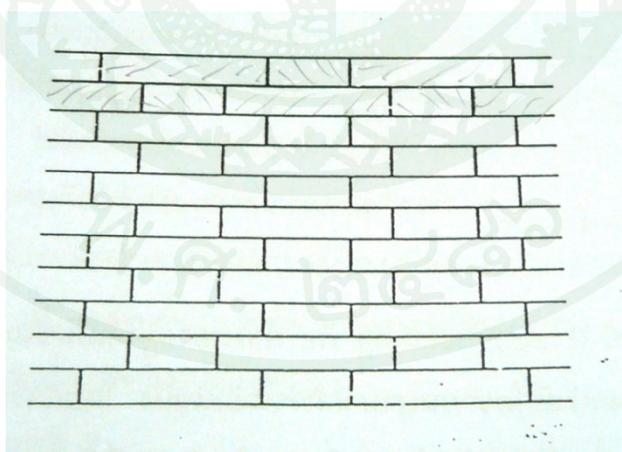
การยึดเหนี่ยวอังกฤษ (English Bond) คือ การเรียงอิฐตามความยาว 1 ชั้น สลับกับเรียงตามความกว้าง 1 ชั้น การยึดเหนี่ยวแบบนี้แข็งแรงสุด แต่ไม่สวยงาม



ภาพที่ 2 การยึดเหนี่ยวแบบอังกฤษ

ที่มา : เอกสารประกอบการเรียนวิชา Material and Testing ม.เกษตรศาสตร์
(2547)

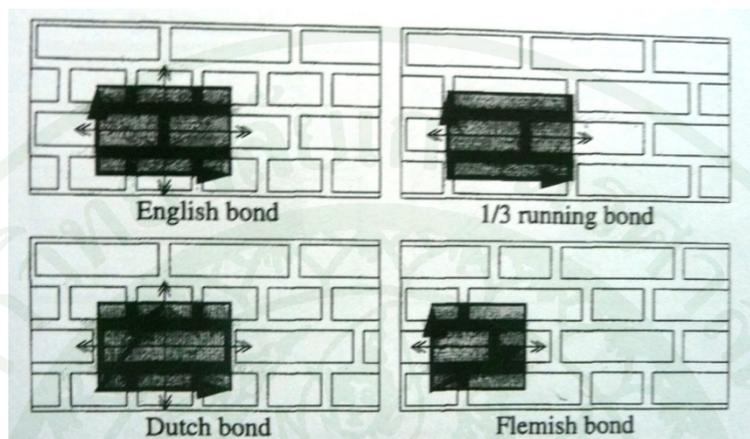
การยึดเหนี่ยวเฟลมิช (Felnish Bond) คือ การเรียงอิฐตามความยาวกับตามความกว้างในชั้นเดียวกัน โดยให้ความกว้างของอิฐแผ่นบนอยู่เหนือตอนกลางตามความยาวของอิฐแผ่น



ภาพที่ 3 การยึดเหนี่ยวแบบเฟลมิช

ที่มา : เอกสารประกอบการเรียนวิชา Material and Testing ม.เกษตรศาสตร์
(2547)

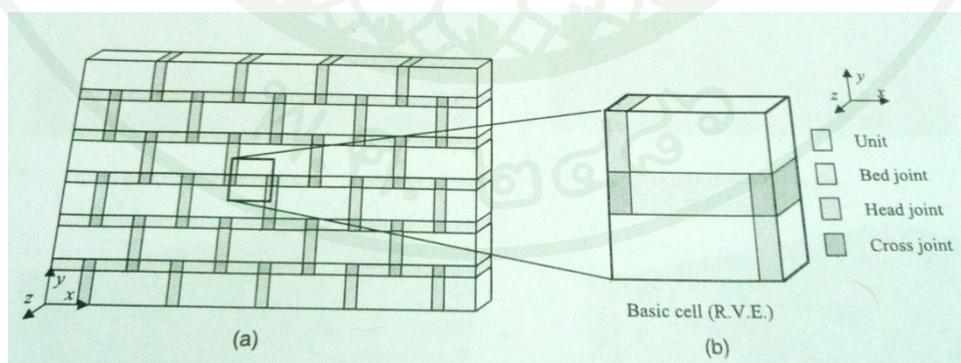
Anthoine (1993) ได้กล่าวถึงการหาที่มาของค่าคุณสมบัติต่างๆของอิฐก่อในระนาบในช่วงอิลาสติก ซึ่งไม่คำนึงถึงความหนาของอิฐก่อ และได้กล่าวถึงการแบ่งการแบบจำลอง 1 หน่วย แบบต่างๆไว้ดังนี้



ภาพที่ 4 การเลือกแบบจำลอง 1 หน่วยในแต่ละแบบการขีดเหนี่ยว

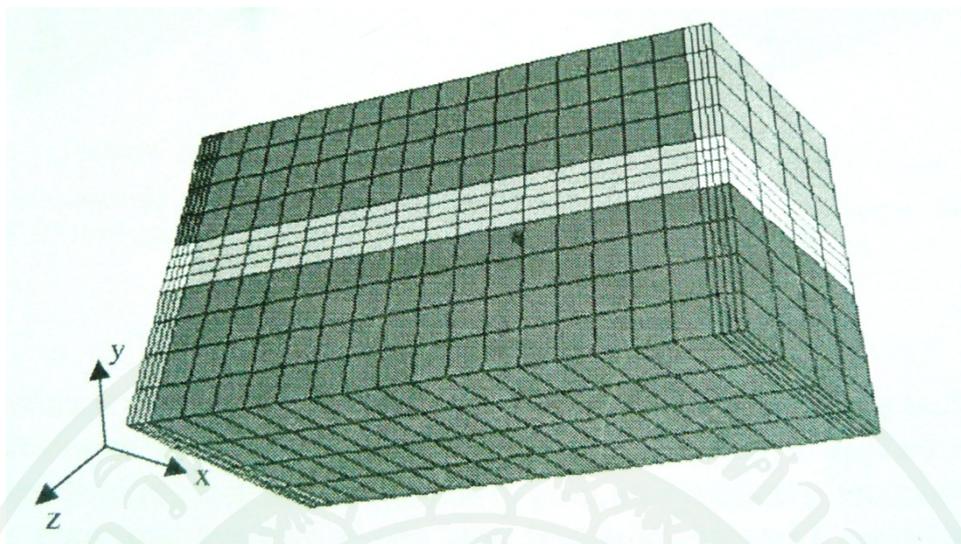
ที่มา : Anthoine (1993)

Zucchini and Lourenço (2000) ได้กล่าวถึงแบบจำลองกลไกขนาดเล็กลงของอิฐก่อที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพที่ 5 รายละเอียดส่วนต่างๆของแบบจำลอง 1 หน่วย

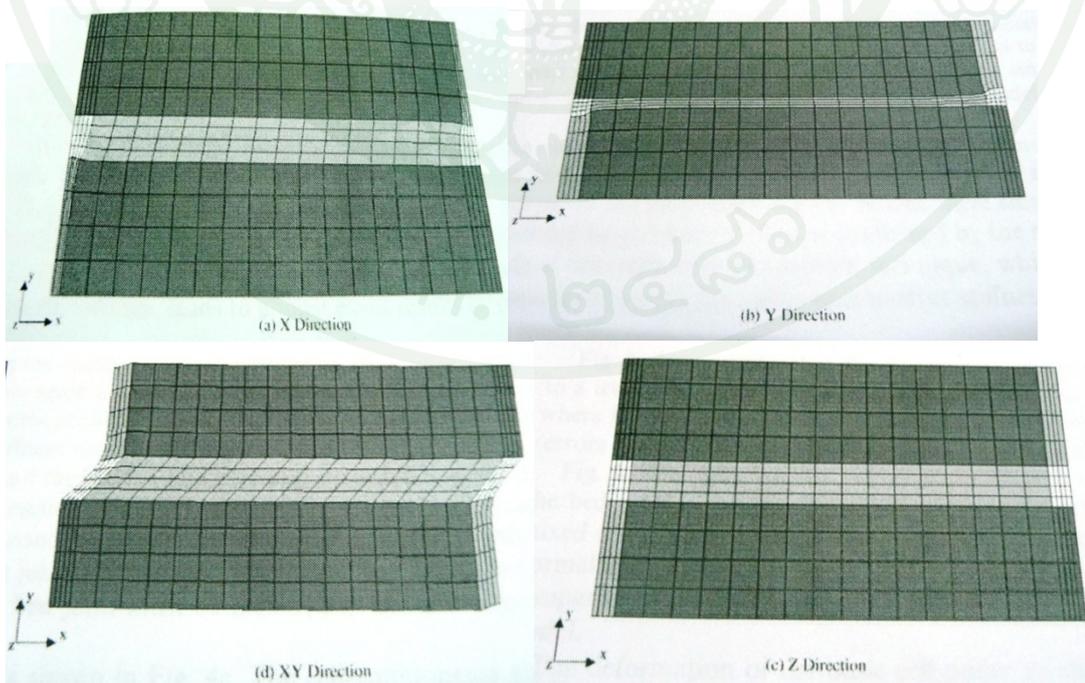
ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

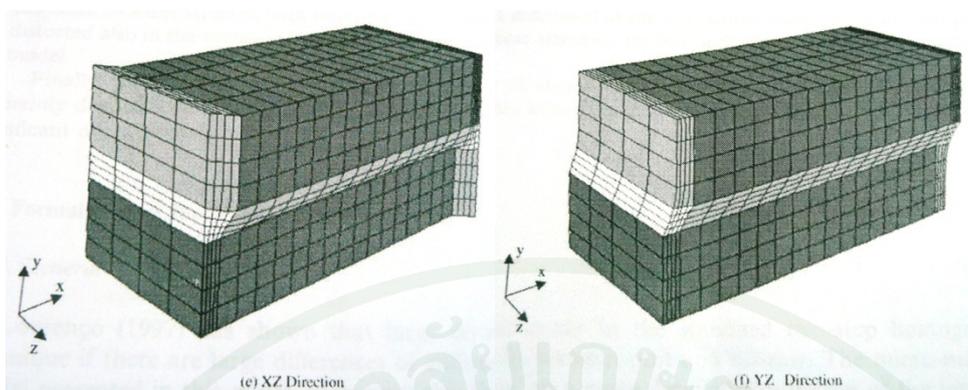


ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ในโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง 1 หน่วย

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

เริ่มต้นจากการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อดูการเคลื่อนตัวของอิฐก้อนในทิศทางต่างๆดังนี้





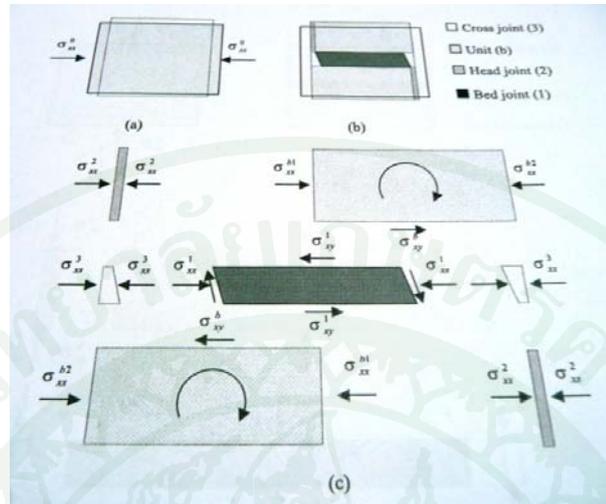
ภาพที่ 7 การเคลื่อนตัวของแบบจำลอง 1 หน่วยในทิศทางต่างๆ

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

การวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย ใช้หลักการดังนี้

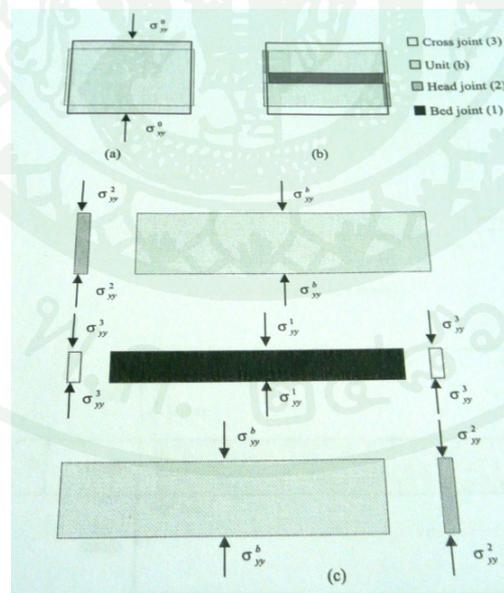
1. มีความเค้นหลักในแนวตั้งในปูนก่อแนวนอน เมื่อแบบจำลอง 1 หน่วยไม่มีแรงเฉือนในแนวระนาบ
2. มีแรงเฉือนในแนวระนาบในปูนก่อแนวนอน เมื่อแบบจำลอง 1 หน่วยมีความเค้นหลักในแนวนอนในแนวระนาบ
3. มีความเค้นเฉือนแกน YZ ในแนวอกระนาบในปูนก่อแนวนอน เมื่อแบบจำลอง 1 หน่วยมีความเค้นเฉือนแกน XZ ในแนวอกระนาบ

การวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย ใช้หลักโมดูลัสของยังและค่าสัมประสิทธิ์ปัวซอง ใช้การคิดดั่งรูป



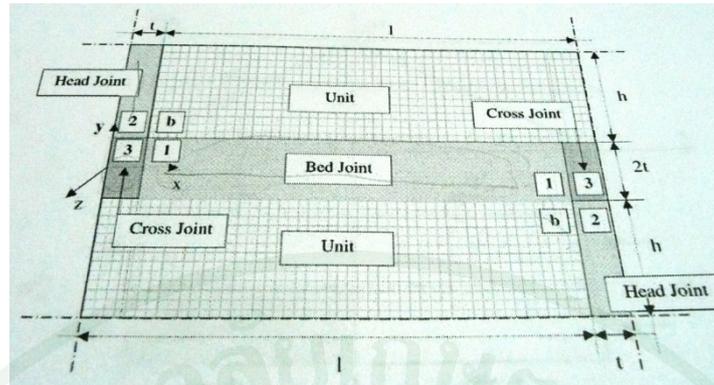
ภาพที่ 8 การกระจายความเค้นแนวแกนหลักในทิศทางแกน X

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)



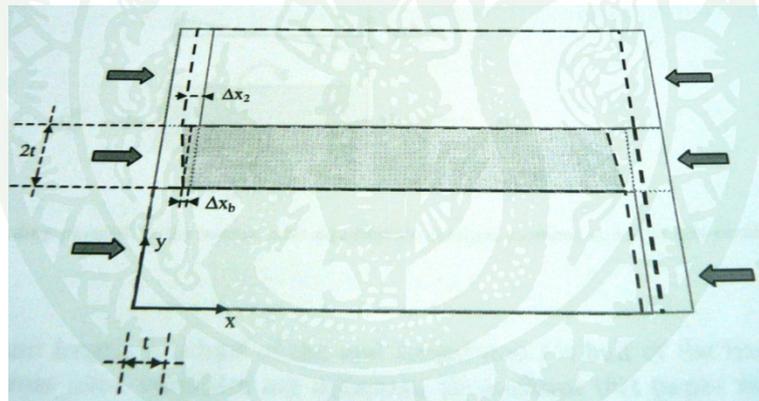
ภาพที่ 9 การกระจายความเค้นแนวแกนหลักในทิศทางแกน Y

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)



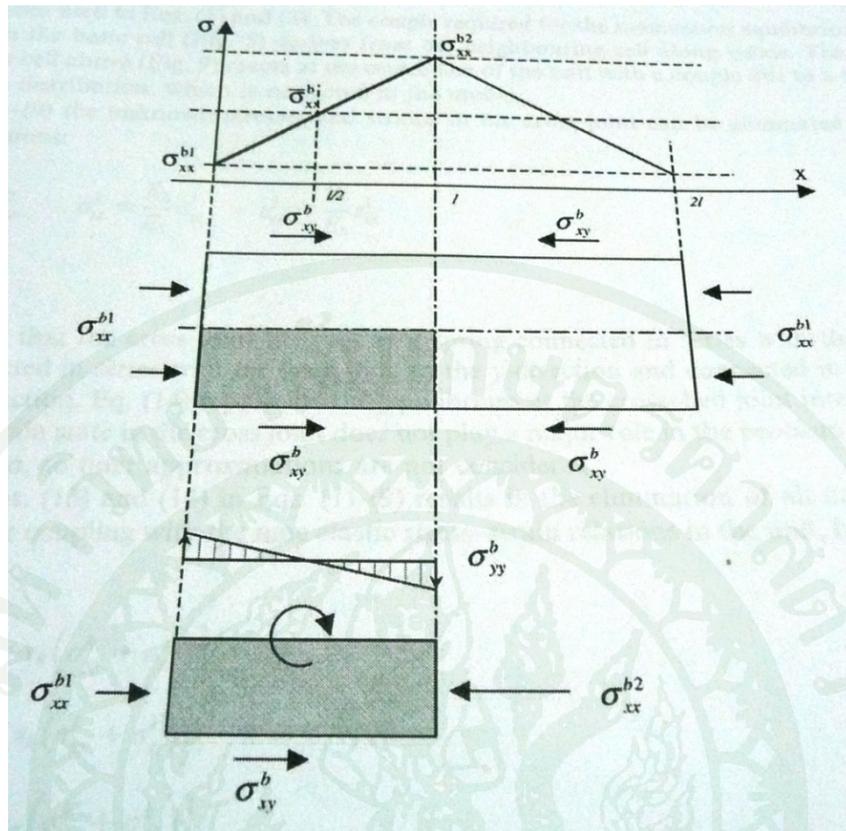
ภาพที่ 10 สัญลักษณ์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของแบบจำลอง 1 หน่วย

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)



ภาพที่ 11 การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนตัวในแนวแกน X

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)



ภาพที่ 12 การหาความเค้นแกนหลักในอิฐ

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

จากการวิเคราะห์จากภาพทั้งหมด และสมการสมดุล สรุปได้ดังนี้

$$E_i = \frac{\sigma_\varepsilon^0}{\varepsilon_{ii}}, \quad \nu_{ij} = \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{ii}} \right)_i, \quad i, j = x, y, z \quad (1)$$

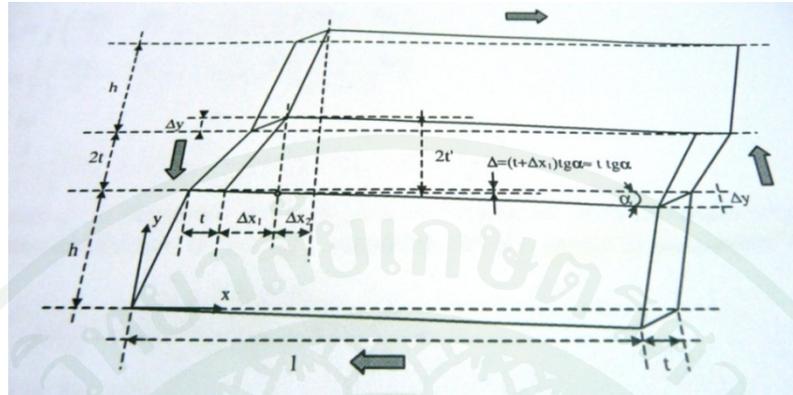
โดยที่

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^1 \frac{l-t+2tE_1/E_3}{l+t}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\varepsilon_{yy}^2 (h + 2tE_2/E_3) + h\varepsilon_{yy}^b}{2(t+h)}$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz}^b$$

การหาค่ามอดูลัสของแรงเฉือน

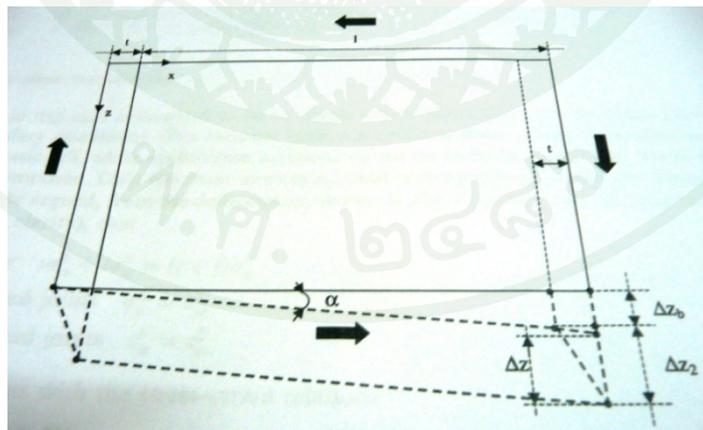


ภาพที่ 13 การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน XY

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

ได้ผลดังนี้

$$G_{xy} = \frac{\sigma_{xy}^0}{2\varepsilon_{xy}} = \frac{t(t+l)(t+h)}{k \frac{tl(t+h)}{G_2} + \frac{(t+l-kt)(lh-t^2)}{G_b} + \frac{t(t+l)(t+l-kt)}{G_1}} \quad (2)$$

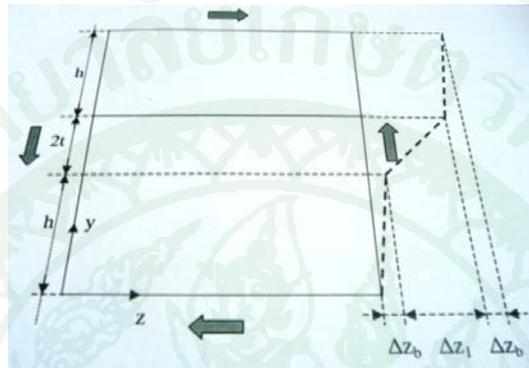


ภาพที่ 14 การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน XZ

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

ได้ผลดังนี้

$$G_{xy} = \frac{\sigma_{xz}^0}{2\varepsilon_{xz}} = \frac{\sigma_{xz}^0}{2} \frac{t+l}{t\varepsilon_{xz}^2 + l\varepsilon_{xz}^b} = \frac{(t+l)(tG_1 + hG_b)}{(t+h) + \left(t \frac{4hG_b + (l-t)G_1}{4hG_2 + (l-t)G_1} + l \right)} \quad (3)$$



ภาพที่ 15 การสันนิษฐานทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับแรงเฉือนแกน YZ

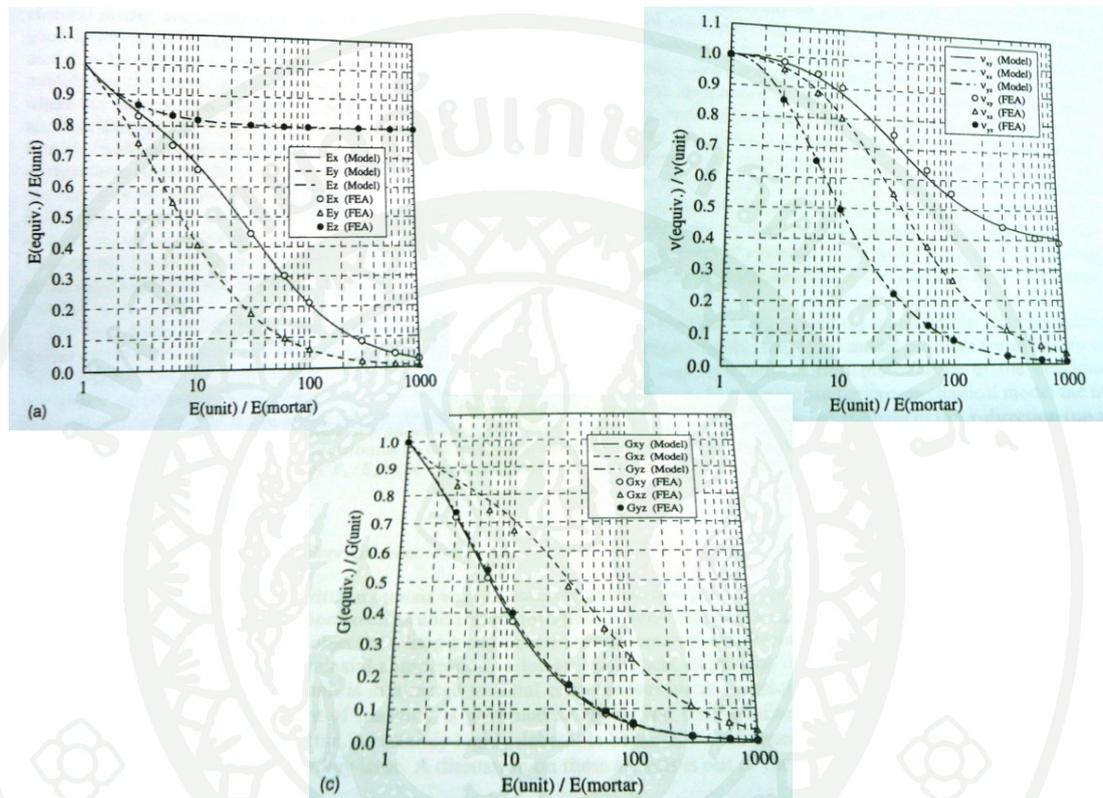
ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

ได้ผลดังนี้

$$G_{xy} = \frac{\sigma_{xz}^0}{2\varepsilon_{xz}} = \frac{t+h}{t+l} G_1 \frac{lG_b + tG_2}{tG_b + hG_1} \quad (4)$$

การวิเคราะห์โครงสร้างอิฐก่อด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างอิฐก่อด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย



ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (a) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (b) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (c) ค่ามอดูลัสแรงเฉือน

ที่มา : Zucchini and Lourenço (2000)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่นำเอาความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มารวมกับทฤษฎีโครงสร้าง เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้าง ประโยชน์ในทางปฏิบัติคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองโครงสร้างที่สลับซับซ้อนได้เหมือนโครงสร้างจริง ทำให้สามารถวิเคราะห์รูปร่างต่างๆ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน สามารถทำนายการตอบสนองของโครงสร้างจริง การเกิดแรงภายในที่จุดต่างๆของโครงสร้าง

หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างโครงสร้างจำลองจากการประกอบกันของชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีความสัมพันธ์ต่อเนื่องและมีผลซึ่งกันและกัน การวิเคราะห์โครงสร้างทำโดยการสร้างสมการซึ่งเป็นตัวแทนของเอลิเมนต์เล็กๆแล้วนำมารวมกัน เพื่อเป็นสมการ แสดงการตอบสนองของโครงสร้างทั้งหมด

Thayaparan (1982) ได้หาสมการหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุก่อ ปูน+อิฐ เป็นดังสมการ

$$E_m = 1 / \left\{ \left[(1 - \delta) / E_j \right] + (\delta / E_b) \right\} \quad (5)$$

โดยที่ E_m = มอดุลัสความยืดหยุ่นของอิฐก่อ

E_j = มอดุลัสความยืดหยุ่นของวัสดุประสาน

E_b = มอดุลัสความยืดหยุ่นของอิฐ

δ = T_v / T

T = ความหนาทั้งหมดของอิฐก่อ

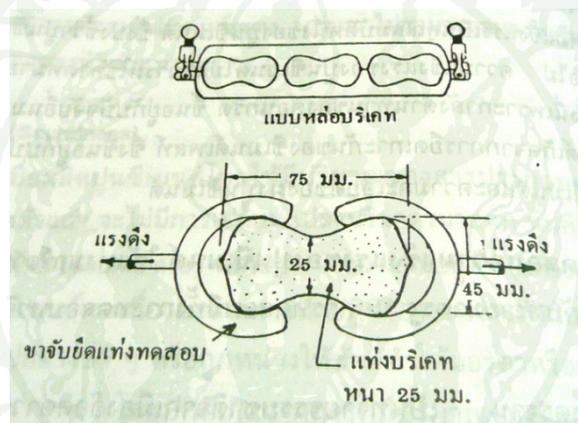
T_b = ความหนาของอิฐ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ความแข็งแรงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของปูนซีเมนต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้มีคุณภาพดีหรือไม่ การทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ใช้แท่งมอร์ต้าที่ทำขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับทรายมาตรฐาน การทดสอบมีทั้งการทดสอบหาความต้านทานต่อแรงอัด และต่อแรงดึง

ทรายมาตรฐาน เป็นทรายธรรมชาติจากเมืองออตตาวา รัฐอิลลินอยส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นแร่ควอร์ตเกือบทั้งหมด มีสีขาวคล้ายน้ำตาลทราย ขนาดของเม็ดทรายสม่ำเสมอประมาณ 1 มม. ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 30

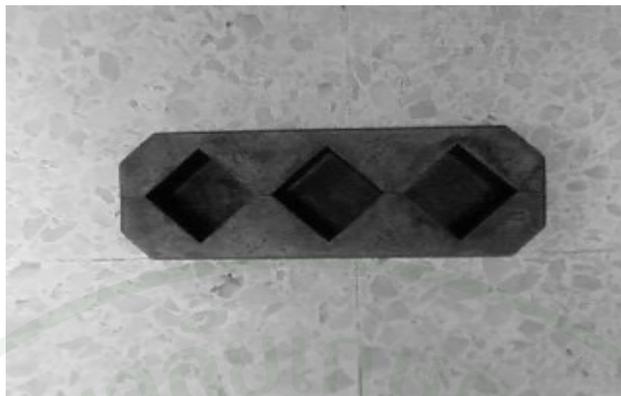
การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐานอเมริกันหาได้จากการทดสอบแท่งบริเคต (Briquet) ของมอร์ต้า ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์ 1 ส่วน กับทรายมาตรฐาน 3 ส่วน โดยน้ำหนัก แท่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบนี้เป็นบริเคต มีปลายทั้งสองข้างใหญ่และหน้าตัดตรงกลางมีเนื้อที่ 1 ตารางนิ้ว แรงดึงที่ใช้ทดสอบต้องกระทำสม่ำเสมอด้วยอัตราประมาณ 265-285 กิโลกรัมต่อนาที



ภาพที่ 17 แบบหล่อบริเคต

ที่มา : หนังสือคอนกรีตเทคโนโลยี โดย วินิต ช่อวิเชียร (2001)

การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐานอเมริกัน ได้จากการใช้แท่งลูกบาศก์ขนาด 2 นิ้วของมอร์ต้า ที่ประกอบด้วยซีเมนต์ 1 ส่วน กับทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก



ภาพที่ 18 แบบหล่อมอร์ต้าขนาด 2.5 นิ้ว x 2.5 นิ้ว x 2.5 นิ้ว

ที่มา : ภาพจากการนำเสนอวิชาปฏิบัติการภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

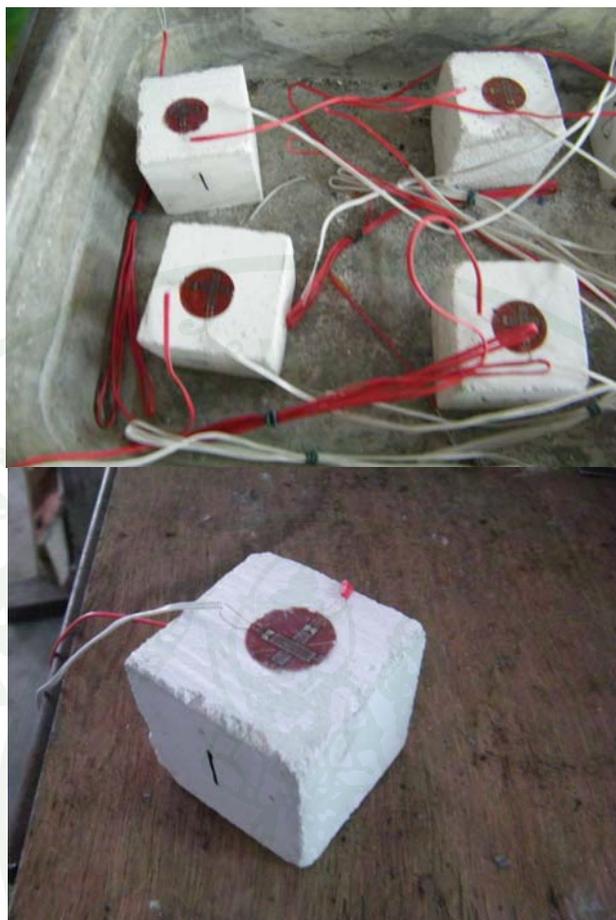
1. ปูนขาวหมัก 10 กิโลกรัม ซีเมนต์ขาว 2 กิโลกรัม ทราช 20 กิโลกรัม นำตามเปอร์เซ็นต์
2. แบบหล่อปริมาตร 3 ชั้น แบบหล่อ cube ขนาด 2 x 2 นิ้ว 3 ชั้น
3. เครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine
4. เครื่องคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์มาตรฐาน
5. โปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ คือ โปรแกรม Nastran

วิธีการ

1. หล่อแท่งทดสอบแรงอัดและแรงดึงของปูนขาวหมัก ด้วยอัตราส่วน ซีเมนต์ขาว : ปูนขาวหมัก : ทราช เป็น 1 : 2 : 6 , 1 : 2 : 8 , 1 : 2 : 9 ตามลำดับ คำนวณปริมาณส่วนผสมที่ใช้ทั้งหมดรวมน้ำ ทั้งหมด อัตราส่วนละ 2 ชุด สำหรับแรงอัด 1 ชุด และแรงดึง 1 ชุด
2. ทิ้งไว้ 28 วัน โดยไม่บ่ม แล้วทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง และทำการทดสอบแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine โดยติดสเตรนเกจสองทิศทาง หาค่าอัตราส่วนปริมาตรของ คำนวณค่าความเค้น และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น



ภาพที่ 19 เครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine



ภาพที่ 20 ภาพก่อนตัวอย่างทดสอบแรงอัดที่ทำการติด Strain gauge

3. ทำการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยเล็ก ด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ พิจารณาการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทาง และนำผลที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยมือ โดยใช้ทฤษฎีความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสและอัตราส่วนปัวซอง โดยติดค่าพารามิเตอร์ต่างๆไว้ในรูปของสมการ
4. ทำการโมเดลแบบจำลองขนาดจริงในโปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยติดค่า E เป็นอัตราส่วน แล้วบันทึกค่าเป็นกราฟ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี ที่ติดไว้ในรูปสมการข้างต้น
5. เปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างวิธีการโมเดลโดยโปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ และการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

สถานที่และระยะเวลาการวิจัย

สถานที่ในการทำวิจัยคือคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
บางเขน

ระยะเวลาในการทำวิจัยมีรายละเอียดดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงช่วงเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย

ขั้นตอน	2552 เดือนที่		2553 เดือนที่		2554 เดือนที่	
	5-8	9-12	1-4	5-8	9-12	1-4
ค้นคว้าหาข้อมูลและรวบรวมเอกสาร						
ทำการทดลองและวิเคราะห์ทางโปรแกรม						
สรุปผลการวิจัย						
ศึกษาค้นคว้า, ทำการวิจัยเพิ่มเติม (ถ้ามี)						
จัดทำเอกสาร, รูปเล่มรายงาน						

ผลและวิจารณ์

การหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ



ภาพที่ 21 ภาพระหว่างใช้งานเครื่องทดสอบกำลัง Universal Testing Machine



ภาพที่ 22 แสดงการวิบัติของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อ

ซีเมนต์ขาว : ปูนขาวหมัก : ทราย เป็น 1:2:6

ขนาดหน้าตัดปูนก่อ 2.54 x 2.54 ตารางเซนติเมตร

No.5			No.6			No.8		
P_{Max}	4915	N	P_{Max}	3072	N	P_{Max}	4040	N
Δ	2.112	mm.	Δ	3.29	mm.	Δ	2.21	mm.
Stress	7465.9	ksc.	Stress	4666.4	ksc.	Stress	6136.8	ksc.
Strain	0.083		Strain	0.13		Strain	0.09	
E_m	89788.76	ksc	E_m	36026.14	ksc	E_m	70531.23	ksc

ซีเมนต์ขาว : ปูนขาวหมัก : ทราย เป็น 1:2:8

ขนาดหน้าตัดปูนก่อ 2.54 x 2.54 ตารางเซนติเมตร

No.1			No.4			No.9		
P_{Max}	4775	N	P_{Max}	4775	N	P_{Max}	4445	N
Δ	1.54	mm.	Δ	1.612	mm.	Δ	1.7175	mm.
Stress	7253.24	ksc.	Stress	7253.24	ksc.	Stress	6751.97	ksc.
Strain	0.06		Strain	0.06		Strain	0.07	
E_m	119631.35	ksc	E_m	114288.02	ksc	E_m	99854.44	ksc

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ซีเมนต์ขาว : ปูนขาวหมัก : ทราย เป็น 1:2:9

ขนาดหน้าตัดปูนก่อ 2.54 x 2.54 ตารางเซนติเมตร

No.2		No.3		No.7				
P_{Max}	8230	N	P_{Max}	7992	N	P_{Max}	8870	N
Δ	1.905	mm.	Δ	1.832	mm.	Δ	2.295	mm.
Stress	12501.4	ksc.	Stress	12139.9	ksc.	Stress	13473.6	ksc.
Strain	0.08		Strain	0.07		Strain	0.09	
E_m	166685.3	ksc	E_m	168314.8	ksc	E_m	149119.1	ksc
U_m	0.1601		U_m	0.183002481		U_m	0.1979622	

*หมายเหตุ ผลการทดสอบและกราฟอย่างละเอียดอยู่ในภาคผนวก

โดยที่ P_{Max} คือ แรงกดสูงสุดที่เกิดขึ้น

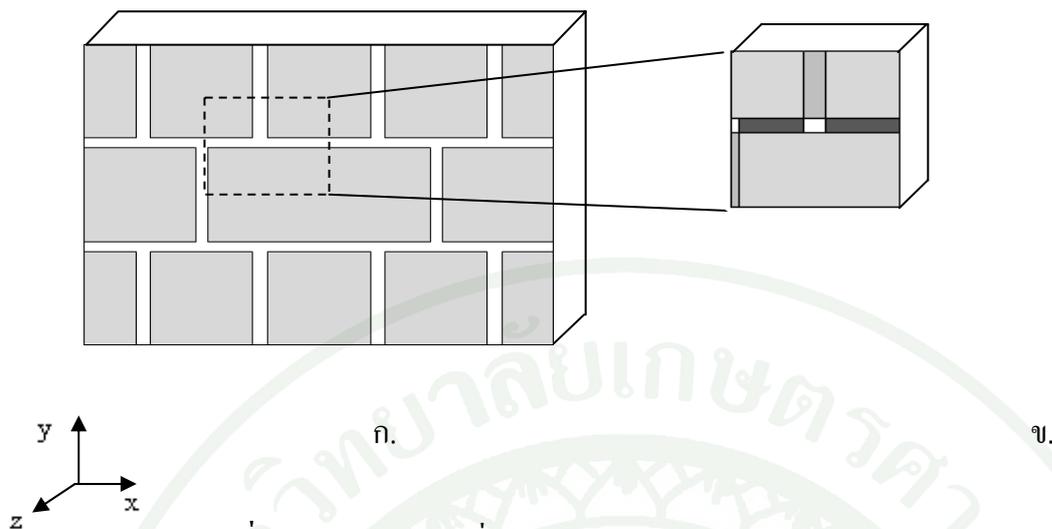
Δ คือ การเสีรูปร่างในชั้นทดสอบ

E_m คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ

U_m คือ อัตราส่วนปัวของก่ของปูนก่อ

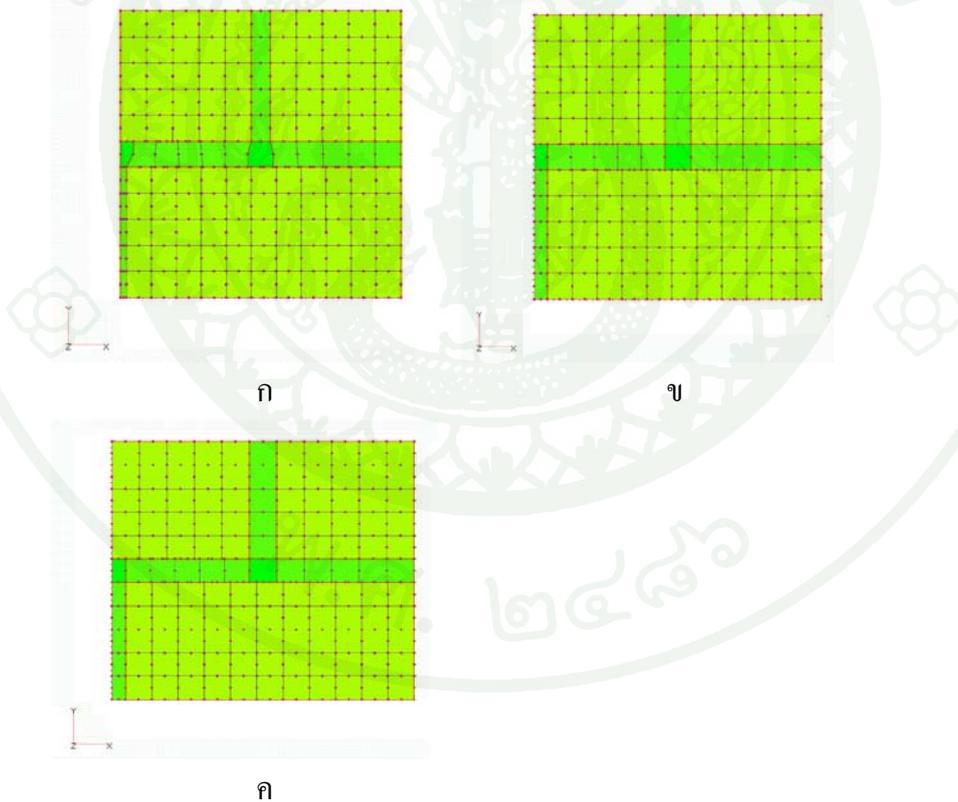
การวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย

1. การแบ่งแบบจำลอง 1 หน่วย ได้มีการแบ่งตามลักษณะการยึดเหนี่ยว ซึ่งลักษณะการก่ออิฐที่นำมาพิจารณา คือ การก่ออิฐแบบวางไขว้ เป็นการยึดเหนี่ยวแบบอังกฤษ นิยมใช้งานบูรณโบราณสถานในประเทศไทยในปัจจุบัน ดังแสดงในภาพที่ 23



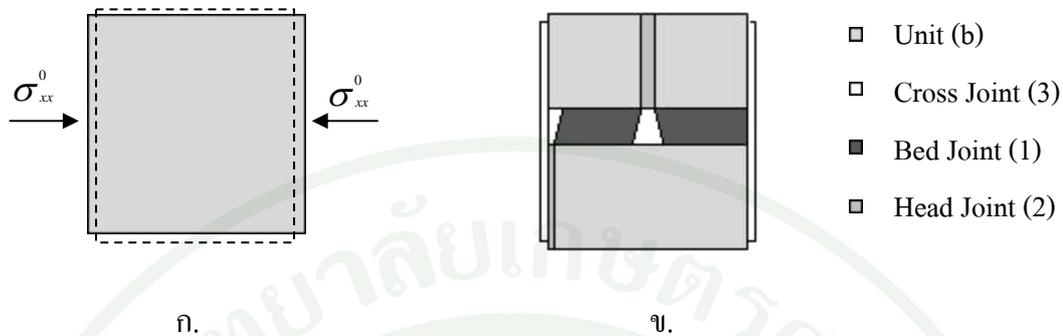
ภาพที่ 23 ก. รูปการขีดเหนี่ยวแบบอังกฤษ ข. รูปการแบ่งแบบจำลอง 1 หน่วย

2. พิจารณาการเคลื่อนที่ เมื่อได้รับแรงกระทำในแต่ละทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 24 การเคลื่อนที่ของแบบจำลอง 1 หน่วย ในทิศทางต่างๆจากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ก. แรงกดในแนวแกน X ข. แรงกดในแนวแกน Y ค. แรงกดในแนวแกน Z

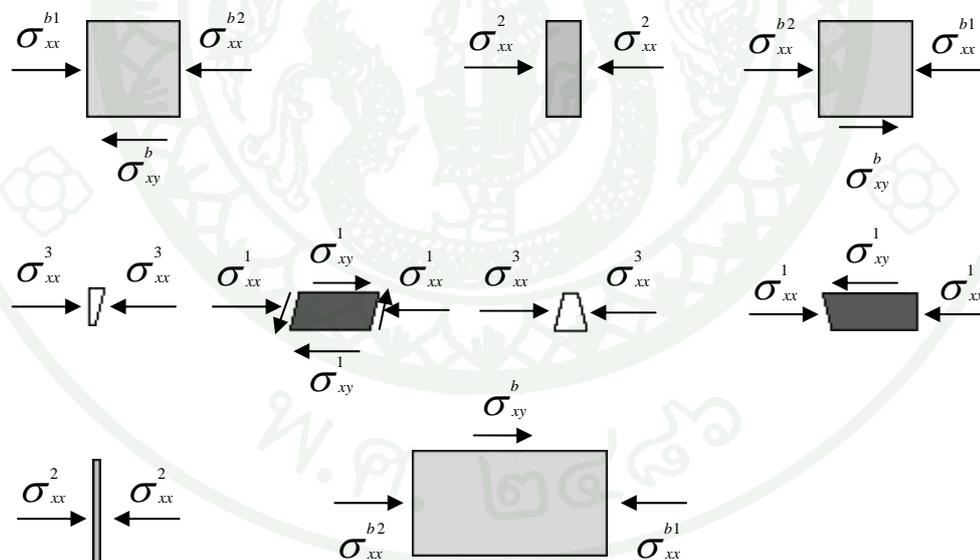
จากภาพที่ 24 ก. สามารถนำมาพิจารณาการเคลื่อนที่ภายในแบบจำลอง 1 หน่วย ได้ดังนี้



ภาพที่ 25 ก. รูปภาพแสดงการรับแรงในแนวแกน X

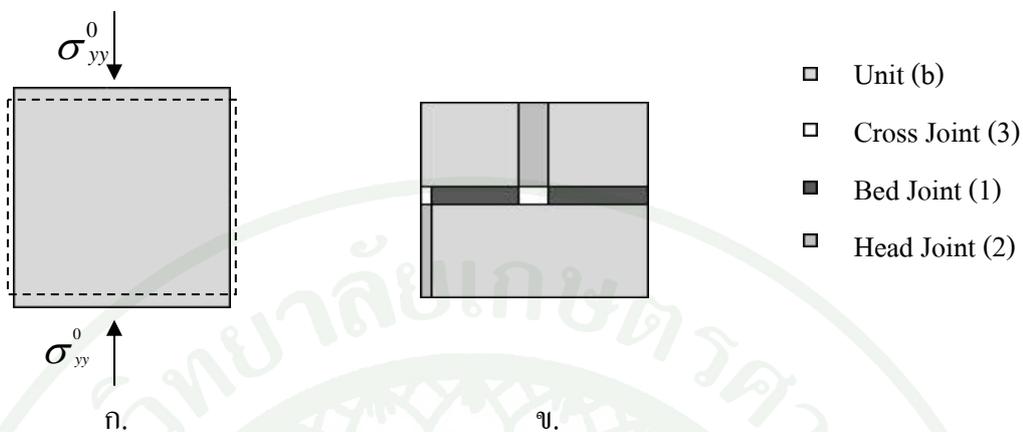
ข. การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นภายในอิฐก่อ

จากภาพที่ 25 ข. แยกชิ้นส่วนเล็กๆ ได้ดังนี้



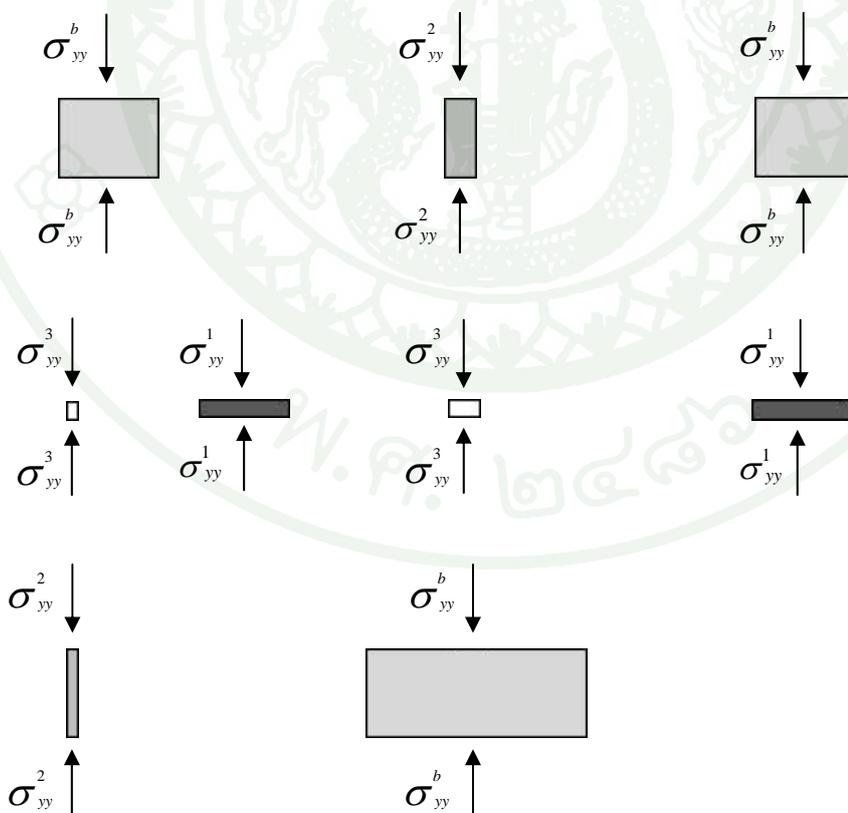
ภาพที่ 26 การเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน X

จากภาพที่ 24 ข. สามารถนำมาพิจารณาการเคลื่อนที่ภายในแบบจำลอง 1 หน่วย ได้ดังนี้



ภาพที่ 27 ก. รูปภาพแสดงการรับแรงในแนวแกน Y ข. การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นภายในอิฐก่อ

จากภาพที่ 27 ข. แยกชิ้นส่วนเล็กๆ ได้ดังนี้

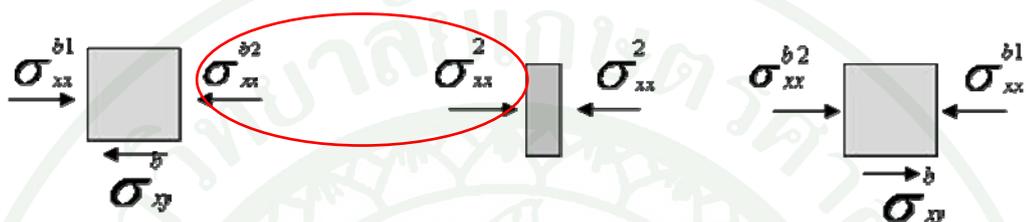


ภาพที่ 28 การเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน Y

3. จากการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

3.1 สมการจากสมดุลของหน่วยแรง

จากภาพที่ 26 พิจารณาผิวสัมผัสระหว่างอิฐ - ปูนแนวตั้งในแถวบนด้านซ้าย



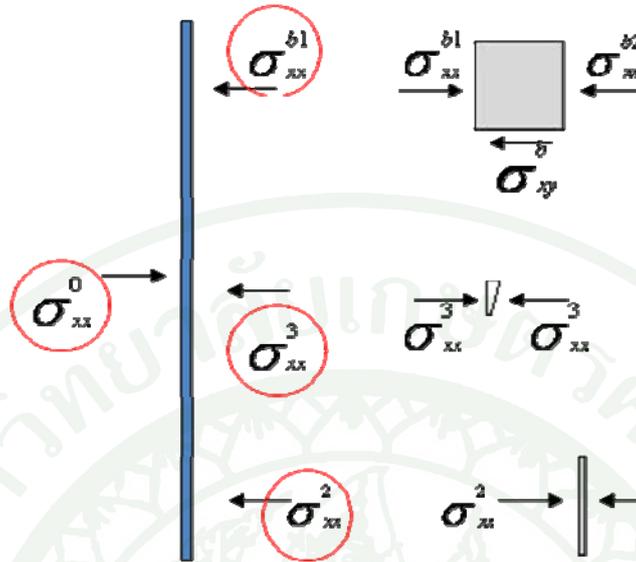
จะได้ว่า
$$\sigma_{xx}^2 = \frac{-b}{\sigma_{xx}^b} - \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h} \quad (6)$$

จากภาพที่ 28 พิจารณาผิวสัมผัสระหว่างอิฐ - ปูนแนวนอน ทางด้านขวา



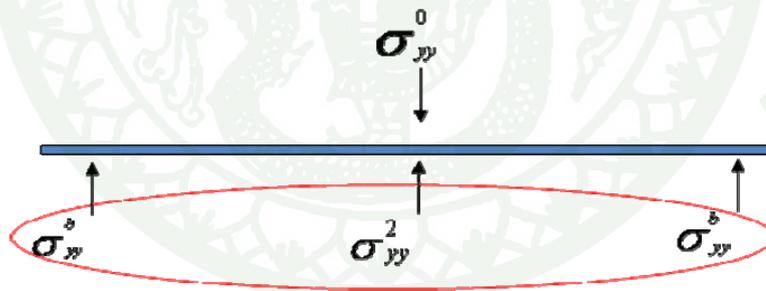
จะได้ว่า
$$\sigma_{yy}^b = \sigma_{yy}^1 \quad (7)$$

จากภาพที่ 26 พิจารณาระนาบด้านซ้าย สมดุลของแรงภายในและแรงภายนอกที่เกิดขึ้น



$$\text{จะได้ว่า } 2(h+t)\sigma_{xx}^0 = h\left[\frac{-b}{\sigma_{xx}} - \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h}\right] + h\sigma_{xx}^2 + 2t\sigma_{xx}^3 \quad (8)$$

จากภาพที่ 28 พิจารณาระนาบด้านบน สมดุลของแรงภายในและแรงภายนอกที่เกิดขึ้น



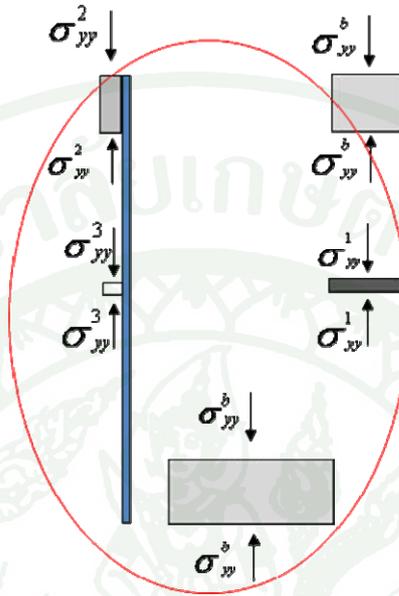
$$\text{จะได้ว่า } 2l\sigma_{yy}^b + 2t\sigma_{yy}^2 = (2l+2t)\sigma_{yy}^0 \quad (9)$$

จากภาพที่ 24ค. พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกทั้งระนาบอริฐก่อ

$$3th\sigma_{zz}^2 + 4lh\sigma_{zz}^b + (2l-t)\sigma_{zz}^1 + 3t^2\sigma_{zz}^3 = (3th+4lh+2l-t+3t^2)\sigma_{zz}^0 \quad (10)$$

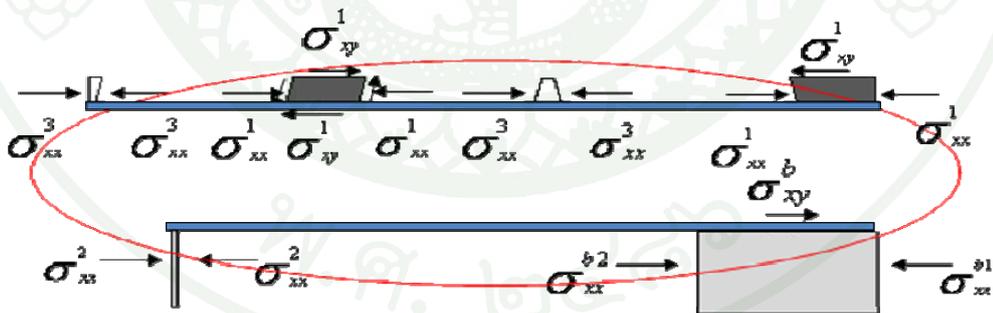
3.2 สมการจากความเข้ากันได้ของความเครียด

จากภาพที่ 28 พิจารณารอยต่อระหว่างระนาบกลางและระนาบด้านขวา



จะได้ว่า
$$h\varepsilon_{yy}^b + 2t\varepsilon_{yy}^1 = h\varepsilon_{yy}^2 + 2t\varepsilon_{yy}^3 \tag{11}$$

จากภาพที่ 26 ในแนวรอยต่อระหว่างชั้นกลางกับชั้นล่าง พิจารณาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น



จะได้ว่า
$$2l\varepsilon_{xx}^b + t\varepsilon_{xx}^2 = 3t\varepsilon_{xx}^3 + (2l-t)\varepsilon_{xx}^1 \tag{12}$$

จากภาพที่ 24ค. พิจารณาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น จะได้ว่า

$$\varepsilon_{zz}^b = \varepsilon_{zz}^2 \tag{13}$$

$$\mathcal{E}_{zz}^b = \mathcal{E}_{zz}^1 \quad (14)$$

- โดยที่ l คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของก้อนอิฐ
 h คือ ความสูงครึ่งหนึ่งของก้อนอิฐ
 t คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของปูนก่อ
- σ_{xx}^0 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่กระทำต่ออิฐก่อ
 σ_{yy}^0 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่กระทำต่ออิฐก่อ
 σ_{zz}^0 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่กระทำต่ออิฐก่อ
 σ_{xx}^1 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 σ_{xx}^2 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 σ_{xx}^3 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 σ_{xx}^{-b} คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 σ_{xy}^1 คือ ความเค้นเฉือนในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 σ_{yy}^1 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 σ_{yy}^2 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 σ_{yy}^3 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 σ_{yy}^b คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 σ_{zz}^1 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 σ_{zz}^2 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 σ_{zz}^3 คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 σ_{zz}^b คือ ความเค้นหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 \mathcal{E}_{xx}^1 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{xx}^2 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 \mathcal{E}_{xx}^3 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 \mathcal{E}_{xx}^{-b} คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ
 \mathcal{E}_{xy}^1 คือ ความเครียดเฉือนในทิศทางแกน X ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{yy}^1 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวนอน
 \mathcal{E}_{yy}^2 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อแนวตั้ง
 \mathcal{E}_{yy}^3 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อปูนก่อ
 \mathcal{E}_{yy}^b คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Y ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ

ε_{zz}^1 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อนแวนอน

ε_{zz}^2 คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในปูนก่อนแวนตั้ง

ε_{zz}^b คือ ความเครียดหลักในทิศทางแกน Z ที่เกิดขึ้นภายในอิฐ

ในสมการที่ 6 – 14 ค่าตัวแปรหน่วยแรงและความเครียดในรอยต่อปูน (Cross joint) สามารถแทนได้ด้วยความสัมพันธ์

$$\varepsilon_{yy}^3 = \frac{E_2}{E_3} \varepsilon_{yy}^2, \quad \sigma_{zz}^3 = \frac{E_1}{E_3} \sigma_{zz}^1 \quad (15)$$

$$\varepsilon_{xx}^3 = \frac{E_1}{E_3} \varepsilon_{xx}^1, \quad \sigma_{xx}^3 = \frac{E_1}{E_3} \sigma_{xx}^1 \quad (16)$$

นำสมการที่ 15 และ 16 เข้าแทนในสมการที่ 6 – 14 โดยจัดให้อยู่ในรูปที่สัมพันธ์กับรอยต่อปูน และจัดสมการที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของ หน่วยแรง – ความเครียด ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^k &= \frac{1}{E_k} [\sigma_{xx}^k - \nu_k (\sigma_{yy}^k + \sigma_{zz}^k)] \\ \varepsilon_{yy}^k &= \frac{1}{E_k} [\sigma_{yy}^k - \nu_k (\sigma_{xx}^k + \sigma_{zz}^k)], \quad k = b, 1, 2 \\ \varepsilon_{zz}^k &= \frac{1}{E_k} [\sigma_{zz}^k - \nu_k (\sigma_{xx}^k + \sigma_{yy}^k)] \end{aligned} \quad (17)$$

พิจารณาค่าตัวแปรทั้งหมดที่ไม่ทราบค่า ซึ่งมี 6 หน่วยแรงหลักและความเครียดของสามวัสดุ (อิฐ, ปูนแวนตั้ง, ปูนแวนอน) หน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนใน ปูนแวนอน รวมทั้งสิ้น 20 ตัวแปร และสมการทั้งหมดมี 18 สมการ คือสมการที่ 6-14 และ สมการที่ 17 อีก 9 สมการ ความสัมพันธ์ในกรณีนี้ที่คิดว่าปูนแวนอนไม่มีการลื่นไถล ได้ดังนี้

$$\sigma_{xy}^1 = 2G_1 \varepsilon_{xy}^1 \quad (18)$$

สมการสุดท้ายสามารถหาได้จากเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนในปูนแวนอน เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของอิฐกับปูนแวนตั้งกับส่วนที่ไม่มีปูนแวนตั้ง จัดรูปได้ดังนี้

$$\varepsilon_{xy}^1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta x_2 - \Delta x_b}{2t} = \frac{\varepsilon_{xx}^2 t - \varepsilon_{xx}^b t}{4t} \cong \frac{\varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xx}^b}{4} \quad (19)$$

ระบบทั้งหมดมี 20 สมการ และ 20 ตัวแปร สามารถแก้สมการได้โดยวิธีการเชิงตัวเลขได้
กำหนดให้การรับแรงเป็นแบบแกนเดียว

$$\sigma_{ii}^0 = 1, \sigma_{ij}^0 = 0 \quad (j \neq i) \quad i,j = x,y,z \quad (20)$$

ระบบทั้งหมดมี 20 สมการ และ 20 ตัวแปร สามารถแก้สมการได้โดยวิธีการเชิงตัวเลขได้*

* การวิเคราะห์สมการอย่างละเอียดอยู่ในภาคผนวก

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองของ หาได้ดังนี้

$$E_i = \frac{\sigma_{ii}^0}{\varepsilon_{ii}}, \nu_{ij} = \left(\frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}} \right)_i, \quad i,j = x,y,z \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^1 \frac{2l - t + 3tE_1 / E_3}{2l + t}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\varepsilon_{yy}^2 (h + 2tE_2 / E_3) + h\varepsilon_{yy}^b}{2(t + h)}$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz}^b$$

กำหนดให้ $l = 15 \text{ cm.}$, $h = 2.5 \text{ cm.}$, $t = 1 \text{ cm.}$, $E_1 = 161373 \text{ ksc.}$, $E_2 = 161373 \text{ ksc.}$

$E_b = 32450 \text{ ksc.}$, $E_3 = 161373 \text{ ksc.}$, $\nu_1 = 0.18$, $\nu_2 = 0.18$, $\nu_b = 0.13$, $G_1 = 68378.4 \text{ ksc.}$

ผลจากการวิเคราะห์สมการที่ (16) ได้ค่าต่างๆดังนี้

$$E_x = 39062.5 \text{ ksc.}$$

$$E_y = 48359.24 \text{ ksc.}$$

$$E_z = 58962.26 \text{ ksc.}$$

$$U_{xy} = 0.064$$

$$U_{xz} = 0.112$$

$$U_{yx} = 0.194$$

$$U_{yz} = 0.099$$

$$U_{zx} = 0.269$$

$$U_{zy} = 0.132$$

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นอิฐก่อในสมการที่ (5)

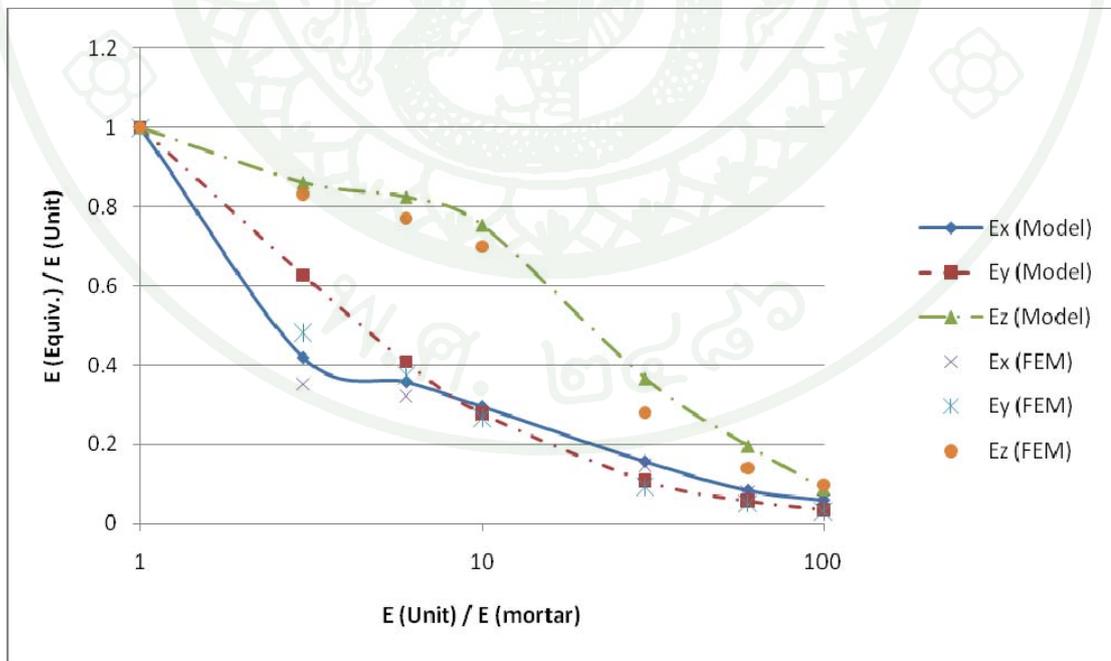
$$E_m = 37470.33 \text{ ksc.}$$

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อแนวตั้ง แนวนอน และแนวที่ตัดกัน ในการวิเคราะห์ข้างต้น เรากำหนดให้เท่ากันหมด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ในทางอีลาสติก ให้อัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐและของปูนก่อ เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 1 - 100 โดยกำหนดให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐคงที่ เท่ากับ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.13 และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วน E_y/E_m และค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.13 หลังจากทำการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วยข้างต้น ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5 ค่าอัตราส่วนมอดูลัสของการยืดหยุ่นระหว่างค่าที่ได้จากผลของไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย กับ อิฐ*

E_b/E_m	$E(\text{micro-model})/E_b$			$E(\text{FEM})/E_b$		
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis
1	1	1	1	1	1	1
3	0.4187	0.6266	0.8608	0.3521	0.4827	0.8320
6	0.3573	0.4069	0.8240	0.3234	0.3750	0.7704
10	0.2952	0.2777	0.7535	0.2748	0.2684	0.6988
30	0.1563	0.1074	0.3669	0.1481	0.0950	0.2807
60	0.0835	0.0560	0.1963	0.0808	0.0513	0.1399
100	0.0589	0.0341	0.0878	0.0606	0.0312	0.0993

*หมายเหตุ รายละเอียดค่ามอดูลัสยืดหยุ่นจากการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย อยู่ในภาคผนวก



ภาพที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนมอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุกับอิฐระหว่าง micro mechanical model กับ โมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลที่ได้ค่าอัตราส่วนมอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุกับอิฐจากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โมเดลจะมีค่าต่ำกว่าผลจากการวิเคราะห์ micro mechanical model ซึ่งในช่วงที่อัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 100 หรือมากกว่า ค่าที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าสูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย มีผลของค่าความเค้นในแนว XY เข้ามาเกี่ยวข้องแก่แกนเดียว ซึ่งถ้าหากวิเคราะห์โมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีผลของความเค้นในแนว YZ เข้ามาเพิ่ม ซึ่งมีผลกระทบสูง เมื่อค่าอัตราส่วนมอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุกับอิฐมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 29 กับภาพที่ 16 พบว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นแกนต่างๆมีค่าอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐกับมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนระหว่างอิฐและปูนก่อก่อมีค่าสูงขึ้น ยกตัวอย่างที่อัตราส่วนของอิฐและปูนก่อก่อมีค่าที่ 100 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นแกน X ในภาพที่ 16 มีค่าประมาณ 0.3 ในขณะที่ภาพที่ 29 มีค่า 0.06 ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้น มีผลมาจากการเรียงตัวของอิฐก่อก่อในลักษณะที่แตกต่างกัน เมื่อค่าอัตราส่วนมอดูลัสของอิฐต่อปูนก่อก่อมีค่าสูงมาก ส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสของอิฐก่อก่อที่เกิดขึ้นมีค่าที่น้อยมาก เพราะในภาพที่ 29 การวิเคราะห์ก่อก่ออิฐแบบวางไขว้ มีปูนก่อก่อเป็นแนวรอยต่อที่ค่อนข้างกระจายทั่วในโมเดล 1 หน่วยที่ใช้วิเคราะห์ ซึ่งในภาพที่ 16 ปูนก่อก่อมีแนวที่สมมาตร และอยู่บริเวณขอบ และอิฐมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ ถ้าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อก่อมีค่าที่น้อยมาก การเปลี่ยนรูปในแนวแกนต่างๆในภาพที่ 29 จึงมีค่าที่สูงขึ้นมากกว่าในภาพที่ 16 ทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อก่อจึงมีค่าที่ลดลง ซึ่งถ้าหากพิจารณาจากผลโดยรวม ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อก่อในแกน Z มีค่ามากกว่าในแกน X และ Y ตามลำดับเช่นกันทั้ง 2 ภาพ

วิจารณ์ผล

1. การวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย สามารถใช้ได้เป็นกรณีเฉพาะการเรียงตัวของอิฐแบบวางไขว้เท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับการก่อก่ออิฐในลักษณะอื่นๆ
2. ลักษณะของสมการและตัวแปรที่ค่อนข้างมาก ทำให้ใช้เวลานานต่อการวิเคราะห์ผล
3. ถ้าอัตราส่วนมอดูลัสยืดหยุ่นระหว่างอิฐกับอิฐมีค่าที่สูง ผลจากการวิเคราะห์ทางวิธีนี้ยังให้ค่าที่น้อยกว่าความเป็นจริง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถหาค่าคุณสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้นภายในอิฐก่อแบบเรียงไขว้ได้ โดยการวิเคราะห์แบบจำลอง 1 หน่วย จากการคำนวณทางแบบจำลอง 1 หน่วยได้ค่ามอดูลัสแกน X,Y และ Z เป็น 39062.5 ,48359.24 และ 58962.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าจากสมการจากหัวข้อ 2.3 ได้ 37470.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกัน และสามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อแตกต่างกันไปได้จากกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 27

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้สามารถใช้กับการก่ออิฐในลักษณะเรียงไขว้ หรือแบบอังกฤษเท่านั้น ควรมีการพัฒนาในรูปแบบต่างๆต่อไป
2. หากค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อมีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ จึงควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมก่อนนำค่าจากผลที่ได้ไปใช้งานจริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ เลขที่ มอก. 77 – 2517

วินิต ช่อวิเชียร. 2544. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. สำนักพิมพ์ 12/1 ซอยทองหล่อ ถ.วิภาวดีรังสิต จตุจักร , กรุงเทพฯ.

สุดชาย พานสุวรรณ. 2543. **การวิเคราะห์โบราณสถานก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Material and Testing. 2547. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

A.Antoine. 1993. Derivation of The In-Plane Elastic Characteristics of Masonry Through Homogenization Theory. **International Journal of Solids and Structures** 32 No.2 (1995): 137 – 163.

ASTM C 109/C 109M – 07. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm.] Cube Specimens)

A.Zucchini and P.B. Lourenço. 2000. A Micro-mechanical Model for The Homogenization of Masonry. **International Journal of Solids and Structures** 39 (2002): 3233-3255.



ภาคผนวก

1. รายละเอียดผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อ

ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อโดยละเอียดแต่ละก้อน (เฉพาะช่วงที่ค่าแรงกดสูงสุด)

No.1		No.2		No.3	
Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)
1.524	4765	1.86	7750	1.804	7968
1.528	4770	1.865	7840	1.808	7968
1.532	4770	1.87	7890	1.812	7976
1.536	4770	1.875	7940	1.816	7976
1.54	4775	1.88	8020	1.82	7984
1.544	4775	1.885	8090	1.824	7984
1.548	4775	1.89	8140	1.828	7984
1.552	4775	1.895	8180	1.832	7992
1.556	4775	1.9	8200	1.836	7992
1.56	4775	1.905	8230	1.84	7992
1.564	4775	1.91	8220	1.844	7992
1.568	4770	1.915	8210	1.848	7992
1.572	4770	1.92	8150	1.852	7992
1.576	4770	1.925	8090	1.856	7992
1.58	4770	1.93	8040	1.86	7984
1.584	4770	1.935	8000	1.864	7984
1.588	4770	1.94	7920	1.868	7984
1.592	4765	1.945	7830	1.872	7976
1.596	4765	1.95	7800	1.876	7976

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

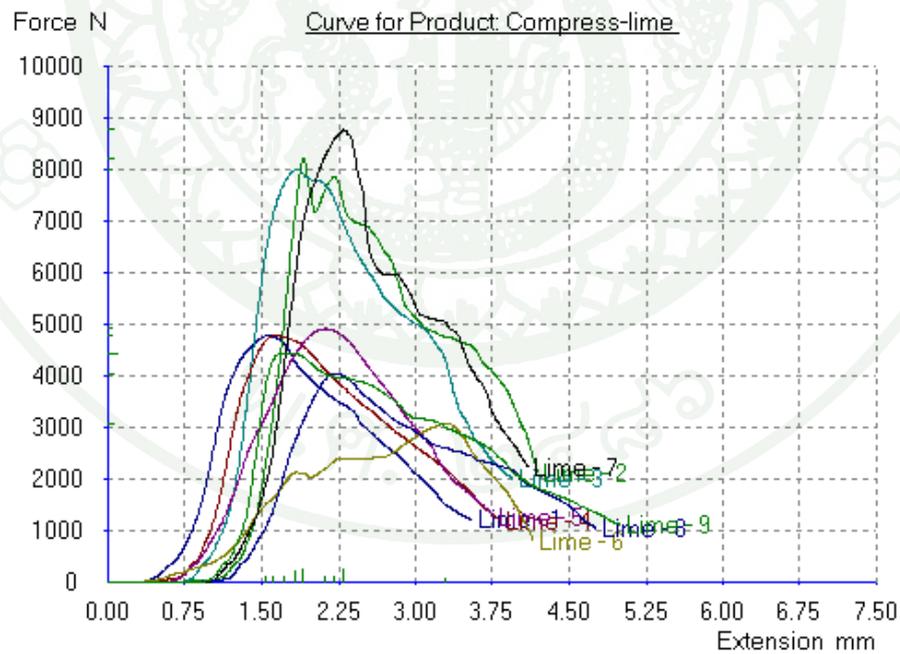
No.4		No.5		No.6	
Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)
1.6	4770	2.096	4905	3.26	3064
1.604	4770	2.1	4910	3.265	3064
1.608	4770	2.104	4910	3.27	3064
1.612	4775	2.108	4910	3.275	3068
1.616	4775	2.112	4915	3.28	3068
1.62	4775	2.116	4915	3.285	3068
1.624	4775	2.12	4915	3.29	3072
1.628	4775	2.124	4915	3.295	3072
1.632	4775	2.128	4915	3.3	3072
1.636	4775	2.132	4915	3.305	3072
1.64	4775	2.136	4915	3.31	3072
1.644	4775	2.14	4910	3.315	3072
1.648	4775	2.144	4910	3.32	3072
1.652	4775	2.148	4910	3.325	3072
1.656	4775	2.152	4910	3.33	3072
1.66	4775	2.156	4910	3.335	3068
1.664	4775	2.16	4910	3.34	3064
1.668	4775	2.164	4905	3.345	3060

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

No.7		No.8		No.9	
Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)	Extension (mm.)	Force(N)
2.255	8680	2.175	4020	1.6725	4430
2.26	8700	2.18	4020	1.68	4430
2.265	8720	2.185	4025	1.6875	4435
2.27	8730	2.19	4030	1.695	4440
2.275	8740	2.195	4030	1.7025	4440
2.28	8750	2.2	4030	1.71	4440
2.285	8760	2.205	4035	1.7175	4445
2.29	8760	2.21	4040	1.725	4445
2.295	8770	2.215	4040	1.7325	4445
2.3	8760	2.22	4040	1.74	4445
2.305	8760	2.225	4040	1.7475	4445
2.31	8760	2.23	4040	1.755	4445
2.315	8750	2.235	4040	1.7625	4440
2.32	8740	2.24	4040	1.77	4440
2.325	8740	2.245	4035	1.7775	4440
2.33	8720	2.25	4030	1.785	4435
2.335	8700	2.255	4030	1.7925	4435
2.34	8690	2.26	4030	1.8	4435
2.345	8680	2.265	4025	1.8075	4430

ตารางผนวกที่ 2 สรุปผลการทดสอบแรงอัดของปูนก่อ

Comp. Strength MPa	Breadth mm	Specimen No	Label
1.850316167	50.79999924	1	
3.18913126	50.79999924	2	
3.096906185	50.79999924	3	
1.850316167	50.79999924	4	
1.904566288	50.79999924	5	
1.190402389	50.79999924	6	
3.39838171	50.79999924	7	
1.56550312	50.79999924	8	
1.722440958	50.79999924	9	



ภาพผนวกที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของปูนก่อ

ตารางผนวกที่ 3 การเคลื่อนที่ของปุ๋ยมุ่ยระหว่างทำการทดสอบ (เฉพาะช่วงที่การเคลื่อนที่สูงสุด)

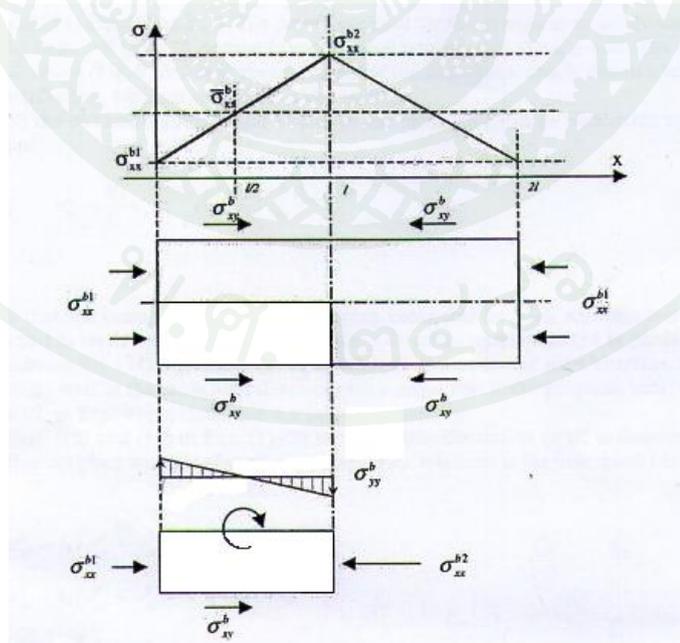
ปุ๋ยมุ่ย 1 ($\times 10^{-3}$ cm)		ปุ๋ยมุ่ย 2 ($\times 10^{-3}$ cm)		ปุ๋ยมุ่ย 3 ($\times 10^{-3}$ cm)	
CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
-1285	355	-1450	355	-1215	355
-1290	345	-1480	345	-1265	345
-1295	335	-1515	335	-1310	335
-1295	330	-1550	330	-1370	330
-1300	320	-1585	320	-1430	320
-1300	310	-1620	310	-1485	310
-1300	305	-1655	305	-1540	305
-1305	295	-1685	295	-1580	295
-1305	290	-1715	290	-1365	290
-1305	280	-1735	280	-1360	280
-1305	275	-1755	275	-1350	275
-1305	265	-1760	265	-1350	265
-1305	255	-1755	255	-1260	255
-1300	255	-1745	255	-1255	255
-1305	240	-1720	240	-1240	240
-1295	230	-1680	230	-1160	230
-1295	225	-1620	225	-1155	225
-1285	220	-1550	220	-1150	220
-1285	205	-1430	205	-1150	205
-1275	200	-1325	200	-1150	200
-1270	190	-1240	190	-1145	190
-1265	180	-1175	180	-1135	180

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้สมการอย่างละเอียด

2.1 สมการที่ 6, 8 และ 12 เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน X

ภาพผนวกที่ 2 สมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในทิศทางแกน X

σ_{xy}^b และ σ_{xx}^{b2} สามารถจัดความสัมพันธ์สมดุลความเค้นภายในก่อนอิฐ ได้ดังนี้



ภาพผนวกที่ 3 การกระจายความเค้นภายในก่อนอิฐ

จากภาพที่ 32 จะหาความสัมพันธ์จากรูปได้ดังนี้

$$\sigma_{xx}^{b1} = \frac{-b}{\sigma_{xx}} - \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h} \quad (22)$$

$$\sigma_{xx}^{b2} = \frac{-b}{\sigma_{xx}} + \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h} \quad (23)$$

จากผิวสัมผัสระหว่างอิฐและปูนก่อ ในวงกลมสีแดงภาพที่ 3 ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{xx}^2 = \sigma_{xx}^{b2} = \frac{-b}{\sigma_{xx}} + \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h} \quad (24)$$

จากภาพที่ 31 จะได้สมการสมดุลความเค้นภายนอกเท่ากับความเค้นภายในได้ดังนี้

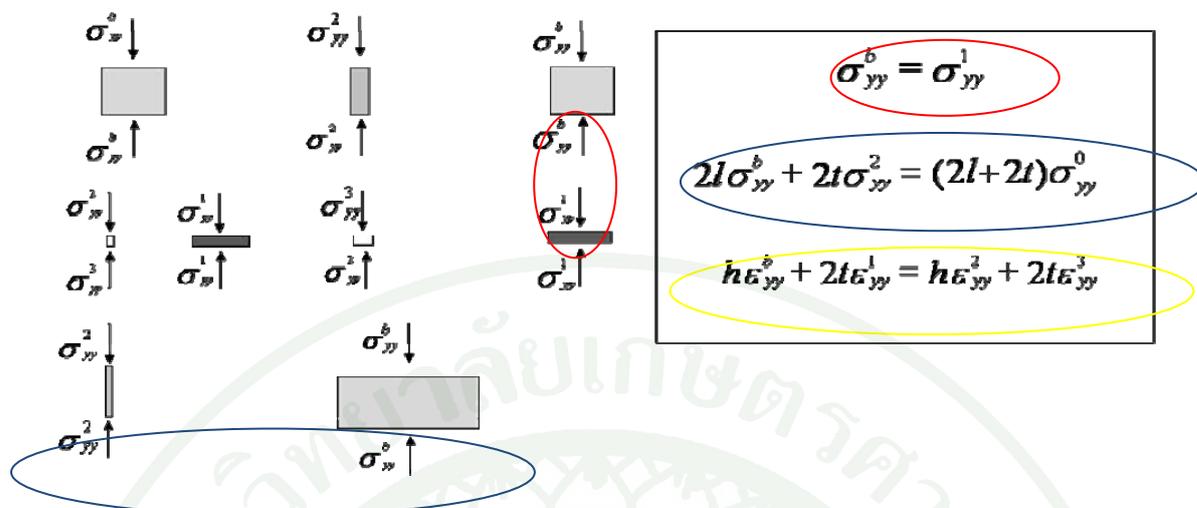
$$2(h+t)\sigma_{xx}^0 = h\sigma_{xx}^{b1} + h\sigma_{xx}^2 + t\sigma_{xx}^3 \quad (25)$$

แทนค่า σ_{xx}^{b1} จากสมการที่ 22

$$2(h+t)\sigma_{xx}^0 = h \left[\frac{-b}{\sigma_{xx}} - \sigma_{xy}^1 \frac{(l-t)}{2h} \right] + h\sigma_{xx}^2 + t\sigma_{xx}^3 \quad (26)$$

จากภาพที่ 31 สมการในวงกลมสีแดงหาจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3

2.2 สมการที่ 7, 9 และ 11 เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่เมื่อรับแรงในแนวแกน Y



ภาพผนวกที่ 4 สมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y

จากภาพที่ 33 สมการในวงกลมสีแดง หากจากสมดุลของความเค้นภายในที่รอยต่อระหว่างอิฐกับปูนแนวนอน สมการในวงกลมสีน้ำเงินหาจากสมดุลของความเค้นภายในกับความเค้นที่กระทำภายนอก สมการในวงกลมสีเหลืองหาจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ แถวที่ 2 และแถวที่ 3

2.3 สมการที่ 10 หาจากสมดุลของความเค้นภายในกับความเค้นที่กระทำภายนอกในทิศทางแกน Z สมการที่ 13 และ 14 หาจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ภายใน เมื่อรับแรงในทิศทางแกน Z

3. ผลการแก้สมการ 20 สมการอย่างละเอียด

3.1 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 161373 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าอัตราส่วนปัวซองของอิฐ 0.13

ค่าอัตราส่วนปัวซองของปูนก่อ 0.18

ครึ่งความยาวอิฐ 15 เซนติเมตร

ครึ่งความสูงอิฐ 2.5 เซนติเมตร

ความหนาของปูนก่อ 1 เซนติเมตร

ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 68378.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ 20 สมการเพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	4.192	-0.576	-0.271
σ_{xx}^2	0.761	0.154	0.094
σ_{xx}^b	0.323	0.068	0.013
σ_{yy}^1	0.021	0.874	-0.006
σ_{yy}^2	-0.321	2.892	0.099
σ_{yy}^b	0.021	0.874	-0.006
σ_{zz}^1	0.305	-0.294	2.688
σ_{zz}^2	-0.374	0.201	2.772
σ_{zz}^b	-0.046	0.053	0.551
σ_{xy}^1	0.156	0.0305	0.029
ϵ_{xx}^1	0.0000256	-0.0000042	-0.00000467
ϵ_{xx}^2	0.00000549	-0.0000025	-0.00000262
ϵ_{xx}^b	0.0000101	-0.0000016	-0.00000178
ϵ_{yy}^1	-0.00000488	0.0000064	-0.00000274
ϵ_{yy}^2	-0.00000242	0.0000175	-0.00000259
ϵ_{yy}^b	-0.00000045	0.0000264	-0.00000246
ϵ_{zz}^1	-0.0000028	-0.00000215	0.00001696
ϵ_{zz}^2	-0.0000028	-0.00000215	0.00001696
ϵ_{zz}^b	-0.0000028	-0.00000215	0.00001696
ϵ_{xy}^1	-0.00000114	-0.00000022	-0.00000021
E_x	39062.5		
E_y		48359.24007	
E_z			58962.26415

3.2 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 3

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 10816.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 4786.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่า
มอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 3

Case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.8026	0.0394	-0.0717
σ_{xx}^2	1.5868	-0.0345	0.0179
σ_{xx}^b	0.7966	0.0167	0.0096
σ_{yy}^1	-0.0103	1.0240	-0.0005
σ_{yy}^2	0.1553	0.6366	0.0069
σ_{yy}^b	-0.0104	1.0240	-0.0005
σ_{zz}^1	0.0615	0.0866	0.3779
σ_{zz}^2	0.1849	0.0266	0.3906
σ_{zz}^b	-0.0224	-0.0198	1.1632
σ_{xy}^1	0.2822	-0.0183	0.0030
ϵ_{xx}^1	0.0000736	-0.0000097	-0.0000112
ϵ_{xx}^2	0.0001430	-0.0000112	-0.0000031
ϵ_{xx}^b	0.0000247	-0.0000035	-0.0000044
ϵ_{yy}^1	-0.0000113	0.0000932	-0.0000037
ϵ_{yy}^2	-0.0000069	0.0000590	-0.0000043
ϵ_{yy}^b	-0.0000034	0.0000316	-0.0000047
ϵ_{zz}^1	-0.0000038	-0.0000048	0.0000358
ϵ_{zz}^2	-0.0000038	-0.0000048	0.0000358
ϵ_{zz}^b	-0.0000038	-0.0000048	0.0000358
ϵ_{xy}^1	0.0000295	-0.0000019	0.0000003

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

E_x	13586.9565	
E_y		20332.5830
E_z		27932.9609

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	3	
Stress X	38.2750	ksc
Strain X	0.0034	
E	11425.0000	ksc
Stress Y	73.1730	ksc
Strain Y	0.0047	
E	15663.9400	ksc
Stress Z	105.2900	ksc
Strain Z	0.0039	
E	26997.4000	Ksc

3.3 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 6

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 5408.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 2393.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 6

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.4698	0.0394	-0.0717
σ_{xx}^2	1.7399	-0.0345	0.0179
σ_{xx}^b	0.7797	0.0167	0.0096
σ_{yy}^1	-0.0140	1.0240	-0.0005
σ_{yy}^2	0.2105	0.6366	0.0069
σ_{yy}^b	-0.0140	1.0240	-0.0005
σ_{zz}^1	0.0393	0.0866	0.3779
σ_{zz}^2	0.2336	0.0266	0.3906
σ_{zz}^b	-0.0201	-0.0198	1.1632
σ_{xy}^1	0.3433	-0.0183	0.0030
ϵ_{xx}^1	0.0000863	-0.0000097	-0.0000112
ϵ_{xx}^2	0.0003110	-0.0000112	-0.0000031
ϵ_{xx}^b	0.0000241	-0.0000035	-0.0000044
ϵ_{yy}^1	-0.0000148	0.0001856	-0.0000037
ϵ_{yy}^2	-0.0000085	0.0001001	-0.0000043
ϵ_{yy}^b	-0.0000035	0.0000318	-0.0000047
ϵ_{zz}^1	-0.0000037	-0.0000048	0.0000374
ϵ_{zz}^2	-0.0000037	-0.0000048	0.0000374
ϵ_{zz}^b	-0.0000037	-0.0000048	0.0000374
ϵ_{xy}^1	0.0000717	-0.0000019	0.0000003

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

E_x	11594.2029	
E_y		13204.3084
E_z		26737.9679

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	6	
Stress X	44.1800	ksc
Strain X	0.0042	
E	10494.0600	ksc
Stress Y	79.9738	ksc
Strain Y	0.0066	
E	12169.9300	ksc
Stress Z	129.9980	ksc
Strain Z	0.0052	
E	24999.6200	ksc

- 3.4 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 10
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 3245 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 1435.84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ 1 หน่วย และค่าจากโมเมนต์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่า
 มอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อที่อัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 10

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.3407	0.1114	-0.0240
σ_{xx}^2	1.7993	-0.0598	0.0065
σ_{xx}^b	0.7718	0.0136	0.0030
σ_{yy}^1	-0.0155	1.0333	-0.0002
σ_{yy}^2	0.2321	0.5000	0.0025
σ_{yy}^b	-0.0155	1.0333	-0.0002
σ_{zz}^1	0.0305	0.1322	0.1199
σ_{zz}^2	0.2523	0.0406	0.1243
σ_{zz}^b	-0.0191	-0.0302	1.2315
σ_{xy}^1	0.3669	-0.0262	0.0013
ϵ_{xx}^1	0.0001044	-0.0000123	-0.0000124
ϵ_{xx}^2	0.0005351	-0.0000401	-0.0000031
ϵ_{xx}^b	0.0000239	-0.0000360	-0.0000048
ϵ_{yy}^1	-0.0000196	0.0003086	-0.0000039
ϵ_{yy}^2	-0.0000107	0.0001549	-0.0000045
ϵ_{yy}^b	-0.0000035	0.0000319	-0.0000050
ϵ_{zz}^1	-0.0000036	-0.0000051	0.0000409
ϵ_{zz}^2	-0.0000036	-0.0000051	0.0000409
ϵ_{zz}^b	-0.0000036	-0.0000051	0.0000409
ϵ_{xy}^1	0.0001278	-0.0000091	0.0000004

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

E_x	9578.5441	
E_y		9011.3285
E_z		24449.8778

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	10	
Stress X	48.0500	ksc
Strain X	0.0054	
E	8918.7900	ksc
Stress Y	81.7500	ksc
Strain Y	0.0094	
E	8710.0400	ksc
Stress Z	147.4000	ksc
Strain Z	0.0065	
E	22676.9200	ksc

- 3.5 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 30
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 1081.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 478.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 30

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.2139	0.1328	-0.0085
σ_{xx}^2	1.8576	-0.0670	0.0023
σ_{xx}^b	0.7649	0.1270	0.0010
σ_{yy}^1	-0.0169	1.0360	-0.0001
σ_{yy}^2	0.2534	0.4610	0.0009
σ_{yy}^b	-0.0169	1.0359	-0.0001
σ_{zz}^1	0.0218	0.1463	0.0406
σ_{zz}^2	0.2706	0.0455	0.0422
σ_{zz}^b	-0.0182	-0.0335	1.2526
σ_{xy}^1	0.3902	-0.0286	0.0005
ϵ_{xx}^1	0.0001972	-0.0000193	-0.0000127
ϵ_{xx}^2	0.0016544	-0.0001231	-0.0000031
ϵ_{xx}^b	0.0000237	-0.0000036	-0.0000050
ϵ_{yy}^1	-0.0000439	0.0009242	-0.0000039
ϵ_{yy}^2	-0.0000215	0.0004285	-0.0000045
ϵ_{yy}^b	-0.0000035	0.0000320	-0.0000050
ϵ_{zz}^1	-0.0000036	-0.0000052	0.0000840
ϵ_{zz}^2	-0.0000036	-0.0000052	0.0000840
ϵ_{zz}^b	-0.0000036	-0.0000052	0.0000840
ϵ_{xy}^1	0.0004077	-0.0000299	0.0000005

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

E_x	5070.9939	
E_y		3485.5784
E_z		11904.7619

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	30	
Stress X	54.6800	ksc
Strain X	0.0114	
E	4807.0300	ksc
Stress Y	83.2700	ksc
Strain Y	0.0269	
E	3084.0700	ksc
Stress Z	158.5000	ksc
Strain Z	0.0174	
E	9109.1900	ksc

- 3.6 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 60
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 540.83 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 239.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่า
 มอดูลัสยืดหยุ่นอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 60

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.1825	0.1382	-0.0043
σ_{xx}^2	1.8721	-0.0693	0.0012
σ_{xx}^b	0.7633	0.0125	0.0005
σ_{yy}^1	-0.0172	1.0366	-0.0003
σ_{yy}^2	0.2587	0.4508	-0.0004
σ_{yy}^b	-0.0172	1.0366	0.0000
σ_{zz}^1	0.0196	0.1499	0.0204
σ_{zz}^2	0.2751	0.0468	0.0212
σ_{zz}^b	-0.0179	-0.0343	1.2579
σ_{xy}^1	0.3960	-0.0292	0.0002
ϵ_{xx}^1	0.00036900	-0.00002970	-0.00001280
ϵ_{xx}^2	0.00333300	-0.00024770	-0.00000306
ϵ_{xx}^b	0.00002370	-0.00000363	-0.00000502
ϵ_{yy}^1	-0.00008047	0.00184750	-0.00000393
ϵ_{yy}^2	-0.00003770	0.00083890	-0.00000455
ϵ_{yy}^b	-0.00000352	0.00003203	-0.00000504
ϵ_{zz}^1	-0.00000354	-0.00000526	0.00015700
ϵ_{zz}^2	-0.00000354	-0.00000526	0.00015700
ϵ_{zz}^b	-0.00000354	-0.00000526	0.00015700
ϵ_{xy}^1	0.00082740	-0.00006101	0.00000490

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

E_x	2710.0271	
E_y		1815.7647
E_z		6369.4268

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	60	
Stress X	64.3950	ksc
Strain X	0.0246	
E	2621.6800	ksc
Stress Y	84.8500	ksc
Strain Y	0.0510	
E	1664.1900	ksc
Stress Z	162.0800	ksc
Strain Z	0.0357	
E	4540.0600	ksc

3.7 ค่าอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 100

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ 32450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ 324.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่ามอดูลัสแรงเฉือนของปูนก่อ 143.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางผนวกที่ 10 ผลการวิเคราะห์โมเดล 1 หน่วย และค่าจากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นอิฐก่อที่มีอัตราส่วนของมอดูลัสยืดหยุ่นอิฐต่อปูนก่อ เท่ากับ 100

case	$\sigma_{xx}^0=1, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=1, \sigma_{zz}^0=0$	$\sigma_{xx}^0=0, \sigma_{yy}^0=0, \sigma_{zz}^0=1$
σ_{xx}^1	0.1700	0.1400	-0.0026
σ_{xx}^2	1.8778	-0.0700	-0.0007
σ_{xx}^b	0.7626	0.0124	0.0003
σ_{yy}^1	-0.0174	1.0369	0.0000
σ_{yy}^2	0.2680	0.4468	0.0003
σ_{yy}^b	-0.0174	1.0369	0.0000
σ_{zz}^1	0.0187	0.1513	0.0123
σ_{zz}^2	0.2769	0.0473	0.0127
σ_{zz}^b	-0.0178	-0.0346	1.2600
σ_{xy}^1	0.3983	-0.0294	0.0001
ϵ_{xx}^1	0.0005230	-0.0000436	-0.0000129
ϵ_{xx}^2	0.0055710	-0.0004137	-0.0000031
ϵ_{xx}^b	0.0000236	-0.0000036	-0.0000050
ϵ_{yy}^1	-0.0001292	0.0030780	-0.0000039
ϵ_{yy}^2	-0.0000594	0.0013860	-0.0000046
ϵ_{yy}^b	-0.0000035	0.0000320	-0.0000051
ϵ_{zz}^1	-0.0000035	-0.0000053	0.0003510
ϵ_{zz}^2	-0.0000035	-0.0000053	0.0003510
ϵ_{zz}^b	-0.0000035	-0.0000053	0.0003510
ϵ_{xy}^1	0.0013869	-0.0001025	0.0000005

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

E_x	1912.0459	
E_y		1108.1034
E_z		2849.0028

ค่าจากโมเดลทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Eb/Em	100	
Stress X	73.9660	ksc
Strain X	0.6020	
E	1965.8500	ksc
Stress Y	87.6200	ksc
Strain Y	0.6062	
E	1011.7800	ksc
Stress Z	175.6900	ksc
Strain Z	0.5450	
E	3223.6700	ksc

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวเนาวรัตน์ มุ่งเจริญ
เกิดวันที่	23 กันยายน 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	2550 วศ.บ. วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-