การวิเคราะห์โครงสร้างของมณฑปอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

วิรัชต์ ทองรวย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-993-8

013448

I 17372015X

A Structural Analysis of a Brick Mandapa in Sukhothai Historical Park

Mr. Virat Thong-ruay

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1986

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์โครงสร้างของมณฑปอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

โดย นายวิรัฬห์ ทองรวย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดี ฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนรักษาการในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..................................ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

..................................กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

..................................กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ)

..................................กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงเดชา รัชตโพธิ์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์โครงสร้างของมณฑปอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

ชื่อ นายวิรัชต์ ทองรวย

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ความมุ่งหมายของการวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างของมณฑปอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย เพื่อหาสาเหตุที่อาจทำให้เกิดการเสื่อมสลาย และเสียเสถียรภาพ ของโบราณสถาน การวิเคราะห์โครงสร้าง กระทำโดยวิธีไฟไนท์เอลลิเมนท์แบบสามมิติ คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์จะทำให้สามารถเสริมความมั่นคงแข็งแรงได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างสำหรับมณฑปอิฐก่อที่วัดศรีชุม เพื่อศึกษาผลกระทบจากการที่น้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิฐก่อมีน้ำฝนขัง ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอิฐก่อภายในและภายนอก การทรุดตัวที่ขอบของดินฐานราก และการทรุดตัวของวัสดุอิฐก่อ อันเนื่องมาจากการเสื่อมสลายของอิฐก่อ ผลการวิเคราะห์ให้ข้อสรุปว่า โครงสร้างของมณฑปมีลักษณะเป็นปฏิสมมาตร จึงเป็นเหตุให้ผนังของมณฑปมีการยุบตัวในลักษณะเอียง และมีหน่วยแรงสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมผนัง

กรณีของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และการทรุดตัวที่ฐานเพียงเล็กน้อย ไม่มีผลต่อการพังทลายของมณฑป แต่กรณีของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำและการทรุดตัวของวัสดุก่อสร้างมีผลทำให้โครงสร้างของมณฑปเสื่อมสลายได้

Thesis Title — A Structural Analysis of A Brick Mandapa in Sukhothai Historical Park

Name — Mr. Virat Thongruay

Thesis Advisor — Associate Professor Karoon Chandrangsu, Ph.D.

Department — Civil Engineering

Academic Year — 1985

ABSTRACT

The purposes of this research were to analyse structural behavior of brick Mandapas in Sukhothai Historical Park in order to find out causes of strength deterioration and instability of the monuments. The Structural analysis was done by a three-dimensional finite element method. The properties of material used for this analysis were done in the laboratory. The result of this study could be used for structural strengthening .

The research also demonstrated the analysis of brick Mandapa at Wat Srichum to study the effects of gravity load increasing from water absorption of brickwork, a differential temperature between internal and external brickwork, a settlement at the edge of the foundation, and a settlement of materials due to the deterioration of brickwork. It can be concluded that the Mandapa structure is asymmetrical that caused the wall sway and concentrated stresses were at the corner of the wall. There was no effect of the different temperature and a small settlement of the edge. But the water absorption and the settlement of materials could deteriorate the Mandapa structure.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิติกรรมประกาศ

ในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนจบ และรองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงเดชา รัชตโพธิ์ ที่กรุณาตรวจ พร้อมทั้งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กรมศิลปากรที่กรุณาให้ความสะดวกในการศึกษาและเก็บข้อมูลสำหรับการวิจัยนี้ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ยืมเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง และขอขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณปู่ ฌาน ทองรวย ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด จนผู้เขียนสามารถสำเร็จการศึกษาถึงขั้นนี้

วิรัชต์ ทองรวย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

รายการตารางประกอบ .... ฌ

รายการรูปประกอบ .... ญ

สัญลักษณ์ .... ฒ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4

1.4 แผนดำเนินการวิจัย 5

2. การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 มณฑปในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย 7

2.2 โครงสร้างอิฐก่อในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย 8

2.3 สาเหตุของการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน 9

2.4 เกณฑ์การบูรณะโบราณสถาน 10

3. แนวความคิดและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย 14

3.1 แนวความคิดในการวิเคราะห์ 14

3.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ 14

3.3 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุ 26

4. ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง 33

4.1 ขอบเขตของการวิเคราะห์ 33

4.2 วิธีดำเนินการวิเคราะห์ 33

4.3 ผลการวิเคราะห์ 34

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 39

5.1 สรุปผล 39

5.2 ข้อเสนอแนะ 40

เอกสารอ้างอิง 41

ประวัติ 132

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

3.1 คุณสมบัติการดูดซึมของอิฐสมัยโบราณ 43

3.2 คุณสมบัติเชิงกลของอิฐสมัยโบราณ 43

3.3 คุณสมบัติเชิงกลของปูนก่อ 44

3.4 คุณสมบัติเชิงกลของปูนก่อที่มีอัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ : ปูนขาว : ทราย = 2 : 6 :12 45

3.5 คุณสมบัติเชิงกลของอิฐก่อ ที่ก่อด้วยอิฐโบราณและปูนก่อที่มีอัตราส่วนผสม ปูนซิเมนต์ : ปูนขาว : ทราย = 2 : 6 :12 46

3.6 สัดส่วนปอยซองของดินชนิดต่าง ๆ 47

3.7 โมดูลัสยืดหยุ่นของดินชนิดต่าง ๆ 47

3.8 สัมประสิทธิ์ตัวคูณ (Influence factor) 47

3.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง 48

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ขอบเขตของอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย	49
2.1	มณฑปวัดศรีชุม	50
2.2	มรฑปวัดตระพังทองหลาง	51
2.2 ก	มณฑปวัดตระพังทองหลาง	52
2.3	มณฑปวัดมหาธาตุ	53
2.4	มณฑปวัดตึก	54
2.5	มณฑปวัดสวนแก้วอุทยานน้อย	55
2.6	มณฑปวัดกุฎีราย	56
2.7	มณฑปวัดศรีโทน	57
3.1	ไฟไนท์เอลลิเมนท์ชนิด บริค 8 (Brick 8)	58
3.2	เอลลิเมนท์ชนิดโครงถัง (Truss Element)	18
3.3	อิฐก่อภายใต้หน่วยแรงอัด	22
3.4	อิฐก่อภายใต้หน่วยแรงเฉือน	25
3.5	การทดลองหากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ	58
3.6	โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐโบราณ	59
3.7 ก	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซิเมนต์ของปูนก่อ (3 วัน)	60
3.7 ข	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซิเมนต์ของปูนก่อ (7 วัน)	61
3.7 ค	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซิเมนต์ของปูนก่อ (28 วัน)	62
3.8 ก	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปูนก่อกับเวลาในอัตราส่วน ปูนขาว : ทราย = 1 : 1.5	63
3.8 ข	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปูนก่อกับเวลาในอัตราส่วน ปูนขาว : ทราย = 1 : 2	64

รูปที่ หน้า

3.8 ค ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปูนก่อกับเวลา ในอัตราส่วน ปูนขาว : ทราย = 1 : 2.5 65

3.8 ง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปูนก่อกับเวลา ในอัตราส่วน ปูนขาว : ทราย = 1 : 3 66

3.8 จ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปูนก่อกับเวลา ในอัตราส่วน ปูนขาว : ทราย = 1 : 4 67

3.9 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อที่มีอัตราส่วนผสมของ ปูนซิเมนต์ : ทราย = 2 : 6 :12

3.10 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ 69

3.11 การหาสัดส่วนปอยซองของอิฐก่อ 70

3.12 ก แผนผังแสดงตำแหน่งที่เจาะสำรวจดินทางวิศวกรรม 71

3.12 ข แนวชั้นดินบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย 72

4.1 ก รูปจำลองของมณฑปวัดศรีชุม 73

4.1 ข รูปจำลองแปลนของมณฑปอิฐก่อ 74

4.1 ค รูปจำลองภาคตัดของมณฑปอิฐก่อ 75

4.2 ก แบบจำลองไฟไนท์ เอลลิเมนต์ของกำแพงมณฑปด้านหน้า........... 76

4.2 ข แบบจำลองไฟไนท์เอลลิเมนท์ของกำแพงมณฑปด้านหลัง 77

4.3 ก 1 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ② - ② 78

4.3 ก 2 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด③ - ③..................... 79

4.3 ก 3 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ④ - ④..................... 80

4.3 ก 4 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ⑤ - ⑤..................... 81

4.3 ข 1 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ② - ②.................. 82

รูปที่ หน้า

4.3 ข 2 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ③ - ③ 83

4.3 ข 3 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ④ - ④ 84

4.3 ข 4 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ⑤ - ⑤ 85

4.3 ค 1 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ② - ② 86

4.3 ค 2 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ③ - ③ 87

4.3 ค 3 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ④ - ④ 88

4.3 ค 4 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ⑤ - ⑤ 89

4.3 ง 1 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ② - ② 90

4.3 ง 2 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ③ - ③ 91

4.3 ง 3 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ④ - ④ 92

4.3 ง 4 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ⑤ - ⑤ 93

4.3 จ 1 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ② - ②... 94

4.3 จ 2 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ③ - ③... 95

รูปที่ หน้า

4.3 จ 3 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ④ - ④.... 96

4.3 จ 4 แสดงการเปลี่ยนรูปทรงของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ⑤ - ⑤.... 97

4.4 ก 1 แสดงคอนทัวร์ของการทรุดตัวที่ฐานของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง 98

4.4 ก 2 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่ฐานของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง 99

4.4 ก 3 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ① - ① 100

4.4 ก 4 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ⑥ - ⑥ 101

4.4 ก 5 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ③ - ③ 102

4.4 ก 6 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง ที่ภาคตัด ④ - ④ 103

4.4 ข 1 แสดงคอนทัวร์ของการทรุดตัวที่ฐานของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเองและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 104

4.4 ข 2 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่ฐานของมณฑป เนื่องจากน้ำหนักตัวเองและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 105

4.4 ข 3 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ① - ① 106

4.4 ข 4 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ⑥ - ⑥ 107

4.4 ข 5 แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด ③ - ③ 108

รูปที่ | หน้า

4.4 ข 6 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่ภาคตัด 4 – 4 109

4.4 ค 1 แสดงกอนทัวร์ของการทรุดตัวที่ฐานของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ 110

4.4 ค 2 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่ฐานของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ 111

4.4 ค 3 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ① – ① ... 112

4.4 ค 4 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ⑥ – ⑥ ... 113

4.4 ค 5 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์ ที่ภาคตัด ③ – ③ 114

4.4 ค 6 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และน้ำหนักเยื้องศูนย์เนื่องจากน้ำ ที่ภาคตัด ④ – ④ 115

4.4 ง 1 แสดงกอนทัวร์ของการทรุดตัวที่ฐานของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก 116

4.4 ง 2 แสางกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่ฐานของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและการทรุดตัวของดินฐานราก 117

4.4 ง 3 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ① – ① 118

4.4 ง 4 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนัก ตัวเองและการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ⑥ – ⑥ 119

4.4 ง 5 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ③ – ③ 120

4.4 ง 6 แสดงกอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง และการทรุดตัวของดินฐานราก ที่ภาคตัด ④ – ④ 121

รูปที่		หน้า
4.4 จ 1	แสดงคอนทัวร์ของการทรุดตัวที่ฐานของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป	122
4.4 จ 2	แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ การทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป	123
4.4 จ 3	แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ของ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ① - ①	124
4.4 จ 4	แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงในแนวดิ่งของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ⑥ - ⑥	125
4.4 จ 5	แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบ และการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ③ - ③	126
4.4 จ 6	แสดงคอนทัวร์ของหน่วยแรงเฉือนของมณฑปเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง การทรุดตัวที่ขอบและการทรุดตัวที่กึ่งกลางผนังมณฑป ที่ภาคตัด ④ - ④	127
4.5	การเสื่อมสภาพของอิฐก่อที่มณฑปวัดตระพังทองหลาง	128
4.6	การเสื่อมสภาพของปูนก่อที่มณฑปวัดศรีชุม	129
4.7	การแตกร้าวและการเคลื่อนตัวของอิฐก่อที่มณฑปวัดศรีชุม	130
4.8	การแตกร้าวของอิฐก่อที่มณฑปวัดตระพังทองหลาง	131

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

[a] = เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนที่ของจุดขั้ว (node)

[c] = เมตริกซ์แทนคุณสมบัติของวัสดุ

d = ความหนาของอิฐ

Eb = โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ

Em = โมดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อ

[J] = จาคอบเบียน เมตริกซ์ (Jacobian matrice)

[K] = โกลโบล สติฟเนส เมตริกซ์ (Grobal Stiffness Mattrix)

[r] = เมตริกซ์ (Mattrix) ของการเคลื่อนที่ของจุดขั้ว

[R] = เมตริกซ์ (Mattrix) ของแรงที่เกิดขึ้นแต่ละขั้ว

σ_y = กำลังอัดของอิฐก่อ

σ_t = หน่วยแรงดึงสูงสุดในอิฐก่อ

$\epsilon_{yb}, \epsilon_{ym}$ = ความเครียดในแนวดิ่งของอิฐและของปูนก่อ

$\epsilon_{tb}, \epsilon_{tm}$ = ความเครียดในแนวราบของอิฐและปูนก่อ

ν_b, ν_m = สัดส่วนปอยซองของอิฐและปูนก่อ

σ_b = หน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในอิฐ

σ_m = หน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในปูนก่อ

σ_u = กำลังอัดสูงสุดของอิฐก่อ

σ_o = กำลังอัดสูงสุดของอิฐ

σ_b = หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของอิฐก่อ

Vbo = หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างอิฐและปูนก่อ

μ = สัมประสิทธิ์ของความยึดระหว่างอิฐและปูนก่อ

τ = หน่วยแรงเฉือน

τ_t = หน่วยแรงเฉือนสูงสุด