



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง

A Study of Seismic Response of Belled Shape Masonry Historical Monuments

นามผู้วิจัย นางสาวณัฐยา เลิศสิวนนท์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รongศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวัฒน์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนิรัตน์ กุศลาศัย, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รongศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง

A Study of Seismic Response of Belled Shape Masonry Historical Monuments

โดย

นางสาวณัฐยา เลิศสิวนนท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

ณัฐยา เลิศสิวนนท์ 2552: การศึกษาการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของโบราณสถานอิฐ  
ก่อทรงระฆัง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรม  
โยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์  
เบญจพล เวทย์วิวรรณ, Ph.D. 112 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเจดีย์อิฐก่อทรงระฆัง ซึ่งเป็นทรง  
ที่มีมากในประเทศไทย เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำเนื่องจาก  
แผ่นดินไหว รวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติและ  
รูปแบบการสั่นไหว โดยทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของเจดีย์ที่มีความสูงต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางด้านสถิตศาสตร์ภายใต้น้ำหนัก  
ของเจดีย์ ค่าหน่วยแรงโดยรวมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นหน่วยแรงอัด ซึ่งมีค่าไม่เกินกำลัง  
อัดประลัยของอิฐก่อ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว EI  
Centro ปี ค.ศ.1940 ของแบบจำลองเจดีย์ที่มีความสูงมากกว่า 60 เมตร ได้รับผลกระทบมาก โดย  
เกิดหน่วยแรงดึงทั้งในแนวราบและแนวดิ่งบริเวณปล้องโถง ซึ่งมีค่าเกินกำลังดึงประลัย ส่งผลให้  
เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึง และยังพบอีกว่า มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรวมพื้นดินใต้ฐานราก  
เจดีย์เข้ากับแบบจำลองด้วยจึงจะทำให้แบบจำลองทางพลศาสตร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Nattiya Lerdsivanon 2009: A Study of Seismic Response of Belled Shape Masonry Historical Monuments. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Benjapon Wethyavivorn, Ph.D. 112 pages.

This thesis proposed a finite element model of bell-shaped masonry pagodas, the most common type in Thailand. The research has investigated structural behavior under seismic loading including their dynamics properties, the natural frequencies and mode shapes. Behavior of pagodas with different height was analyzed.

It was found from the statics analysis that the vertical stresses were mostly compressive and were not exceeding the strength capacity under its own weight. However, in an event of the earthquake that characterised by 1940 El Centro, horizontal and vertical tensile stresses at the lower of the top portion would exceed its strength capacity for a pagoda model of more than sixty meters height. It was also found that in order to accurately account for their dynamic behavior, soil-structure interaction must be considered.

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Student's signature                      Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เบญจพล เวทย์วิวัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
ประธานวิทยานิพนธ์ อ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรรณ และ ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาศัย กรรมการร่วม ที่ได้  
คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์  
และกราบขอบพระคุณ--- ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้  
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบ  
ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณ คุณ สุคชาย พาน  
สุวรรณ วิศวกรโยธา 7 สำนักโบราณคดี กรมศิลปากร และสำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ที่  
อนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา คุณป้า  
สุดที่รักญาติพี่น้อง รวมถึงเพื่อนๆ ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา

ณัฐยา เลิศศิวนนท์

เมษายน 2552

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	51
ผล	51
วิจารณ์	93
สรุปและข้อเสนอแนะ	106
สรุป	106
ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	109
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	112

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กำลังอัดของวัสดุก่อคิเดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน	5
2	หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีต ไม่เสริมเหล็ก	6
3	รูปแบบการสันไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัย มงคล	48
4	รูปแบบการสันไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	54
5	รูปแบบการสันไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ	59
6	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	65
7	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	65
8	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	67
9	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	67
10	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิติ	68
11	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิติ	68
12	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	70
13	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	70
14	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	72

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	72
16	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	74
17	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	74
18	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	76
19	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	76
20	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	78
21	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	78
22	หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	79
23	หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	79
24	รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน	81
25	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	89
26	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	90



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
27	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	91
28	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	91
29	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	92
30	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	93
31	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	94
32	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	94
33	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นต่อพระธาตุจอมกิตติ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	95
34	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	96
35	สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อพระธาตุจอมกิตติ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์	97
36	อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	97

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของแบบจำลองโครงสร้างย่อย	8
2	แสดงความเค้นในแนวตั้งฉากของแกนค้ำพร้อมด้วยความเข้มของความเค้น	8
3	โครงสร้างแบบจำลองเจดีย์กรณีที่ไม่มีการต่อเติมองค์ระฆังและปล้องโถง ของเจดีย์วัดกุฎีดาว	11
4	โครงสร้างแบบจำลองเจดีย์กรณีที่มีการต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐาน ของเจดีย์วัดกุฎีดาว	12
5	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์วัดกุฎีดาว	12
6	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธานทรงปราสาทวัดวรเชษฐเทพบำรุง ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.0984 เฮิรตซ์	14
7	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธานทรงปราสาทวัดวรเชษฐเทพ ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.4148 เฮิรตซ์ เมื่อรวมชั้นดินในแบบจำลอง	14
8	แสดงแผนภูมิสีของการเสียรูปและหน่วยแรงจากการวิเคราะห์ขององค์เจดีย์วัดบวรนิเวศวิหาร	15
9	ระบบระดับชั้นเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้แผ่นดินไหว และการสมมูลแรง	19
10	แรงแผ่นดินไหวประสิทธิภาพ	20
11	อาคาร 3 ชั้นและรูปแบบการสั่นไหว	22
12	ตัวอย่างของความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว เหตุการณ์ต่างๆ	23
13	การจัดของระบบต่างๆเนื่องจากแผ่นดินไหวแบบ El Centro	24
14	สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro ค.ศ. 1940	25
15	ตำแหน่งสถานีตรวจแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา	26
16	เครือข่ายสถานีตรวจแผ่นดินไหวของหน่วยงานต่างๆในประเทศไทย	27
17	รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย	28
18	ลักษณะเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ	30
19	เอลิเมนต์สามมิติ	30
20	เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	33

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	แบบแปลนเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	33
22	เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	34
23	แบบแปลนเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	34
24	พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ จังหวัดเชียงราย	35
25	แบบแปลนพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ	35
26	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	36
27	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	37
28	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ	37
29	แสดงการเปรียบเทียบขนาดความสูงของเจดีย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	38
30	กราฟความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro, California 1940	40
31	กราฟความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนแม่จัน จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) 2550	41
32	ค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro ที่ใช้ในการวิเคราะห์	42
33	ค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ที่ใช้ในการวิเคราะห์	43
34	แสดงการแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนๆ ตามความสูง	44
35	แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นส่วนย่อยแบบจำลอง	44
36	แสดงลักษณะของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างแบบจำลอง	45
37	ลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์	47
38	ลักษณะอิทธิพลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์	47
39	แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์ทรงระฆังเมื่อรวมผลของชั้นดิน	48
40	ผลจากการตรวจวัดโดยตรงของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ได้ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	รูปแบบการสันไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9841 เฮิรตซ์	52
42	รูปแบบการสันไหวที่ 2 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9841 เฮิรตซ์	52
43	รูปแบบการสันไหวที่ 3 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7076 เฮิรตซ์	53
44	รูปแบบการสันไหวที่ 4 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7076 เฮิรตซ์	53
45	รูปแบบการสันไหวที่ 5 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7076 เฮิรตซ์	54
46	รูปแบบการสันไหวที่ 6 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7076 เฮิรตซ์	54
47	รูปแบบการสันไหวที่ 7 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 10.8735 เฮิรตซ์	55
48	รูปแบบการสันไหวที่ 8 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.4380 เฮิรตซ์	55
49	รูปแบบการสันไหวที่ 9 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.5835 เฮิรตซ์	56
50	รูปแบบการสันไหวที่ 10 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.5835 เฮิรตซ์	56
51	รูปแบบการสันไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.8649 เฮิรตซ์	57
52	รูปแบบการสันไหวที่ 2 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.8649 เฮิรตซ์	58
53	รูปแบบการสันไหวที่ 3 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 13.1002 เฮิรตซ์	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	รูปแบบการสันไหวที่ 4 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 13.1002 เฮิรตซ์	59
55	รูปแบบการสันไหวที่ 5 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 22.7483 เฮิรตซ์	59
56	รูปแบบการสันไหวที่ 6 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 22.7483 เฮิรตซ์	60
57	รูปแบบการสันไหวที่ 7 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 26.2891 เฮิรตซ์	60
58	รูปแบบการสันไหวที่ 8 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 26.4649 เฮิรตซ์	61
59	รูปแบบการสันไหวที่ 9 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 28.6318 เฮิรตซ์	61
60	รูปแบบการสันไหวที่ 10 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 28.6318 เฮิรตซ์	62
61	รูปแบบการสันไหวที่ 1 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 12.2062 เฮิรตซ์	63
62	รูปแบบการสันไหวที่ 2 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 12.2062 เฮิรตซ์	63
63	รูปแบบการสันไหวที่ 3 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 17.6369 เฮิรตซ์	64
64	รูปแบบการสันไหวที่ 4 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 17.6369 เฮิรตซ์	64
65	รูปแบบการสันไหวที่ 5 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 30.7493 เฮิรตซ์	65
66	รูปแบบการสันไหวที่ 6 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 30.7493 เฮิรตซ์	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
67	รูปแบบการสันไหวที่ 7 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ ธรรมชาติเท่ากับ 37.0195 เฮิรตซ์	66
68	รูปแบบการสันไหวที่ 8 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ ธรรมชาติเท่ากับ 45.1375 เฮิรตซ์	66
69	รูปแบบการสันไหวที่ 9 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ ธรรมชาติเท่ากับ 51.1298 เฮิรตซ์	67
70	รูปแบบการสันไหวที่ 10 ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ค่าความถี่ ธรรมชาติเท่ากับ 51.1298 เฮิรตซ์	67
71	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	69
72	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	69
73	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	71
74	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	71
75	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	73
76	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	73
77	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	75
78	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	75
79	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	77

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
80	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	77
81	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	79
82	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	79
83	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	81
84	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล	81
85	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	83
86	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ	83
87	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	85
88	แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ	85
89	รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.2289 เฮิรตซ์	87
90	รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.2292 เฮิรตซ์	87
91	รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.3863 เฮิรตซ์	88
92	รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.4658 เฮิรตซ์	88

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
93	รูปแบบการสั้นไหวที่ 5 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5010 เฮิรตซ์	89
94	รูปแบบการสั้นไหวที่ 6 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5011 เฮิรตซ์	89
95	รูปแบบการสั้นไหวที่ 7 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5928 เฮิรตซ์	90
96	รูปแบบการสั้นไหวที่ 8 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5936 เฮิรตซ์	90
97	รูปแบบการสั้นไหวที่ 9 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.7569 เฮิรตซ์	91
98	รูปแบบการสั้นไหวที่ 10 ของแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.8050 เฮิรตซ์	91
99	กราฟแสดงค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแบบจำลอง ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนอง	92



# การศึกษาการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง

## A Study of Seismic Response of Belled Shape Masonry Historical Monuments

### คำนำ

จากสภาพแวดล้อมของโลกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ส่งผลให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติขึ้นมากมาย เช่น น้ำท่วม สภาวะแห้งแล้ง พายุหมุน การทรุดตัวของแผ่นดิน การระเบิดของภูเขาไฟ และแผ่นดินไหวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อโครงสร้าง

แผ่นดินไวนับเป็นภัยธรรมชาติอย่างหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ ในระยะหลังได้มีการเกิดแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยบ่อยครั้งขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้าง โครงสร้างอาคารสูงและบ้านพักอาศัยที่ไม่ได้คำนึงถึงการออกแบบเพื่อรองรับการเกิดแผ่นดินไหวอย่างเพียงพอ และที่สำคัญแผ่นดินไวยังมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางโบราณสถานซึ่งเป็นมรดกของชาติ จากอดีตที่ผ่านมาการเกิดแผ่นดินไหวได้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโบราณสถานหลายครั้ง เช่น ปี พ.ศ.1077 เกิดแผ่นดินไหวที่โยนกนครขนาด 8.0 ริกเตอร์ (บริเวณภาคเหนือ) ทำให้ยอดเจดีย์หัก 4 แห่ง, ปี พ.ศ.2088 เกิดแผ่นดินไหวที่เมืองเชียงใหม่ขนาด 7.0 ริกเตอร์ ส่งผลให้ยอดเจดีย์หลวงสูง 86 เมตร หักพังลงมาเหลือ 60 เมตร, ปี พ.ศ.2258 เกิดแผ่นดินไหวที่เมืองเชียงแสนขนาด 7.0 ริกเตอร์ ส่งผลให้วัดและเจดีย์ 4 ตำบล ถูกทำลาย และวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ.2538 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.2 ริกเตอร์ ที่พรมแดนพม่าและจีน ซึ่งมีผลทำให้ยอดพระธาตุคอกยสุเทพหักลงมา และมีอาคารในจังหวัดเชียงรายได้รับความเสียหายบ้างเล็กน้อย และครั้งล่าสุดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2550 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.1 ริกเตอร์ ที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ชายแดนประเทศลาว ส่งผลให้พระธาตุจอมกิติ ในเมืองโบราณเชียงแสน ที่อยู่ห่างจากจุดเกิดแผ่นดินไหวราว 60 กิโลเมตร เกิดความเสียหาย นอกจากยอดของพระธาตุได้หักลงแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไวยังส่งผลให้องค์พระธาตุมีรอยร้าว (สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา) จะเห็นได้ว่าการเกิดแผ่นดินไวยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องบ่อยครั้งขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโบราณสถานมาโดยตลอด

การบูรณะโบราณสถานในแต่ละครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องรู้และเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้าง และควรคำนึงถึงผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างโบราณสถานด้วย เพื่อให้การบูรณะมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้น

ซึ่งการศึกษาโครงสร้างโบราณสถานภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์ในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการสั่นสะเทือนจากการจราจร โดยใช้แรงพลศาสตร์เทียบเท่ารถบรรทุกในการศึกษา ผลการศึกษาพบว่า การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างในด้านกำลังรับแรงอัด แต่จะมีผลเนื่องจากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโยกตัวของโครงสร้างจึงอาจส่งผลในด้านของการเกิดการแตกร้าวรอบๆ โครงสร้างได้ แต่ในด้านการศึกษาแรงกระทำภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวซึ่งมีค่าการสั่นสะเทือนที่มากกว่ายังไม่มีการศึกษา และโบราณสถานเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังเป็นทรงที่มีมากในประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆังภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์เนื่องจากแผ่นดินไหว เพื่อวิเคราะห์หน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้น และทำการศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์และคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของแบบจำลองภายใต้น้ำหนักของตัวเอง ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง ซึ่งผลที่ได้ น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการบูรณะโบราณสถานต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆังภายใต้การตอบสนองต่อแผ่นดินไหว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์และคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง
3. เพื่อศึกษาหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆังภายใต้น้ำหนักตัวเอง

## ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังทางสถิติศาสตร์ พลศาสตร์ และหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นของโครงสร้างเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังภายใต้การตอบสนองต่อแผ่นดินไหวและภายใต้น้ำหนักขององค์เจดีย์ โดยการสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้สมมุติฐานว่าโครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีความต่อเนื่องกันระหว่างก้อนอิฐและปูนทราย โดยเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังที่ใช้พิจารณาจะมีความสูงประมาณ 15, 30 และ 60 เมตร และใช้คุณสมบัติของอิฐก่อในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ในการวิเคราะห์และศึกษาหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นภายใต้การตอบสนองต่อแผ่นดินไหว โดยจะสมมุติว่า เจดีย์อยู่ ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว จะใช้ข้อมูลความเร่งเนื่องจากพื้นจากการเกิดแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม ค.ศ.1940 (พ.ศ.2483) ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับโครงสร้างหลายประเภท และแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ชายแดนประเทศลาว เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2550 จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยอดพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติเกิดความเสียหาย เป็นกรณีศึกษา

## การตรวจเอกสาร

เจดีย์ทรงระฆัง เรียกอีกอย่างว่า ทรงลังกา เป็นเจดีย์ที่มีองค์ระฆังเป็นลักษณะเด่น การแบ่งเจดีย์ทรงระฆังจะแบ่งเป็นสามส่วนตามแนวตั้ง โดยส่วนล่างมีฐานรองรับอยู่ บางองค์อาจเป็นเพียงชั้นเชิง ส่วนกลางเริ่มจากชั้นเชิงต่อขึ้นไปเป็นวงแหวนแล้วจึงถึงบัวปากระฆังประกอบกันเพื่อรองรับทรงระฆังขนาดใหญ่ และส่วนบนเหนือจากทรงระฆังนับเป็นส่วนยอด มีบัลลังก์รูปสี่เหลี่ยมต่อขึ้นไป คือ ทรงกรวย เป็นส่วนที่มักจะชำรุดเสียหาย ประกอบด้วย ปล้องไฉน และปลี (สันติ, 2544)

จากการสำรวจพบว่าโบราณสถานในประเทศไทย นับตั้งแต่อดีตในสายอารยธรรมทวารวดี ศรีวิชัย สุโขทัย และอยุธยา ส่วนใหญ่จะมีอิฐและหินเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นหลักตั้งแต่ระดับฐานจนถึงยอด (กองโบราณคดี, 2528)

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างโบราณสถานอิฐก่อโดยการจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความจำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ก่อ คือ ค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่นและน้ำหนักเฉพาะของวัสดุก่อ เป็นต้น เป็นอันดับแรกก่อน เพื่อให้การสร้างแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด และเมื่อได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างแล้ว สามารถนำมาเป็นค่าตั้งต้นในการเปรียบเทียบหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของโครงสร้างได้

## วัสดุก่อ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2539) ได้ให้ความหมายของวัสดุก่อไว้ดังนี้ *ก้อนวัสดุก่อ* ต้น หมายถึง ก้อนวัสดุก่อซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดในทุกระนาบ ซึ่งขนานกับผิวหน้าที่ได้รับน้ำหนักตั้งแต่ร้อยละ 75 ของเนื้อที่หน้าตัดรวม ซึ่งวัดในระนาบเดียวกันขึ้นไป *มอร์ต้า* หมายถึง ส่วนผสมเหลวๆ ของวัสดุที่เป็นตัวประสานมวลรวมละเอียดและน้ำ *เกร้าท์* หมายถึง ส่วนผสมของวัสดุที่เป็นเชื้อผสมและมวลรวมซึ่งจัดส่วนปริมาตรให้มีความชื้นเหลวพอดีที่จะเทหรือสูบลได้ โดยวัสดุที่เป็นส่วนผสมไม่เกิดการแยกแยะ *งานวัสดุก่อ* หมายถึง งานก่อสร้างที่ประกอบด้วยก้อนวัสดุก่อ ซึ่งวางเรียงกันในมอร์ต้าหรือเกร้าท์

1. หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ในงานวัสดุคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรมหรือมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

## 2. มอร์ต้าและเกร้าท์

2.1. หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น มอร์ต้าและเกร้าท์จะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

2.2. ห้ามใช้แคลเซียมคลอไรด์หรือสารผสมเพิ่มซึ่งมีแคลเซียมคลอไรด์กับมอร์ต้าและเกร้าท์ ซึ่งมีเหล็กเสริม เหล็กปลอกหรือเหล็กยึดอื่นๆฝังอยู่

ในกรณีที่มีได้มีการหาค่ากำลังอัดของวัสดุคอนกรีตโดยวิธีทดสอบล่วงหน้า และก้อนวัสดุ มอร์ต้า ตลอดจนฝีมือการทำงานตรงตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานแล้ว อาจคิดว่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้โดยเฉลี่ยของค่ากำลังอัดของวัสดุทั้งหมดจากค่าตามตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** กำลังอัดของวัสดุก่อคิณเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน

กำลังอัดของก้อน (กก./ซม <sup>2</sup> .)	กำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมด $f'_m$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)
70 ถึง 105	63 ถึง 80
106 ถึง 175	81 ถึง 110
176 ถึง 280	111 ถึง 140
281 ถึง 420	141 ถึง 170
มากกว่า 420	มากกว่า 170

**ที่มา:** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2539)

ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในงานวัสดุคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

หน่วยแรงตามแนวแกน	$0.20 f'_m$
หน่วยแรงดัด	$0.30 f'_m$

หากไม่มีผลทดสอบมาแสดงจนเป็นที่น่าพอใจแล้ว ค่าหน่วยแรงเฉือนและแรงดึงอันเกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดให้ตามตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก <sup>(1)</sup>

หน่วยแรงที่ยอมรับ	งานก่อสร้างด้วยวัสดุก่อ			
	ชนิดก้อนกลวง		ชนิดก้อนตันหรือเกร้าท์	
	มอร์ต้า กำลังสูง <sup>(6)</sup>	มอร์ต้า ธรรมดา <sup>(7)</sup>	มอร์ต้า กำลังสูง <sup>(6)</sup>	มอร์ต้า ธรรมดา <sup>(7)</sup>
หน่วยแรงเฉือน, (กก./ซม <sup>2</sup> .)	2.4 <sup>(4)</sup>	1.6 <sup>(4)</sup>	2.4 <sup>(4)</sup>	1.6
หน่วยแรงดึงในการตัด <sup>(5)</sup>				
ตั้งฉากกับรอยต่อทางราบ <sup>(2)</sup>	1.6 <sup>(4)</sup>	1.1 <sup>(4)</sup>	2.7	1.9
ขนานกับรอยต่อทางราบ <sup>(3)</sup>	3.2 <sup>(4)</sup>	2.2 <sup>(4)</sup>	5.5	3.8

**ที่มา:** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2539)

(1) ในกรณีไม่มีการควบคุมงานทางวิศวกรรมหรือสถาปัตยกรรมให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดให้ลดค่าหน่วยแรงที่ยอมรับให้ต่างลงครึ่งหนึ่ง

(2) ทิศทางของหน่วยแรงตั้งฉากกับชั้นรอยต่อราบ ตั้งตั้งในงานวัสดุก่อแบบธรรมดา

(3) ทิศทางของหน่วยแรงขนานกับรอยต่อทางราบ ซึ่งจะอยู่ในแนวราบในงานวัสดุก่อสร้างธรรมดาในกรณีที่ก่อวัสดุก่อแบบเรียงตามขวาง จะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบในวัสดุก่อไม่ได้

(4) เนื้อที่สุทธิของชั้นมอร์ต้า

(5) ในการคำนวณความต้านทานแรงดึง จะต้องถือว่าโมดูลัสหน้าตัดของผนังกลวงมีค่าเท่ากับผลรวมของโมดูลัสหน้าตัดของผนังแต่ละแผง

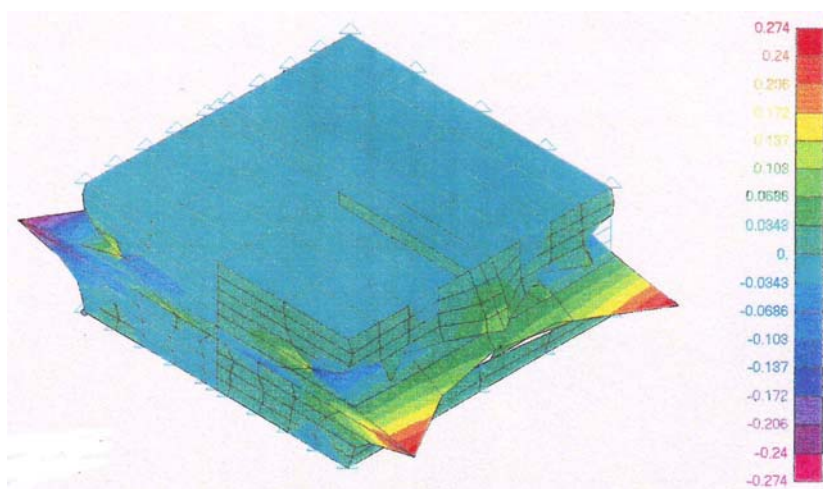
(6) กำลังสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 140 กก./ซม<sup>2</sup>

(7) กำลังสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 50 กก./ซม<sup>2</sup>

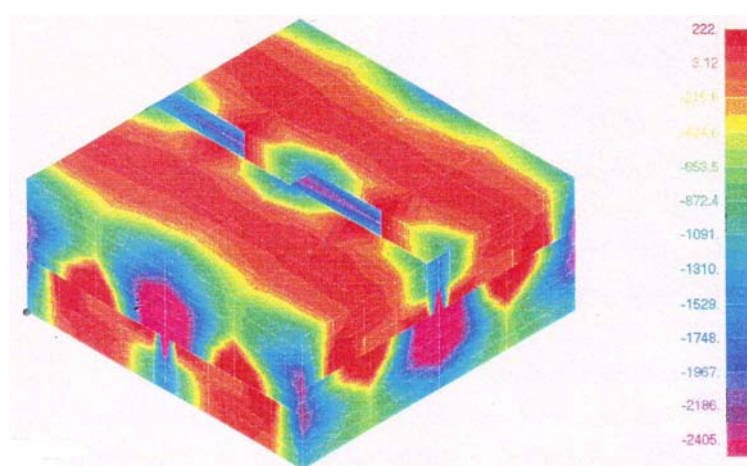
วรศักดิ์ (2540) ได้ทำการตรวจสอบสภาพโครงสร้างขององค์พระปฐมเจดีย์ จังหวัด นครปฐม โดยการยกนำเอาชิ้นส่วนก้อนอิฐและปูนประสานมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า กำลังอัดประลัยของก้อนอิฐและปูนประสาน มีค่าประมาณ 60 และ 25 กก./ $\text{cm}^2$  ตามลำดับ เมื่อนำมาใช้ คำนวณหากำลังอัดประลัยของวัสดุก่อโดยรวมของก้อนอิฐและปูนประสาน (ตามข้อกำหนด BS CODE 5628, 1978) จะได้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 28.21 กก./ $\text{cm}^2$  คุณสมบัติโมดูลัสความยืดหยุ่น ได้เท่ากับ 28,210 กก./ $\text{cm}^2$  คุณสมบัติค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.216 และน้ำหนักจำเพาะได้ค่า เท่ากับ 1,760 กก./ $\text{cm}^3$

สุดชาย (2543) ทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงของอิฐโบราณและอิฐที่ใช้ใน การบูรณะโบราณสถาน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 9 แห่ง เป็นอิฐโบราณที่เก็บตัวอย่างมาจาก แหล่งโบราณสถานในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 8 แห่ง อิฐที่มีการผลิตในปัจจุบันที่บ้านลุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 1 แห่ง โดยมีอายุเฉลี่ย 1 ถึง 410 ปี จากการทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยของ กำลังอัดประลัยมีค่าเฉลี่ยในระดับ 43 ถึง 46 กก./ $\text{cm}^2$  และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยระหว่าง 32,000 ถึง 35,000 กก./ $\text{cm}^2$

วรพจน์ (2543) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประกอบจากอิฐและปูน ก่อซึ่งผสมเส้นใยเหล็กเพื่อเสริมกำลัง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของปูนก่อเสริมกำลัง เปรียบเทียบกับปูนก่อมาตรฐาน พร้อมทั้งได้ทำการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างย่อยในและ วิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ปูนก่อเสริมกำลังมีกำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจากปูนก่อมาตรฐานประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และกำลังของปูนก่อ เสริมกำลังจะเพิ่มขึ้นตามจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นลวดเสริมแรงที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของการ วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างย่อยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าอัตราส่วนปัวซองซึ่งเท่ากับ 0.228 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบซึ่งเท่ากับ 0.229



ภาพที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของแบบจำลองโครงสร้างย่อย



ภาพที่ 2 แสดงความเค้นในแนวตั้งฉากของแกนดิ่งพร้อมด้วยความเข้มของความเค้น

ที่มา: วรพจน์ (2543)



อดิษฐ์ (2544) ทำการศึกษาคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างโบราณสถานเจดีย์บริเวณเขต จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยใช้ข้อมูลทางการศึกษาจากเจดีย์วัดกุฎีดาว ประกอบไปด้วย อิฐที่ใช้ ในการบูรณะองค์เจดีย์ รูปร่างลักษณะขององค์เจดีย์ ทำการทดลองโดยการนำอิฐที่ใช้ในการบูรณะ โบราณสถานมาทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นตัวอย่าง เพื่อหาวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ จากการ ทดลองวัสดุได้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่น 30,800 กก./ซม<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด 40 กก./ซม<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนปัวซอง 0.21 และค่าเฉลี่ยโมดูลัสของแรงเฉือน 12,727 กก./ซม<sup>2</sup>

เบญจพลและคณะ (2544) ได้ศึกษาพฤติกรรมของโบราณสถานอิฐก่อ ณ แหล่ง โบราณสถานในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการทดสอบวัสดุและการสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์โบราณสถานใน 2 ระดับ ได้แก่ ระดับชิ้นส่วน โครงสร้างย่อยเพื่อวิเคราะห์ คุณสมบัติของอิฐก่อซึ่งเป็นส่วนประกอบ และในระดับ โครงสร้างองค์รวมเพื่อศึกษาพฤติกรรมใน การรับแรงสถิตและพฤติกรรมทางพลศาสตร์ในกรณีที่มีแรงกระทำในลักษณะดังกล่าว จากการศึกษา พบว่า คุณสมบัติของอิฐโบราณและอิฐสำหรับการบูรณะ ทำการทดสอบตัวอย่างอิฐที่อยู่ในสภาพดี และมีอัตราส่วนความสูงต่อความหนาไม่เกิน 1 พบว่า เนื้ออิฐมีน้ำหนักระหว่าง 1.3 ถึง 1.4 กก./ม<sup>3</sup> และมีกำลังอัดเฉลี่ยในระดับ 43 ถึง 46 กก./ซม<sup>2</sup> โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยระหว่าง 32,000-35,000 กก./ซม<sup>2</sup> จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐที่มีอายุตั้งแต่ 1-410 ปี พบว่า เนื้ออิฐ ภายในมีคุณภาพค่อนข้างต่ำ

สำหรับคุณสมบัติของปูนก่อสำหรับการบูรณะโบราณสถาน ทำการทดสอบปูนทราย สำหรับการก่อตามส่วนผสมการบูรณะและมีขนาดมาตรฐานตามสมาคมการทดสอบวัสดุอเมริกัน จำนวน 8 ตัวอย่าง ที่ 28 วัน พบว่า ค่าความสามารถในการรับแรงอัดของปูนก่อเฉลี่ยประมาณ 20 กก./ซม<sup>2</sup> และ 7 กก./ซม<sup>2</sup> สำหรับแรงดึง

พฤติกรรมของโครงสร้างโดยรวม จากการศึกษาการรับแรงสถิตเนื่องจากการรับน้ำหนัก ของโครงสร้าง พบว่า ค่าความเค้นแนวตั้งภายในโครงสร้างไม่เกินความสามารถในการรับแรงอัด ของวัสดุโดยอยู่ในระดับไม่เกิน 3 กก./ซม<sup>2</sup> อย่างไรก็ตามน้ำหนักส่วนองค์ยอดของเจดีย์มีผลให้เกิด แรงเครียดดึงส่วนบนโดยรอบซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวและสึกกร่อนได้ในภายหลัง cjt จากการศึกษาทางพลศาสตร์ของโครงสร้างเจดีย์สำหรับเจดีย์ประธานวัดกุฎีดาว พบว่า มีการสั่น ไหวในระนาบทั้ง 3 ซึ่งประกอบด้วย การสั่นไหวด้านข้าง การยืดตัว และการบิด ณ ความถี่ต่างๆ

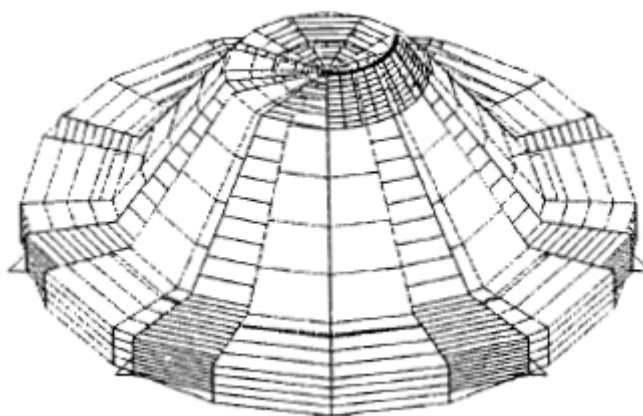
### การวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างโบราณสถาน

วรศักดิ์ (2540) ทำการศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนจากการจราจรต่อความมั่นคงขององค์พระปฐมเจดีย์ จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นเจดีย์ทรงระฆัง สูงประมาณ 116 เมตร มีค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบแรกเท่ากับ 0.725 เฮิรตซ์ ทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองโครงสร้างองค์พระฯ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักองค์เจดีย์และผลการตอบสนองของโครงสร้างองค์พระฯ ต่อการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากการทดสอบวัสดุตัวอย่าง พบว่า วัสดุก่อโดยรวมมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 28.21 กก./ซม<sup>2</sup> คุณสมบัติโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 28,210 กก./ซม<sup>2</sup> คุณสมบัติค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.216 และน้ำหนักจำเพาะได้ค่าเท่ากับ 1,760 กก./ซม<sup>3</sup> ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรไม่มีผลต่อองค์พระฯ และหน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดเนื่องจากน้ำหนักองค์เจดีย์มีค่าน้อยกว่า 1 ใน 3 ของกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ จึงไม่เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติได้ แต่มีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเนื่องจากการโยกตัวของปล้องโฉน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวของปูนประสานรอบๆ ได้

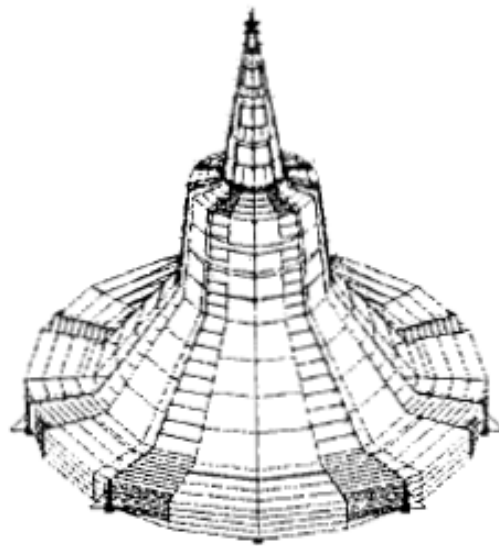
วรศักดิ์ (2540) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ภูเขาทอง มีลักษณะเป็นเจดีย์ย่อมุมไม้สิบสอง สูงจากพื้นถึงยอด 64 เมตร ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อเสนอแนวทางในการบูรณะและซ่อมแซม ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ คุณสมบัติทางกลของวัสดุก่อได้จากผลการทดสอบ คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 20,000 กก./ซม<sup>2</sup> คุณสมบัติค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.22 และน้ำหนักจำเพาะได้ค่าเท่ากับ 1,800 กก./ซม<sup>3</sup> จากการวิเคราะห์แบบจำลอง พบว่าการกระจายของหน่วยแรงในโครงสร้างจะเป็นการถ่ายแรงจากส่วนบนของโครงสร้างสู่ส่วนล่าง โดยที่หน่วยแรงสูงสุดจะอยู่บริเวณศูนย์กลางของฐานองค์เจดีย์ ซึ่งค่าหน่วยแรงอัดอันเกิดจากน้ำหนักของตัวเจดีย์เองมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ จึงพอสรุปได้ว่าเจดีย์ภูเขาทองยังมีเสถียรภาพที่ดี และจะไม่เกิดการวิบัติแบบพังทลายทันที แต่ในความเป็นจริงจากการสำรวจพบว่า วัสดุก่อมีสภาพค่อนข้างทรุดโทรม และมีช่องโพรงกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณฐานของเจดีย์ และเมื่อพิจารณาถึงหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นพบว่ามีค่าน้อยมาก แต่เนื่องจากวัสดุก่อมีสภาพทรุดโทรม ด้วยแรงดึงเพียงเล็กน้อยเป็นผลให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นดังเห็นได้ในสภาพปัจจุบัน ส่วนแนวทางในการบูรณะองค์เจดีย์ภูเขาทอง คือการอัดฉีดน้ำปูนเข้มข้นในส่วนฐานของเจดีย์เพื่อปิดช่องโพรงที่กระจายอยู่ และเพื่อเป็นการกระจายหน่วยแรงกดให้ออกจากศูนย์กลาง ทำให้ฐานเจดีย์มีบริเวณที่ช่วยกันเฉลี่ยรับแรงกดเป็นบริเวณกว้างขึ้น จึงคาดว่าวิธีนี้้องค์เจดีย์ซึ่งมีการเอียงใน

อดีตจะไม่มีการเอียงเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองหลังการบูรณะแล้วพบว่า ค่าหน่วยแรงสูงสุดมีค่าลดลง และหน่วยแรงบริเวณฐานเจดีย์มีการกระจายที่ดีขึ้น

สุดชาย (2543) ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธาน โบราณสถานวัดกุฎีดาวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาถึงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์ในกรณีที่ไม่มีการต่อเติมองค์ระฆังและปล้องไฉนและในกรณีที่มีการต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐาน โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุก่อนการทดสอบ คือ ค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 44 กก./ $\text{cm}^2$  ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 32,000 กก./ $\text{cm}^2$  คุณสมบัติค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.22 และน้ำหนักจำเพาะเท่ากับ 1,800 กก./ $\text{cm}^3$  จากผลการวิเคราะห์ พบว่า กรณีที่ไม่มีการต่อเติมองค์ระฆังและปล้องไฉน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับองค์เจดีย์ทั้งหน่วยแรงในแนวตั้งและหน่วยแรงในแนวราบเป็นหน่วยแรงอัด โดยมีหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณฐาน และหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ ส่วนกรณีที่มีการต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งเป็นหน่วยแรงอัด มีค่าสูงสุดบริเวณฐานและไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ แต่จะเกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบบริเวณส่วนบน โดยรอบเนื่องจากน้ำหนักของปล้องไฉนและส่วนยอด ที่ต่อเติมและบริเวณฐาน หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่มากนัก แต่อาจมีผลในการทำให้องค์เจดีย์เริ่มแตกร้าว โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างอิฐกับปูนก่อ

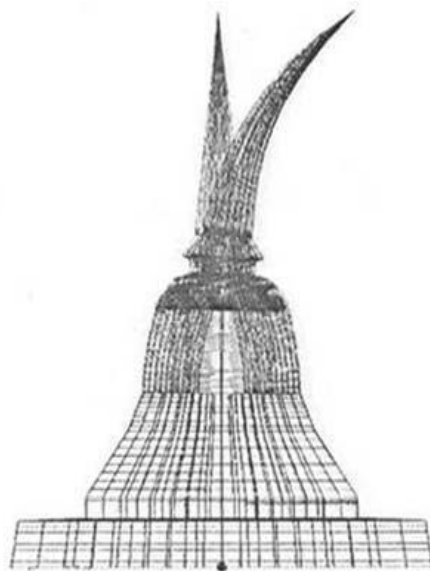


ภาพที่ 3 โครงสร้างแบบจำลองเจดีย์วัดกุฎีดาว กรณีที่ไม่มีการต่อเติมองค์ระฆังและปล้องไฉน



ภาพที่ 4 โครงสร้างแบบจำลองเจดีย์เจดีย์วัดกุฎีดาว กรณีที่มีการต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐาน

ที่มา: สุธชาย (2543)



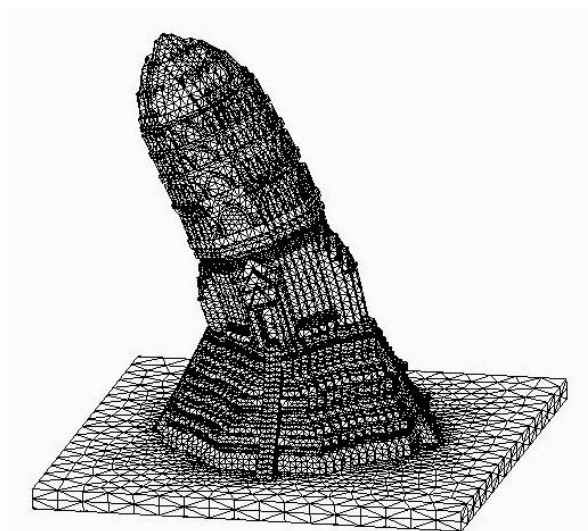
ภาพที่ 5 รูปแบบการสันไหวที่ 1 ของเจดีย์วัดกุฎีดาว

ที่มา: อดิษฐ์ (2544)

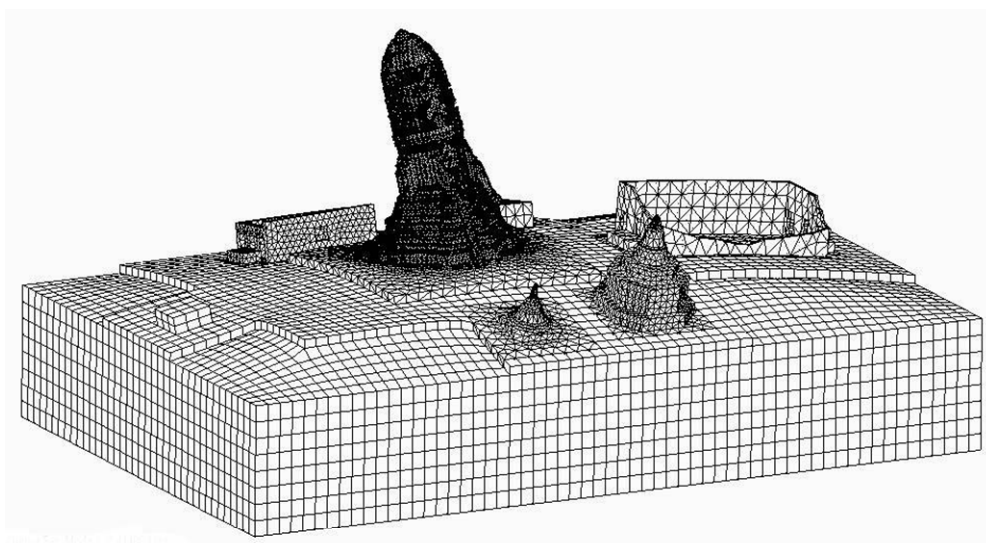
อดิษฐ์ (2544) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของเจดีย์วัดกุฎีดาว มีความสูงประมาณ 33 เมตร เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหว โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุจากการทดสอบซึ่งได้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่น  $30,800 \text{ กก./ซม}^2$  ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด  $40 \text{ กก./ซม}^2$  และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนปัวซอง  $0.21$  นำของมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างโบราณสถานด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ทราบว่ารูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ขององค์เจดีย์มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  $1.759$  เฮิรตซ์ มีลักษณะการเคลื่อนตัวไปด้านข้าง

ชนาฉัตร (2549) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของเจดีย์ประธานทรงปรางค์วัดวรเชษฐเทพบำรุง ณ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีความสูงประมาณ 30 เมตร โดยทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการตรวจวัดการสั่นไหวจากสถานที่จริง เพื่อการศึกษาแนวทางในการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพของโบราณสถานอิฐก่อ สำหรับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากการวิเคราะห์โครงสร้างย่อย ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ  $27,000 \text{ กก./ซม}^2$  อัตราส่วนปัวซอง  $0.22$  ความหนาแน่น  $1,800 \text{ กก./ซม}^3$  และค่ากำลังรับแรงอัด  $40 \text{ กก./ซม}^2$  จากการศึกษาแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์และพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของเจดีย์ประธานทรงปรางค์วัดวรเชษฐเทพบำรุง ณ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่า หน่วยแรงสถิตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของเจดีย์ทรงปรางค์ส่วนใหญ่เป็นหน่วยแรงอัด และสูงสุดถึง  $32\%$  ของกำลังอัดประลัย ณ บริเวณซุ้มประตู ซึ่งค่อนข้างสูงสำหรับโครงสร้างอิฐก่อ อีกทั้งน้ำหนักขององค์เจดีย์ทรงปรางค์ยังทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวบริเวณเรือนธาตุและเรือนยอด ซึ่งถึงแม้จะไม่สูงนักแต่ก็อาจเป็นสาเหตุของการแตกร้าวเสียหายในระยะยาวได้

สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของเจดีย์ทรงปรางค์ มีความจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองที่มีชั้นดินใต้โบราณสถานขึ้นด้วย เพราะแบบจำลองที่ไม่ได้รวมชั้นดินจะไม่สามารถแสดงการสั่นไหวในบางช่วงความถี่ (ประมาณ 3 ถึง 5 เฮิรตซ์) ได้ โดยค่าความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์ที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 มีค่าประมาณ  $2.2952$  เฮิรตซ์, ค่าความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์เมื่อไม่รวมชั้นดินในแบบจำลองในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 มีค่าประมาณ  $3.0984$  เฮิรตซ์ และค่าความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์เมื่อรวมชั้นดินในแบบจำลองในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 มีค่าประมาณ  $2.4148$  เฮิรตซ์ ดังนั้นการรวมชั้นดินในแบบจำลองจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้น ต่างจากการตรวจวัดซึ่งลดลงจาก  $35\%$  ไปเป็น  $5\%$  และหน่วยแรงภายในองค์เจดีย์ที่เกิดจากแรงพลศาสตร์เทียบเท่ารถบรรทุกทุกหนักมีทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึง ซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ  $5$  และ  $6\%$  ของกำลังอัดประลัย ตามลำดับ



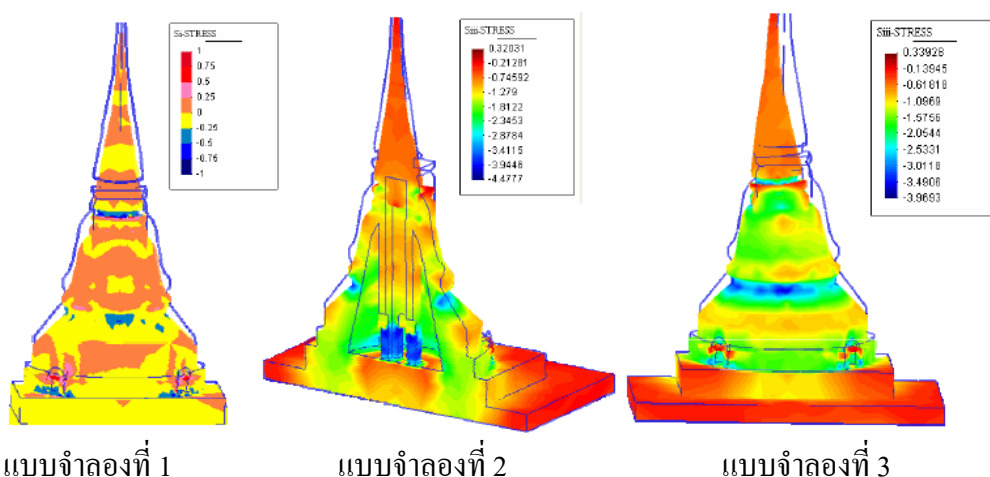
ภาพที่ 6 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธานทรงปราสาทวัดระฆังธนบุรี กรุงเทพมหานคร ความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 3.0984 เฮิรตซ์



ภาพที่ 7 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธานทรงปราสาทวัดระฆังธนบุรี กรุงเทพมหานคร ความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 2.4148 เฮิรตซ์ เมื่อรวมชั้นดินในแบบจำลอง

ที่มา: ชนาฉัตร (2549)

วรศักดิ์และคณะ (2550) ได้นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัญหา 3 มิติ โดยการใช้ Moving Kriging Interpolation ร่วมกับหลักการของ Layered Domain of Influence จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างขององค์เจดีย์วัดบวรนิเวศวิหารซึ่งมีความสูง 45.51 เมตร จากการสำรวจองค์เจดีย์เบื้องต้น พบว่ายอดขององค์เจดีย์เอียง ไปประมาณ 60 ซม โดยจำลองแบบจำลอง 3 แบบซึ่งแบบจำลองที่ 1 มีลักษณะของโดมสูง แบบจำลองที่ 2 จะมีลักษณะเสาสูงขึ้นไปจนถึงบริเวณฐานของบัลลังก์ในการวิเคราะห์ และแบบจำลองที่ 3 จะเหมือนกับแบบจำลองที่ 1 แต่ได้ทำการเอียงยอดเจดีย์ไป 60 ซม คุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุคือ 28,025 กก./ซม<sup>2</sup> ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุคือเท่ากับ 0.22 หน่วยน้ำหนักของวัสดุคือ 1,785.67 กก./ซม<sup>3</sup> กำลังอัดประลัยของวัสดุคือเท่ากับ 29.36 กก./ซม<sup>2</sup> และกำลังรับแรงดึงประลัยเท่ากับ 4.1 กก./ซม<sup>2</sup> ผลการวิเคราะห์ พบว่า หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นในแบบจำลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.48 กก./ซม<sup>2</sup> หากพิจารณาเงื่อนไขแบบไม่มีเสาคือแบบจำลองที่ 3 ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.97 กก./ซม<sup>2</sup> ซึ่งเป็นกรณีที่ให้องค์เจดีย์เอียงไป 60 ซม. เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าประมาณ 6.55 จึงถือได้ว่าโครงสร้างขององค์เจดีย์มีเสถียรภาพที่ดีพอสมควร และเมื่อพิจารณาถึงหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นพบว่า หน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.32 กก./ซม<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.11 เนื่องจากวัสดุก่อสร้างมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจเป็นสาเหตุของการเกิดรอยร้าวและการหลุดร่อนได้



ภาพที่ 8 แผนภูมิสีของการเสียรูปและหน่วยแรงจากการวิเคราะห์ขององค์เจดีย์วัดบวรนิเวศวิหาร

ที่มา: วรศักดิ์และคณะ (2550)

จุฑามาศและคณะ (2549) ทำการศึกษาพฤติกรรมของเจดีย์ทรงระฆังคว่ำ เจดีย์ชัยมงคล ณ วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยความสูงจากฐานถึงยอด 62.10 เมตร ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมของเจดีย์ทรงระฆังคว่ำเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดการสั่นในสถานที่จริง จากการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.957 เฮิรตซ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงที่พระเจดีย์ชัยมงคลโดยมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์ พบว่าจะมีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก อาจเนื่องจากการในการสร้างแบบจำลองจะสมมุติฐานให้ฐานขององค์เจดีย์เป็นพื้นแข็ง (จุดยึดแน่น) แต่ในสถานที่จริงฐานขององค์เจดีย์ไม่เป็นพื้นแข็งเนื่องสภาพของดินที่รองรับฐาน และได้ทำการสร้างแบบจำลององค์เจดีย์ที่มีความสูงเมื่อเทียบกับฐานต่าง ๆ กัน 8 องค์ นำค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มาเปรียบเทียบกับพบว่า เจดีย์ที่มีความชะลูดมากเมื่อเทียบกับฐานจะมีค่าความถี่ธรรมชาติอยู่ระหว่าง 5 ถึง 6 เฮิรตซ์ และเจดีย์ที่มีความชะลูดน้อยเมื่อเทียบกับฐานจะมีค่าความถี่ธรรมชาติอยู่ระหว่าง 6 ถึง 8 เฮิรตซ์

Jaishi et al. (2003) ทำการศึกษารูปแบบความเสียหายของวัดอิฐก่อโบราณสถานในประเทศเนปาลภายใต้แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ได้ทำการคำนวณค่าด้วยวิธีสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหว ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างวัด หากค่าคาบธรรมชาติโดยเลือกวัดตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเลือกวัดตัวอย่าง 3 ตัวอย่างเพื่อทำการตรวจวัดจริงภายใต้อิทธิพลแรงลม นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับ และทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของวัด (H) และความกว้างของฐาน (d) ด้วยวิธีทางสถิติได้เท่ากับ  $T = 0.0488H / \sqrt{d}$  และทำการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างวัดที่ถูกแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหว จากผลการทดลอง พบว่า วัดอิฐก่อมีค่าคาบธรรมชาติค่าน้อยกว่า 0.6 วินาที และมีอัตราส่วนความหน่วงอยู่ระหว่าง 1-6 % รูปแบบความเสียหายของโครงสร้างวัดส่วนใหญ่เกิดจากหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัด

Kuhlmann (2003) ทำการศึกษาพฤติกรรมของโบสถ์ขนาดใหญ่ซึ่งเป็นมรดกโลกที่มีอายุกว่า 1200 ปี ในประเทศเยอรมัน ที่อยู่ในบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว โดยที่โบสถ์ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วนเรียงกัน คือ หอคอยตะวันตกทางด้านซ้าย หอคอยแปดเหลี่ยมที่อยู่ตรงกลาง และโรงสวดมนต์ขนาดใหญ่ทางด้านขวา ซึ่งโรงสวดมนต์ประกอบด้วยเสาที่บางและภายนอกตกแต่งด้วยกระจกซึ่งไม่สามารถรับแรงทางด้านข้างจากแผ่นดินไหวได้ จึงได้มีการติดตั้งสมอเหล็กและคอนกรีตเพื่อยึดโครงสร้างของโรงสวดมนต์ให้ติดกับหอคอยแปดเหลี่ยม เพื่อทำการถ่ายแรง



กระทำไปให้หอคอยแปดเหลี่ยม และได้ทำการตรวจวัดโครงสร้างทางพลศาสตร์ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติ 2 รูปแบบแรกเท่ากับ 1.13 และ 2.13 เฮิรตซ์ ตามลำดับ และได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองของโครงสร้าง โดยที่แบบจำลองจะถูกปรับแก้จนกว่าค่าความถี่ธรรมชาติจากแบบจำลองจะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งการปรับแก้แบบจำลองจะใช้น้ำหนักของส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างหลักกระจายเพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้แผ่นดินไหว พบว่าหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นมากที่สุดที่สมอหลัก มีค่าประมาณ 10 % ของกำลังรับแรงดึง โครงสร้างจึงอยู่ในสภาพที่ปลอดภัย

Casciati and Borja (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของอนุสาวรีย์เมมมอขนขนาดใหญ่ทางทิศใต้ ที่มีชื่อเสียงทางประวัติศาสตร์ในประเทศอียิปต์ ภายใต้ภาวะแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโครงสร้างส่วนบนสร้างโดยใช้รูปแบบสามมิติ แบ่งเป็นส่วนรูปทรงอิฐก่อ สร้างจากการสำรวจจริงด้วยภาพถ่าย (Photogrammetric survey) ซึ่งจะบอกรายละเอียดของพื้นผิวหน้าและระบุถึงตำแหน่งของความเข้มข้นความเครียด การทำแบบจำลองจะนำเสนอถึงรายละเอียดของพื้นผิวที่ขาดตอนระหว่างส่วนบนของรูปหล่อและฐานที่แตกร้าว นำผลกระทบเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เป็นดินตะกอนที่มีผลต่อแบบจำลองของฐานโครงสร้างมาเป็นตัวแปรเพื่อใช้วิเคราะห์การตอบสนองของแผ่นดินไหวทั้งระบบรวมถึงผลของ SFSI (soil-foundation-structure interaction) ที่ไม่หยุดนิ่ง และเพื่อลดจำนวนตัวแปรในการวิเคราะห์ จึงกำหนดเงื่อนไขของสภาพดินตะกอน คือ ใช้อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 สำหรับกรณีที่ดินมีการระบายน้ำออก และใช้อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.499 สำหรับกรณีที่ดินไม่มีการระบายน้ำออก ซึ่งกรณีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.499 จะเกิดการสั่นของพื้นดินที่แรงกว่า และค่ายังก์โมดูลัส (E) โมดูลัสเฉือนยึดหยุ่น (G) ลดลงในขณะที่อัตราส่วนปัวซองเพิ่มขึ้นจนถึง 0.5 ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์กรณีวิกฤตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในกรณีดินไม่มีการระบายน้ำออก และใช้อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.499 สำหรับดินตะกอนทั่วไป ส่วนค่าสัมบูรณ์สูงสุดของความเร่งพื้นดิน (the maximum absolute value of ground motion acceleration) ที่คาบเวลา  $2T$  มีค่าสูงกว่าที่คาบเวลา  $4T$  ณ ตำแหน่งใกล้ฐานของโครงสร้าง ค่ากำลังสะสมเลื่อนพลาสติก (the cumulative plastic slips) มีค่าสูงสุดที่จุดต่อที่เป็นตำแหน่งจบของโครงสร้าง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งฐานรองรับน้ำหนักของรูปหล่อ และค่าการเลื่อนพลาสติกที่คำนวณ ณ จุดต่อระหว่างส่วนล่างของฐานและพื้นดินใต้ฐานจะมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณ ณ จุดต่อระหว่างส่วนล่างของรูปหล่อและจุดบนสุดของฐาน

Carpinteri et al. (2005) ทำการศึกษาพฤติกรรมของหอคอยอิฐก่อ ศตวรรษที่ 8 ในประเทศอิตาลี ซึ่งหอคอยมีขนาด 5.9 x 5.9 x 39 เมตร และเอียงจากแนวตั้ง 39 เซนติเมตร ไปทางทิศเหนือและ 3 เซนติเมตร ไปทางทิศตะวันตก จากการตรวจสอบรูปแบบความเสียหายของหอคอยด้วยวิธีภาพถ่ายด้วยความร้อน พบว่า รอยแตกร้าวส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณช่องเปิดของโครงสร้างหอคอย เช่น บริเวณใกล้หน้าต่าง เป็นต้น และได้ทำการทดสอบด้วยวิธีเฟลทแจค (Flat jack test) บริเวณฐานและชั้น 1 ของหอคอย เพื่อหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง และหาคุณสมบัติของอิฐก่อเพื่อใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ (ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 5000 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร, อัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.2, ความหนาแน่นเท่ากับ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, กำลังรับแรงดึงเท่ากับ 0.3 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร, Fracture Energy(GF) เท่ากับ 50 จูลต่อตารางเมตร และกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร) และทำการวิเคราะห์โครงสร้างของหอคอยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้น พบว่า ค่าหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจากสนามจริง ณ ตำแหน่งเดียวกัน สรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความถูกต้อง ค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.123 เฮิรตซ์ รูปแบบการบิดของโครงสร้างเกิดขึ้น ณ ความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 4 สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อโครงสร้างมีการเอียงเพิ่มขึ้น หน่วยแรงดึงที่บริเวณส่วนล่างของโครงสร้างจะมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าว และเมื่อโครงสร้างเกิดการเอียงมากกว่า 3 % ของความสูงหอคอยจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นที่ฐาน เนื่องจากค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าเกินค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ สรุปว่าเมื่อโครงสร้างเอียง 3 % (เอียงจากศูนย์กลางที่ตำแหน่งบนสุด เท่ากับ 125 เซนติเมตร โครงสร้างจะเกิดสภาวะประลัย)

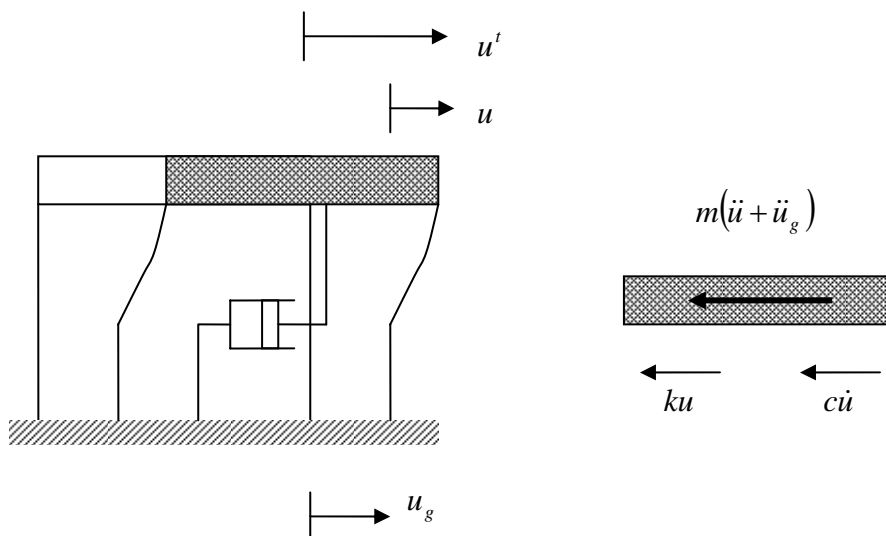
Betti and Vignoli (2007) ได้ทำการวิเคราะห์โบสถ์อิฐก่อแบบโรมันในประเทศอิตาลี ซึ่งมีขนาดยาวและกว้างที่สุดเท่ากับ 26.5 และ 21.5 เมตรตามลำดับ และกำแพงสูง 11.0 เมตร เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างและความเสี่ยงเนื่องจากผลตอบสนองของสัญญาณแผ่นดินไหวสำหรับการบูรณะโบสถ์อิฐก่อ ทำการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโบสถ์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเชิงเส้นตรง และศึกษาพฤติกรรมแบบไม่เป็นเส้นตรงเพื่อหาจุดกำเนิดของรอยแตกร้าว และสามารถใช้ในการประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างและชี้ตำแหน่งที่ต้องซ่อมแซมเพื่อการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

## พลศาสตร์โครงสร้าง

### 1. สมการของการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว

ผลกระทบของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง คือ เกิดการเคลื่อนที่ของที่รองรับอย่างมีความเร่ง จากตำแหน่งสมดุลซึ่งส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างทั้งระบบ พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อเกิดการเคลื่อนที่เช่นนี้สามารถอธิบายได้เมื่อเขียนสมการของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว โดยระยะขจัดของการเคลื่อนที่ของที่รองรับแทนด้วย  $u_g$  ระยะขจัดสัมพัทธ์ระหว่างมวลกับที่รองรับแทนด้วย  $u$  ดังนั้นระยะขจัดรวมของมวล  $u^t$  คือ

$$u^t = u(t) + u_g(t) \quad (1)$$



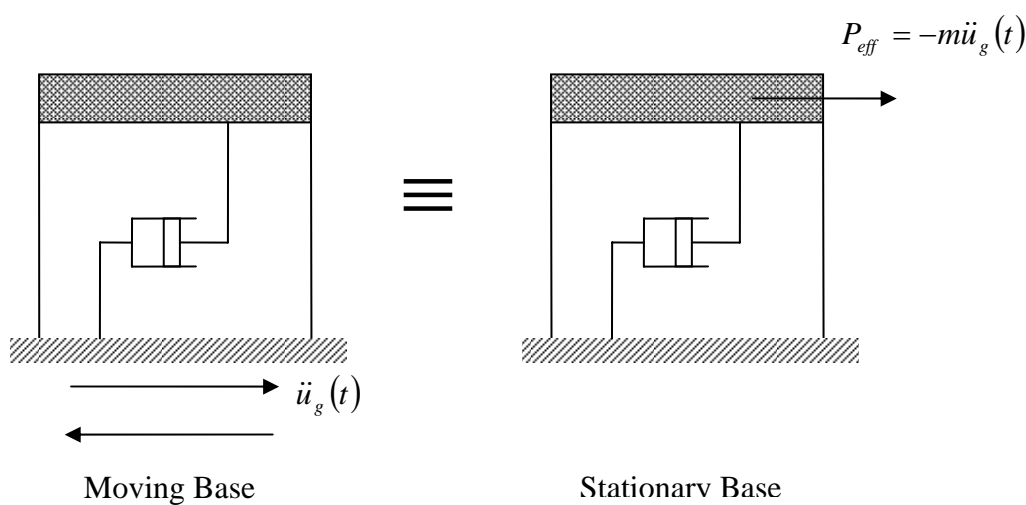
ภาพที่ 9 ระบบระดับขั้นเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้แผ่นดินไหว และการสมดุลแรง

เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงตามภาพ จะได้สมการระบบระดับขั้นเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้แผ่นดินไหว ดังนี้

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

สมการที่ 3 คือ สมการการเคลื่อนที่สำหรับการจัดสัมพันธ์  $u(t)$  ของโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวด้วยความเร่ง  $\ddot{u}_g(t)$  จะเห็นได้ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพื้นด้วยความเร่ง  $\ddot{u}_g(t)$  คือ โครงสร้างมีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-m\ddot{u}_g(t)$  เรียกผลนี้ว่า แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผล (Effective Earthquake Force)  $P_{eff}(t)$

$$P_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$



ภาพที่ 10 แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผล

ข้อสังเกต คือ แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลเป็นส่วนโดยตรงกับมวลของโครงสร้าง ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อระดับความรุนแรงของแรงจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างก็คือมวลของโครงสร้างเอง

## 2. ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหว (Natural Frequency and Mode Shape)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญของระบบที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่งประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ รูปแบบการสั่นไหวและอัตราส่วนความหน่วง พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของการสั่นแบบอิสระสำหรับระบบที่ไม่เกิดผลของความหน่วง ดังนี้

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (4)$$

เขียนคำตอบของสมการที่ 4 ในรูปของฟังก์ชันฮาร์โมนิก ได้ดังนี้

$$u(t) = \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_1 e^{i\omega t} \\ \phi_2 e^{i\omega t} \\ \dots \\ \phi_N e^{i\omega t} \end{Bmatrix} = \phi e^{i\omega t} \quad (5)$$

แทนค่าสมการ 5 ลงในสมการ 4 และจัดรูปใหม่ได้คือ

$$[K - \omega^2 M] \phi = 0 \quad (6)$$

สมการที่ 6 เรียกว่าปัญหา Eigenvalue และสามารถหาคำตอบได้โดยการพิจารณาเงื่อนไขที่ทำให้สมการมีคำตอบที่ไม่เป็นศูนย์ เงื่อนไขนั้นคือ ดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) ของเมทริกซ์  $[K - \omega^2 M]$  ต้องเท่ากับศูนย์

$$\det|K - \omega^2 M| = 0 \quad (7)$$

เมื่อทำการกระจายผลคูณในสมการที่ 7 จะได้สมการที่มีเลขยกกำลัง  $N$  สำหรับตัวแปร  $\omega^2$  จำนวน  $N$  คำตอบ และจากสมการ 5 สามารถแปลความหมายได้ว่า  $\omega$  คือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบนั่นเอง ดังนั้นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $N$  จึงมีค่าความถี่ธรรมชาติได้ทั้งหมด  $N$  ค่าและคำตอบที่แตกต่างกันทั้งหมด  $N$  ค่าหรือรูปแบบ (Mode) โดยแต่ละรูปแบบมีคุณลักษณะในการสั่นไหวที่แตกต่างกัน ความถี่ธรรมชาติสำหรับรูปแบบที่  $n(\omega_n)$  แสดงถึงจังหวะการสั่นตามธรรมชาติของรูปแบบนั้น สำหรับรูปแบบที่มีค่าความถี่ธรรมชาติน้อยที่สุดเรียกว่า

รูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Mode) หรือรูปแบบที่หนึ่ง (Mode 1) จากนั้นสำหรับรูปแบบที่มีค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นเรียกชื่อเป็นรูปแบบลำดับต่อไป

เมื่อคำนวณความถี่ธรรมชาติสำหรับรูปแบบที่  $n(\omega_n)$  ได้แล้ว หากแทนค่า  $\omega^2$  ลงในสมการที่ 6 จะสามารถหาคำตอบของเวกเตอร์  $\varphi$  ได้ โดยความหมายของ  $\varphi$  จากสมการที่ 6 คือรูปแบบการเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นสัมพันธ์กัน โดยเรียกว่า รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) โดยมีรูปร่างเฉพาะสำหรับรูปแบบในการสั่นไหวต่างๆ

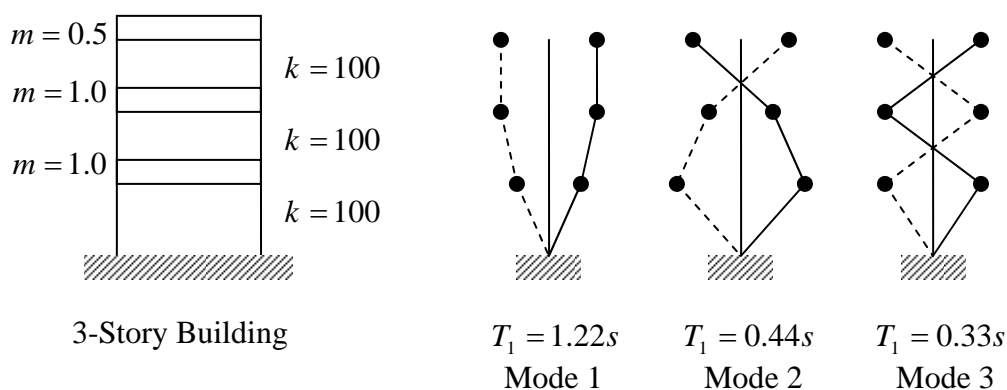
จากการวิเคราะห์คำตอบของ  $u$  ตามสมการที่ 5 ซึ่งเป็นการแยกคำตอบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ( $e^{i\omega t}$ ) และส่วนที่ขึ้นกับตำแหน่งต่างๆในระบบ ( $\varphi$ ) ในการนำไปใช้ต่อไป นิยมเขียนคำตอบของ  $u$  ในรูปของผลรวมจากแต่ละรูปแบบได้ดังนี้

$$u(t) = \Phi q(t) \quad (8)$$

โดยที่  $\Phi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_N]$  เรียกว่า แบบจำลองเมทริกซ์ (Modal Matrix)

$q(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad \dots \quad q_N(t)]$  คือ ผลตอบสนองตามเวลาในแต่ละรูปแบบ

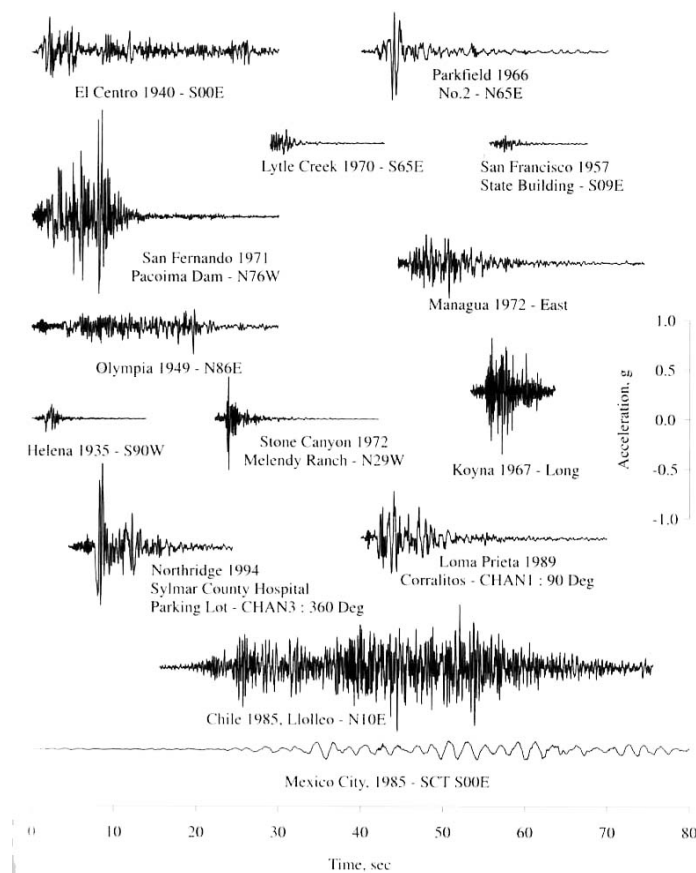
จากภาพที่ 11 คาบธรรมชาติประจำรูปแบบ (Mode) เป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของระบบต่อแรงภายนอก เช่น หากแรงภายนอกมีค่าคาบการสั่นไหวเท่ากับหรือใกล้เคียงกับคาบประจำรูปแบบใดๆ ระบบจะมีการตอบสนองด้วยลักษณะตามรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ของรูปแบบนั้นเป็นหลัก และค่าจากรูปแบบอื่นก็จะมีในสัดส่วนที่น้อยกว่าและสำหรับโครงสร้างในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic)



ภาพที่ 11 อาคาร 3 ชั้นและรูปแบบการสั่นไหว

### 3. ลักษณะของการตอบสนองของระบบเนื่องจากแผ่นดินไหว

จากการพิจารณาเบื้องต้น การเคลื่อนที่ของพื้นรองรับด้วยความเร่ง  $\ddot{u}_g$  จะทำให้เกิดแรงประสิทธิผลกระทำต่อโครงสร้างได้เช่นเดียวกับแรงภายนอกทั่วไป ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณหาการตอบสนองของระบบเนื่องจากแผ่นดินไหวจึงจำเป็นต้องทราบลักษณะของแผ่นดินไหวเป็นข้อมูลเบื้องต้น ซึ่งข้อมูลของความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวสามารถตรวจวัดและบันทึกได้โดยเครื่องมือที่เรียกว่า Accelerograph ที่ติดตั้งอยู่ ณ สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว จากข้อมูลที่ผ่านมาในอดีตสำหรับแผ่นดินไหวที่สำคัญที่เกิดขึ้นหลายครั้งพบว่า การเคลื่อนที่ของพื้นมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ตัวอย่างของข้อมูลค่าความเร่งของพื้นสำหรับแผ่นดินไหวที่สำคัญที่เคยเกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 12



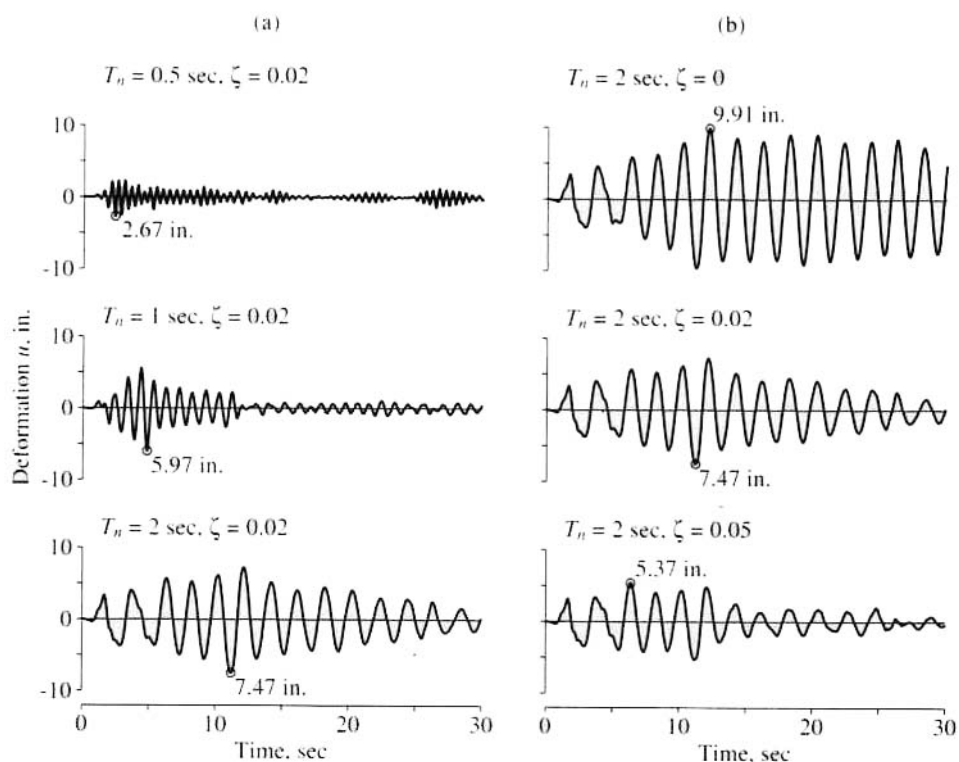
ภาพที่ 12 ตัวอย่างของความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว เหตุการณ์ต่างๆ

ที่มา: Chopra (2007)

ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบมีสมมติฐานหลัก 2 ข้อคือ พิจารณาว่าระบบมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น และพิจารณาว่าคินที่ฐานรากนั้นยึดรั้งระบบได้สมบูรณ์ จึงไม่คิดผลเนื่องจากโครงสร้างของดิน (Soil-Structure interaction) พิจารณาสมการของการเคลื่อนที่สมการที่ 2 ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ จะได้

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (9)$$

จะเห็นว่า สำหรับการเคลื่อนที่ของพื้น  $\ddot{u}_g$  หนึ่งๆ ลักษณะการตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าคาบธรรมชาติ  $T$  และค่าอัตราส่วนความหน่วง  $\xi$  เท่านั้น ดังนั้นหากพิจารณาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อลักษณะการตอบสนองของระบบโดยการเปลี่ยนแปลง  $T$  และ  $\xi$  ภายใต้ผลของแผ่นดินไหวชุดเดียวกัน จะสามารถหาการตอบสนองในรูปของการขจัด  $u(t)$  โดยวิธีทางตัวเลข ในลักษณะต่างๆดังแสดงในภาพที่ 13



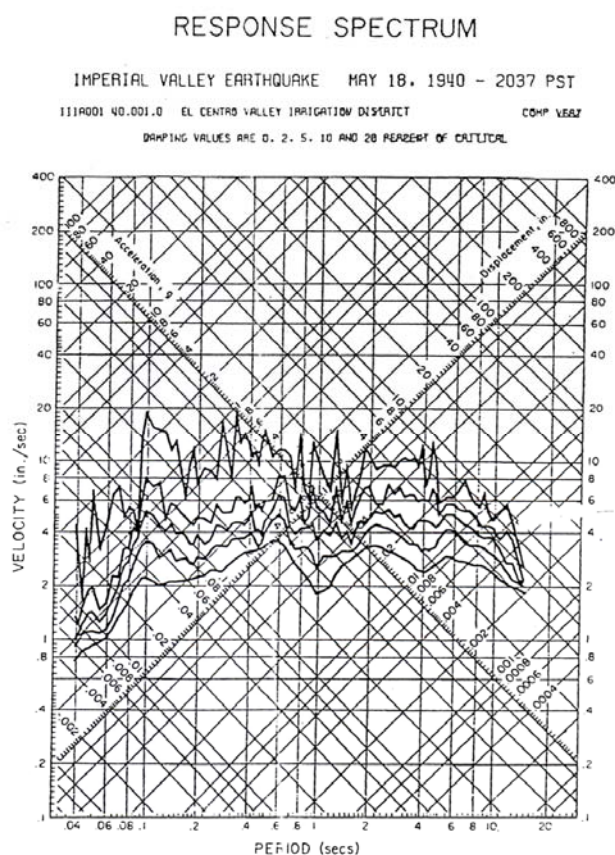
ภาพที่ 13 การขจัดของระบบต่างๆเนื่องจากแผ่นดินไหวแบบ El Centro

ที่มา: Chopra (2007)



จากผลของการตอบสนองของระบบต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวเช่นนี้ได้นำมาเป็นแนวคิดในการอธิบายพฤติกรรมของระบบต่างๆภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยเรียกว่า สเปกตรัมผลตอบสนอง (Response Spectrum)

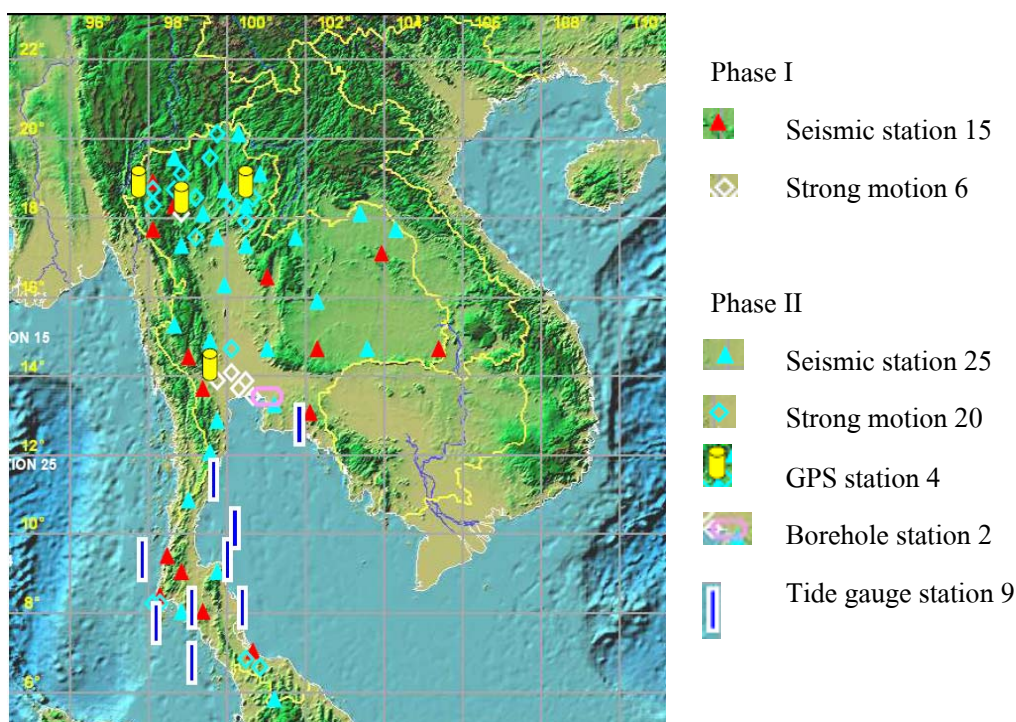
สเปกตรัมผลตอบสนอง(Response Spectrum) คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของการตอบสนองต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวกับคาบธรรมชาติของระบบนั้น โดยพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่คงที่ค่าหนึ่ง สเปกตรัมผลตอบสนองแบ่งตามชนิดของผลตอบสนองได้ 3 ประเภทคือ สเปกตรัมผลตอบสนองของการเสวยรูป (Deformation response spectrum) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร็ว (Velocity response spectrum) และสเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง (Acceleration response spectrum)



ภาพที่ 14 สเปกตรัมผลตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro ค.ศ. 1940

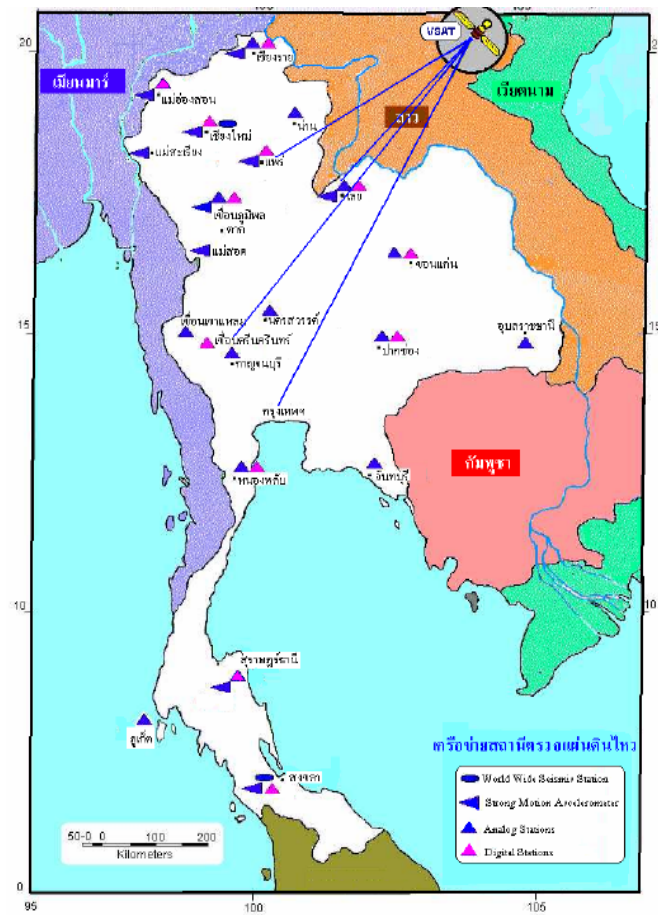
ที่มา: Chopra (2007)

สำหรับในประเทศไทยเครือข่ายการตรวจวัดแผ่นดินไหวมีหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบโดยตรง คือ กรมอุตุนิยมวิทยา เครือข่ายตรวจวัดความสั่นสะเทือนจะเป็นเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน (Seismometer) วัดดูประสงค์เพื่อหาตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว เวลาเกิด ขนาด และเครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerometer) เพื่องานด้านวิศวกรรม ซึ่งมีทั้งระบบตรวจวัดแบบอะนาล็อกและแบบดิจิทัลโดยส่งผ่านสัญญาณด้วยระบบสื่อสารดาวเทียมแบบเวลาจริง โดยมีศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลแบบอัตโนมัติ ณ ส่วนกลางกรมอุตุนิยมวิทยาแสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งแสดงรายละเอียดเครื่องมือทั้งหมดของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่มีเครือข่ายการตรวจวัดความสั่นสะเทือนได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมชลประทาน มีเครือข่ายและเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวบริเวณเขื่อนต่างๆภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคใต้ของประเทศไทย อีกหน่วยงานหนึ่งได้แก่ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือมีเครือข่ายที่มีลักษณะเป็นแบบอาร์เรย์ (Array) มีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบความสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากการทดสอบนิวเคลียร์ใต้พื้นดินและตำแหน่งแผ่นดินไหวใกล้ เป็นต้น



ภาพที่ 15 ตำแหน่งสถานีตรวจแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา

ที่มา: สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา (2551)



ภาพที่ 16 เครื่องข่ายสถานีตรวจแผ่นดินไหวของหน่วยงานต่างๆในประเทศไทย

ที่มา: สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา (2551)

#### 4. แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวหรือบริเวณตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวส่วนใหญ่จะอยู่ตรงบริเวณ

- แนวแผ่นดินไหวของโลก ตรงบริเวณของของแผ่นเปลือกโลก ในกรณีของประเทศไทย แนวแผ่นดินไหวโลกที่ใกล้ๆ ได้แก่ แนวในมหาสมุทรอินเดีย สุมาตราและประเทศพม่า

- แนวรอยเลื่อนต่างๆในกรณีประเทศไทย ได้แก่ แนวรอยเลื่อนในประเทศเพื่อนบ้าน พม่า จีนตอนใต้ สาธารณรัฐประชาชนลาว และรอยเลื่อนภายในประเทศส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันตก แสดงดังภาพที่ 17

- บริเวณที่มีกิจกรรมการกระตุ้นให้เกิดแผ่นดินไหว เช่น เหมือง เชื้ออน บ่อน้ำมัน เป็นต้น



ภาพที่ 17 รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

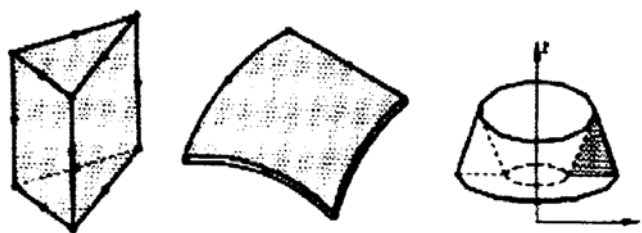
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2547)

## การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

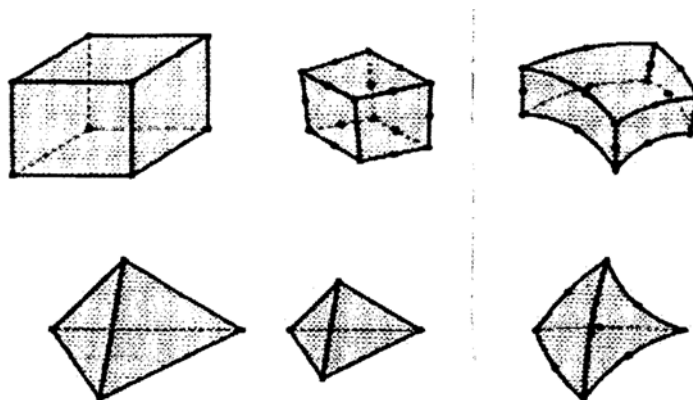
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน อาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของโครงสร้างรวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล เป็นต้น

การแก้ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์ อยู่บนพื้นฐานของการประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมาย ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element)

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรง หรือวิธียืดหยุ่น (Force or Flexibility Method) และวิธีการกระจัดหรือวิธีสติฟเนส (Displacement or Stiffness Method) หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจาย (Displacement Function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์



ภาพที่ 18 ลักษณะเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 19 เอลิเมนต์สามมิติ

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องมากขึ้นเรื่อยๆที่จะขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะของชิ้นงานจริง ยิ่งกำหนดหรือแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะจริงมากเท่าไรผลเฉลยจะถูกต้องแม่นยำมากขึ้น การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ และความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆของเครื่องคอมพิวเตอร์

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมวิเคราะห์แบบจำลอง MSC/NASTRAN
3. แบบแปลนเจดีย์ที่ได้จากกรมศิลปากร
4. ข้อมูลความเร่งพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro ปีค.ศ.1940 และแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ชายแดนประเทศพม่า-ลาว พ.ศ. 2550

## วิธีการ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างเจดีย์อิฐก่อทรงระฆัง จำเป็นที่จะต้องทราบถึงหลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ เงื่อนไขขอบเขต และแรงพลศาสตร์ที่กระทำต่อแบบจำลอง ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาถึงพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์และคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของ โบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง รวมถึงศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยใช้เป็นค่าความเร่งของพื้นของแผ่นดินไหว จากนั้นทำการปรับแก้แบบจำลอง โครงสร้างเจดีย์อิฐ โดย การเพิ่มพื้นดินใต้ฐานรากของโครงสร้างเข้ากับแบบจำลอง และบ่งชี้พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของ โครงสร้างแบบจำลองที่รวมชั้นดินด้วยวิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง (Response Spectrum Method)

## 1. เจดีย์อิฐก่อทรงระฆัง

สำหรับเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังที่ใช้ในการศึกษาและสร้างแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ จะกำหนดเงื่อนไขโดยพิจารณาองค์เจดีย์ที่ระดับความสูงต่างกัน 3 ระดับ คือ องค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงมาก สูงปานกลาง และสูงน้อย

1.1. องค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงมาก จะใช้เจดีย์ประธานวัดใหญ่ชัยมงคล ซึ่งก่อสร้างในรัชกาลพระนารายณ์ ตั้งอยู่ในวัดใหญ่ชัยมงคล เขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นเจดีย์ทรงระฆัง ตั้งอยู่บนฐานทักษิณสี่เหลี่ยม ขนาดกว้างด้านละ 32.40 เมตร สูง 15 เมตร บนฐานทักษิณมีเจดีย์ทิศสูงองค์ละประมาณ 12 เมตร ตั้งอยู่ทั้ง 4 มุม ถัดจากฐานทักษิณสี่เหลี่ยม คือฐานแปดเหลี่ยมเป็นแท่นบัวคว่ำบัวหงายซ้อนกัน 2 ชั้น ชั้นล่างทางด้านทิศตะวันออกเจาะเป็นช่องคูหาสำหรับเข้าไปภายในได้ ต่อขึ้นไปเป็นฐานกลมรองรับองค์ระฆังเหนือองค์ระฆังเป็นบัลลังก์แปดเหลี่ยมปล้องไฉน ปลี และมีลูกแก้วประดับอยู่ปลายสุดรวมความสูงขององค์เจดีย์จากฐานถึงยอดประมาณ 62.10 เมตร

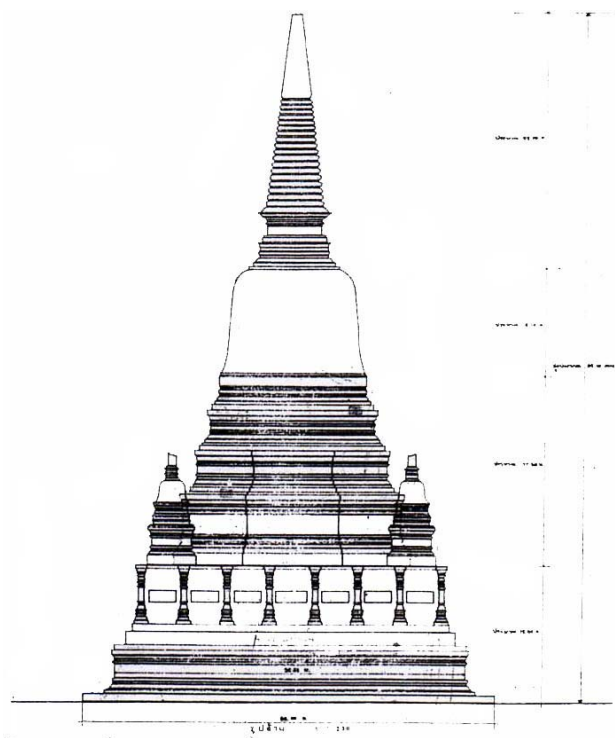
1.2. องค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงปานกลาง จะใช้เจดีย์ประธานวัดจักรวรรดิ ซึ่งก่อสร้างในสมัยอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นเจดีย์ขนาดใหญ่สูงประมาณ 26 เมตร ตั้งอยู่บนฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22 x 22 เมตร ถัดขึ้นไปเป็นฐานเขียง ฐานปัทม์ มาลัยเถา องค์เจดีย์ทรงระฆังกลมป้อม มีร่องรอยของลวดลายบัวที่คอระฆังเหนือระฆังเป็นบัลลังก์แปดเหลี่ยม ก้านฉัตรและปล้องไฉนขนาดใหญ่คล้ายกับเจดีย์ประธานวัดกุฎีดาว

1.3. และองค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงน้อย จะใช้พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ จังหวัดเชียงราย สร้างขึ้นในสมัยพระเจ้าฟ้างคราช สูง 6 วา 2 ศอก กว้าง 3 วา เพื่อประดิษฐานพระบรมสารีริกธาตุ เมื่อปี พ.ศ.1483 ซึ่งเป็นเจดีย์ทรงระฆังแบบล้านนา ที่มีส่วนผสมแบบอยุธยา ประกอบด้วยส่วนฐานเขียงรองรับฐานบัวย่อมุมไม้สิบสอง และชุดฐานบัวรองรับองค์ระฆัง 3 ฐาน ในส่วนของฐานบัวย่อมุมประดิษฐานพระพุทธรูปปูนปั้นประทับยืนในซุ้มจระนำ 4 ทิศ ในส่วนขององค์ระฆังมีเส้นคาดอก ซึ่งเป็นลักษณะที่โดดเด่นของเจดีย์ทรงระฆังแบบล้านนา เหนือขึ้นไปเป็นชุดดอกบัวรองรับปล้องไฉนและปลียอด ซึ่งประดับฉัตร 9 ชั้น





ภาพที่ 20 เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



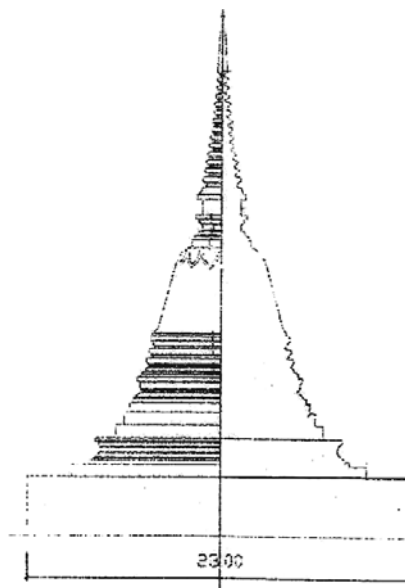
ภาพที่ 21 แบบแปลนเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ที่มา: กรมศิลปากร (2522)

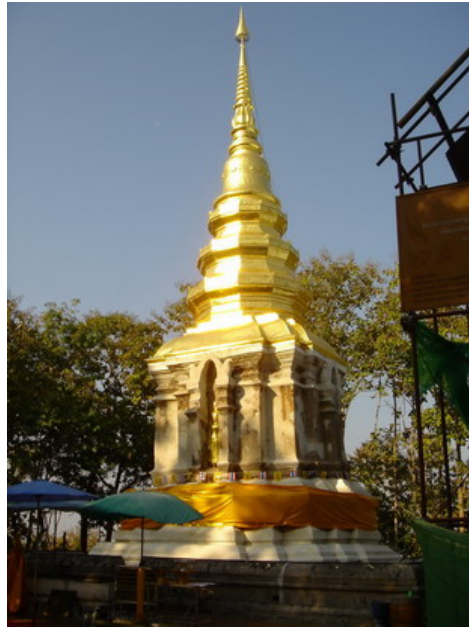


ภาพที่ 22 เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

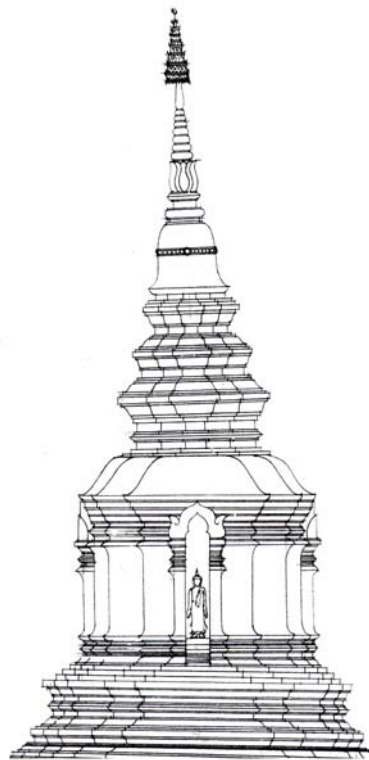
ที่มา: Pinprapa (2007)



ภาพที่ 23 แบบแปลนเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ



ภาพที่ 24 พระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ จังหวัดเชียงราย



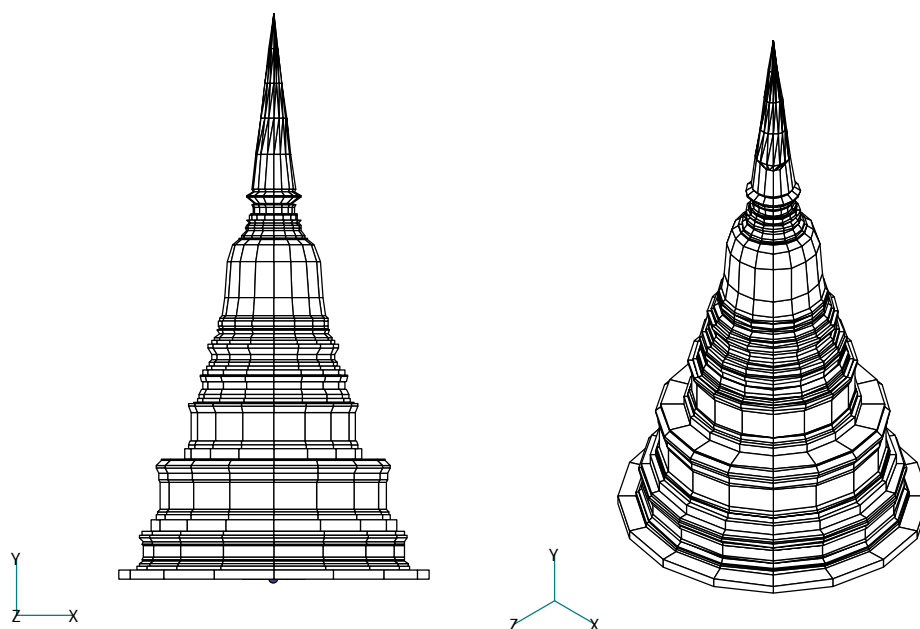
ภาพที่ 25 แบบแปลนพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

## 2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้โปรแกรม MSC/NASTRAN สร้างแบบจำลองจากแบบที่ได้จากกรมศิลปากร โดยโครงสร้างเจดีย์ถูกจำลองขึ้นด้วยชิ้นประกอบกัน (solid elements) 3 มิติ ภายใต้สมมุติฐาน 3 ข้อ คือ โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์และมีความต่อเนื่องกันระหว่างก้อนอิฐและปูนทราย, โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น และดินที่ฐานรากของโครงสร้างยึดรั้งได้สมบูรณ์

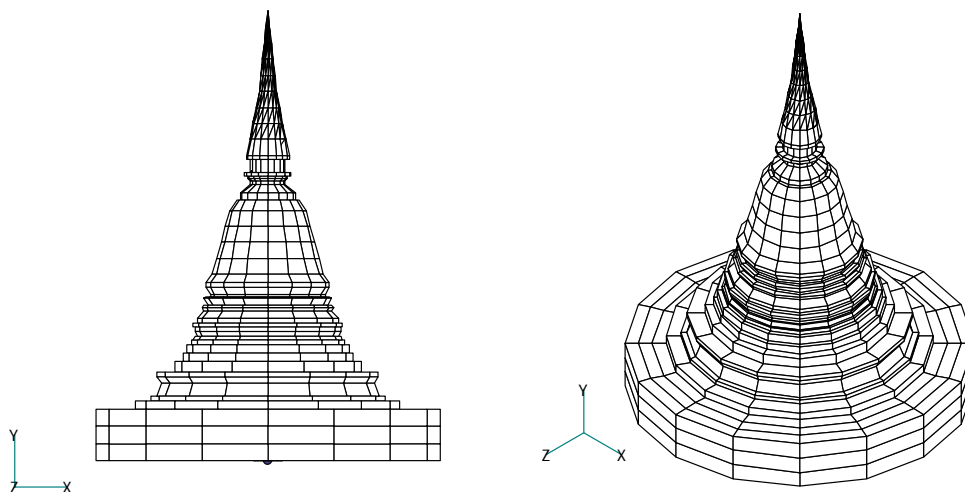
โดยคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้จากการทดสอบโครงสร้างย่อย (sub-structure) ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $30,800 \text{ กก/ซม}^2$  ค่าอัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.21 หน่วยน้ำหนักของวัสดุ เท่ากับ  $1,800 \text{ กก/ม}^3$  ค่ารับแรงดึงประลัยเท่ากับ  $3.8 \text{ กก/ซม}^2$  และมีกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อเท่ากับ  $40 \text{ กก/ซม}^2$

2.1 โครงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของเจดีย์ประธานวัดใหญ่ชัยมงคล มีชิ้นประกอบกันจำนวนทั้งสิ้น 4,608 ชิ้นส่วน โดยมีจุดต่อรวมกันทั้งหมด 3,021 จุดต่อ



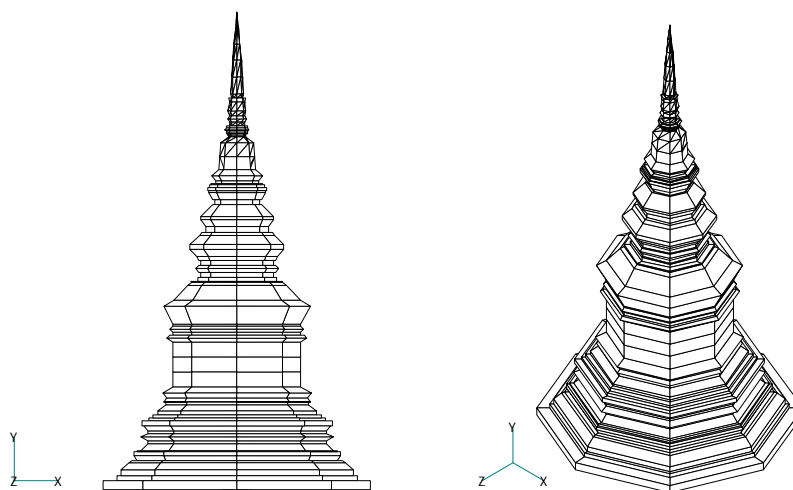
ภาพที่ 26 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

2.2 โครงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของเจดีย์ประธานวัดจักรวรรดิ มีชั้นประกอบกันจำนวนทั้งสิ้น 6,960 ชั้นส่วน โดยมีจุดต่อรวมกันทั้งหมด 3,647 จุดต่อ

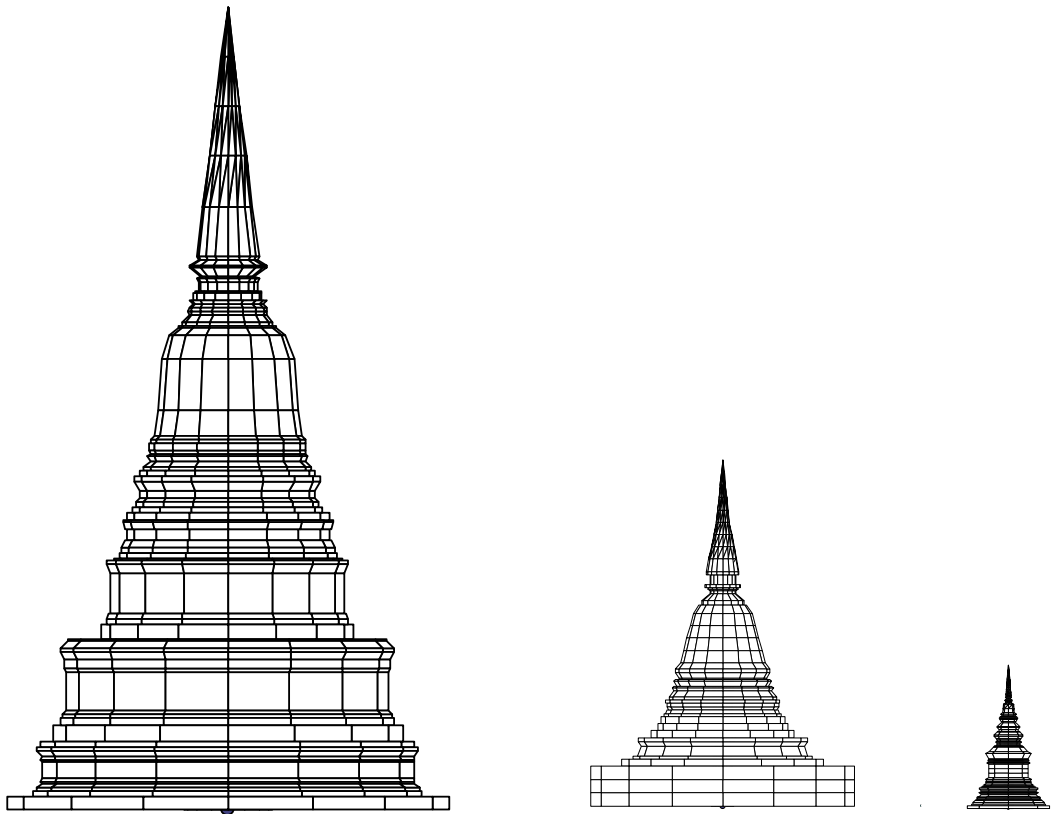


ภาพที่ 27 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

2.3 โครงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของพระธาตุจอมกิตติ มีชั้นประกอบกันจำนวนทั้งสิ้น 3,816 ชั้นส่วน โดยมีจุดต่อรวมกันทั้งหมด 2,129 จุดต่อ



ภาพที่ 28 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ



ภาพที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบขนาดความสูงของเจดีย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 3. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์ อีฐก่อทรงระฆังแบ่งการวิเคราะห์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

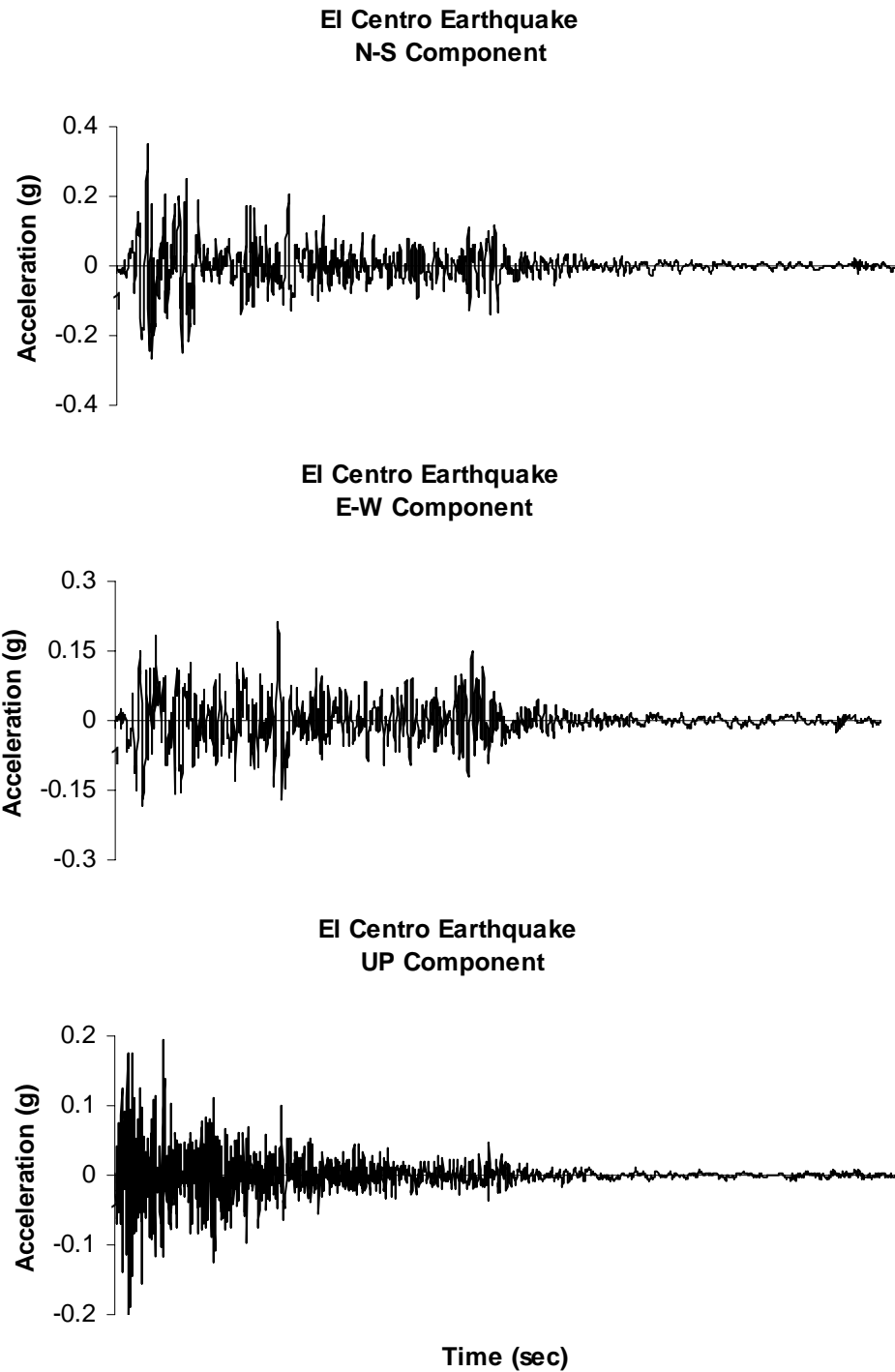
3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยทำการศึกษารูปแบบการสั่นไหว 10 รูปแบบแรก

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ โดยทำการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ (Self Weight) เพื่อหาค่าหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเจดีย์ ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุ (Unit Weight) เท่ากับ 1,800 กก/ม<sup>3</sup>

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยใช้แผ่นดินไหวครั้งสำคัญ 2 เหตุการณ์ คือ แผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม ค.ศ.1940 (พ.ศ.2483) และแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ชายแดนประเทศลาว เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2550 จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) เป็นกรณีศึกษา ในการศึกษาจะใช้ข้อมูลค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยลักษณะการกระทำของแรงต่อโครงสร้าง แสดงดังสมการของการเคลื่อนที่ดังนี้

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

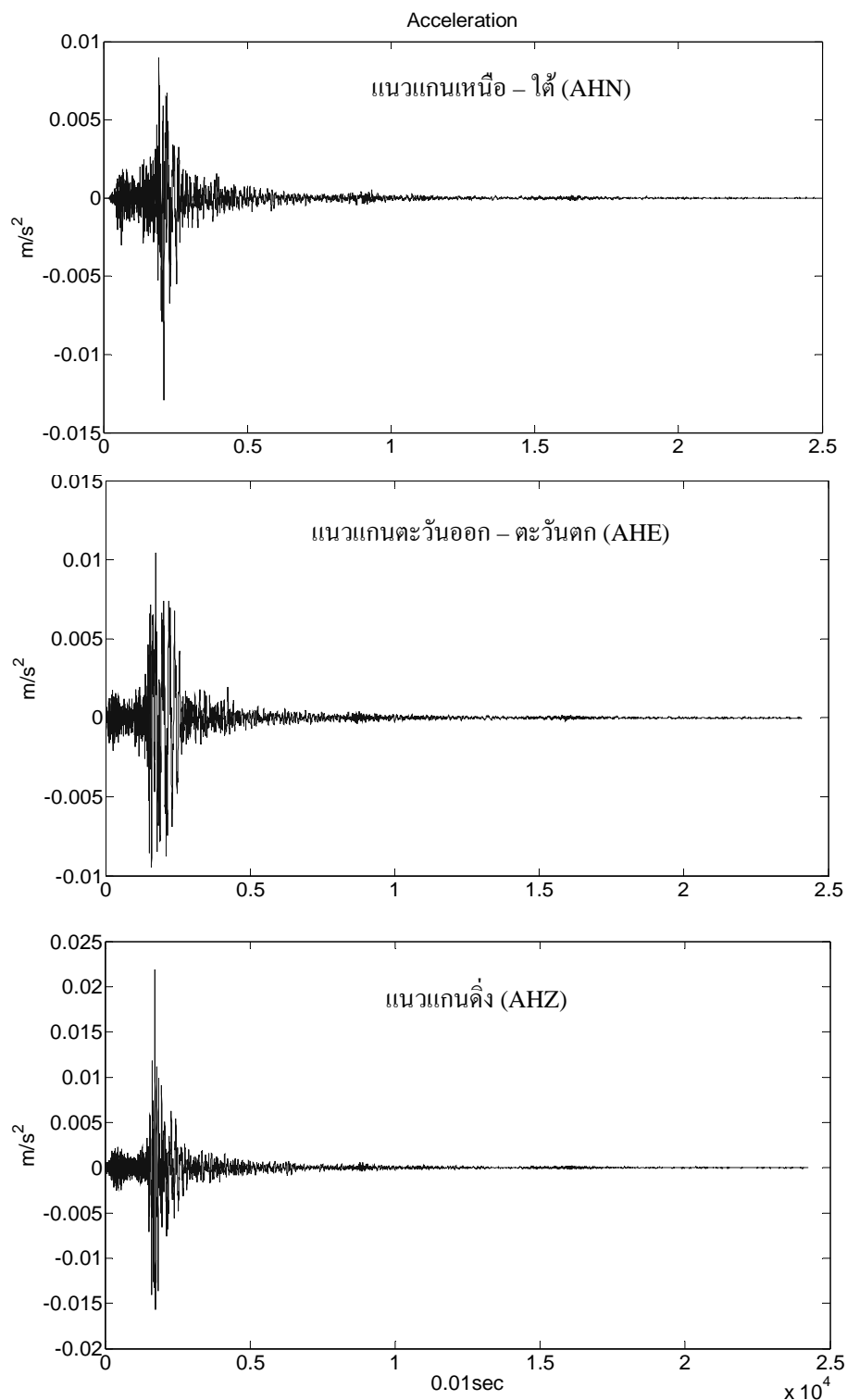
ซึ่งแรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลคือ  $P_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$  และ  $\ddot{u}_g$  คือ ค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว



ภาพที่ 30 กราฟความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro, California 1940

ที่มา: Pacific Earthquake Engineering Research Center (1940)

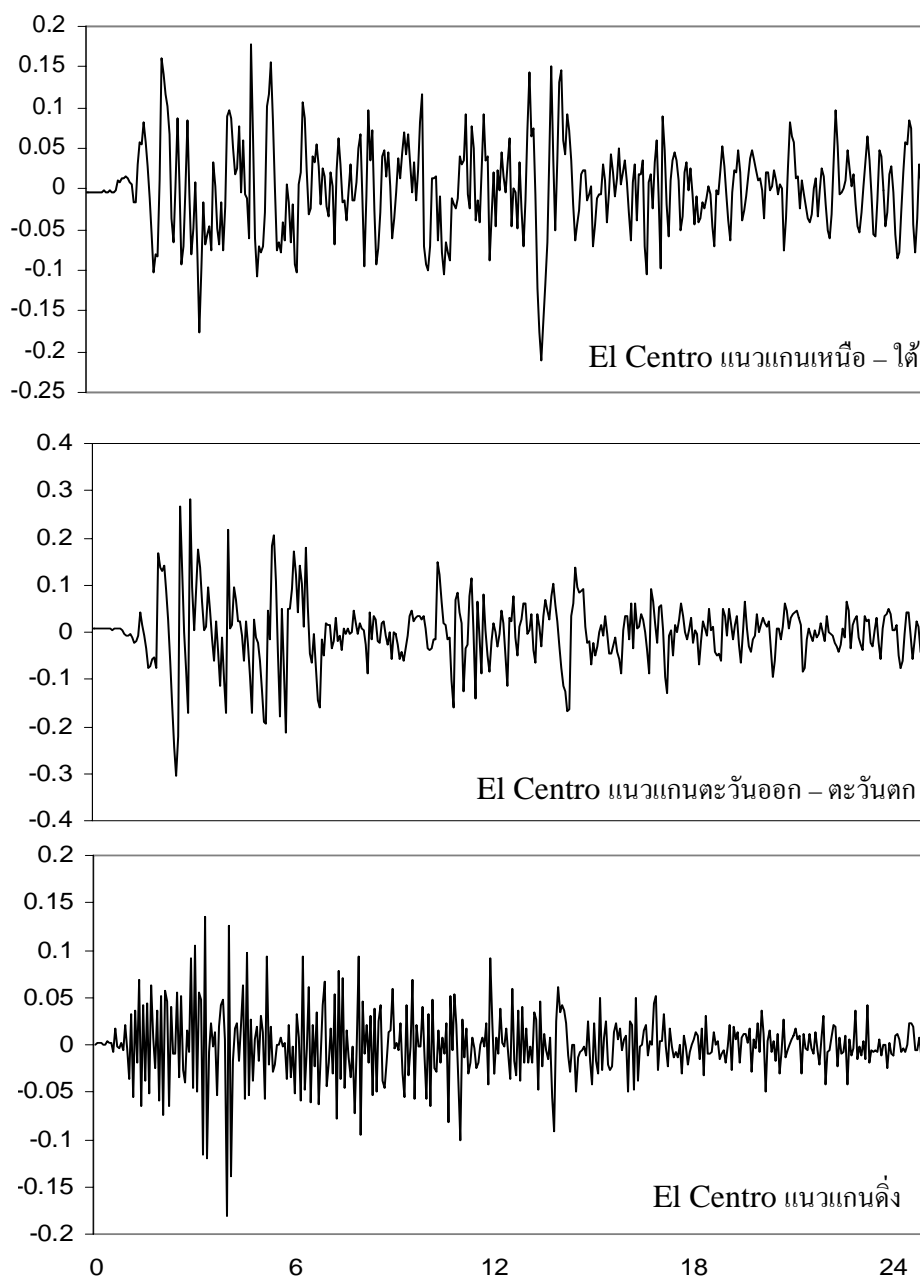




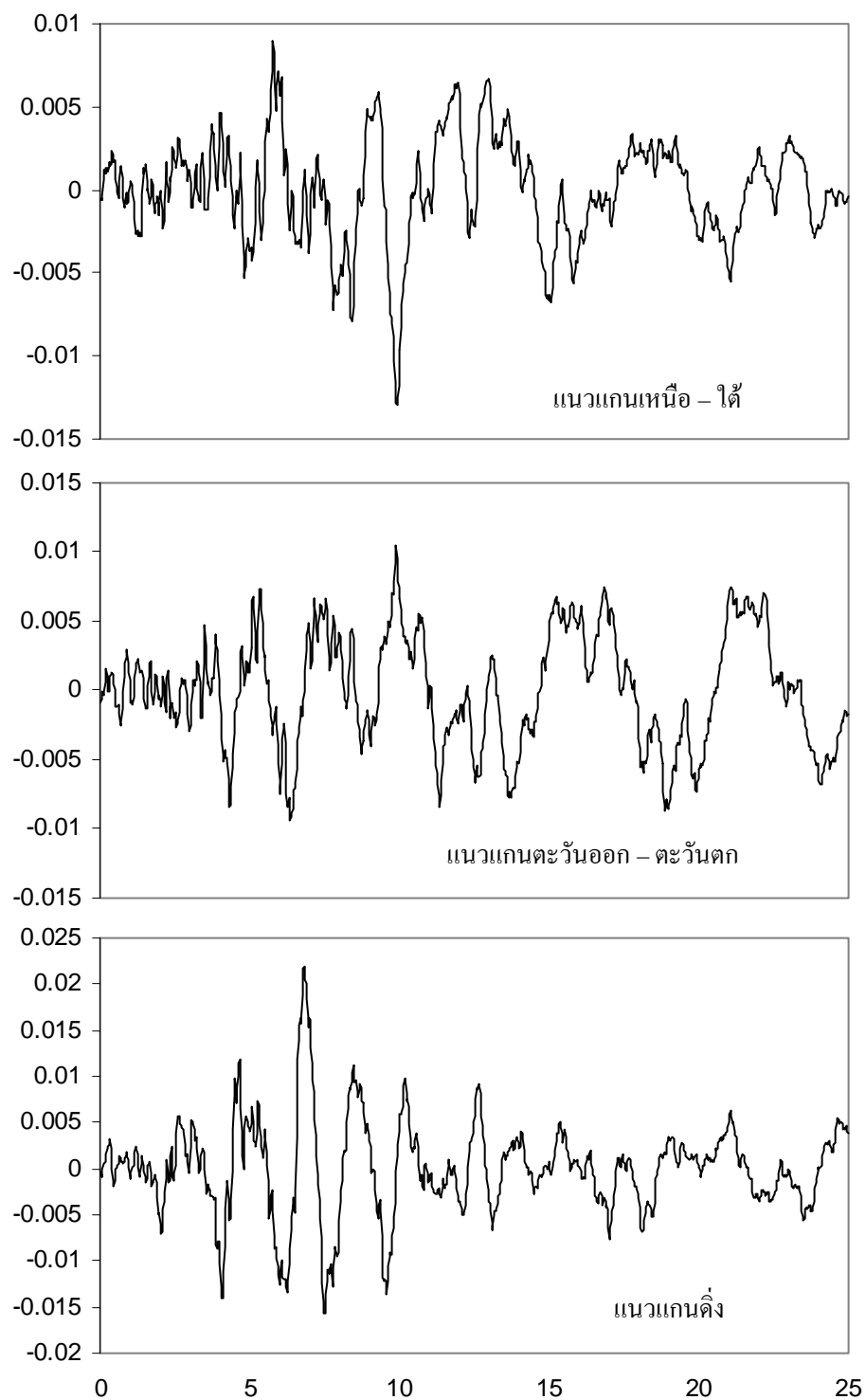
ภาพที่ 31 กราฟความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนแม่จัน จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) 2550

ที่มา: สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา (2550)

ในการใช้ค่าข้อมูลความเร่งของพื้นมาในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษานี้ จะพิจารณาใช้ช่วงค่าความเร่งสูงสุดของพื้นที่มีขนาดมากที่สุด (Peak) เป็นเวลา 25 วินาที แสดงดังภาพที่ 32 สำหรับค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro และภาพที่ 33 สำหรับค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนแม่จัน



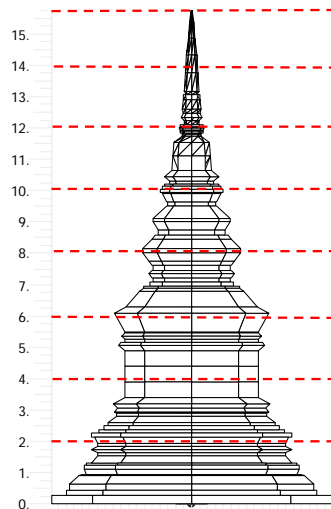
ภาพที่ 32 ค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว El Centro ที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 33 ค่าความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนแม่จัน ที่ใช้ในการวิเคราะห์

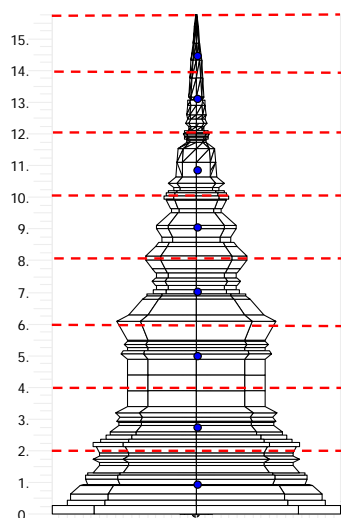
ในการหาค่าแรงแผ่นดินไหวประสิทธิภาพที่มากกระทำต่อโครงสร้างแบบจำลองจากสมการ  $P_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$  มีขั้นตอนดังนี้

### 1. แบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนๆตามความสูง



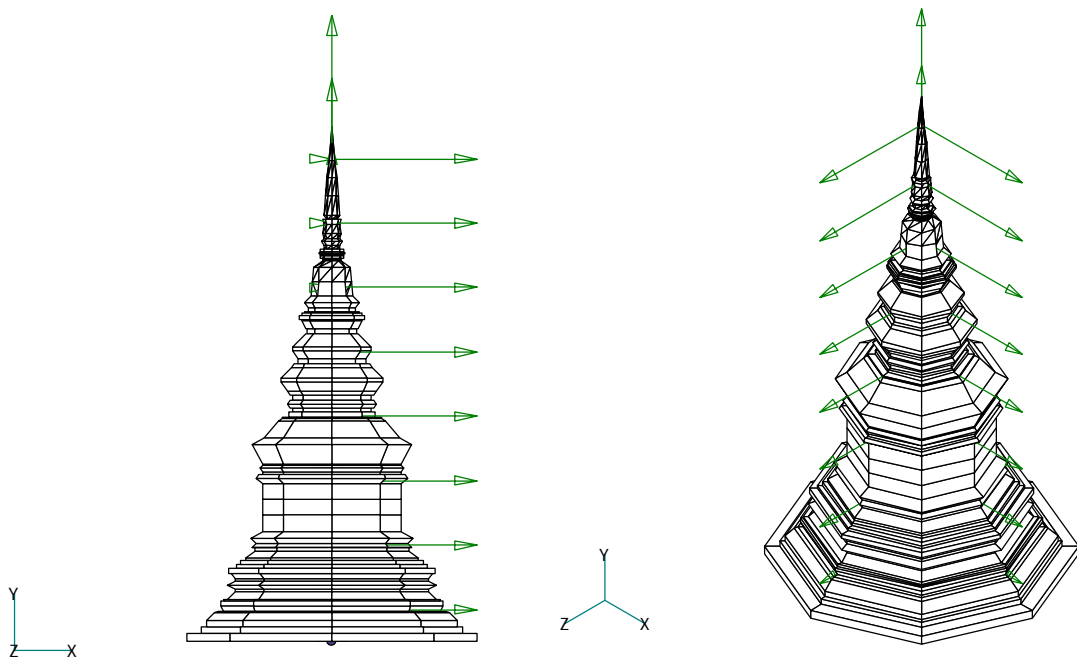
ภาพที่ 34 แสดงการแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนๆตามความสูง

### 2. หาดำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นส่วนย่อยแบบจำลอง (CG)



ภาพที่ 35 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นส่วนย่อยแบบจำลอง

3. หา  $m$  ของแต่ละชั้นส่วนย่อยแบบจำลอง
4. นำ  $P_{eff}(t)$  มากระทำที่แบบจำลองที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของชั้นส่วนย่อยแบบจำลอง โดย  $\ddot{u}_g$  ใช้ข้อมูลความเร่งของพื้นที่ทั้ง 3 แกน คือ แกนเหนือ - ใต้, แกนตะวันออก - ตะวันตก และ แกนตั้ง



ภาพที่ 36 แสดงลักษณะของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างแบบจำลอง

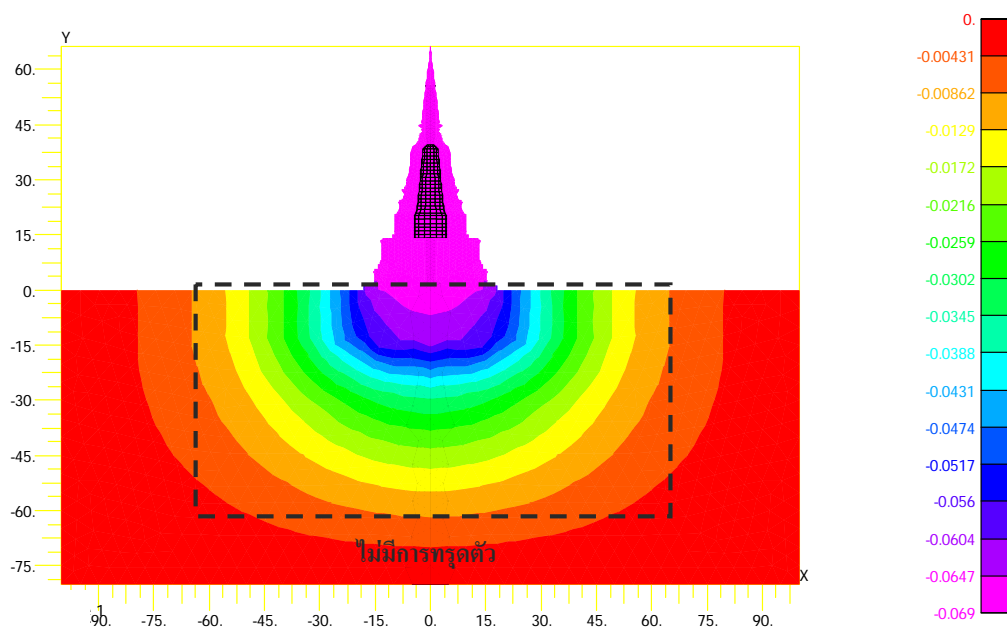
5. ทำการวิเคราะห์ห้วงแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว
6. ทำซ้ำทุกขั้นตอนสำหรับแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์ประธานวัดใหญ่ชัยมงคล และ เจดีย์ประธานวัดจักรวรรดิ
7. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์

#### 4. การปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริง

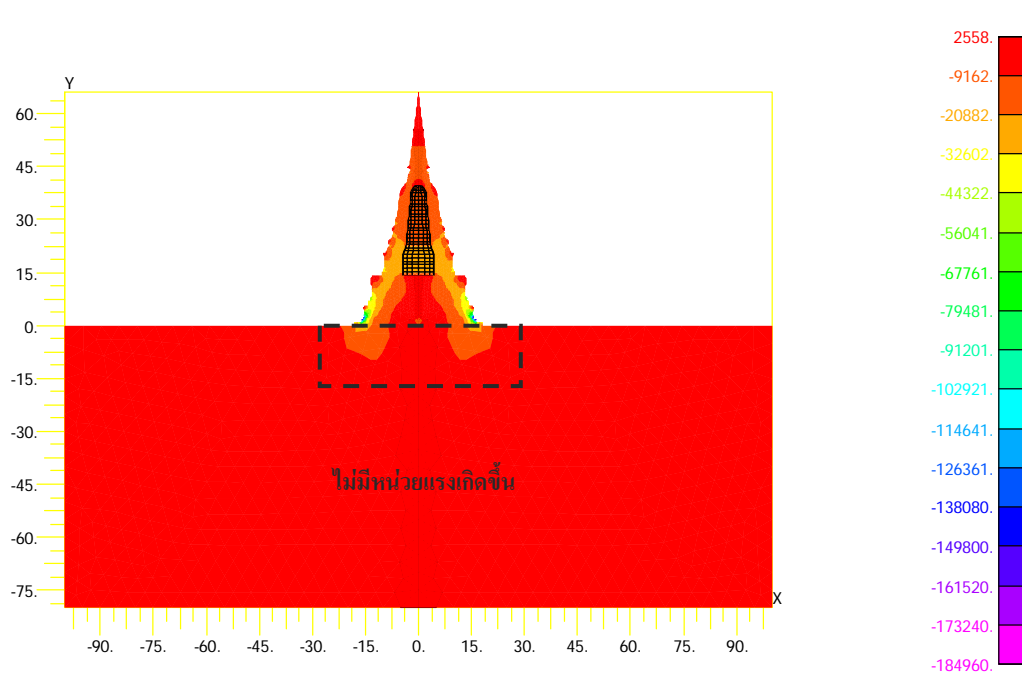
เนื่องจากการทำแบบจำลองโครงสร้างข้างต้นได้กำหนดให้ดินที่ฐานรากของโครงสร้างยึดรั้งได้สมบูรณ์ (Fixed Support) ซึ่งในความเป็นจริงพื้นดินที่รองรับบริเวณใต้ฐานของโครงสร้างเจดีย์ไม่สามารถยึดรั้งได้อย่างสมบูรณ์กับโครงสร้างเจดีย์จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นที่ฐานโครงสร้างแบบจำลองที่ยึดรั้งสมบูรณ์มีลักษณะแตกต่างจากสภาพจริง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริง โดยคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากชั้นดิน

ในการศึกษานี้จะใช้เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคลเป็นกรณีศึกษา ซึ่งในปี พ.ศ. 2522 ได้มีการบูรณะองค์พระเจดีย์ และจากการขุดเจาะสำรวจดิน ปรากฏว่าสภาพดินใต้ฐานรากเป็นชั้นดินปนทราย (Silty Clay) ประกอบด้วยทรายละเอียดปนสลับกับชั้นทรายปนดิน สามารถรับน้ำหนักได้ประมาณ 29.30 ตัน/ม<sup>2</sup> มีความปลอดภัยเพียง 1.19 ซึ่งนับว่าน้อยมาก การบูรณะองค์พระเจดีย์ทำโดยการอัดปูนทรายในชั้นทรายใต้ฐานองค์พระเจดีย์ เพื่อให้ชั้นทรายแน่นขึ้นซึ่งจะทำให้ดินสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นและเป็นการเพิ่มส่วนความปลอดภัยให้มากขึ้นด้วย

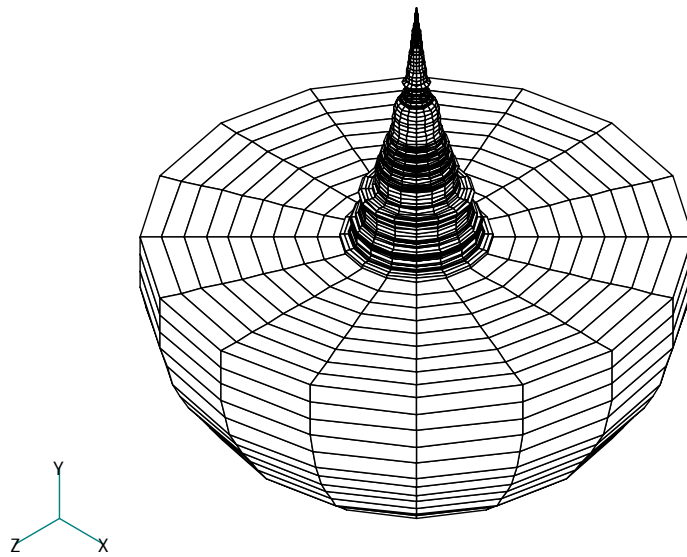
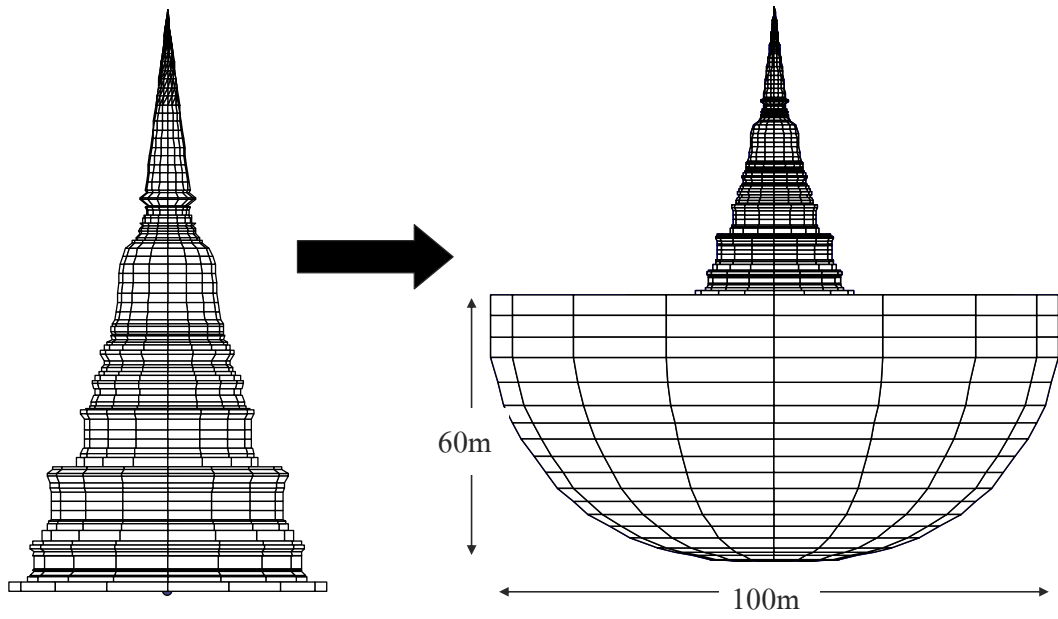
ในการสร้างแบบจำลองชั้นดินใต้ฐานองค์เจดีย์ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้คุณสมบัติของชั้นดินที่เหมาะสมกับพฤติกรรมจริง โดยทำการวิเคราะห์อิทธิพลของหน่วยแรงและลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์ เพื่อใช้ในการกำหนดแบบจำลองชั้นดินพบว่าความลึกของชั้นดินที่ได้รับอิทธิพลประมาณ 60 เมตร ซึ่งไม่เกินความสูงขององค์เจดีย์และสอดคล้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโบราณสถานก่ออิฐทรงปราสาทเมื่อรวมผลของชั้นดิน (ชานฉัตร 2549) และได้ทำการแบ่งคุณสมบัติของชั้นดินเป็น 3 ระดับ คือ ที่ระดับผิวดินจนถึงความลึก 15 เมตร เป็นชั้นดินที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยการอัดปูนทรายมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2500 กก/ซม<sup>2</sup> ค่าอัตราส่วนปัวของประมาณ 0.22 ที่ระดับประมาณ 15 - 30 เมตร ชั้นดินเป็นแบบปานกลางถึงแข็ง มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 293 กก/ซม<sup>2</sup> ค่าอัตราส่วนปัวของประมาณ 0.22 และที่ระดับประมาณ 30 เมตร เป็นต้นไป ชั้นดินเป็นแบบทรายนุ่มปานกลางถึงทรายนุ่ม จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 411 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าอัตราส่วนปัวของประมาณ 0.22



ภาพที่ 37 ลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นในชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์



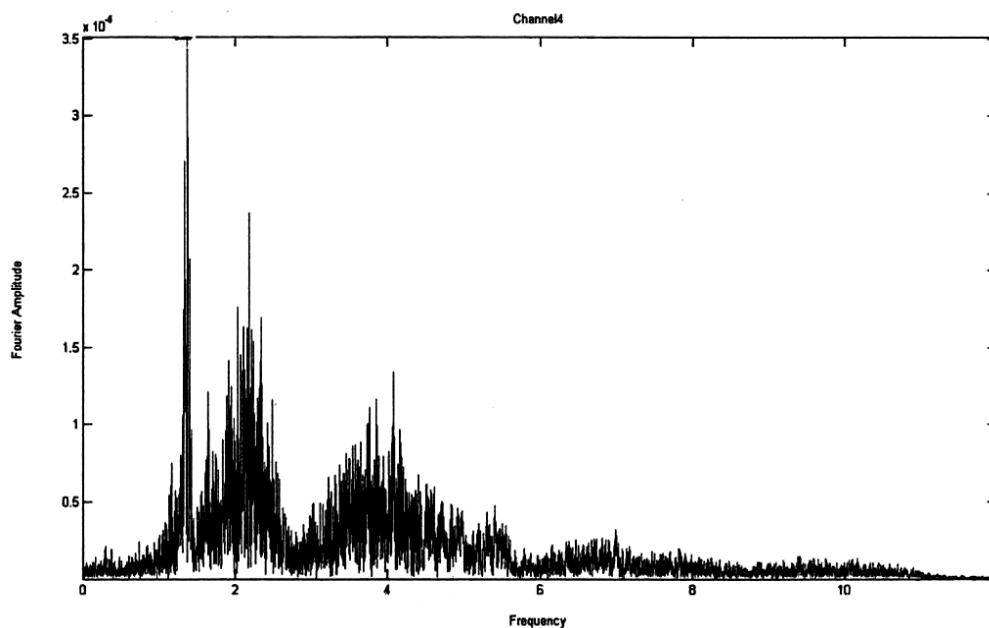
ภาพที่ 38 ลักษณะอิทธิพลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์



ภาพที่ 39 แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์ทรงระฆังเมื่อรวมผลของชั้นดิน



จากนั้นทำการตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัด ณ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นตัวชี้วัด ถูกเสนอโดยจุฑามาศและคณะ (2549) ด้วยวิธีการตรวจวัดการสั่นไหวแบบล้อมรอบ (Ambient Vibration) ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้แรงจากสภาพแวดล้อม โดยติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วที่มีความละเอียดสูงกับองค์เจดีย์เพื่อวัดการสั่นไหว โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งเป็นตัวแปรโดเมนเวลา (Time Domain) ที่ได้จะนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของตัวแปรโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยวิธีการแปลงฟูริเยร์ (Fast Fourier Transform; FFT) ซึ่งแอมพลิจูดสเปกตรัมที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในภาพที่ 39 โดยพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์ เป็นตัวชี้วัดกับผลการวิเคราะห์



ภาพที่ 40 ผลจากการตรวจวัดโดยตรงของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ได้ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์

ที่มา: จุฑามาศและคณะ (2549)

และทำการบ่งชี้พฤติกรรมของโครงสร้างทางพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum Method) โดยใช้ค่าความถี่และรูปแบบการสั่นไหวในการวิเคราะห์ ซึ่งจะใช้สเปกตรัมการตอบสนองของแผ่นดินไหว El Centro ทั้ง 3 แกน เป็นกรณีศึกษา โดยจะทำการหาการเคลื่อนที่สูงสุดของโครงสร้างเปรียบเทียบกับรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง การเคลื่อนที่สูงสุดของรูปแบบการสั่นไหวหาได้จาก

$$v_{n,\max} = \phi_n \frac{\Gamma_n}{M_n} S_d(\xi_n, T_n) \quad (10)$$

โดย  $v_{n,\max}$  ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดรูปแบบที่ n  
 $\phi_n$  สมการรูปร่าง (shape function)  
 $\Gamma_n$  ค่าเฟคเตอร์แบบจำลองภายใต้แผ่นดินไหว (the modal earthquake-excitation factor)  
 $M_n$  มวลของรูปแบบที่ n (generalized mass of  $n$ th normal mode)

ผลรวมของการเคลื่อนที่สูงสุดของรูปแบบการสั่นไหวที่หาได้จากสเปกตรัมการตอบสนอง จะใช้วิธีรากที่สองของผลรวมของผลตอบตอบสนองของแบบจำลองกำลังสอง (The square root of the sum of the squares of the modal response) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่นิยมใช้กัน ดังนั้นผลรวมของค่าการเคลื่อนที่สูงสุดโดยประมาณ คือ

$$v_{\max} = \sqrt{(v_1)_{\max}^2 + (v_2)_{\max}^2 + \dots} \quad (11)$$

## ผลและวิจารณ์

### ผล

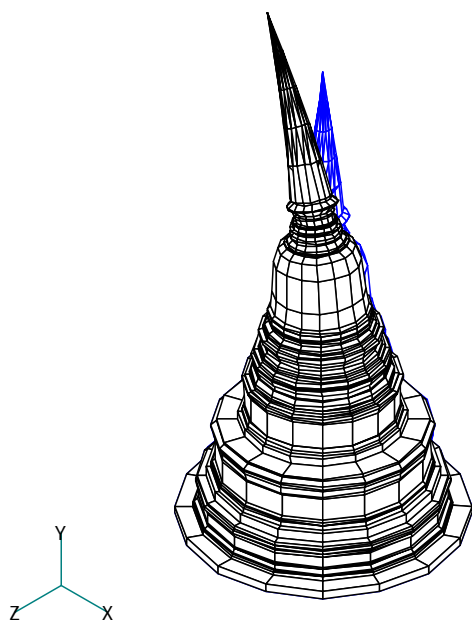
#### 1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยทำการศึกษา รูปแบบการสั่นไหว 10 รูปแบบแรก ของทั้ง 3 เจดีย์ คือ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ และพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 ถึง ตารางที่ 5 ตามลำดับ

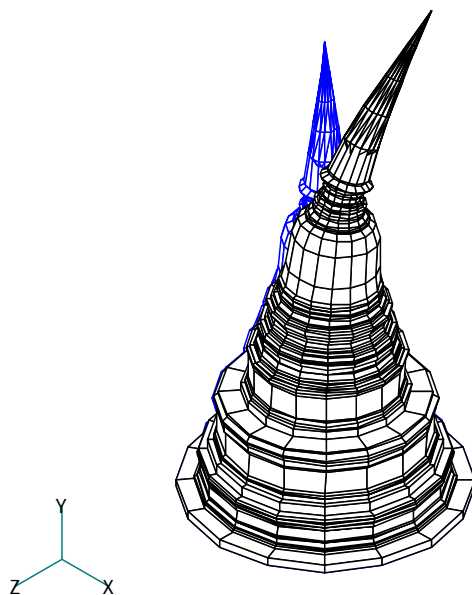
##### 1.1 เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ซึ่งมีความสูงมากที่สุด

#### ตารางที่ 3 รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

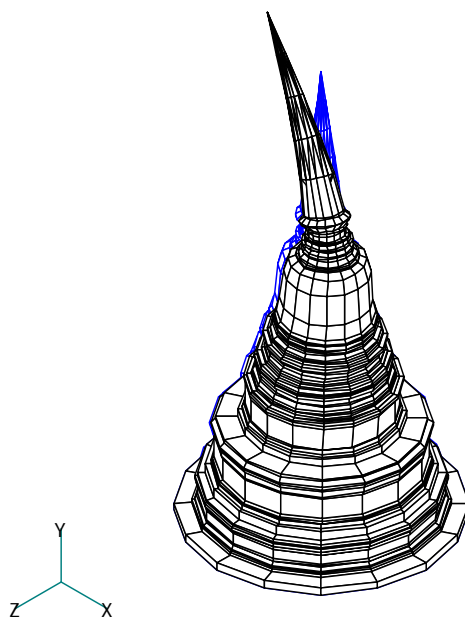
รูปแบบการสั่นไหว	ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 z - direction	2.9843
2 x - direction	2.9843
3 z - direction	4.9231
4 x - direction	4.9231
5 z - direction	8.7078
6 x - direction	8.7078
7 torsion	10.8737
8 y - direction	11.4385
9 z - direction	11.5836
10 x - direction	11.5836



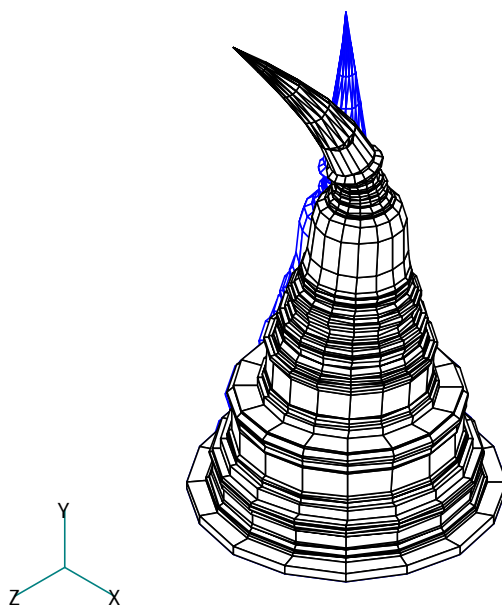
ภาพที่ 41 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9843 เฮิรตซ์



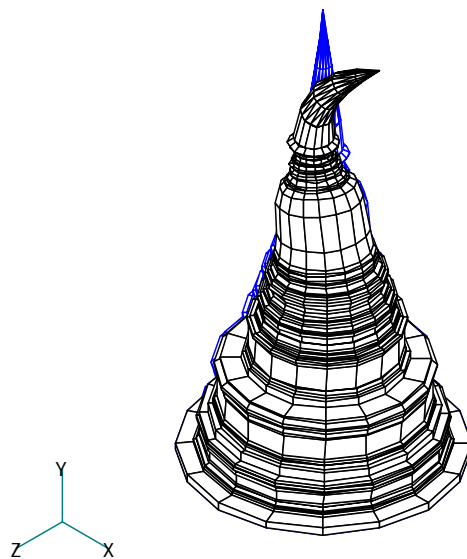
ภาพที่ 42 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9843 เฮิรตซ์



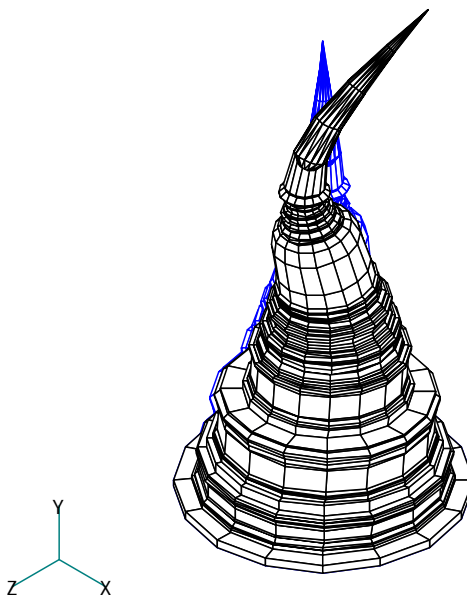
ภาพที่ 43 รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 4.9231 เฮิรตซ์



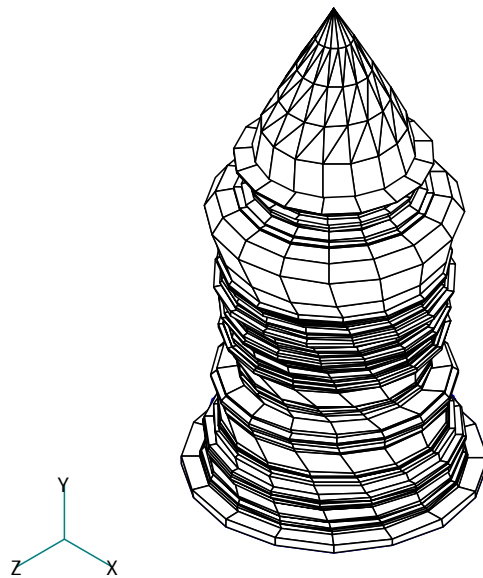
ภาพที่ 44 รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 4.9231 เฮิรตซ์



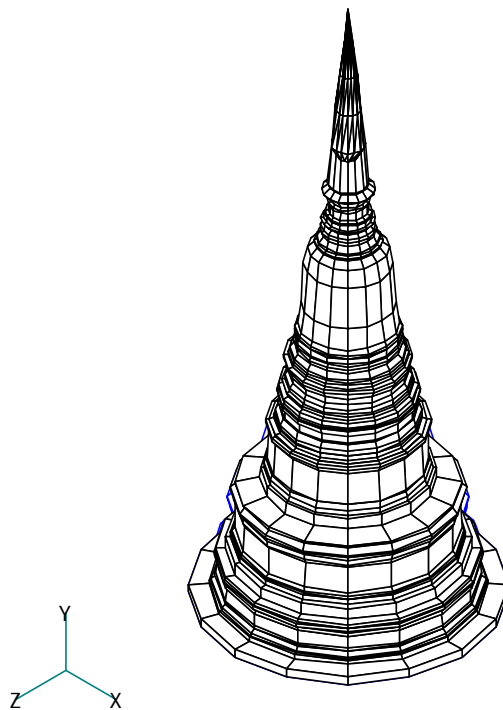
ภาพที่ 45 รูปแบบการสั่นไหวที่ 5 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7078 เฮิรตซ์



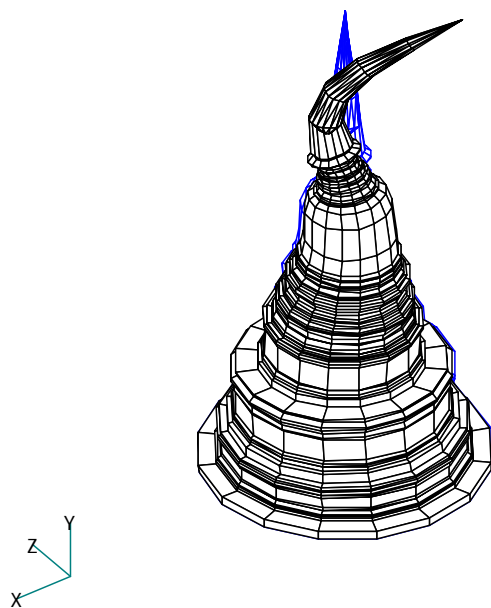
ภาพที่ 46 รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 8.7078 เฮิรตซ์



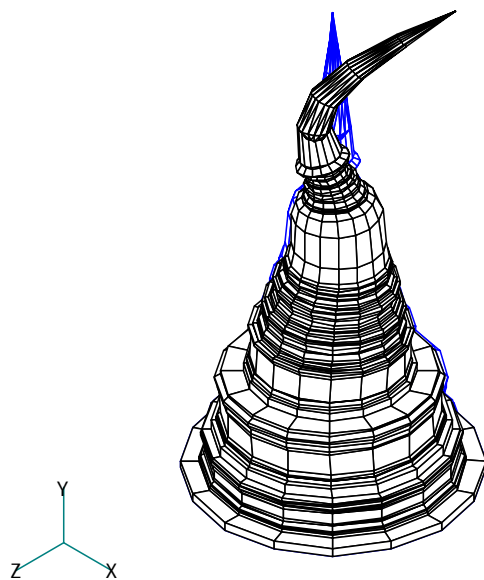
ภาพที่ 47 รูปแบบการสั่นไหวที่ 7 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 10.8737 เฮิรตซ์



ภาพที่ 48 รูปแบบการสั่นไหวที่ 8 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.4385 เฮิรตซ์



ภาพที่ 49 รูปแบบการสันไหวที่ 9 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.5836 เฮิรตซ์



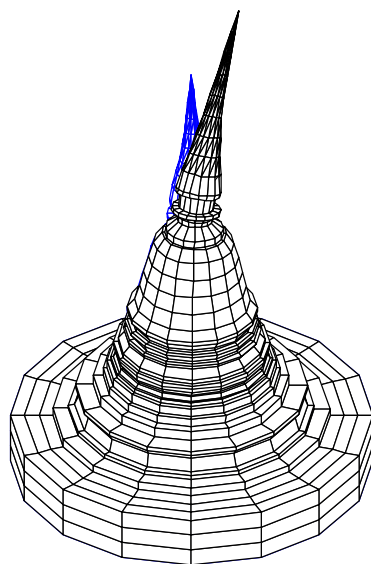
ภาพที่ 50 รูปแบบการสันไหวที่ 10 ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 11.5836 เฮิรตซ์



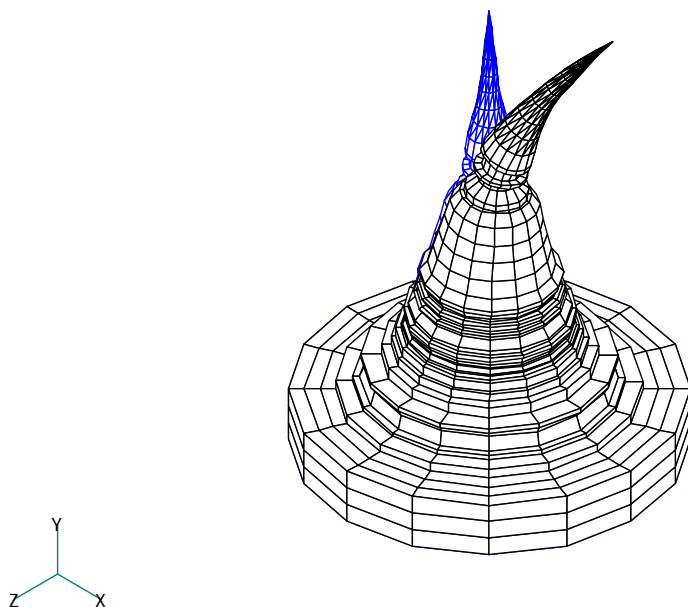
## 1.2 เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ซึ่งมีความสูงขนาดปานกลาง

ตารางที่ 4 รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

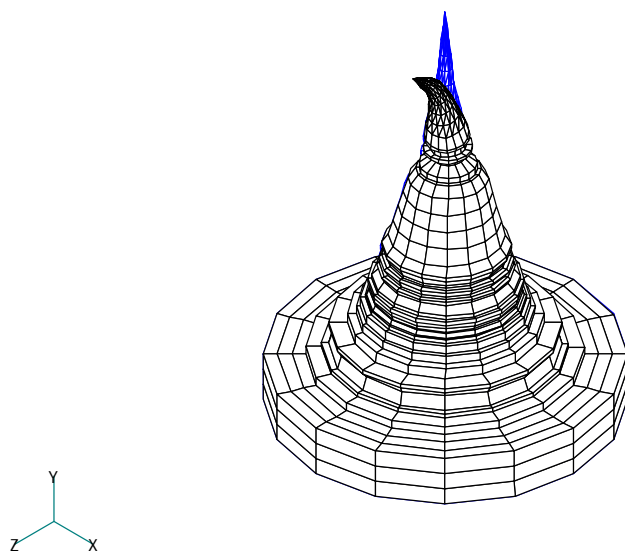
รูปแบบการสั่นไหว	ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 z - direction	7.8649
2 x - direction	7.8649
3 z - direction	13.1002
4 x - direction	13.1002
5 z - direction	22.7483
6 x - direction	22.7483
7 torsion	26.2891
8 y - direction	26.4649
9 z - direction	28.6318
10 x - direction	28.6318



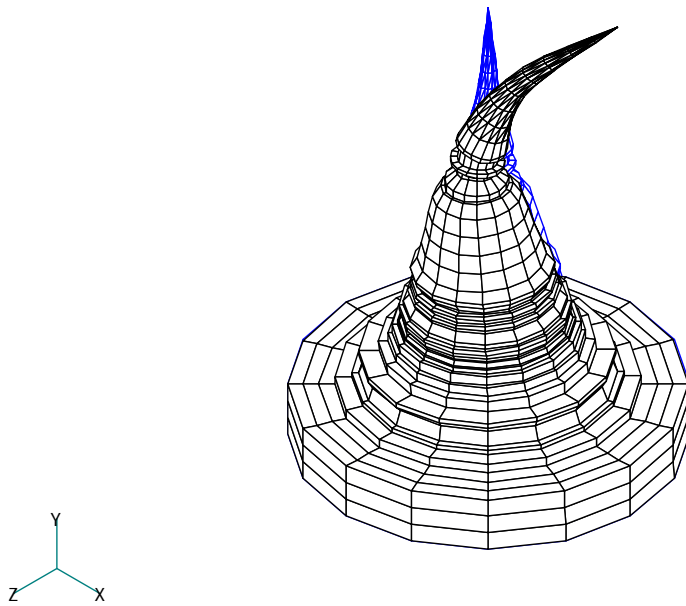
ภาพที่ 51 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.8649 เฮิรตซ์



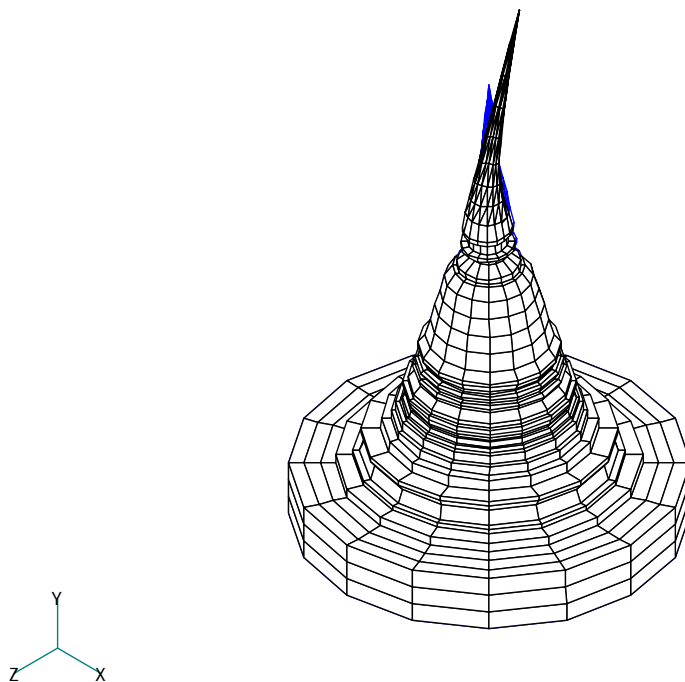
ภาพที่ 52 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.8649 เฮิรตซ์



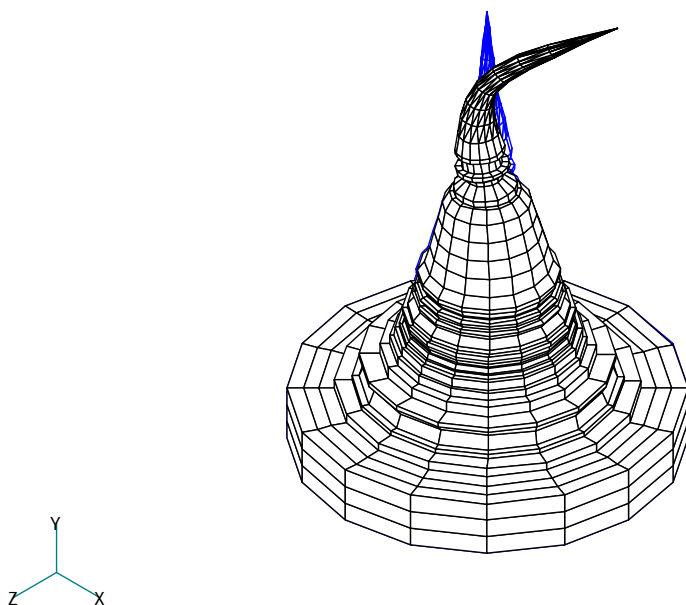
ภาพที่ 53 รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 13.1002 เฮิรตซ์



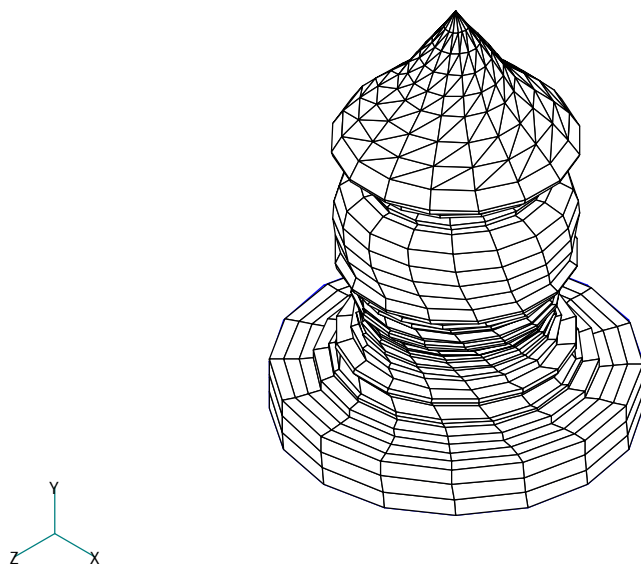
ภาพที่ 54 รูปแบบการสั้นไหวที่ 4 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  
13.1002 เฮิรตซ์



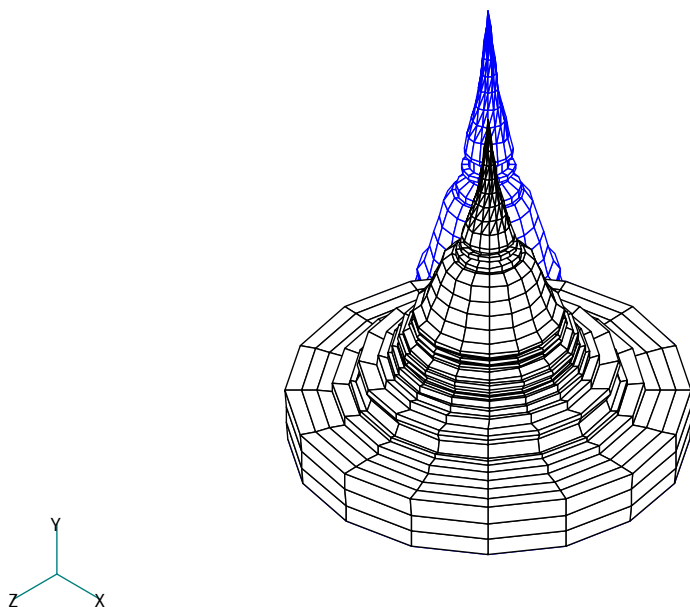
ภาพที่ 55 รูปแบบการสั้นไหวที่ 5 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  
22.7483 เฮิรตซ์



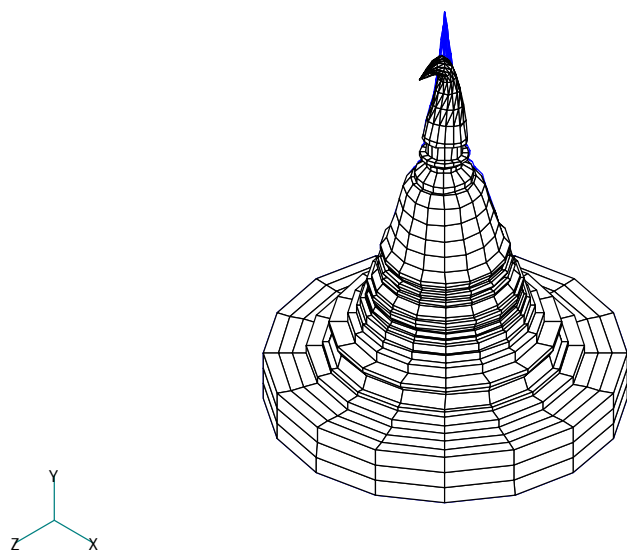
ภาพที่ 56 รูปแบบการสันไหวที่ 6 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 22.7483 เฮิรตซ์



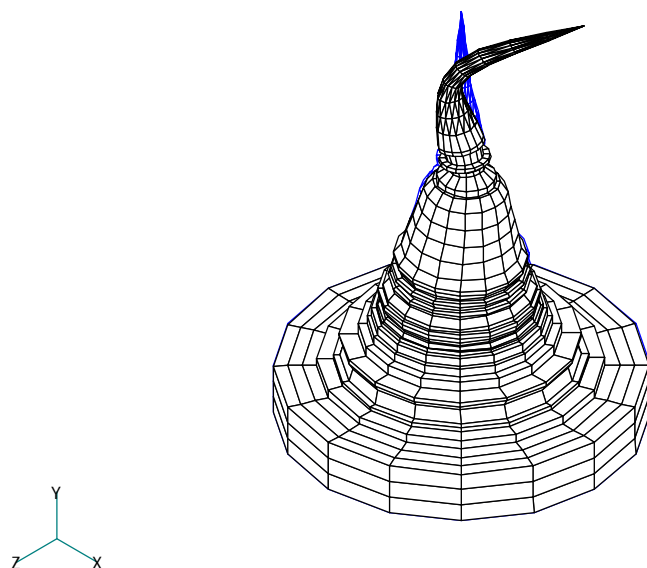
ภาพที่ 57 รูปแบบการสันไหวที่ 7 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 26.2891 เฮิรตซ์



ภาพที่ 58 รูปแบบการสั้นไหวที่ 8 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 26.4649 เฮิรตซ์



ภาพที่ 59 รูปแบบการสั้นไหวที่ 9 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 28.6318 เฮิรตซ์

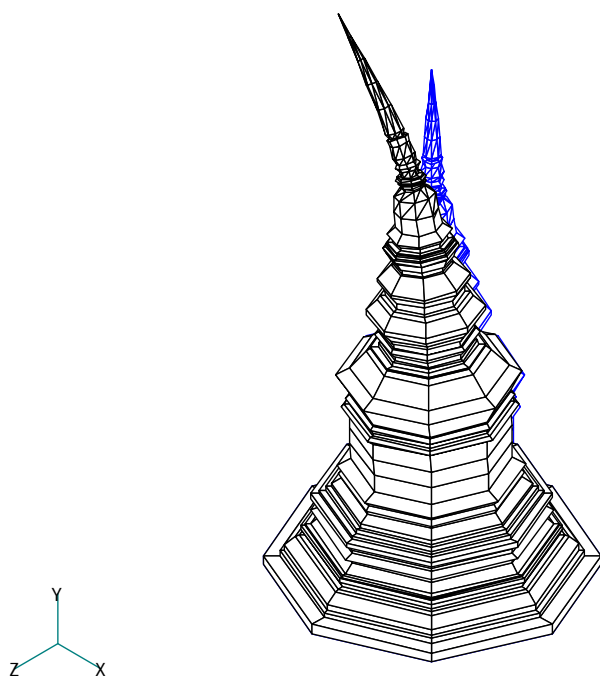


ภาพที่ 60 รูปแบบการสั่นไหวที่ 10 ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 28.6318 เฮิรตซ์

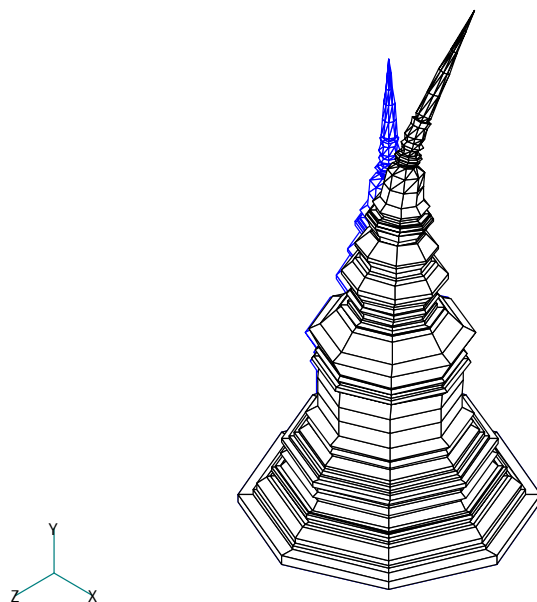
### 1.3 พระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ซึ่งมีขนาดความสูงน้อยที่สุด

ตารางที่ 5 รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

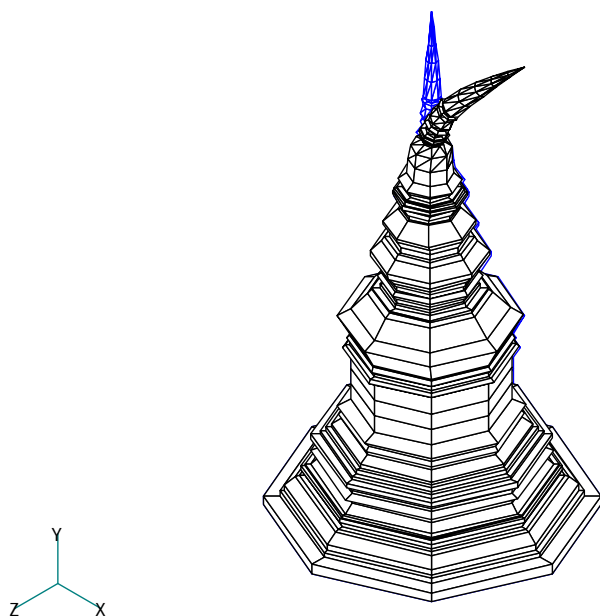
รูปแบบการสั่นไหว	ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 x - direction	12.2062
2 z - direction	12.2062
3 x - direction	17.6369
4 z - direction	17.6369
5 x - direction	30.7493
6 z - direction	30.7493
7 torsion	37.0195
8 y - direction	45.1375
9 x - direction	51.1298
10 z - direction	51.1298



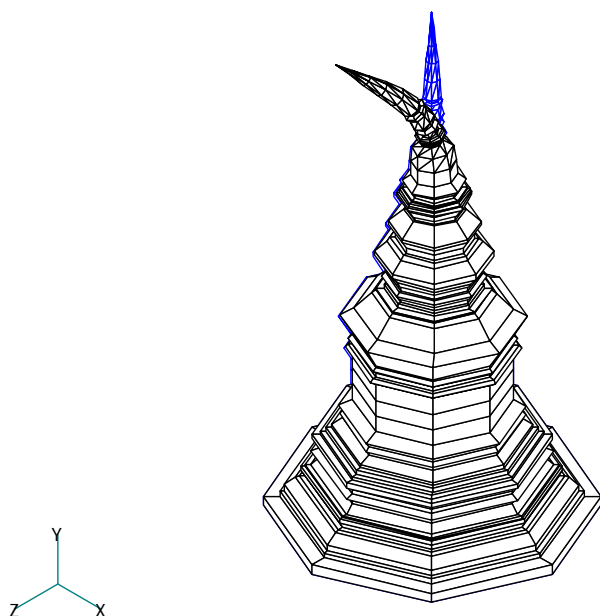
ภาพที่ 61 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 12.2062 เฮิรตซ์



ภาพที่ 62 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 12.2062 เฮิรตซ์

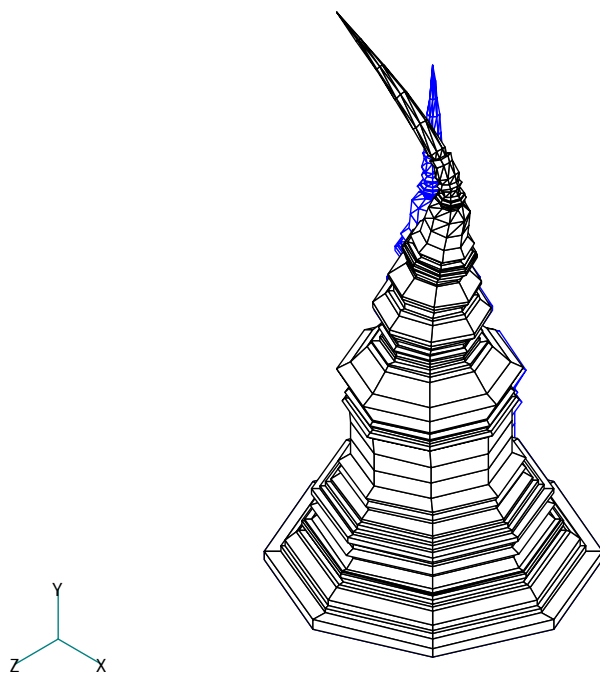


ภาพที่ 63 รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 17.6369 เฮิรตซ์

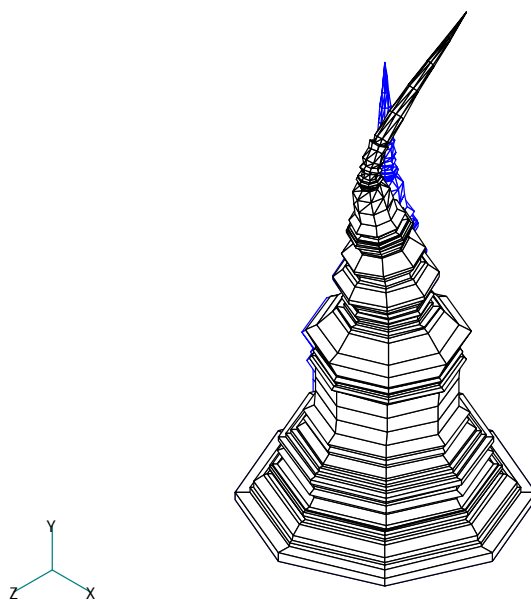


ภาพที่ 64 รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 17.6369 เฮิรตซ์

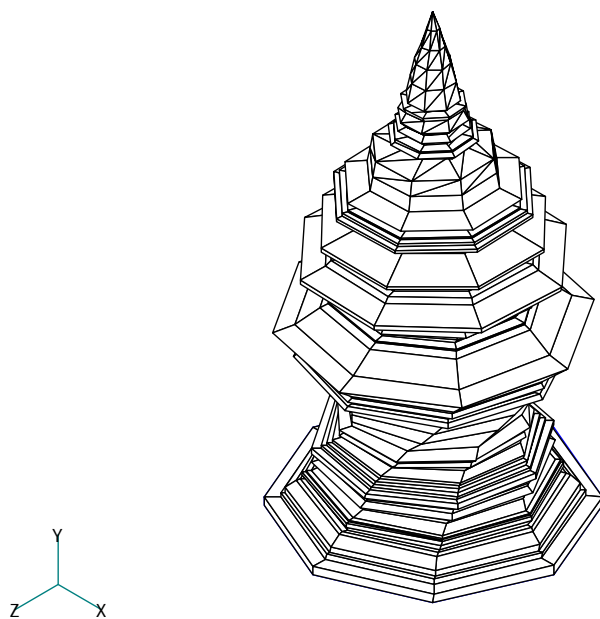




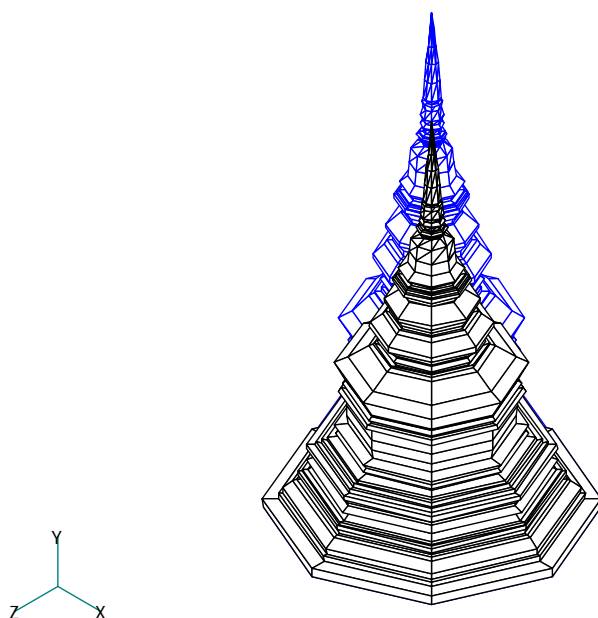
ภาพที่ 65 รูปแบบการสั่นไหวที่ 5 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 30.7493 เฮิรตซ์



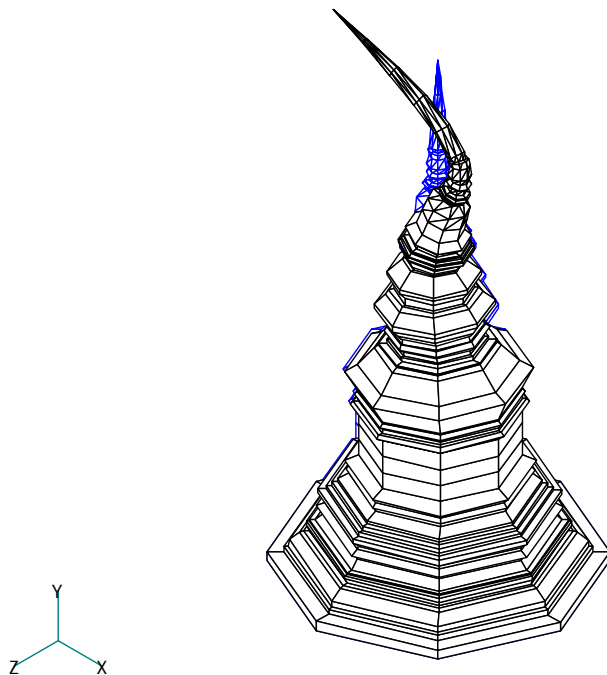
ภาพที่ 66 รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 30.7493 เฮิรตซ์



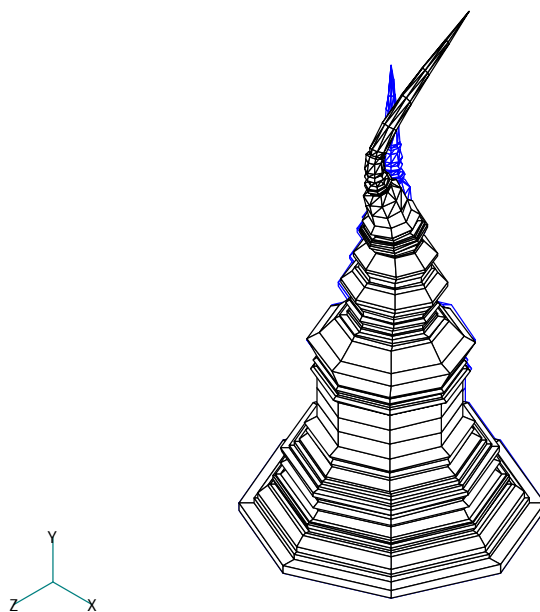
ภาพที่ 67 รูปแบบการสั่นไหวที่ 7 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 37.0195 เฮิรตซ์



ภาพที่ 68 รูปแบบการสั่นไหวที่ 8 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 45.1375 เฮิรตซ์



ภาพที่ 69 รูปแบบการสั้นไหวที่ 9 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 51.1298 เฮิรตซ์



ภาพที่ 70 รูปแบบการสั้นไหวที่ 10 ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ ค่าความถี่ธรรมชาติ เท่ากับ 51.1298 เฮิรตซ์

## 2. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางสถิตศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษานี้ จะศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวราบ ภายใต้น้ำหนักขององค์เจดีย์ ของเจดีย์ทั้ง 3 องค์ คือ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ และพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ผลการวิเคราะห์แสดงดังต่อไปนี้

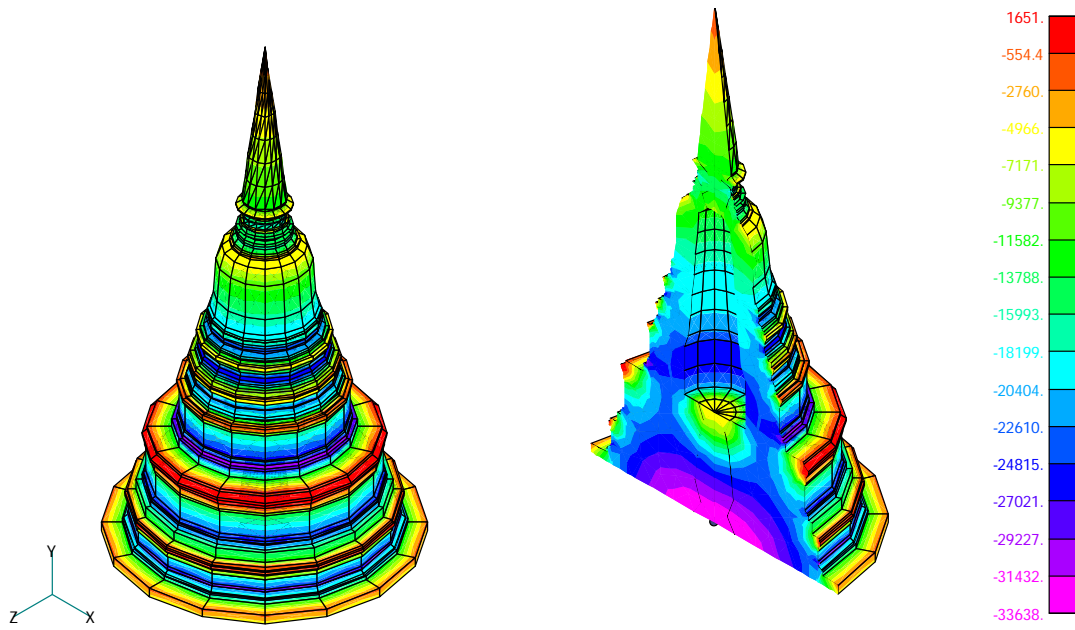
### 2.1 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ซึ่งมีความสูงมากที่สุด

ตารางที่ 6 หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

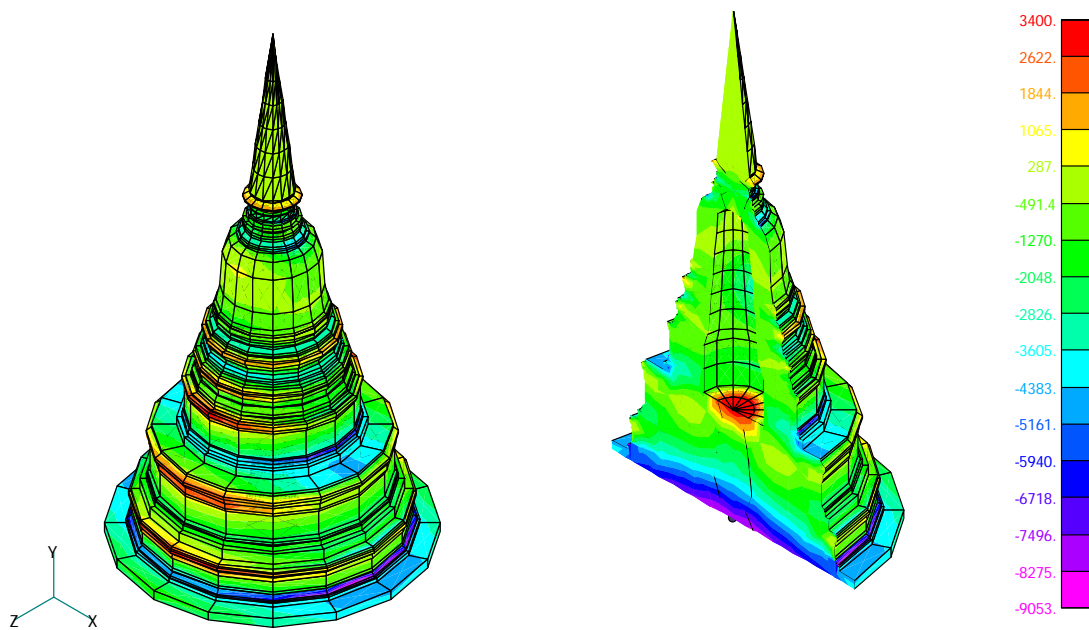
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.7906	-
บริเวณเรือนธาตุ	-2.5952	-
บริเวณรอบฐาน	-2.9571	0.1651
กึ่งกลางฐาน	-3.3638	-

ตารางที่ 7 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.233	0.3966
บริเวณเรือนธาตุ	-0.4314	0.3400
บริเวณรอบฐาน	-0.6085	0.2207
กึ่งกลางฐาน	-0.9053	-



ภาพที่ 71 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล



ภาพที่ 72 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

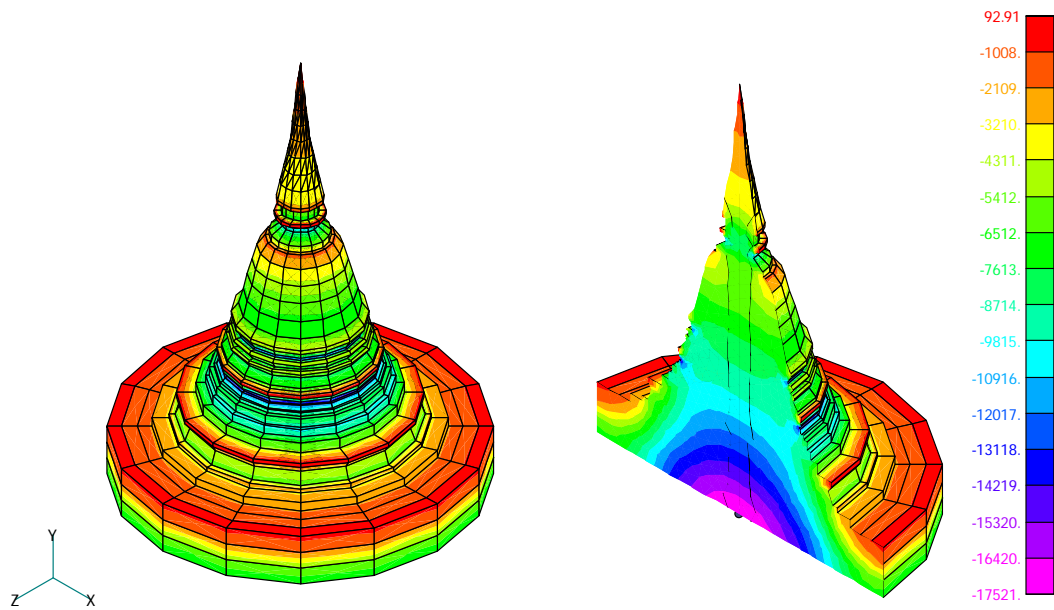
2.2 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ซึ่งมีความสูงขนาดปานกลาง

ตารางที่ 8 หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

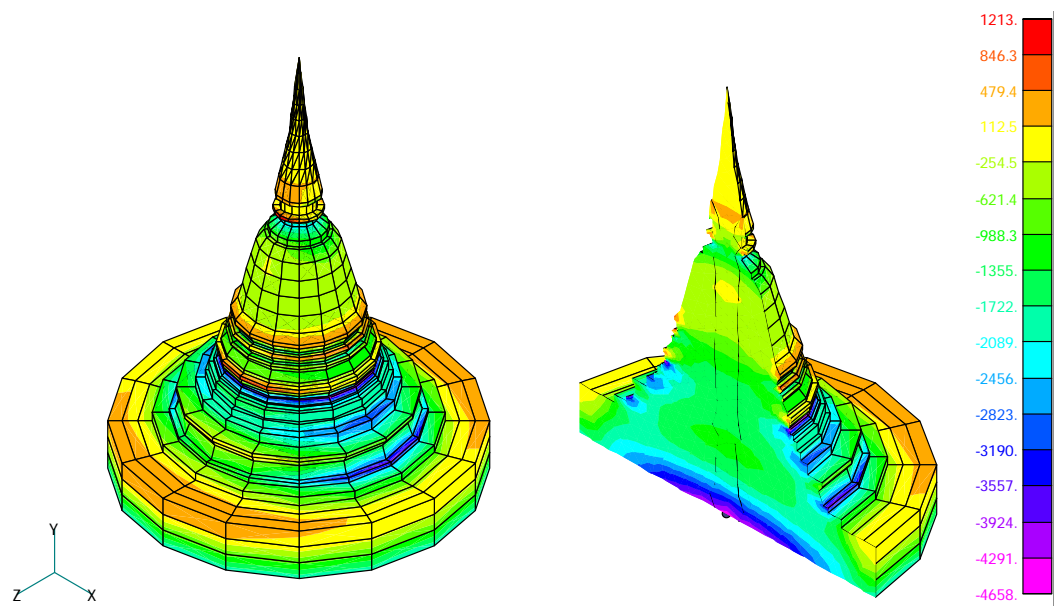
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-1.6265	0.0016
บริเวณเรือนธาตุ	-1.6751	0.0092
บริเวณรอบฐาน	-0.7526	-
กึ่งกลางฐาน	-1.7521	-

ตารางที่ 9 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.3904	0.1194
บริเวณเรือนธาตุ	-0.2369	0.0894
บริเวณรอบฐาน	-0.1863	0.044
กึ่งกลางฐาน	-0.4657	-



ภาพที่ 73 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ



ภาพที่ 74 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

2.3 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ ซึ่งมีขนาดความสูงน้อยที่สุด

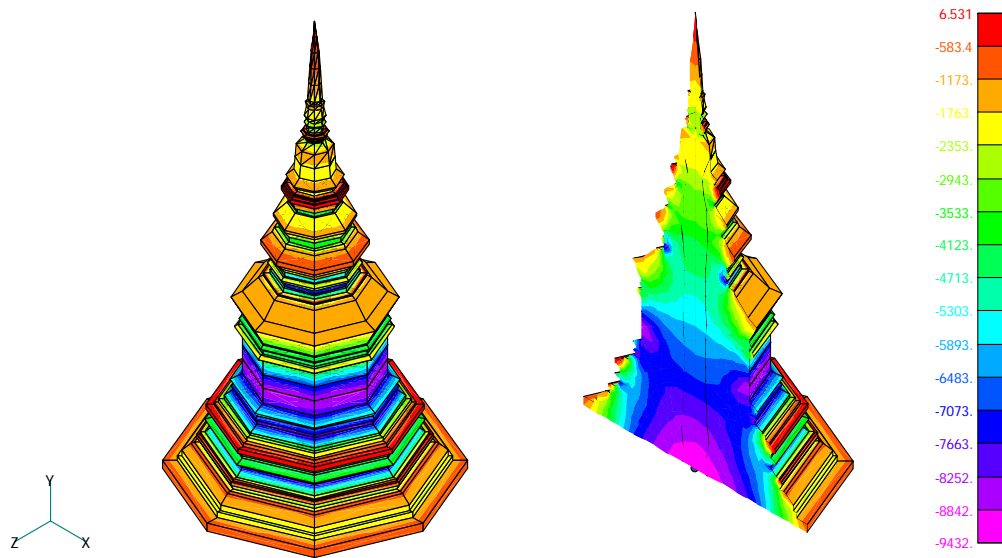
ตารางที่ 10 หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงดึง (kg/cm <sup>2</sup> )
บริเวณปล้องไฉน	-0.5366	-
บริเวณเรือนธาตุ	-1.1041	-
บริเวณรอบฐาน	-1.1213	-
กึ่งกลางฐาน	-0.9432	-

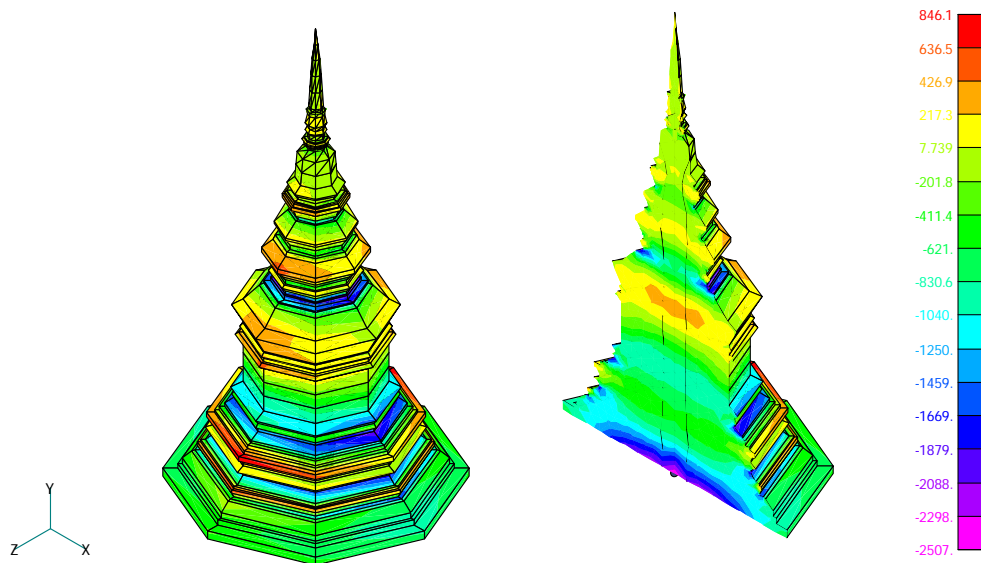
ตารางที่ 11 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงดึง (kg/cm <sup>2</sup> )
บริเวณปล้องไฉน	-0.1012	0.0264
บริเวณเรือนธาตุ	-0.2396	0.069
บริเวณรอบฐาน	-0.2019	0.0818
กึ่งกลางฐาน	-0.2507	-





ภาพที่ 75 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิติ  
วัดพระธาตุจอมกิติ



ภาพที่ 76 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้น้ำหนักตัวเองของพระธาตุจอมกิติ  
วัดพระธาตุจอมกิติ

### 3. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์เนื่องจากแผ่นดินไหว

ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวนี้ จะทำการแบ่งผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์เนื่องจากแผ่นดินไหวเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) และกรณีที่ 2 โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว El Centro

**กรณีที่ 1** โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเชียงใหม่ (CMMT) ผลการวิเคราะห์ของทั้ง 3 องค์เจดีย์ แสดงดังต่อไปนี้

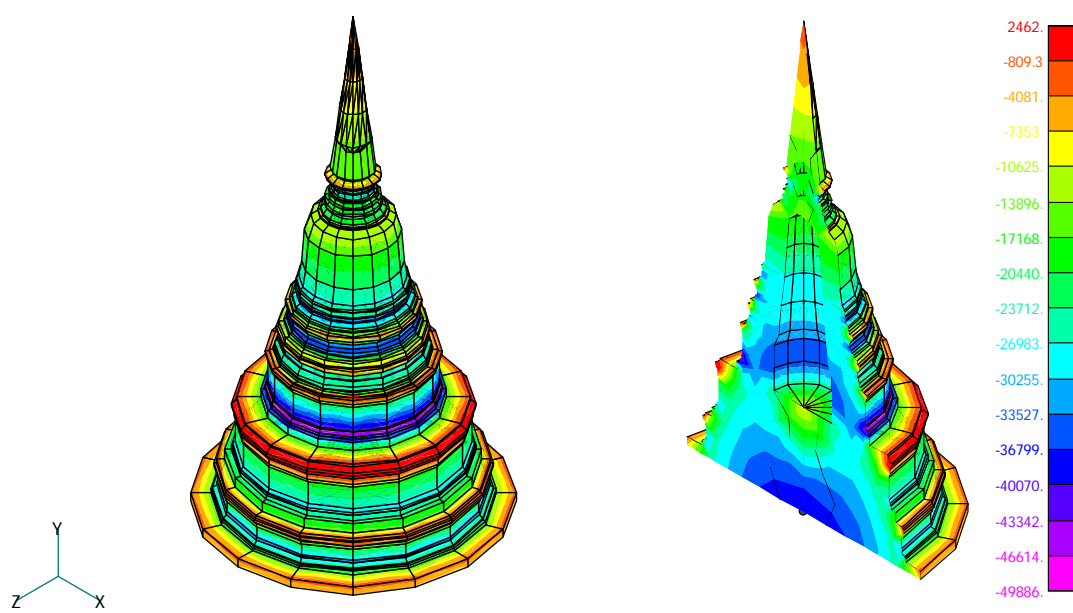
3.1 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

**ตารางที่ 12** หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

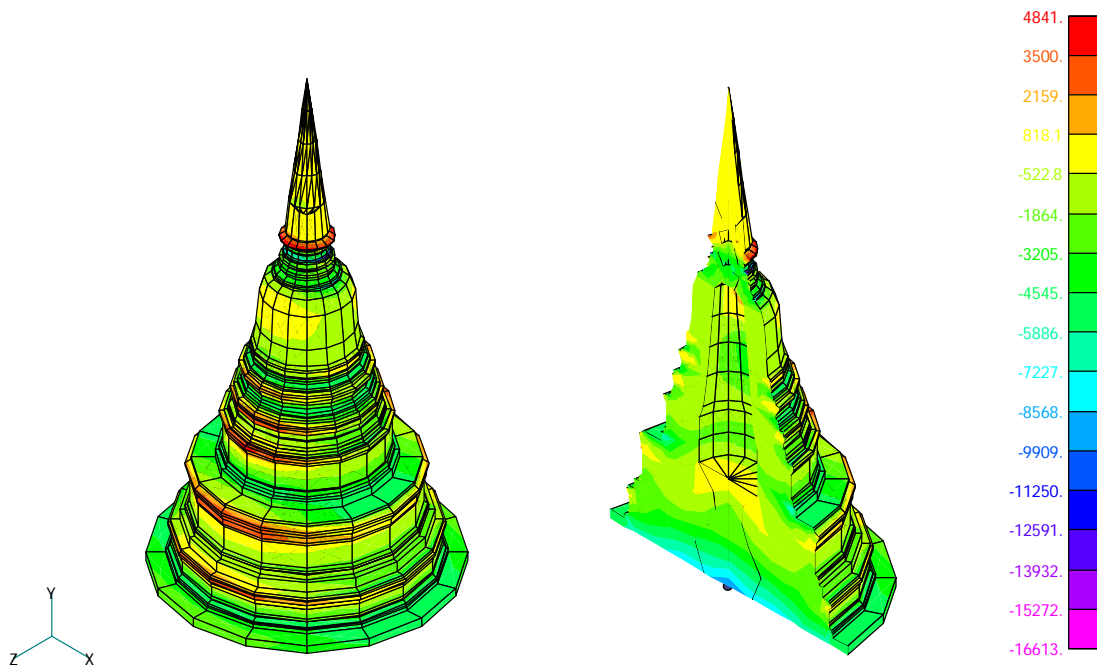
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-4.0613	0.2462
บริเวณเรือนธาตุ	-4.9886	-
บริเวณรอบฐาน	-3.3342	0.2801
กึ่งกลางฐาน	-3.9919	-

**ตารางที่ 13** หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-1.6613	0.4841
บริเวณเรือนธาตุ	-0.603	0.4607
บริเวณรอบฐาน	-0.6453	0.3608
กึ่งกลางฐาน	-1.0611	-



ภาพที่ 77 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล



ภาพที่ 78 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

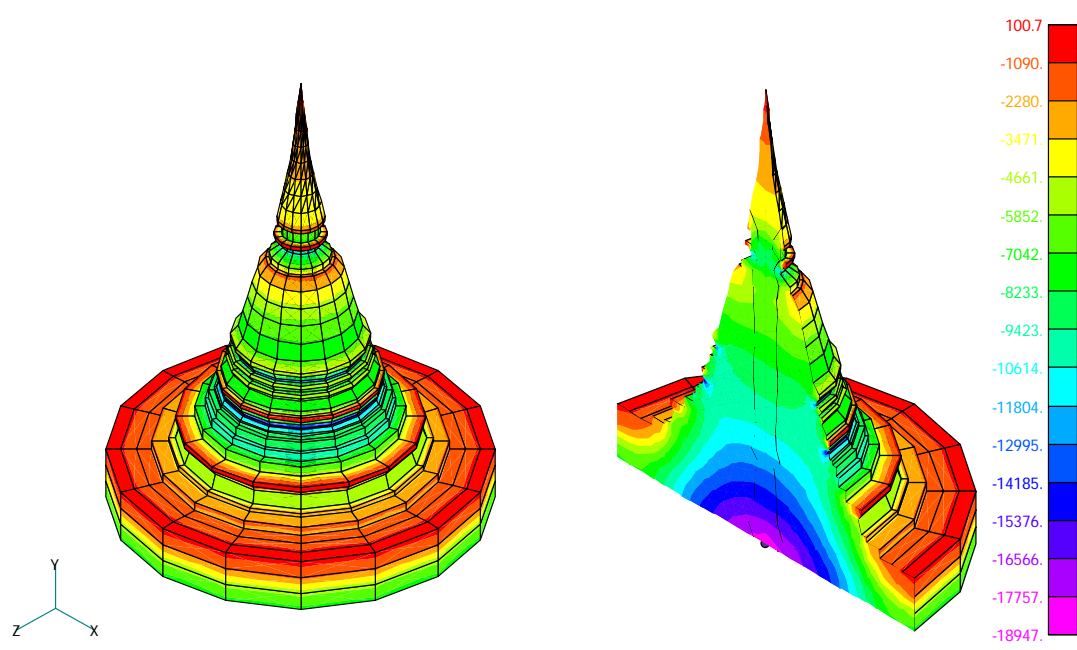
3.2 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตารางที่ 14 หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

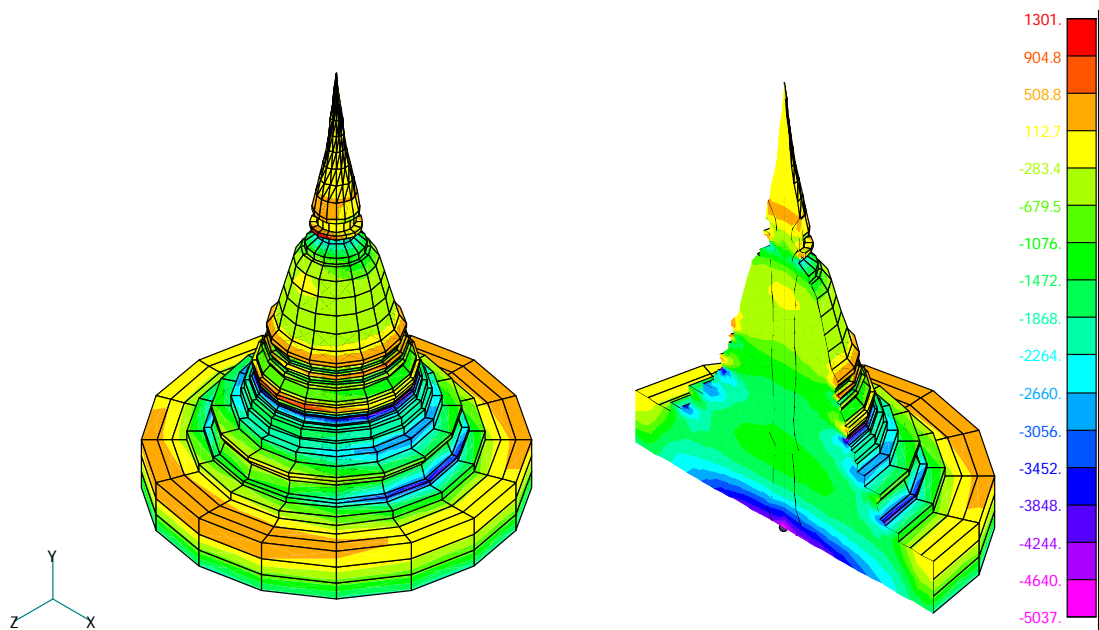
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-1.806	0.013
บริเวณเรือนธาตุ	-1.7468	0.011
บริเวณรอบฐาน	-0.7608	-
กึ่งกลางฐาน	-1.8947	-

ตารางที่ 15 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.4361	0.1301
บริเวณเรือนธาตุ	-0.5037	0.0957
บริเวณรอบฐาน	-0.4326	0.046
กึ่งกลางฐาน	-0.5028	-



ภาพที่ 79 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ



ภาพที่ 80 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

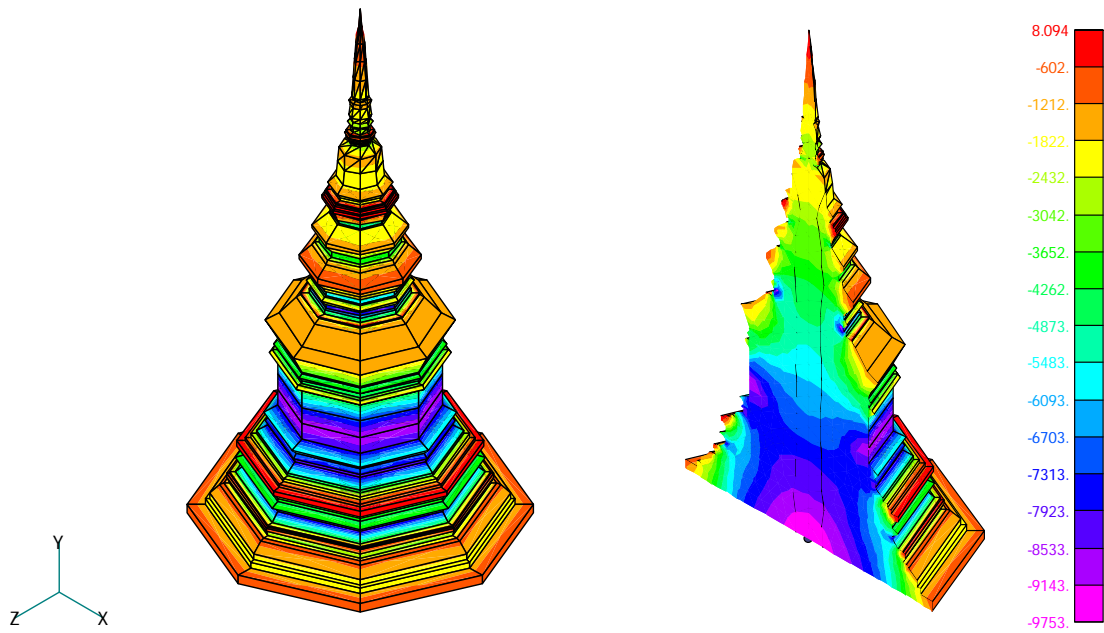
3.3 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

ตารางที่ 16 หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

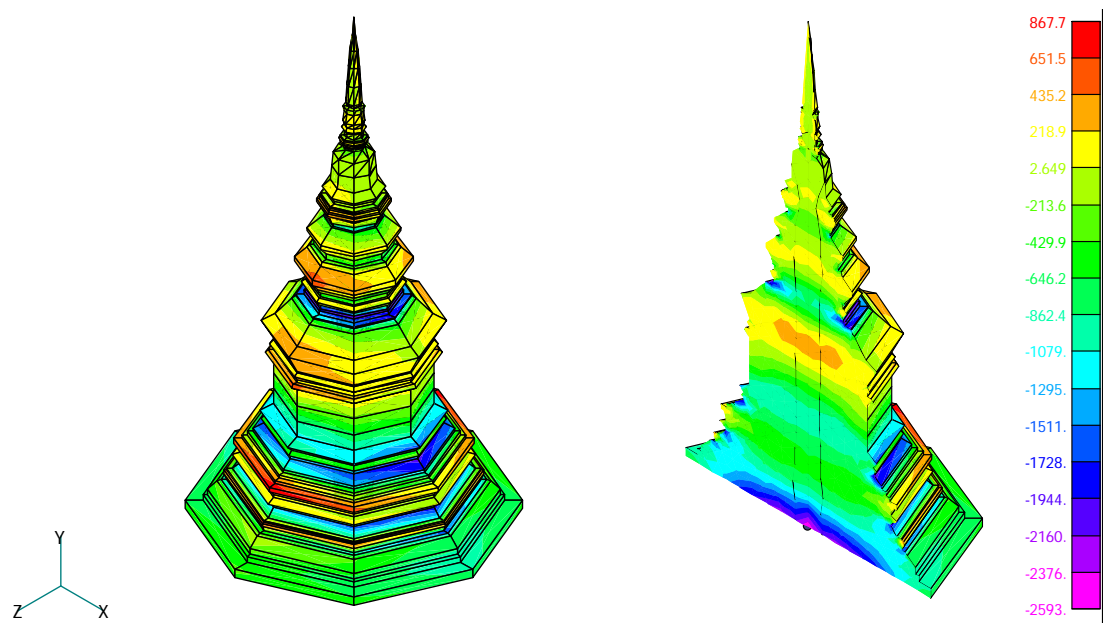
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.6112	-
บริเวณเรือนธาตุ	-1.1466	-
บริเวณรอบฐาน	-1.1508	-
กึ่งกลางฐาน	-0.9753	-

ตารางที่ 17 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของ  
พระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.1141	0.0472
บริเวณเรือนธาตุ	-0.2283	0.0738
บริเวณรอบฐาน	-0.2472	0.085
กึ่งกลางฐาน	-0.2592	-



ภาพที่ 81 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ



ภาพที่ 82 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จัน (CMMT) ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

**กรณีที่ 2** ผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของทั้ง 3 องค์เจดีย์ แสดงดังต่อไปนี้

3.4 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

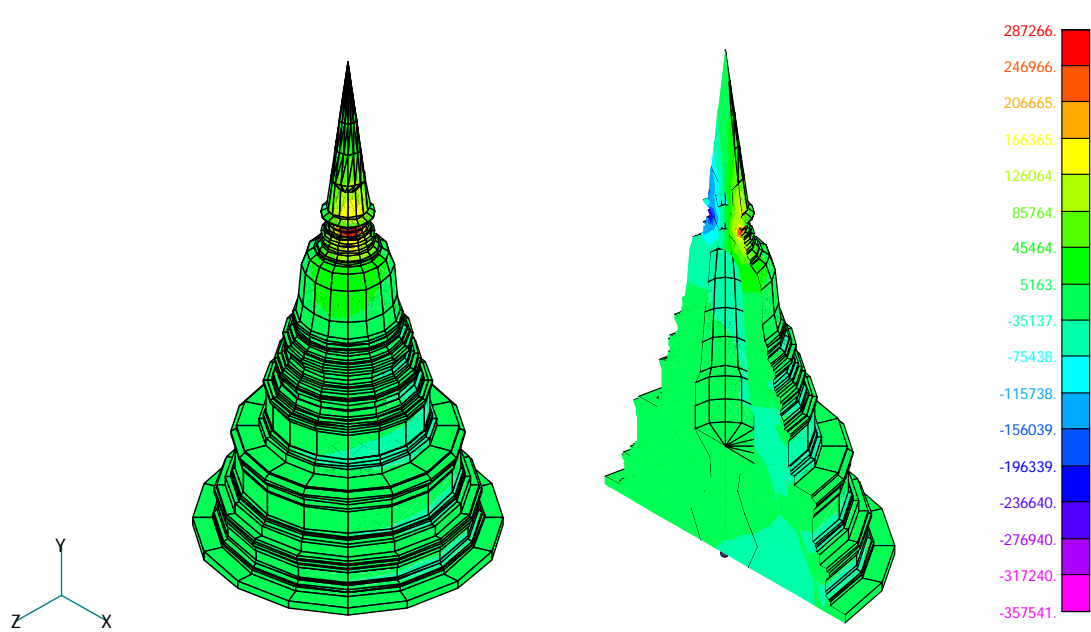
**ตารางที่ 18** หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-35.7541	28.7266
บริเวณเรือนธาตุ	-8.2697	2.5525
บริเวณรอบฐาน	-5.0544	0.5210
กึ่งกลางฐาน	-4.0492	-

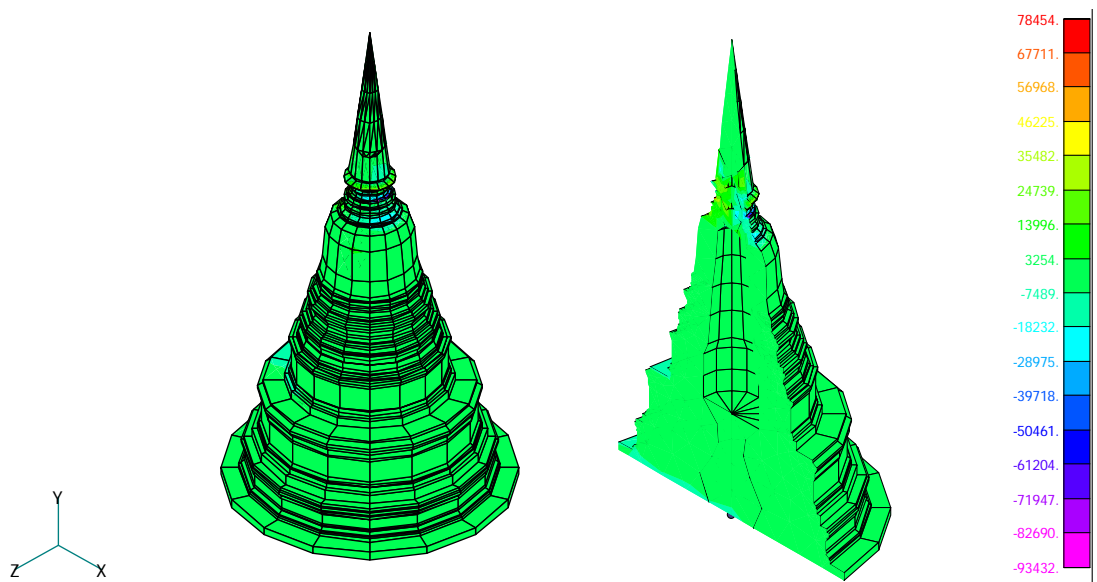
**ตารางที่ 19** หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-9.3432	7.8454
บริเวณเรือนธาตุ	-5.0351	0.9983
บริเวณรอบฐาน	-0.9084	0.674
กึ่งกลางฐาน	-1.0763	-





ภาพที่ 83 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน  
วัดใหญ่ชัยมงคล



ภาพที่ 84 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน  
วัดใหญ่ชัยมงคล

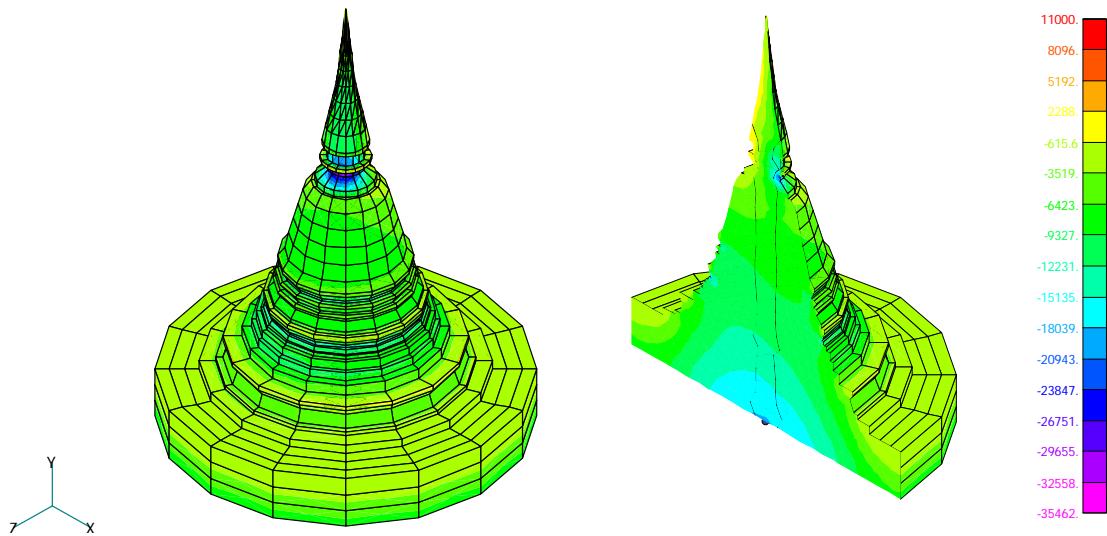
### 3.5 หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

**ตารางที่ 20** หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

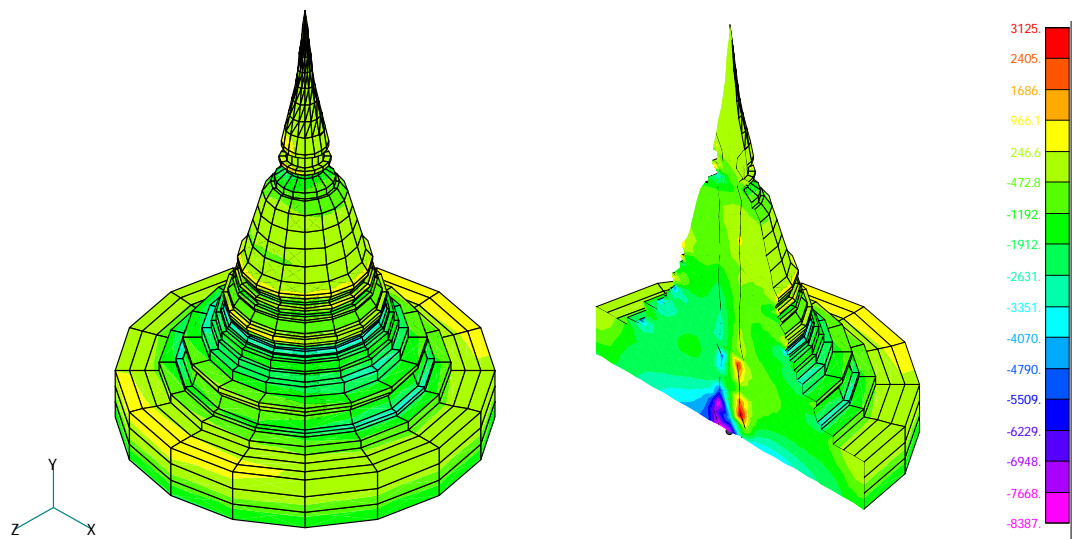
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงดึง (kg/cm <sup>2</sup> )
บริเวณปล้องไฉน	-3.5462	1.1000
บริเวณเรือนธาตุ	-2.1242	0.2286
บริเวณรอบฐาน	-0.8176	-
กึ่งกลางฐาน	-3.0395	-

**ตารางที่ 21** หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	หน่วยแรงดึง (kg/cm <sup>2</sup> )
บริเวณปล้องไฉน	-0.8387	0.3125
บริเวณเรือนธาตุ	-0.4172	0.1723
บริเวณรอบฐาน	-0.2109	0.0575
กึ่งกลางฐาน	-0.8079	-



ภาพที่ 85 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหวที่ El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ



ภาพที่ 86 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

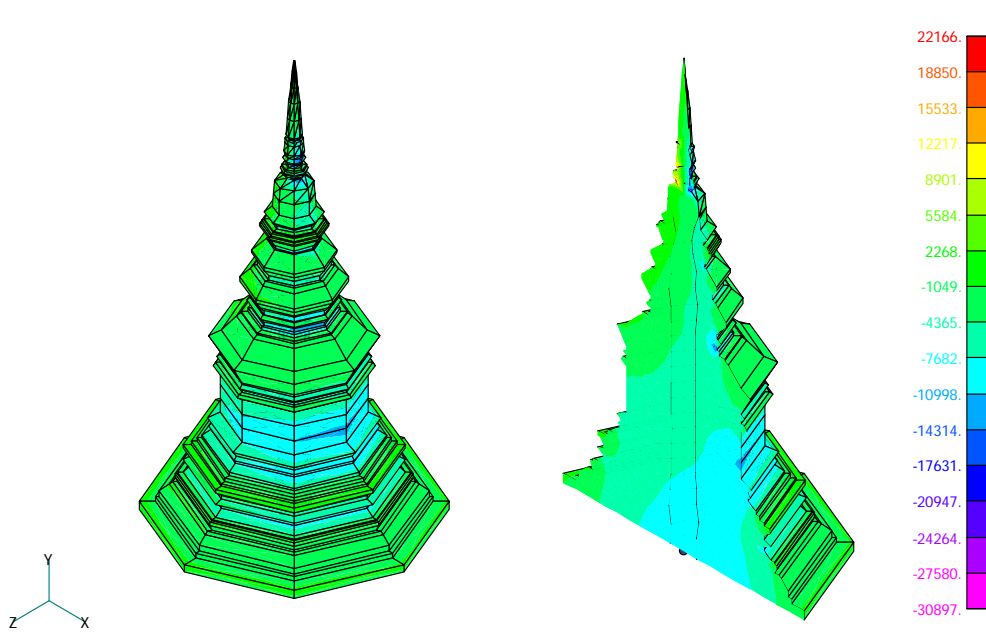
3.6 หน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

ตารางที่ 22 หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

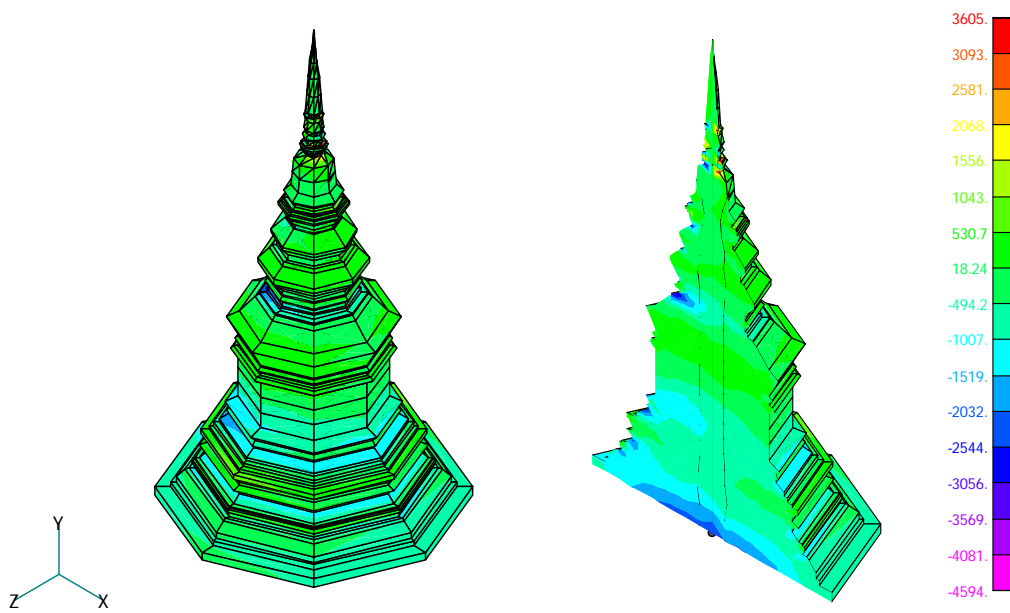
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-3.0897	2.2166
บริเวณเรือนธาตุ	-1.8672	0.0062
บริเวณรอบฐาน	-1.3712	-
กึ่งกลางฐาน	-1.1301	-

ตารางที่ 23 หน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	หน่วยแรงดึง ( $\text{kg/cm}^2$ )
บริเวณปล้องไฉน	-0.4594	0.3605
บริเวณเรือนธาตุ	-0.3503	0.1114
บริเวณรอบฐาน	-0.2538	0.1069
กึ่งกลางฐาน	-0.3004	-



ภาพที่ 87 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวตั้งภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ



ภาพที่ 88 แผนภูมิแสดงค่าหน่วยแรงในแนวราบภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ของพระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ

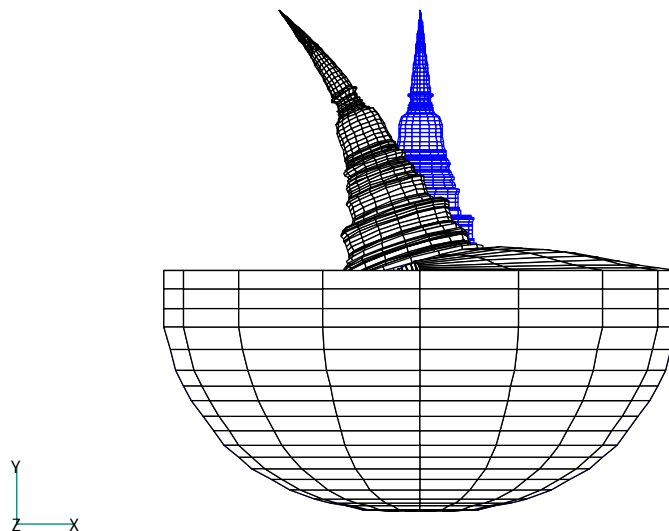
#### 4. ผลการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพโครงสร้างจริง

เมื่อพิจารณาถึงผลการตรวจวัดจริงและการวิเคราะห์แบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบที่ 1 เท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์ และ 2.9843 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดประมาณ 86.5 % อาจเป็นผลเนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองจะพิจารณาเพียงโครงสร้างอย่างเดียวโดยบริเวณฐานรองรับของโครงสร้าง กำหนดให้เป็นแบบยึดแน่น (fixed support) ซึ่งในความเป็นจริงพื้นที่รองรับบริเวณใต้ฐาน โครงสร้างเป็นชั้นดิน จึงอาจทำให้โครงสร้างแบบจำลองมีสภาพต่างจากสถานที่จริงมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการปรับแก้แบบจำลองโดยคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากชั้นดิน

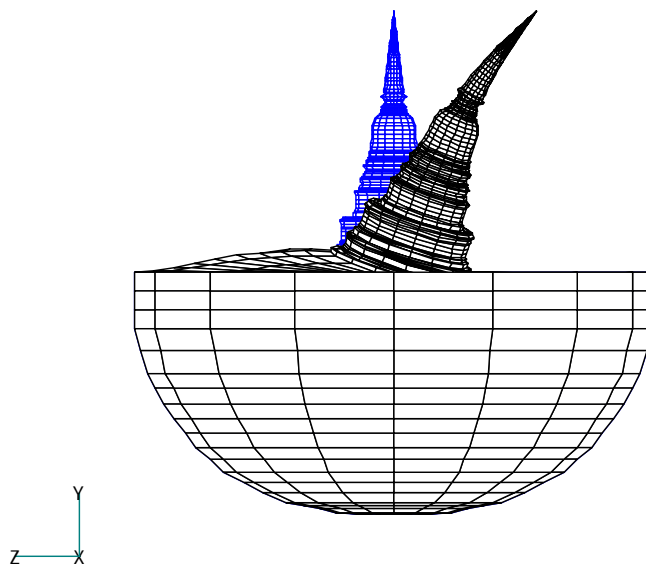
เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่เพิ่มชั้นดินใต้ฐานรากของโครงสร้างเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ลึกลงไปเป็นระยะประมาณ 60 เมตร พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และรูปแบบการสั่นไหว (Mode Shapes) 10 รูปแบบแรก ได้แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 24 รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน

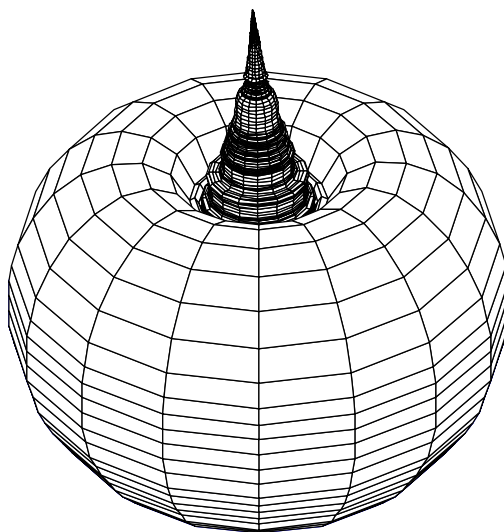
รูปแบบการสั่นไหว	ค่าความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 combination mode	1.2289
2 combination mode	1.2292
3 soil mode	1.3863
4 combination mode	1.4658
5 combination mode	1.5010
6 combination mode	1.5011
7 soil mode	1.5928
8 soil mode	1.5936
9 combination mode	1.7569
10 combination mode	1.8050



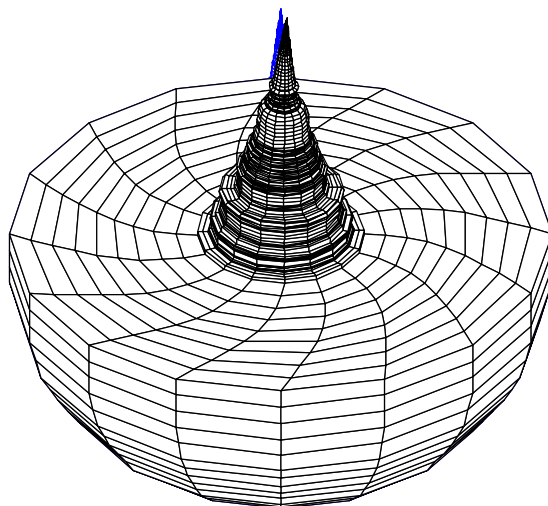
ภาพที่ 89 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.2289 เฮิรตซ์



ภาพที่ 90 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.2292 เฮิรตซ์

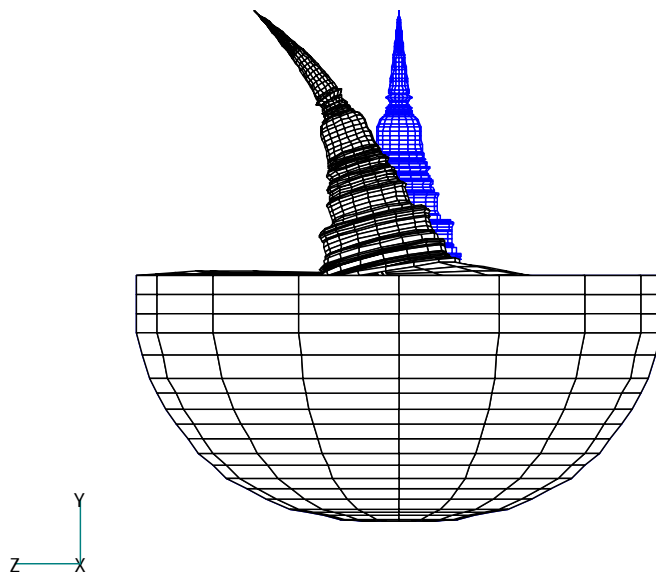


ภาพที่ 91 รูปแบบการสั้นไหวที่ 3 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.3863 เฮิรตซ์

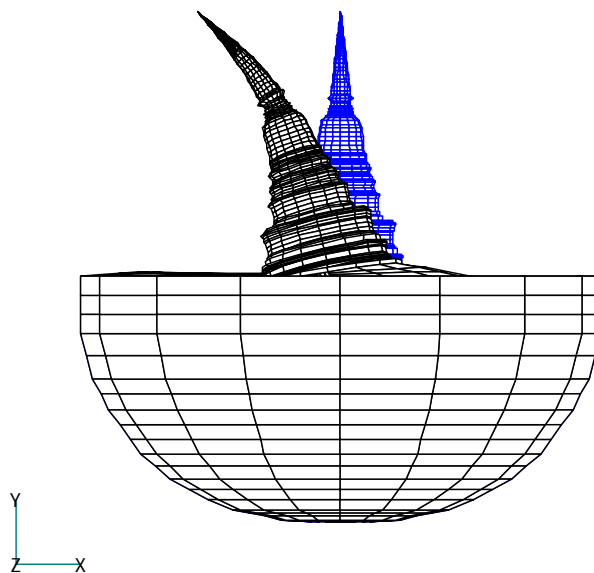


ภาพที่ 92 รูปแบบการสั้นไหวที่ 4 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.4658 เฮิรตซ์

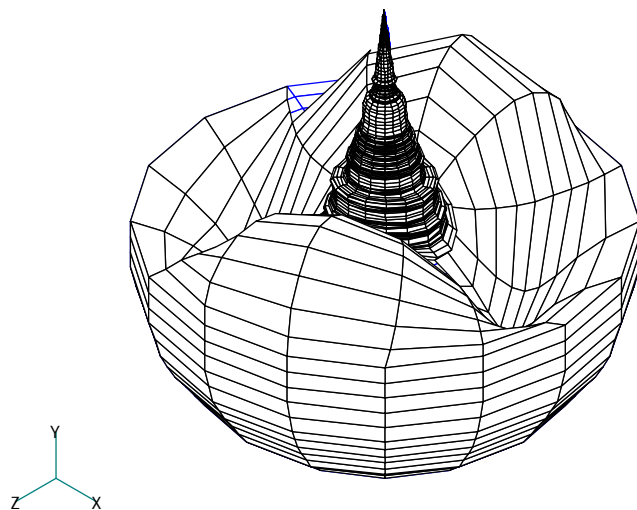




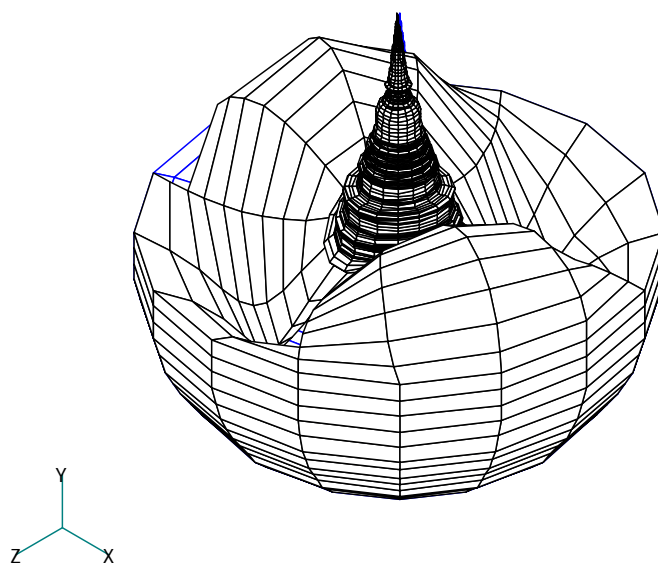
ภาพที่ 93 รูปแบบการสั่นไหวที่ 5 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5010 เฮิรตซ์



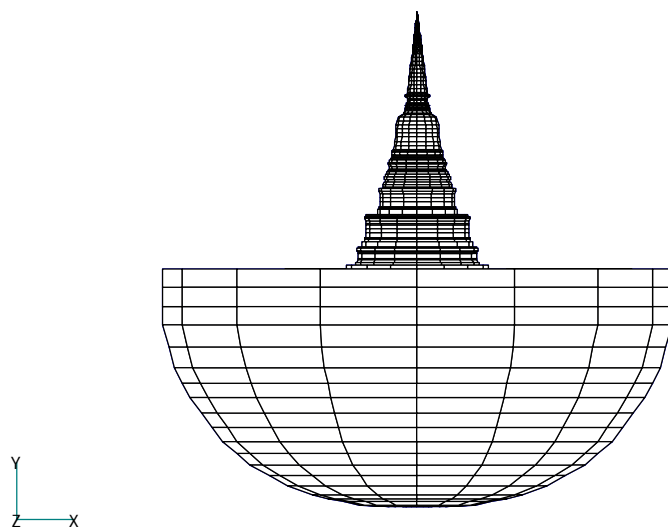
ภาพที่ 94 รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5011 เฮิรตซ์



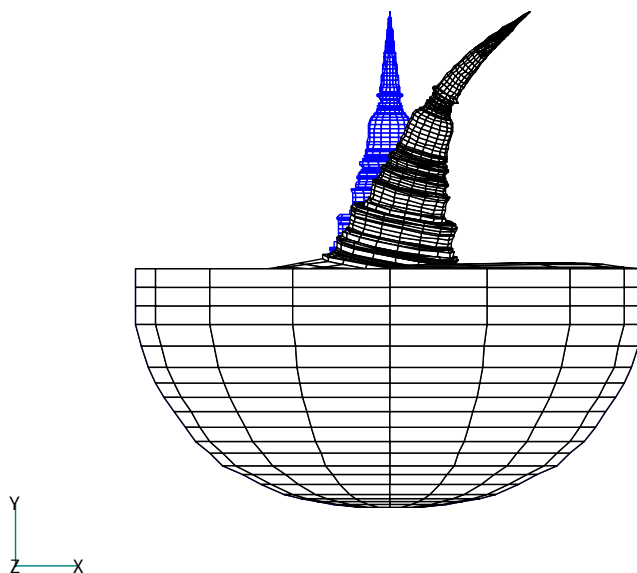
ภาพที่ 95 รูปแบบการสั้นไหวที่ 7 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5928 เฮิรตซ์



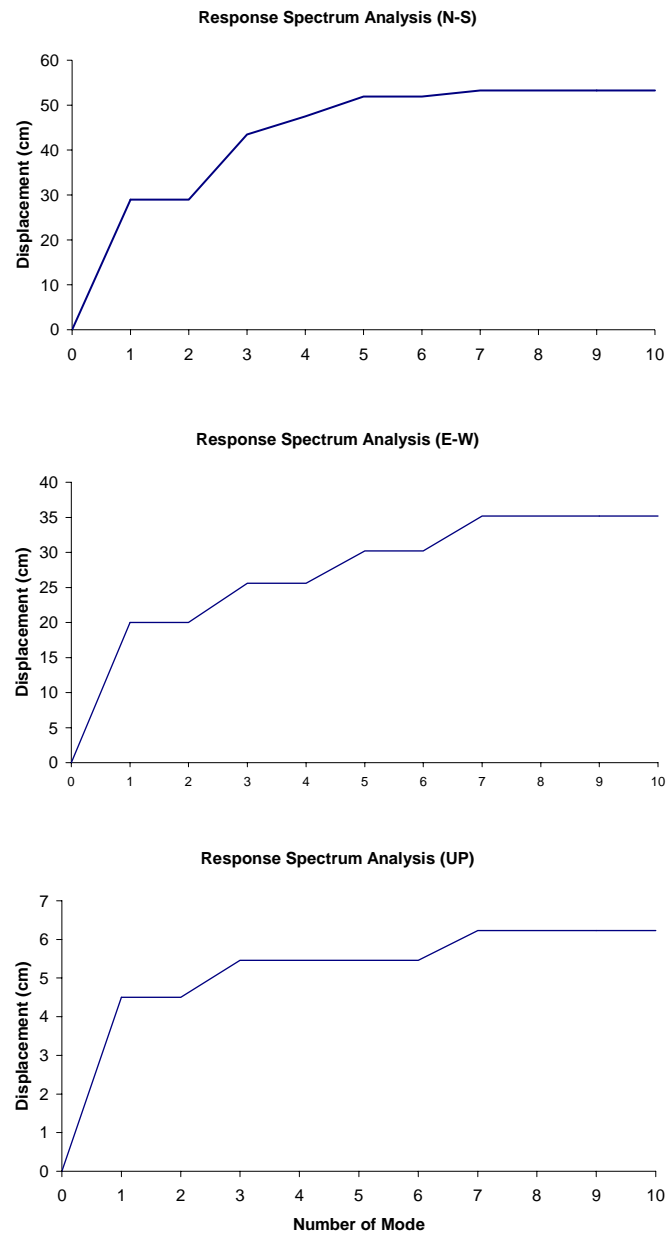
ภาพที่ 96 รูปแบบการสั้นไหวที่ 8 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.5936 เฮิรตซ์



ภาพที่ 97 รูปแบบการสั่นไหวที่ 9 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.7569 เฮิรตซ์



ภาพที่ 98 รูปแบบการสั่นไหวที่ 10 ของแบบจำลองที่เพิ่มชั้นดิน ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1.8050 เฮิรตซ์



**ภาพที่ 99** กราฟแสดงค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแบบจำลอง ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนอง

จากภาพที่ 99 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของตำแหน่งยอดเจ็ลย์ ซึ่งวิเคราะห์จากวิธีสเปกตรัมการตอบสนอง (the response spectrum analysis) ทั้ง 3 แกน คือ แกนเหนือ-ใต้ แกนตะวันออก-ตะวันตก และ แกนตั้ง โดยแกนแนวตั้งของกราฟ คือค่าการเคลื่อนที่ ซึ่งหามาจากวิธีรากที่สองของผลรวมของผลตอบตอบสนองของแบบจำลองกำลังสอง (The square root of the sum of the squares of the modal response) และแกนแนวนอนคือจำนวนของรูปแบบ (number of mode)

## วิจารณ์

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการจำลองแบบจำลองโครงสร้างองค์เจดีย์อิฐก่อทรงระฆังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดเงื่อนไขพิจารณาองค์เจดีย์ที่ระดับความสูงต่างกัน 3 ระดับ คือ องค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงมาก สูงปานกลาง และสูงน้อย เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของโครงสร้างองค์เจดีย์ และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเนื่องจากความสูงที่ต่างกันขององค์เจดีย์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคตและสามารถใช้เป็นพื้นฐานหรือข้อมูลเบื้องต้นในการบูรณะโบราณสถานต่อไป

### 1. การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังทั้ง 3 องค์เจดีย์ คือ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ซึ่ง สูงประมาณ 62.10 เมตร เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ สูงประมาณ 26 เมตร และพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติซึ่ง โดยมีความสูงประมาณ 16 เมตร พบว่า

เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล มีความสูงมากที่สุด มีรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 2.9843 เฮิรตซ์ และมีค่าคาบธรรมชาติเริ่มตั้งแต่ 0.3351 วินาที จนถึง 0.0863 วินาที

เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ มีความสูงปานกลาง รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 7.8649 เฮิรตซ์ และมีค่าคาบธรรมชาติเริ่มตั้งแต่ 0.1271 วินาที จนถึง 0.0349 วินาที

และพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ มีความสูงน้อยที่สุด รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 12.2062 เฮิรตซ์ และมีค่าคาบธรรมชาติเริ่มตั้งแต่ 0.0891 วินาที จนถึง 0.0195 วินาที

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าขนาดความสูงของโครงสร้างองค์เจดีย์มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ คือ เมื่อโครงสร้างเจดีย์มีความสูงมากขึ้น น้ำหนักของโครงสร้างก็มากขึ้นด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติลดลง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติธรรมชาติของระบบคาบธรรมชาติและความถี่ธรรมชาติ จะขึ้นอยู่กับมวลและสติเฟเนส ของระบบนั้นๆ

## 2. การวิเคราะห์หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างภายใต้น้ำหนักตัวเอง

จากการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังภายใต้น้ำหนักตัวเอง ทั้ง 3 องค์เจดีย์ สรุปได้ดังนี้

2.1 เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ  $3.3630 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 11.89 และมีหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน มีค่าเท่ากับ  $0.1651 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 23.02 ซึ่งหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกิดจากการดึงรั้งด้านนอกเนื่องจากการยุบตัวเนื่องจากน้ำหนักส่วนกลางองค์เจดีย์ สำหรับหน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ  $0.9053 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 44.18 และมีหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ  $0.3966 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 9.59

2.2 เจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ  $1.7521 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 22.83 และมีหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณเรือนธาตุ มีค่าเท่ากับ  $0.0092 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 35.92 ซึ่งหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเกิดจากการดึงรั้งด้านนอกเนื่องจากการยุบตัวเนื่องจากน้ำหนักส่วนกลางองค์เจดีย์ สำหรับหน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ  $0.4657 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 85.89 และมีหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ  $0.1194 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 31.83

2.3 พระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์เกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน มีค่าเท่ากับ  $1.1213 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 35.67 ไม่เกิดหน่วยแรงดึงในแนวตั้ง สำหรับหน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ  $0.2507 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 159.55 และมีหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน มีค่าเท่ากับ  $0.0818 \text{ กก/ซม}^2$  อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 46.45

### 3.การวิเคราะห์หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว

ตารางที่ 25 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	El Centro		CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	-0.7906	-4.0613	-35.754	-	0.2462	28.7266
บริเวณเรือนธาตุ	-2.5952	-4.9886	-8.2697	-	-	2.5525
บริเวณรอบฐาน	-2.9571	-3.3342	-5.0544	0.1651	0.2801	0.5210
กึ่งกลางฐาน	-3.4540	-3.9919	-4.0492	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณเรือนธาตุ มีค่าเท่ากับ 4.9886 กก./ชม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 8.02 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.7818 กก./ชม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 4.65

สำหรับหน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 35.7541 กก./ชม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 1.12 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุด เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 28.7266 กก./ชม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 0.13 ซึ่งมีค่าเกินกำลังรับแรงดึงประลัยที่ยอมให้

ตารางที่ 26 อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนัก  
องค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	413.70	4422.40	246.2	6368.50
บริเวณเรือนธาตุ	92.22	218.65	-	255.25
บริเวณรอบฐาน	12.75	70.92	69.65	847.27
กึ่งกลางฐาน	15.57	17.23	-	-

อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอย  
เลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น  
246.2 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 9.85 และอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึง  
สูงสุดในแนวดิ่งเกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน โดยเพิ่มขึ้น 409.27% เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่า  
เท่ากับ 13.57

อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวดิ่งภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เทียบ  
กับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 4422.40 % เมื่อ  
คิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.12 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดใน  
แนวดิ่งเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 6368.50 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ  
0.13



ตารางที่ 27 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	El Centro		CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	-0.233	-1.6613	-9.3432	0.3966	0.4841	7.8454
บริเวณเรือนธาตุ	-0.4314	-0.603	-5.0351	0.3400	0.4607	0.9983
บริเวณรอบฐาน	-0.6085	-0.6453	-0.9084	0.2207	0.3608	0.674
กึ่งกลางฐาน	-0.9053	-1.0611	-1.0763	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 1.6613 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 24.08 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.4841 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 7.85

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 9.3432 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 4.28 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 7.8454 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 0.48 ซึ่งมีค่าเกินกำลังรับแรงดึงประลัยที่ยอมรับได้

ตารางที่ 28 อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับ  
น้ำหนักองค์เจดีย์ เจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	613.00	3909.96	22.06	1878.16
บริเวณเรือนธาตุ	39.78	1067.15	32.88	187.94
บริเวณรอบฐาน	6.05	49.29	63.48	205.39
กึ่งกลางฐาน	15.58	17.23	-	-

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 613 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 24.08 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 22.06 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 7.85

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เทียบกับหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 3909.36 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 4.28 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 1878.16 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 0.48 มีค่าเกินกำลังรับแรงดึงประลัยที่ยอมรับให้

ตารางที่ 29 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	El Centro		CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	-1.6265	-1.806	-3.5462	0.0016	0.013	1.1000
บริเวณเรือนธาตุ	-1.6751	-1.7468	-2.1242	0.0092	0.011	0.2286
บริเวณรอบฐาน	-0.7526	-0.7608	-0.8176	-	-	-
กึ่งกลางฐาน	-1.7521	-1.8914	-3.0395	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ 1.8914 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 21.15 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.0130 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 292.31

หน่วยแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 3.5462 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 11.28 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณเรือนธาตุ มีค่าเท่ากับ 0.2286 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 16.62

ตารางที่ 30 อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	11.04	118.03	712.50	9382.76
บริเวณเรือนธาตุ	4.28	26.81	19.56	116.07
บริเวณรอบฐาน	1.09	8.64	-	-
กึ่งกลางฐาน	7.95	73.48	-	-

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 11.04 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 22.15 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวตั้งเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 712.5 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 292.31

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แรงแผ่นดินไหว E1 Centro เทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 118.03 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 11.28 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวตั้งเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 9382.76 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 3.45

**ตารางที่ 31** สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนักองค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนักองค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	E1 Centro		CMMT	E1 Centro
บริเวณปล้องไฉน	-0.3904	-0.4361	-0.8387	0.1194	0.1301	0.3125
บริเวณเรือนธาตุ	-0.2369	-0.5037	-0.4172	0.0894	0.0957	0.1723
บริเวณรอบฐาน	-0.1863	-0.4326	-0.2109	0.044	0.046	0.0575
กึ่งกลางฐาน	-0.4657	-0.5028	-0.8079	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณเรือนธาตุ มีค่าเท่ากับ 0.5037 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 97.41 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.1301 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 29.21

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.8387 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 47.69 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.3125 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 12.16

**ตารางที่ 32** อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับ น้ำหนักองค์เจดีย์ ของเจดีย์ประธาน วัดจักรวรรดิ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	11.71	114.83	8.96	161.73
บริเวณเรือนธาตุ	112.62	76.11	7.05	92.73
บริเวณรอบฐาน	132.21	13.20	4.55	30.68
กึ่งกลางฐาน	7.97	73.48	-	-

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่ บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้ น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน โดยเพิ่มขึ้น 132.21% เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 92.46 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของ หน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 8.96 % เมื่อคิดอัตราส่วน ความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 29.21

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้ น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 114.83 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 47.69 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึง สูงสุดในแนวราบเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 161.73 % เมื่อคิดอัตราส่วน ความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 12.16

ตารางที่ 33 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นต่อพระราชอุโมงค์กิติ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และ ภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนัก องค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	El Centro		CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	-0.5366	-0.6112	-3.0897	-	-	2.2166
บริเวณเรือนธาตุ	-1.1041	-1.1466	-1.8672	-	-	0.0062
บริเวณรอบฐาน	-1.1213	-1.1508	-1.3712	-	-	-
กึ่งกลางฐาน	-0.9432	-0.9753	-1.1301	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวดิ่งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน มีค่าเท่ากับ 1.1508 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 34.76 แต่ไม่เกิดหน่วยแรงดึงในแนวดิ่ง

หน่วยแรงอัดในแนวดิ่งสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 3.0897 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 12.95 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวดิ่งสูงสุด เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 2.2166 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 1.714

ตารางที่ 34 อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับน้ำหนักองค์เจดีย์ ของพระราชอุโมงค์กิติ วัดพระราชอุโมงค์กิติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	13.90	475.79	-	221
บริเวณเรือนธาตุ	3.85	69.12	-	0.6
บริเวณรอบฐาน	2.63	22.29	-	-
กึ่งกลางฐาน	3.40	19.82	-	-

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 13.9% เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 65.45

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวตั้งภายใต้แรงแผ่นดินไหว EI Centro เทียบกับหน่วยแรงสูงสุดภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 475.79 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 10.89 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 221 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.714

ตารางที่ 35 สรุปค่าหน่วยแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นต่อพระราชอุคมกิตติ ภายใต้น้ำหนักตัวเอง และภายใต้แผ่นดินไหวทั้ง 2 เหตุการณ์

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )			หน่วยแรงดึงเนื่องจาก (kg/cm <sup>2</sup> )		
	น้ำหนักองค์เจดีย์	แผ่นดินไหว		น้ำหนักองค์เจดีย์	แผ่นดินไหว	
		CMMT	El Centro		CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	-0.1012	-0.1141	-0.4594	0.0264	0.0472	0.3605
บริเวณเรือนธาตุ	-0.2396	-0.2283	-3.5039	0.069	0.0738	0.1114
บริเวณรอบฐาน	-0.2019	-0.2472	-0.2538	0.0818	0.085	0.1069
กึ่งกลางฐาน	-0.2507	-0.2592	-0.3004	-	-	-

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางฐาน มีค่าเท่ากับ 0.2592 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 154.32 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณรอบฐาน มีค่าเท่ากับ 0.085 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 44.71

หน่วยแรงอัดในแนวราบสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว EI Centro เกิดขึ้นบริเวณเรือนธาตุ มีค่าเท่ากับ 3.5039 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 11.42 ส่วนหน่วยแรงดึงในแนวราบสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน มีค่าเท่ากับ 0.3605 กก./ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 10.54

ตารางที่ 36 อัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบเนื่องจากแผ่นดินไหวเทียบกับ  
น้ำหนักองค์เจดีย์ ของพระธาตุจอมกิติ วัดพระธาตุจอมกิติ

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัด (%)		หน่วยแรงดึง (%)	
	CMMT	El Centro	CMMT	El Centro
บริเวณปล้องไฉน	12.75	353.95	78.79	1265.53
บริเวณเรือนธาตุ	-4.72	1362.40	6.96	61.45
บริเวณรอบฐาน	22.44	25.71	-	-
กึ่งกลางฐาน	3.39	19.82	-	-

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเทียบกับหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 22.44 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 161.81 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 78.79 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 80.51

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวราบภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่ El Centro เทียบกับหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 1362.4 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 11.42 ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบ เกิดขึ้นบริเวณปล้องไฉน โดยเพิ่มขึ้น 1265.53 % เมื่อคิดอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 10.54



#### 4. ผลการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่ได้รวมเพิ่มขึ้นดินใต้ฐาน โครงสร้างพบว่า มีค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 1 เท่ากับ 2.9843 เฮิรตซ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 1 ที่ได้จากการตรวจวัดจริงมีเท่ากับ 1.6 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัด พบว่ามีค่าต่างกันถึง 86.5% ดังนั้นจึงทำการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์โดยคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากชั้นดิน โดยทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างโดยสร้างชั้นดินใต้ฐานเพิ่ม ผลจากการปรับแก้แบบจำลองโดยเพิ่มขึ้นดินใต้ฐานรากของโครงสร้างเจดีย์ประธาน วัดใหญ่ชัยมงคล พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.2289 เฮิรตซ์ ซึ่งลดลงจากการ โครงสร้างแบบจำลองที่ไม่รวมชั้นดินถึงประมาณ 58.8 % และเมื่อพิจารณาค่าความถี่ธรรมชาติรูปแบบที่ 1 ที่ได้จากการตรวจวัดจริงซึ่งเป็นตัวชี้วัด พบว่าการสร้างแบบจำลองโดยการรวมชั้นดินเข้ากับโครงสร้างเจดีย์ ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติซึ่ง ต่างจากการตรวจวัดจริงลดลงจาก 86.5% เป็น 23.2%

และจากการใช้วิธีสเปกตรัมผลตอบสนองในภาพที่ 99 พบว่า แผ่นดินไหว El Centro มีผลกระทบต่อโครงสร้างอย่างน้อยที่รูปแบบการสั่นไหวที่ 7 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการตรวจวัดจริงในภาพที่ 40 แล้วจะอยู่ในช่วงของยอด (peak) ความถี่ธรรมชาติกลุ่มที่ 1 มีค่าความถี่ธรรมชาติประมาณ 1.6 เฮิรตซ์ โดยค่าการเคลื่อนที่คงที่จนถึงรูปแบบที่ 10 ซึ่งอยู่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติกลุ่มที่ 2 มีค่าความถี่ธรรมชาติประมาณ 1.8 เฮิรตซ์ ซึ่งถ้าพิจารณาจากกราฟค่าตรวจวัดจริงและผลจากการใช้วิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง พบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติในช่วงความถี่ธรรมชาติกลุ่มที่ 3 น่าจะมีผลทำให้เกิดทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นในการวิเคราะห์โครงสร้างจำเป็นต้องใช้รูปแบบการสั่นไหวอย่างน้อยที่สุด 7 รูปแบบแรก

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. ผลจากการศึกษารูปแบบการสั่นไหวขององค์เจดีย์ทำให้สามารถทำนายรูปแบบของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างได้ เมื่อมีแรงพลศาสตร์ภายนอกที่มีค่าความถี่ใดๆ (ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10 รูปแบบ) มากระทำ

2. ขนาดความสูงของโครงสร้างองค์เจดีย์มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าผกผันกับขนาดความสูงของโครงสร้าง โดยค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลงเมื่อความสูงของโครงสร้างเจดีย์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความสูงในด้านการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างเจดีย์อัฐกู่ทรงระฆัง พบว่าความสูงจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการเกิดหน่วยแรง คือ องค์เจดีย์ที่มีความสูงมากขึ้นจะมีค่าหน่วยแรงที่มากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างเจดีย์ ดังนั้น โครงสร้างที่มีความสูงมากก็จะได้รับผลกระทบที่มากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างองค์เจดีย์ภายใต้แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว พบว่า องค์เจดีย์ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมากที่สุด คือประธานวัดใหญ่ชัยมงคลที่มีความสูงมากที่สุด สูง 66 เมตร และที่แผ่นดินไหว El Centro ซึ่งมีความรุนแรงมาก ส่งผลทำให้โครงสร้างองค์เจดีย์ขนาดสูงสุดเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเพียง 1.28 และ 4.28 ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่เกิดคือ บริเวณล่างสุดของปล้องไฉน

3. ภายใต้น้ำหนักตัวเองของแบบจำลองโครงสร้างเจดีย์อัฐกู่ทรงระฆังทั้ง 3 องค์เจดีย์ ซึ่งมีขนาดความสูงที่ต่างกัน 3 ระดับ คือองค์เจดีย์ที่มีขนาดความสูงมาก สูงปานกลาง และสูงน้อย พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นหน่วยแรงอัดและเมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงอัดสูงสุด พบว่ามีค่าไม่เกินค่ากำลังอัดประลัย สรุปได้ว่าแบบจำลองเจดีย์ทั้ง 3 องค์มีความปลอดภัยจากการวิบัติของอัฐกู่ และเมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าจะเกิดหน่วยแรงดึงที่มีค่าน้อย แต่อาจมีผลต่อผิวรอบนอกของโครงสร้างได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักให้เกิดการแตกร้าวและการหลุดร่อนของผิวรอบๆองค์เจดีย์ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดรอยแตกร้าวรอบๆองค์เจดีย์ โดยเฉพาะบริเวณส่วนยอดและบริเวณรอบๆฐาน ที่มีให้เห็นได้ทั่วไปในปัจจุบัน

4. เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังทั้ง 3 องค์ พบว่าตำแหน่งของการเกิดหน่วยแรงที่ควรพิจารณาอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมี 3 ตำแหน่ง คือ บริเวณล่างสุดของปล้องโฉน บริเวณรอบเรือนธาตุ และบริเวณรอบฐาน

5. เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยคำนึงถึงชั้นดินใต้ฐาน จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ชัดว่าชั้นดินใต้ฐานของโครงสร้างมีผลต่อการตอบสนองทางโครงสร้างในด้านพลศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ จากการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการตรวจวัดจริงและจากการวิเคราะห์แบบจำลอง ดังนั้นการคำนึงถึงการปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างชนิดนี้กับชั้นดินมีผลอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์

#### ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โบราณสถานเจดีย์อิฐก่อทรงระฆัง โดยพิจารณาถึงเงื่อนไขของความสูงของเจดีย์ที่ 3 ขนาด คือ องค์ที่มีความสูงมาก สูงปานกลางและสูงน้อย เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้างในด้านสถิตศาสตร์ พลศาสตร์ และพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยใช้แผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงต่างกันแค่ 2 เหตุการณ์ คือแผ่นดินไหว El Centro Centro เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม ค.ศ.1940 (พ.ศ.2483) และ แผ่นดินไหวที่บริเวณรอยเลื่อนแม่จันเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2550 แต่ในปัจจุบันแผ่นดินไหวมีการเกิดบ่อยขึ้นและมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างโบราณสถานบ้างไม่มากนักซึ่งแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นก็มีขนาดความรุนแรงที่ต่าง และมีผลต่อโครงสร้างที่ต่างกันด้วย

ดังนั้นในอนาคตหากมีการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์อิฐก่อทรงระฆังภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ควรจะมีการเพิ่มข้อมูลของแผ่นดินไหวเหตุการณ์อื่นๆด้วย เพื่อให้ได้ถึงพฤติกรรมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โบราณสถานเจดีย์อิฐก่อทรงระฆังภายใต้แผ่นดินไหวที่หลากหลายขึ้น และควรพิจารณาอิทธิพลของชั้นดินใต้ฐานของโครงสร้างด้วย เพื่อให้แบบจำลองสามารถตอบสนองพฤติกรรมต่อการรับแรงแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ทั้งนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการป้องกันการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างโบราณอิฐก่อต่อไป

ในด้านการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบหาอัตราส่วนความปลอดภัยของวัสดุโครงสร้างเป็นเพียงการเปรียบเทียบโดยภาพรวมเท่านั้น ทั้งนี้หากต้องการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในเชิงลึกจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงลักษณะการวิบัติและตำแหน่งของการวิบัติของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างต่อไป

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมศิลปากร. 2522. การอนุรักษ์พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลของกรมศิลปากร. กรมศิลปากร.

กองโบราณคดี. 2528. การอนุรักษ์โบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย. กรมศิลปากร, กรุงเทพฯ.

จุฑามาศ ปานเฟื่อง, ภัทรภูมิ สว่างพร้อม และ ชีรวัฒน์ ศรีวรรณนุสรณ์. 2549. การวิเคราะห์แบบจำลองและตรวจวัดโบราณสถานอิฐก่อ. โครงการงานวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชนาฉัตร อภิชาติยะกุล. 2549. การวิเคราะห์และทวนสอบแบบจำลองของโบราณสถานก่ออิฐ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. บริษัทพิมพ์ดีการพิมพ์จำกัด, กรุงเทพฯ.

เบญจพล เวทย์วิวัฒน์, พรศักดิ์ พุทธิพงษ์ศิริพร และ สูดชาย พานสุวรรณ. 2544. การวิเคราะห์โบราณสถานอิฐก่อ. วิศวกรรมสาร มก 44: 37-42.

วรพจน์ ประชาเสรี. 2543. คุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประกอบจากอิฐและปูนก่อเสริมกำลัง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย. 2539. โครงการถนนพุทธบูชา : ผลกระทบต่อโครงสร้างองค์พระปฐมเจดีย์. โยธาสาร 3: 51-56.

วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย. 2540. การวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ภูเขาทองเพื่อการบูรณะ. โยธาสาร 12: 54-60.

วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย, ไพรัช เล้าประเสริฐ และ วิเชียร โสมณวัฒน์. **The restoration of the ancient wat bovorn nivet pagpda.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 2539. **มาตรฐานอาคารวัสดุก่อ.** โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.: 38 .

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และ บริษัท สโตนเอ็นจิ้นส์ แอนด์ คอนซัลแทนท์ จำกัด. 2540. **รายงานการสำรวจและออกแบบเพื่อการบูรณะเจดีย์ภูเขาทอง.** สำนักโบราณคดีและพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติที่ 3, พระนครศรีอยุธยา.

สุคชาย พานสุวรรณ. 2543. **การวิเคราะห์โบราณสถานการก่ออิฐในเชิงวิศวกรรม.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สันติ เล็กสุขุม. 2544. **ศิลปะอยุธยา งานช่างหลวงแผ่นดิน.** สำนักพิมพ์เมืองโบราณ, กรุงเทพฯ.

อดิษฐ์ มอพิมพ์. 2544. **พฤติกรรมทางจลนศาสตร์ของโครงสร้างโบราณสถาน.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือน. 2551. **เอกสารประกอบโครงการอบรมภาคีวิศวกรโยธา การออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว ครั้งที่ 5.** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

Cagatay,I.H. 2005. Failure of an industrial building during a recent earthquake in Turkey. **Engineering Failure Analysis** 12: 497-507. Cukurova University, Turkey.

Carpinteri, A., S. Invernizzi and G. Lacidogna. 2005. In situ damage assessment and nonlinear modeling of a historical masonry tower. **Engineering structures** 27: 387-395.

Casciati, S. and R.I. Borja. 2004. Dynamic FE analysis of South Memnon Colossus including 3D soil-foundation-structure interaction. **Computer and Structures** 82: 1719-1736. Stanford University, Stanford.

Chopra, A.K. 2007. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, New Jersey.

Clough, R.W. and J. Penzien. 1993. **Dynamic of Structure**. McGraw- Hill, New York.

Jaishi, B., W.X. Ren, Z.H. Zong and P.N. Maskey. 2003. **Dynamic and seismic performance of old multi-tiered temples in Nepal**. *Engineering Structures* 25: 1827-1839.

Kuhlmann,W. 2003. **Historic Building under earthquake load**. Institute of Structural Statics and Dynamics, Aachen University.

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล

นางสาวณัฐิยา เลิศสิวนนท์

วัน เดือน ปี ที่เกิด

19 ตุลาคม 2526

สถานที่เกิด

อำเภอนาบอน จังหวัดนครศรีธรรมราช

ประวัติการศึกษา

วศ.บ.(โยธา) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์