



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถาน
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”

Analysis of Ancient Structures by Finite Element Method

โดย

ศ.ดร.อมร พิमानมาศ และคณะ

พฤษภาคม 2564

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถาน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”

Analysis of Ancient Structures by Finite Element Method

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ศ.ดร.อมร พิชานมาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์จิรภัทร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. ผศ.ดร. จักรพันธ์ เทือกตะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	มหาวิทยาลัยพะเยา

สนับสนุนโดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

ความสำคัญและความเป็นมา

โบราณสถานในเขตภาคเหนือตอนล่าง อย่างอุทยานประวัติศาสตร์จังหวัดสุโขทัย พบว่าสภาพของโครงสร้างโดยรวมถือว่าสมบูรณ์ และไม่พบการแตกร้าวหรือทรุดตัวอย่างมีนัยของโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างค่อนข้างมีเสถียรภาพสูง และสภาพชั้นดินที่แน่นตามลักษณะภูมิประเทศของภาคเหนือตอนล่าง เสาโครงสร้างวิหารนิยมใช้ศิลาแลง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าการใช้อิฐ จึงทำให้เกิดแนวคิดการวิจัยต่อยอดจากในเฟสแรก ที่จะทำการจำลองโบราณสถาน ในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่ลักษณะของโครงสร้างดินแน่น และมีความรุนแรงจากภัยธรรมชาติที่แตกต่างจากในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา โดยนำข้อมูลทางวิศวกรรมที่ถูกต้องทั้งคุณสมบัติวัสดุ ลักษณะรูปร่างที่สอดคล้องสภาพเป็นจริง ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย 3 มิติ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้าง ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำต่างๆ ทั้งน้ำหนักตัวเอง แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว รวมถึงแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างอย่างเหมาะสม โดยทำการทดลองเสริมกำลัง และตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้การเสริมกำลังนั้นมีความกลมกลืน และสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างโบราณสถานมากที่สุด ทำให้เกิดแนวทางการอนุรักษ์โบราณสถานอย่างยั่งยืนและเป็นไปตามหลักวิศวกรรม

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. จำลองโครงสร้างโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ศึกษาความมั่นคงแข็งแรง ตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนแอของโครงสร้างโบราณสถาน ที่นำมาเป็นตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำต่างๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกตัวเอง แรงลม และแรงแผ่นดินไหว ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและศรีเทพ
3. นำเสนอวิธีการซ่อม และเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้างโบราณสถานตัวอย่าง ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ
4. เผยแพร่ความรู้ไปสู่ผู้ที่เกี่ยวข้องเช่นวิศวกร สถาปนิกของกรมศิลปกร บุคลากรทางการศึกษา หรือผู้ที่มีความสนใจในการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์กับโครงสร้างโบราณสถาน ในรูปแบบการจัดสัมมนา

ผลการวิจัย

จากการลงพื้นที่ สํารวจการเสื่อมสภาพและสภาพความเสียหายของโบราณสถานอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัยพบว่า วัสดุทางโครงสร้างแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ศิลาแลงก่อผนังด้วยวัสดุฉาบปิดผิว โดยพบได้ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยบางส่วน และทั้งหมดของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย และวัสดุประเภทอิฐดินเผาก่อและฉาบด้วยวัสดุฉาบปิดผิว ที่พบได้ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยบางส่วน ลักษณะทางโครงสร้างของเจดีย์เป็นลักษณะผนังรับแรงและมีช่องเปิดภายในบางส่วน บางส่วนเป็นเจดีย์ตัน ตัววิหารและโบสถ์ เป็นลักษณะโครงสร้างแบบเสาแกนผนังเป็นผนังรับแรง

โบราณสถานที่สำรวจพบว่าส่วนใหญ่มีสภาพรกรากหักพัง โดยความเสียหายเกิดขึ้นในลักษณะของการพังทลายลงมา การสึกกร่อนของศิลาแลงตามกาลเวลาเนื่องจากการชะของน้ำฝน การเกิดตะไคร้และไลเคนที่ทำให้เกิดการเก็บกักความชื้น ส่งผลให้วัสดุเสื่อมตามกาลเวลา ในส่วนของอาคารที่ยังคงสภาพทางโครงสร้างพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นความเสียหายเฉพาะจุด เช่นการหักของยอดเจดีย์ การหลุดร่อนของวัสดุฉาบผิว การแตกหักของศิลาแลงเฉพาะจุด หรือการสึกกร่อนของศิลาแลงตามกาลเวลาจากน้ำฝน รวมถึงการทรุดตัวของพื้นดินที่รองรับ แต่ไม่มากเท่าอุทยานประวัติศาสตร์อยุธยา ทั้งนี้โบราณสถานบางส่วนได้มีการบูรณปฏิสังขรณ์ในอดีต ซึ่งอาจทำให้ตัวเนื้อวัสดุและโครงสร้างแตกต่างจากที่ก่อสร้างขึ้นดั้งเดิม

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเจดีย์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบเจดีย์วัดมหาธาตุ ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย วัสดุก่อประกอบด้วยศิลาแลง และอิฐก่อ พบว่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งพบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุก่อ เจดีย์จะยังคงอยู่ในสภาวะสมดุล และไม่เกิดความเสียหาย วัสดุก่อในเจดีย์สามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากด้านบนลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ภายใต้แรงลมตาม มยผ. 1311-50 พบว่าเจดีย์วัดมหาธาตุ มีหน่วยแรงดึงที่เกินค่าที่ยอมให้บริเวณยอดเจดีย์ประธาน ส่วนภายใต้แรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1303-57 พบว่าเจดีย์วัดมหาธาตุ สามารถต้านทานแรงอัดได้ แต่จะเกิดความเสียหายจากแรงดึงที่ยอดเจดีย์

เช่นเดียวกับแรงลม นอกจากนี้แล้วยังจะความเสียหายจากแรงดึงที่เรือนธาตุที่รองรับองค์ระฆังที่เป็นลักษณะดอกบัวตูม และเกิดความเสียหายในองค์ปรางค์ทั้ง 4 เนื่องจากแรงดึงเช่นกัน

สำหรับแบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับเป็นตัวแทนอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ คือ องค์ปรางค์ฤาษี ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตายตัว แรงลม จะไม่เกิดความเสียหายใดๆ แต่เกิดความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหว บริเวณคานทับหลัง ตรงทางเข้าภายในองค์ปรางค์ บริเวณประตูทางเข้าองค์ปรางค์ เนื่องจากมีหน่วยแรงดึงที่สูงเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกทุกด้านบน และเป็นจุดอ่อนแอ ขององค์ปรางค์ แม้ว่าองค์เจดีย์มีลักษณะชะลูดต่ำ และมีความเร่งของพื้นดินใน จังหวัดเพชรบูรณ์จะมีค่าไม่สูงก็ตาม

หลังจากทำการทดลองเสริมกำลังยอดเจดีย์วัดมหาธาตุด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถช่วยลดค่าของหน่วยแรงดึง ในยอดเจดีย์ภายใต้แรงลมและแรงแผ่นดินไหวได้ ส่วนองค์ปรางค์นั้นสามารถใช้เฟอร์โรซีเมนต์ฉาบบนผิวฐานของปรางค์ที่ เชื่อมต่อกับฐานของเจดีย์ประธานเพื่อลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในทุกส่วนของเจดีย์วัด มหาธาตุมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตาม ในกรณีของปรางค์ฤาษี ซึ่งมีค่าหน่วย แรงดึงสูงเกิดขึ้นที่มุมใต้คานทับหลังเหนือทางเข้า การฉาบกรอบทางเข้าตั้งแต่พื้นไปถึงท้องคานทับหลังไม่สามารถลดค่าหน่วย แรงดังกล่าวได้ อาจเนื่องมาจากค่าสติฟเนสที่ต่ำของระบบเฟอร์โรซีเมนต์ จึงควรพิจารณาวัสดุอื่นที่มีค่าสติฟเนสที่มากกว่า เช่น นำคานเหล็กมาทำเป็นโครงเพื่อช่วยต้านทานแรงแผ่นดินไหว

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RDG6230018

ชื่อโครงการ: การวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อนักวิจัย: อมร พิมานมาศ¹, รังสรรค์ วงศ์จิรภัทร¹, จักรพันธ์ เทือกดี¹, ปรีดา ไชยมหาวัน²
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹, มหาวิทยาลัยพะเยา²

Email address: amorn.pi@ku.th, fengrsw@ku.ac.th, fengcputu@ku.ac.th, preeda.ch@up.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 18 เดือน

โครงการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความมั่นคงแข็งแรง ตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนแอของโครงสร้างโบราณสถาน ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ ภายใต้แรงกระทำต่างๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกตัวเอง แรงลม และแรง แผ่นดินไหว ด้วยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำเสนอวิธีการซ่อม และเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้าง โบราณสถานดังกล่าวซึ่งเป็นโบราณสถานที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง จากการลงพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และ อุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัยพบว่า วัสดุทางโครงสร้างแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ศิลาแลงก่อฉาบด้วยวัสดุฉาบปิด ผิว และวัสดุประเภทอิฐดินเผาก่อและฉาบด้วยวัสดุฉาบปิดผิว ลักษณะทางโครงสร้างของเจดีย์เป็นลักษณะผนังรับแรง และมี ช่องเปิดภายในบางส่วน สภาพส่วนใหญ่มีลักษณะรกรักหักพัง โดยความเสียหายเกิดขึ้นในลักษณะของการพังทลายลงมา การ สึกกร่อนของศิลาแลงตามกาลเวลาเนื่องจากการเซาะของน้ำฝน การเกิดตะไคร่ และไลเคนที่ทำให้เกิดการเก็บกักความชื้น ส่งผลให้วัสดุเสื่อมตามกาลเวลา ในส่วนของอาคารที่ยังคงสภาพทางโครงสร้างพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นความเสียหายเฉพาะจุด เช่นการหักของยอดเจดีย์ การหลุดร่อนของวัสดุฉาบผิว ทั้งนี้โบราณสถานบางส่วนได้มีการบูรณปฏิสังขรณ์ ในอดีต ซึ่งอาจทำให้ตัวเนื้อวัสดุและโครงสร้างแตกต่างจากที่ก่อสร้างขึ้นดั้งเดิม

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเจดีย์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบเจดีย์วัดมหาธาตุ ในอุทยาน ประวัติศาสตร์สุโขทัย วัสดุก่อประกอบด้วยศิลาแลง และอิฐก่อ พบว่าภายใต้แรงลมตาม มยผ. 1311-50 เจดีย์วัดมหาธาตุ มี หน่วยแรงดึงที่เกินค่าที่ยอมให้บริเวณยอดเจดีย์ประธาน ส่วนภายใต้แรงแผ่นดินไหว ตาม มยผ. 1303-57 พบว่าเจดีย์วัด มหาธาตุ สามารถต้านทานแรงอัดได้ แต่จะเกิดความเสียหายจากแรงดึงที่ยอดเจดีย์ นอกจากนี้แล้วยังพบความเสียหายจากแรง ดึงที่เรือนธาตุที่รองรับองค์ระฆังที่เป็นลักษณะดอกบัวตูม และเกิดความเสียหายในองค์ปรางค์ทั้ง 4

สำหรับแบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับเป็นตัวแทนอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ คือ องค์ปรางค์ ฤาษี ผลการศึกษาพบว่า เกิดความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวบริเวณคานทับหลัง บริเวณประตูทางเข้าองค์ปรางค์ เนื่องจากมี หน่วยแรงดึงที่สูงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกด้านบน และเป็นจุดอ่อนแอ ขององค์ปรางค์ แม้ว่าองค์เจดีย์มีลักษณะชะลูดต่ำ และ มีความแข็งแรงของพื้นดินในจังหวัดเพชรบูรณ์จะมีค่าไม่สูงก็ตาม

หลังจากทำการทดลองเสริมกำลังยอดเจดีย์วัดมหาธาตุด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถช่วยลดค่าของหน่วยแรงดึง ในยอดเจดีย์ภายใต้แรงลม และแรงแผ่นดินไหวได้ ส่วนองค์ปรางค์ทั้ง 4 ได้ใช้เฟอร์โรซีเมนต์ฉาบบนผิวฐานของปรางค์ที่ เชื่อมต่อกับฐานของเจดีย์เพื่อลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในทุกส่วนของเจดีย์วัดมหาธาตุมี ค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ ภายหลังจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตาม ในกรณีของปรางค์ฤาษี ซึ่งมีค่าหน่วยแรงดึงสูง เกิดขึ้นที่มุมใต้คานทับหลังเหนือทางเข้า การฉาบกรอบทางเข้าตั้งแต่พื้นไปถึงท้องคานทับหลังไม่สามารถลดค่าหน่วยแรง ดังกล่าวได้ อาจเนื่องมาจากค่าสตีเฟนส์ที่ต่ำของระบบเฟอร์โรซีเมนต์ในรูปแบบที่ใช้ จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพของการติดตั้ง โครงเหล็กค้ำยันภายในปรางค์ฤาษีและพบว่าสามารถช่วยลดขนาดของหน่วยแรงดึงที่คานทับหลังได้ดี ทั้งนี้ในการเสริมกำลัง หรือซ่อมแซมโครงสร้างโบราณสถาน จำเป็นต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุเสริมกำลังและวัสดุ เดิมของโครงสร้าง และผลกระทบของระบบเสริมกำลังต่อรูปลักษณะภายนอกของโครงสร้างโบราณด้วย

คำหลัก: ไฟไนต์เอลิเมนต์ โบราณสถาน เจดีย์ แผ่นดินไหว เสริมกำลัง

Abstract

Project Code: RDG6230018

Project Title: Analysis of Ancient Structures by Finite Element Method

Investigators: Amorn Pimanmas¹, Rangsarn Wongjeeraphat¹, Chakrapan Tuakta¹, Preeda Chaimahawan⁵
Kasetsart University¹, University of Phayao²

Email address: amorn.pi@ku.th

Project Duration: 18 months

The objectives of this project are to evaluate and to determine the weak point of ancient structures, located in Sukhothai and Si Thep Historical Parks, subjected to various types of load, such as self-weight, wind, and earthquake loads, by using finite element method (FEM). The study also proposes repairing and strengthening methods of the selected ancient structures, which are located in the southern part of northern region. From site visit of Sukhothai Historical Park and Si Satchanalai Historical Park, it was found that the material of the historical structures can be defined in two major categories, which are laterite with plaster covering the surface and brick with plaster covering the surface. The structural system of pagodas is load bearing wall system with opening inside. Most of them are ruined and collapsed. The erosion of laterite over time due to rainfall are found. The pagodas are also deteriorated over time by moisture retention from moss and lichens. Most of the ancient structures that are not collapsed have local damages, such as the broken tip of the pagoda, spalling and degradation of the plaster cover. However, some of the ancient remains have been retrofitted and restored in the past. This may cause the materials and structures to be different from the original construction.

In this study, Mahathat pagoda, selected as the representation of Sukhothai Historical Park, was modeled by using FEM analysis with laterite and masonry as the construction materials. The result shows that under wind load based on DPT1311-50 standard, tensile stress in the banana bud of the main pagoda is higher than the allowable tensile strength of the material. Under earthquake load according to DPT 1303-57 standard, it was found that Mahathat pagoda can withstand compressive stress, but will be damaged by the tensile stress at the banana bud. In addition, damage due tensile stress was also found at the terrace that supports the bell-shaped part of the pagoda, and at all four surrounding prangs.

Prang Ruesi Monument, an ancient structure in Si Thep Historical Park in Phetchabun Province, was selected as representation and modeled with FEM. Based on the analysis, the damage under earthquake load will occur at the lintel beam above the entrance of the prang. The tensile stress is quite high in this member due to the high gravity load transferred from above, and being a weak point due to an opening. Therefore, the damage will occur due to earthquake, although the structure has low slenderness ratio and is located in a region with low ground acceleration.

The results of the FEM analysis of Mahathat pagoda after being strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) indicated that tensile stress in the banana bud of the pagoda is reduced under both wind load and earthquake load cases. The tensile stress in the four surrounding prangs, which are strengthened with ferro cement on their surfaces that are connected to the base, are also reduced under earthquake load. The stress in all parts of Mahathat pagoda is lower than the allowable stress after strengthening with FRP and ferro cement. However, in case of Prang Ruesi Monument, which has high level of tensile stress at the lintel beam, coating the doorframe and the soffit of the lintel beam with either strengthening materials cannot reduce the tensile stress possibly due to the low stiffness of ferro cement and FRP

systems. Therefore, the effectiveness of installing steel beams and columns to form a framing system inside the structure was also investigated, and it was found that tensile stress at the lintel beam can be reduced by this method. Note that, when selecting strengthening or repair system for ancient structures, it is crucial to consider the physical and chemical compatibilities between strengthening materials and original materials, and the effects on the appearance of the structures.

Keywords: Finite element, Ancient remains, Pagoda, Seismic, Strengthening

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ/หลักการและเหตุผล	1
1.2 ทบทวนเอกสารเชิงสังเคราะห์	6
1.3 วัตถุประสงค์	12
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	12
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	13
บทที่ 2 ผลการสำรวจอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย	15
2.1 อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย	15
2.2 กลุ่มอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย	34
2.3 สรุปผลการสำรวจอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย	44
บทที่ 3 การตรวจสอบโบราณสถานภายใต้แรงกระทำต่างๆ ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	45
3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในเขตอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย	45
3.1.1 การสร้างแบบจำลองเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย	47
3.1.1.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์	51
3.1.1.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์	51
3.1.1.3 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์ หรือแรงแผ่นดินไหว	51
3.1.1.4 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงลม	56
3.1.2 ผลการวิเคราะห์	60
3.1.2.1 รูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์	60
3.1.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในน้ำหนักตัวเอง	64
3.1.2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว	65
3.1.2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม	68
3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในเขตอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์	69
3.2.1 แนวทางการสร้างและวิเคราะห์ปรางค์ถ้ำ	69

สารบัญ

	หน้า
3.2.1.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์	72
3.2.1.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์	72
3.2.1.3 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์ หรือแรงแผ่นดินไหว	72
3.2.1.4 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงลม	75
3.2.2 ผลการวิเคราะห์	76
3.2.2.1 รูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์	76
3.2.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักตัวเอง	79
3.2.2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว	80
3.2.2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม	83
3.2 สรุปผลการวิเคราะห์เจดีย์	85
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	86
4.1 การวิเคราะห์การเสริมกำลังเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย	86
4.1.1 การเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	86
4.1.2 การเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยการติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์	87
4.1.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลัง	89
4.2 การวิเคราะห์การเสริมกำลังปรางค์ฤาษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ	91
4.2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์	91
4.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยการติดตั้งโครงเหล็กค้ำยัน	93
4.3 สรุปผลการวิเคราะห์การเสริมโครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	95
4.4 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถาน	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก ก การจำแนกประเภทของดินตามข้อมูลการเจาะสำรวจดินในสนาม	98
ภาคผนวก ข แบบรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้าง	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ/หลักการและเหตุผล

จากการลงพื้นที่สำรวจโบราณสถานในหลายพื้นที่ทั้งภาคเหนือตอนบน ภาคเหนือตอนล่าง และอุทยานประวัติศาสตร์อยุธยา ในโครงการเฟสที่ 1 ที่ผ่านมาแล้วนั้น ซึ่งมีการลงพื้นที่เพื่อสำรวจกลุ่มอาคารโบราณสถานจำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 26-28 พฤษภาคม 2560 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดลำพูน ครั้งที่ 2 วันที่ 19 เมษายน 2561 ในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาและจังหวัดลพบุรี และครั้งที่ 3 ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2561 ในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ผลการลงพื้นที่พบว่าอาคารที่สำคัญที่ควรให้ความสนใจคือเจดีย์ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความสูงชะลูด อีกทั้งโครงสร้างเหล่านั้นยังมีความสำคัญในด้านจิตใจของชุมชน ซึ่งจากการสังเกตพบว่าโดยมากเจดีย์เหล่านั้น ได้รับการบูรณะให้มีความคงทนเพิ่มขึ้น แต่ปัญหาที่ยังไม่สามารถแก้ได้คือ ปัญหาการทรุดเอียง ทั้งที่อาจจะเกิดจากความตั้งใจของการก่อสร้าง หรือจากการทรุดตัวของฐานรองรับก็ตาม

สำหรับรูปแบบของเจดีย์ พบว่าในเขตพื้นที่ภาคเหนือ ถือว่าเป็นช่วงสมัยล้านนา รูปแบบที่เป็นทรงระฆังคว่ำทั้งแบบฐานกลม และฐานเหลี่ยม สำหรับเจดีย์ทรงปราสาทนั้นก็สามารถพบเห็นได้บ้างแต่ไม่มากนัก โดยอัตราส่วนความชะลูดของการก่อสร้างเจดีย์ทรงระฆังจะมีค่าที่สูงกว่าทรงปราสาท ทำให้อาจพบปัญหาการได้รับความเสียหายจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังนั้นจะต้องตรวจสอบจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์หาตำแหน่งที่มีความอ่อนแอ เพื่อที่จะเสริมกำลังอย่างเหมาะสม



(ก) วัดพระธาตุอภัยสุเทพราชวรวิหาร



(ข) วัดพระสิงห์วรมหาวิหาร



(ค) เจดีย์วัดอุโมงค์

(ง) วัดโพธารามมหาวิหาร
(วัดเจ็ดยอด)

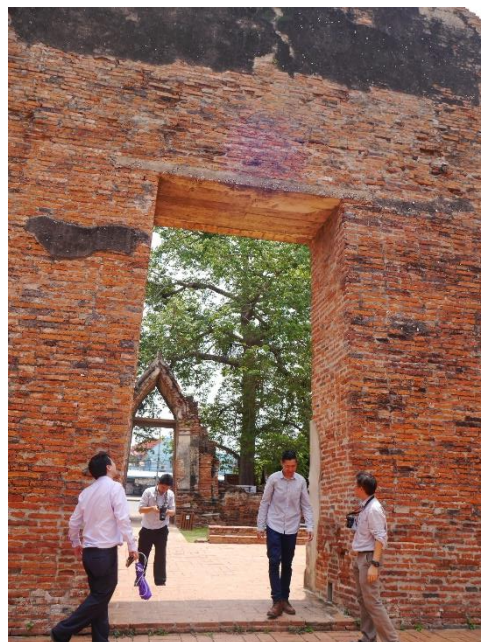
(จ) วัดจามเทวี

รูปที่ 1.1 โบราณสถานในภาคเหนือที่ได้ทำการสำรวจ

สำหรับรูปแบบเจดีย์ หรือปราสาทในเขตพื้นที่ภาคกลางลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา โดยโครงสร้างโบราณสถานส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสมัยอยุธยา ตั้งแต่สมัย พ.ศ. 1893 จนถึง พ.ศ. 2310 พบว่าประสบปัญหาคล้ายกันคือเกิดการทรุดตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายหลังจากน้ำท่วมใหญ่ในปี พ.ศ.2554 เจดีย์หลายแห่งมีการทรุดตัว ทำให้องค์เจดีย์มีความเอียงตัวไป โดยมีการซ่อมแซมทั้งที่สามารถมองเห็นอย่างชัดเจนและมองไม่เห็น (รูปที่ 2) อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบเจดีย์ตัวอย่าง ได้แก่ เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล พบว่าเจดีย์สามารถต้านทานแรงกระทำจากน้ำหนักตัวเอง และแรงลมได้อย่างปลอดภัย และคาดว่าทรุดตัวน่าจะคงตัวแล้ว แต่อาจพบความเสียหายบริเวณปล้องไฉนหากเกิดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว เนื่องจากอยุธยาตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน สามารถขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้ 3-4 เท่า โดยแนวทางการเสริมกำลังที่ได้ทดลองวิเคราะห์ได้แก่ การทดลองเสริมกำลังปล้องไฉนด้วยวิธีห่มด้วยเฟอโรซีเมนต์ (รูปที่ 3) และการติดพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในอิฐก่อไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยหน่วยแรงดึงสูงสุด ย้ายไปเกิดขึ้นในเอลิเมนต์ที่เป็นเฟอโรซีเมนต์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแทน ซึ่งเฟอโรซีเมนต์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถต้านทานหน่วยแรงดึงดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย ทำให้เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น



(ก) วัดใหญ่ชัยมงคล



(ข) การเสริมทับหลังคอนกรีตเสริมเหล็กวัดราชบูรณะ



(ค) วัดพระศรีสรรเพชญ์



(ง) ค้ำยันชั่วคราวผนังโบสถ์วัดพระศรีสรรเพชญ์

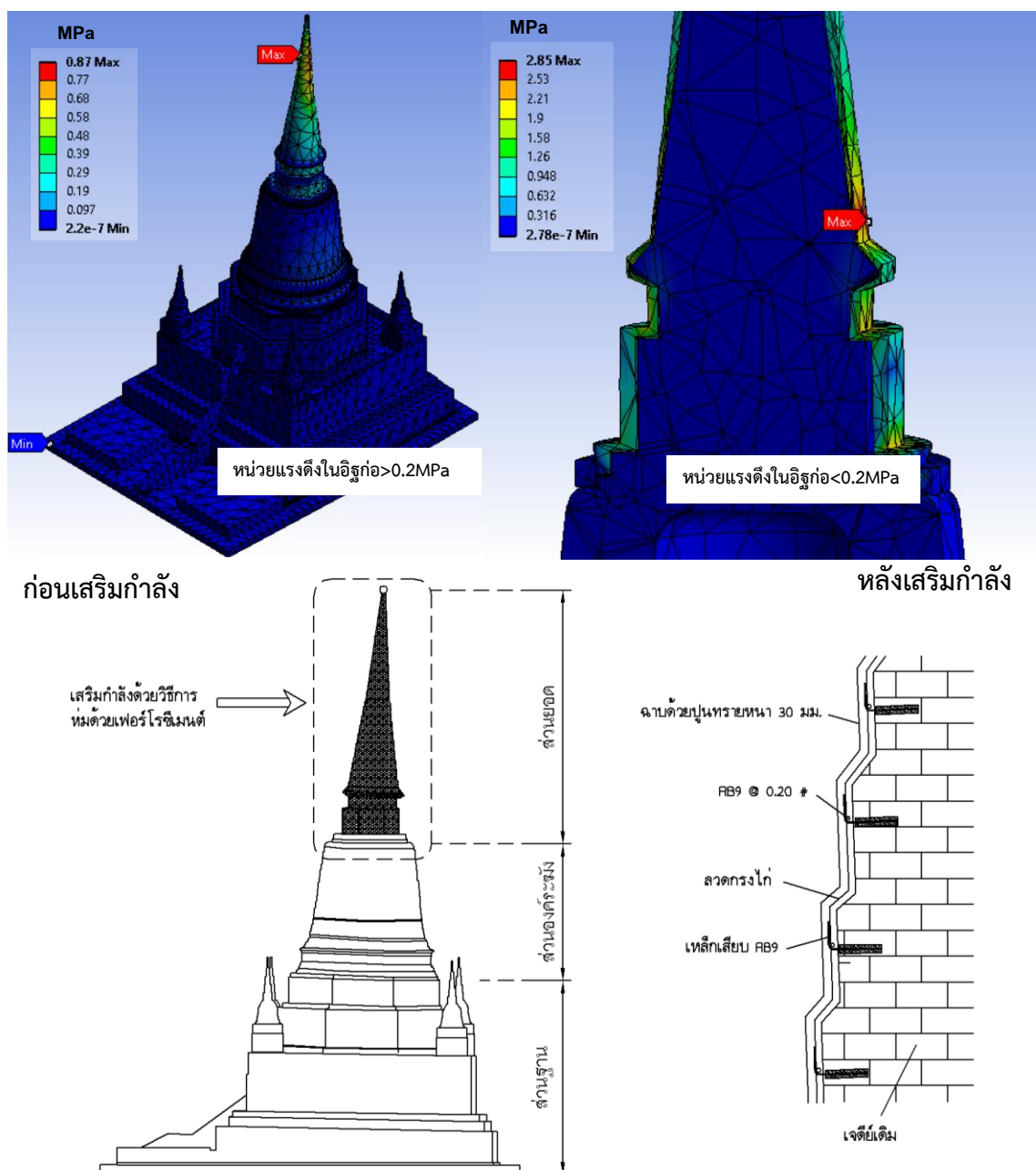


(จ) ค้ำยันยึดเสาโบสถ์วัดพระศรีรัตนมหาธาตุ



(ฉ) การเสริมคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
พระปรางค์วัดพระศรีรัตนมหาธาตุ

รูปที่ 1.2 โบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และจังหวัดลพบุรี



รูปที่ 1.3 ผลการวิเคราะห์และรูปแบบการเสริมกำลังเจตีย์วัดใหญ่ชัยมงคลจากโครงการในเฟสที่ 1

ในกรณีของโบราณสถานในเขตภาคเหนือตอนล่าง ได้แก่อุทยานประวัติศาสตร์จังหวัดสุโขทัย อยู่ในช่วงเวลาประมาณ พ.ศ. 1762 ถึง พ.ศ. 1981 จากการสำรวจพบว่าสภาพของโครงสร้างโดยรวมถือว่าสมบูรณ์ และไม่พบการแตกร้าวหรือทรุดตัวอย่างมีนัยของโครงสร้าง แม้จะเป็นโบราณสถานที่ก่อสร้างขึ้นก่อนสมัยอยุธยาก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างค่อนข้างมีเสถียรภาพสูง และสภาพชั้นดินที่แน่นตามลักษณะภูมิประเทศของภาคเหนือตอนล่าง เสาโครงสร้างวิหารนิยมใช้ศิลาแลง ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าการใช้อิฐ (รูปที่ 4) จึงทำให้เกิดแนวคิดการวิจัยต่อยอดจากในเฟสแรก ที่จะทำการจำลองโบราณสถาน ในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีสัชนาลัย ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่ลักษณะของโครงสร้างดินแน่น และมีความรุนแรงจากภัยธรรมชาติที่แตกต่างจากในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา

โดยนำข้อมูลทางวิศวกรรมที่ถูกต้องทั้งคุณสมบัติวัสดุ ลักษณะรูปร่างที่สอดคล้องสภาพเป็นจริง ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพถ่าย 3 มิติ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนของโครงสร้าง ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำต่างๆ ทั้งน้ำหนักตัวเอง แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว รวมถึงแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างอย่างเหมาะสม โดยทำการทดลองเสริมกำลัง และตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้การเสริมกำลังนั้นมีความกลมกลืน และสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างโบราณสถานมากที่สุด ทำให้เกิดแนวทางการอนุรักษ์โบราณสถานอย่างยั่งยืนและเป็นไปตามหลักวิศวกรรม





รูปที่ 1.4 วัดมหาธาตุ และวัดชนะสงคราม ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยที่ได้ทำการสำรวจ



รูปที่ 1.5 วัดศรีชุม ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยที่ได้ทำการสำรวจ

โดยข้อเสนอนี้ นอกจากจะเป็นการวิเคราะห์และศึกษาข้อมูลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ยังจะได้ทำการจัดสัมมนา เพื่อให้ความรู้ทั้ง บุคคลากรที่เกี่ยวข้อง และมีความสนใจในการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ โครงสร้างโบราณสถานด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการซ่อมเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถาน อาทิวิศวกร ของกรมศิลปากร ซึ่งเป็นผู้มีหน้าที่ในการดูแลรักษาและทำการซ่อมแซมโครงสร้างโบราณสถาน ตลอดจน วิศวกร หรือบุคคลากรทางการศึกษา ที่มีความสนใจ หรือบุคคลากรในท้องถิ่น ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ จะต้องร่วมอนุรักษ์โบราณสถานไปพร้อมกัน

1.2 ทบทวนเอกสารเชิงสังเคราะห์

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยในอดีตของไทยที่ได้ทำการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ องค์เจดีย์นั้นมีอยู่พอสมควร อาทิเช่น ชยานนท์ และ เศรษฐพงษ์ (2554) ได้ทำการประเมินความแข็งแรงและ เสนอแนวทางการบูรณะโบราณสถานประเภทเจดีย์ในจังหวัดเชียงใหม่ด้านทานแผ่นดินไหว โดยใช้พระธาตุ ดอยสุเทพเป็นตัวแทนเจดีย์ในจังหวัดเชียงใหม่ ญัฐยา (2552) ได้ทำการศึกษาการตอบสนองต่อแผ่นดินไหว ของโบราณสถานอิฐก่อทรงระฆัง เจดีย์ประธานวัดใหญ่ชัยมงคล จ.พระนครศรีอยุธยา เจดีย์ประธาน วัด จักรวรรดิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และ พระธาตุจอมกิตติ วัดพระธาตุจอมกิตติ จังหวัดเชียงราย หรือ

งานวิจัยของวรศักดิ์และคณะ (2550) ได้นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัญหา 3 มิติ โดยการใช้ Moving Kriging Interpolation ร่วมกับหลักการของ Layered Domain of Influence จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างขององค์เจดีย์วัดบวรนิเวศวิหารซึ่งมีความสูง 45.51 เมตร และ ษนาฉัตร (2549) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของเจดีย์ประธานทรงปรางค์วัดวรเชษฐเทพบำรุง ณ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีความสูงประมาณ 30 เมตร โดยสร้างแบบจำลองที่รวมผลของโครงสร้างดินไปด้วย จะเห็นได้ว่างานวิจัยในเชิงวิศวกรรมเกี่ยวกับโบราณสถานในประเทศไทยนั้นยังมีจำกัดอยู่ ซึ่งหากมีการสนับสนุนให้มีการวิจัยอย่างจริงจัง จะช่วยให้เข้าใจในพฤติกรรม และสามารถหาแนวทางป้องกันความเสียหาย หรือหาแนวทางการอนุรักษ์ โครงสร้างเหล่านี้ให้มีความมั่นคงแข็งแรง จะทำให้เรามีโบราณสถานไว้สืบทอดให้ลูกหลานได้ชื่นชมศึกษาต่อไป

เมื่อสืบค้นเพิ่มเติมเกี่ยวกับงานวิจัยของต่างประเทศเกี่ยวกับการอนุรักษ์เจดีย์ พบว่าในแต่ละประเทศนั้นมีลักษณะของเจดีย์ที่แตกต่างจากในประเทศไทย เช่น เจดีย์ในประเทศจีนนิยมทำจากอิฐก่อ เจดีย์ในประเทศเนปาล ทำจากไม้และอิฐ เจดีย์ในประเทศญี่ปุ่นนิยมทำจากไม้ และเจดีย์ในประเทศเกาหลีที่ทำจากหินเรียง โดยงานวิจัยที่ได้สร้างแบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์อาทิเช่น งานวิจัยของ D. Abruzzese และคณะ (2009) ที่ได้ทำการประเมินความเสี่ยงของการวิบัติเจดีย์อิฐโบราณ “Huzhu” ในจังหวัด Songjiang ประเทศจีน ความสูง 18.8 ม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐาน 4.1 ม. มีอายุมากกว่า 100 ปี (รูปที่ 6) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้รวมผลของโครงสร้างดิน คุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรมของอิฐจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้คุณสมบัติเทียบเท่าของระบบอิฐก่อ (อิฐและปูนก่อ) โมดูลัสยืดหยุ่น 3,000 MPa อัตราส่วนปัวซอง 0.15 หน่วงน้ำหนัก 1,850 กก./ลบ.ม. กำลังอัด 10 Mpa ซึ่งผลการศึกษาภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตย์สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนการดูแลรักษา ส่วนประกอบทางสถาปัตยกรรมที่ซับซ้อนนี้ สร้างความยุ่งยากในการจำลองเป็นอย่างยิ่ง ผลการวิจัยพบว่าภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ หน่วยแรงในดินใต้ฐานมีค่าสูง และภายใต้การวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหวขนาดประมาณ 5% ของน้ำหนักหอคอย เมื่อรวมผลของปูนก่อกับอิฐแล้ว อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการล้มคว่ำมีค่า 3.5 ซึ่งยังถือว่าเจดีย์ยังไม่พังลงมาทันทีทันใด แต่เนื่องจากยังขาดข้อมูลการตรวจวัดทางพลศาสตร์ ซึ่งจะช่วยทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น



Fig. 6. (a) 3D section of physical model. Numerical models: (b) model 1; (c) model 2; (d) model 2 leaning. F.e.m. model: 30163 elements, 51454 nodes.

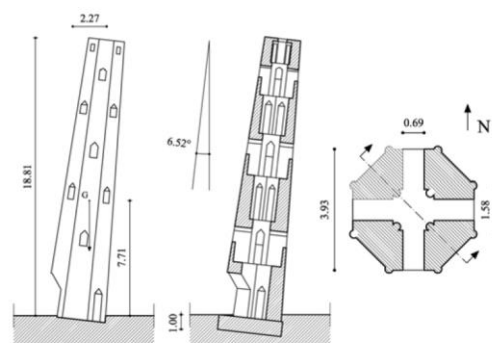


Fig. 2. Elevation, section and plan of Huzhu Pagoda.

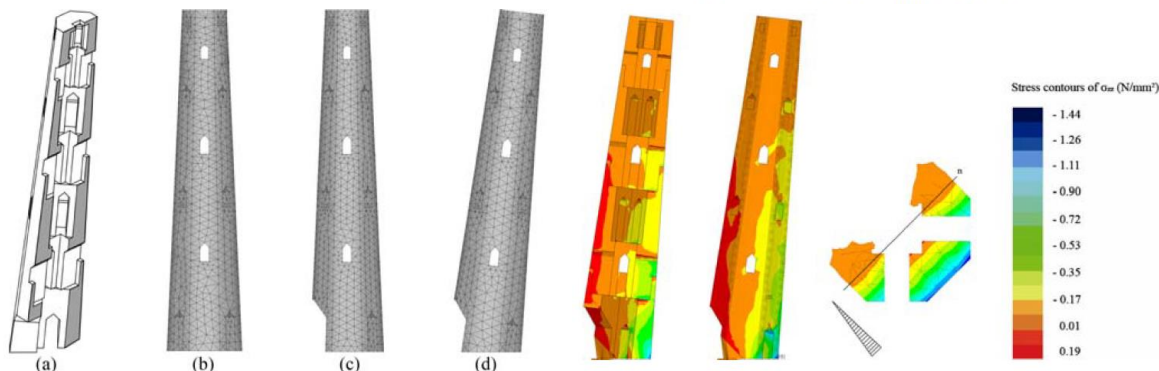
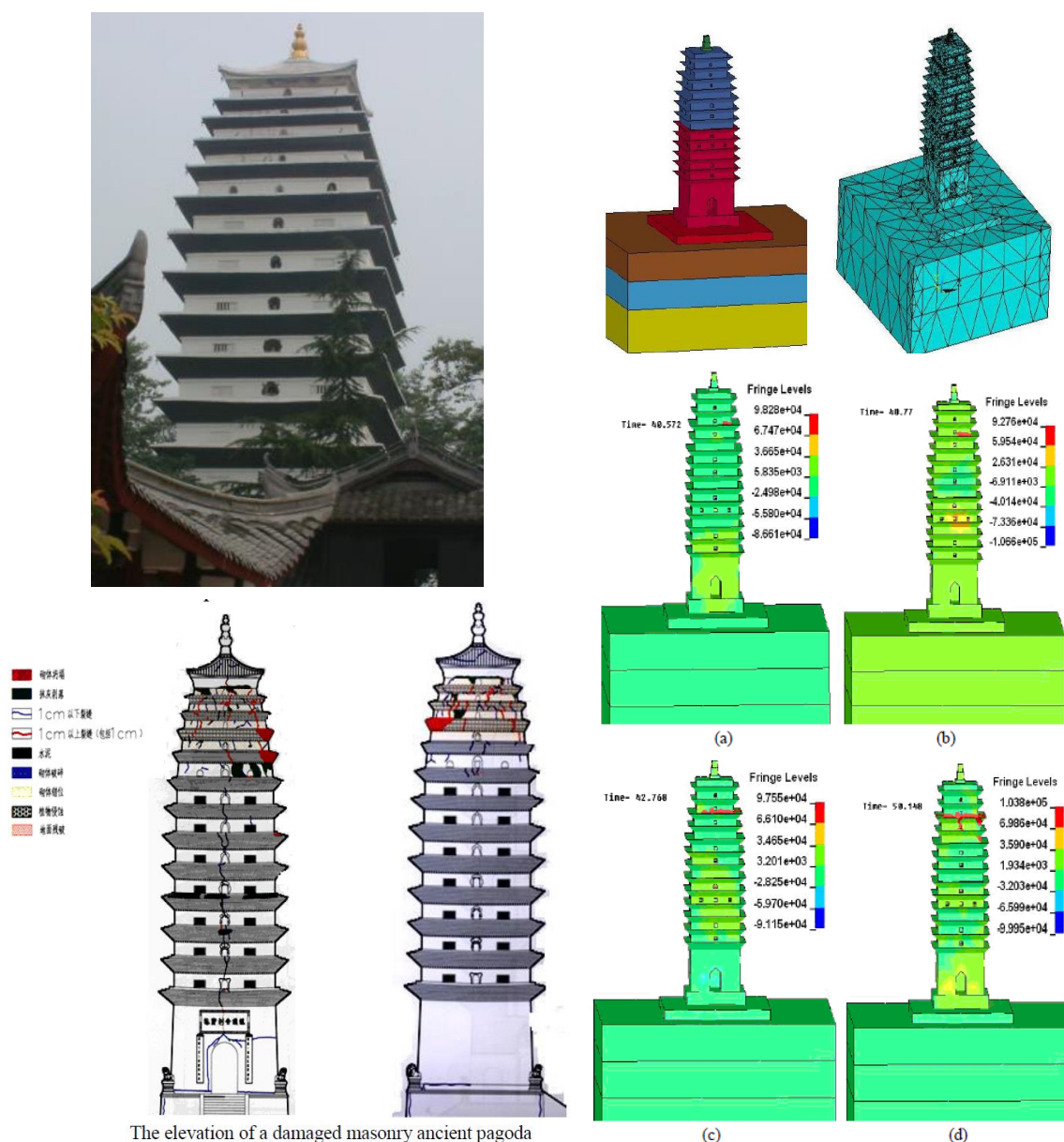


Fig. 8. Z component of σ_{zz} (elevation, section and plane) - Dead load + horizontal 0.05g - Tensionless base.

รูปที่ 1.6 การวิเคราะห์หอคอยอิฐโบราณ “Huzhu” ในจังหวัด Songjiang

ที่มา : D. Abruzzese และคณะ (2009)

งานวิจัยของ Shengcai Li และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของเจดีย์โบราณ “Longhu” ความสูงประมาณ 33 ม. มีลักษณะเป็นฐานสี่เหลี่ยมกว้าง 7.96 ม. ตั้งอยู่ในจังหวัด Sichuan โดยได้นำรูปแบบวิบัติ การเสียรูป และการแตกร้าวของเจดีย์จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Wenchuan Earthquake 2008 มาทำการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้ทำการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นจนถึงช่วงพลาสติก (elastic-plastic) ภายใต้แรงพลศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองนี้ได้มีการกำหนดเอลิเมนต์ที่มีความเสียหาย (failure element) โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวหากถึงค่าความเค้นหรือความเครียดวิบัติแล้ว จะไม่นำมาใช้ในการคำนวณในสถานะต่อไป เพื่อจำลองสภาพของอิฐก่อที่เมื่อได้รับความเสียหายแล้วจะหลุดร่วงลงไป แบบจำลองที่ใช้สร้างจากโปรแกรม LS-DYNA โดยรวมผลของดินใต้ฐานไว้ด้วย (รูปที่ 7) โดยมีการตรวจวัดคาบธรรมชาตินในสนามเพื่อปรับแก้แบบจำลองให้สอดคล้องกัน ผู้วิจัยได้พยายามอธิบายหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ ขณะเกิดแผ่นดินไหว มีค่าสูง ณ ตำแหน่งใดบ้างของเจดีย์ ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปแบบการแตกร้าวที่ตรวจพบในเจดีย์ภายหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Wenchuan Earthquake 2008 อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะผิวด้านนอกของเจดีย์เท่านั้น แต่ยังไม่สามารถวิเคราะห์ถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในเจดีย์ได้ และต้องการการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

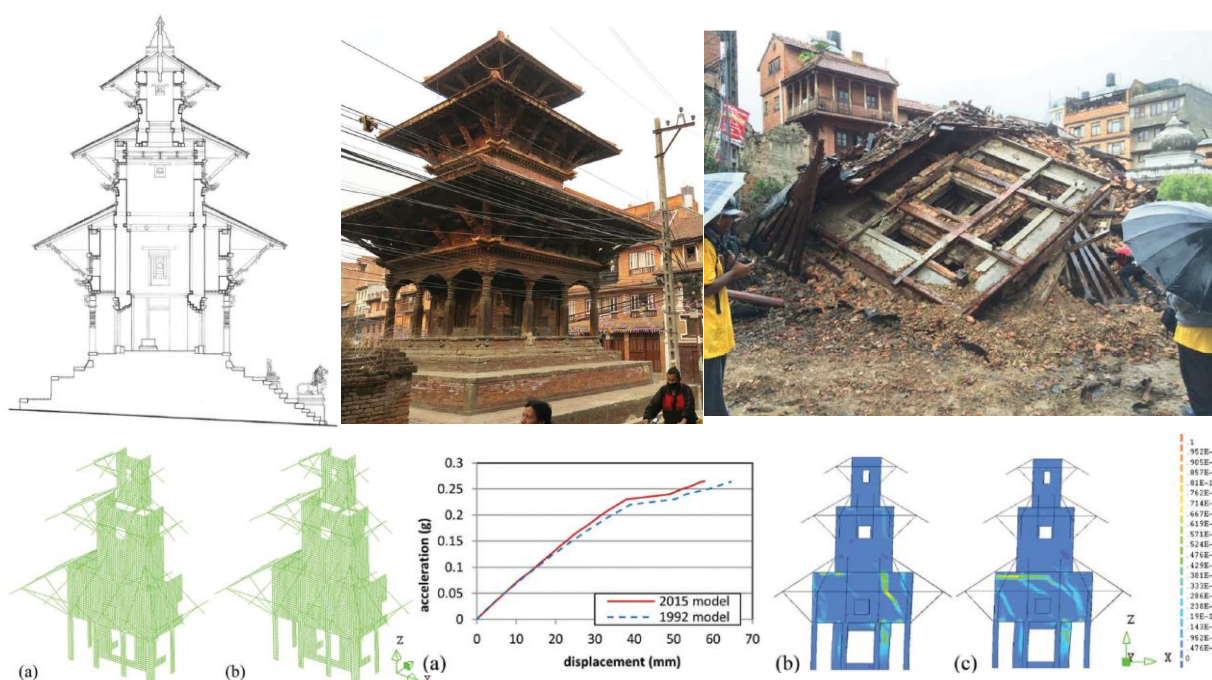


รูปที่ 1.7 แบบจำลองเจดีย์ “Longhu” จังหวัด Sichuan ประเทศจีน

ที่มา : Shengcai Li และคณะ (2014)

งานวิจัยของ Yoei and Toshikazu (2018) พยายามอธิบายพฤติกรรมก่อนและการเสริมกำลังให้เจดีย์ 3 ชั้นในประเทศเนปาล ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยเจดีย์ Radha Krishna temple เป็นเจดีย์รูปแบบของศาสนาฮินดู ก่อสร้างด้วยกำแพงอิฐ ปูนก่อดินโคลน (mud mortar) และมีไม้เป็นโครงฝังในผนังอิฐก่อ เจดีย์ดังกล่าวได้เกิดการวิบัติเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Nepal earthquake 2015 ขนาด 7.8 แมกนิจูด (รูปที่ 8) แม้ว่าจะได้ทำการเสริมกำลังด้วยโครงสร้างด้วยคอนกรีตลักษณะเป็นวงแหวนในชั้นพื้น และชั้น 1 และเสริมเหล็กรูปตัวไอในชั้น 2 เมื่อปี ค.ศ. 1992 แล้วก็ตาม ทั้งคู่ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 แบบ เพื่อจำลองพฤติกรรม ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยคอนกรีตวงแหวน ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้ได้ค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐและปูนก่อดินโคลน 1.7 Mpa และโมดูลัสยืดหยุ่น

180 Mpa กำลังดัด 0.08 Mpa ในขณะที่ไม้ที่ทดสอบมีหน่วยน้ำหนัก 880 กก./ลบ.ม. โมดูลัสยืดหยุ่น 10.3 Gpa และกำลังอัด 44 Mpa ซึ่งนำไปใช้ป้อนให้กับโปรแกรม โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็น TNO DIANA ผลการวิจัยพบว่า เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธี Push over และ ผลวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจากคลื่นแผ่นดินไหว พบว่าแบบจำลองก่อนเสริมกำลังสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ได้มากกว่าแบบจำลองที่เสริมกำลังเล็กน้อย ในขณะที่กำลังต้านทานมีค่าใกล้เคียงกัน แบบจำลองทั้งคู่แสดงรูปตรวจความเสียหายตามแนวยาวของกำแพง ในขณะที่แบบจำลองก่อนเสริมกำลังพบความเสียหายกระจายในกำแพงอิฐที่มากกว่า แบบจำลองเสริมกำลังแสดงให้เห็นความเสียหายที่รุนแรงกระจุกตัวในเสาชั้น 1 บนแท่นบูชา ที่มากกว่าแบบจำลองไม่เสริมกำลัง เนื่องจากการเสริมกำลังด้วยวงแหวนคอนกรีตและคานเหล็ก ทำให้มีความแข็งแรงที่สูงกว่า ซึ่งเหนียวนำไปเกิดแรงกระจุกตัวในเสาที่มากกว่านั่นเอง

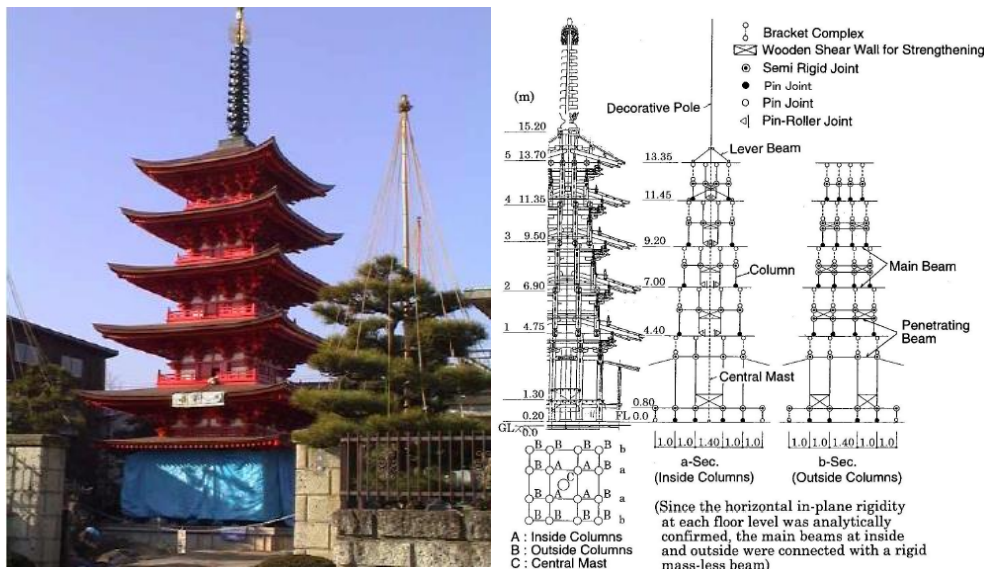


รูปที่ 1.8 แบบจำลองเจดีย์ “Radha Krishna temple” ประเทศเนปาล ซึ่งได้รับความเสียหายจากแผ่นดินไหวที่เนปาล 2015

ที่มา : Yoei and Toshikazu (2018)

Toshikazu และ คณะ (2004) ได้ทำการประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของเจดีย์ 5 ชั้น “Eimyou-in Goju-no-to” ที่ทำจากไม้ สร้างขึ้นมาใหม่เลียนแบบเจดีย์สมัยศตวรรษที่ 17 ด้วยความสูง 15.2 ม. เมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วได้ทำการเสริมกำลังด้วยกำแพงรับแรงเฉือนจากไม้ และเสริมกำลังโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมด้วยทองแดงและสแตนเลส แบบจำลองที่ใช้ศึกษาเป็นโครงเฟรม 2 มิติ จุดต่อคาน เสา ถูกจำลองเป็นแบบกึ่งแข็งกึ่งอ่อน ทำการวิเคราะห์ภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ และแรงพลศาสตร์ซึ่งมีการปรับแบบจำลองให้รวมน้ำหนักบรรทุกทุกไว้ที่จุดต่อ (Lump mass) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อนำความถี่ธรรมชาติที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องมือ Microtremore พบว่าให้ค่าที่แตกต่างจากการวัด

พอสมควร อย่างไรก็ตามผู้วิจัยให้เหตุผลว่าจำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลพฤติกรรมที่แท้จริงในขณะที่โครงสร้างเกิดการสั่นไหวอย่างรุนแรงจากภัยธรรมชาติที่มีความรุนแรงเช่นไต้ฝุ่น หรือแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ เนื่องจากแรงกระตุ้นจากเครื่องมือวัดอาจไม่มากพอที่โครงสร้างแสดงผลตอบสนองออกมา



รูปที่ 1.9 แบบจำลองเจดีย์ 5 ชั้น “Eimyou-in Goju-no-to” ที่ทำจากไม้
ที่มา: Toshikazu และ คณะ (2004)

จะเห็นว่าการวิจัยแต่ละคน พยายามใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการศึกษาค้นคว้า เพื่อตรวจสอบพฤติกรรม ประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหว หรืออธิบายพฤติกรรมหลังจากที่เจดีย์ได้วิบัติไปแล้ว ซึ่งเป็นแนวทางในการศึกษาเชิงลึก โดยประเทศไทยยังคงขาดแคลนงานวิจัยในลักษณะนี้อยู่ หากสังเกตงานวิจัยในต่างประเทศได้ตั้งสมมติฐานให้ง่าย และพยายามทำให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างต่างๆ ในสมัยก่อนนั้น วัสดุที่ใช้ก่อสร้างอาจมีคุณภาพต่ำ ซึ่งวัสดุบางชนิดไม่มีข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมเลย ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบหรือเทียบเพื่อปรับแก้ไขแบบจำลองให้ใกล้เคียงมากที่สุด อย่างไรก็ตามรูปแบบของเจดีย์ และวัสดุที่ใช้จะแตกต่างกับในประเทศไทย เช่น เจดีย์ของต่างประเทศ เป็นลักษณะด้านล่างเปิดโล่ง สามารถเดินเข้าไปด้านในได้ ในขณะที่เจดีย์ของไทย มีลักษณะทึบหรือกลวงภายใน มีการสร้างทับไปแล้วก็ชั้น ไม่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นหากสนับสนุนให้มีการวิจัยรายละเอียดเชิงลึก เพื่อศึกษาพฤติกรรมความสามารถต้านทานแรงกระทำให้กับโครงสร้างโบราณสถานในประเทศไทยให้มากขึ้น จะทำให้การอนุรักษ์โบราณสถานในประเทศไทย มีการพัฒนาและเป็นไปตามหลักวิชาการทางวิศวกรรมอย่างถูกต้อง

1.3 วัตถุประสงค์

1. จำลองโครงสร้างโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างน้อย 1 หรือ 2 ตัวอย่าง
2. ศึกษาความมั่นคงแข็งแรง ตำแหน่งที่เป็นจุดอ่อนแอของโครงสร้างโบราณสถาน ที่นำมาเป็นตัวอย่าง ภายใต้แรงกระทำต่างๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกตัวเอง แรงลม และแรงแผ่นดินไหว ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและศรีเทพ
3. นำเสนอวิธีการซ่อม และเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้างโบราณสถานตัวอย่าง ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ
4. เผยแพร่ความรู้ไปสู่ผู้ที่เกี่ยวข้องเช่นวิศวกร สถาปนิกของกรมศิลปกร บุคลากรทางการศึกษา หรือผู้ที่มีความสนใจในการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์กับโครงสร้างโบราณสถาน ในรูปแบบการจัดสัมมนา

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

แผนการดำเนินงานรวมทั้งวิธีดำเนินการวิจัย วิธีการเก็บข้อมูล ประกอบด้วยกัน 6 ขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงสร้างโบราณสถานในรูปแบบ 3 มิติ

ในขั้นตอนนี้จะทำข้อมูลที่ได้จากการนำข้อมูลภาพถ่ายและประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติ (Digital image processing) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูก discretized เชิงตัวเลขให้เป็นตำแหน่งพิกัดของโครงสร้างโบราณสถาน จากโครงการย่อย “การพัฒนาแนวทางการสำรวจและประเมินความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถาน” มาใช้เป็น input data ให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากนั้นจึงนำข้อมูลคุณสมบัติวัสดุที่ได้จากโครงสร้าง จริง เช่น กำลั้งอัด โมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้จากโครงการย่อย “การพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย” มาป้อนให้กับคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2. ทำการตรวจสอบโบราณสถานภายใต้แรงกระทำต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักตัวเอง แรงลม และแรงแผ่นดินไหว

น้ำหนักของโครงสร้างโบราณสถานถือว่ามีความสำคัญนอกจากจะใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างแล้ว ยังทำให้เข้าใจพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลองอีกด้วย โดยหน่วยน้ำหนักจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการสร้างจากโครงการย่อย “การพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย”

แรงลม โครงการนี้จะทำการศึกษาวเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานภายใต้แรงลม เนื่องจากโบราณสถานบางแห่งในจังหวัดอยุธยาตั้งอยู่ในที่โล่งแจ้ง มีโอกาสที่จะเกิดแรงลมจากผลของการกรรโชกของลม (Gust effect) โดยการคำนวณค่าแรงลมจะใช้ค่าตาม มยผ. 1311-50

แรงแผ่นดินไหว โบราณสถานที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ ก่อสร้างในพื้นที่ดินปานกลาง ซึ่งแม้ว่าจังหวัดสุโขทัยจะไม่ได้ตั้งอยู่บนรอยเลื่อนก็ตาม แต่หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว คลื่นแผ่นดินไหวสามารถเดินทางผ่านชั้นดิน ส่งถ่ายมาเป็นแรงให้กับตัวของโครงสร้าง โดยการวิเคราะห์จะใช้แรงแผ่นดินไหว

ด้วยกราฟสเปกตรัมตอบสนองเชิงอัตราเร่ง (Acceleration Response Spectrum) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของ มยผ. 1301/1302-61 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวฉบับที่มีการปรับปรุงล่าสุดสำหรับประเทศไทย ซึ่งมีข้อมูลความเร่งในทุกอำเภอของประเทศไทยรวมทั้ง พื้นที่ของอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและศรีสัชนาลัยด้วย โดยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวถึงว่าอยู่ในระดับกลางสำหรับในประเทศไทย

3. วิเคราะห์การกระจายหน่วยแรง ความเครียด และกลไกการรับน้ำหนักของโครงสร้างโบราณสถาน
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานภายใต้แรงกระทำรูปแบบต่างๆ จะทำให้ทราบการกระจายของหน่วยแรง ความเครียด ตามตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมีประโยชน์ในการระบุตำแหน่งวิกฤติภายในโครงสร้าง ซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่หน่วยแรง และความเครียดสูง ซึ่งจะทำให้ทราบต่อไปว่า หากการวิบัติเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้แล้ว จะลุกลามไปที่จุดอื่นๆ หรือไม่ อย่างไร เพื่อหาแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานได้ทันทั่วทั้ง

4. นำเสนอวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานในรูปแบบต่างๆ
จากตำแหน่งที่มีความวิกฤตจากแรงกระทำต่างๆ เช่น การใช้วิธีอัดฉีดน้ำปูน หุ้มด้วยเฟอโรซีเมนต์ หุ้มด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ การเสริมเหล็ก การเสริมโครงสร้างด้านใน การปรับปรุงคุณสมบัติของดินและอิฐขั้นฐาน ฯลฯ โดยทำการทดลองเสริมกำลังโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่ได้ทำการเสริมกำลังแล้ว เพื่อศึกษาการกระจายของความเค้นและความเครียดตลอดจนกลไกการรับแรงในกรณีโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังแล้ว จะทำให้ทราบประสิทธิภาพการเสริมกำลังในวิธีต่างๆ

5. จัดอบรมสัมมนาเพื่อให้ความรู้
ในขั้นตอนนี้จะนำองค์ความรู้ที่ได้รวบรวมจากโครงการในเฟสที่ 1 มาทำการเผยแพร่ ซึ่งประกอบด้วย การจำแนกรูปแบบของโครงสร้างโบราณสถานในเชิงวิศวกรรม แนวทางในการอนุรักษ์โบราณสถานของประเทศไทย การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างโบราณสถาน การวิเคราะห์ผล ตลอดจนแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถาน เพื่อให้ผู้วิศวกรผู้ออกแบบ วิศวกร สถาปนิก ของกรมศิลปากร ซึ่งมีหน้าที่ในการดูแลรักษาและอนุรักษ์โบราณสถานในประเทศไทย ตลอดจน อาจารย์ นักวิจัย นิสิตปริญญาโท ปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และสาขาสถาปัตยกรรม หรือผู้รับเหมา และวิศวกรในท้องถิ่นที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมโครงสร้างโบราณสถาน นำไปประยุกต์ในการใช้งาน ให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมที่ถูกต้อง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

Output

- ได้เผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ การเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้กับบุคลากรในหน่วยงานที่มีความรับผิดชอบโดยตรง

Outcome

- ทำให้ทราบความแตกต่างของพฤติกรรมของโครงสร้างระหว่างโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ กับโครงสร้างโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์อยุธยา
- ทำให้ทราบตำแหน่งที่มีความอ่อนแอของโครงสร้างโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ ภายใต้แรงกระทำต่างๆ
- ได้แนวทางในการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานบริเวณภาคเหนือตอนล่าง และบริเวณใกล้เคียง หรือในกรณีลักษณะวางบนชั้นดินแข็ง ความรุนแรงของแผ่นดินไหวอยู่ในระดับปานกลางสำหรับพื้นที่ประเทศไทย

Impact

- หน่วยงานภาครัฐ อาทิ กรมศิลปากร กรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถนำแนวทาง หรือความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการร่างมาตรฐานการซ่อมหรือเสริมกำลังให้กับโบราณสถาน
- บริษัทเอกชนหรือผู้รับเหมาสามารถนำผลการศึกษาไปใช้ในเป็นแนวทางในการซ่อมโครงสร้างโบราณสถาน
- สามารถนำไปเป็นหัวข้อวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท หรือปริญญาเอก ได้เพื่อผลิตบุคลากรทางการศึกษา ทั้งยังจะช่วยกระตุ้นให้เกิดการผลิตงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันเพื่อต่อยอดความคิดของการวิจัยในอนาคตได้

บทที่ 2

ผลการสำรวจอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย

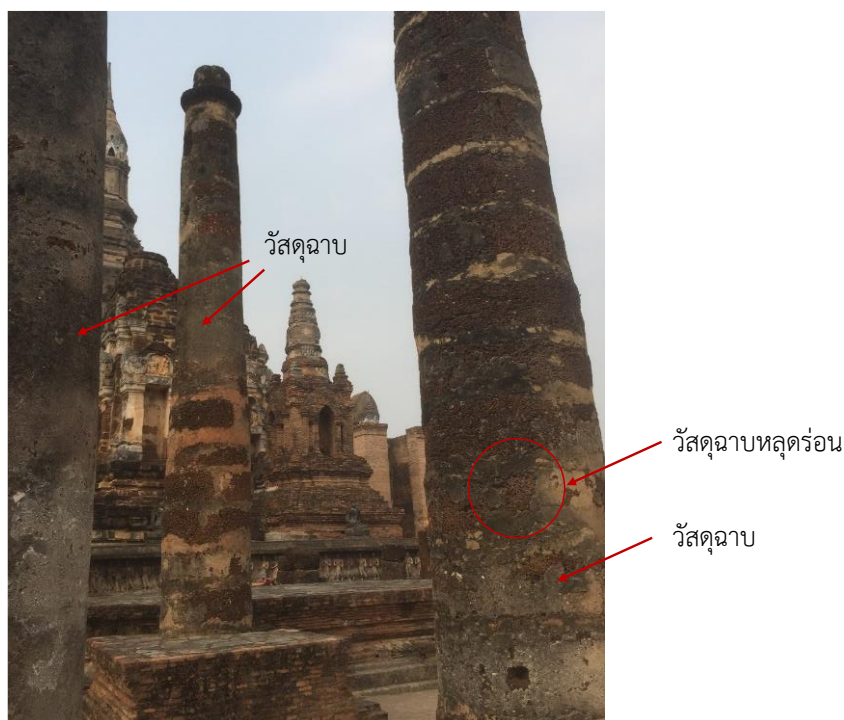
การสำรวจโบราณสถานโดยการสำรวจแบบตรวจพินิจ (visual inspection) อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัยระหว่างวันที่ 19-20 มกราคม พุทธศักราช 2563 โดยทีมวิจัยได้ทำการสำรวจโบราณสถานต่างๆ โดยมีรายละเอียดลักษณะโครงสร้างและความเสียหายดังนี้

2.1 อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ห่างจากตัวจังหวัดสุโขทัยไปทางทิศตะวันตกประมาณ ๑๒ กิโลเมตร ถนนจรดวิถีถ่อง ทางหลวงหมายเลข 12 สายสุโขทัย-ตาก บริเวณพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยครอบคลุมพื้นที่กว่า 70 ตารางกิโลเมตร (http://www.sukhothai.go.th/tour/tour_01.htm) พรทิพย์ (2547) สรุปรูปแบบศิลปะการก่อสร้างในสมัยสุโขทัย ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ พ.ศ. 1762 ถึง พ.ศ. 1981 ว่าการก่อสร้างศาสนสถานส่วนใหญ่เป็นระบบผนังรับน้ำหนัก และหลังคาเก๋อหีบ หรือผนังรับน้ำหนักโครงหลังคาซึ่งเป็นโครงจั่วไม้ รวมถึงมีการใช้ระบบผนังรับน้ำหนักร่วมกับการใช้เสารับโครงจั่วหลังคา ซึ่งเสามีทั้งเสาไม้และเสาศิลาแลงก่อ วัสดุในการก่อสร้างนิยมใช้อิฐและศิลาแลงในการก่อสร้างโบราณสถาน ส่วนฐานรากของโบราณสถานใช้การปรับพื้นดินให้แน่น และการก่อศิลาแลงคล้ายเป็นกับกำแพงที่โอบดินบริเวณที่ก่อสร้างไว้ไม่ให้เกิดการพังทลาย สถาปัตยกรรมสถาปัตยกรรมเจดีย์ของสุโขทัยแบ่งออกได้เป็นสามลักษณะโดยลักษณะแรกเป็นทรงพุ่มข้าวบิณฑ์ หรือทรงดอกบัวตูม ซึ่งถือเป็นลักษณะเฉพาะของอาณาจักรสุโขทัยเท่านั้น โดยพบได้ที่เจดีย์วัดมหาธาตุ และเจดีย์องค์กลางที่วัดเจดีย์เจ็ดแถว ศรีสัชนาลัย ลักษณะที่สองเป็นเจดีย์ทรงลังกาหรือทรงระฆัง เช่น เจดีย์วัดช้างล้อม ส่วนรูปแบบที่สามเป็นทรงลังกาผสมศรีวิชัยซึ่งมีลักษณะเจดีย์เหมือนทรงลังกาแต่ตั้งอยู่บนฐานสูงรูปสี่เหลี่ยม เช่นเจดีย์บางองค์ของวัดเจดีย์เจ็ดแถว โบราณสถานที่เกิดขึ้นก่อนยุคสุโขทัยจะได้รับอิทธิพลมาจากสถาปัตยกรรมขอม เช่น ศาลาผาแดง เนื่องจากอยู่ภายใต้การปกครองของขอม อีกทั้งยังพบว่ามีโบราณสถาน เช่น พระปรางค์ 3 องค์ของวัดศรีสวาย ที่สันนิษฐานว่าสร้างขึ้นเพื่อเป็นเทวสถานในศาสนาฮินดูโดยสร้างส่วนฐานในยุคขอมและสร้างต่อจนเสร็จในยุคสุโขทัย เพื่อใช้เป็นศาสนสถาน (มานพ, 2546) ภายหลังจากสถาปนาอาณาจักรสุโขทัย สถาปัตยกรรมและศิลปกรรมมีการพัฒนาเป็นรูปแบบเฉพาะของตนเอง เช่น สถาปัตยกรรมทรงพุ่มข้าวบิณฑ์หรือพระพุทธรูปปางลีลา พร้อมทั้งรับพระพุทธศาสนาเข้ามา

จากการสำรวจตัวโบราณสถานพบว่ามีรายละเอียดดังนี้

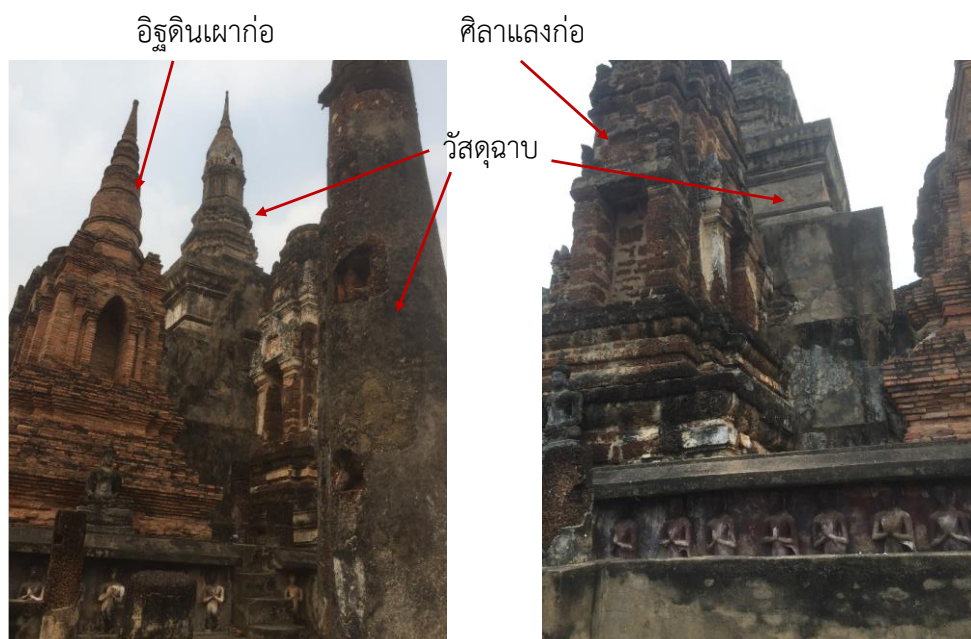
ภายในกลุ่มอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยประกอบด้วยวัดจำนวนหลายวัดเช่นวัดมหาธาตุ วัดศรีสวาย วัดสระศรี เป็นต้น จากการสำรวจวัดมหาธาตุซึ่งเป็นวัดที่ประกอบด้วย เจดีย์ประธานทรงพุ่มข้าวบิณฑ์หรือทรงยอดดอกบัวตูม, วิหาร, มณฑป, อุโบสถ และเจดีย์รายมีจำนวนมากถึง 200 องค์ (<https://thailandtourismdirectory.go.th/th/info/attraction/detail/itemid/2947>) พบว่าตัวอาคารมีการเสื่อมและเสียหายตามกาลเวลา โดยเสาที่หลงเหลืออยู่เป็นเสาศิลาแลงก่อ มีลักษณะการก่อสร้างโดยการตัดศิลาแลงเป็นท่อนๆ แล้วนำมาซ้อนต่อกัน ดังรูปที่ 2.1 จากรูปที่ 2.1 พบว่าระหว่างชั้นของชั้นส่วนศิลาแลงพบวัสดุเชื่อมประสานระหว่างชั้น มีร่องรอยวัสดุาบปิดผิว ซึ่งเกิดการกะเทาะหลุดร่อนไปตามกาลเวลา



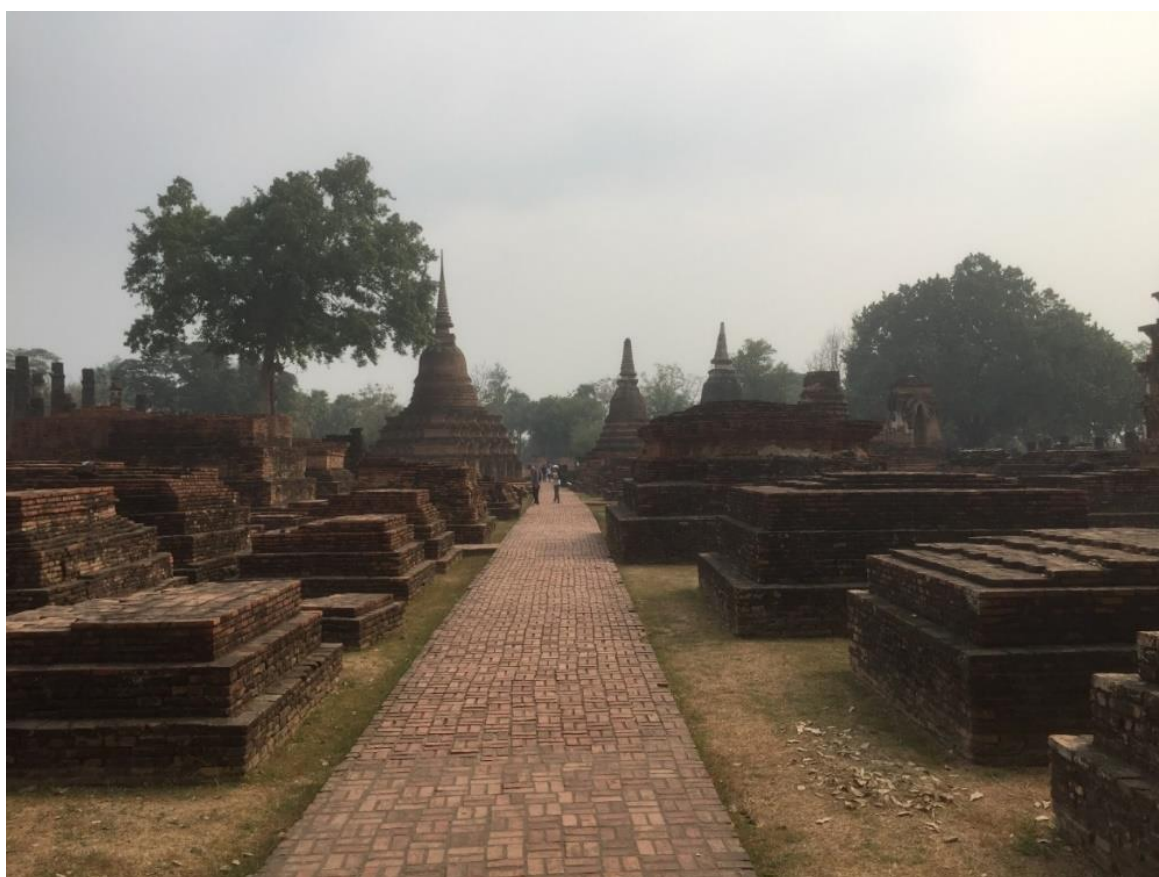
รูปที่ 2.1 เสาวัดมหาธาตุ

ตัวเจดีย์วัดมหาธาตุ มีลักษณะเป็นศิลาแลงก่อบางส่วนร่วมกับอิฐดินเผาก่อ โดยมีวัสดุเชื่อมประสาน และมีการฉาบปิดผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.2

พื้นที่บริเวณโดยรอบประกอบด้วยเจดีย์รายจำนวนมาก โดยในสภาพปัจจุบันพบว่าตัวเจดีย์รายส่วนใหญ่เสียหายเหลือเพียงแต่ฐานเจดีย์เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และมีจำนวนเจดีย์ที่ยังคงอยู่ในสภาพไม่พังทลายไม่มาก



รูปที่ 2.2 เจดีย์วัดมหาธาตุ รูปซ้ายแสดงอิฐดินเผา ก่อ รูปขวาแสดง ศิลาลังก่อ
 บางส่วนของเจดีย์มีวัสดุฉาบปิดผิว



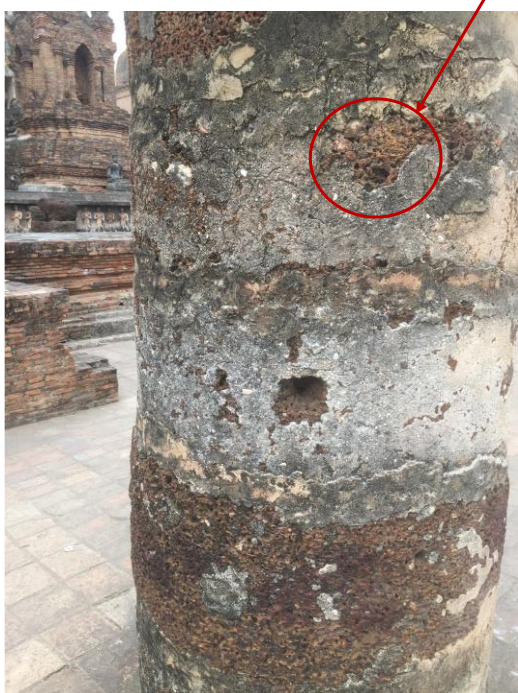
รูปที่ 2.3 เจดีย์ราย วัดมหาธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่เหลือเพียงฐานเจดีย์

จากการตรวจสอบบริเวณโดยรอบพบว่า สภาพความเสียหายนอกจากการพังทลาย จะพบการเกิดกร่อนเนื่องจากน้ำฝนสะสมรวมถึงการตากแดดเป็นระยะเวลานาน (รูปที่ 2.4) การแตกร่อนของวัสดุฉาบผิว (รูปที่ 2.5) รวมถึงความเสียหายจากความเป็นกรดที่เกิดจากแบคทีเรียสร้างขึ้น หรือการที่แบคทีเรียย่อยสลายซิลิกาแลงโดยตรง (สันสนีย์, 2528)



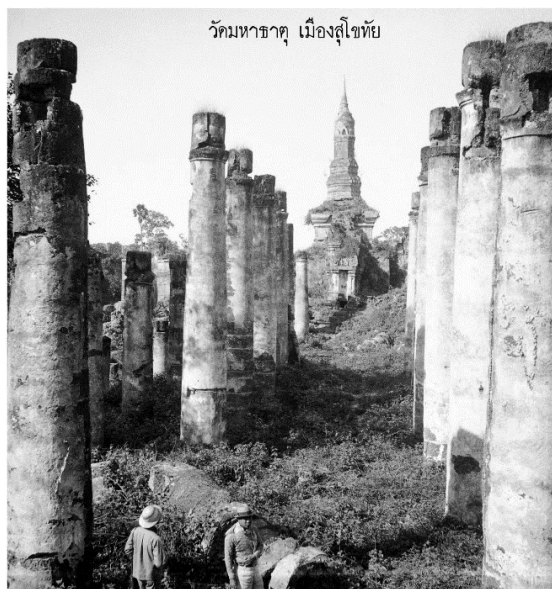
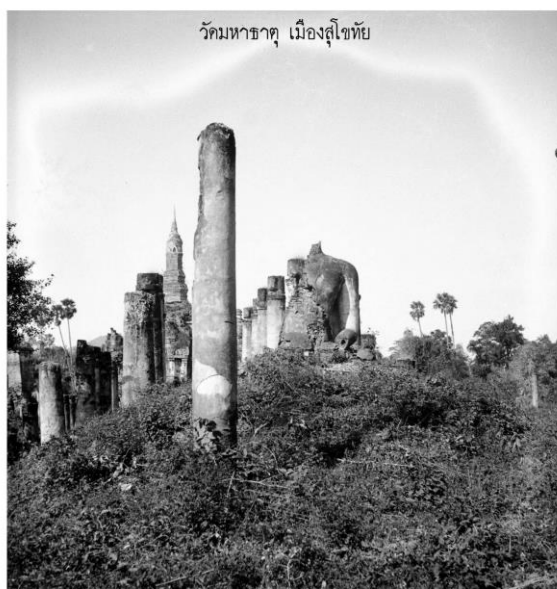
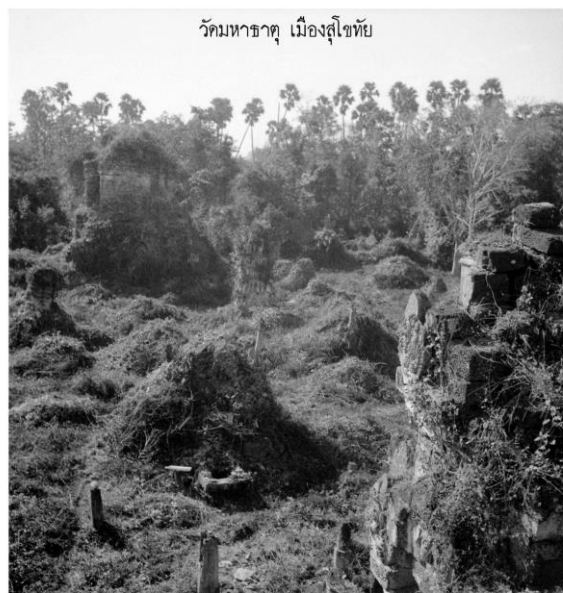
รูปที่ 2.4 การกร่อนเนื่องจากน้ำฝนสะสมรวมถึงการตากแดดเป็นระยะเวลานาน

วัสดุฉาบหลุดร่อน



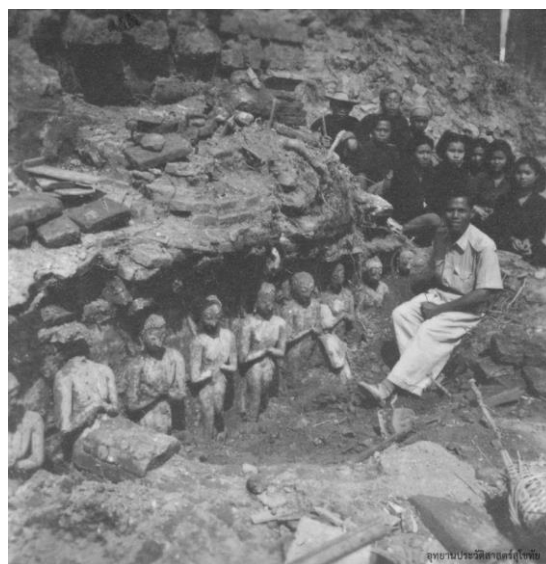
รูปที่ 2.5 ความเสียหายจากการหลุดร่อนของวัสดุฉาบผิว

จากข้อมูลภาพถ่ายเก่าวัดมหาธาตุ ที่ถ่ายเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ.2479 โดย ดร.โรเบิร์ต ลาริมอร์ เพนเดิลตัน (Dr.Robert Larimore Pendleton) พบว่าก่อนการบูรณะ วัดมหาธาตุถูกปล่อยทิ้งร้าง ปกคลุมด้วยหญ้า และต้นไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ภายหลังได้มีการบูรณะครั้งแรกในช่วงปี พ.ศ. 2496 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 บูรณะครั้งที่ 2 พ.ศ. 2508-2511 และบูรณะครั้งที่ 3 เมื่อ พ.ศ. 2524-2526 ซึ่งทำให้โครงสร้างบางส่วนเป็นส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นใหม่เพื่อทดแทนของเก่าที่เสียหายชำรุดไป



รูปที่ 2.6 วัดมหาธาตุ เมื่อปี พ.ศ.2479 ถ่ายโดย ดร.โรเบิร์ต ลาริมอร์ เพนเดิลตัน
(Dr.Robert Larimore Pendleton)

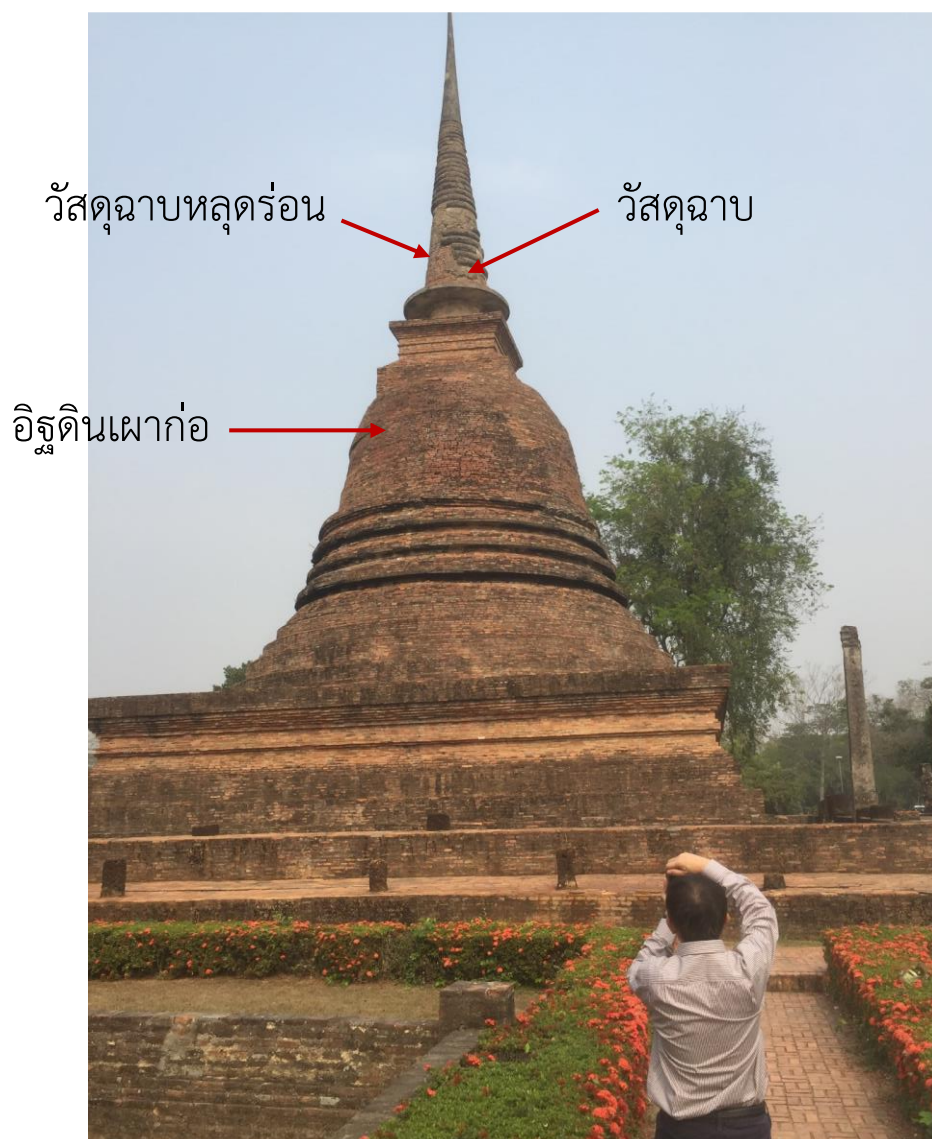
ที่มา: <https://www.facebook.com/skt.his.park/posts/4701875729864898>



รูปที่ 2.7 ภาพการบูรณะวัดมหาธาตุ เมื่อปี พ.ศ.2496

ที่มา: <https://www.facebook.com/skt.his.park/posts/1792693444116489>

การสำรวจในบริเวณวัดสระศรี ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของวัดมหาธาตุ และตั้งอยู่กลางสระน้ำขนาดใหญ่ พบว่าเจดีย์ประธานทรงระฆัง มีลักษณะเป็นอิฐดินเผาก่อและมีวัสดุฉาบปิดผิวในส่วนยอด โดยตัวเจดีย์ไม่สามารถระบุได้ว่าการฉาบปิดผิวหรือไม่เนื่องจากไม่มีสภาพบ่งชี้ที่ชัดเจน โครงสร้างของตัวเจดีย์อยู่ในสภาพดี วัสดุปิดผิวส่วนยอดหลุดร่อนเสียหายเป็นส่วนใหญ่ ไม่พบรอยแตกร้าวที่จะส่งผลต่อกำลังของตัวเจดีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ตัวเจดีย์ราย มีลักษณะเป็นอิฐดินเผาก่อและมีวัสดุฉาบปิดผิว โดยสภาพโครงสร้างของตัวเจดีย์อยู่ในสภาพดี วัสดุปิดผิวร่อนเสียหายเกือบทั้งหมด ยกเว้นส่วนยอดที่ยังคงสภาพดี ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 สภาพของเจดีย์ประธานทรงระฆัง วัดสระศรี



รูปที่ 2.9 สภาพของเจดีย์ราย วัดสระศรี

ตัวอุโบสถของวัดสระศรี พบว่ามีความเสียหายเกือบทั้งหมด โดยปัจจุบันเหลือเพียงเสา องค์กรพระประธาน แทนบุชา และแผ่นพื้น (รูปที่ 2.10) ตัวเสาของอุโบสถมีลักษณะเป็นเสาศิลาแลงก่อ โดยไม่สามารถระบุชัดได้ว่ามีวัสดุก่อระหว่างชั้นหรือไม่ และตัวเสาฉาบด้วยวัสดุฉาบผิว ปัจจุบันตัวเสาที่เหลืออยู่ยังคงสภาพอยู่ในตำแหน่ง และตั้งตรง ไม่เอียงเอน และไม่พบการเคลื่อนออกจากตำแหน่งของชิ้นส่วน แต่วัสดุฉาบปิดผิวเสียหายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 สภาพอุโบสถวัดสระศรี



รูปที่ 2.11 สภาพเสาวัดสระศรี

วัสดุศิลาแลงตัวเสามีสภาพกร่อนจากการกัดเซาะที่ผิว (รูปที่ 2.12) เนื้อศิลาแลงส่วนหนึ่งกร่อนออกไปจนเห็นเม็ดหิน และบางส่วนมีความชื้นสะสมเกิดตะไคร่และไลเคนในซอกของศิลาแลงซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.12 เสาศิลาแลงอุโบสถวัดสระศรี มีสภาพกร่อน

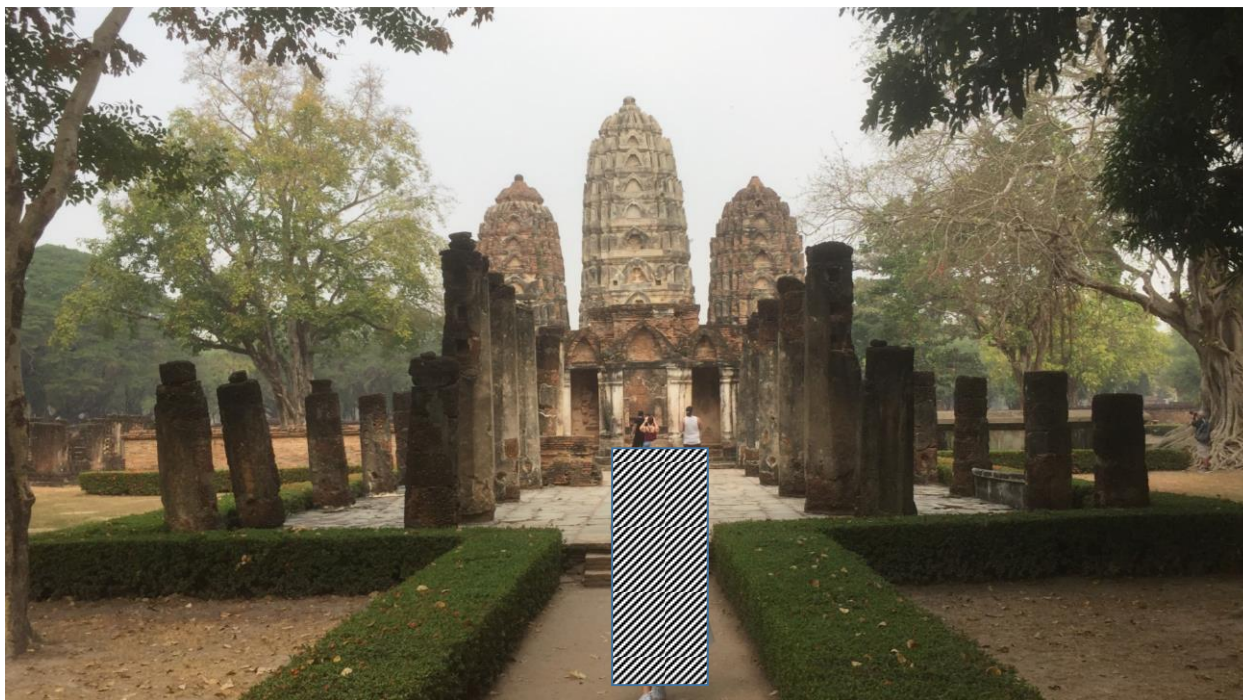


รูปที่ 2.13 เสาศิลาแลงกร่อนจนเห็นสภาพเม็ดหิน และเกิดตะไคร่และไลเคน (เสาศิลาแลงอุโบสถวัดสระศรี)

ทางด้านทิศใต้ของวัดมหาธาตุ เป็นที่ตั้งของวัดศรีสวาย โดยสภาพในปัจจุบันของวัดศรีสวายพบว่า บริเวณประตูทางเข้าเป็นอิฐดินเผาก่อ กำแพงเป็นศิลาแลง มีสภาพที่ยังคงรูปชัดเจน ตัวศิลาแลงมีการกัดกร่อนไปบ้างตามกาลเวลา (รูปที่ 2.14) ผ่านประตูเข้าไปจะพบตัวพระวิหารที่โครงสร้างหลังคาเสียหายหมดแล้ว เหลือเพียงตัวเสาซึ่งเป็นอิฐดินเผาก่อฉาบด้วยวัสดุปิตผิว โดยรวมเสาที่ยังคงมีสภาพค่อนข้างดี มีการหลุดร่อนของวัสดุฉาบปิตผิวบางส่วน ยกเว้นเสาบางต้นที่วัสดุฉาบปิตผิวร่อนออกเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ประตูทางเข้าและกำแพง วัดศรีสวาย



รูปที่ 2.15 พระวิหาร วัดศรีสวาย

ประตูชั้นที่สอง ด้านหลังพระวิหาร มีทับหลังเป็นหิน สภาพค่อนข้างที่จะสมบูรณ์ ตั้งอยู่บนอิฐดินเผา ก่อ ฉาบด้วยวัสดุปิดผิว ตัวฐานและทับหลังมีร่องการสึกหรอตามกาลเวลา ไม่พบความเสียหายที่รุนแรงที่ส่งผลต่อโครงสร้าง (รูปที่ 2.16)



รูปที่ 2.16 ทับหลังประตูทางเข้าวัดศรีสวาย

พระปรารค์ 3 องค์ ของวัดศรีสวาย ก่อด้วยอิฐดินเผาเป็นผนังรับน้ำหนัก พระปรารค์องค์กลาง ด้านในมีช่องเดินเข้าไปได้ ยอดเพดานมีแผ่นไม้ มีรูปบริเวณกึ่งกลางมีสภาพผุเปื่อยตามกาลเวลา (รูปที่ 2.17) ส่วนยอดเจดีย์ก่อที่บตัน



รูปที่ 2.17 เพดานพระปรารค์องค์กลางวัดศรีสวาย เป็นแผ่นไม้ มีช่องเปิด และมีสภาพผุบางส่วน

วัดศรีชุม ซึ่งตั้งอยู่นอกกำแพงเมืองด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือ พบว่าตัวพระวิหารมีสภาพปลักหักพังเหลือเพียงเสาและขอบกำแพงตัวพระวิหาร (รูปที่ 2.18) ตัวเสาเป็นศิลาแลงก่อและฉาบปิดผิวด้วยวัสดุฉาบ โดยตัวเสามีสภาพกร่อนตามกาลเวลา ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 และพบว่าบางส่วนของเสามีอิฐดินเผาแทรกตัวอยู่ ตัวกำแพงพระวิหารเป็นอิฐดินเผาก่อมีสภาพกร่อนตามกาลเวลา



รูปที่ 2.18 พระวิหารวัดศรีชุม



รูปที่ 2.19 สภาพเสาศาพระวิหารวัดศรีชุม



รูปที่ 2.20 ความเสียหายของเสาศาพระวิหารวัดศรีชุม

ตัวมณฑปที่ประดิษฐานพระพุทธรูปขนาดใหญ่ (พระอจนะ) ตัวอาคารรอบบริเวณองค์พระพุทธรูป (รูปที่ 2.21) เป็นผนังอิฐดินเผาก่อฉาบด้วยวัสดุฉาบปิดผิว และมีช่องเปิดเป็นจุดๆ โดยเป็นผนังรับน้ำหนัก โดยตัวผนังมีความสูงค่อนข้างมาก ตัววัสดุปิดผิวมีการหลุดร่อนเป็นบางส่วน ทั้งด้านในและด้านนอก (รูปที่ 2.22 และ 2.23) ทั้งนี้ วัดศรีชุมได้ถูกบูรณปฏิสังขรณ์ในช่วง รวปี พ.ศ. 2496-2499 (https://www.silpa-mag.com/old-photos-tell-the-historical-story/article_17681) ในยุคสมัยจอมพล ป.พิบูลย์สงคราม ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และ รูปที่ 2.25 ทำให้วัสดุและเทคนิคและวิธีการก่อสร้างแตกต่างไปจากไปสมัยสุโขทัย แต่ทั้งนี้ โครงสร้างโดยรวมยังคงสภาพแข็งแรงอยู่ โดยเฉพาะองค์พระพุทธรูป พระอจนะ



รูปที่ 2.21 ผนังภายในบริเวณองค์พระ วัดศรีชุม



รูปที่ 2.22 วัสดุฉาบผนังด้านนอกของอาคารประดิษฐานองค์พระวัดศรีชุม หลุดร่อนเป็นบางส่วน



รูปที่ 2.23 ภาพขยายแสดงการหลุดร่อนและการกร่อนของวัสดุฉาบผิว
ของอาคารประดิษฐานองค์พระวัดศรีชุม



รูปที่ 2.24 ภาพการบูรณะเศียรองค์พระอนนะ วัดศรีชุม

ที่มา: https://www.silpa-mag.com/old-photos-tell-the-historical-story/article_17681



รูปที่ 2.25 ภาพการบูรณะองค์พระอนนะ วัดศรีชุม

ที่มา: https://www.silpa-mag.com/old-photos-tell-the-historical-story/article_17681

วัดพระพายหลวง อยู่นอกกำแพงเมืองด้านเหนือ สภาพโดยรวม ตัวอาคารด้านหน้าเป็นอิฐดินเผาก่อฉาบปิดผิว มณฑปสภาพโดยรวมมีสภาพความเสียหายค่อนข้างสูง ตัวองค์พระนอนขนาดใหญ่พังทลาย พื้น

อาคารมีการทรุดตัวบางพื้นที่ องค์พระยืนและผนังด้านหลังสึกกร่อนสูง เหลือเพียงเค้าโครง ดังรูปที่ 2.26 ส่วนกลางเป็นส่วนพระวิหารซึ่งมีสภาพพังทลายเหลือเพียงเสา ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 อาคารส่วนหน้า (มณฑป) วัดพระพายหลวง พังทลายและพื้นไม่อยู่ในระนาบ



รูปที่ 2.27 พระวิหารวัดพระพายหลวง

พระปรารักษ์ 3 องค์ที่อยู่บริเวณด้านหลังเป็นศิลาแลงก่อ พบว่ามี 1 องค์ที่ยังคงสภาพดี (รูปที่ 2.28) ส่วนอีกสององค์พังทลายเหลือเพียงฐาน (รูปที่ 2.29)



รูปที่ 2.28 พระปรางค์วัดพระพายหลวง ยังคงสภาพดีวัสดุฉาบมีการกร่อนไปตามกาลเวลา



รูปที่ 2.29 พระปรางค์วัดพระพายหลวง พังทลายเหลือเพียงฐานและมีสภาพการกร่อนสูง

2.2 กลุ่มอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย

อุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัยตั้งอยู่ที่ ตำบลศรีสัชนาลัย อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย ในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์มีโบราณสถาน และโบราณวัตถุทั้งหมด 215 แห่ง สํารวจค้นพบแล้ว 204 แห่ง (http://www.sukhothai.go.th/tour/tour_02.htm) โดยมีแผนผังดังรูปที่ 2.30 จากการสำรวจโบราณสถานบางจุดได้แก่วัดช้างล้อม วัดเขาพนมเพลิง วัดเจดีย์เจ็ดแถว และวัดนางพญา ซึ่งทั้งหมดอยู่ในบริเวณกำแพงเมือง โดยสภาพกำแพงเมืองมีลักษณะเป็นกำแพงก่อจากศิลาแลง เป็นกำแพงสูงและเป็นกำแพงรับน้ำหนัก โดยตัวกำแพงมีสภาพการกร่อนตามกาลเวลา มีคราบตะไคร่และไลเคน ดังรูปที่ 2.31 บางส่วนมีการพังทลาย จากการสำรวจตัวโบราณสถานพบว่ามีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.30 แผนผังอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย



รูปที่ 2.31 กำแพงเมือง อุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย

วัดช้างล้อม (รูปที่ 2.32) บริเวณพระวิหารด้านหน้ามีลักษณะเป็นศิลาแลงก่อ ตัวเสามีการฉาบผิว โดยในปัจจุบันเหลือเพียงเสาและฐานกำแพงรอบอาคาร วัสดุฉาบผิวของเสาหลุดร่อนเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.32 วัดช้างล้อม

ส่วนหลังของวัดช้างล้อมเป็นเจดีย์ทรงลังกาตั้งอยู่บนฐานประทักษิณยกสูง ที่ฐานเจดีย์มีรูปปั้นช้างอยู่รายรอบ เหนือฐานประทักษิณมีพระพุทธรูปอยู่รายรอบ โดยรวมเป็นวัสดุศิลาแลงก่อและฉาบปิดผิว สภาพปัจจุบันพบว่าตัวเจดีย์ วัสดุฉาบหลุดร่อนเป็นบางส่วนและมีวัชพืชขึ้นอยู่ที่ใกล้ส่วนยอด บันไดทางขึ้นฐานประทักษิณ (รูปที่ 2.33) และราวกันตกโดยรอบเป็นวัสดุศิลาแลงสีกร่อนตามกาลเวลาแต่ยังอยู่ในสภาพดี ฐานประทักษิณยังคงมีสภาพที่ดี องค์พระพุทธรูปที่อยู่รายล้อม (รูปที่ 2.34) เป็นวัสดุศิลาแลงก่อและฉาบปั้นผิวเป็นรูปองค์พระ อยู่ภายในซุ้ม สภาพปัจจุบันมีความเสียหายพอสมควร องค์พระพุทธรูปบางส่วนสีกร่อนและกะเทาะออกจนเห็นวัสดุศิลาแลง



รูปที่ 2.33 เจดีย์ทรงลังกาบนฐานประทักษิณ



รูปที่ 2.34 พระพุทธรูปเหนือฐานประทักษิณ วัดช้างล้อม

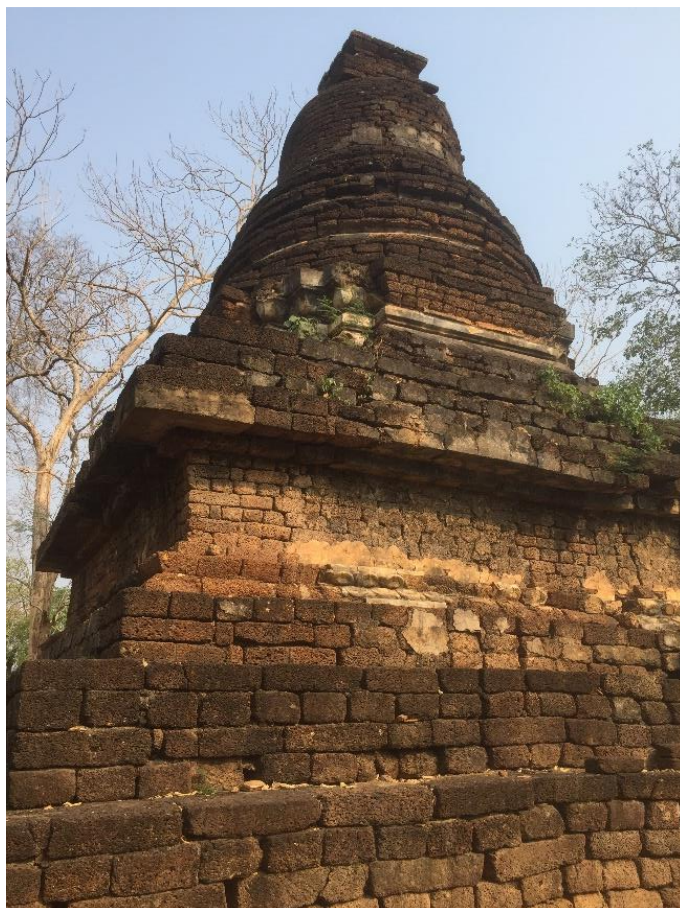
รูปปั้นช้างล้อมลอยตัว เป็นวัสดุก่อจากศิลาแลงและฉาบปิดผิว โดยวัสดุฉาบสีกร่อนและหลุดร่อนจนเห็นเนื้อศิลาแลง และวัสดุศิลาแลงแตกหักเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.35

เจดีย์รายเป็นวัสดุศิลาแลงก่อ สีกร่อนตามกาลเวลา ด้วยยอดเจดีย์หักและเสียหาย



รูปที่ 2.35 รูปปั้นช้างที่ฐานเจดีย์ วัดช้างล้อม

วัดเขาพนมเพลิง (รูปที่ 2.36) ตั้งอยู่บนยอดเขาพนมเพลิง ภายในกำแพงเมือง บ้านไต่ทางขึ้นเป็นศิลาแลง ตัวเจดีย์ทรงกลมก่อด้วยศิลาแลงบนฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยกสูง บางส่วนพบวัสดุฉาบผิว สภาพสีกร่อนตามเวลา มีตะไคร้และไลเคนขึ้น ส่วนฐานบางส่วนเกิดการทรุดตัวและไม่อยู่ในแนวระนาบ



รูปที่ 2.36 เจดีย์วัดเขาพนมเพลิง

วัดเจดีย์เจ็ดแถว ประกอบด้วยเจดีย์แบบต่างๆ และเจดีย์ราย มณฑป อาคารขนาดเล็กรวมกันจำนวนมาก รวมถึงตัวโบสถ์และพระวิหาร โดยเจดีย์ประธานของวัดเป็นเจดีย์ทรงพุ่มข้าวบิณฑ์ โดยพบว่าพระวิหารเป็นศิลาแลงก่อและฉาบผิว ตัวฐานเป็นผนังรับน้ำหนัก ปัจจุบันมีสภาพรกรักหักพัง เหลือเพียงฐานและเสาศิลาแลง (รูปที่ 2.37) มีการสีกกร่อน เกิดตะไคร่และเลนเกาะศิลาแลง ตัวเจดีย์เป็นวัสดุศิลาแลงก่อฉาบผิว ตัวเจดีย์ยังคงอยู่ในสภาพที่ดี (รูปที่ 2.38) ความเสียหายที่พบจะเป็นการกร่อนและหลุดร่อนของวัสดุฉาบผิว ส่วนยอดของเจดีย์บางส่วนหักและเสียหาย (รูปที่ 2.39)



รูปที่ 2.37 พระวิหาร วัดเจดีย์เจ็ดแถว



รูปที่ 2.38 เจดีย์ภายในวัดเจดีย์เจ็ดแถว



รูปที่ 2.39 เจดีย์ประธานทรงพุ่มข้าวบิณฑ์ วัดเจดีย์เจ็ดแถวยังคงมีสภาพดี

วัดนางพญา ตั้งอยู่ติดกับวัดสวนแก้วอุทยานใหญ่ ซึ่งอยู่ถัดจากวัดเจดีย์เจ็ดแถว วัดนางพญาเป็นศิลาแลงก่อฉาบปิดผิว ส่วนด้านหน้าเป็นพระวิหาร ซึ่งปัจจุบันมีสภาพปรักหักพัง เหลือเพียงส่วนฐานและเสาบางต้น (รูปที่ 2.40) และกำแพงศิลาแลงก่อฉาบปิดผิวที่มีลวดลายปูนปั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.41 ซึ่งมีความเสียหายวัสดุฉาบปิดผิวหลุดร่อน แตกหักเสียหาย เหลือให้เห็นภาพปูนปั้นเพียงบางส่วน ตัวเจดีย์ทรงกลมตั้งอยู่บนฐานประทักษิณ มีบันไดทางขึ้น วัสดุเป็นศิลาแลงก่อฉาบปิดผิว (รูปที่ 2.42) สภาพภายนอกมีสภาพสีกร่อนสูงเมื่อเข้าไปด้านใน จะพบว่าวัสดุศิลาแลง ยังคงมีสภาพดี ดังแสดงในรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.40 สภาพโดยรวมของพระวิหารด้านหน้าวัดนางพญา



รูปที่ 2.41 ภาพปูนปั้นบนผนัง วัดนางพญา



รูปที่ 2.42 เจดีย์วัดนางพญา



รูปที่ 2.43 สภาพศิลปะแลงบนเพดานด้านในเจดีย์วัดนางพญา

2.3 สรุปผลการสำรวจอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย

จากการสำรวจการเสื่อมสภาพและสภาพความเสียหายของโบราณสถานอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยและอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัยพบว่า วัสดุทางโครงสร้างแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ศิลาแลงก่อฉาบด้วยวัสดุฉาบปิดผิว โดยพบได้ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยบางส่วน และทั้งหมดของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย และวัสดุประเภทอิฐดินเผาก่อและฉาบด้วยวัสดุฉาบปิดผิว ที่พบได้ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยบางส่วน ลักษณะทางโครงสร้างของเจดีย์เป็นลักษณะผนังรับแรงและมีช่องเปิดภายในบางส่วน บางส่วนเป็นเจดีย์ตัน ตัววิหารและโบสถ์ เป็นลักษณะโครงสร้างแบบเสาคาน ผนังเป็นผนังรับแรง

โบราณสถานที่สำรวจพบว่าส่วนใหญ่มีสภาพรกรากหักพัง โดยความเสียหายเกิดขึ้นในลักษณะของการพังทลายลงมา การสึกกร่อนของศิลาแลงตามกาลเวลาเนื่องจากการเซาะของน้ำฝน การเกิดตะไคร่และไลเคนที่ทำให้เกิดการเก็บกักความชื้น ส่งผลให้วัสดุเสื่อมตามกาลเวลา ในส่วนของอาคารที่ยังคงสภาพทางโครงสร้างพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นความเสียหายเฉพาะจุด เช่น การหักของยอดเจดีย์ การหลุดร่อนของวัสดุฉาบผิว การแตกหักของศิลาแลงเฉพาะจุด หรือการสึกกร่อนของศิลาแลงตามกาลเวลาจากน้ำฝน รวมถึงการทรุดตัวของพื้นดินที่รองรับ ทั้งนี้โบราณสถานบางส่วนได้มีการบูรณปฏิสังขรณ์ในอดีต เช่น วัดมหาธาตุ และวัดศรีชุม ซึ่งอาจทำให้ตัวเนื้อวัสดุและโครงสร้างแตกต่างจากที่ก่อสร้างขึ้นดั้งเดิม

บทที่ 3

การตรวจสอบโบราณสถานภายใต้แรงกระทำต่างๆ ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

คณะผู้ดำเนินการวิจัยได้นำข้อมูล แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากทีม ของ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม มาทำการศึกษาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาความมั่นคงแข็งแรงของเจดีย์ตัวอย่างในอุทยาน ประวัติศาสตร์สุโขทัย และศรีเทพ ภายใต้แรงกระทำต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกตัวเอง แรงลม และแรง แผ่นดินไหว เพื่อหาแนวทางในการซ่อมและเสริมกำลังต่อไป

3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในเขตอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

เป็นการทดลองจำลองโครงสร้างเจดีย์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของ โครงสร้างเจดีย์ภายใต้แรงกระทำต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกจากตัวเอง แรงลม และแรงแผ่นดินไหว เพื่อให้ เกิดความเข้าใจพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างเจดีย์ หาดำแหน่งที่เป็นจุดที่มีความอ่อนแอ และหาแนวทางการจำลองโครงสร้างในการซ่อมเสริมกำลังในจุดที่มีความอ่อนแอได้อย่างถูกต้อง

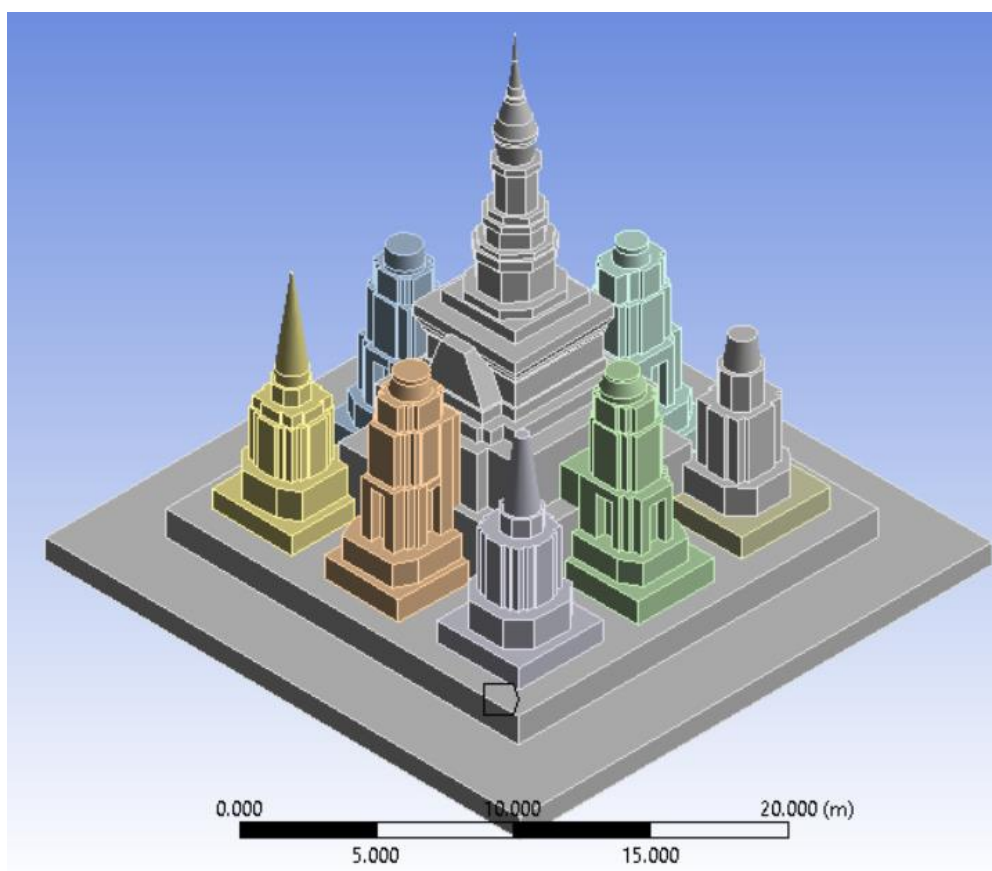
เจดีย์ที่ใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้เลือกเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์ สุโขทัย จ.สุโขทัย เนื่องจากเป็นเจดีย์ที่มีความสำคัญ มีรูปแบบของศิลปะสมัยสุโขทัยอย่างชัดเจน โดยทีมวิจัย ได้มีการสำรวจ เก็บข้อมูลอย่างละเอียด เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองขึ้นมา จากวิธีการ structural form motion (SFM) ตรวจวัดคุณสมบัติพลศาสตร์โครงสร้าง และมีการเก็บข้อมูลผลการทดสอบวัสดุเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย (ต่อ)

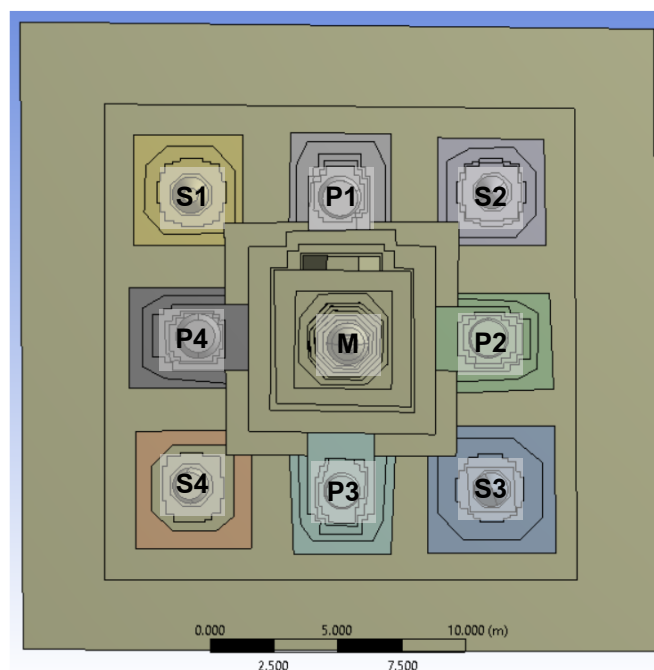


รูปที่ 3.2 ภาพจำลองด้วยโปรแกรม 3 มิติ เจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

3.1.1 การสร้างแบบจำลองเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

เจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ประกอบด้วยเจดีย์ประธาน 1 องค์ตรงกลาง มีลักษณะเป็นเจดีย์ทรงดอกบัวตูม (หรือพุ่มข้าวบิณฑ์) แสดงถึงเอกลักษณ์ของศิลปะสุโขทัยแบบบริสุทธิ์รายล้อมด้วยปราสาททิศ 4 องค์ ที่แสดงอิทธิพลศิลปะขอม และเจดีย์ประจำมุมอีก 4 องค์เป็นเจดีย์ทรงปราสาทห้ายอด ที่มีอิทธิพลของศิลปะล้านนา รอบฐานเจดีย์ประธานประดับด้วยภาพปูนปั้นรูปพระสาวกในท่าอัญชลีดินประเทกษณโดยรอบ จำนวน 168 รูป แบบจำลองมีฐานใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และยกฐานขึ้นอีกระดับหนึ่งเพื่อรองรับเจดีย์องค์หลักและเจดีย์องค์รองทั้งแปด เจดีย์วัดมหาธาตุที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ เป็นเจดีย์ที่มีการบูรณะครั้งล่าสุดในปี พ.ศ. 2526 กำหนดแกนอ้างอิง x ซี่ไปทางทิศตะวันออกซึ่งเป็นด้านหน้าขององค์เจดีย์ที่ต่อเนื่องกับแนวเสาวิหาร แกนอ้างอิง y ซี่ไปทางทิศเหนือ และแกนอ้างอิง z แสดงถึงระดับในแนวดิ่ง

ระดับฐานรองรับองค์เจดีย์อยู่ที่ระดับ 2.28 เมตรเหนือพื้นดิน ส่วนฐานของส่วนยอดทรงพุ่มข้าวบิณฑ์อยู่ที่ระดับ 17.91 เมตร และส่วนยอดของเจดีย์มีความสูงเหนือระดับพื้นดินประมาณ 23.22 เมตร รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังขององค์เจดีย์ พบว่าฐานขององค์เจดีย์มีลักษณะใกล้เคียงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ละด้านมีความยาวอยู่ในช่วง 24.30 ถึง 24.76 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 24.57 เมตร ดังนั้นพื้นที่ฐานขององค์เจดีย์จึงมีค่าประมาณ 604 ตารางเมตร ทั้งนี้เพื่อความสะดวก ในการศึกษาจะกำหนดเรียกเจดีย์องค์รองทั้งแปดตามลำดับหมายเลขที่ระบุในรูปที่ 3.3 โดยเจดีย์องค์หลัก (M) องค์ปรangkหมายเลข P1 ถึง P4 เป็นโครงสร้างประเภทศิลาแลงที่ต่อเชื่อมกับเจดีย์องค์หลักทางทิศหลักทั้งสี่ และเจดีย์รองหมายเลข S1 ถึง S4 เป็นโครงสร้างอิฐก่อที่แยกจากเจดีย์องค์หลักและตั้งอยู่ทางทิศรองบริเวณมุมของฐาน



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งขององค์เจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

เมื่อนำแบบจำลองเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จาก ทีมวิจัยของ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม ที่ได้ทำการศึกษา การพัฒนาแนวทางการสำรวจ และประเมินความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถาน มาสร้างโดยใช้ solid element แบบ 3 มิติ ภายใต้สมมุติฐาน 3 ข้อคือ โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์ และมีความต่อเนื่องกันระหว่างก้อนศิลาแลง ก้อนอิฐ และปูนทราย โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น และดินที่ฐานรากของโครงสร้างยึดรั้งได้สมบูรณ์

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง ใช้ค่าที่ได้จากทีมวิจัยของ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม ซึ่งได้ทำการสอบเทียบกับค่าที่วัดได้จากสนาม

ศิลาแลงมีโมดูลัสยืดหยุ่น 850 เมกกะปาสคาล ค่าอัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.32 กำลังรับแรงดึงประลัยเท่ากับ 0.2 เมกกะปาสคาล และกำลังอัดประลัยเท่ากับ 5.0 เมกกะปาสคาล (แสงสุรีย์ และคณะ 2563)

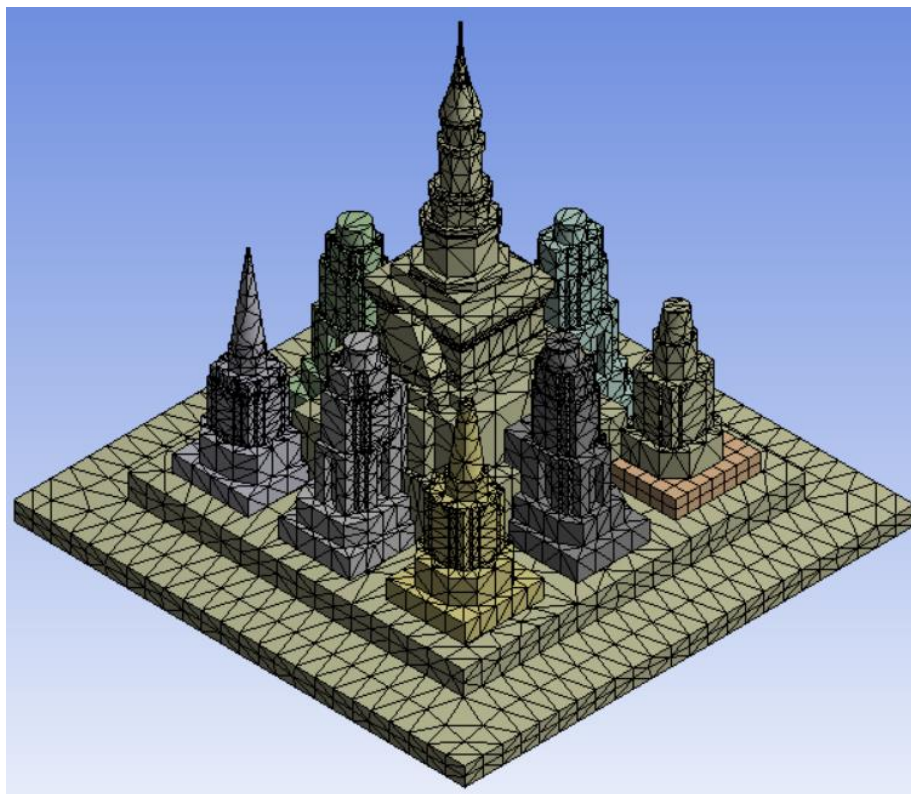
อิฐก่อใช้ค่าโมดูลัส เท่ากับ 834 เมกกะปาสคาล ค่าอัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.216 หน่วยน้ำหนักของวัสดุเท่ากับ 1,800 กก./ม.³ กำลังรับแรงดึงประลัยเท่ากับ 0.2 เมกกะปาสคาล และกำลังอัดประลัยของวัสดุเท่ากับ 3.0 เมกกะปาสคาล (Wonganan, N. et al., 2020)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชิงกลเจดีย์ประธาน วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

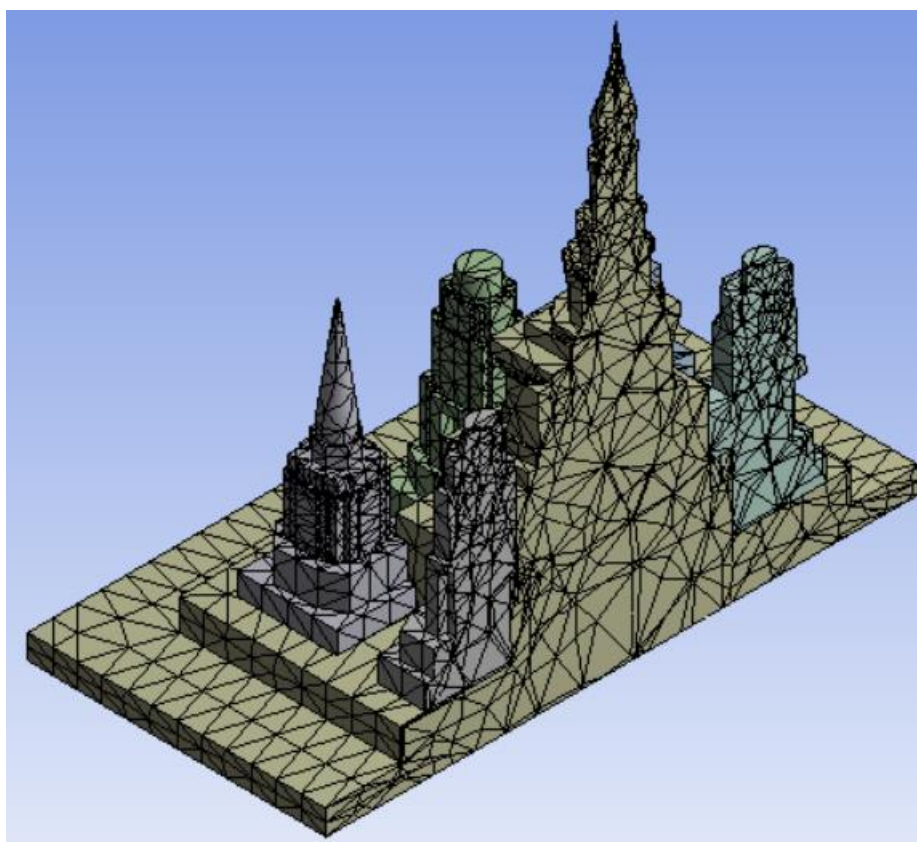
ส่วนโครงสร้าง	วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วนปัวซอง
เจดีย์องค์ประธาน (M)	ศิลาแลง	2,270	850	0.32
เจดีย์องค์ปราง (P1-P4)	ศิลาแลง	2,270	850	0.32
เจดีย์รอง (S1-S4)	อิฐก่อ	1,800	834	0.216
ฐาน	ศิลาแลง	2,270	850	0.32

แบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของวัดมหาธาตุ แสดงดังรูปที่ 3.4 มีชิ้นประกอบกันจำนวนทั้งสิ้น 45,403 ชิ้นส่วน โดยมีจุดต่อรวมกันทั้งหมด 83,252 จุดต่อ รูปที่ 3.5 แสดงเจดีย์ที่เป็นศิลาแลง และรูปที่ 3.6 แสดงเฉพาะเจดีย์ที่เป็นอิฐก่อ

เนื่องจากงานวิจัยได้ใช้สมมุติฐานให้วัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น โดยตัดผลของปัจจัยที่มีผลกระทบอื่นๆออกไป โดยปรับเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นให้สอดคล้องกับผลการเก็บข้อมูลพลศาสตร์จากในสนาม ดังนั้นแบบจำลองจึงสมมุติให้ลักษณะของฐานรากยึดกับพื้นดินเป็นแบบยึดแน่น (Fixed) โดยตัดปัจจัยเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับโครงสร้างดินออกไป ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ โดยจะมีการปรับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามลักษณะของชั้นดินได้ฐานอีกครั้งตามกราฟสเปกตรัมผลตอบแทนจากข้อมูลการเจาะสำรวจดินในบริเวณที่ใกล้เคียงกับที่ตั้งของเจดีย์มากที่สุด นอกจากนี้แล้วแบบจำลองยังไม่ได้รวมผลของปัจจัยความเสื่อมสภาพของวัสดุ หรือความชื้น ที่พื้นผิวของแบบจำลอง เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผล

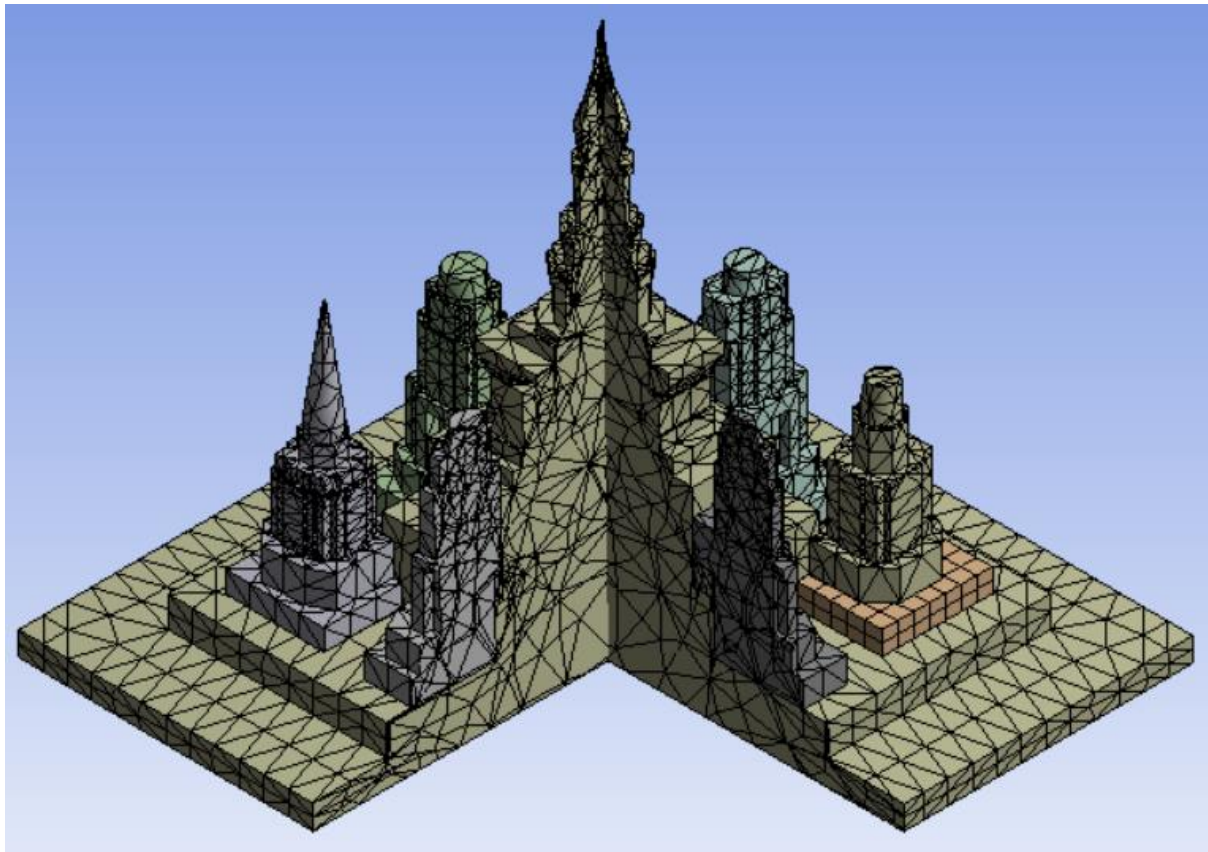


(ก) ภายนอก



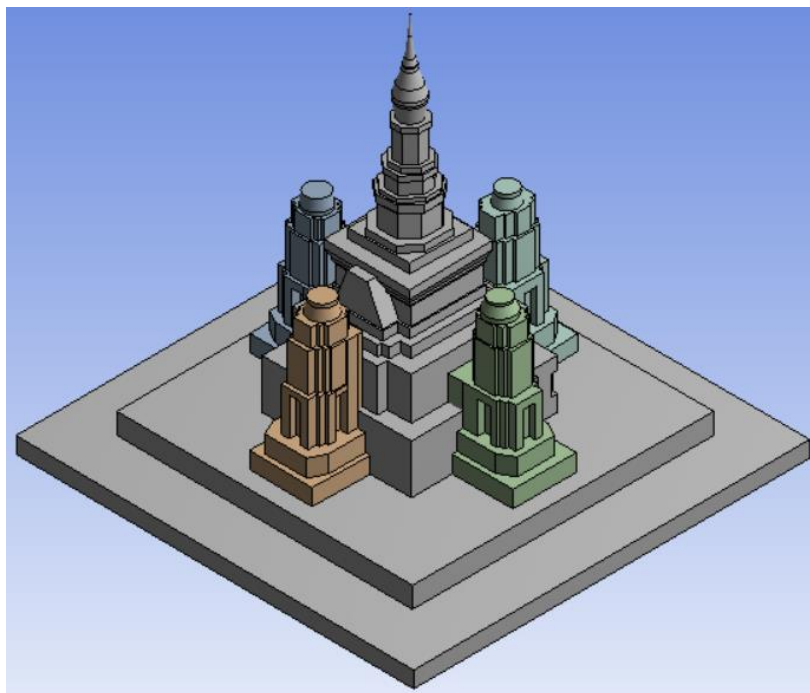
(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์วัดมหาธาตุ

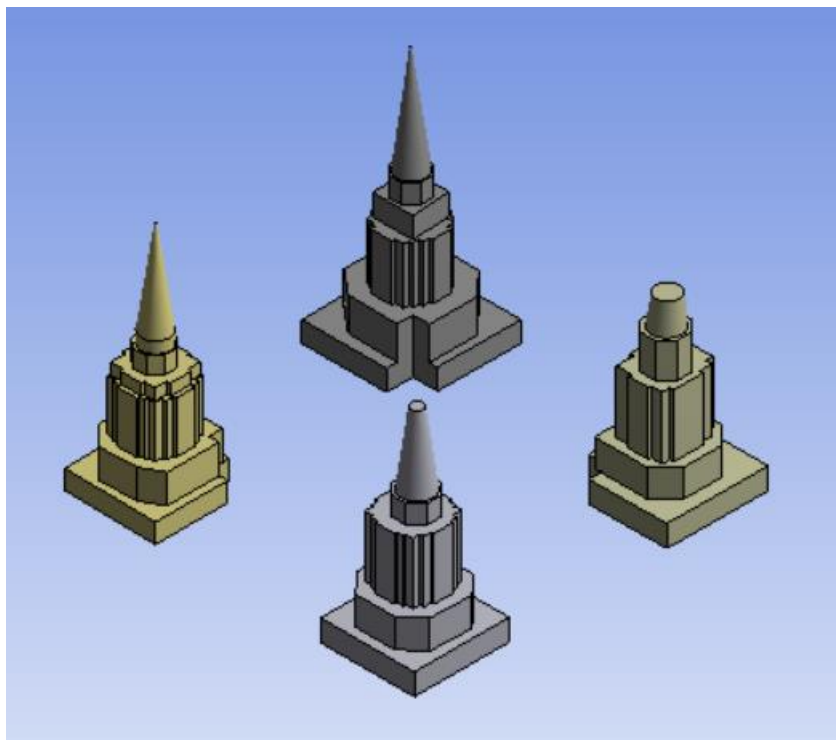


(ค) รูปตัด

รูปที่ 3.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เจดีย์วัดมหาธาตุ (ต่อ)



รูปที่ 3.5 เจดีย์ที่เป็นส่วนศิลาแลง



รูปที่ 3.6 เจดีย์ที่เป็นส่วนอิฐก่อ

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์ 4 ชั้นตอน ได้แก่

3.1.1.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์
ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยทำการศึกษารูปแบบการสั่นไหว 6 รูปแบบแรก

3.1.1.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์
โดยการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ (self weight) เพื่อหาค่าหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเจดีย์ ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุ (unit weight) เท่ากับ $2,270 \text{ กก./ม.}^3$ และ $1,800 \text{ กก./ม.}^3$ สำหรับศิลาแลง และอิฐก่อตามลำดับ

3.1.1.3 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์ หรือแรงแผ่นดินไหว
แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยใช้กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองตาม มยผ. 1301/1302-61 ซึ่งมีสเปกตรัมผลตอบสนองของทุกอำเภอในประเทศไทย โดยวัดมหาธาตุ ตั้งอยู่ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ซึ่งตั้งอยู่ที่เทศบาลตำบลเมืองเก่า อ.เมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย จึงได้เลือกสเปกตรัมดังกล่าวมาทำการ

วิเคราะห์ โดยกราฟสเปกตรัมผลตอบสนอง สำหรับการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของอำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย ที่ใช้ในการคำนวณ มีวิธีการสร้างดังนี้

- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) เท่ากับ 0.449g และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) เท่ากับ 0.117g สำหรับ อำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย ตามตารางที่ 1.4-1 ของ มยผ.1301/1302-61 โดยนำมา แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (ที่มา มยผ.1301/1302-61)

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง	
		S_s	S_1
สุโขทัย	กงไกรลาศ	0.431	0.109
	คีรีมาศ	0.435	0.111
	ทุ่งเสลี่ยม	0.490	0.126
	บ้านด่านลานหอย	0.451	0.120
	<u>เมืองสุโขทัย</u>	<u>0.449</u>	<u>0.117</u>
	ศรีนคร	0.621	0.154
	ศรีสัชนาลัย	0.526	0.131
	ศรีสำโรง	0.464	0.118
	สวรรคโลก	0.503	0.126

- ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินของกรมโยธาธิการและผังเมือง ใน อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย บริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งของเจดีย์มากที่สุด จำนวน 2 หลุม มาทำการวิเคราะห์เพื่อ จำแนกประเภทของดิน พบว่าเป็นประเภท D (รายละเอียดการจำแนกประเภทของดินอยู่ใน ภาคผนวก ก)
- F_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งเจดีย์ สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที (F_a) จาก ตาราง 1.4-2 ตาม มยผ.1301/1302-61 มีค่าเท่ากับ $F_a = 1.44$
- F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งเจดีย์ สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที จากตารางที่ 1.4-2 ตาม มยผ.1301/1302-61 มีค่าเท่ากับ $F_v = 2.33$ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_a (ที่มา มยผ.1301/1302-61)

ประเภทของ ชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ที่คาบ 0.2 วินาที (g)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณีๆ ไป				

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_v (ที่มา มยผ.1301/1302-61)

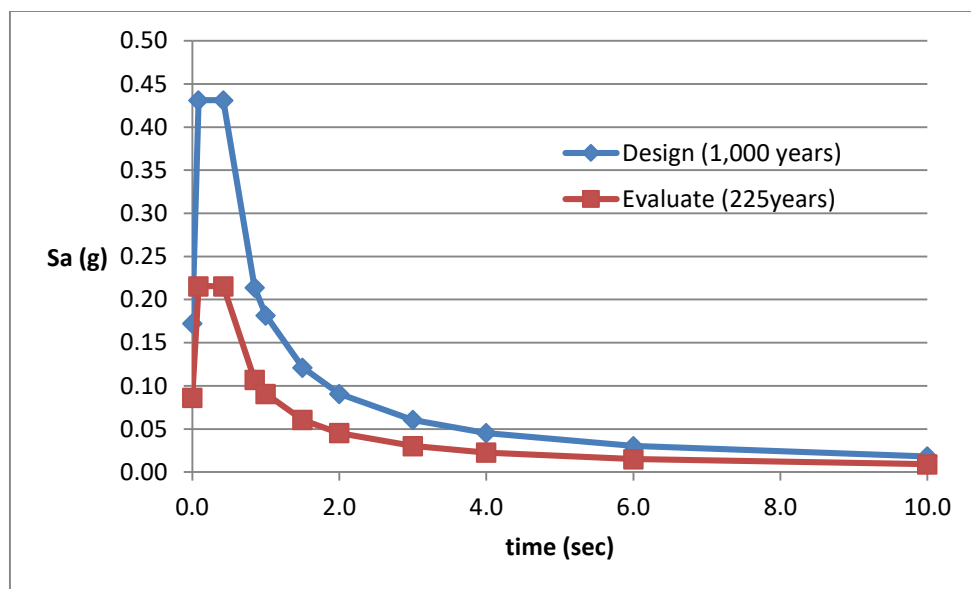
ประเภทของ ชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ที่คาบ 0.2 วินาที (g)				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_s = 0.4$	$S_s \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณีๆ ไป				

- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร $S_{MS} = F_a S_s = 1.44 \times 0.449g = 0.647g$ ค่าดังกล่าวเป็นความเร่งของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดที่คาบการเกิดซ้ำ 2,500 ปี
- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร $S_{M1} = F_v S_1 = 2.33 \times 0.117g = 0.273g$
- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบมีค่าเท่ากับระดับแผ่นดินไหวที่มีคาบการเกิดซ้ำ 1,000 ปี หรือมีความรุนแรงสองในสามเท่าของแผ่นดินไหวที่มีคาบการกลับ 2,500 ปี สามารถคำนวณได้จาก

$$S_{DS} = \left(\frac{2}{3}\right) S_{MS} = \left(\frac{2}{3}\right) \times 0.647g = 0.431g$$

$$S_{D1} = \left(\frac{2}{3}\right) S_{M1} = \left(\frac{2}{3}\right) \times 0.273g = 0.182g$$

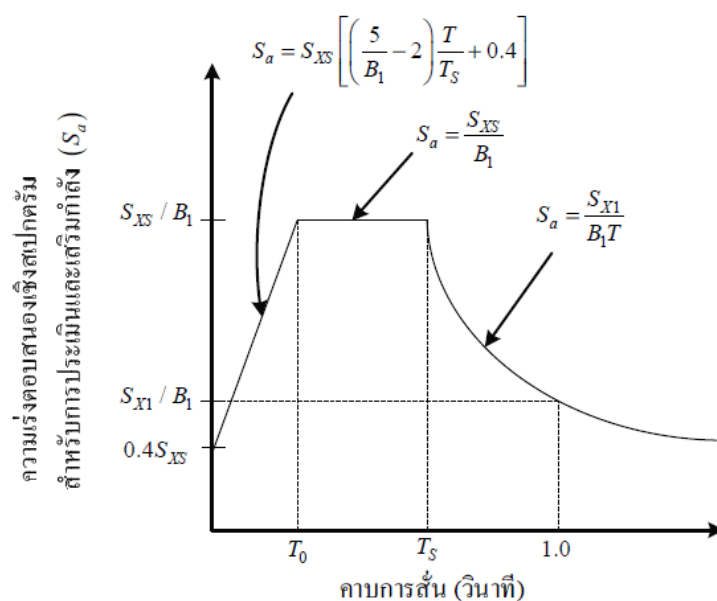
- จะเห็นว่า $S_{D1} < S_{DS}$ เมื่อนำมาสร้างสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบโดยวิธีพลศาสตร์ ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่อำเภอเมืองสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย

อย่างไรก็ตามกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองตาม มยพ.1301/1302-61 เป็นกราฟสำหรับการออกแบบอาคารใหม่ ระดับความรุนแรงที่มีคาบการกลับประมาณ 1,000 ปี โอกาสเกิดแผ่นดินไหว (หรือ เรียกในที่นี้ว่า แผ่นดินไหว 1,000 ปี)

ซึ่งหากต้องการประเมินความแข็งแรงของอาคารเดิมที่ก่อสร้างมานานแล้ว มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง การประเมินและออกแบบเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคารตาม (มยพ.1303-57) อนุญาตให้ลดค่าแรงแผ่นดินไหวตามกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองตาม มยพ. 1301/1302-61 เหลือเพียงครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.8 และสมการ (1) และ (2) ซึ่งเป็นระดับความรุนแรงที่กำหนดให้สอดคล้องกับคาบการกลับซ้ำประมาณ 225 ปี เนื่องจากอาคารที่ได้รับการประเมินเป็นอาคารเก่า ที่ไม่ได้ออกแบบให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวไว้ตั้งแต่แรก ย่อมมีกำลังต้านทานที่น้อยกว่าอาคารใหม่ ยากที่จะปรับปรุงให้มีกำลังเท่าอาคารใหม่ได้ อีกทั้งอาคารมีความเสื่อมสภาพจากการใช้งานไปตามกาลเวลา แรงแผ่นดินไหวที่ใช้นี้เป็นแรงแผ่นดินไหวระดับความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมินและออกแบบเสริมกำลัง
ที่มา: มยผ.1303-57

$$S_{XS} = 0.5S_{DS} \quad (3-1)$$

$$S_{X1} = 0.5S_{D1} \quad (3-2)$$

- เมื่อ S_{DS} เป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (g)
 S_{D1} เป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที (g)
 S_{XS} เป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินและออกแบบเสริมกำลังที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (g)
 S_{X1} เป็นความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมินและออกแบบเสริมกำลังที่คาบการสั่น 1 วินาที (g)

$$T_S = S_{X1} / S_{XS}$$

ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกแรงแผ่นดินไหวที่คาบการเกิดซ้ำ 225 ปี เพื่อให้สอดคล้องกับเจดีย์ที่ก่อสร้างโดยไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวตั้งแต่แรก กราฟสเปกตรัมสำหรับการประเมินและเสริมกำลังที่ใช้สำหรับพื้นที่ อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย แสดงในรูปที่ 3.7 เช่นกัน

3.1.1.4 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงลม

การคำนวณแรงลม ใช้ตามมาตรฐานการคำนวณแรงลม และการตอบสนองของอาคาร (มผย. 1311-50) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ซึ่งการคำนวณแรงลมได้ใช้วิธีการคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกของอาคารในทิศทางลม สามารถคำนวณได้จาก

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (3-3)$$

เมื่อ p เป็นหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (equivalent static wind pressure) กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวภายนอก โดยเรียกว่า “หน่วยแรงดัน” ถ้ามีทิศเข้าหาพื้นผิว หรือ “หน่วยแรงดูด” ถ้ามีทิศพุ่งออกจากพื้นผิว

I_w ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม

ประเภทความสำคัญของอาคาร	ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม	
	สถานะจำกัดด้านกำลัง	สถานะจำกัดด้านการใช้งาน
น้อย	0.8	0.75
ปกติ	1.0	0.75
มาก	1.15	0.75
สูงมาก	1.15	0.75

สำหรับเจดีย์วัดมหาธาตุ ถือว่ามีความสำคัญสูงมาก ใช้ค่า $I_w = 1.15$

q หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม (reference velocity pressure) สามารถคำนวณได้จาก

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 \quad (3-4)$$

เมื่อ q ที่คำนวณได้ มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

ρ ความหนาแน่นของมวลอากาศ (ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1.25 กิโลกรัม (มวล) ต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับความดันบรรยากาศปกติและ อุณหภูมิของอากาศประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส

g อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 ม./วินาที²

$\bar{V}$ ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ความเร็วลมอ้างอิง คือค่าความเร็วลมเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง (open exposure) สำหรับคาบเวลากลับ (return period) 50 ปี (V_{50})

สำหรับจังหวัดสุโขทัยอยู่ในกลุ่มที่ 1 $\bar{V} = 25$ เมตรต่อวินาที

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$$

C_e ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (exposure factor) แปรเปลี่ยนตามความสูงจากพื้นดินและสภาพภูมิประเทศ มยผ. 1311-50 ได้กำหนดค่า C_e สำหรับวิธีการอย่างง่าย ดังแสดงในตารางที่ 3.6 หรือคำนวณตามสมการ (3-5) และ (3-6)

สภาพภูมิประเทศแบบ A เป็นสภาพภูมิประเทศแบบโล่งซึ่งมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง กระจัดกระจายอยู่ห่างๆ กัน หรือ เป็นบริเวณชายฝั่งทะเล

$$C_e = \left(\frac{z}{10} \right)^{0.2} \quad (3-5)$$

ตารางที่ 3.6 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (C_e) สำหรับวิธีการอย่างง่าย

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศแบบ A	สภาพภูมิประเทศแบบ B
สูงไม่เกิน 6 เมตร	0.90	0.70
สูงเกิน 6 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.70
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.15	0.82
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	1.25	0.92
สูงเกิน 30 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.32	1.00
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร	1.43	1.13
สูงเกิน 60 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.52	1.24

สภาพภูมิประเทศแบบ B เป็นสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง หรือพื้นที่ที่มีต้นไม้ใหญ่หนาแน่น หรือบริเวณศูนย์กลางเมืองขนาดเล็ก ให้คำนวณค่า C_e จากสมการ

$$C_e = 0.7 \left(\frac{z}{12} \right)^{0.3} \quad (3-6)$$

หาก C_e ที่คำนวณได้จาก (3-3) มีค่าน้อยกว่า 0.7 กำหนดให้ใช้ค่า $C_e = 0.7$

ซึ่งในตัวอย่างเจดีย์วัดมหาธาตุเป็นภูมิประเทศแบบ B

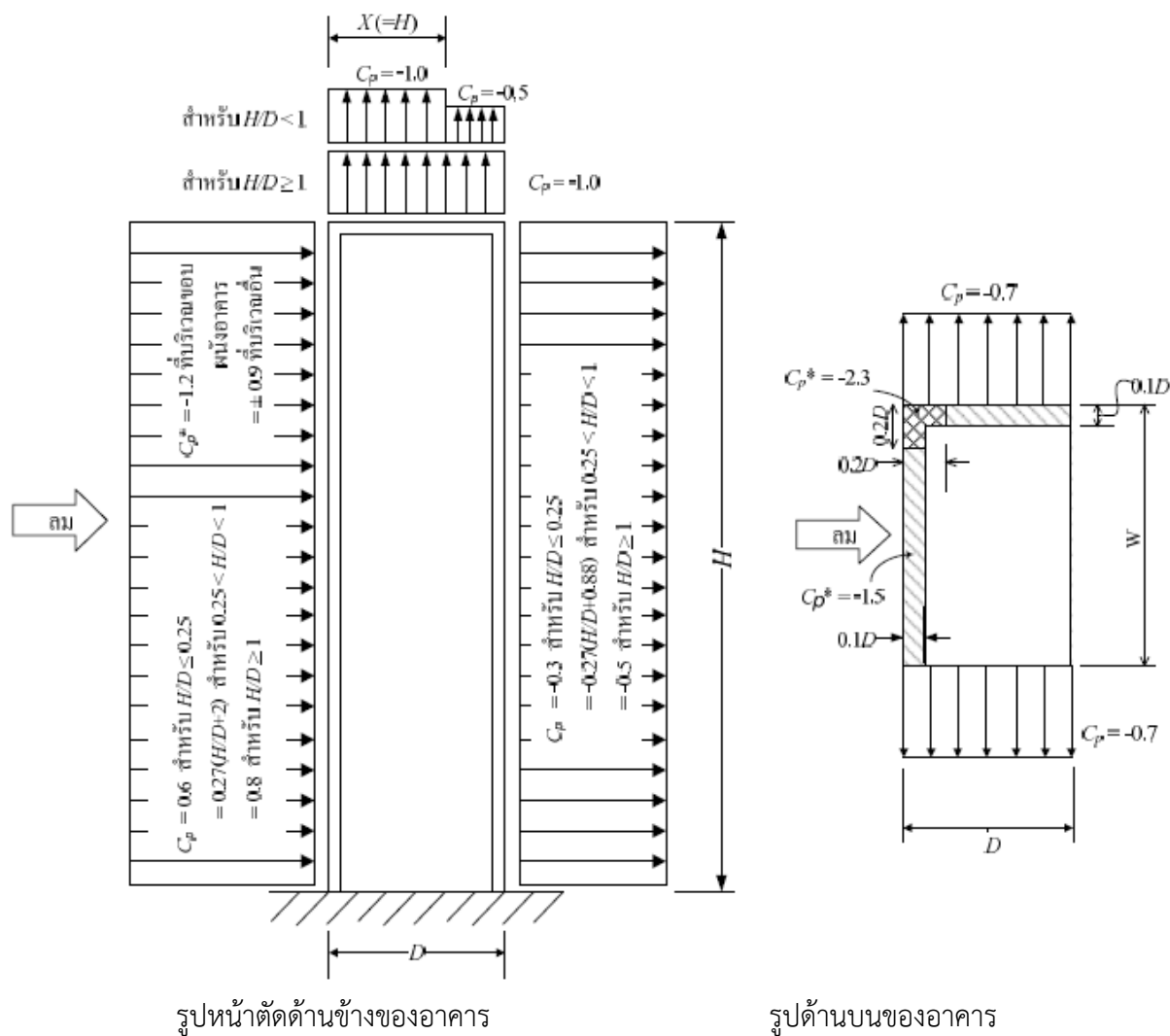
$$C_e = 0.7 \left(\frac{z}{12} \right)^{0.3} = 0.332z^{0.3}$$

C_g ค่าประกอบเนื่องจากผลการกระโชกของลม (gust effect factor) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ
 $C_g = 2.0$ ในการออกแบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม ยกเว้น ป้ายและกำแพงให้ใช้ค่า
 $C_g = 2.35$
 $C_g = 2.5$ ในการออกแบบโครงสร้างรองและผนังภายนอกอาคาร (cladding) ที่มีขนาดเล็ก
 (ประมาณขนาดของหน้าต่าง)

ซึ่งในตัวอย่างเจดีย์วัดมหาธาตุ เป็นโครงสร้างหลักต้านทานแรงลม $C_g = 2.0$

C_p ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร (external pressure coefficient) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอาคาร ทิศทางลม และ ลักษณะการแปรเปลี่ยนของความเร็วลมตามความสูงอาคาร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม ที่กระทำภายนอกอาคาร สำหรับการออกแบบผนังภายนอกอาคาร และระบบโครงสร้างหลักของเจดีย์
 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมภายนอก สำหรับอาคารที่มีความสูงต่อความกว้าง $\left(\frac{H}{D_s} \right)$

มากกว่าหรือเท่ากับ 1 (D_s คือความกว้างด้านที่แคบสุด) และมีความสูงอ้างอิง (reference height) มากกว่า 23 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมใช้ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (C_p และ C_p^*) สำหรับอาคารที่มีความสูงมากกว่าความกว้างและมีหลังคาอยู่ในแนวราบ

สำหรับตัวอย่างเจดีย์วัดมหาธาตุ

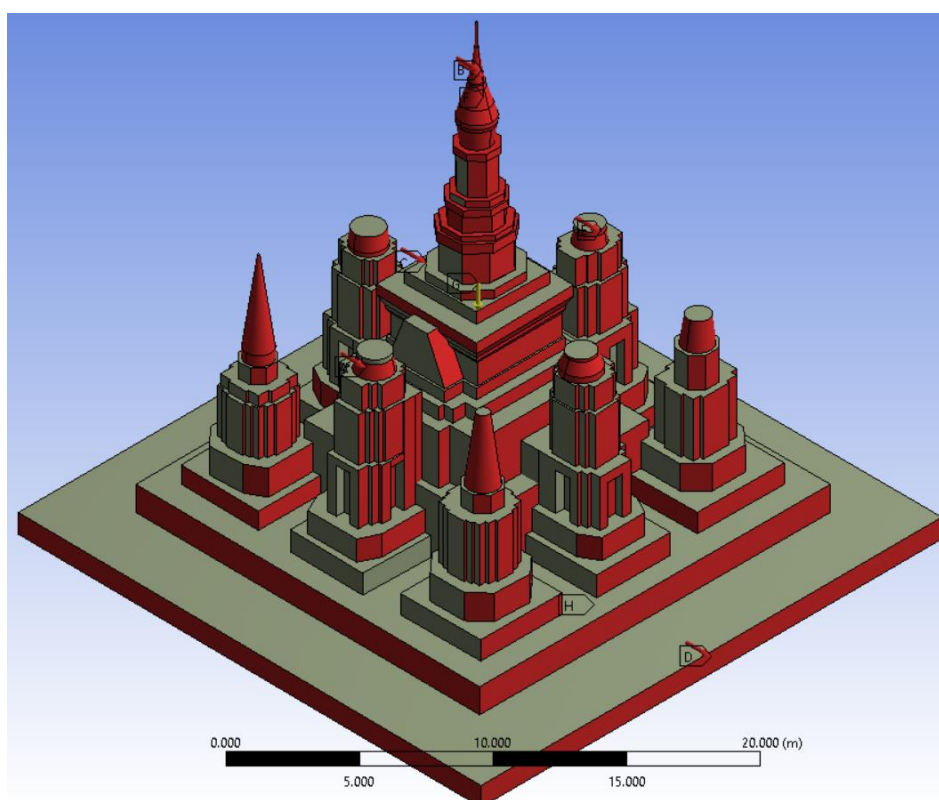
ด้านตันลม $C_p = 0.8$

ด้านท้ายลม $C_p = -0.5$

ผลการคำนวณแรงลมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เจดีย์วัดมหาธาตุที่ระดับความสูงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.7 โดยการป้อนค่า ใช้เป็นความดันลมกระทำผิวเจดีย์ในทิศทางตามแนวแกน x เพียงทิศทางเดียว เนื่องจากผลที่ได้จากการกระทำในอีกทิศทางมีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณแรงลมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์

ความสูงจากพื้นดิน	ด้านต้นลม (นิวตันต่อตารางเมตร)	ด้านท้ายลม (นิวตันต่อตารางเมตร)
สูงเกิน ไม่เกิน 10 เมตร	503	-314
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	586	-367
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	662	-414
สูงเกิน 30 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	722	-451
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร	815	-510
สูงเกิน 60 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	889	-556



รูปที่ 3.10 แบบจำลองเมื่อคำนึงถึงผลของแรงลม

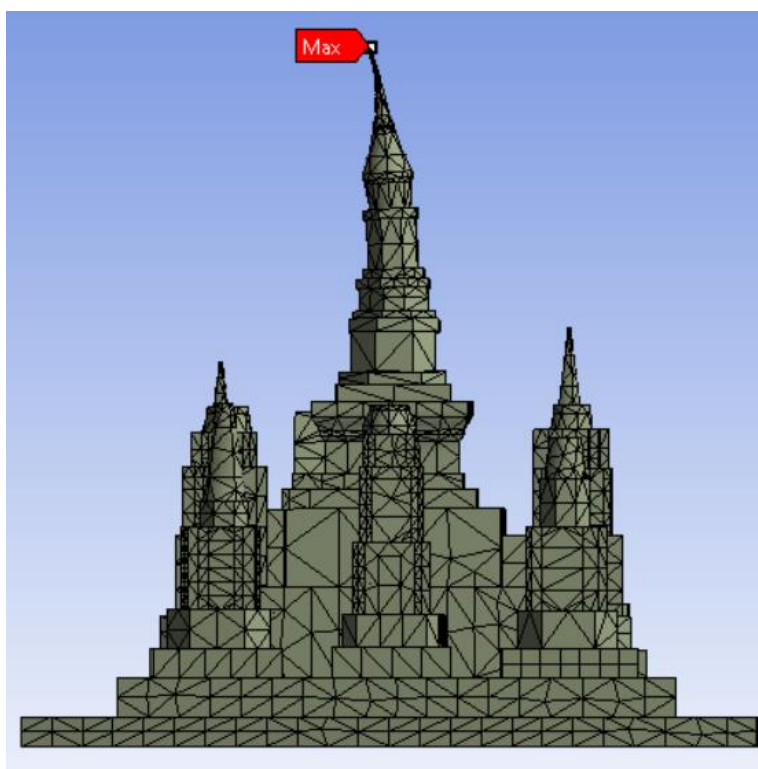
3.1.2 ผลการวิเคราะห์

3.1.2.1 รูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์

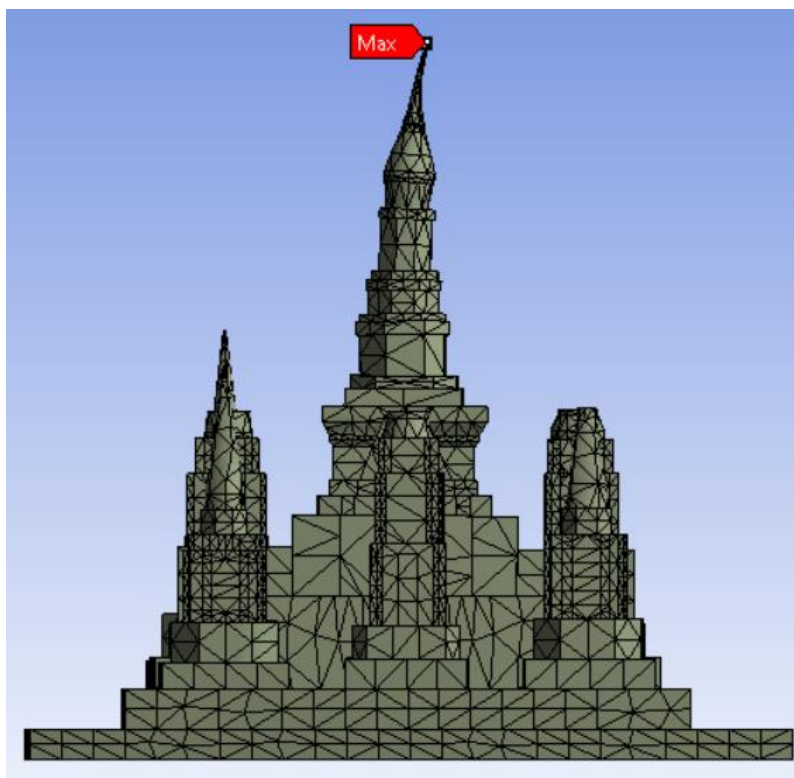
รูปแบบการสั่นไหวของแบบจำลองวัดมหาธาตุ และความถี่ธรรมชาติใน 6 รูปแบบแรก กรณีไม่รวมผลของดินรองรับได้ฐาน แสดงดังรูปที่ 3.11 ถึง 3.16 และความถี่ธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 3.8 จะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของทีมีวิจัยของ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม

ตารางที่ 3.8 รูปแบบการสันไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของวัดมหาธาตุ

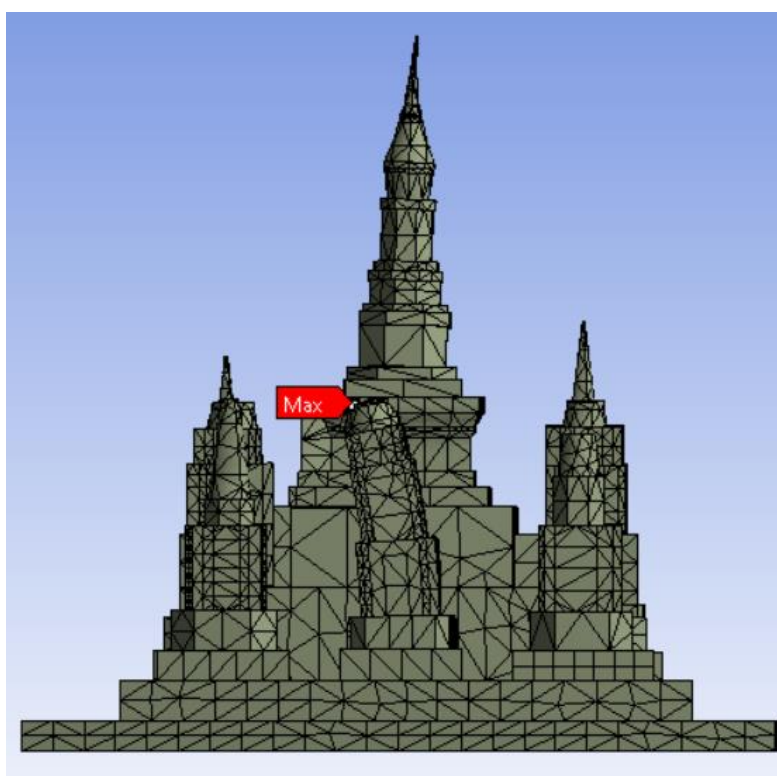
รูปแบบการสันไหว	ความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 ทิศทาง Y	3.83
2 ทิศทาง X	4.05
3 ทิศทาง X	6.15
4 ทิศทาง X	6.36
5 ทิศทาง Y	6.57
6 ทิศทาง X	6.66



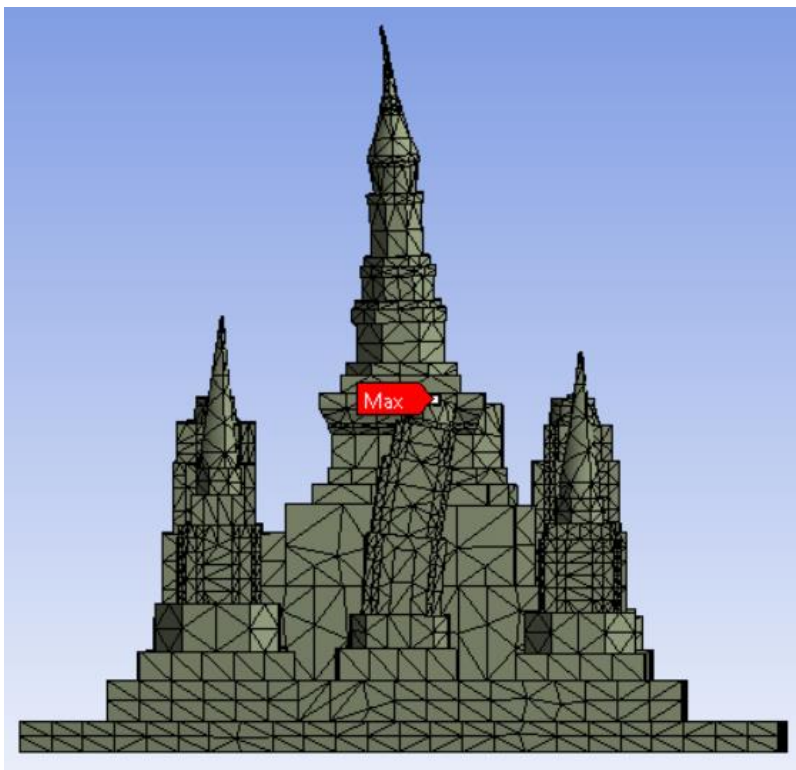
รูปที่ 3.11 รูปแบบการสันไหวที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 3.83 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y)



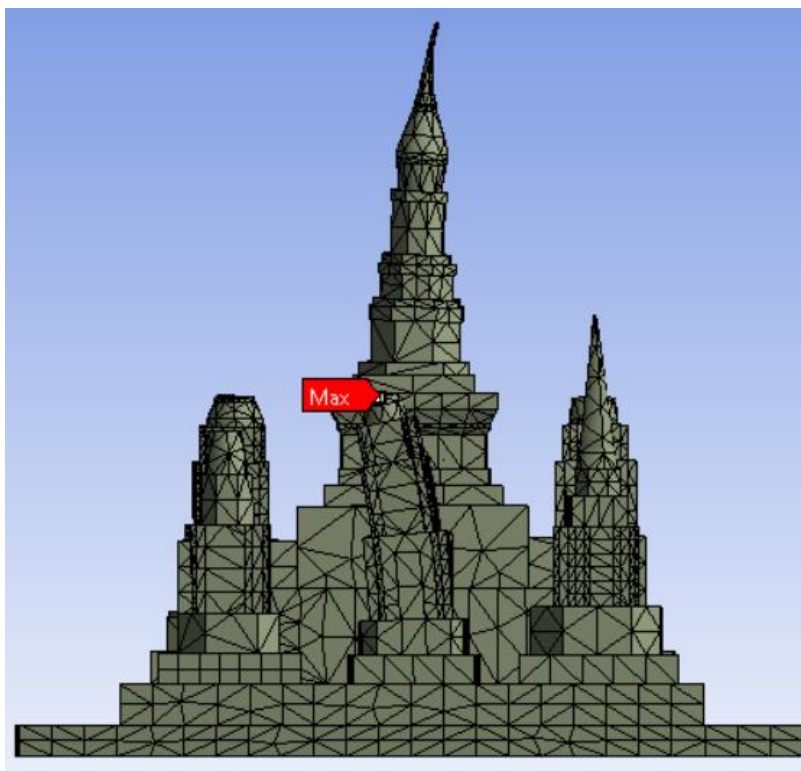
รูปที่ 3.12 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 4.05 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน X)



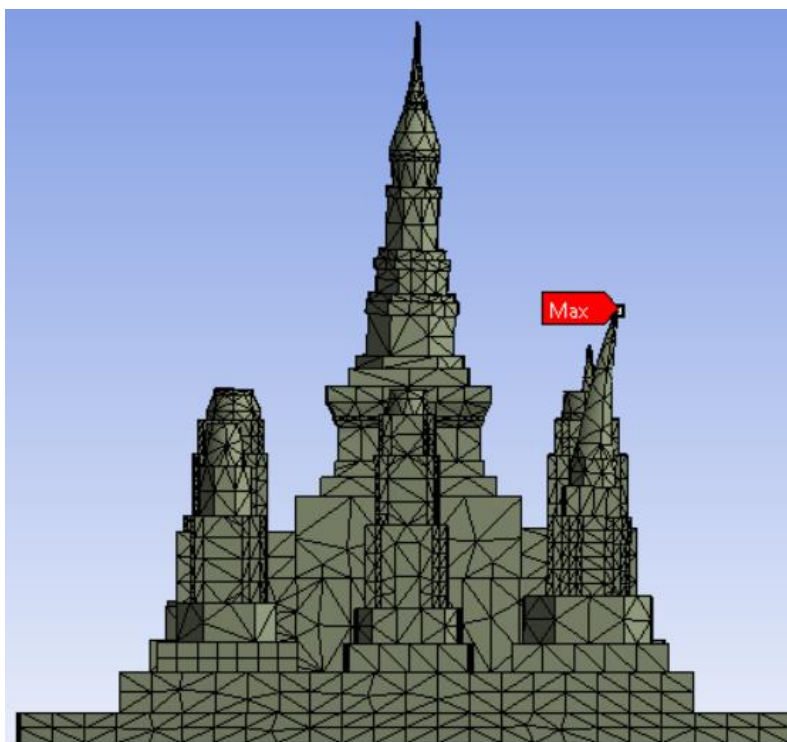
รูปที่ 3.13 รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 6.15 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน X)



รูปที่ 3.14 รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 6.36 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน X)



รูปที่ 3.15 รูปแบบการสั่นไหวที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 6.57 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y)



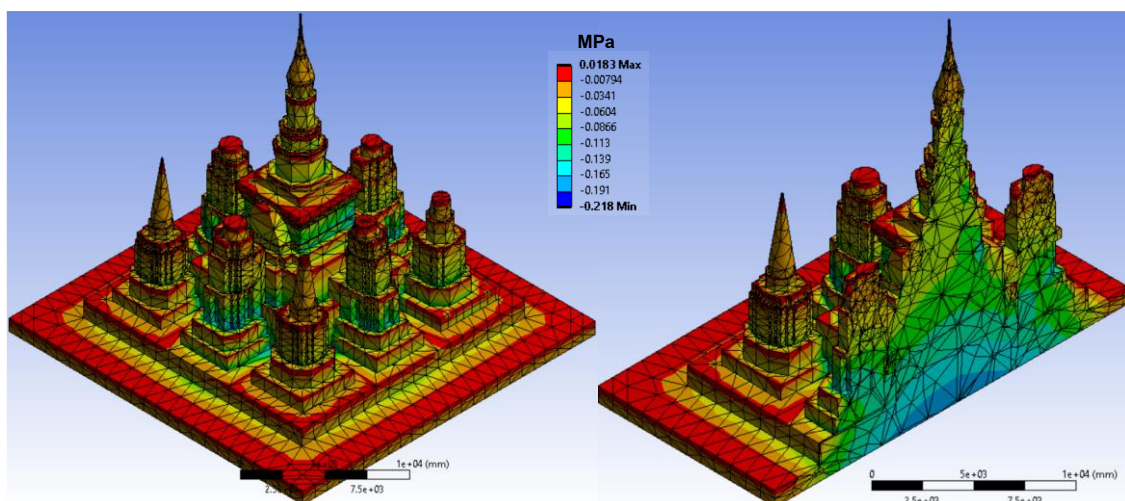
รูปที่ 3.16 รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ความถี่ธรรมชาติ 6.66 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวกแกน X)

3.1.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในน้ำหนักตัวเอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายแรงภายในโครงสร้างเจดีย์จากน้ำหนักตัวเอง พบว่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงอัดประลัย และหน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุก่อ โดยหน่วยแรงหน่วยแรงอัดสูงสุด 0.20 Mpa เกิดขึ้น ณ บริเวณใต้ฐาน บริเวณศูนย์กลางเจดีย์ คิดเป็นร้อยละ 4.0 ของกำลังอัดของวัสดุก่อ สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุด 0.01 Mpa คิดเป็นร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าน้อยมากจนแทบไม่น่าสนใจ

ตารางที่ 3.9 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในน้ำหนักตัวเอง

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดสูงสุด		หน่วยแรงดึง	
	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังดึงสูงสุด (%)
เจดีย์ประธาน	-0.16	3.2	0.01	5.0
เจดีย์ปรางค์ (P1-P4)	-0.20	4.0	0.01	5.0
เจดีย์ราย (S1-S4)	-0.13	2.6	0.01	5.0
กึ่งกลางฐาน	-0.20	4.0	-	-



(ก) ที่ผิว

(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.17 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ผิวภายใต้น้ำหนักตัวเอง (Mpa)

3.1.2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

เมื่อตรวจสอบหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากกรณีของแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ตาม มยพ.1301/1302-61 ที่คาบการเกิดซ้ำ 225 ปี โดยให้แรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามแนวแกน X 100% และกระทำทิศตั้งฉากได้แก่แกน Y อีก 30% ตามคำแนะนำในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ 1301/1302-61) และเมื่อเปรียบเทียบในกรณีให้แรงแผ่นดินไหวกระทำตามแกน Y 100% ร่วมกับแกน X อีก 30% พบว่าเกิดหน่วยแรงที่น้อยกว่า จึงจะรายงานผลการวิเคราะห์ตามแนวแกน X เป็นหลักเท่านั้น โดยชุดการรวมแรงแผ่นดินไหวตาม มยพ.1303-57 และน้ำหนักบรรทุกตัวเอง มี 2 กรณี ได้แก่

ชุดการรวมแรงที่ 1 1.1D+1.0E

ชุดการรวมแรงที่ 2 0.9D+1.0E

เมื่อ DL เป็นน้ำหนักบรรทุกตายตัว

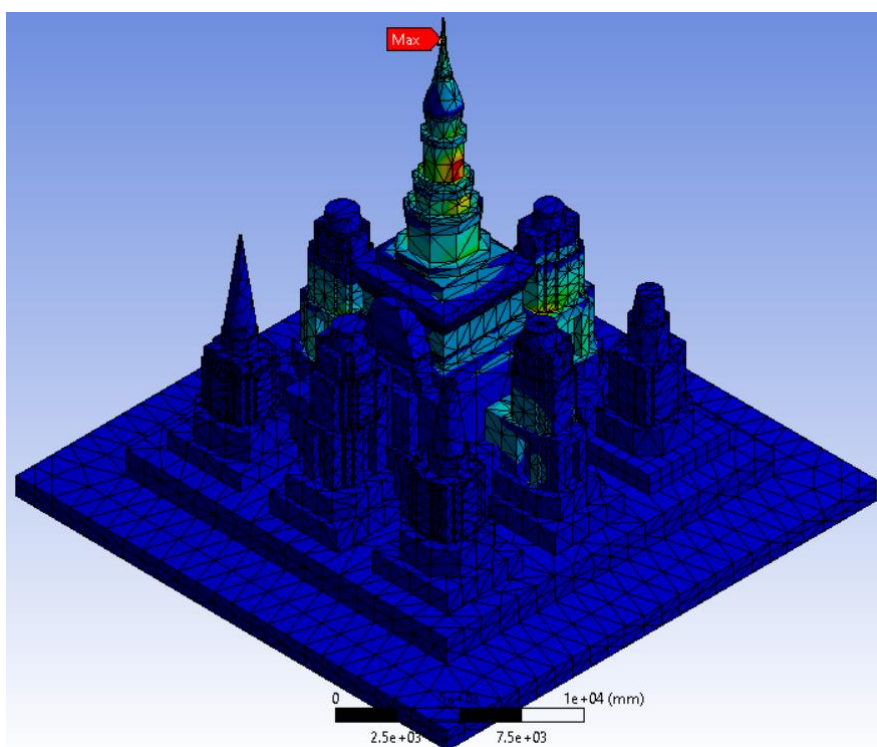
E เป็นแรงแผ่นดินไหว

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปลายเจดีย์องค์ประธานมีการเคลื่อนตัวสูงสุด 24 มม. หน่วยแรงอัดมีค่าสูงสุด 0.18 Mpa และ 0.14 Mpa สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของศิลาแลง (5.0 Mpa) คิดเป็นร้อยละ 3-4 ณ บริเวณกึ่งกลางฐาน ดังรูปที่ 3.18 โดยตำแหน่งอื่นๆ ค่าหน่วยแรงอัดยังไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

พบหน่วยแรงดึงสูงสุด 0.24-0.31 Mpa ทั้ง 2 ชุดการรวมแรง บริเวณยอดเจดีย์ บริเวณเรือนธาตุเจดีย์ประธาน ซึ่งมีลักษณะเป็นฐานย่อมุม คิดเป็นร้อยละ 155 นอกจากนี้แล้ว หน่วยแรงดึงในเจดีย์ปรางค์ทั้ง 4 มีค่าสูง 0.24 Mpa ซึ่งเกินกว่าหน่วยแรงดึงประลัยร้อยละ 120 ส่วนตำแหน่งอื่นๆ หน่วยแรงดึงไม่เกินค่าที่ยอมให้ ดังรูปที่ 19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น เรือนธาตุที่รองรับกระฉังที่เป็นลักษณะดอกบัวตูมน่าจะเกิดการวิบัติเป็นตำแหน่งแรก และตามมาด้วยการวิบัติของเจดีย์ปรางค์ทั้ง 4

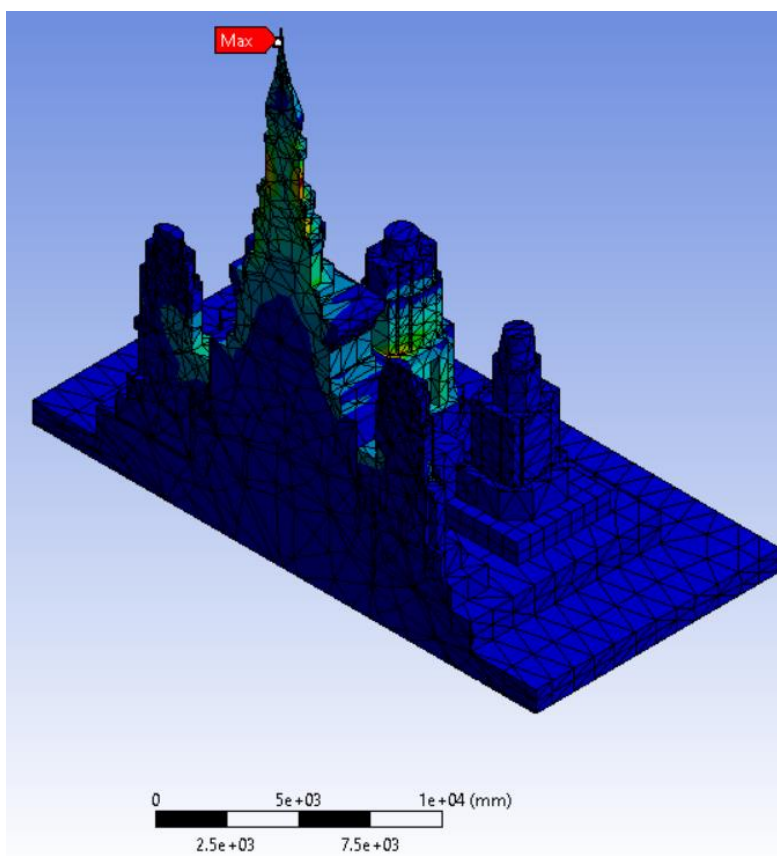
ตารางที่ 3.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ตำแหน่งที่เกิด	ชุดการรวมแรง 1.1DL+1.0E		ชุดการรวมแรง 0.9DL+1.0E	
	หน่วยแรง ที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของ กำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรง ที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของ กำลังดึงสูงสุด (%)
เจดีย์ประธาน	0.31 (ดึง)	154.5	0.31 (ดึง)	155.5
เจดีย์ปรางค์ (P1-P4)	0.24 (ดึง)	119.5	0.24 (ดึง)	120.5
เจดีย์ราย (S1-S4)	-0.08 (อัด)	2.7	-0.06 (อัด)	1.2
กึ่งกลางฐาน	-0.06 (อัด)	1.2	-0.04 (อัด)	0.8



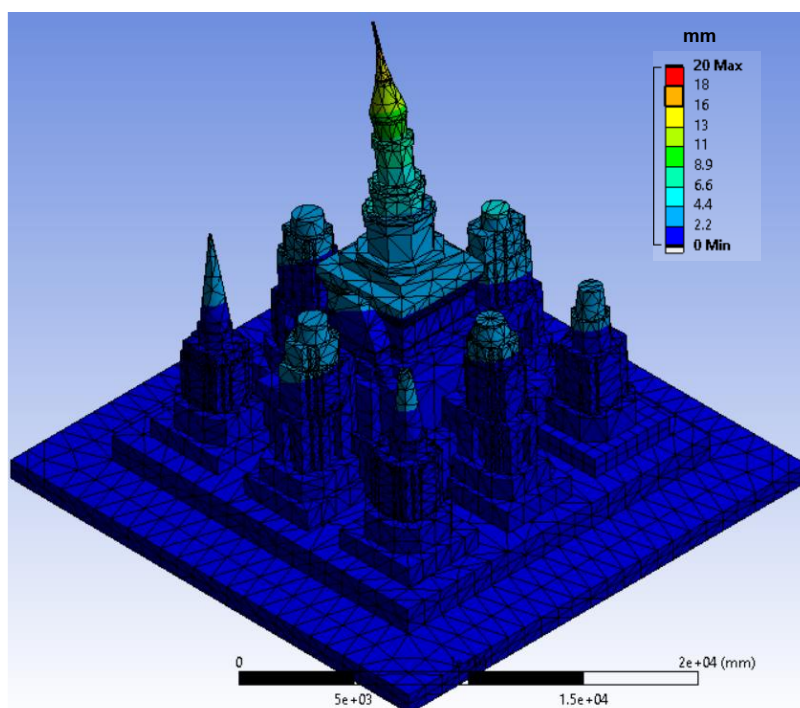
(ก) ภายนอก

รูปที่ 3.18 หน่วยแรงสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Mpa)



(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.18 หน่วยแรงสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Mpa) (ต่อ)



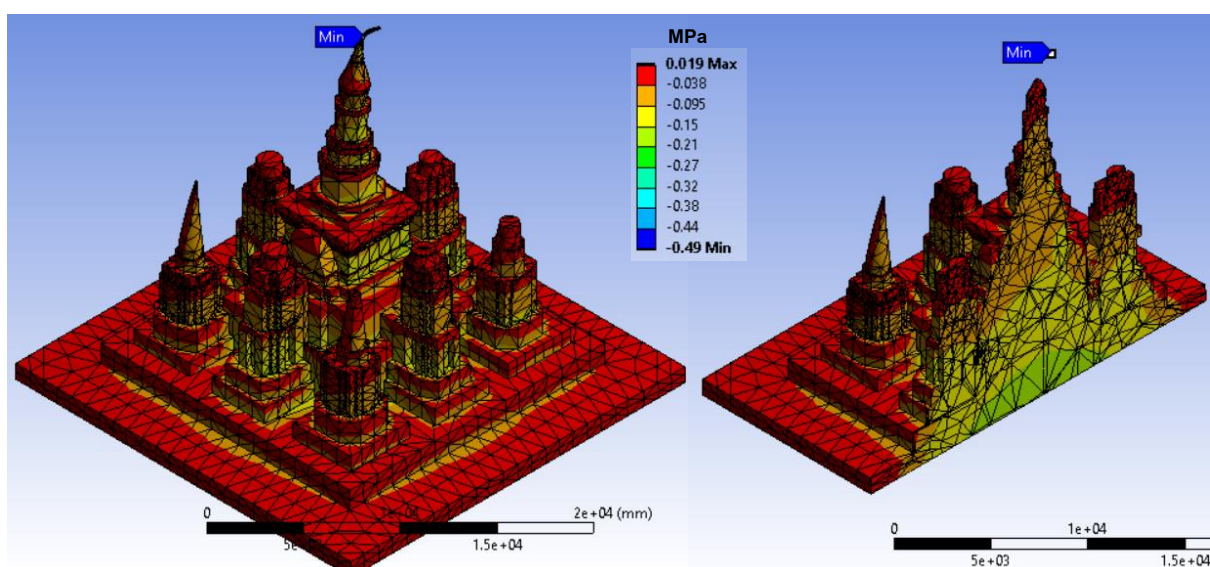
รูปที่ 3.19 การเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว

3.1.2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม

จากการวิเคราะห์ผลของแรงลมตาม มยผ.1311-50 ในทิศทางตามแนวแกน x เพียงทิศทางเดียว พบว่า การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายเจดีย์มีค่าเท่ากับ 11 มิลลิเมตร น้อยกว่าการเคลื่อนตัวจากแรงแผ่นดินไหว ประมาณ 2 เท่า หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณยอดเจดีย์องค์ประธาน มีค่าสูงสุด 0.49 Mpa คิดเป็นร้อยละ 9.8 ยังไม่ถึงค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของวัสดุก่อ (รูปที่ 3.20) ในขณะที่หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณยอดเจดีย์องค์ประธาน โดยมีค่าสูงสุด 0.48 Mpa หรือประมาณร้อยละ 240 ของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของวัสดุก่อ แสดงถึงความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นที่ยอดเจดีย์ เช่นเดียวกับกรณีของแรงแผ่นดินไหวที่จะเสี่ยงที่ยอดเจดีย์ และเรือนธาตุใต้องค์เจดีย์ ในขณะที่ตำแหน่งอื่นๆ ไม่เกินกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เช่นกัน ดังรูปที่ 3.21

ตารางที่ 3.11 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม

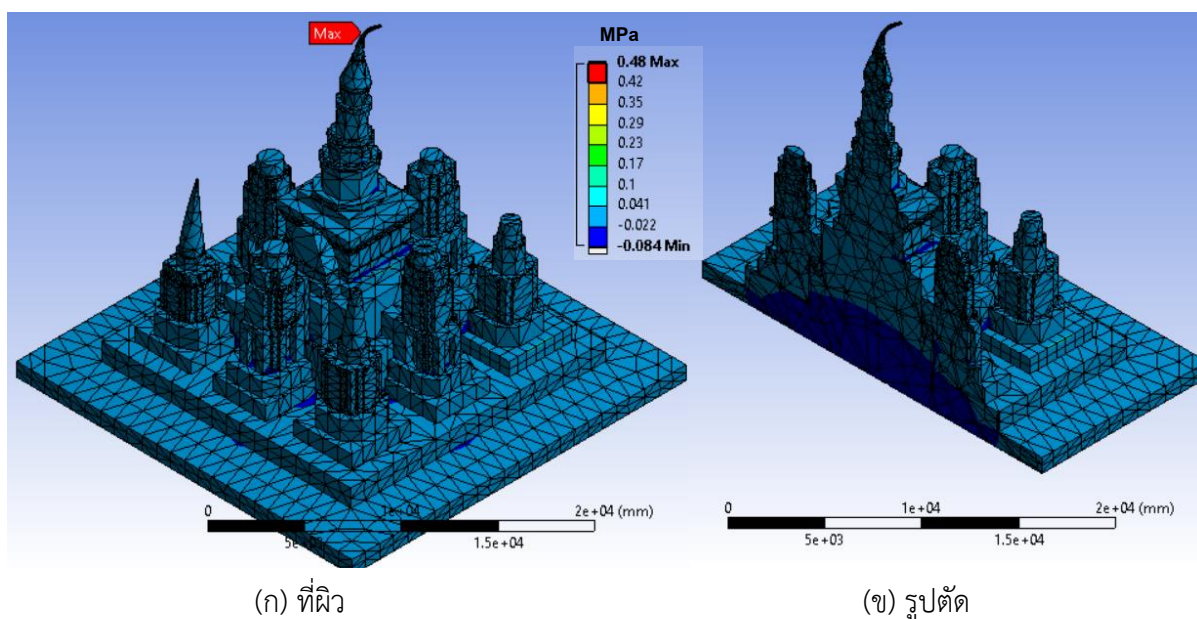
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดสูงสุด		หน่วยแรงดึง	
	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังดึงสูงสุด (%)
เจดีย์ประธาน (M)	-0.49	9.8	0.48	240.0
เจดีย์ปราง (P1-P4)	-0.26	5.2	0.04	20.0
เจดีย์ราย (S1-S4)	-0.21	7.0	0.04	20.0
กึ่งกลางฐาน	-0.26	5.2	0.04	20.0



(ก) ที่ผิว

(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.20 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงลม (Mpa)



รูปที่ 3.21 หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงลม (Mpa)

3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในเขตอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

สำหรับพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นพื้นที่ที่แตกต่างจากอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ด้วยทำเลที่ตั้งที่ต่างกัน นอกจากนี้แล้วรูปร่างของเจดีย์ที่ได้รับอิทธิพลจากศิลปะทวารวดี หรือศิลปะขอม ซึ่งนิยมทำเป็นรูปทรงปราสาท มีความขะลุขุดต่ำ ที่มีอายุกว่า 1,000 ปี ด้วยลักษณะความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เบากว่า เจดีย์ที่ใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้เลือกปราสาทฤาษี ซึ่งตั้งอยู่นอกเมืองศรีเทพด้านทิศเหนือประมาณ 2 กม. เนื่องจากเป็นเจดีย์ที่ทรงเอกลักษณ์ของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพอย่างชัดเจน ภายในในหลวง มีประตูสามารถเข้าไปได้ปราศได้ โดยทีมวิจัยได้มีการสำรวจเก็บข้อมูลอย่างละเอียด เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองขึ้นมา จากวิธีการ structural form motion (SFM) เช่นกัน

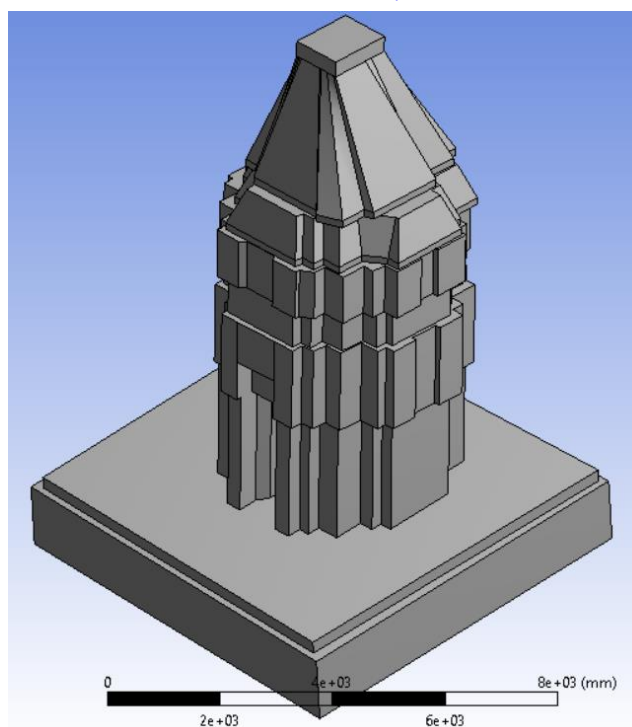
3.2.1 แนวทางการสร้างและวิเคราะห์ปราสาทฤาษี

ปราสาทฤาษีมีลักษณะเป็นกลุ่มโบราณสถาน หันหน้าไปทางด้านทิศตะวันออก ปราสาทประธานมีขนาดเล็กก่อด้วยอิฐไม่สอปูนตั้งอยู่บนฐานศิลาแลง ผังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 6.95 เมตร ความยาว 7.65 เมตร ความสูง ประมาณ 10 เมตร ทางด้านหน้าปราสาทประธานมีฐานอาคารผังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และฐานอาคารก่อด้วยอิฐและศิลาแลง ลักษณะคล้ายมณฑปด้านหน้าปราสาท เชื่อมต่อกับโคปุระทางด้านทิศตะวันออก มีกำแพงแก้วศิลาแลงล้อมรอบกลุ่มโบราณสถาน และมีแนวทางเดินปูด้วยศิลาแลงด้านหน้า ภาพถ่ายปราสาทฤาษี และภาพแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 ตามลำดับ



รูปที่ 3.22 ปราสาทฤๅษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

ที่มา: <http://www.qrcode.finearts.go.th/index.php/th/historicalpark/srithep/srithep-02/item/268-srithep03-007>



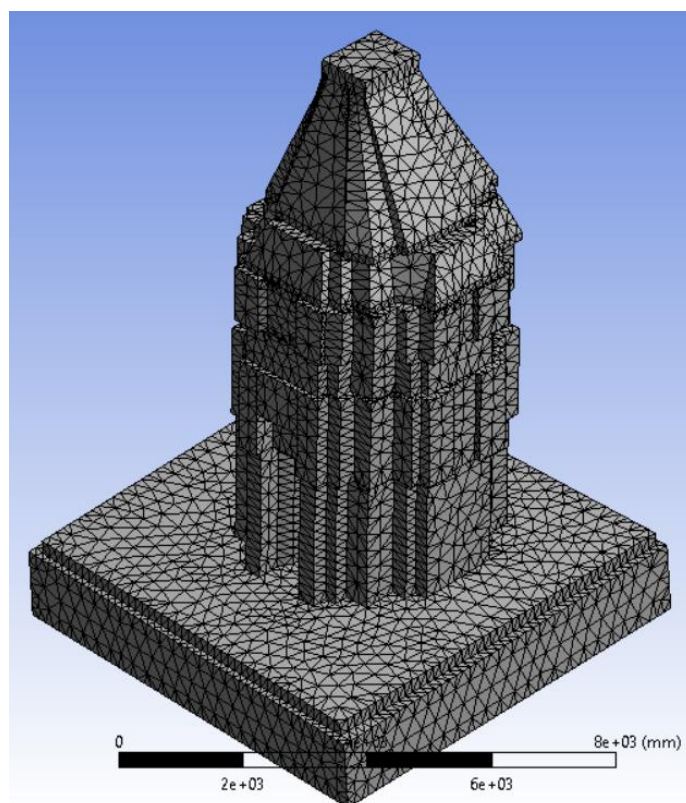
รูปที่ 3.23 แบบจำลองด้วยโปรแกรม 3 มิติ ปราสาทฤๅษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

คุณสมบัติวัสดุของอิฐก่อที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองปราสาทฤๅษี ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 833 เมกะปาสคาล ค่าอัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.216 หน่วยน้ำหนักของวัสดุเท่ากับ 1,800 กก./ม.³ กำลังรับแรงดึงประลัยเท่ากับ 0.2 เมกะปาสคาล และกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อเท่ากับ 3.0 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 3.12 คุณสมบัติเชิงกลเจดีย์ประธาน วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

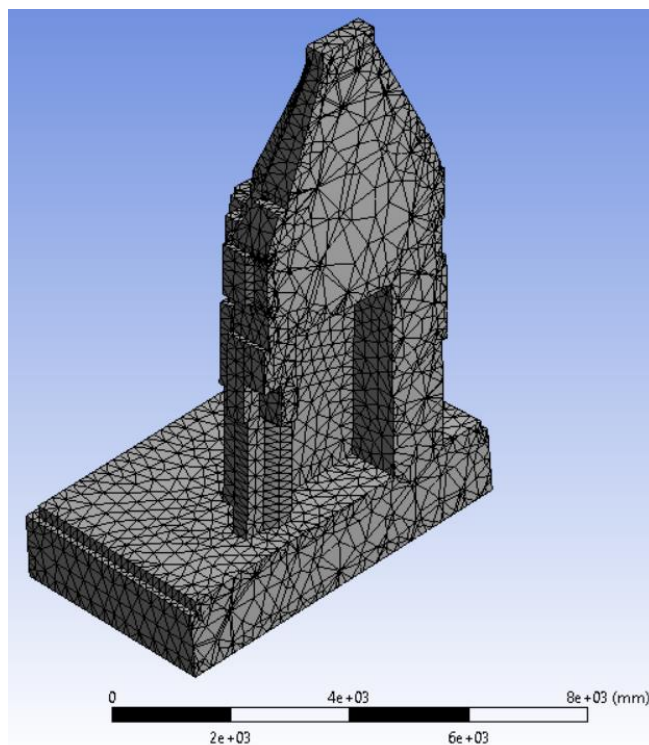
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วนปัวซอง	กำลังอัด (Mpa)	กำลังดึง (Mpa)
องค์เจดีย์และฐาน	1,800	833	0.216	3.0	0.2

แบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ของปราสาทฤๅษี แสดงดังรูปที่ 3.24 มีชิ้นส่วนประกอบกันจำนวนทั้งสิ้น 37,405 ชิ้นส่วน โดยมีจุดต่อรวมกันทั้งหมด 64,645 จุดต่อ ภายในองค์ปราสาททำเป็นช่องว่างเช่นเดียวกับองค์จริง เพื่อตรวจสอบหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในสภาพเสมือนจริงมากที่สุด



(ก) ภายนอก

รูปที่ 3.24 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ปราสาทฤๅษี



(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.24 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ปรางค์ฤาษี (ต่อ)

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ 4 ชั้นตอน เช่นเดียวกับที่ศึกษาในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ได้แก่

3.2.1.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์

ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยทำการศึกษารูปแบบการสั่นไหว 6 รูปแบบแรก

3.2.1.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิตศาสตร์

โดยการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้น้ำหนักองค์เจดีย์ (self weight) เพื่อหาค่าหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเจดีย์ ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุ (unit weight)

3.2.1.3 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำทางพลศาสตร์ หรือแรงแผ่นดินไหว

กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองตาม มยผ. 1301/1302-61 สำหรับอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลศรีเทพ อ.ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ สำหรับการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของ อ.ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ใช้ในการคำนวณ มีวิธีการสร้างดังนี้

- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) เท่ากับ 0.055g และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) เท่ากับ 0.040g สำหรับอำเภอศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ ตามตารางที่ 1.4-1 ของ มยผ.1301/1302-61 โดยนำมาแสดงในตารางที่ 3.13 ซึ่งจะเห็นว่าความเร่งค่อนข้างต่ำ เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวไม่ได้เป็นพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

ตารางที่ 3.13 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (ที่มา มยผ.1301/1302-61)

จังหวัด	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง	
		S_s	S_1
เพชรบูรณ์	เขาชัย	0.153	0.049
	ชนแดน	0.079	0.044
	น้ำหนาว	0.200	0.049
	บึงสามพัน	0.060	0.040
	เมืองเพชรบูรณ์	0.110	0.042
	วังโป่ง	0.093	0.046
	วิเชียรบุรี	0.055	0.039
	ศรีเทพ	<u>0.055</u>	<u>0.040</u>
	หนองไผ่	0.065	0.039
	หล่มเก่า	0.221	0.054
	หล่มสัก	0.205	0.052

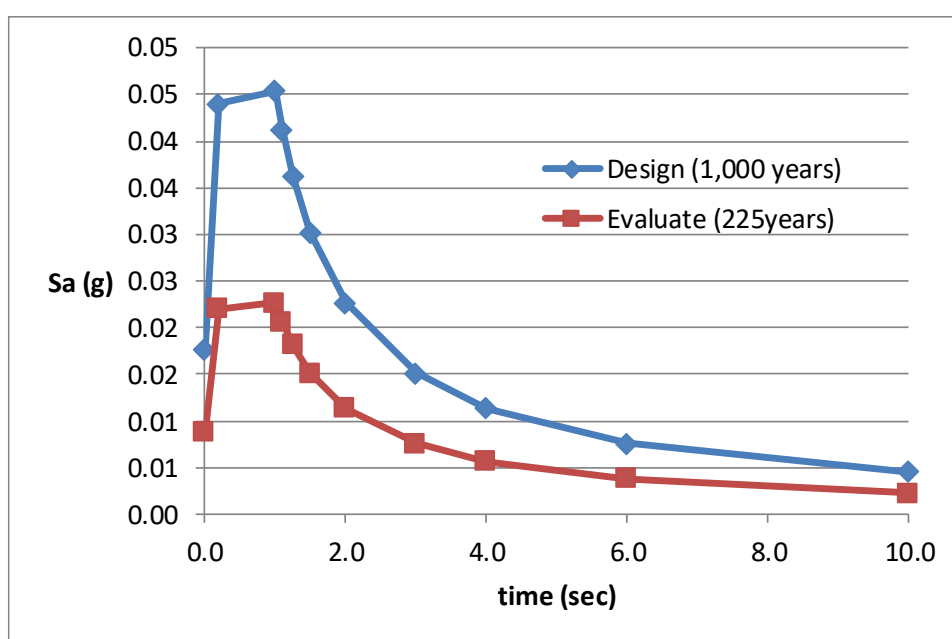
- ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินของกรมโยธาธิการและผังเมือง ใน อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์ บริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งของปรangkมมากที่สุด จำนวน 2 หลุม มาทำการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทของดิน พบว่าเป็นประเภท C (รายละเอียดการจำแนกประเภทของดินอยู่ในภาคผนวก ก)
- กำหนดให้ชั้นดินเป็นดินอ่อน ประเภท C F_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งเจดีย์ทรงปรangkม สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที (F_a) จากตาราง 1.4-2 ตาม มยผ.1301/1302-61 มีค่าเท่ากับ $F_a = 1.20$ (ดูตารางที่ 3.3)
- F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งเจดีย์ สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที จากตารางที่ 1.4-2 ตาม มยผ.1301/1302-61 มีค่าเท่ากับ $F_v = 1.70$ (ดูตารางที่ 3.4)
- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร $S_{MS} = F_a S_s = 1.20 \times 0.055g = 0.066g$ ค่าดังกล่าวเป็นความเร่งของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดที่คาบการเกิดซ้ำ 2,500 ปี

- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร $S_{M1} = F_v S_1 = 1.70 \times 0.040g = 0.068g$
- ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบมีค่าเท่ากับระดับแผ่นดินไหวที่มีคาบการกลับ 1,000 ปี หรือมีความรุนแรงสองในสามเท่าของแผ่นดินไหวที่มีคาบการกลับ 2,500 ปี สามารถคำนวณได้จาก

$$S_{DS} = \left(\frac{2}{3}\right) S_{MS} = \left(\frac{2}{3}\right) \times 0.055g = 0.044g$$

$$S_{D1} = \left(\frac{2}{3}\right) S_{M1} = \left(\frac{2}{3}\right) \times 0.068g = 0.045g$$

- จะเห็นว่า $S_{D1} > S_{DS}$ เมื่อนำมาสร้างสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบโดยวิธีพลศาสตร์ ได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่อำเภอศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์

อย่างไรก็ตามกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองตาม มยผ.1301/1302-61 เป็นกราฟสำหรับการออกแบบอาคารใหม่ ระดับความรุนแรงที่มีคาบการกลับประมาณ 1,000 ปี ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกแรงแผ่นดินไหวที่คาบการเกิดซ้ำ 225 ปี เพื่อให้สอดคล้องกับเจดีย์ที่ก่อสร้างโดยไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวตั้งแต่แรก กราฟสเปกตรัมสำหรับการประเมินและเสริมกำลังที่ใช้สำหรับพื้นที่ อ.ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ แสดงในรูปที่ 3.25 เช่นกัน (เส้นสีแดง)

3.2.1.4 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงลม

การคำนวณแรงลม ใช้ตามมาตรฐานการคำนวณแรงลม และการตอบสนองของอาคาร (มผย. 1311-50) กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ซึ่งการคำนวณแรงลมได้ใช้วิธีการคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการอย่างง่าย ตามสมการที่ (3-3) และ (3-4) เช่นเดียวกับแบบจำลองวัดมหาธาตุ

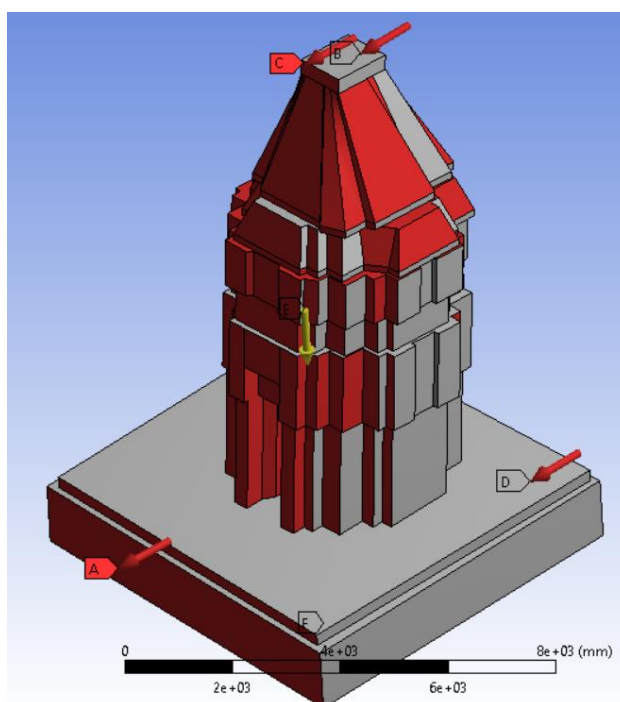
สำหรับจังหวัด เพชรบูรณ์ อยู่ในกลุ่มที่ 1 $\bar{V} = 25$ เมตรต่อวินาที

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^2 = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 25^2 = 390.6 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร}$$

ผลการคำนวณแรงลมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เจดีย์วัดมหาธาตุที่ระดับความสูงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.14 โดยการป้อนค่าความดันลมกระทำผิวเจดีย์ในทิศทางตามแนวแกน x และ y โดยการแยกพิจารณาคนละทิศทาง

ตารางที่ 3.14 ผลการคำนวณแรงลมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปรangk์ถาษี

ความสูงจากพื้นดิน	ด้านต้นลม (นิวตันต่อตารางเมตร)	ด้านท้ายลม (นิวตันต่อตารางเมตร)
สูงเกิน ไม่เกิน 10 เมตร	503	-314
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	586	-367
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	662	-414



รูปที่ 3.26 แบบจำลองเมื่อกำหนดถึงผลของแรงลม

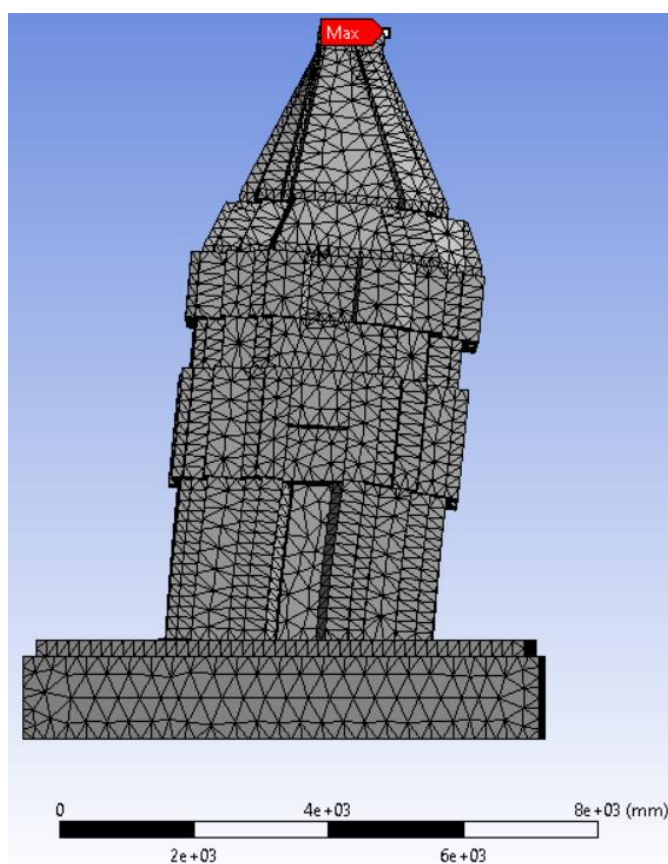
3.2.2 ผลการวิเคราะห์

3.2.2.1 รูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์

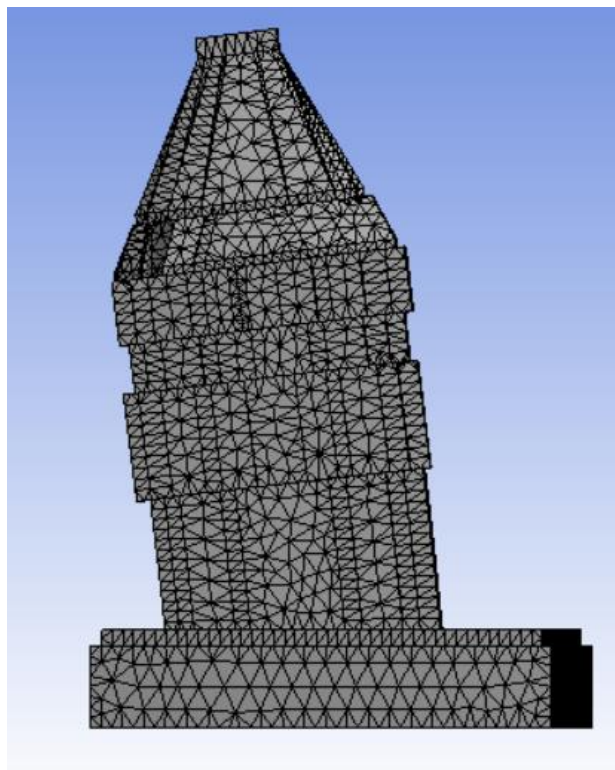
รูปแบบการสั่นไหวของแบบจำลองปราสาทฤๅษี และความถี่ธรรมชาติใน 6 รูปแบบแรก กรณีไม่รวมผลของดินรองรับได้ฐาน แสดงดังรูปที่ 3.27 ถึง 3.32 และความถี่ธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 รูปแบบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของปราสาทฤๅษี

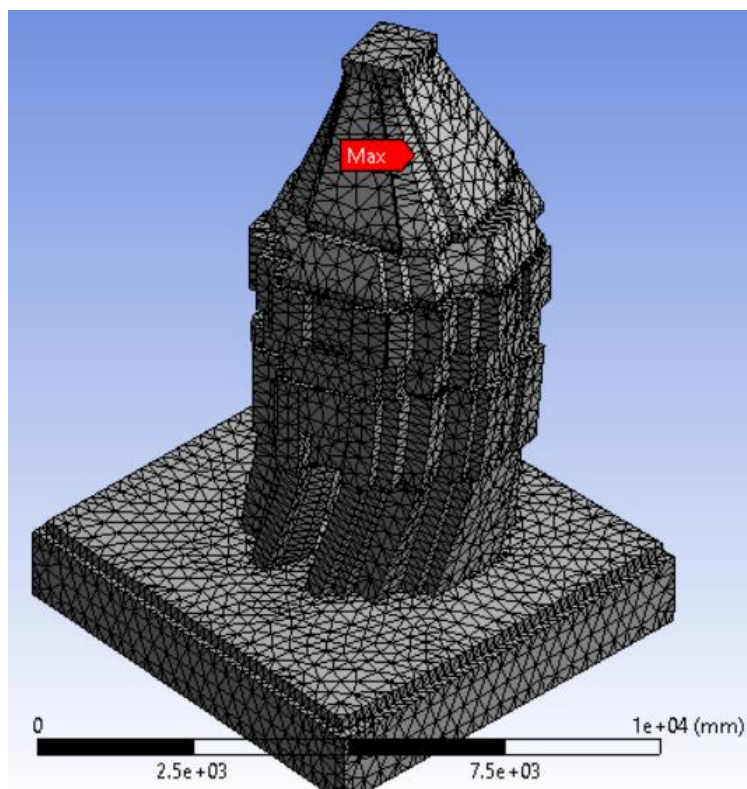
รูปแบบการสั่นไหว	ความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)
1 ทิศทาง Y	4.58
2 ทิศทาง X	4.76
3 รอบแกน Z	11.54
4 ทิศทาง Y	18.02
5 ทิศทาง Y	18.16
6 ทิศทาง X	19.86



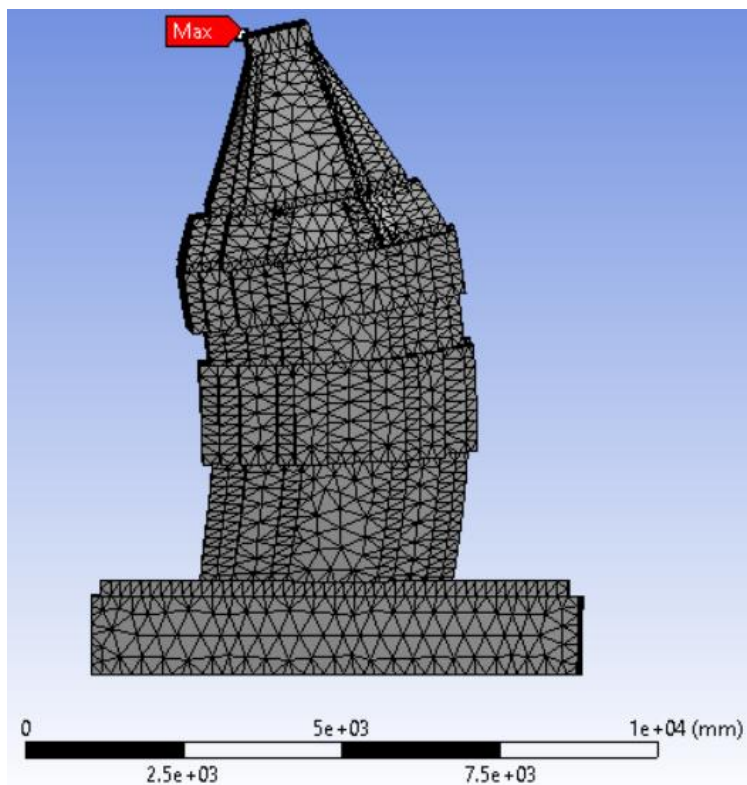
รูปที่ 3.27 รูปแบบการสั่นไหวที่ 1 ความถี่ธรรมชาติ 4.58 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y)



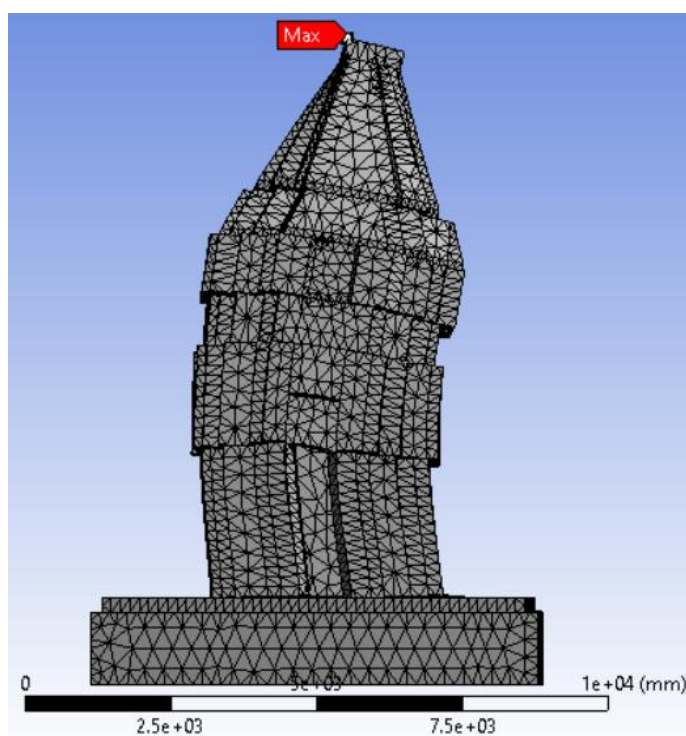
รูปที่ 3.28 รูปแบบการสั่นไหวที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 4.76 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน X)



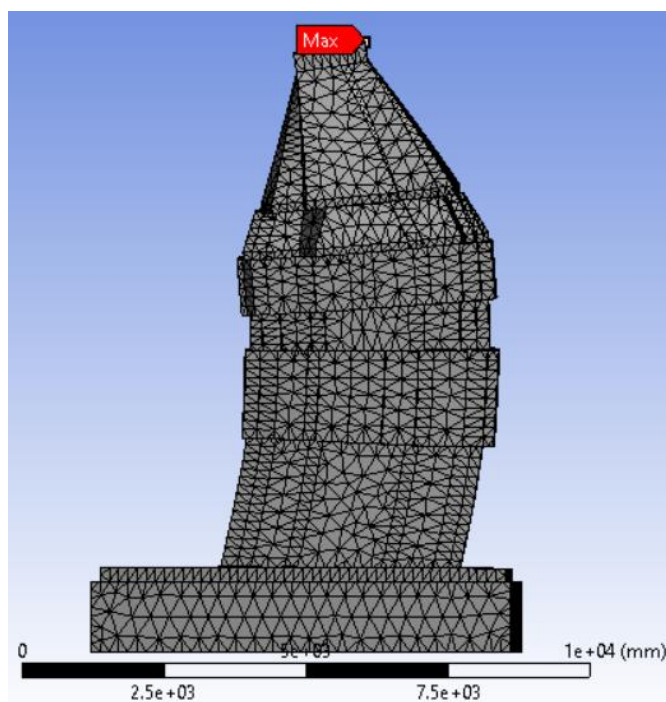
รูปที่ 3.29 รูปแบบการสั่นไหวที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 11.54 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่รอบแกน Z)



รูปที่ 3.30 รูปแบบการสั่นไหวที่ 4 ความถี่ธรรมชาติ 18.02 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y)



รูปที่ 3.31 รูปแบบการสั่นไหวที่ 5 ความถี่ธรรมชาติ 18.16 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y)



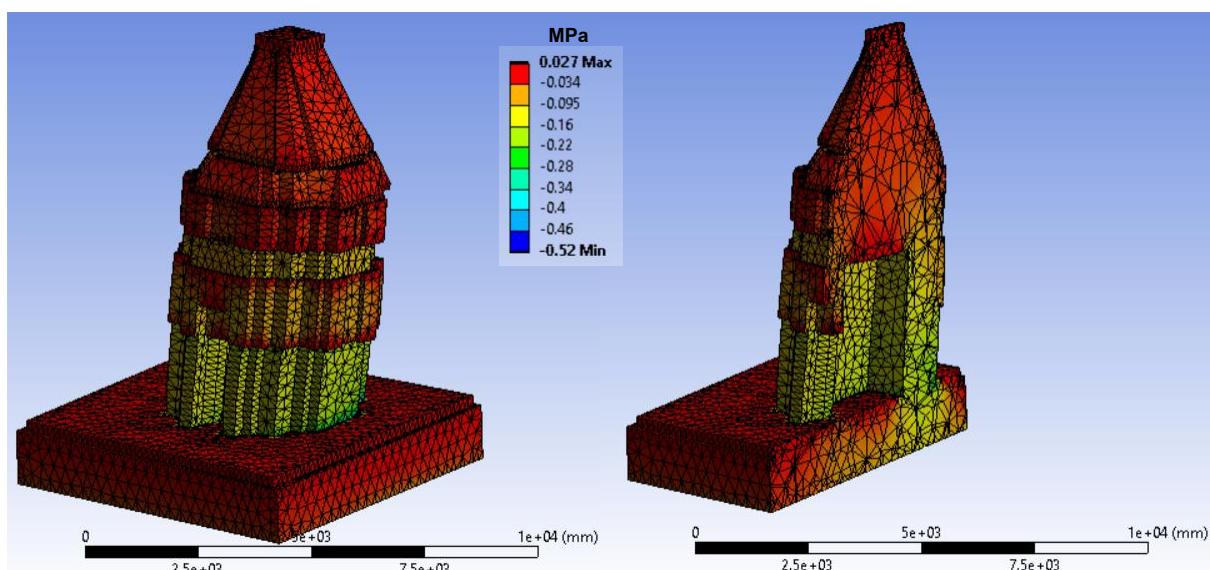
รูปที่ 3.32 รูปแบบการสั่นไหวที่ 6 ความถี่ธรรมชาติ 19.86 เฮิรตซ์ (เคลื่อนที่ตามแนวนอน X)

3.2.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักตัวเอง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายแรงภายในโครงสร้างเจดีย์จากน้ำหนักตัวเอง พบว่าหน่วยแรงอัดหลัก และหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เกินค่าหน่วยแรงอัดประลัย และหน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุก่อ โดยหน่วยแรงอัดสูงสุด 0.40 Mpa เกิดขึ้น ณ บริเวณฐาน (รูปที่ 3.33) คิดเป็นร้อยละ 13.3 ของกำลังอัดของวัสดุก่อ และในกรณีที่หน่วยแรงดึงสูงสุด 0.12 Mpa บริเวณคานทับหลังของทางเข้า คิดเป็นร้อยละ 60 ของกำลังรับแรงดึงของวัสดุก่อ

ตารางที่ 3.9 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักตัวเอง

ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดสูงสุด		หน่วยแรงดึง	
	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังดึงสูงสุด (%)
องค์ปรางค์	-0.03	1.0	0.02	10.0
ทางเข้า	-0.16	5.3	0.12	60.0
ภายในองค์ปรางค์	-0.28	9.3	0.04	20.0
ฐาน	-0.40	13.3	-	-



(ก) ที่ผิว

(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.33 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ผิวภายใต้น้ำหนักตัวเอง (Mpa)

3.2.2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

เมื่อตรวจสอบหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากกรณีของแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ตาม มยพ.1301/1302-61 ที่คาบการเกิดซ้ำ 225 ปี โดยให้แรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามแนวแกน X 100% และกระทำทิศตั้งฉากได้แก่ แกน Y อีก 30% ตามคำแนะนำในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ 1301/1302-61) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีให้แรงแผ่นดินไหวกระทำตามแกน Y 100% ร่วมกับแกน X อีก 30% พบว่าเกิดหน่วยแรงที่มากกว่าเป็นแรงแผ่นดินไหวกระทำตามทิศทาง Y จึงจะรายงานผลการวิเคราะห์ตามแนวแกน Y เป็นหลักเท่านั้น โดยชุดการรวมแรงแผ่นดินไหวตาม มยพ.1303-57 และน้ำหนักบรรทุกทุกตัวเอง มี 2 กรณี ได้แก่

ชุดการรวมแรงที่ 1 1.1D+1.0E

ชุดการรวมแรงที่ 2 0.9D+1.0E

เมื่อ DL เป็นน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว

E เป็นแรงแผ่นดินไหว

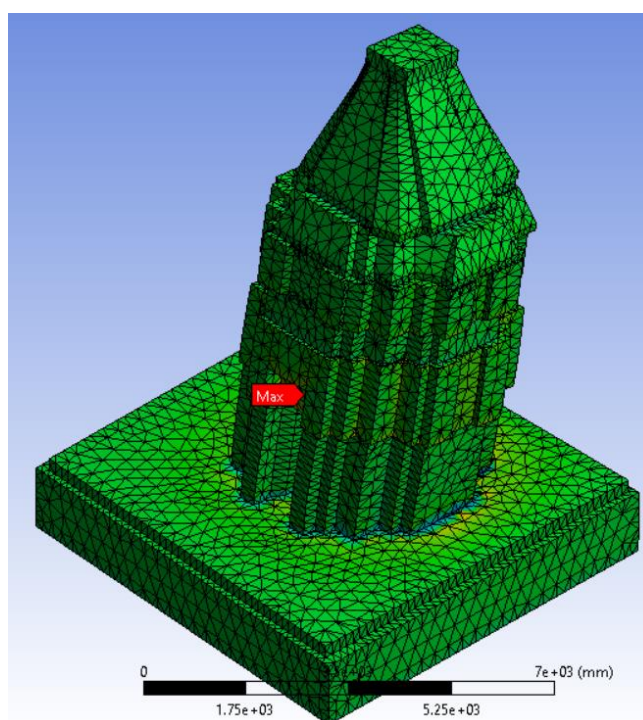
ผลการวิเคราะห์พบว่า ยอดเจดีย์องค์มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเพียง 0.6 มม. ซึ่งมีค่าน้อยมากเนื่องจากลักษณะของปรางค์มีความชะลูดต่ำ อีกทั้งความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าน้อย หน่วยแรงอัดมีค่าสูงสุด 0.43 Mpa และ 0.35 Mpa สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของอิฐก่อ (3.0 Mpa) คิดเป็นร้อยละ 11.7-14.3 ณ บริเวณรอยต่อระหว่างฐานกับองค์เจดีย์ ดังรูปที่ 3.34 โดยตำแหน่งอื่นๆ ค่าหน่วยแรงอัดยังไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่า 0.23 และ 0.21 Mpa ในชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยมีค่าสูงสุดบริเวณคานทับหลังตรงทางเข้าภายในองค์ปรางค์ คิดเป็นร้อยละ 114.5-102.5 ซึ่งเกินกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ในขณะที่ตำแหน่งอื่นๆ หน่วยแรงดึงไม่เกินค่าที่ยอมให้ ดังรูปที่ 3.35

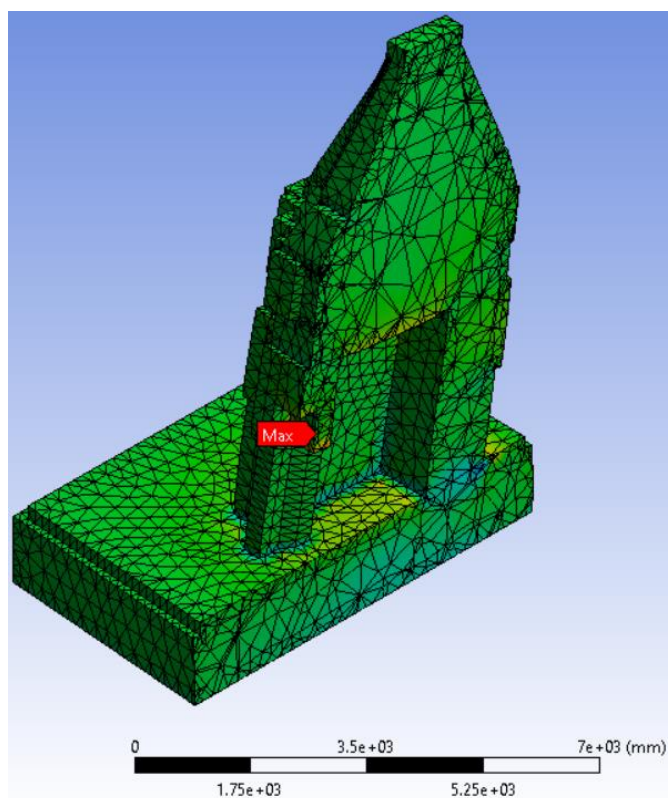
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น องค์ปรางค์ถาชี จะเกิดการวิบัติบริเวณ คานทับหลังตรงทางเข้าภายในองค์ปรางค์ เนื่องจากมีหน่วยแรงดิ่งที่สูง และเป็นจุดอ่อนแอ ขององค์ปรางค์ แม้ องค์ปรางค์จะมีความละชุดต่ำ และระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าไม่สูง ดังนั้นจึงควรเสริมกำลังบริเวณ คานทับหลังที่บริเวณทางเข้าภายในองค์เจดีย์ เพื่อให้เจดีย์มีความปลอดภัย และมีความคงทนมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.10 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ตำแหน่งที่เกิด	ชุดการรวมแรง 1.1DL+1.0E		ชุดการรวมแรง 0.9DL+1.0E	
	หน่วยแรง ที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของ กำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรง ที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของ กำลังดิ่งสูงสุด (%)
องค์ปรางค์	0.07 (ดิ่ง)	36.0	0.07 (ดิ่ง)	34.0
ทางเข้า	0.23 (ดิ่ง)	114.5	0.21 (ดิ่ง)	102.5
ภายในองค์ปรางค์	0.07 (ดิ่ง)	37.0	0.07 (ดิ่ง)	33.0
ฐาน	-0.43 (อัด)	14.3	-0.35 (อัด)	11.7

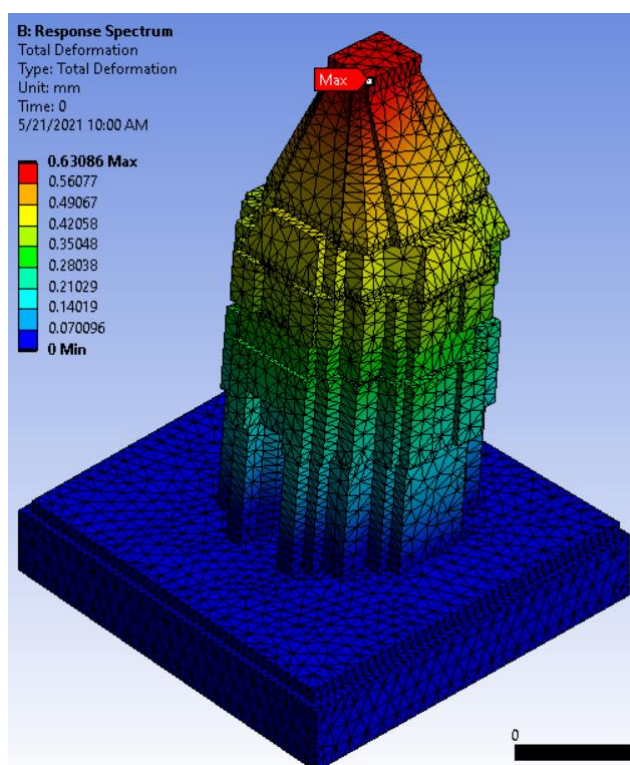


(ก) รูปด้านนอก



(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.34 หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Mpa)



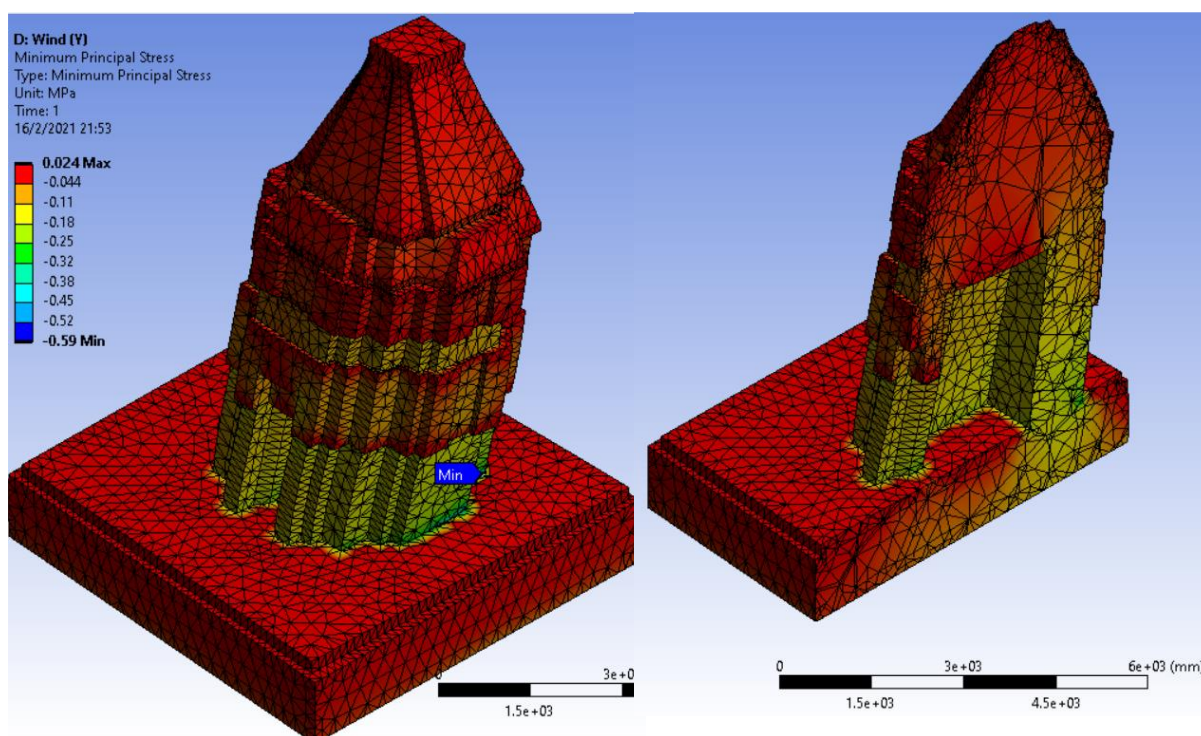
รูปที่ 3.35 การเคลื่อนตัวสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว

3.2.2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม

จากการวิเคราะห์ผลของแรงลมตาม มยพ.1311-50 ในทิศทางตามแนวแกน x และ y โดยผลการศึกษพบว่าในทิศทาง y ให้ค่าหน่วยแรงมากกว่าทิศทาง x เล็กน้อย จึงนำผลการศึกษามาแสดงเฉพาะทิศทาง y เพียงทิศทางเดียว พบว่า การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายเจดีย์มีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ฐานบริเวณรอยต่อระหว่างองค์ปรางค์ มีค่าสูงสุด 0.52 Mpa คิดเป็นร้อยละ 17.3 ยังไม่เกินค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของวัสดุก่อ (รูปที่ 3.36) ในขณะที่หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณคานทับหลังบริเวณทางเข้า มีค่าสูงสุด 0.13 Mpa หรือประมาณร้อยละ 65 ของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของวัสดุก่อ แสดงว่าจะไม่เกิดความเสียหาย ในขณะที่มีแรงลมกระทำตาม มยพ.1311-50 ดังรูปที่ 3.36

ตารางที่ 3.11 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงลม

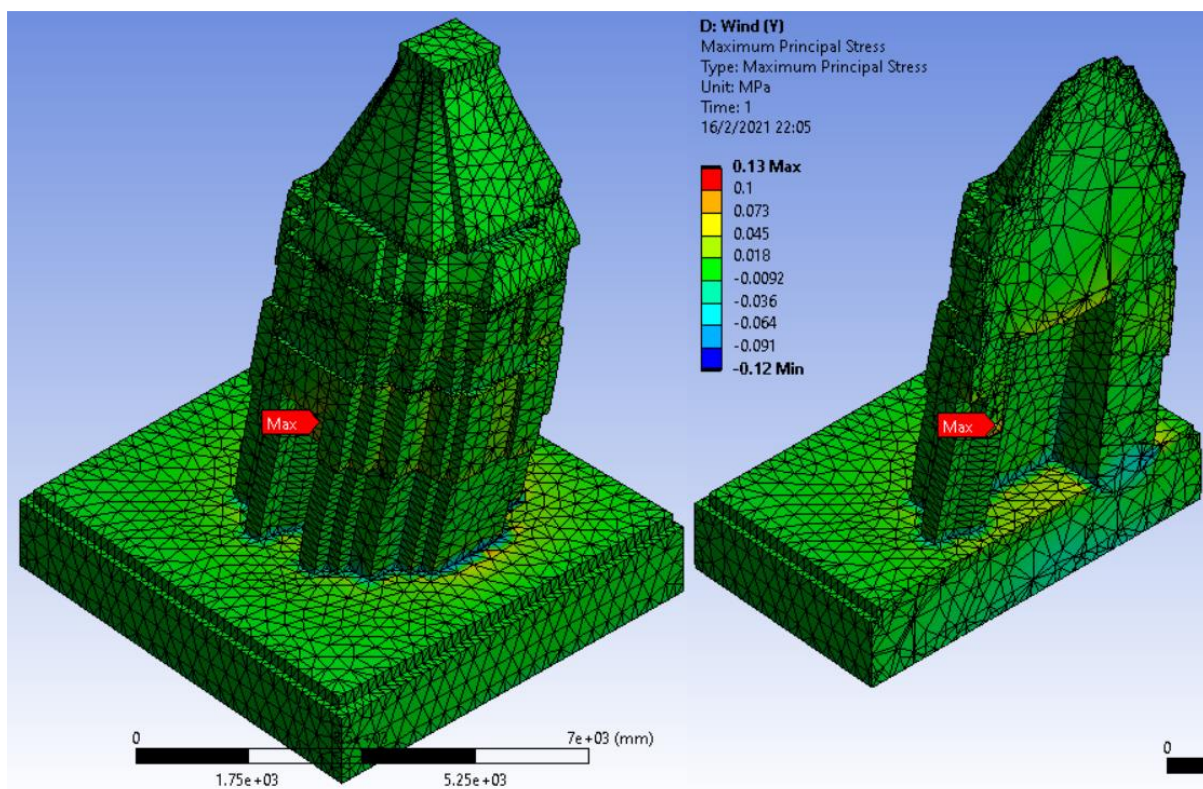
ตำแหน่งที่เกิด	หน่วยแรงอัดสูงสุด		หน่วยแรงดึง	
	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังอัดสูงสุด (%)	หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (Mpa)	ร้อยละของกำลังดึงสูงสุด (%)
องค์ปรางค์	-0.32	10.7	0.018	9.0
ทางเข้า	-0.25	8.3	0.13	65.0
ภายในองค์ปรางค์	-0.32	10.7	0.045	22.5
ฐาน	-0.52	17.3	0.018	9.0



(ก) ที่ผิว

(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.36 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงลม (Mpa)



(ก) ที่ผิว

(ข) รูปตัด

รูปที่ 3.37 หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวภายใต้แรงลม (Mpa)

3.2 สรุปผลการดำเนินงานวิเคราะห์เจดีย์

- แบบจำลองที่ทดลองสร้างขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้แบบเจดีย์วัดมหาธาตุ ในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จังหวัดสุโขทัย เมื่อวิเคราะห์ผลแล้ว พบว่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งพบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุก่อ ดังนั้นหากไม่เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง หรือเกิดการทรุดตัวของดิน เจดีย์จะยังคงอยู่ในสภาวะสมดุล และไม่เกิดความเสียหาย วัสดุก่อในเจดีย์สามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากด้านบนลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย ภายใต้แรงลมตาม มยผ. 1311-50 พบว่าเจดีย์วัดมหาธาตุ มีหน่วยแรงดิ่งที่เกินค่าที่ยอมให้บริเวณยอดเจดีย์ประธาน ส่วนภายใต้แรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1303-57 พบว่าเจดีย์วัดมหาธาตุ สามารถต้านทานแรงอัดได้ แต่จะเกิดความเสียหายจากแรงดิ่งที่ยอดเจดีย์ เช่นเดียวกับแรงลม นอกจากนี้แล้วยังจะความเสียหายจากแรงดิ่งที่เรือนธาตุที่รองรับองค์ระฆังที่เป็นลักษณะดอกบัวตูม และเกิดความเสียหายในองค์ปราสาททั้ง 4 เนื่องจากแรงดิ่งเช่นกัน

- แบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับเป็นตัวแทนอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ คือ องค์ปราสาทฤาษี ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกตายตัว แรงลม จะไม่เกิดความเสียหายใดๆ แต่เกิดความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวบริเวณคานทับหลัง ตรงทางเข้าภายในองค์ปราสาท บริเวณประตูทางเข้าองค์ปราสาท เนื่องจากมีหน่วยแรงดิ่งที่สูงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกด้านบน และเป็นจุดอ่อนแอ ขององค์ปราสาท แม้ว่าองค์เจดีย์มีลักษณะชะลูดต่ำ และมีความเร่งของพื้นดินในจังหวัดเพชรบูรณ์จะมีค่าไม่สูงก็ตาม

บทที่ 4

การวิเคราะห์การเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ได้เลือกเจดีย์วัดมหาธาตุและปราสาทศิลาเป็นตัวอย่างในการศึกษาวิธีการเสริมกำลังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองที่มีพฤติกรรมของวัสดุเสริมกำลังแบบอิลาสติกเชิงเส้น เช่นเดียวกับวัสดุของโครงสร้างที่จะทำการเสริมกำลัง มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์การเสริมกำลังเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

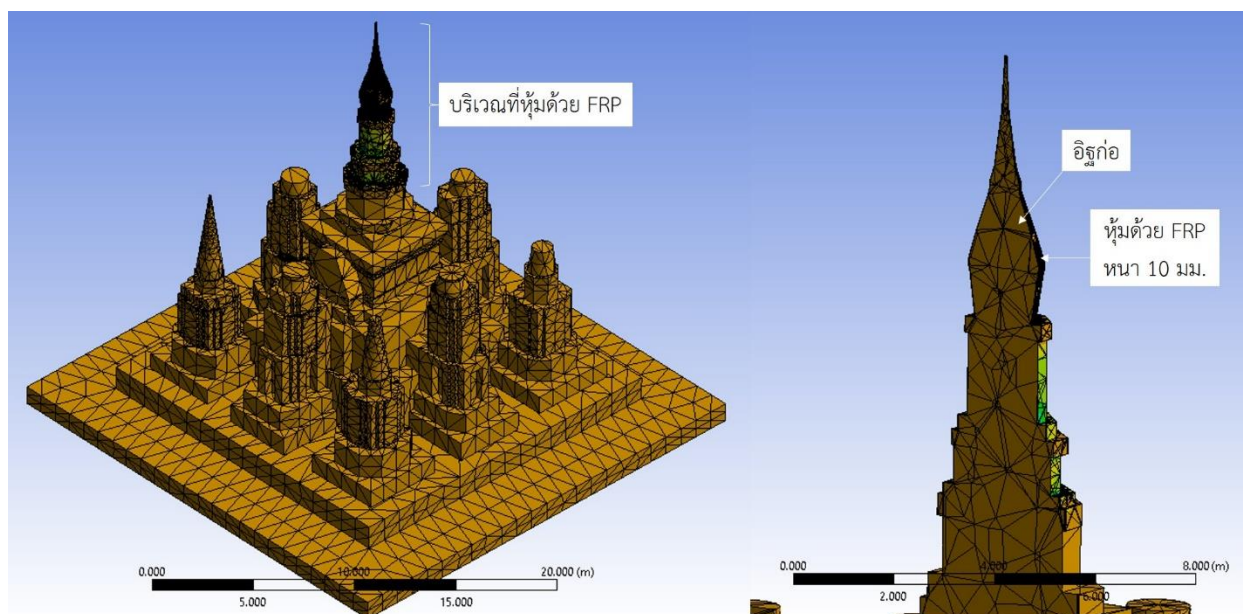
จากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว ไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุก่อ ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีการเสื่อมสภาพของโครงสร้างหรือการทรุดตัวของดิน วัสดุก่อในเจดีย์จะสามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากด้านบนลงสู่พื้นดินได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพฤติกรรมภายใต้แรงลมตาม มยผ. 1311-50 พบว่ามีหน่วยแรงดึงเกินค่าที่ยอมให้ในบริเวณยอดเจดีย์ประธาน ส่วนในกรณีของแรงแผ่นดินไหวตาม มยผ. 1303-57 พบว่าเจดีย์สามารถต้านทานแรงอัดได้ แต่จะมีความเสียหายเนื่องจากแรงดึงที่ยอดเจดีย์ เรือนธาตุที่รองรับองค์ระฆัง และในองค์ปราสาทบริเวณใกล้จุดเชื่อมต่อกับฐานของเจดีย์ประธาน (องค์ปราสาท P2 และ P4) เมื่อพิจารณาความเสียหายดังที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาวิธีการเสริมกำลัง 2 วิธี ได้แก่ การเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และการเสริมกำลังองค์ปราสาทด้วยการติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของเจดีย์ในเชิงของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใน ภายหลังจากได้รับการเสริมกำลังแล้ว

4.1.1 การเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย หรือ Fiber-reinforced polymer (FRP) เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยทำหน้าที่รับแรงดึงเป็นหลัก และมีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างเส้นใย ปกป้องเส้นใยจากสภาพแวดล้อมและทำให้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถขึ้นรูปได้เหมาะสมกับการใช้งาน ข้อดีประการหนึ่งของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคือมีอัตราส่วนกำลังรับแรงต่อน้ำหนักที่สูง จึงสามารถใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าวัสดุเสริมกำลังทั่วไป เหมาะกับการใช้เสริมกำลังยอดเจดีย์เนื่องจากมีผลให้น้ำหนักของโครงสร้างเปลี่ยนไปไม่มาก

ในการศึกษานี้ ได้ทดลองใช้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามมาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1508-51) มีอัตราส่วนเส้นคาร์บอนต่อเส้นใยแก้ว 25:75 หน่วยน้ำหนัก 1,850 กก./ลบ.ม. โมดูลัสยืดหยุ่น 63.9 GPa อัตราส่วนปัวซอง 0.22 กำลังรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเท่ากับ 641.2 MPa และกำลังรับแรงอัดใช้เท่ากับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพ็อกซี่ 4 MPa แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเสริมกำลังยอดเจดีย์ด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยการพันหุ้มตั้งปลายยอดเจดีย์ลงมาเป็นระยะ 9.4 ม. ดังรูปที่ 4.1 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้มีความหนา 10 มม. ใช้ชนิดของเอลิเมนต์แบบ solid element 3 มิติ เช่นเดียวกับอิฐก่อและศิลาแลง

และสมมติให้รอยต่อระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างเจตีย์เป็นแบบสมบูรณ์ (perfect bonding) ภาพผนวกที่ ก แสดงรายละเอียดการเสริมกำลังเจตีย์ด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



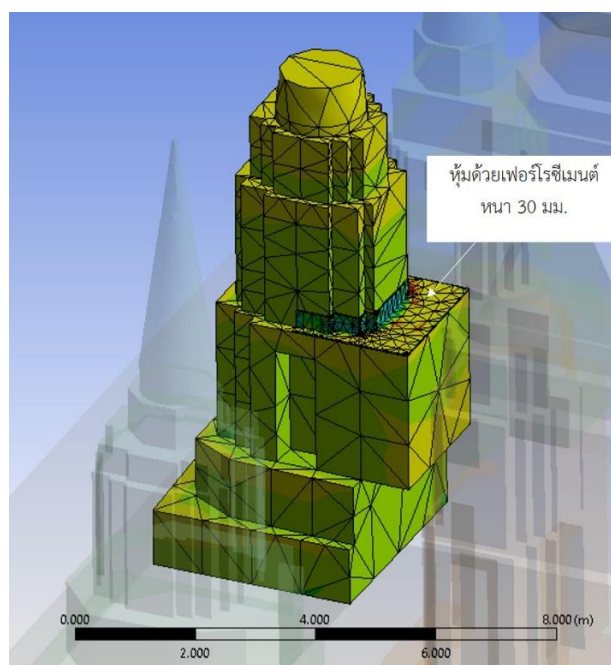
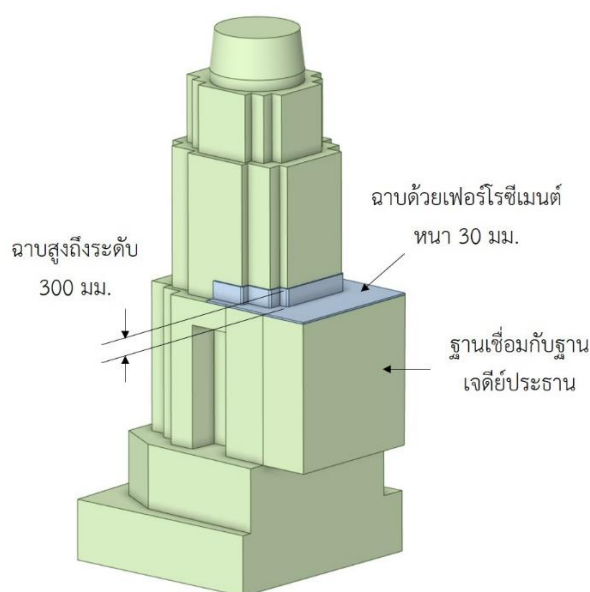
รูปที่ 4.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเสริมกำลังยอดเจตีย์วัดมหาธาตุด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

4.1.2 การเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยการติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเจตีย์วัดมหาธาตุด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าภายใต้แรงแผ่นดินไหว เกิดหน่วยแรงดึงสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุที่บริเวณฐานขององค์ปรางค์ P2 และ P4 ที่มีส่วนเชื่อมต่อกับฐานของเจตีย์ประธาน ในการศึกษา นักวิจัยได้เลือกใช้เฟอร์โรซีเมนต์ในการเสริมกำลังบริเวณนี้ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยในบริเวณที่มีมุม (re-entrant corner) ยกตัวอย่างเช่นบริเวณฐานขององค์ปรางค์ดังกล่าว อีกทั้งเฟอร์โรซีเมนต์มีสตีฟเนสสูงกว่าพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จึงเหมาะสมในการช่วยลดหน่วยแรงดึงที่น่าจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ทางขวางของส่วนบนขององค์ปรางค์ เฟอร์โรซีเมนต์ที่ใช้ในการเสริมกำลังประกอบด้วยโครงเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. วางเรียงเป็นตารางประมาณ 150x150 มม. และใช้เหล็กกรงไก่ที่มีช่องเป็นรูป 6 เหลี่ยมพันหุ้ม แล้วฉาบด้วยปูนทรายมอร์ตาร์หนาประมาณ 30 มม. ยึดเฟอร์โรซีเมนต์กับผิวองค์ปรางค์ด้วยเหล็กเสียบขนาด 9 มม.

ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์ที่ผิวฐานองค์ปรางค์ เริ่มตั้งแต่ผนังของฐานเจตีย์ประธานไปจนถึงผิวแนวตั้งขององค์ปรางค์และสูงขึ้นเป็นระยะ 300 มม. ดังรูปที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุในการจำลองใช้ตาม ACI 549R-97 State-of-the-Art Report on Ferrocement ซึ่งแนะนำค่ากำลังต้านทานแรงอัดไม่เกิน $0.45f'_c$ เมื่อ f'_c เป็นค่ากำลังอัดประลัยสูงสุดของปูนฉาบหล่อเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 76x150 มม. ในงานวิจัยนี้สมมุติมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 40 MPa ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของเฟอร์โรซีเมนต์จึงเท่ากับ 18 MPa ทั้งนี้ ACI 549R-97 ยังแนะนำค่ากำลังรับแรงดึงของเฟอร์โรซีเมนต์ไม่เกิน 207 MPa สำหรับเฟอร์โรซีเมนต์ที่มีความหนา 75 มม. ดังนั้นจึงใช้ค่า

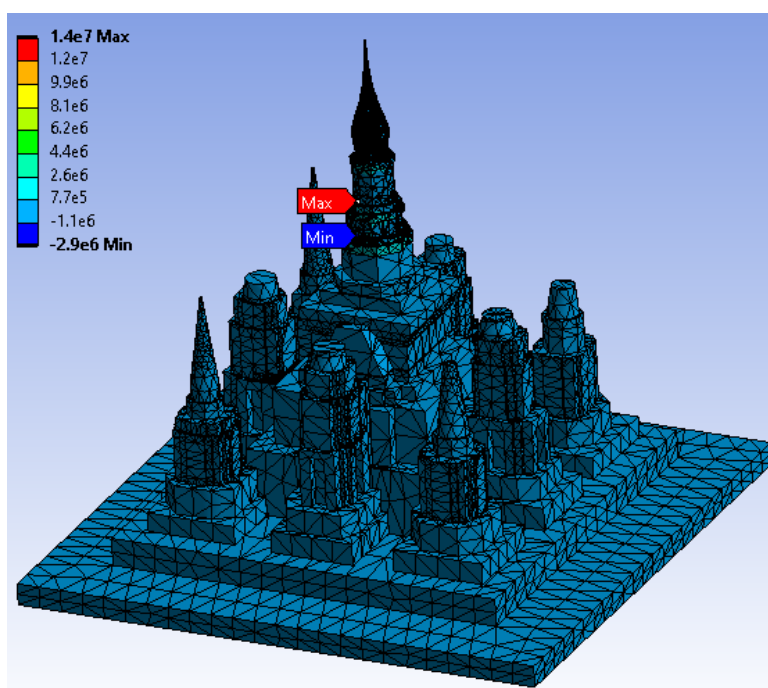
กำลังดึงประมาณ 200 MPa ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าโมดูลัสใช้ตามผลการศึกษาของ Jayaramppa และ Bai (2016) เท่ากับ 20 GPa และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.18 แบบจำลองของเฟอร์โรซีเมนต์ใช้ชนิดของเอลิเมนต์แบบ solid element 3 มิติ เช่นเดียวกับอิฐก่อและศิลาแลง และสมมุติให้รอยต่อระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างเจตีย์เป็นแบบสมบูรณ์ (perfect bonding) ทั้งนี้สมมุติพฤติกรรมของเฟอร์โรซีเมนต์เป็นแบบวัสดุเนื้อเดียว (homogeneous) และมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดการเสริมกำลังเจตีย์ด้วยการติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์



รูปที่ 4.3 รูปแบบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเสริมกำลังฐานองค์ปรางด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ (ตัวอย่างองค์ปราง P2)

4.1.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลัง

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดมหาธาตุภายหลังการเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ (ในแบบจำลองเดียวกัน) พบว่าภายใต้แรงลมตาม มยผ. 1311-50 หน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้เสริมกำลังเจดีย์ (รูปที่ 4.4) และหน่วยแรงดึงในยอดเจดีย์ประธานมีค่าลดลง 0.41 MPa โดยมีร้อยละ 35 ของหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ของปูนก่อ ส่วนหน่วยแรงดึงในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าสูงสุดเพียง 13.56 MPa คิดเป็นร้อยละ 2.1 ของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่วนหน่วยแรงอัดมีค่า 16.4 MPa ซึ่งเกินกว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ อย่างไรก็ตามเนื่องจากรูปแบบการติดตั้งของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นการยึดติดกับผิวโครงสร้างการปัดผิวโดยหน่วยแรงอัดไม่น่าจะเกิดขึ้นในการใช้งาน ส่วนหน่วยแรงในส่วนอื่น ๆ มีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ (ตารางที่ 4.1)

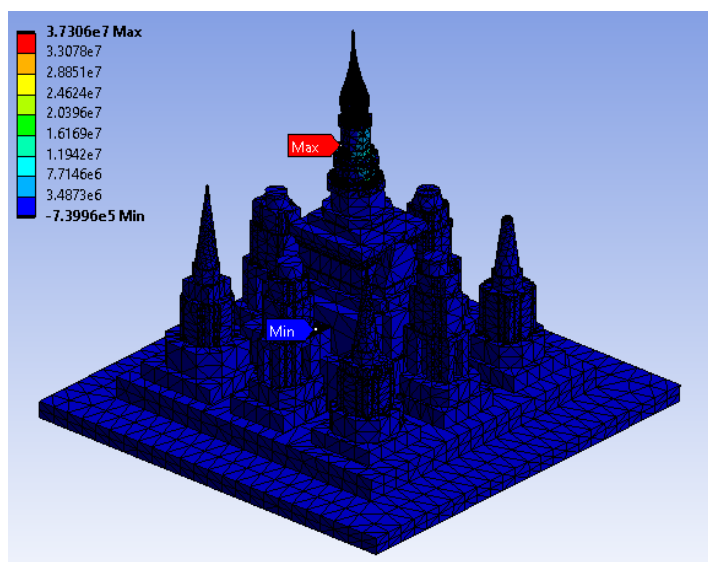


รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของหน่วยแรงดึงสูงสุดในเจดีย์ภายใต้แรงลมภายหลังการเสริมกำลัง

ตารางที่ 4.1 หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเจดีย์ภายใต้แรงลมภายหลังจากการได้รับการเสริมกำลัง

	หน่วยแรงอัด (MPa)	ร้อยละของกำลังอัด (%)	หน่วยแรงดึง (MPa)	ร้อยละของกำลังดึง (%)
เจดีย์ประธาน (M)	-0.2	4.0	0.07	35
เจดีย์ปรางค์ (P1-P4)	-0.22	4.4	0.1	50
เจดีย์ราย (S1-S4)	-0.17	5.7	0.08	40
กึ่งกลางฐาน	-0.26	5.2	0.04	20
เฟอร์โรซีเมนต์	-2.2	12.2	0.65	0.3
พอลิเมอร์เสริมเส้นใย	-16.4	410	13.56	2.1

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเจดีย์วัดมหาธาตุภายหลังการเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ (ในแบบจำลองเดียวกัน) ภายใต้แรงแผ่นดินไหว พบว่าหน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งสองชุดการรวมแรง เช่นเดียวกับกรณีของแรงลม (รูปที่ 4.5) หน่วยแรงดึงสูงสุดในยอดเจดีย์ลดลง 0.18 และ 0.2 MPa สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าของหน่วยแรงดึงดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับหน่วยแรงที่ยอมให้ของศิลาแลง ดังนั้นจึงควรเพิ่มความหนาของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหรือเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเพื่อให้ความปลอดภัยมากขึ้น หน่วยแรงดึงสูงสุดในองค์ปรางค์มีค่าลดลง 0.06 และ 0.13 MPa สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 30 และ 65 ของหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ หน่วยแรงดึงสูงสุดในพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าระหว่าง 35.8 และ 37.3 ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 6 ของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ส่วนหน่วยแรงในส่วนอื่น ๆ มีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ (ตารางที่ 4.2)



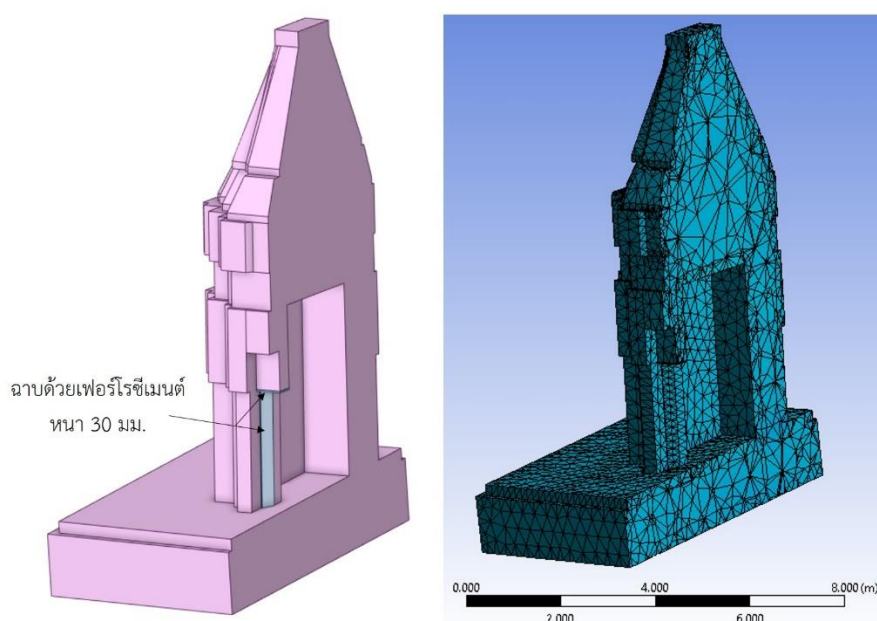
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของหน่วยแรงดึงสูงสุดในเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังการเสริมกำลัง

ตารางที่ 4.2 หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังจากได้รับการเสริมกำลัง

ตำแหน่งที่เกิด	ชุดการรวมแรง 1.1DL+1.0E		ชุดการรวมแรง 0.9DL+1.0E	
	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)
เจดีย์ประธาน (M)	0.18 (ดึง)	90	0.2 (ดึง)	100
เจดีย์ปรางค์ (P1-P4)	0.06 (ดึง)	30	0.13 (ดึง)	65
เจดีย์ราย (S1-S4)	0.075 (ดึง)	37.5	0.014 (ดึง)	7
กึ่งกลางฐาน	-0.2 (อัด)	4	-0.16 (อัด)	3.2
เฟอร์โรซีเมนต์	-0.74 (อัด)	4.1	-0.57 (อัด)	3.2
พอลิเมอร์เสริมเส้นใย	37.3 (ดึง)	5.8	35.8 (ดึง)	5.6

4.2 การวิเคราะห์การเสริมกำลังปรางค์ฤาษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ

จากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างปรางค์ฤาษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ พบว่าองค์ปรางค์ไม่มีความเสียหายภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวหรือแรงลม แต่อาจจะมีปัญหารอยร้าวภายใต้แรงแผ่นดินไหวจากค่าหน่วยแรงดึงที่สูงบริเวณคานทับหลังเหนือประตูทางเข้าองค์ปรางค์ เมื่อพิจารณาบริเวณที่มีแนวโน้มเกิดความเสียหายได้ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาวิธีการเสริมกำลัง 2 วิธี ได้แก่ การติดตั้งเฟอร์โรซีเมนต์ที่ผิวอิฐก่อของกรอบซุ้มทางเข้าและการติดตั้งโครงเหล็กค้ำยันภายในองค์ปรางค์



รูปที่ 4.5 รูปแบบและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการเสริมกำลังฐานองค์ปรางด้วยเฟอร์โรซีเมนต์

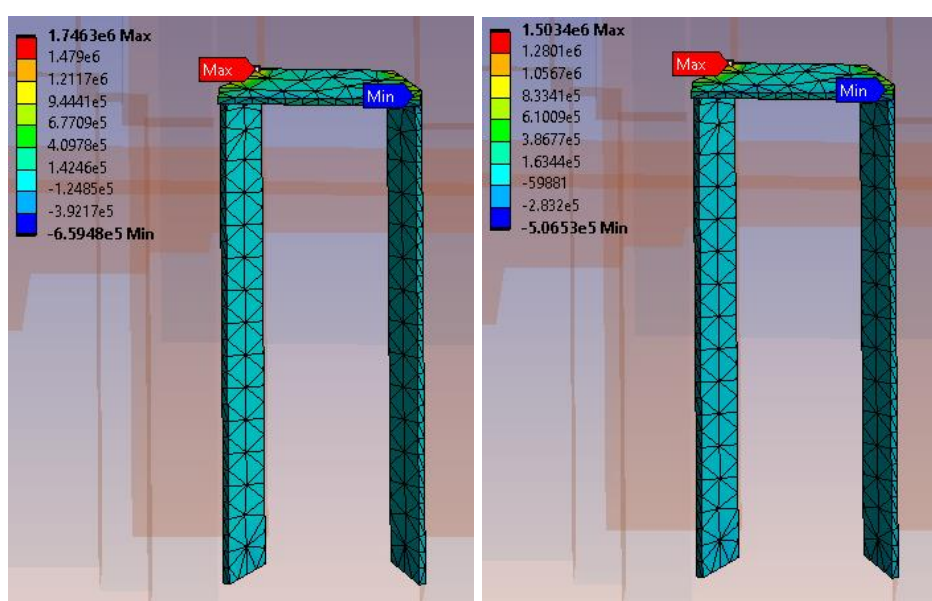
4.2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์

เฟอร์โรซีเมนต์ที่ใช้เสริมกำลังเป็นลักษณะเดียวกับที่ใช้เสริมกำลังองค์ปรางค์ในเจดีย์วัดมหาธาตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ใช้ความหนาเฟอร์โรซีเมนต์ 30 มม. ฉาบตั้งแต่วางของซุ้มประตูไปจนถึงท้องคานทับหลัง ดังรูปที่ 4.5 จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างปรางค์ฤาษีภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังการเสริมกำลังบริเวณประตูทางเข้าด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ พบว่าค่าของหน่วยแรงสูงสุดในบริเวณต่างๆ ของปรางค์ฤาษีไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (ประมาณ 13-15%) เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลัง (ตารางที่ 4.3) หน่วยแรงดึงสูงสุดในเฟอร์โรซีเมนต์เกิดที่มุมด้านซ้ายใต้คานทับหลัง มีค่าเท่ากับ 1.75 และ 1.5 MPa สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (รูปที่ 4.6) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ในเฟอร์โรซีเมนต์อย่างมาก เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าของหน่วยแรงสูงสุดในโครงสร้าง สามารถสรุปได้ว่าเฟอร์โรซีเมนต์ที่ติดตั้งตามรูปแบบในแบบจำลองไม่สามารถทำหน้าที่เสริมกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แรงแผ่นดินไหว ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากค่าสติเฟนสทางขวางที่ต่ำของรูปแบบเฟอร์โรซีเมนต์ที่ใช้ติดตั้ง ส่งผลให้ไม่สามารถช่วย

ด้านการเปลี่ยนรูปบริเวณทางเข้าปรางค์ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวได้ การใช้โครงเหล็กแทนที่เฟอร์โรซีเมนต์อาจช่วยเสริมกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

ตารางที่ 4.3 หน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในปรางค์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังจากได้รับการเสริมกำลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์

ตำแหน่งที่เกิด	ชุดการรวมแรง 1.1DL+1.0E		ชุดการรวมแรง 0.9DL+1.0E	
	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)
องค์ปรางค์	0.02 (ดึง)	10	0.02 (ดึง)	10
ทางเข้า	0.128 (ดึง)	64	0.11 (ดึง)	55
ภายในองค์ปรางค์	0.04 (ดึง)	20	0.04 (ดึง)	20
ฐาน	-0.36 (อัด)	12	-0.3 (อัด)	10
เฟอร์โรซีเมนต์	1.75 (ดึง)	0.9	1.5 (ดึง)	0.75



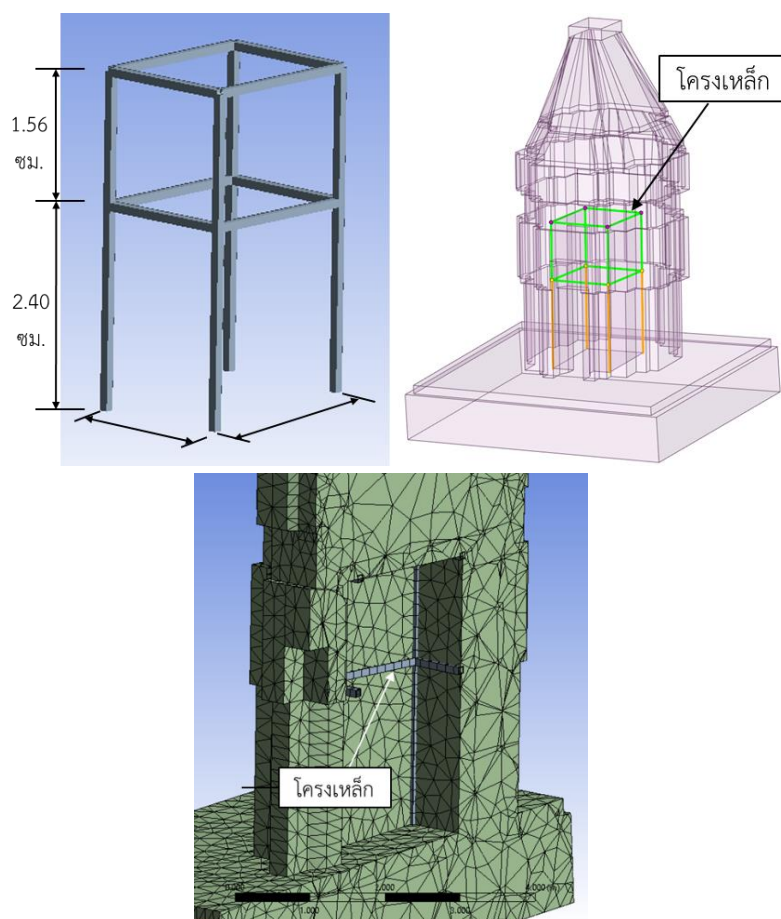
(ก) ชุดรวมแรงที่ 1

(ข) ชุดรวมแรงที่ 2

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของหน่วยแรงดึงสูงสุดในเฟอร์โรซีเมนต์

4.2.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังการเสริมกำลังองค์ปรางค์ด้วยการติดตั้งโครงเหล็กค้ำยัน

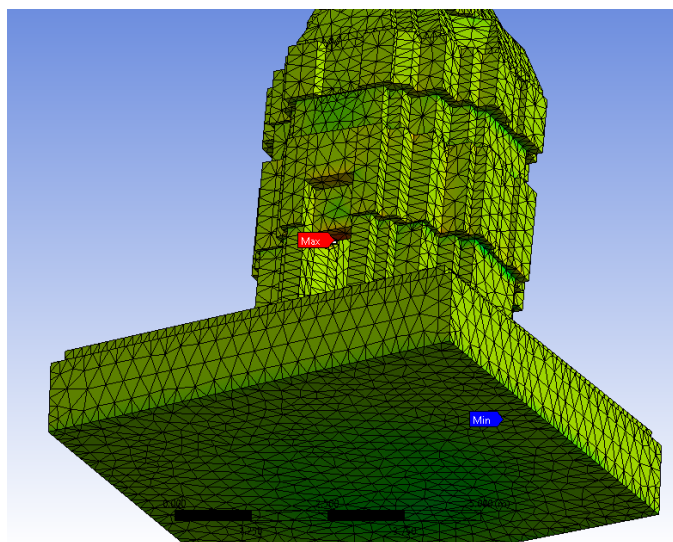
การเสริมกำลังด้วยเฟอร์ไรต์ไมนด์และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ผิวหน้าของโครงสร้างโบราณสถานอาจส่งผลให้รูปลักษณะภายนอกของโครงสร้างโบราณสถานเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้คุณค่าทางศิลปะและวัฒนธรรมลดลงได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยการติดตั้งโครงเหล็กภายในปรางค์ฤาษีเพื่อช่วยในการค้ำยันโครงสร้างทางด้านข้างด้วย ซึ่งแตกต่างจากกรณีของเจดีย์วัดมหาธาตุเนื่องจากมีพื้นที่ภายในโครงสร้างที่เพียงพอสำหรับการติดตั้งโครงเหล็ก โครงเหล็กที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยเสาเหล็กจำนวน 4 ต้น และคานเหล็กจำนวน 8 คาน สร้างจากเหล็กรูปพรรณหน้าตัดกล่องขนาด 100x100 มม.หนา 1 มม. เชื่อมกันที่จุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงเหล็กใช้ Beam Element และสมมติให้รอยต่อระหว่างโครงเหล็กและโครงสร้างองค์ปรางค์เป็นแบบสมบูรณ์ (Perfect Bonding) พฤติกรรมของโครงเหล็กเป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้นและมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200 GPa



รูปที่ 4.7 ลักษณะของโครงเหล็กค้ำยันภายในปรางค์ฤาษีและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในปรางค์ฤาษีภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังจากได้รับการเสริมกำลังด้วยโครงเหล็กค้ำยันภายใน พบว่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่คานทับหลังเหนือทางเข้าองค์ปรางค์ลดลงเหลือร้อยละ 40.5 และ 37 ของกำลังรับแรงดึงสูงสุด สำหรับชุดการรวมแรงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

(ลดลง 41-46% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีโครงเหล็กภายใน) ตามที่แสดงดังรูปที่ 4.7 ทั้งนี้หน่วยแรงในบางตำแหน่งขององค์ปรางค์ เช่น เพดานด้านในและผิวด้านนอก มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการยึดรั้งของโครงเหล็กภายใน หน่วยแรงทุกตำแหน่งมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเสริมกำลังด้วยโครงเหล็กค้ำยันภายในมีประสิทธิภาพในการช่วยลดหน่วยแรงดึงที่คานทับหลังมากกว่าการใช้เฟอร์โรซีเมนต์



รูปที่ 4.8 ลักษณะของโครงเหล็กค้ำยันภายในปรางค์ฤาษีและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.4 หน่วยแรงสูงสุดในปรางค์ฤาษีภายใต้แรงแผ่นดินไหวภายหลังจากได้รับการเสริมกำลังด้วยโครงเหล็ก

ตำแหน่งที่เกิด	ชุดการรวมแรง 1.1DL+1.0E		ชุดการรวมแรง 0.9DL+1.0E	
	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	ร้อยละของกำลัง (%)
องค์ปรางค์	0.06 (ดึง)	30	0.045 (ดึง)	22.5
ทางเข้า	0.081 (ดึง)	40.5	0.074 (ดึง)	37
ภายในองค์ปรางค์	0.067 (ดึง)	33.5	0.057 (ดึง)	28.5
ฐาน	-0.343 (อัด)	11.4	-0.27 (อัด)	9

4.3 สรุปผลการวิเคราะห์การเสริมโครงสร้างโบราณสถานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังยอดเจดีย์วัดมหาธาตุด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถช่วยลดค่าของหน่วยแรงดึงในยอดเจดีย์ภายใต้แรงลมและแรงแผ่นดินไหวได้ ส่วนองค์ปรangk นั้นสามารถใช้เฟอร์โรซีเมนต์ฉาบบนผิวฐานของปรangkที่เชื่อมต่อกับฐานของเจดีย์ประธานเพื่อลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในทุกส่วนของเจดีย์วัดมหาธาตุมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตาม ในกรณีของปรangkธาตุ ซึ่งมีค่าหน่วยแรงดึงสูงเกิดขึ้นที่มุมใต้คานทับหลังเหนือทางเข้า การฉาบกรอบทางเข้าตั้งแต่พื้นไปถึงท้องคานทับหลังด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ไม่สามารถลดค่าหน่วยแรงดังกล่าวได้มากนัก อาจเนื่องมาจากค่าสติเฟนส์ที่ต่ำของรูปแบบของเฟอร์โรซีเมนต์ที่ติดตั้งในทางตรงข้าม การติดตั้งโครงเหล็กค้ำยันภายในปรangkธาตุ สามารถช่วยลดขนาดของหน่วยแรงดึงที่คานทับหลังได้ดี

4.4 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถาน

งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพของแนวทางการเสริมกำลังในการลดค่าของหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม ในการเลือกวัสดุสำหรับใช้เสริมกำลังโครงสร้างโบราณสถานนั้น ควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้ (compatibility) กับวัสดุดั้งเดิมในโครงสร้างด้วย ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์เรซินที่ใช้กับระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อาจมีการซึมผ่านของความชื้นที่ต่ำ ส่งผลให้เกิดความเสื่อมสภาพของโครงสร้างโบราณสถานเนื่องจากความชื้นได้ ส่วนในกรณีของเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลักของมอร์ต้า อาจส่งผลให้เกิดคราบเกลือที่รอยต่อระหว่างเฟอร์โรซีเมนต์และโครงสร้างได้ จึงควรพิจารณาวัสดุทางเลือกที่มีส่วนผสมหลักคล้ายคลึงกับปูนสอที่ใช้ซ่อมแซมโบราณสถาน ในกรณีที่ยังมีข้อมูลความเข้ากันได้ของวัสดุเสริมกำลังไม่เพียงพอ อาจจะทำให้การติดตั้งค้ำยันเป็นการชั่วคราว เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหว นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วยการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง เช่น เฟอร์โรซีเมนต์และพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ที่ผิวนอกของโครงสร้างโบราณสถาน อาจส่งผลให้รูปลักษณะภายนอกของโครงสร้างโบราณสถานเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้คุณค่าทางศิลปะและวัฒนธรรมลดลงได้ จึงควรพิจารณาแนวทางการเสริมกำลังภายในโครงสร้าง เช่น การติดตั้งโครงเหล็กค้ำยันภายในโครงสร้าง การฉีดยาเพื่ออุดรอยร้าว การฝังแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ยังคงต้องได้ศึกษาต่อไป

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นเพียงการเสนอแนวทางการวิเคราะห์ และนำเสนอวิธีการซ่อมและเสริมกำลังให้กับเจดีย์ที่ได้ทำการศึกษาเท่านั้น หากแต่การซ่อมและการลงมือปฏิบัติจริง จะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ให้เห็น และเป็นผู้ลงมือปฏิบัติตามเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- ACI Committee 549-R97. State-of-the-Art Report on Ferrocement. American Concrete Institute. 1997. IJSR-International Journal of Scientific Research. Vol.5 (4), april, 2016. P.662-669.
- Bourman R.P. (1993). Perennial problems in the study of laterite: A review. Australian Journal of Earth Sciences, 40, (4), pp. 387-401.
- David Young, Heritage Consultant. City of Fremantle; Heritage Building Conservation; Technical Advice Sheet 1; Introduction to good conservation practice. Download from www.fremantle.wa.gov.au/cityservices/planning/.
- N.Jayaramappa and H. Sharada Bai. Evaluation of strength and modulus of elasticity of ferrocement elements.
- Wonganan N., Athisakul C., Mahasuwanchai P., Tangchirapat W., Sahamitmongkol R., and Leelataviwat S. (2021), Ancient Materials and Substitution Materials Used in Thai Historical Masonry Structure Preservation, Journal of Renewable Materials (JRM), 2021, Vol.9, no.2.
- กรมการท่องเที่ยว, “วัดมหาธาตุ”, สืบค้นเมื่อ 1 ส.ค. 2560, <https://thailandtourismdirectory.go.th/th/info/attraction/detail/itemid/2947>.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ 1302: 2552. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, บ.ติจิตอลออฟเซท เอเชีย แปซิฟิก จำกัด, กรุงเทพฯ, 2552.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ 1303: 2557. มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, บ.สหมิตรพรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด, นนทบุรี, 2557.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ 1311: 2550. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร, บ.เอส.พี.เอ็ม.การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ, 2550.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ 1311: 2550. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร, บ.เอส.พี.เอ็ม.การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ, 2550.
- กลุ่มงานข้อมูลสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานจังหวัดสุโขทัย, “อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย”, สืบค้นเมื่อ 1 ส.ค. 2563, http://www.sukhothai.go.th/tour/tour_01.htm.
- กลุ่มงานข้อมูลสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานจังหวัดสุโขทัย, “อุทยานประวัติศาสตร์ศรีสัชนาลัย”, สืบค้นเมื่อ 1 ส.ค. 2563, http://www.sukhothai.go.th/tour/tour_02.htm.

นิตยสารศิลปวัฒนธรรม, “ภาพเก่าเล่าตำนาน: “ภาพถ่ายเก่า”บูรณะวัดศรีชุม อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย”, สืบค้นเมื่อ 1 ส.ค. 2563, https://www.silpa-mag.com/old-photos-tell-the-historical-story/article_17681, เผยแพร่ในระบบออนไลน์ เมื่อ 11 มีนาคม พ.ศ.2563.

บริษัทไทยเอ็นจิเนียริงจำกัด. การบูรณะเจดีย์ภูเขาทอง. <http://www.thaiengineering.com>

/2015/index.php/technology/item/409-pagoda-mountain-restoration. 2558

บริษัทไทยเอ็นจิเนียริงจำกัด. งานบูรณะพระเจดีย์และอาคารบริวาร โครงการบูรณปฏิสังขรณ์วัดบวรนิเวศวิหารในพระบรมราชูปถัมภ์. <http://www.thaiengineering.com/2015/index.php>

/article/project-in-thailand/item/402-restoration-of-the-pagoda-and-the-host-plant

พรทิพย์ ตั้งเจริญทรัพย์, พัฒนาการของการก่อสร้างโบราณสถานไทย, วชิราภรณ์ปริญาหมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547.

พิบูลศุภประดิษฐ์ ว., หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และการดูดซึมน้ำของบล็อกศิลาแลงเทียมที่ใช้เศษศิลาแลงเป็นมวลรวมหยาบ, การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.

มานพ ถนอมศรี. สุโขทัย อุทยานประวัติศาสตร์: มรดกโลก. กรุงเทพฯ : พี พี เวิลด์ มีเดีย, 2546

วรศักดิ์ กนกนุกุลชัย, ไพรัช เล่าประเสริฐ และ วิเชียร โสมณวัฒน์. The restoration of the ancient wat bo vorn nivet pagoda. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2550.

คันสนีย์ ชวนะกุล, การศึกษาชนิดและบทบาทของแบคทีเรียต่อการเสื่อมสภาพของโบราณสถาน ณ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย, วชิราภรณ์, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528, 220 หน้า.

สืบศักดิ์ พรหมบุญ และชูเลิศ จิตเจริญ, รูปแบบการวิบัติของฐานรากในประเทศไทย, วิศวกรรมฐานราก 46, คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2546.

สืบศักดิ์ พรหมบุญ. ฐานรากพระที่นั่งอนันตสมาคม และปัญหาที่เกี่ยวข้อง. ฐานราก 2000. 15 มิถุนายน 2543.

แสงเทียน น. (2548). ศิลาแลงเทียม. วิศวกรรมสาร มข., 32, (4), pp. 577-584.

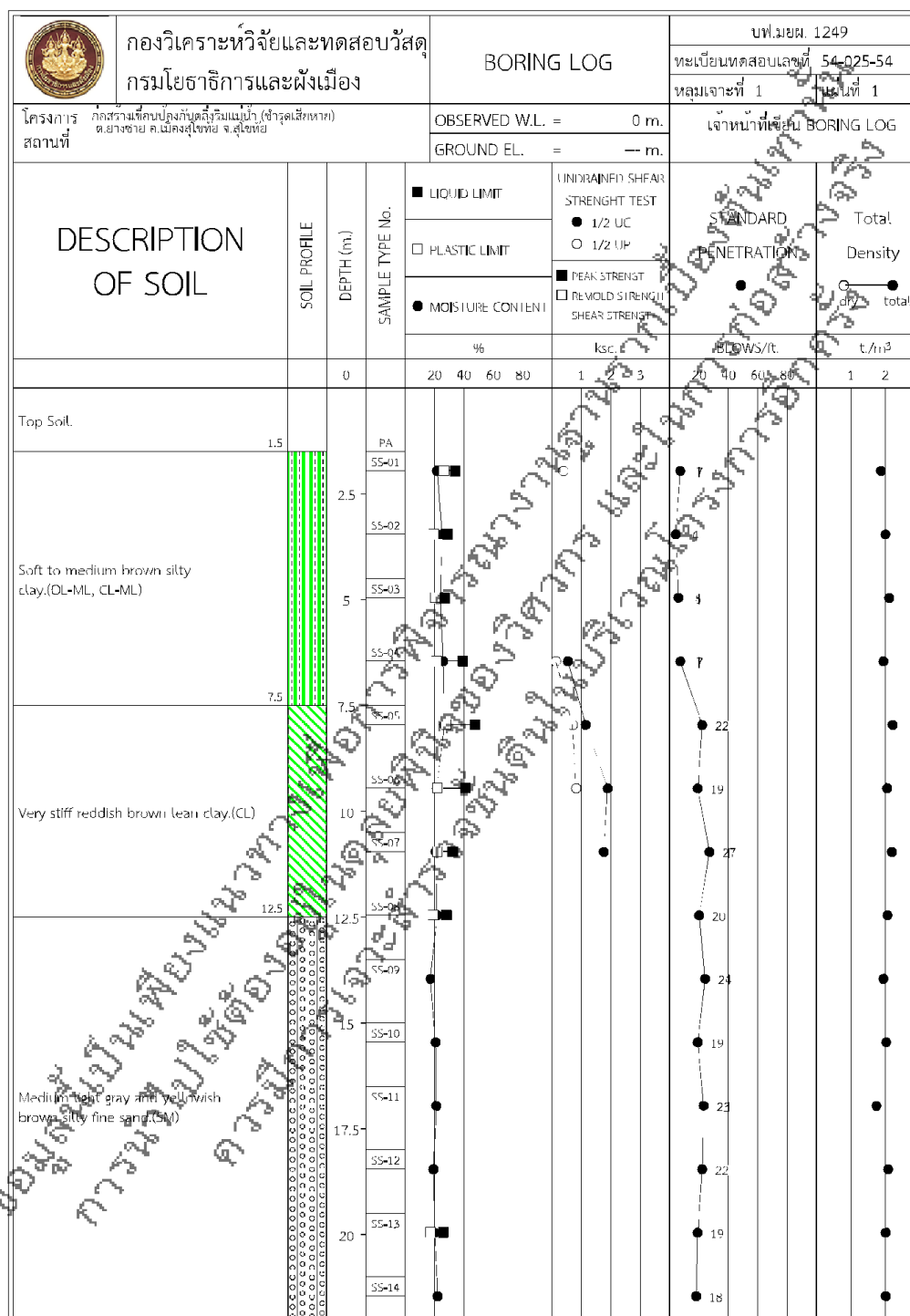
แสงสุรีย์ พังแดง ดารุณี แก้วพิกุล ธวัชชัย โทอินทร์ และ ศรารัตน์ ศาสวัตภิรมย์, สภาพความขึ้นต่อกำลังของหินศิลาแลงสำหรับการก่อสร้างที่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสาน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 15-17 กรกฎาคม 2563 จ.ชลบุรี, WRE35-1-WRE35-4.

ภาคผนวก ก

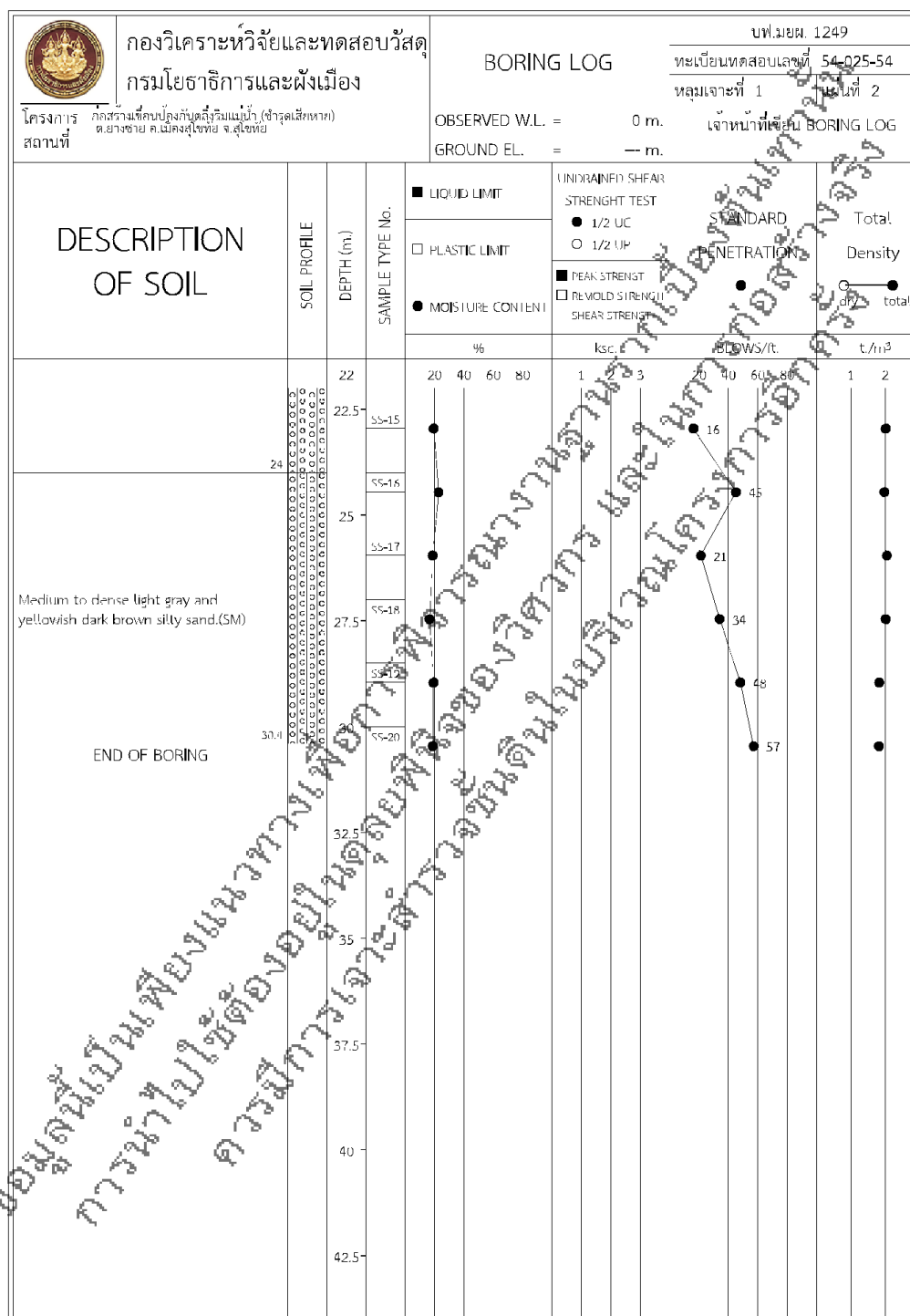
การจำแนกประเภทของดินตามข้อมูลการเจาะสำรวจดินในสนาม

จากการตรวจสอบข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ตั้งของเจดีย์วัดมหาธาตุ อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย โดยนำข้อมูลจาก web site ของกรมโยธาธิการและผังเมือง <http://soilgis.dpt.go.th/> พบว่าหลุมเจาะสำรวจ 2 หลุมได้แก่ ต.ยางซ้าย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย และหลุมเจาะสำรวจ ม.5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งของอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยมากที่สุด รายละเอียดดังรูป ก.1 และ ก.2 โดยทั้งสองหลุมมีลักษณะเป็นดินเหนียว จนถึงดินเหนียวแข็ง จนถึงระดับความลึก 30 ม. ที่มีการสำรวจ โดยมีชั้นทรายเล็กน้อยแทรกอยู่

เมื่อนำมาจำแนกประเภทตามรายละเอียดการคำนวณแสดงดังตารางในรูปที่ ก.3 และ ก. 4 สำหรับหลุมเจาะสำรวจ ต.ยางซ้าย และ ม.5 ต.บ้านกล้วย พบว่า สามารถจำแนกประเภทดินได้เป็นประเภท D



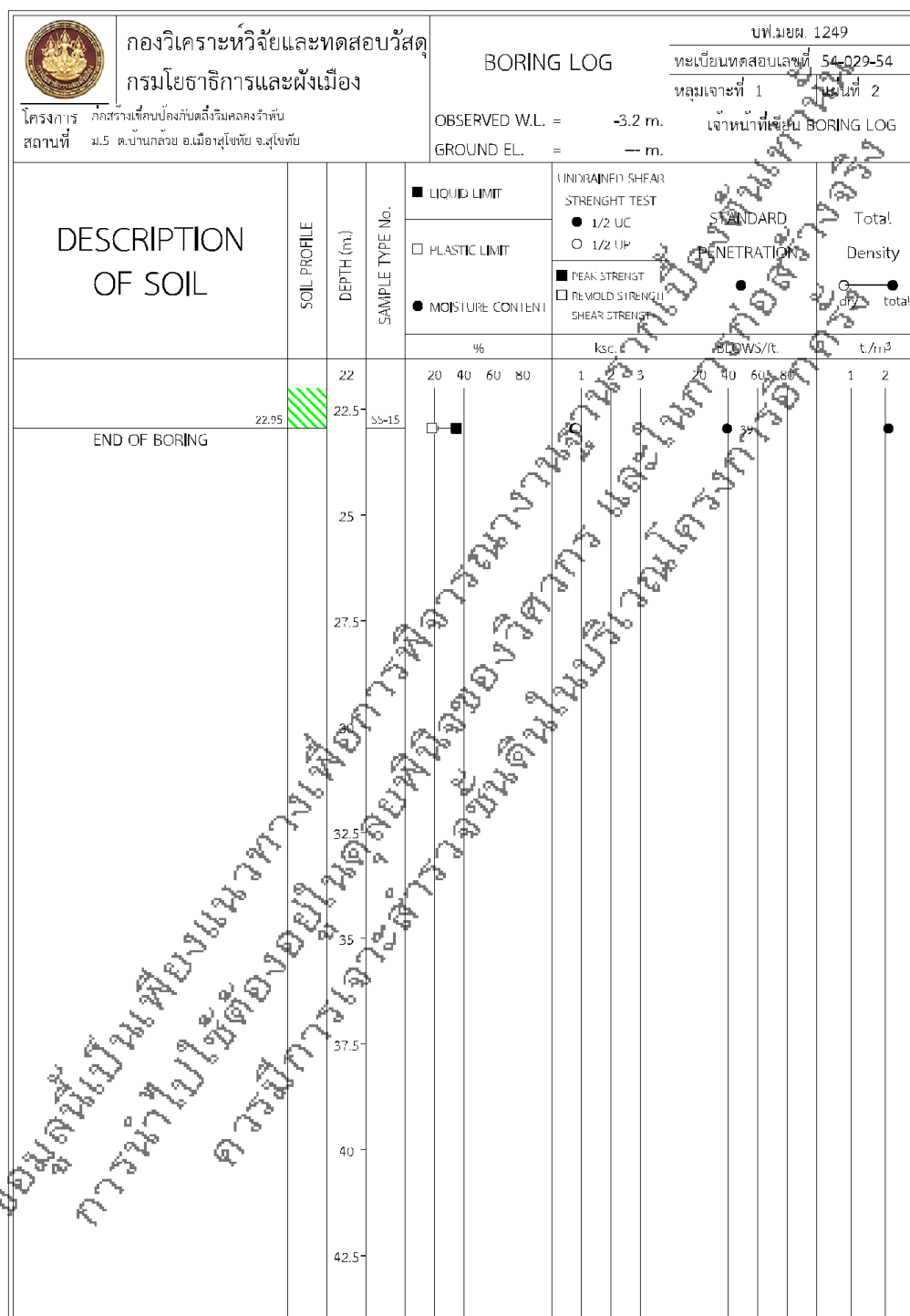
รูป ก. 1 หลุมเจาะสำรวจ ต.บางช้าง อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย (ต่อ)



รูป ก. 1 หลุมเจาะสำรวจ ต.บางซาย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย (ต่อ)

โครงการก่อสร้างป้องกันตลิ่งริมคลองลำพัน										กลุ่มงานวิศวกรรมธรณีและพัฒนามา		บพ.ส. 1249		แผนที่ 1/1									
สถานที่ ม.5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย										กรมโยธาธิการและผังเมือง		ทะเบียนทดสอบเลขที่ 54-029-54											
หลุมเจาะที่ BH-1										SUMMARY OF TEST RESULTS		เจ้าหน้าที่ทดสอบ นายสันติ ปานเย็น											
ระดับปากหลุม										ระดับน้ำใต้ดิน -3.2		เจ้าหน้าที่วิเคราะห์ผล นางพิชชา ทวีเลิศ											
DEPTH (m.)		SAMPLE TYPE		GROUP SYMBOL		ATTERBERG'S LIMITS (%)		MC. %		UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ksc.		POCKET PENETROMETER TEST ksc.		UNIT WEIGHT t/m. ³		SPT blows/ft.		TORVANE SHEAR TEST ksc.		DIRECT SHEAR TEST ksc.		GRAIN SIZE ANALYSIS (% Finer)	
FORM	TO	No.				LL	PL			Q _u	Q _u /2	UP	UP/2	γ _i	N _{value}	PS.	RS.	ST.	C (ksc.)	φ (°)	No. 4	No. 200	
0	1.5	PA																					
1.5	1.95	SS-01	CL			30.63	21.25	15.90						1.85	22						100	94.06	
3	3.45	SS-02	CL			28.06	11.42	10.90						1.85	21						99.93	88.76	
4.5	4.95	SS-03	OH OR			51.99	29.55	24.44	1.03	0.63	1.03	0.81	0.81	1.83	18						100	94.08	
6	6.45	SS-04	ML			47.98	22.36	25.62	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	2.10	26						100	87.68	
7.5	7.95	SS-05	CL			39.06	20.21	18.85	1.72	1.63	0.86	1.63	0.83	1.98	18						99.72	86.1	
9	9.45	SS-06	CL			32.31	19.64	12.67	12.80					1.84	20						99.57	50.89	
10.5	10.95	SS-07	SM				NP	19.70						1.80	18						100	16.56	
12	12.45	SS-08	SM				NP	18.10						1.86							100	21.77	
13.5	13.95	SS-09	CL				No Recovery	18.60	1.88	0.94	2.00	1.00	1.00	2.11	31						100	92.18	
15	15.45	SS-10	CI			50.35	24.27	26.08	22.10	2.36	1.18	0.88	0.88	2.03	34						100	96.36	
16.5	16.95	SS-11	CL			24.79	14.07	10.72	14.80	2.00	1.00			2.06							90.72	59.32	
18	18.45	SS-12	CL			23.77	14.52	9.25	13.00					2.04							100	59.69	
19.5	19.95	SS-13	SC			23.35	16.69	6.66	16.20					2.04	21						100	41.91	
21	21.45	SS-14	CL			42.42	19.54	22.88	16.90			2.25	1.13	2.07							100	92.84	
22.5	22.95	SS-15	CL			34.73	18.1	16.63	19.30	1.46	0.73	1.63	0.81	2.09							97.6	76.06	
END OF BORING																							

รูป ก. 2 หลุมเจาะสำรวจ ม.5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย



รูป ก. 2 หลุมเจาะสำรวจ ม.5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย (ต่อ)

ตำแหน่งที่ตั้ง ต.ยางซ้าย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

ชั้น	ความลึก (ม.)	ความหนา di (ม.)	ชนิด ของดิน	ความชื้น เหลว	SPT (ครั้ง/ฟุต) Ni	S _u (ตัน/ตร.ม.)	φ	d _s	d _c	d/N _i	d/S _u	หมายเหตุ
1	1.50	1.95	0.45	Clay	loose	7	4.64	-	0	0.45	0.000	0.097
2	1.95	3.45	1.50	Clay	loose	4	2.65	-	0	1.5	0.000	0.566
3	3.45	4.95	1.50	Clay	loose	6	3.98	-	0	1.5	0.000	0.377
4	4.95	6.45	1.50	Clay	loose	7	4.64	-	0	1.5	0.000	0.323
5	6.45	7.95	1.50	Clay	Medium	18.5	12.26	-	0	1.5	0.000	0.122
6	7.95	9.45	1.50	Clay	Medium	17	11.26	-	0	1.5	0.000	0.133
7	9.45	10.95	1.50	Clay	Medium	21	13.91	-	0	1.5	0.000	0.108
8	10.95	12.45	1.50	Clay	Medium	17.5	11.59	-	0	1.5	0.000	0.129
9	12.45	13.95	1.50	Sand	Medium	19.5	-	-	1.5	0	0.077	0.000
10	13.95	15.45	1.50	Sand	Medium	17	-	-	1.5	0	0.088	0.000
11	15.45	16.95	1.50	Sand	Medium	19	-	-	1.5	0	0.079	0.000
12	16.95	18.45	1.50	Sand	Medium	17	-	-	1.5	0	0.088	0.000
13	18.45	19.95	1.50	Sand	Medium	18.5	-	-	1.5	0	0.081	0.000
14	19.95	21.45	1.50	Sand	Medium	16.5	-	-	1.5	0	0.091	0.000
15	21.45	22.95	1.50	Sand	Medium	15.5	-	-	1.5	0	0.097	0.000
16	22.95	24.45	1.50	Sand	Stiff	30	-	-	1.5	0	0.050	0.000
17	24.45	25.95	1.50	Sand	Medium	18	-	-	1.5	0	0.083	0.000
18	25.95	27.45	1.50	Sand	Stiff	24.5	-	-	1.5	0	0.061	0.000
19	27.45	28.95	1.50	Sand	Stiff	31.5	-	-	1.5	0	0.048	0.000
รวม									16.5	11	0.8	1.9

$$\overline{N_{ch}} = \frac{d_s}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{N_i}} = 19.57 \text{ ครั้ง/ฟุต}$$

$$\overline{S_u} = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{S_{ui}}} = 57.86 \text{ kPa}$$

ประเภทชั้นดิน D

อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

$$S_s = 0.449 \text{ g}$$

$$S_1 = 0.117 \text{ g}$$

$$F_a = 1.441$$

$$F_v = 2.332$$

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s = 0.647 \text{ g}$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 = 0.273 \text{ g}$$

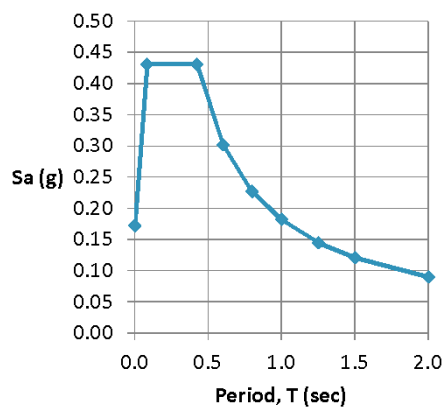
$$S_{DS} = (2/3) S_{MS} = 0.431 \text{ g}$$

$$S_{D1} = (2/3) S_{M1} = 0.182 \text{ g}$$

T(sec)	Sa(g)
0.000	0.173
0.084	0.431
0.422	0.431
0.600	0.303
0.800	0.227
1.000	0.182
1.250	0.146
1.500	0.121
2.000	0.091

$$S_{D1} < S_{DS}$$

Design Response Spectrum Curve



รูปที่ ก. 3 การจำแนกประเภทดินหลุมเจาะ ต.ยางซ้าย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

ตำแหน่งที่ตั้ง ม. 5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

ชั้น	ความลึก (ม.)	ความหนา di (ม.)	ชนิด ของดิน	ความชื้น เหลว	SPT (ครั้ง/ฟุต) Ni	S _u (ตัน/ตร.ม.)	φ	d _s	d _c	d _i /N _i	d _i /S _u	หมายเหตุ
1	1.50	1.95	0.45	Clay	Medium	18.5	12.26	-	0	0.45	0.000	0.037
2	1.95	3.45	1.50	Clay	Medium	18	11.93	-	0	1.5	0.000	0.126
3	3.45	4.95	1.50	Clay	Medium	16.5	10.93	-	0	1.5	0.000	0.137
4	4.95	6.45	1.50	Clay	Medium	20.5	13.58	-	0	1.5	0.000	0.110
5	6.45	7.95	1.50	Clay	Medium	16.5	10.93	-	0	1.5	0.000	0.137
6	7.95	9.45	1.50	Clay	Medium	17.5	11.59	-	0	1.5	0.000	0.129
7	9.45	10.95	1.50	Sand	Medium	16.5	-	-	1.5	0	0.091	0.000
8	10.95	12.45	1.50	Sand	Medium	19.5	-	-	1.5	0	0.077	0.000
9	12.45	13.95	1.50	Clay	Medium	23	15.24	-	0	1.5	0.000	0.098
10	13.95	15.45	1.50	Clay	Medium	24.5	16.23	-	0	1.5	0.000	0.092
11	15.45	16.95	1.50	Clay	Stiff	33	21.86	-	0	1.5	0.000	0.069
12	16.95	18.45	1.50	Clay	Medium	23.5	15.57	-	0	1.5	0.000	0.096
13	18.45	19.95	1.50	Clay	Medium	18	11.93	-	0	1.5	0.000	0.126
14	19.95	21.45	1.50	Clay	Stiff	28.5	18.88	-	0	1.5	0.000	0.079
15	21.45	22.95	1.50	Clay	Medium	27	17.89	-	0	1.5	0.000	0.084
รวม									3	18.5	0.2	1.3

$$\overline{N}_{ch} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{N_i}} = 17.88 \text{ ครั้ง/ฟุต}$$

$$\overline{S}_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{S_{ui}}} = 136.94 \text{ kPa}$$

ประเภทชั้นดิน D
อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

S_s = 0.449 g

S₁ = 0.117 g

F_a = 1.441

F_v = 2.332

S_{MS} = F_a · S_s = 0.647 g

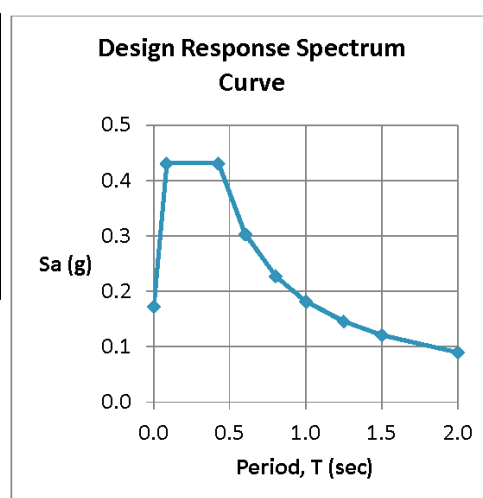
S_{M1} = F_v · S₁ = 0.273 g

S_{DS} = (2/3) S_{MS} = 0.431 g

S_{D1} = (2/3) S_{M1} = 0.182 g

T(sec)	Sa(g)
0.000	0.173
0.084	0.431
0.422	0.431
0.600	0.303
0.800	0.227
1.000	0.182
1.250	0.146
1.500	0.121
2.000	0.091

S_{D1} < S_{DS}

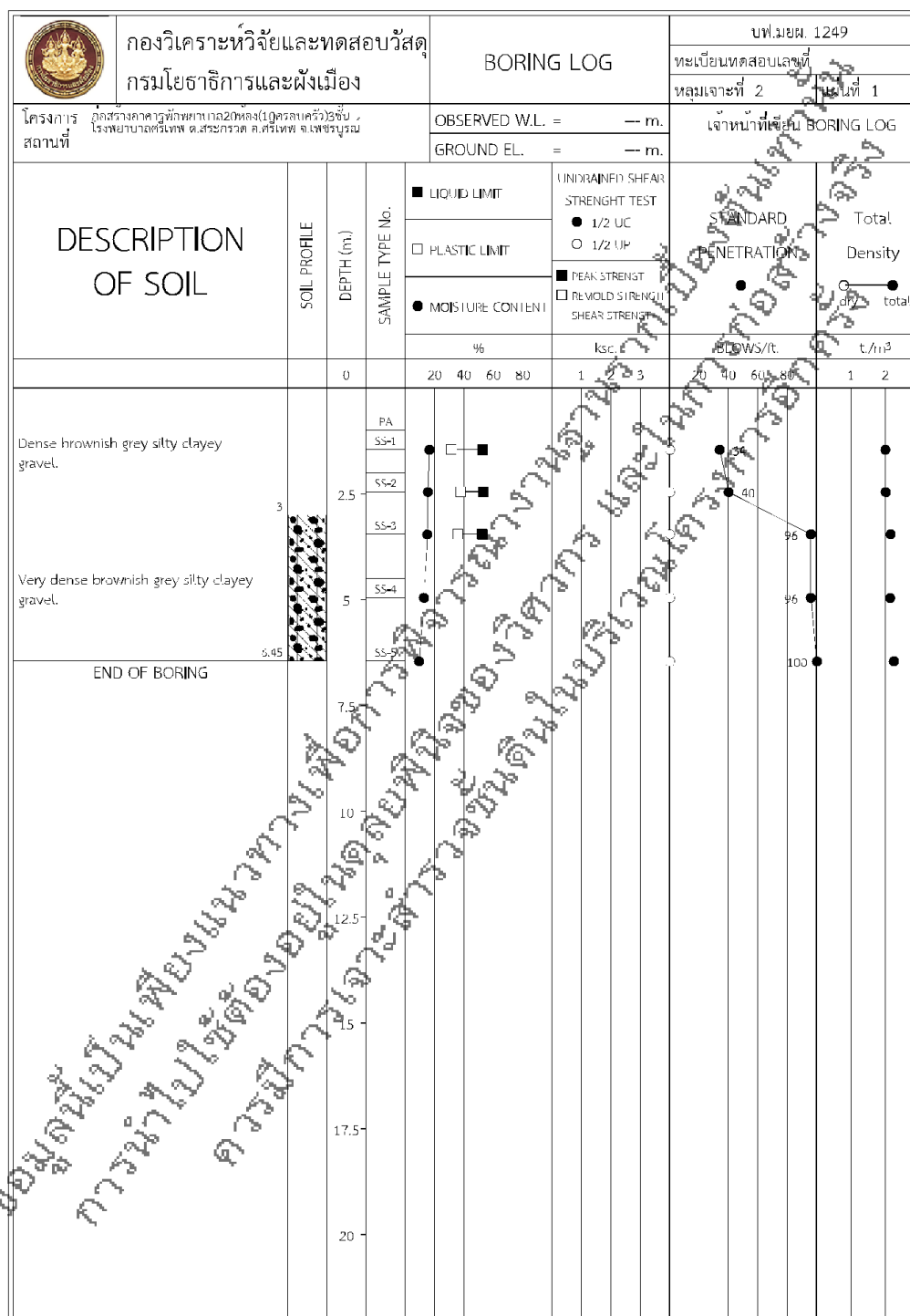


รูปที่ ก.4 การจำแนกประเภทดินหลุมเจาะ ม. 5 ต.บ้านกล้วย อ.เมืองสุโขทัย จ.สุโขทัย

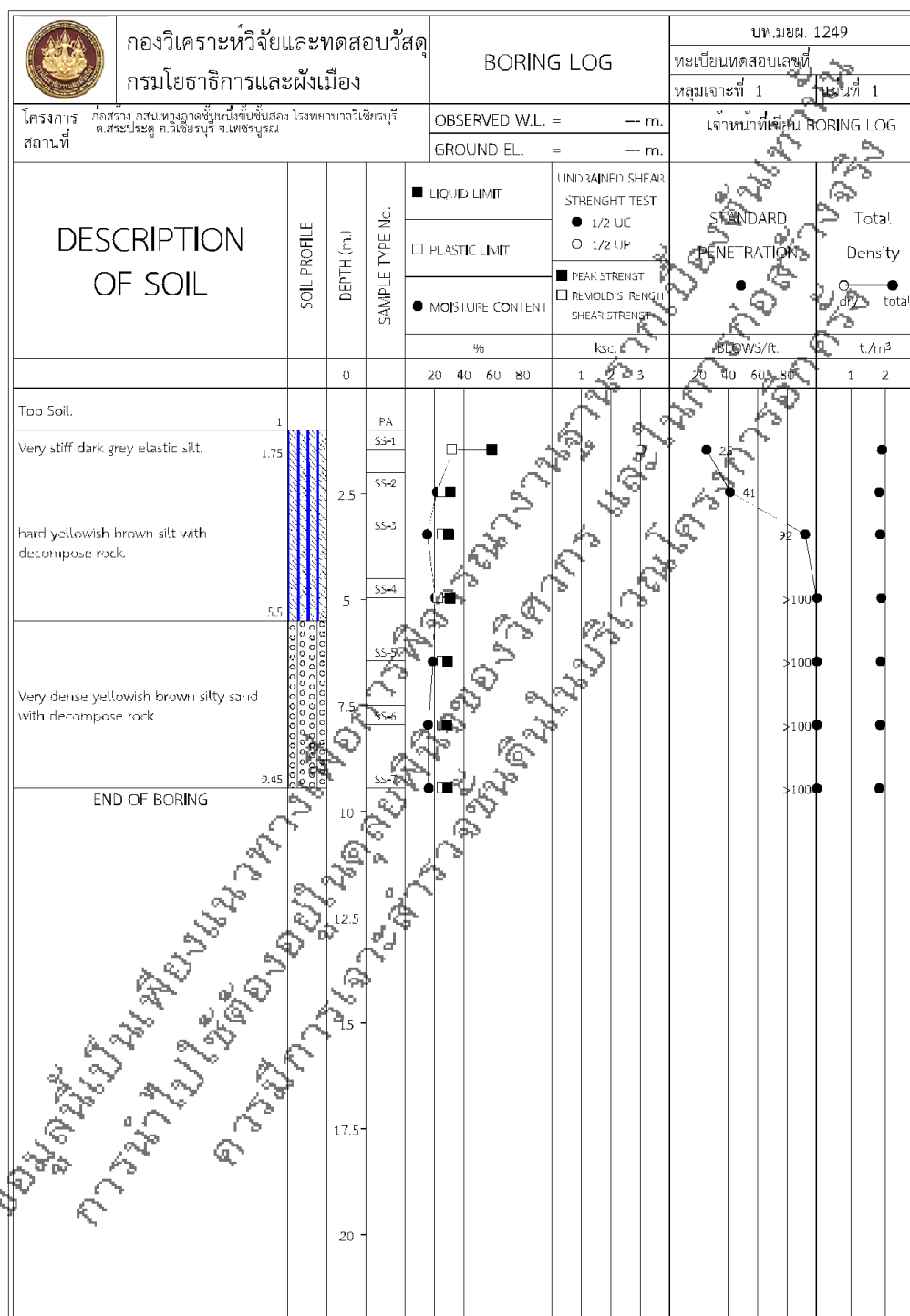
สำหรับข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ตั้งของปรังค์ฤาษี อุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์ โดยนำข้อมูลจาก web site ของกรมโยธาธิการและผังเมือง <http://soilgis.dpt.go.th/> เช่นกัน พบว่าหลุมเจาะสำรวจ 2 หลุมได้แก่ หลุมเจาะโรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์ และหลุมเจาะ โรงพยาบาลวิเชียรบุรี ต.สระประดู่ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งของอุทยานประวัติศาสตร์ศรีเทพมากที่สุด รายละเอียดดังรูป ก.5 และ ก.6 โดยทั้งสองหลุมมีลักษณะเป็นดินเหนียวแข็ง จนถึงดินทราย กรวด ที่ความลึกประมาณ 10 ม. ที่มีการสำรวจ เมื่อนำมาจำแนกประเภทตามรายละเอียดการคำนวณแสดงดังตารางในรูปที่ ก.7 และ ก. 8 สำหรับหลุมเจาะสำรวจ หลุมเจาะโรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์ และหลุมเจาะ โรงพยาบาลวิเชียรบุรี ต.สระประดู่ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ พบว่า สามารถจำแนกประเภทดินได้เป็นประเภท C

โครงการก่อสร้างโรงพยาบาล20ห้อง(10ครอบครัว)วัน สถานที่ โรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์										 กลุ่มงานวิศวกรรมธรณีและพัฒนา กรมโยธาธิการและผังเมือง SUMMARY OF TEST RESULTS		บพ.ส. 1249		แผ่นที่ 1/1			
หลุมเจาะที่ BH-2 ระดับปากหลุม --- เมตร ระดับน้ำใต้ดิน --- เมตร เมตริกผลดิน										TORVANE SHEAR TEST ksc. IN-SITU VANE SHEAR TEST ksc.		DIRECT SHEAR TEST ksc.		GRAIN SIZE ANALYSIS (% Finer)			
DEPTH (m.)		SAMPLE TYPE		GROUP SYMBOL		ATTERBERG'S LIMITS (%)		MC. %		UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ksc.		POCKET PENETROMETER TEST ksc.		UNIT WEIGHT t/m. ³		SPT blows/ft.	
FORM	TO	No.	PA	LL	PL	PI	Q _u	Q _u /2	UP	UP/2	UP	UP/2	UP	UP/2	UP	UP/2	UP
0	1	PA															
1	1.45	SS-1	GM-CC	52.6	31.42	21.22	16.39		9.00	4.50	9.00	4.50	2.00	34			
2	2.45	SS-2	GM-CC	53	31.7	15.17			9.00	4.50	9.00	4.50	2.01	40			
3	3.45	SS-3	GM-CC	52.4	35.9	16.5			9.00	4.50	9.00	4.50	2.15	96			
4	4.95	SS-4	GM-CC				12.53		9.00	4.50	9.00	4.50	2.14	96			
6	6.45	SS-5	GM-CC				19.41		9.00	4.50	9.00	4.50	2.25	100			
หมายเหตุ: ข้อมูลนี้จัดทำขึ้นโดยวิศวกรและในบริเวณโครงการอื่น ๆ																	

รูปที่ ก.5 หลุมเจาะโรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์



รูปที่ ก.5 หลุมเจาะโรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์ (ต่อ)



รูปที่ ก. 6 หลุมเจาะ โรงพยาบาลวิเชียรบุรี ต.สระปรือ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ (ต่อ)

ตำแหน่งที่ตั้ง โรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

ชั้น	ความลึก (ม.)		ความหนา di (ม.)	ชนิด ของดิน	ความชื้น เหลว	SPT (ครั้ง/ฟุต) Ni	S _u (ตัน/ตร.ม.)	φ	d _s	d _c	d _i /N _i	d _i /S _u	หมายเหตุ
1	1.00	1.45	0.45	Clay	Medium	24.5	16.23	-	0	0.45	0.000	0.028	
2	1.45	2.45	1.00	Clay	Stiff	27.5	18.22	-	0	1	0.000	0.055	
3	2.45	3.45	1.00	Clay	Stiff	55.5	36.77	-	0	1	0.000	0.027	
4	3.45	4.95	1.50	Clay	Stiff	55.5	36.77	-	0	1.5	0.000	0.041	
5	4.95	6.45	1.50	Clay	Stiff	57.5	38.09	-	0	1.5	0.000	0.039	
รวม									0	5.45	0.0	0.2	

$$\overline{N}_{ch} = \frac{d_s}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{N_i}} = \quad \text{ครั้ง/ฟุต}$$

$$\overline{S_u} = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{S_{ui}}} = 281.42 \text{ kPa}$$

ประเภทชั้นดิน C
อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

$S_s = 0.055 \text{ g}$

$S_1 = 0.04 \text{ g}$

$F_a = 1.200$

$F_v = 1.70$

$S_{MS} = F_a \cdot S_s = 0.066 \text{ g}$

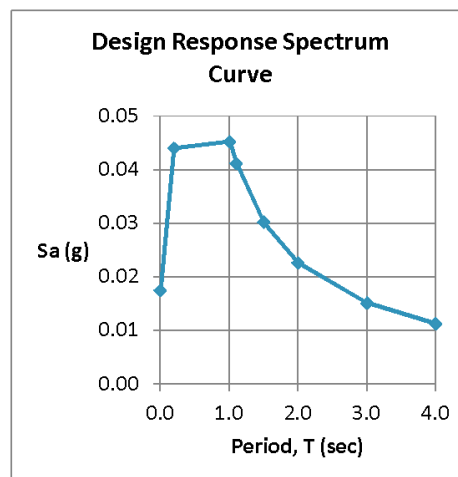
$S_{M1} = F_v \cdot S_1 = 0.068 \text{ g}$

$S_{DS} = (2/3) S_{MS} = 0.044 \text{ g}$

$S_{D1} = (2/3) S_{M1} = 0.045 \text{ g}$

T(sec)	Sa(g)
0.000	0.018
0.200	0.044
1.000	0.045
1.100	0.041
1.500	0.030
2.000	0.023
3.000	0.015
4.000	0.011
5.000	0.009

$S_{D1} > S_{DS}$



รูปที่ ก.7 การจำแนกประเภทดินหลุมเจาะ โรงพยาบาลศรีเทพ ต.สระกรวด อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

ตำแหน่งที่ตั้ง โรงพยาบาลวิเชียรบุรี ต.สระประดู่ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์

ชั้น	ความลึก (ม.)		ความหนา di (ม.)	ชนิด ของดิน	ความชื้น เหลว	SPT (ครั้ง/ฟุต) Ni	S _u (ตัน/ตร.ม.)	φ	d _s	d _c	d/N _i	d/S _u	หมายเหตุ
1	1.00	1.45	0.45	Clay	Medium	20	13.25	-	0	0.45	0.000	0.034	
2	1.45	2.45	1.00	Clay	Medium	28	18.55	-	0	1	0.000	0.054	
3	2.45	3.45	1.00	Clay	Stiff	53.5	35.44	-	0	1	0.000	0.028	
4	3.45	4.95	1.50	Clay	Stiff	60	39.75	-	0	1.5	0.000	0.038	
5	4.95	6.45	1.50	Sand	Stiff	62.5	-	-	1.5	0	0.024	0.000	
6	6.45	7.95	1.50	Sand	Stiff	61	-	-	1.5	0	0.025	0.000	
7	7.95	9.45	1.50	Sand	Stiff	61	-	-	1.5	0	0.025	0.000	
รวม									4.5	3.95	0.1	0.2	

$$\overline{N}_{ch} = \frac{d_s}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{N_i}} = 61.49 \text{ ครั้ง/ฟุต}$$

$$\overline{S}_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{S_{ui}}} = 251.91 \text{ kPa}$$

ประเภทชั้นดิน C

อ.ศรีเทพ จ.เพชรบูรณ์

S_s = 0.055 g

S₁ = 0.04 g

F_a = 1.200

F_v = 1.70

S_{MS} = F_a · S_s = 0.066 g

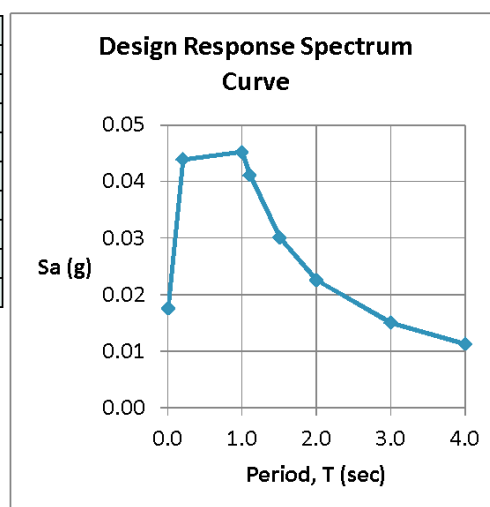
S_{M1} = F_v · S₁ = 0.068 g

S_{DS} = (2/3) S_{MS} = 0.044 g

S_{D1} = (2/3) S_{M1} = 0.045 g

T(sec)	Sa(g)
0.000	0.018
0.200	0.044
1.000	0.045
1.100	0.041
1.500	0.030
2.000	0.023
3.000	0.015
4.000	0.011
5.000	0.009

S_{D1} > S_{DS}



รูปที่ ก.8 การจำแนกประเภทดินหลุมเจาะ โรงพยาบาลวิเชียรบุรี ต.สระประดู่ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์

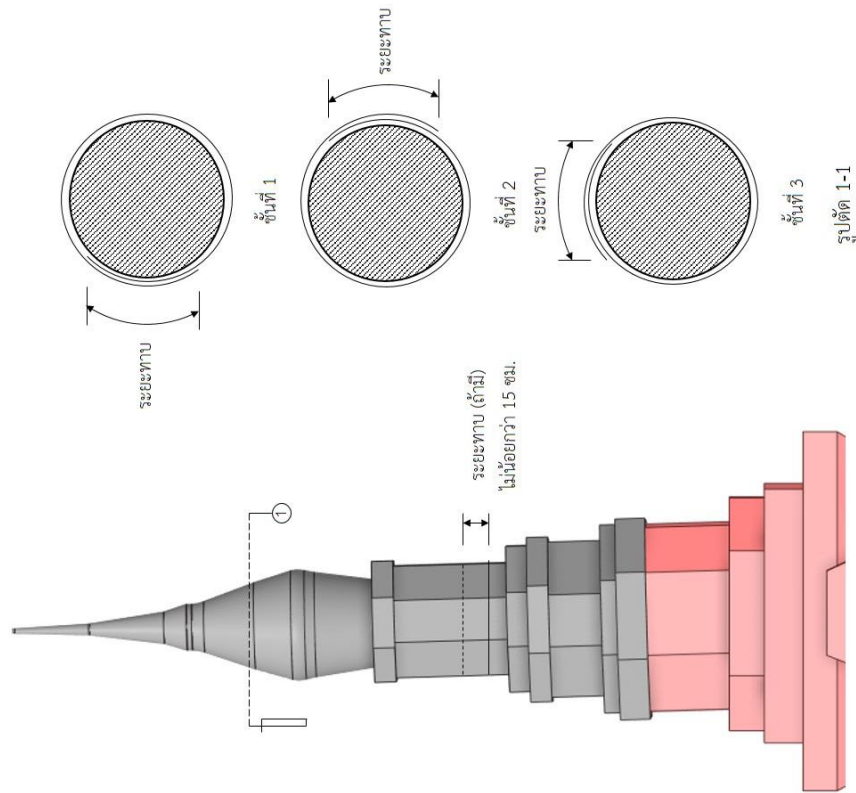
ภาคผนวก ข
แบบรายละเอียดการเสริมกำลังโครงสร้าง

การเสริมกำลังยอดเจดีย์ประธานด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1. รื้อวัสดุแต่งและปูนทรายที่ผิวภายนอกให้หมด ทำการซ่อมแซมเนื้อไม้ในส่วนที่อาจมีความเสียหาย และทำความสะอาดผิวหน้าผิวก่อนติดตั้ง
2. เสริมเส้นใยตามสัดส่วนที่กำหนดโดยผู้ผลิตระบบเสริมกำลัง ห้ามเจือจางหรือเติมด้วยตัวทำละลายอื่นหรือยี่ห้ออื่น หรือการกรอผิวหรือใช้เครื่องมือไฟฟ้าขนาดเล็ก ห้ามใช้เครื่องมือผสมแล้วอยู่บริเวณกลางที่ยังทำงานได้
3. ทาสีอุดร่องพื้น (Primer) 1 ถึง 2 ชั้น บนผิวโครงสร้าง ในกรณีที่ต้องใช้วัสดุฉนวน (Putty) ต้องลงวัสดุฉนวนพื้นที่ที่ร่องพื้นนั้นแล้ว
4. การลงสารเคลือบเส้นใยครั้งแรก ต้องลงให้สม่ำเสมอทั่วบริเวณที่จะติดตั้งระบบ FRP สารที่ใช้ต้องแห้งสนิทไปเคลือบผิวแผ่นเส้นใยก่อนการบ่ม
5. หลังจากลงสารเคลือบเส้นใยเรียบร้อยแล้ว ให้ติดตั้งเส้นใยเข้าที่ โดยติดตั้งให้เรียบร้อยแล้วให้รอให้แห้งตามความยาวที่ผู้ออกแบบกำหนด ทำการกดแผ่นเส้นใยอย่างนุ่มนวลลงบนสารเคลือบเส้นใยที่ทาไว้ รีดอากาศที่ฝังอยู่ระหว่างแผ่นเส้นใยและโครงสร้าง

หมายเหตุ

1. กรณีเส้นใยหลายชั้น ปริมาณเรซินที่ให้กับหน้าแผ่นเส้นใยแต่ละชั้นจะมีปริมาณมากกว่าการให้เส้นใยชั้นเดียว อยู่ประมาณร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 20 เนื่องจากเรซินต้องเป็นทั้งกับหน้าของแผ่นเส้นใยก่อนหน้าและต้องเป็นรอบพื้นของเส้นใยแผ่นถัดมาด้วย การจัดเรียงทิศทางของเส้นใยและการจัดวางให้เป็นไปตามที่กำหนดในแบบ การลงแผ่นเส้นใยแต่ละชั้น ให้ลึกลงที่เรซินก่อนหน้าจะเริ่มแห้งตัว จำนวนชั้นที่ติดตั้งได้ในแต่ละวันจะขึ้นอยู่กับเอกสารข้อมูลของระบบ การติดตั้งเส้นใยหลายชั้นนี้จะใช้เวลาหลายวันได้ เมื่อติดตั้งหน้าให้สนิทแล้วมีการบ่มสุกเรียบร้อยแล้ว อาจต้องทำการเตรียมผิวตามเอกสารข้อมูลของระบบ เช่น การขัดด้วยกระดาษทรายเบาๆ การฉาบด้วยวัสดุฉนวน เป็นต้น
2. การต่อหน้าเส้นใย ถ้าเส้นใยต้องการหยุดตรงงอทิศทางเส้นใย ต้องทำการต่อหน้า โดยความยาวของการต่อหน้าให้เป็นไปตามที่แบบกำหนด แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 150 มม. เมื่อได้แผ่นเส้นใยหลายแผ่นชนกัน ต้องจัดรอยต่อของแต่ละแผ่นให้อยู่ในแนวเดียวกันและในกรณีที่ใช้แผ่นเส้นใยหลายชั้น ก็ต้องจัดให้รอยต่อของแต่ละชั้นเหมือนกัน ไม่จำเป็นต้องต่อหน้าเส้นใยในทิศทาง ยกเว้นแต่มีการระบุในแบบ
3. ต้องจัดแนวเส้นใยบนชิ้นส่วนโครงสร้างตามรูปแบบที่กำหนด การเปลี่ยนแบบเส้นใยไม่ควรเกิน 5 องศา (ประมาณ 90 มม.ต่อเมตร) เมื่อติดตั้งเสร็จ เส้นใยต้องไม่หัก พับ หรือเป็นคลื่น
4. ต้องปล่อยให้ระบบ FRP บ่มตามคำแนะนำในเอกสารข้อมูลของระบบ ห้ามเปลี่ยนส่วนผสมของเรซินในส่วนที่เอียงให้เร็วขึ้น



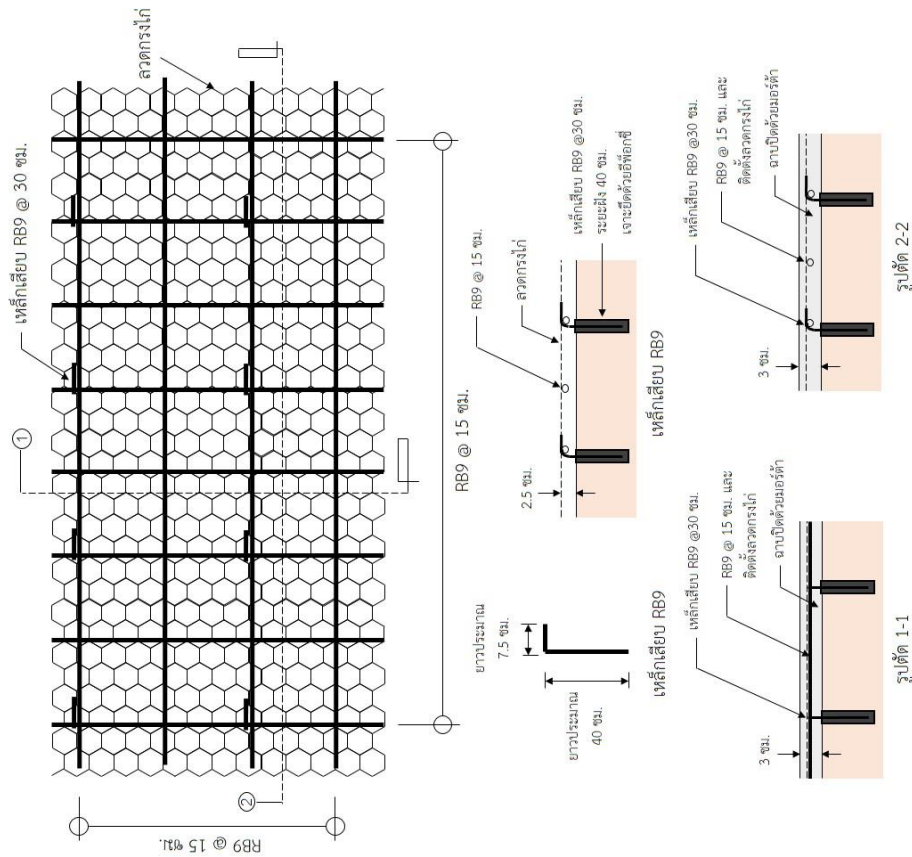
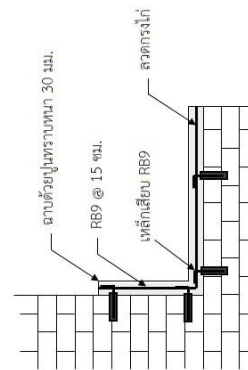
การเสริมกำลังฐานองค์ปรางค์ด้วยเฟอริซีเมนต์

1. ในกรณีที่ผิวโครงสร้างมีปูนทรายฉาบอยู่ ให้ทำการสกัดผิวหน้าออกเพื่อลอปูนทรายออก ในชั้นต่อน้ำออกให้พื้นผิวมีความขรุขระ เพื่อเพิ่มการยึดเกาะ
2. เจาะรูหัวน้าและทำความสะอาดรูเจาะแล้วอุดด้วยกาวยีพ็อกซี่ จากนั้นเสียบเหล็กกลมรูปตัว L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.
3. ทาหน้ายาอุดพื้น หรือ Primer เพื่อปรับสภาพผิวโครงสร้างอิฐก่อ
4. นำเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. มาวางเป็นตะแกรงเหล็กในแนวนอนและแนวตั้ง แล้วผูกยึดด้วยลวดผูกเหล็กตามแบบ
5. นำลวดกรงไก่มาวางทับกับตะแกรงเหล็กในข้อ 3 แล้วยึดด้วยลวดผูกเหล็ก
6. ทำการฉาบผิวด้วยปูนมอร์ต้า

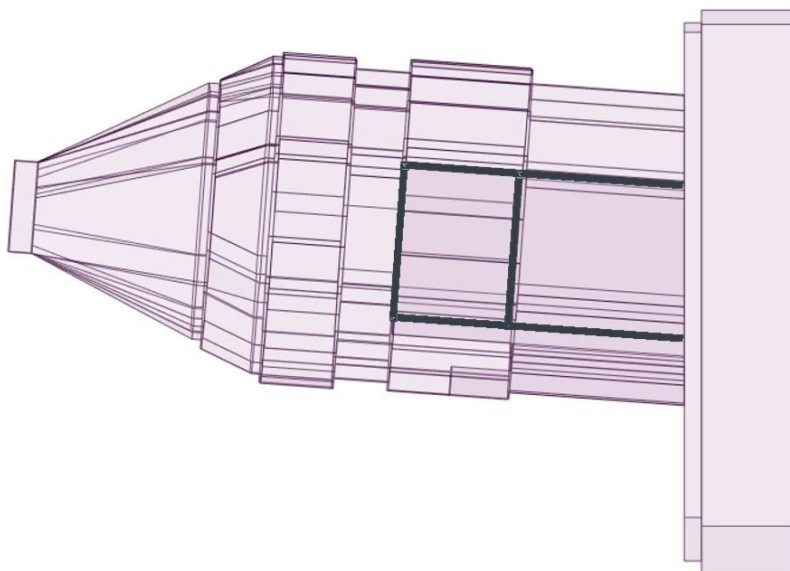
หมายเหตุ

1. ต้องทำความสะอาดพื้นผิวก่อนฉาบ
2. หากไม่มีลวดกรงไก่ทดแทนเหล็กม อุ่นโหลให้ใช้ตาข่ายเหล็ก
3. ต้องทำการทาน้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีตก่อนฉาบปิดผิว
4. ต้องทำการทาน้ำยากันสนิมที่เหล็กเสริม
5. ส่วนผสมของมอร์ต้า ได้แก่

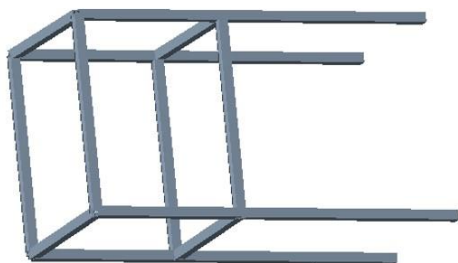
- 5.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ปริมาณ 1 ส่วน
- 5.2 ทรายละเอียด ปริมาณ 2.75 ส่วน
- 5.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.5



การเสริมกำลังรางด้วยโครงเหล็กค้ำยัน
โครงเหล็กที่ใช้ประกอบด้วยเสาเหล็กและคานเหล็กที่เป็นเหล็ก
กล่องหนาตัด 100x100 มม. หนา 1 มม. ติดตั้งภายในองค์รางค้ำ
เพื่อช่วยค้ำยันโครงสร้าง



รูปตัดแสดงการเสริมกำลังด้วยโครงเหล็กภายในองค์รางค้ำ



รูปแสดงการเสริมกำลังด้วยโครงเหล็ก