บทที่ ๖
สรุปผลการวิจัยและการเผยแพร่งานศึกษา

การศึกษานี้ ได้ทำการวิเคราะห์ประเมินการรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ในเชียงใหม่ โดยได้พิจารณาพระธาตุดอยสุเทพเป็นกรณีศึกษา ได้ผลสรุปได้ดังนี้

๖.๑ การรับน้ำหนักตัวเองของเจดีย์

การวิเคราะห์ พบว่าค่าหน่วยแรงอัดสูงสุด (๐.๒๑ MPa < ๒.๖๘ MPa) เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของฐานเขียง และหน่วยแรงดึงสูงสุด (๐.๐๓ MPa < ๐.๒๗ MPa) บริเวณผิวด้านนอกของฐานเขียงบริเวณติดกันฐานระฆัง จากผลการวิเคราะห์พบว่าฐานเขียงที่รองรับองค์ระฆังนั้นจะรับน้ำหนักมากที่สุด และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างทันทีทันใด ค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนค่าหน่วยแรงอัดของดินใต้ฐานรากมีค่าสูงสุดเท่ากับ ๑๑๓ kPa ซึ่งน้อยกว่ากำลังต้านทานของดิน (๑๖๘ kPa)

๖.๒ ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์

ความถี่ธรรมชาติของเจดีย์พระธาตุดอยสุเทพจากการวิเคราะห์ มีค่าอยู่ระหว่าง ๓.๘๑๗–๑๙.๙๕๖ Hz สำหรับการสั่นไหวใน ๑๐ รูปแบบแรก โดยส่วนมากรูปแบบการสั่นไหวของเจดีย์จะเป็นการสั่นไหวแบบเลื่อนในแนวนอน (Translation) ส่วนการสั่นไหวในแนวดิ่งและการบิด จะเกิดที่ค่าความถี่ ๑๗.๒๕๙ Hz และ ๑๙.๙๕๖ Hz ตามลำดับ บริเวณที่มีการสั่นไหวมากที่สุดคือบริเวณส่วนยอดของเจดีย์ได้แก่ ปลียอดและก้านฉัตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติจากการวัดด้วยวิธี Ambient vibration นั้นพบว่าค่าการสั่นไหวในโหมดที่ ๑ จากการวัดมีค่า ๔.๐๘๖ Hz ซึ่งต่างจากค่าที่วิเคราะห์ที่มีค่าเท่ากับ ๓.๘๑๗ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ ๖.๕๙ เปอร์เซ็นต์

๖.๓ การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์

๖.๓.๑ เสถียรภาพของเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

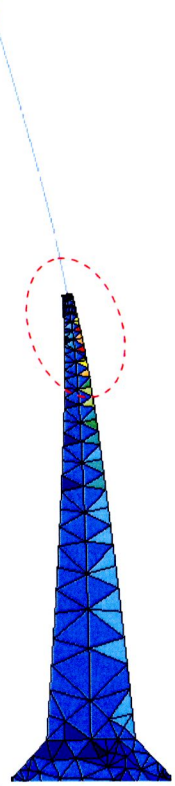
จากการวิเคราะห์ค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกรณีแรงแผ่นดินไหวทั้ง ๓ เหตุการณ์นั้น ไม่เกิดแรงดึงขึ้นเลย แสดงให้เห็นว่าเจดีย์มีเสถียรภาพดี ไม่เกิดการพลิกคว่ำ หน่วยแรงอัดในดินสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้กลับจุดกึ่งกลางเจดีย์โดยเยื้องออกมาทางแกน x มาเล็กน้อย

โดยมีค่าหน่วยแรงอัดของดินใต้ฐานรากมีค่าสูงสุดเท่ากับ ๑๕๓ kPa ซึ่งน้อยกว่ากำลังต้านทานของดิน (๑๖๘ kPa)

๖.๓.๒ หน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงภายใต้แรงแผ่นดินไหว

๖.๓.๒.๑ แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ โดยใช้คลื่น Morgan Hill ๑๙๘๔ ขนาด ๖.๒ ริกเตอร์ ค่าอัตราเร่งสูงสุด ๐.๓๑๒g การวิเคราะห์พบว่า บริเวณที่มีการสั่นไหวมากที่สุดของเจดีย์ คือส่วนยอดเจดีย์และก้านฉัตร โดยที่ยอดฉัตรจะเคลื่อนที่ไป ๓.๐๔ cm และยอดเจดีย์เคลื่อนที่ ๐.๘๘ cm

ความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว พบว่าส่วนที่จะเกิดความเสียหายก่อนส่วนอื่นๆ คือปลียอด และปล้องไฉน อันเนื่องมาจากการที่ก้านฉัตรและยอดเจดีย์มีการเคลื่อนที่หรือการโยกตัว ทำให้ปลียอดและปล้องไฉนเกิดการโยกตัวตามไปด้วย จึงก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงในด้านตรงข้ามกับการเคลื่อนที่นั้น และหน่วยแรงอัดเกิดในด้านเดียวกับการเคลื่อนที่ แต่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (๐.๓๓ MPa ที่เวลา ๑๐.๗๒ วินาที) มีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ (๐.๒๗ MPa) รูป ๖.๑



รูป ๖.๑ ส่วนที่ได้รับความเสียหายจากแรงดึง

จึงเกิดการแตกร้าวขึ้นก่อน ส่วนบริเวณอื่นๆของเจดีย์ไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด เพราะทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงมีค่าไม่เกินหน่วยแรงโดยมีค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่ากับ (๐.๔๔ MPa ที่เวลา ๑๐.๗๒) ซึ่งน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (๒.๖๘ MPa)

๖.๓.๒.๒ แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุด (รอยเลื่อนแม่ทา) โดยใช้คลื่น Imperial Valley ๑๙๗๙ ขนาด ๖.๕ ริกเตอร์ ค่าอัตราเร่งสูงสุด ๐.๓๐๙g ระยะห่างระหว่างองค์เจดีย์จนถึงรอยเลื่อนอยู่ประมาณ ๒๓.๖ กิโลเมตร การวิเคราะห์พบว่า บริเวณที่มีการสั่นไหวมากที่สุดของเจดีย์ คือส่วนยอดเจดีย์และก้านฉัตร โดยที่ยอดฉัตรจะเคลื่อนที่ไป ๒.๘๒ cm และยอดเจดีย์เคลื่อนที่ ๐.๘๑ cm

ความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว มีลักษณะเหมือนกับคลื่นแรก (Morgan Hill ๑๙๘๔) แต่หน่วยแรงมีค่าที่ลดลง โดยหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (๐.๓๐ MPa ที่เวลา ๕.๗๔ วินาที) มีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ (๐.๒๗ MPa) และค่าหน่วยแรงอัดเท่ากับ (๐.๔๐ MPa ที่เวลา ๕.๗๔) ซึ่งน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (๒.๖๘ MPa)

๖.๓.๒.๓ แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อนที่มีกำลังมากที่สุดในเขตภาคเหนือ (รอยเลื่อนแม่จัน) โดยใช้คลื่น Kocaeli, Turkey ๑๙๙๙ ขนาด ๗.๔ ริกเตอร์ ค่าอัตราเร่งสูงสุด ๐.๑๐๓g ระยะห่างระหว่างองค์เจดีย์จนถึงรอยเลื่อนอยู่ประมาณ ๑๓๖.๓ กิโลเมตร การวิเคราะห์พบว่า บริเวณที่มีการสั่นไหวมากที่สุดของเจดีย์ คือส่วนยอดเจดีย์และก้านฉัตร โดยที่ยอดฉัตรจะเคลื่อนที่ไป ๒.๘๒ cm และยอดเจดีย์เคลื่อนที่ ๐.๘๑ cm

ความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว มีลักษณะเหมือนกับคลื่นแรก (Morgan Hill ๑๙๘๔) แต่หน่วยแรงมีค่าที่ลดลง โดยหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (๐.๒๐ MPa ที่เวลา ๒๘.๔๐ วินาที) มีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ (๐.๒๗ MPa) และค่าหน่วยแรงอัดเท่ากับ (๐.๒๙ MPa ที่เวลา ๒๘.๔๐ วินาที) ซึ่งน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (๒.๖๘ MPa)

๖.๓.๓ ความเสียหายจากการรับแรงแผ่นดินไหว

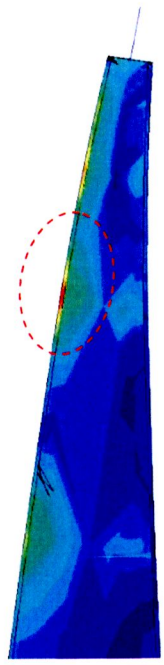
จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าแผ่นดินไหวทั้งสามแบบนั้นจะทำให้เจดีย์มีความเสียหายในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ความเสียหายจะเกิดจากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเกินกว่ากำลังรับแรงของอิฐจะรับได้โดยขึ้นบริเวณปลียอดใกล้กับยอดฉัตร ดังรูป ๖.๑ โดยคลื่นที่ทำให้เกิดหน่วยแรงมากที่สุดคือแผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ (คลื่น Morgan Hill ๑๙๘๔) ขนาด ๖.๒ ริกเตอร์ ณ เวลา ๑๐.๗๒ วินาที หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ ๐.๓๓ MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุที่ ๐.๒๗ MPa

๖.๔ การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ที่ทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว (๒๕:๓/๕)

๖.๔.๑ แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ จากการวิเคราะห์พบว่าบริเวณที่มีหน่วยแรงสูงสูดจะเกิดบริเวณเดียวกับเจดีย์ที่ไม่มีการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้วอัตราส่วน (๒๕:๓/๕) หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณฐานเขียงมีค่าหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ (๐.๔๖ MPa < ๒.๖๘ MPa) และหน่วยแรงดึงสูงสุดจะเกิดในบริเวณปล้องไฉนแต่จะแตกต่างจากเจดีย์ที่ไม่มีการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว อยู่ที่จุดที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว ดังรูป ๖.๒ มีค่าหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ (๐.๔๙ MPa < ๖๔๑ MPa) ส่วนบริเวณที่เกิดการวิบัติเดิมหน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับ (๐.๒๒ MPa < ๐.๓๓ MPa) ซึ่งจะเห็นได้ว่าลดลงจากเดิม และน้อยกว่าหน่อยแรงที่ยอมให้ (๐.๒๓/ MPa)

๖.๔.๒ แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุด (รอยเลื่อนแม่ทา) จากการวิเคราะห์พบว่าบริเวณที่มีหน่วยแรงสูงสูดจะเกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นแผ่นดินไหวแรก โดยหน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณฐานเขียงมีค่าหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ (๐.๔๖ MPa < ๒.๖๘ MPa) และหน่วยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ (๐.๓๙/ MPa < ๖๔๑ MPa) ส่วนบริเวณที่เกิดการวิบัติเดิมหน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับ (๐.๑๗/ MPa < ๐.๓๐ MPa) ซึ่งจะเห็นได้ว่าลดลงจากเดิม และน้อยกว่าหน่อยแรงที่ยอมให้ (๐.๒๓/ MPa)

๖.๔.๓ แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อนที่มีกำลังมากที่สุดในเขตภาคเหนือ (รอยเลื่อนแม่จัน) จากการวิเคราะห์พบว่าบริเวณที่มีหน่วยแรงสูงสูดจะเกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นแผ่นดินไหวสองคลื่นที่ผ่านมา โดยหน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณฐานเขียงมีค่าหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ (๐.๓๐ MPa < ๒.๖๘ MPa) และหน่วยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ (๐.๓๓ MPa < ๖๔๑ MPa) ส่วนบริเวณที่เกิดการวิบัติเดิมหน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับ (๐.๑๓ MPa < ๐.๒๐ MPa) ซึ่งจะเห็นได้ว่าลดลงจากเดิม และน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (๐.๒๓/ MPa)



รูป ๖.๒ บริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุด

๖.๕ บทสรุปการเสริมกำลัง

จากผลการศึกษาพบว่า องค์พระธาตุมีรูปทรงที่ดีในการต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวที่ได้สมมติขึ้น อย่างไรก็ตาม ทีบริเวณส่วนปลายยอดของพระธาตุที่มีขนาดเล็กลงมาผนวกกับมีน้ำหนักของยอดฉัตร ทำให้การตอบสนองในส่วนป้องไฉนเกิดความเสียหายเมื่อรับแรงแผ่นดินไหวดังกล่าว

ดังนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องเสริมกำลังบริเวณที่อ่อนแอนี้ และจากผลการศึกษาสามารถกล่าวได้ว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอนผสมเส้นใยแก้ว (๒๕:๗๕) สามารถที่จะช่วยป้องกันการเสียหายจากแผ่นดินไหวในบริเวณปล้องไฉนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

๖.๖ การเผยแพร่ผลการศึกษา

โครงการได้ร่วมกับเทศบาลนครเชียงใหม่ และกรมศิลปากร จัดกิจกรรมสัมมนา “เชียงใหม่ พร้อมรับมือภัยพิบัติแผ่นดินไหว” ในวันที่ ๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๔ ณ โรงแรมศิริ นาถ การ์เด้นท์ มีผู้เข้าร่วมงานประมาณ ๘๐ คน ดังรูปที่ ๖.๓

โครงการอบรมเรื่อง
"เขียงใหม่..พร้อมรับมือภัยพิบัติแผ่นดินไหว"
วันที่ 27 พฤษภาคม 2554
ณ โรงแรมศิริงาล การ์เด้นท์
TYFO
FIBERWRAP
SYSTEMS

รูปที่ ๖.๓ กิจกรรมสัมมนา “เชียงใหม่ พร้อมรับมือภัยพิบัติแผ่นดินไหว” ในวันที่ ๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๔