

บทที่ ๓

วิธีการวิจัย

ขั้นตอนของการศึกษาประกอบด้วย

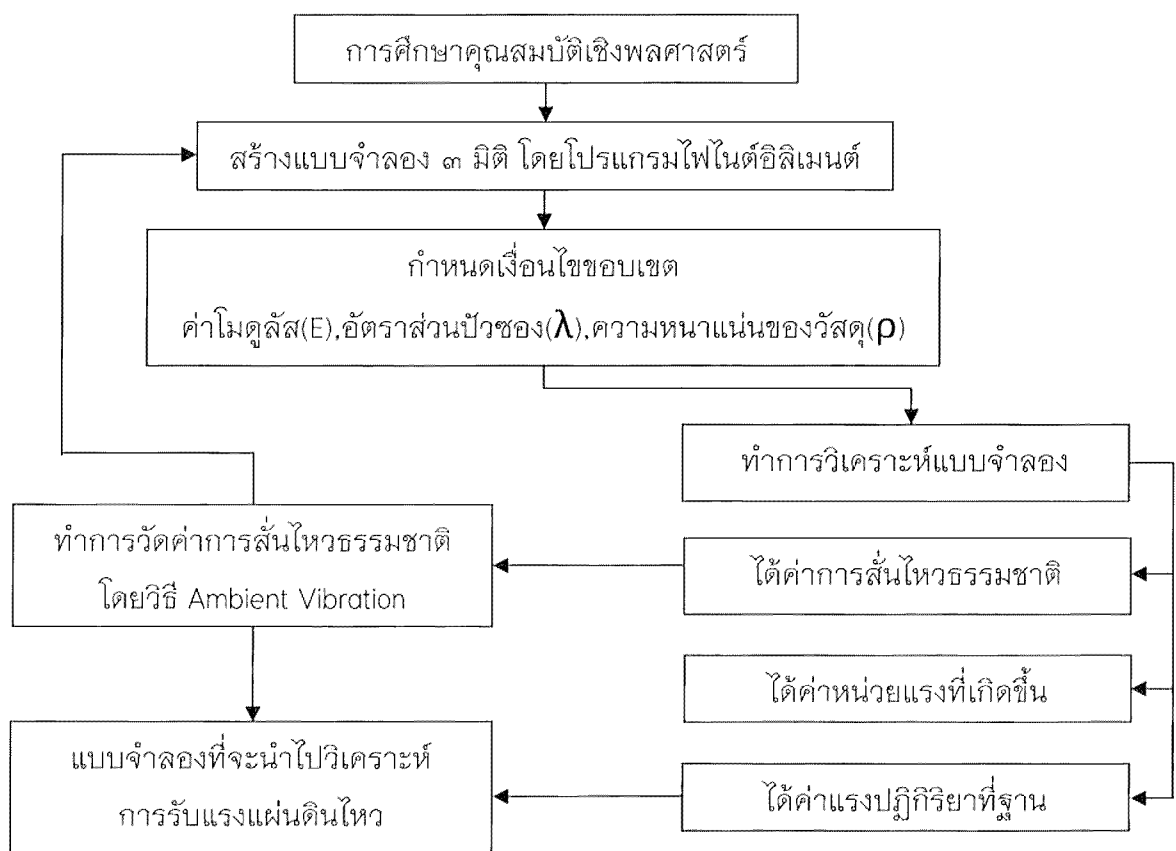
ส่วนที่ ๑. การศึกษารูปทรง และการจัดกลุ่ม

ส่วนที่ ๒. การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งได้คัดเลือกเจดีย์พระธาตุดอยสุเทพเป็นกรณีศึกษา โดยมีขั้นตอนประกอบด้วย

๑. การศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (รูปที่ ๓.๑)

๑.๑ การศึกษาคุณสมบัติโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

๑.๒ การศึกษาโดยการวัดโดยวิธี Ambient Vibration



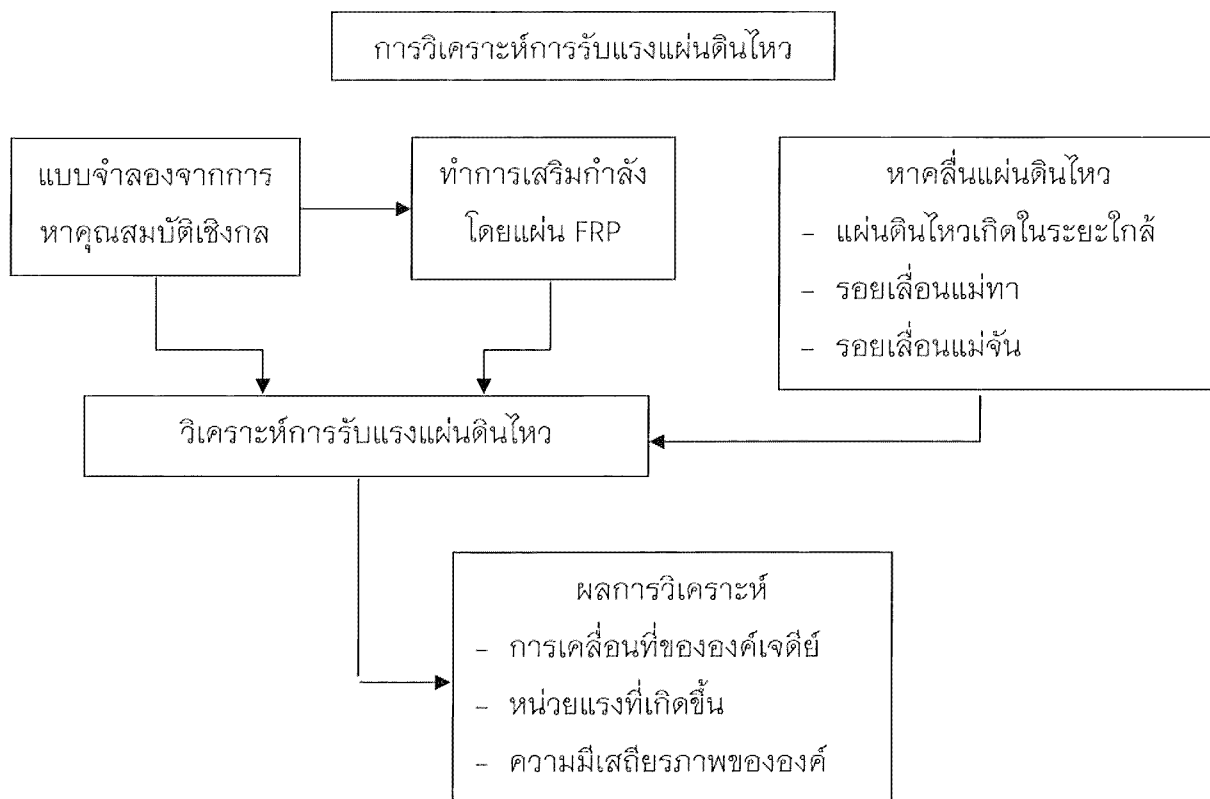
รูป ๓.๑ แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาสสมบัติเชิงพลศาสตร์

๒. การวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ ๓.๒)

๒.๑ การคัดเลือกคลื่นแผ่นดินไหว

๒.๒ การวิเคราะห์โดยไฟไนต์อีลิเมนต์เชิงเส้น

๒.๓ ทำการเสริมกำลังองค์เจตีย์แล้วทำการวิเคราะห์

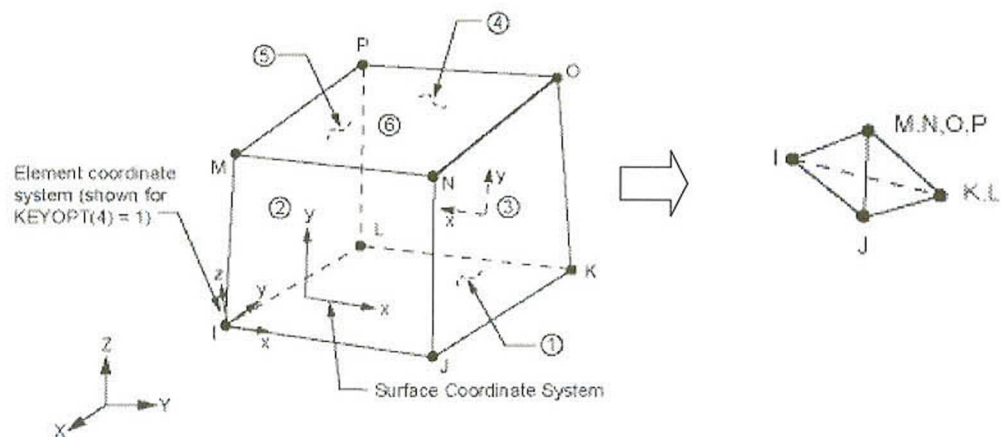


รูป ๓.๒ แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหว

๓.๑ การศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

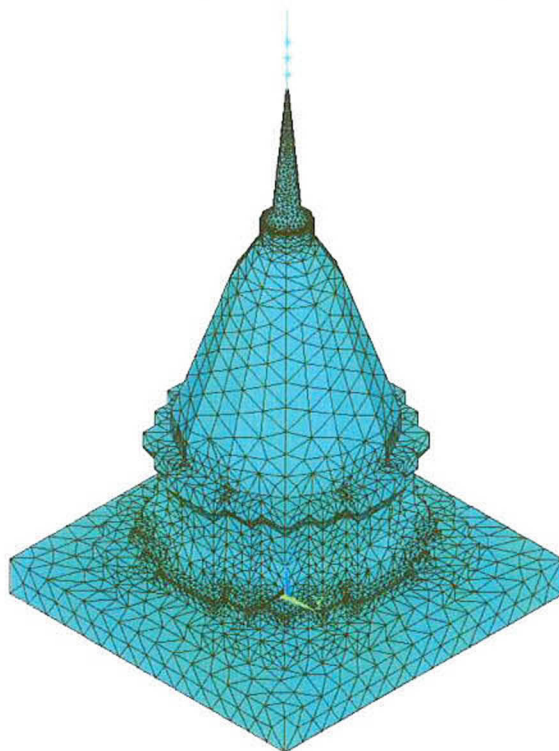
๓.๑.๑ การศึกษาโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

เจตีย์คดอยสุเทพเป็นเจตีย์ทรงระฆัง ซึ่งมีพื้นที่ฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างด้านละ ๑๐.๒๕ เมตร ความสูงองค์เจตีย์ทั้งหมดตั้งแต่ฐานถึงยอดฉัตร ๒๒.๓๕๖ เมตร ฐานองค์ระฆังเป็นรูป ๑๒ เหลี่ยมหน้าหนักที่ใช้คิดจากรูปทรงขององค์เจตีย์คูณกับหน่วยน้ำหนัก มีน้ำหนักเท่ากับ ๑๑๓.๑๘ ตัน การวิเคราะห์จะเป็นแบบเชิงเส้น ไม่คำนึงถึงรอยแตกที่มีอยู่ สมมติให้องค์เจตีย์อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ที่ฐานขององค์เจตีย์ให้มีการยึดรั้งเป็นแบบ hinge support โดย U_x , U_y , U_z เท่ากับ ศูนย์

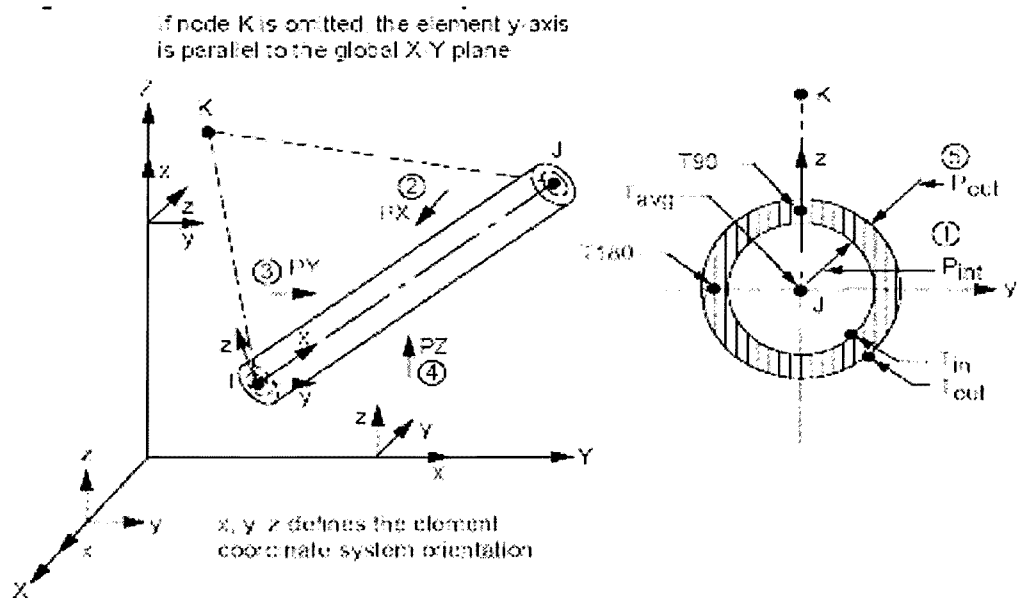


รูป ๓.๓ Solid element (ANSYS๑๓, ๒๐๑๐)

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในรูป ๓ มิติ จำลองในส่วนของเจดีย์ตัดส่วนที่เป็นรูปแบบทางสถาปัตยกรรมออก เลือกใช้อิเลเมนต์แบบ Solid Element ในแต่ละอีลิเมนต์ประกอบไปด้วย ๘ จุดต่อ รูปทรง Tetrahedral ดังในรูป ๓.๓ ในแต่ละจุดต่อมี ๓ ดีกรีอิสระ (Degree-of-freedom, DOF) คือ การเคลื่อนที่แบบเลื่อน (Translation) ในทิศทาง x, y และ z แบบจำลองมีจำนวนชิ้นส่วน ๕๖,๕๐๖ ชิ้นส่วน โดยมีจำนวนจุดต่อทั้งหมด ๑๑,๙๓๐ จุดต่อ ดังในรูป ๓.๔



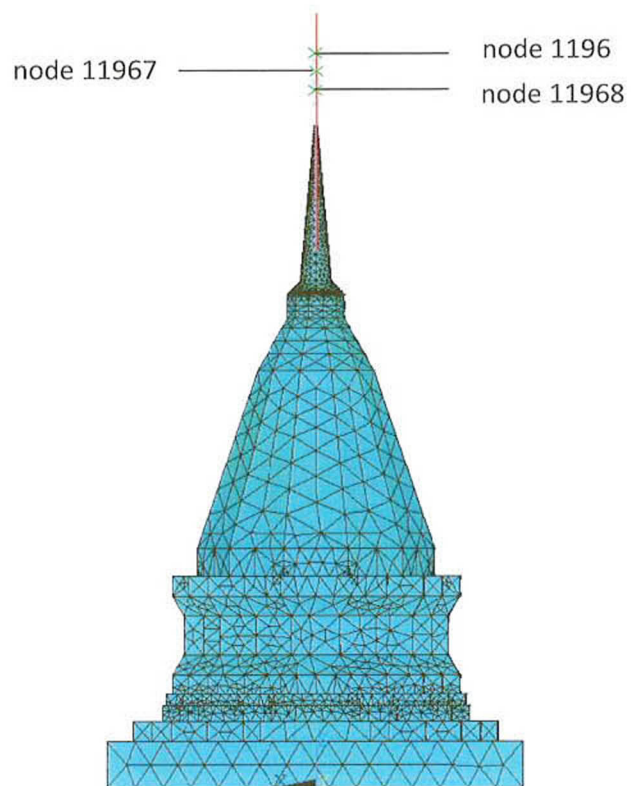
รูป ๓.๔ แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เจดีย์พระธาตุดอยสุเทพ



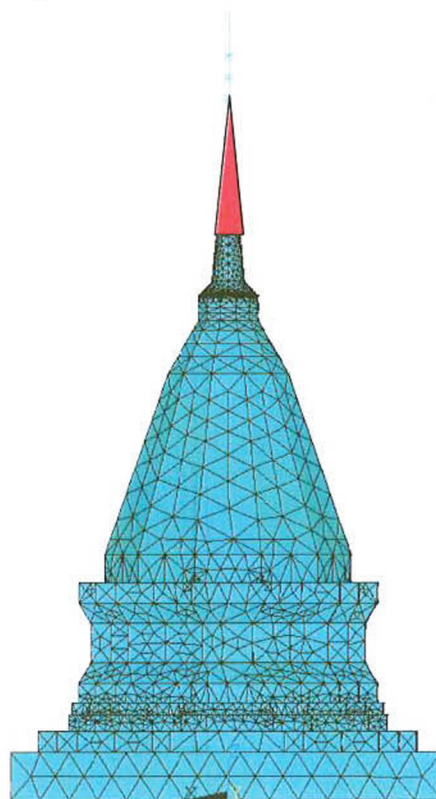
รูป ๓.๕ Pipe element (ANSYS๑๓, ๒๐๑๐)

ส่วนก้านฉัตรนั้นจะเป็นเหล็กกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๓ นิ้ว ผึงเข้าไปในยอดเจดีย์ โดยจะใช้อิเลิเมนต์แบบ Pipe Element ในแต่ละอิเลิเมนต์ประกอบไปด้วย ๒ จุดต่อ ดังรูป ๓.๕ ส่วนฉัตรจำลอง lump mass ติดอยู่บนก้านฉัตร ที่ตำแหน่ง node ๑๑๙๖๘, ๑๑๙๖๙ และ ๑๑๙๖๖ โดยมีน้ำหนัก ๒๐, ๑๐ และ ๕ กิโลกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูป ๓.๖ โดยรวมมี น้ำหนักฉัตรที่ ๓๕ กิโลกรัม

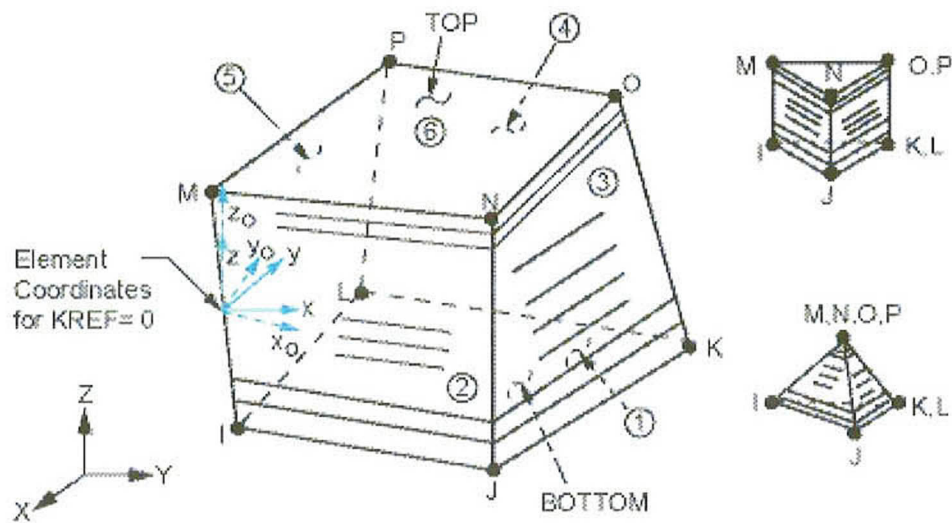
ส่วนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(FRP) มีขนาดความหนา ๓ mm. เส้นใยมีการจัดเรียงกันใน ๒ ทิศทางตั้งฉากกัน โดยทำการพันรอบปล้องโหนดดังรูป ๓.๗ ใช้อิเลิเมนต์แบบ Solid Element ในแต่ละอิเลิเมนต์ประกอบไปด้วย ๘ จุดต่อ คล้าย Solid Element ขององค์เจดีย์แต่จะต่างกันที่ใน Solid Element จะมีการแบ่งเป็นชั้นๆดังรูป ๓.๘



รูป ๓.๖ ตำแหน่งมวลที่ก้านฉัตร



รูป ๓.๗ ตำแหน่งการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูป ๓.๘ Solid element (ANSYS๑๓, ๒๐๑๐)

คุณสมบัติของวัสดุ

โดยทั่วไปโครงสร้างเจตีย์ส่วนมากใช้อิฐเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ในการศึกษานี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าวัสดุก่ออยู่ในสภาพสมบูรณ์

คุณสมบัติของปรีซึมอิฐก่อที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการทดสอบปรีซึมอิฐในจังหวัดเชียงใหม่ (สุภาวิทย์, ๒๕๔๔) ดังนี้

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ ๑,๐๐๐ เมกะปาสกาล
- ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ ๐.๑๕
- มวลต่อปริมาตรเท่ากับ ๑,๘๐๐ กก/ลบ.ม.
- กำลังอัดประลัยเท่ากับ ๒.๖๘ เมกะปาสกาล
- กำลังดึงประลัยเท่ากับ ๐.๒๗ เมกะปาสกาล (คิดเป็นร้อยละ ๑๐ ของกำลังอัดประลัย)

คุณสมบัติของเหล็กมีค่าดังนี้

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ ๒๐๐ จิกะปาสกาล
- ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ ๐.๓๐
- มวลต่อปริมาตรเท่ากับ ๗,๘๕๐ กก/ลบ.ม.
- กำลังดึงประลัยเท่ากับ ๒๓๕.๔๔ เมกะปาสกาล

คุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (มยผ. ๑๕๐๘-๕๑) มีค่าดังนี้

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ ๖๓.๙ จิกะปาสกาล

- ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ ๐.๒๒
- มวลต่อปริมาตรเท่ากับ ๑,๘๐๐ กก/ลบ.ม.
- กำลังดึงประลัยเท่ากับ ๖๔๑.๒ เมกะปาสกาล

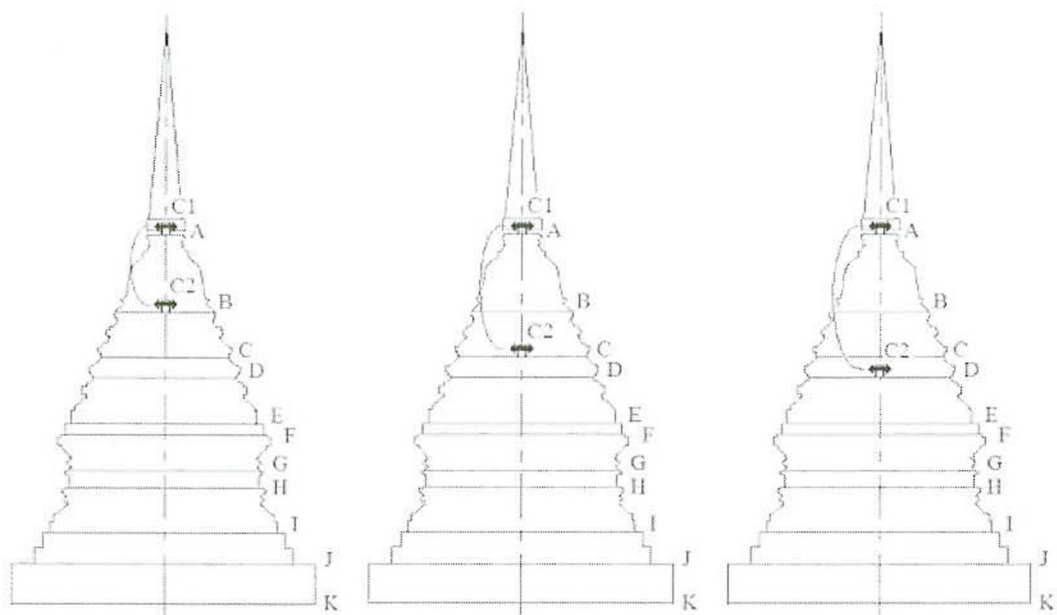
๓.๑.๒ การตรวจวัดด้วยวิธี Ambient Vibration

๓.๑.๒.๑ การตรวจวัดความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

สำหรับการตรวจวัดได้กระทำการเช่นเดียวกันกับ กรณีอาคารที่แบ่งความสูงเป็นระดับชั้น เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดการสั่นไหวจะติดตั้งที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง ในการตรวจวัดองค์เจดีย์ ได้ติดตั้งไว้ที่ระดับความสูง A ดังรูป ๓.๙ สัญญาณความเร่งที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความเร่งเทียบกับเวลาเวลา (time domain) และทำการปรับสัญญาณเบื้องต้นเช่น การปรับค่าเฉลี่ยของสัญญาณให้เป็นศูนย์ การเพิ่มความยาวของข้อมูลด้วยเลขศูนย์ เพื่อให้เหมาะกับการแปลงสัญญาณในขั้นตอนต่อไป หลังจากนั้นสัญญาณในรูปของ Time Domain จะถูกแปลงเป็น Frequency Domain โดยวิธี Fourier Transform การหาค่าความถี่ธรรมชาติพิจารณาที่จุดยอดของกราฟฟูเรียร์แอมพลิจูด (Fourier Amplitude)

๓.๑.๒.๒ การตรวจวัดรูปแบบการสั่นไหวธรรมชาติ (Vibration Mode Shape)

การตรวจวัดรูปแบบการสั่นไหวธรรมชาติ (Vibration Mode Shape) สำหรับอาคารจะมีการวางหัววัดเพิ่มถัดลงมาตามระดับชั้นต่างๆ สำหรับองค์เจดีย์ตำแหน่งที่ทำการวัดคือ ตำแหน่ง “B” ไต่ลงมาจนถึงตำแหน่ง “K” ดังรูป ๓.๙ โดย วางหัววัดชุดที่ ๑ ที่ตำแหน่ง “A” และวางหัววัดชุดที่ ๒ ที่ตำแหน่ง “B” จากนั้นทำการบันทึกสัญญาณ แล้วย้ายหัววัดชุดที่ ๒ ลงมายังระดับล่างที่ตำแหน่ง “C” จนถึงระดับล่างสุดคือตำแหน่ง “K” เพื่อเป็นการหารูปแบบการสั่นไหวของอาคารในลักษณะการเคลื่อนที่ (Translation) โดยพิจารณาจากขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ระหว่างหัววัด หรือความต่างเฟส ของ Fourier Magnitude ที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ตรวจวัด ขนาดของ Fourier Magnitude จะมีขนาดสูงกว่าในกรณีที่เป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลักของความถี่นั้น



รูป ๓.๙ ตำแหน่งการวางหัววัดสำหรับการตรวจวัดการสั่นไหวธรรมชาติ

ตาราง ๓.๑ ระดับความสูง (H) และเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (D) ของเจดีย์ในตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด

ตำแหน่ง	ระดับความสูง (H) เมตร	เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (D) เมตร
A	๑๔.๘๖	๑.๓๙
B	๑๑.๓/๕	๔.๐๕
C	๙.๙๒	๕.๑๖
D	๙.๑๓	๕.๘๒
E	๗.๒๘	๗.๘๓
F	๖.๘๐	๘.๒๐
G	๕.๓๖	๗.๗๗
H	๔.๖๖	๗.๘๓
I	๒.๘๖	๙.๖๒
J	๑.๖๐	๑๒.๑๐
K	๐.๐๐	๑๒.๑๐



๓.๒ การวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหว

๓.๒.๑ การหาคลื่นแผ่นดินไหว

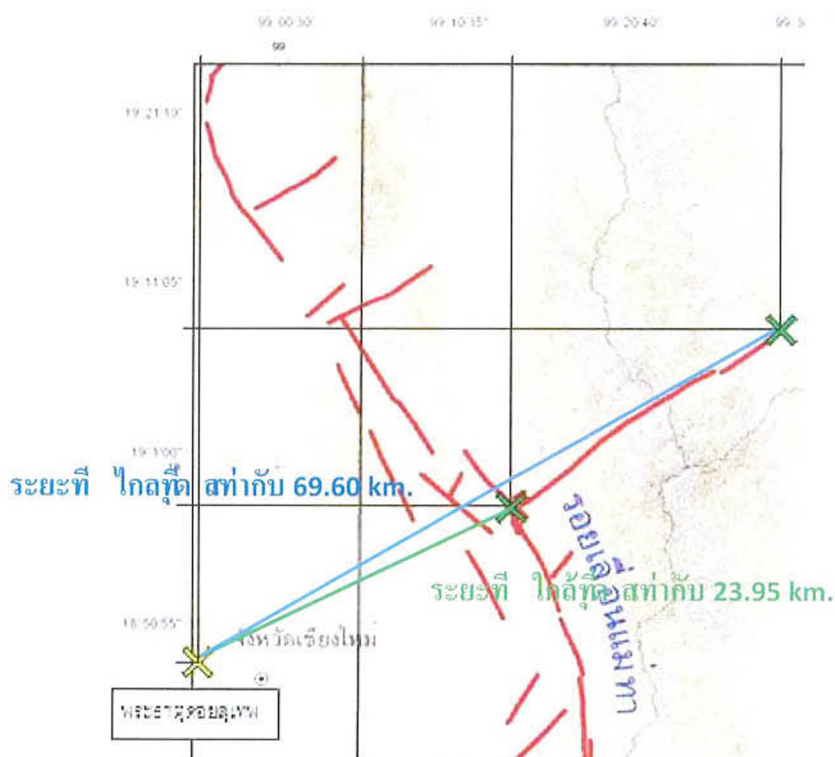
การหาคลื่นแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยการพิจารณาจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้นแล้วในอดีตทั้งนี้แผ่นดินไหวที่เลือก จะแบ่งออกเป็น ๓ รูปแบบคือ ๑.เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในระยะใกล้ โดยเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ไม่เกิน ๑๐ กิโลเมตร ซึ่งไม่สนใจว่ามีประวัติการเกิดแผ่นดินไหวหรือมีรอยเลื่อนหรือไม่ ๒. แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อนที่มีประวัติการเกิดแผ่นดินไหว ที่มีระยะใกล้กับพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ที่สุด และ ๓.แผ่นดินไหวที่มีขนาดแรงมากที่สุด ที่เกิดจากรอยเลื่อนบริเวณทำการวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนหาคลื่นแผ่นดินไหวดังนี้

๑. ทำการหาพิกัดของจุดที่ต้องการศึกษาในที่นี้คือ พระธาตุดอยสุเทพ โดยอยู่ในพิกัดที่

ละติจูด $18^{\circ}44'13''N$ ลองจิจูด $98^{\circ}55'14''E$

๒. เลือกรอยเลื่อนที่ใช้ในการวิเคราะห์จาก

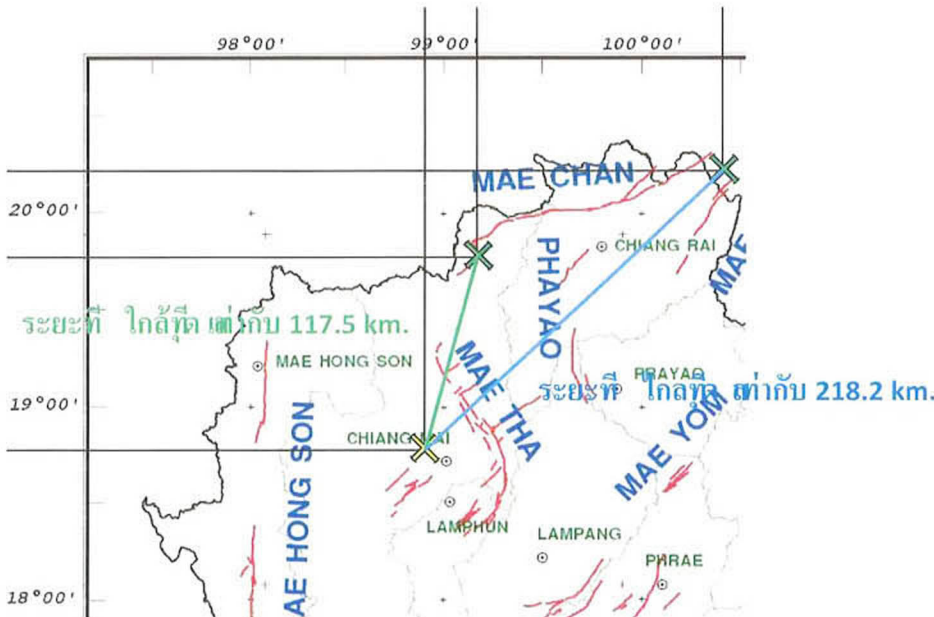
- ๒.๑ รอยเลื่อนที่ใกล้ที่สุดมีระยะทางระหว่างตำแหน่งของพระธาตุดอยสุเทพกับรอยเลื่อนที่คาดว่าจะเป็แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ในการศึกษาี้เลือกใช้รอยเลื่อนแม่ทาดังรูป ๓.๑๐



รูป ๓.๑๐ ตำแหน่งเจดีย์พระธาตุดอยสุเทพถึงรอยเลื่อนแม่ทา (<http://www.dmr.go.th>)

၁၅.၁၅

รอยเลื่อนแม่จัน ดังรูป ๓.๑๑



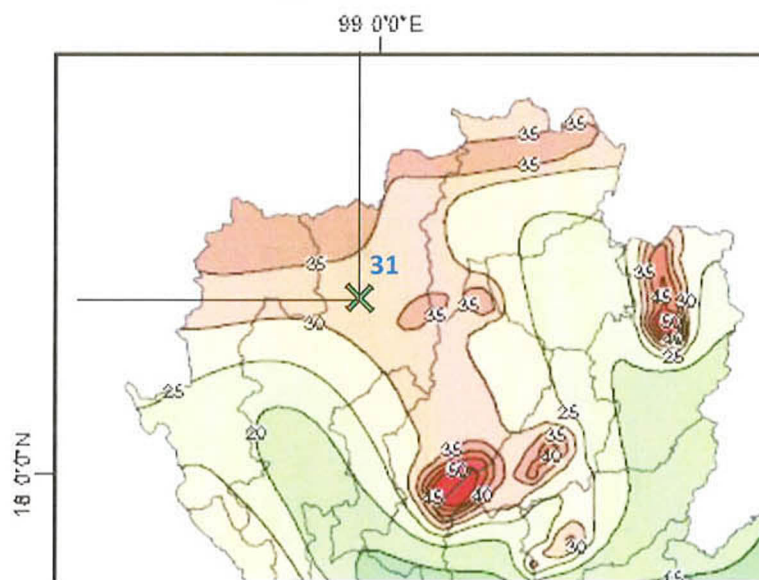
รูป ๓.๑๑ ตำแหน่งเจดีย์พระธาตุดอยสุเทพถึงรอยเลื่อนแม่จัน (<http://www.dmr.go.th>)
จากทั้ง ๒ กรณีตำแหน่งของรอยเลื่อนและระยะทางระหว่างเจดีย์พระธาตุดอยสุเทพถึง
รอยเลื่อน แสดงในตาราง ๓.๒

ตาราง ๓.๒ ระยะทางระหว่างเจดีย์พระธาตุคอกยสเทพถึงรอยเลื่อน

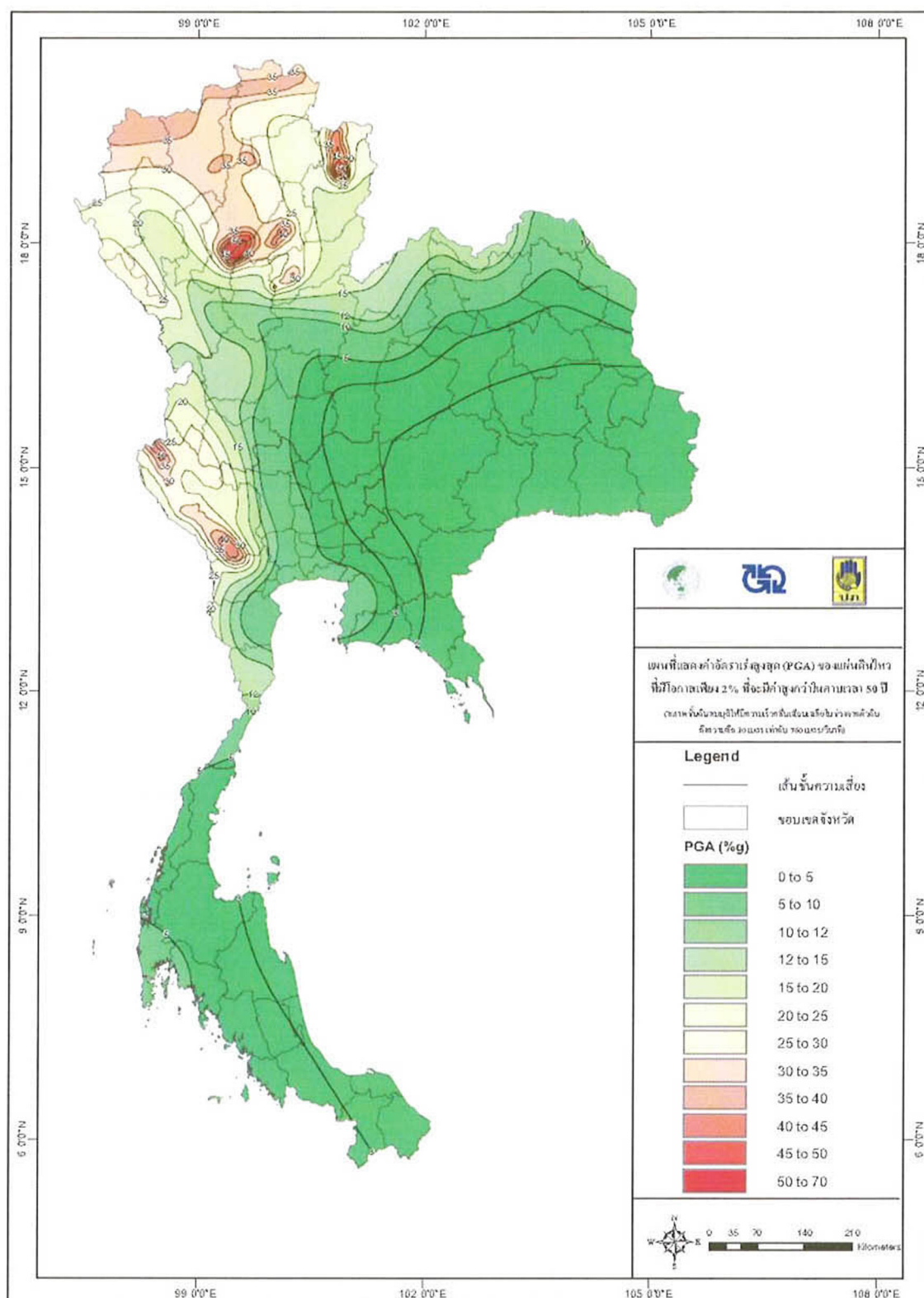
สถานที่	พิกัด		ระยะทาง (km.)
	ละติจูด (N)	ลองจิจูด (E)	
เจดีย์พระธาตุคุดอยสุเทพ	๑๘° ๔๘' ๑๗"	๙๘° ๕๕' ๑๕"	—
รอยเลื่อนแม่ทา (ใกล้ที่สุด)	๑๘° ๕๗' ๓๓"	๙๙° ๑๓' ๔๕"	๒๓.๙๕
รอยเลื่อนแม่ทา (ไกลที่สุด)	๑๙° ๐๘' ๓๓"	๙๙° ๒๘' ๔๐"	๖๙.๖๐
รอยเลื่อนแม่จัน (ใกล้ที่สุด)	๑๙° ๕๐' ๓๓"	๙๙° ๐๗' ๔๕"	๑๑๗.๕
รอยเลื่อนแม่จัน (ไกลที่สุด)	๒๐° ๑๗' ๓๓"	๑๐๐° ๑๖' ๔๐"	๒๑๘.๒

๓. หาค่า PGA

โดยเลือกใช้แผนที่แสดงอัตราเร่งพื้นดินสูงสุด (PGA) ที่มีโอกาสเกิดขึ้น ๒% ที่จะมีค่าสูงกว่าในคาบ ๕๐ ปี สาเหตุที่เลือก ๒% เพราะเจดีย์ดอยสุเทพเป็นสถานที่ที่สำคัญจึงต้องเลือกแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่สุดที่จะเกิดได้มาทำการศึกษา จากรูป ๓.๑๒ และ ๓.๑๓ ได้ค่าอัตราเร่งพื้นดินสูงสุด (PGA) เท่ากับ ๓๑% หรือ ๐.๓๑ เท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลก



รูป ๓.๑๒ แผนที่ส่วนขยายบริเวณจังหวัดเชียงใหม่แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุด (PGA) ของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเพียง ๒ % ที่จะมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา ๕๐ ปี (<http://www.dmr.go.th>)



รูป ๓.๑๓ แผนที่แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุด (PGA) ของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเพียง ๒ % ที่จะมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา ๕๐ ปี (<http://www.dmr.go.th>)

๔. นำข้อมูลที่ได้มาไปหาคลื่นแผ่นดินไหวที่คล้ายคลึงกันที่เคยเกิดขึ้นในอดีตในพื้นที่ต่างๆ โดยพิจารณาคัดกรองข้อมูลจากปัจจัยดังนี้

- ระยะทาง
- ขนาดแผ่นดินไหว
- ค่าอัตราเร่งสูงสุด PGA (รอยเลื่อนแม่จันจะทำการลดค่าอัตราเร่งสูงสุดจาก ๐.๓๑๐g เป็น ๐.๑๖๒g เนื่องจากการลดทอนของพลังงานที่เป็นผลมาจากระยะทางที่มากขึ้น)

ตาราง ๓.๓ ข้อมูลที่นำไปหาคลื่นแผ่นดินไหวที่คล้ายคลึง

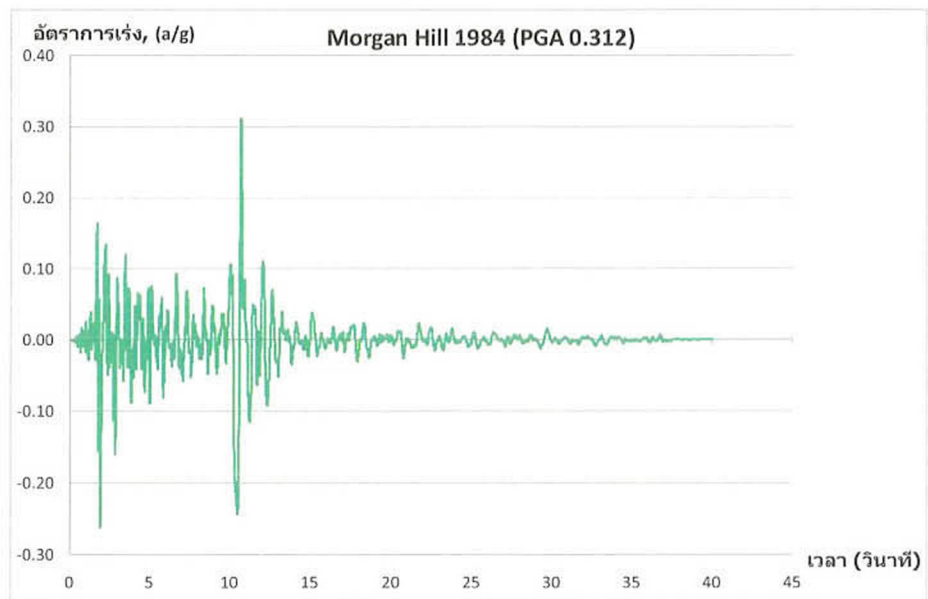
รอยเลื่อน	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ขนาดแผ่นดินไหว (ริกเตอร์)	ค่าอัตราเร่งสูงสุด (g)
แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้	๐ - ๑๐	๖.๐ - ๖.๕	๐.๓๑๐
รอยเลื่อนแม่ทา	๒๐ - ๓๐	๕.๐ - ๖.๕	๐.๓๑๐
รอยเลื่อนแม่จัน	๑๑๐ - ๒๒๐	๖.๕ - ๗.๕	๐.๑๖๒

หมายเหตุ ขนาดแผ่นดินไหวมาจากข้อมูลแผ่นดินไหว (<http://www.seismology.tmd.go.th>)

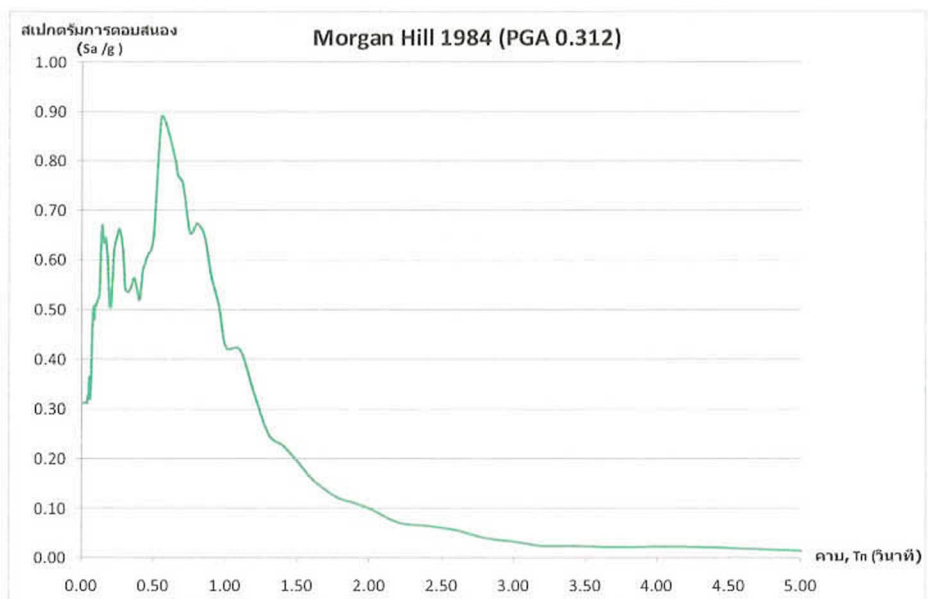
เมื่อนำข้อมูลจากตาราง ๓.๓ ไปหาคลื่นจาก <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html> ซึ่งเป็นเว็บไซต์ที่รวบรวมคลื่นแผ่นดินไหว โดยเลือกคลื่นที่คล้ายคลึงจากระยะทาง ขนาดแผ่นดินไหว และค่าอัตราเร่ง คลื่นที่ได้แสดงในตาราง ๓.๔ และรูปที่ ๓.๑๔-๓.๑๖

ตาราง ๓.๔ คลื่นแผ่นดินไหวที่คล้ายคลึงที่ใช้ในการศึกษา

รอยเลื่อน	คลื่นที่ได้	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ขนาด แผ่นดินไหว (ริกเตอร์)	ค่าอัตราเร่ง สูงสุด (g)
แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้	Morgan Hill	๓.๔	๖.๒	๐.๓๑๒
รอยเลื่อนแม่ทา	Imperial Valley	๒๓.๖	๖.๕	๐.๓๐๙
รอยเลื่อนแม่จัน	Kocaeli, Turkey	๑๓๖.๓	๗.๔	๐.๑๐๓

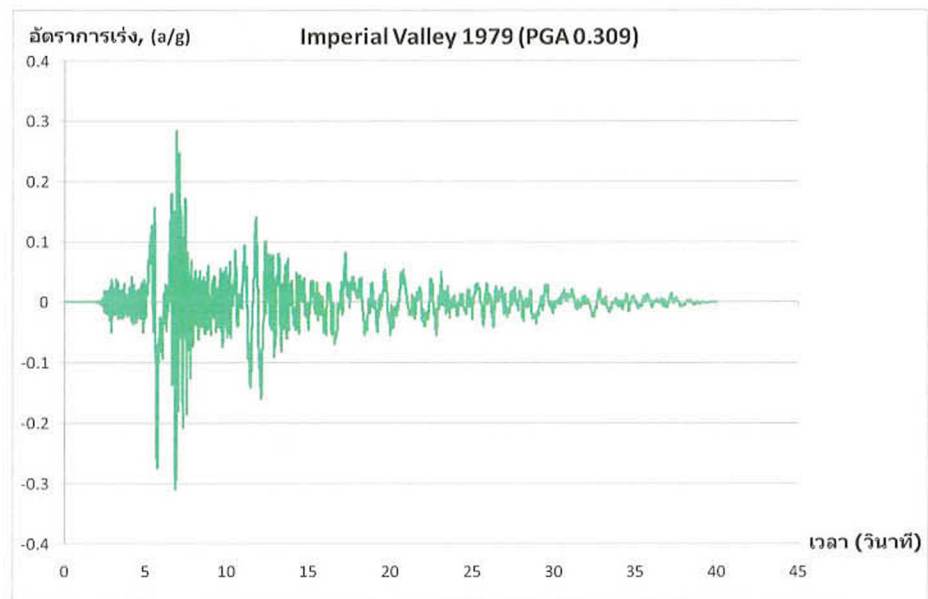


(ก) คลื่นอัตราเร่งของพื้นดิน (PGA ๐.๓๑๒)

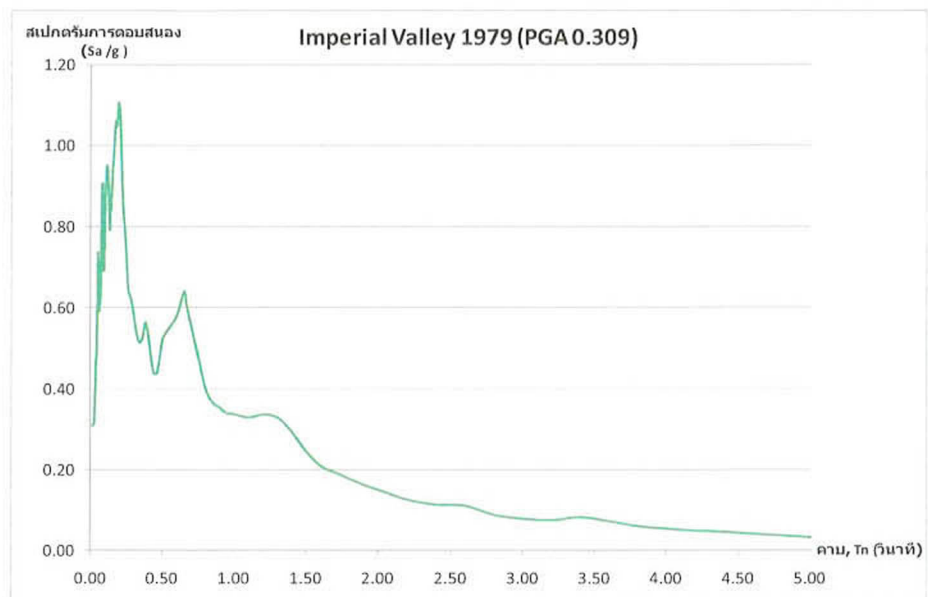


(ข) สเปกตรัมการตอบสนอง(damping ๕%)

รูป ๓.๑๔ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Morgan Hill 1984 กรณีแผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้

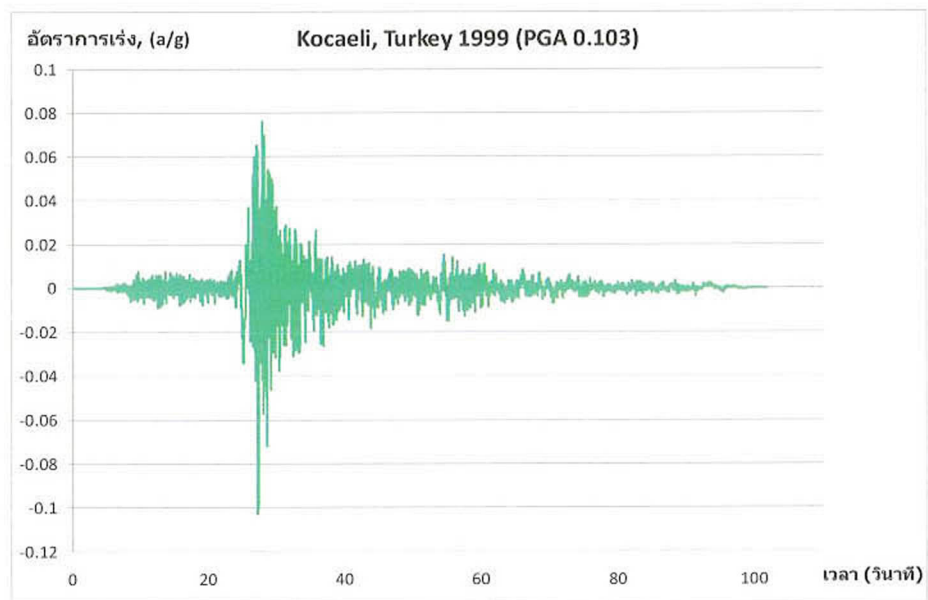


(ก) คลื่นอัตราเร่งของพื้นดิน (PGA ๐.๓๐๙)

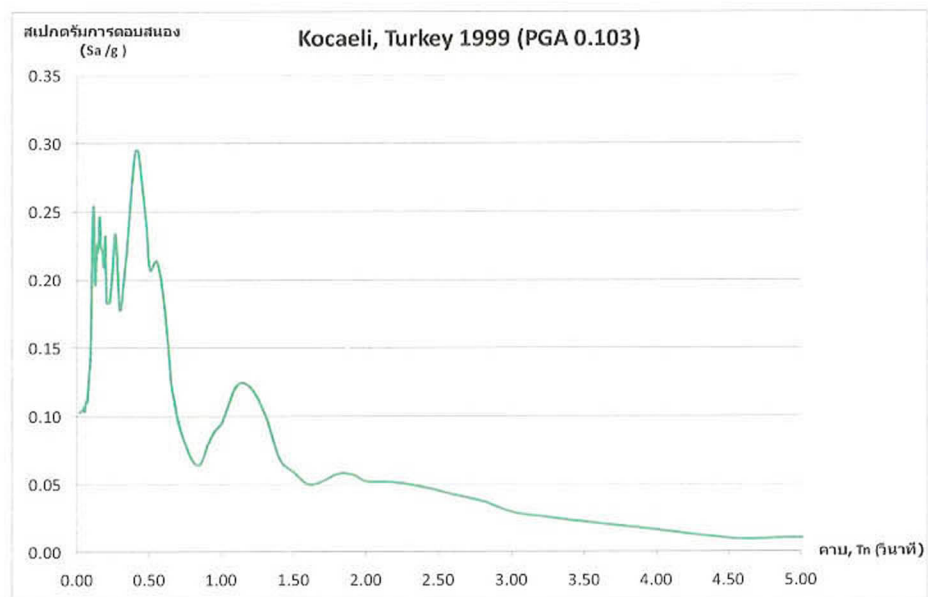


(ข) สเปกตรัมการตอบสนอง(damping ๕%)

รูป ๓.๑๕ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Imperial Valley 1979
กรณีแผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนเมทา



(ก) คลื่นอัตราเร่งของพื้นดิน (PGA ๐.๑๐๓)



(ข) สเปกตรัมการตอบสนอง(damping ๕%)

รูป ๓.๑๖ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey 1999
กรณีแผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนแม่จัน

๕. สร้างสเปกตรัมการตอบสนองในพื้นที่วิเคราะห์จาก มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.๑๓๐๒)

๕.๑ หาค่าความเร่งเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้นจาก มยพ.๑๓๐๒

- ค่าความเร่งเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s) = ๐.๘๓/๘ g
- ค่าความเร่งเชิงสเปกตรัมที่คาบ ๑ วินาที (S_0) = ๐.๒๔๘ g

๕.๒ โครงสร้างตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท D

๕.๓ สร้างสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร F_0 และ F_v หาได้จากตาราง ๓.๕ และ ๓.๖ตามลำดับ

ตาราง ๓.๕ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร F_0

ประเภทของ ชั้นดิน	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่ คาบ ๐.๒ วินาที (g)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.8/5$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	๐.๘	๐.๘	๐.๘	๐.๘	๐.๘
B	๑.๐	๑.๐	๑.๐	๑.๐	๑.๐
C	๑.๒	๑.๒	๑.๑	๑.๐	๑.๐
D	๑.๖	๑.๔	๑.๒	๑.๑	๑.๐
E	๒.๕	๑.๓	๑.๒	๐.๙	๐.๙
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณีๆไป				

ตาราง ๓.๖ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร F_V

ประเภทของ ชั้นดิน	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่ คาบ ๑.๐ วินาที (g)				
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.1$	$S_s = 0.3$	$S_s = 0.4$	$S_s \geq 0.5$
A	๐.๘	๐.๘	๐.๘	๐.๘	๐.๘
B	๑.๐	๑.๐	๑.๐	๑.๐	๑.๐
C	๑.๗	๑.๖	๑.๕	๑.๔	๑.๓
D	๒.๕	๒.๐	๑.๘	๑.๖	๑.๕
E	๓.๕	๓.๒	๒.๘	๒.๔	๒.๔
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณีๆไป				

- ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารสำหรับคาบการสั่น ๐.๒ วินาที (F_0) = ๑.๑๕

- ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารสำหรับคาบการสั่น ๑.๐ วินาที (F_0) = ๑.๙๐

๕.๔ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ปรับแก้แล้ว

$$S_{MS} = F_a S_s \quad \text{.....(๓.๑)}$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad \text{.....(๓.๒)}$$

โดยที่

S_{MS} = ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น ๐.๒ วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

S_{M1} = ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น ๑.๐ วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

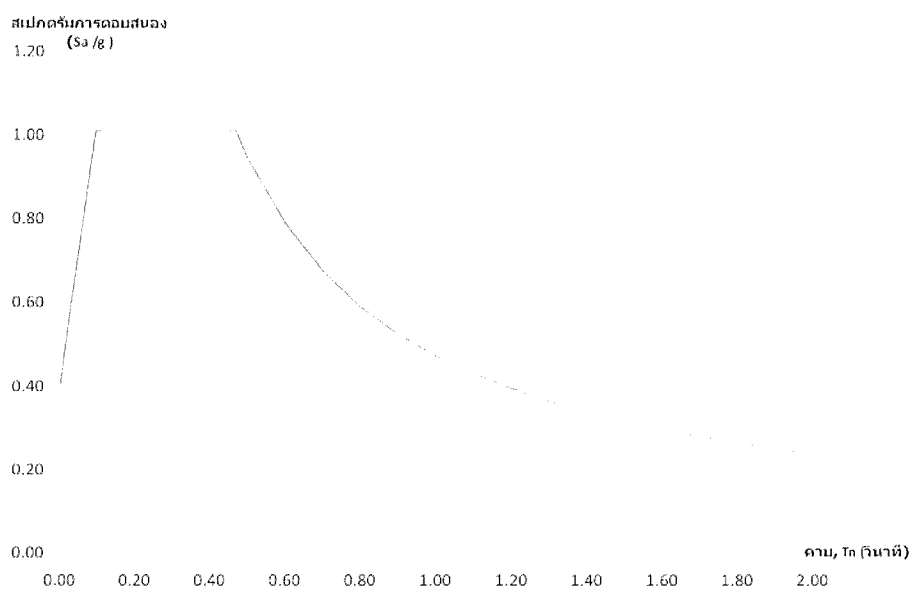
จากสมการ ๓.๑ และ ๓.๒ จะได้ค่า S_{MS} และ S_{M1} ดังนี้

$$S_{MS} = ๑.๐๐๙ \text{ g}$$

$$S_{M1} = ๐.๔๗๒ \text{ g}$$

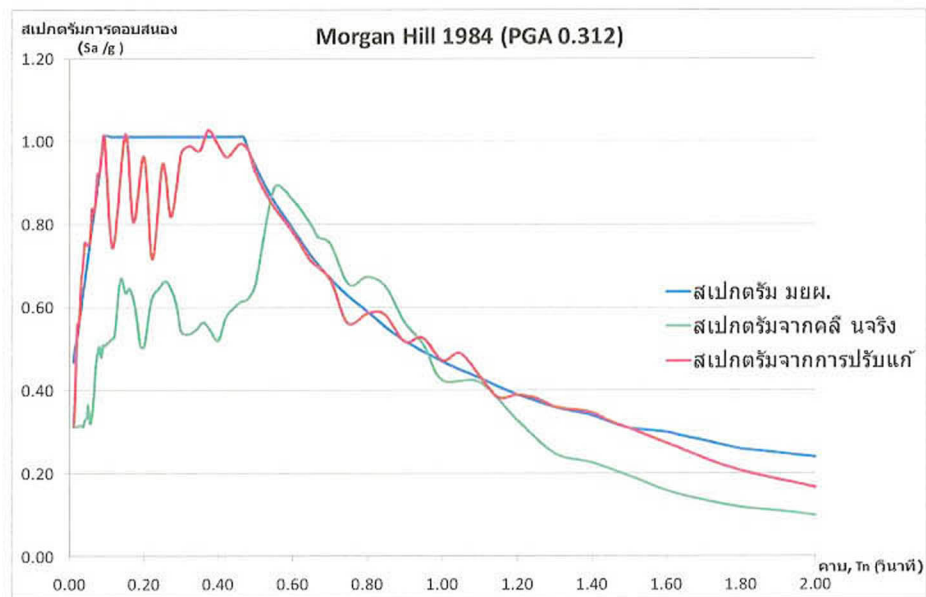
๕.๕ ทำการสร้างกราฟสเปกตรัมการตอบสนองแบบใหม่จากความเร่ง S_{MS}

และ S_{M1} ดังแสดงในรูป ๓.๑๗

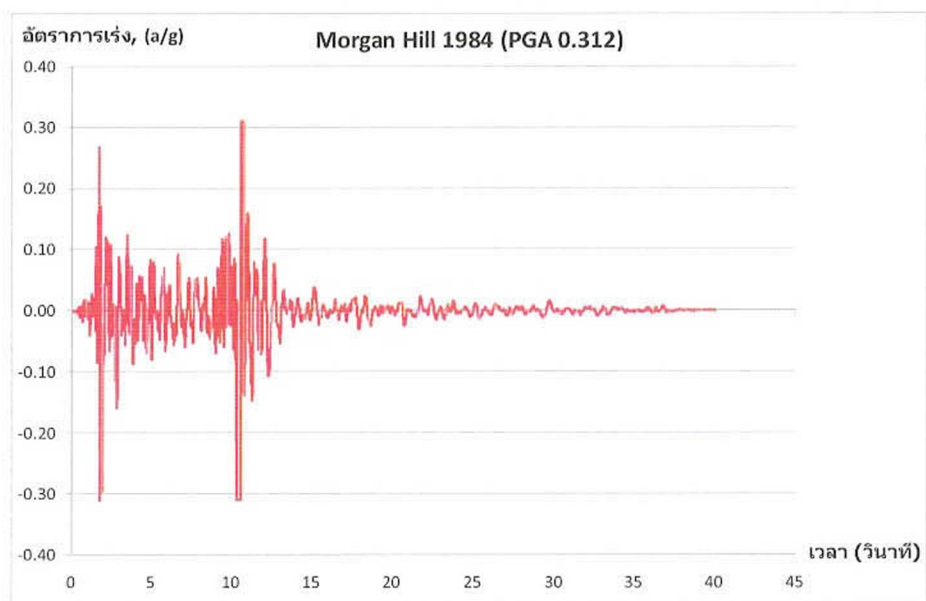


รูป ๓.๑๗ สเปกตรัมผลตอบของเจดีย์พระธาตุอภัยภูเบศรตามมาตรฐาน มยผ. ๑๓๐๒

๖. นำคลื่นที่หาได้ในขั้นตอนที่ ๔ ไป matched ระหว่างสเปกตรัมจากมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ในขั้นตอนที่ ๕ เพื่อให้ได้คลื่นจริงที่ได้เข้ากับลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยในเขตภาคเหนือตามความเป็นจริงมากที่สุด ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้ เมื่อ matched แล้วจะได้สเปกตรัมและคลื่นแผ่นดินไหวดังรูป ๓.๑๘ ถึง ๓.๒๐

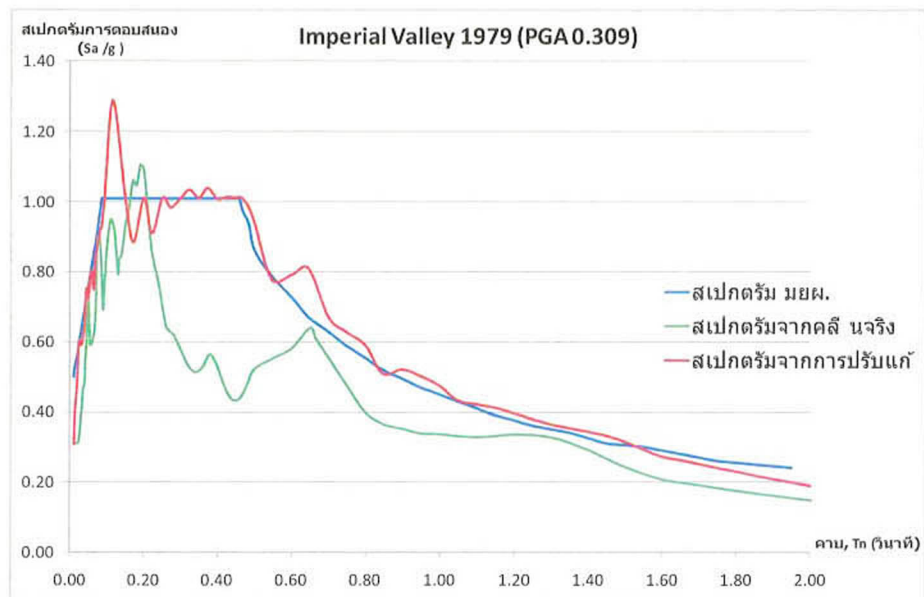


(ก) สเปกตรัมจากการปรับแก้คลื่นแผ่นดินไหว Morgan Hill 1984

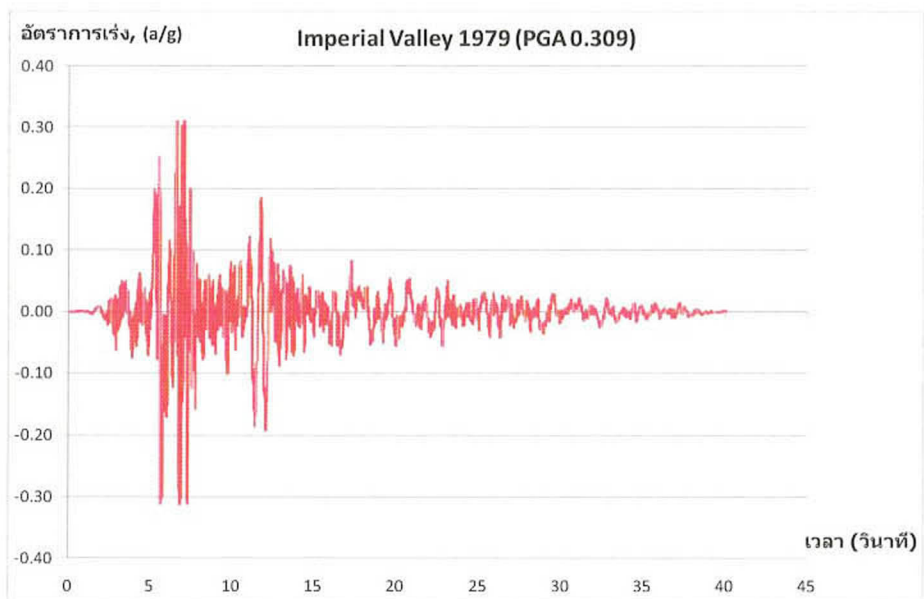


(ข) คลื่นแผ่นดินไหว Morgan Hill จากการปรับแก้

รูป ๓.๑๔ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Morgan Hill 1984 ที่ปรับเข้ากับพื้นที่วิเคราะห์

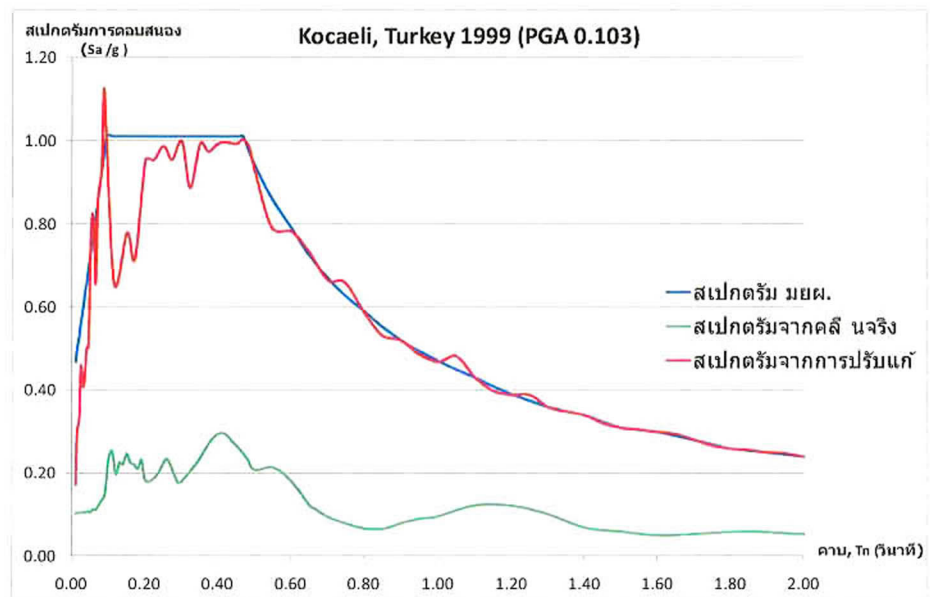


(ก) สเปกตรัมจากการปรับแก้คลื่นแผ่นดินไหว Imperial Valley 1979

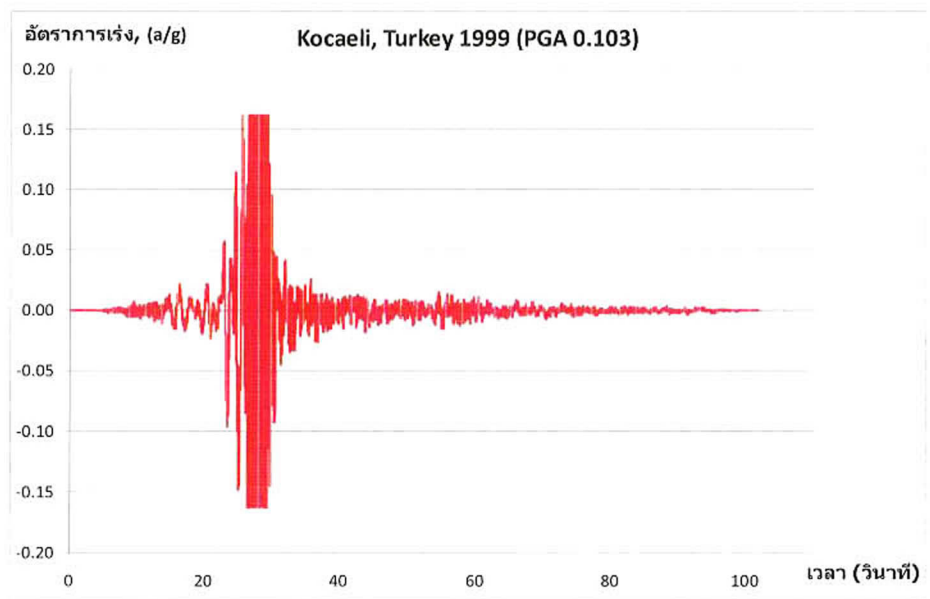


(ข) คลื่น Imperial Valley จากการปรับแก้

รูป ๓.๑๙ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Imperial Valley 1979 ที่ปรับเข้ากับพื้นที่วิเคราะห์



(ก) สเปกตรัมจากการปรับแก้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey 1999 (PGA ๐.๑๐๓)



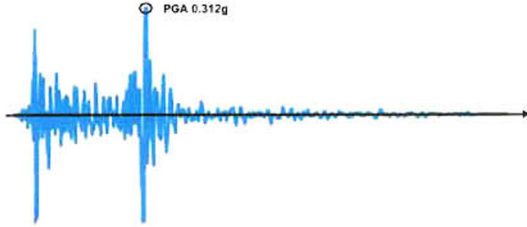
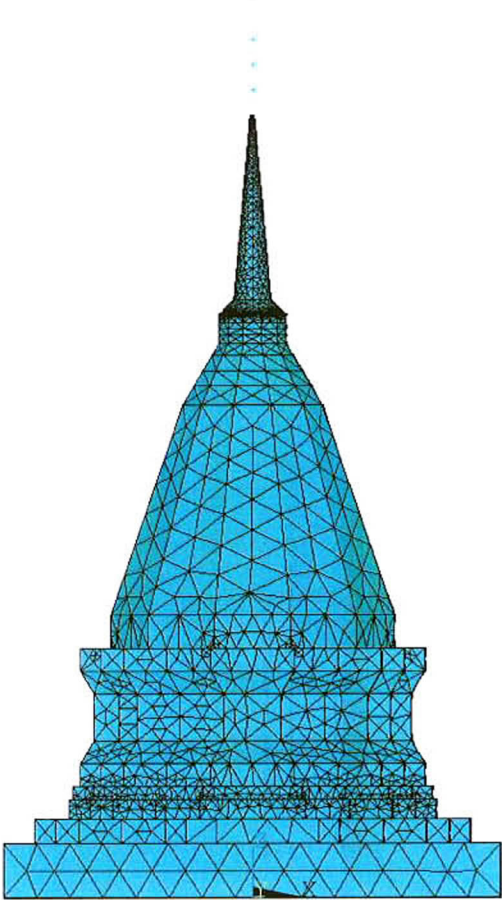
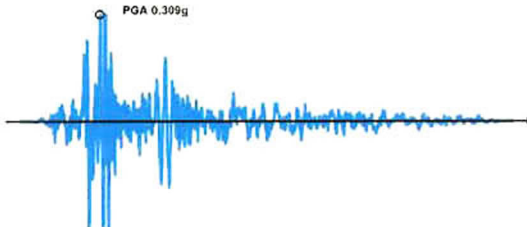
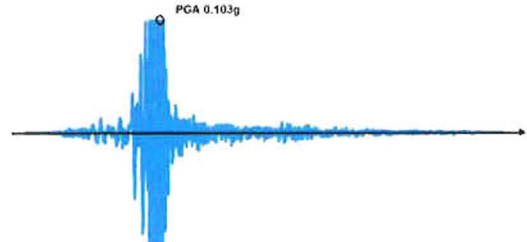
(ข) คลื่น Kocaeli, Turkey จากการปรับแก้

รูป ๓.๒๐ คลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli, Turkey 1999 ที่ปรับเข้ากับพื้นที่วิเคราะห์

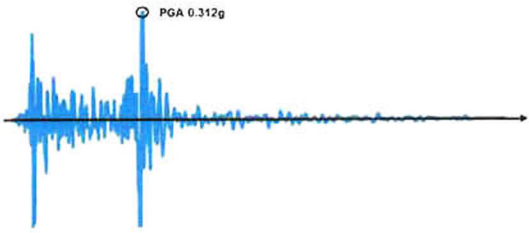
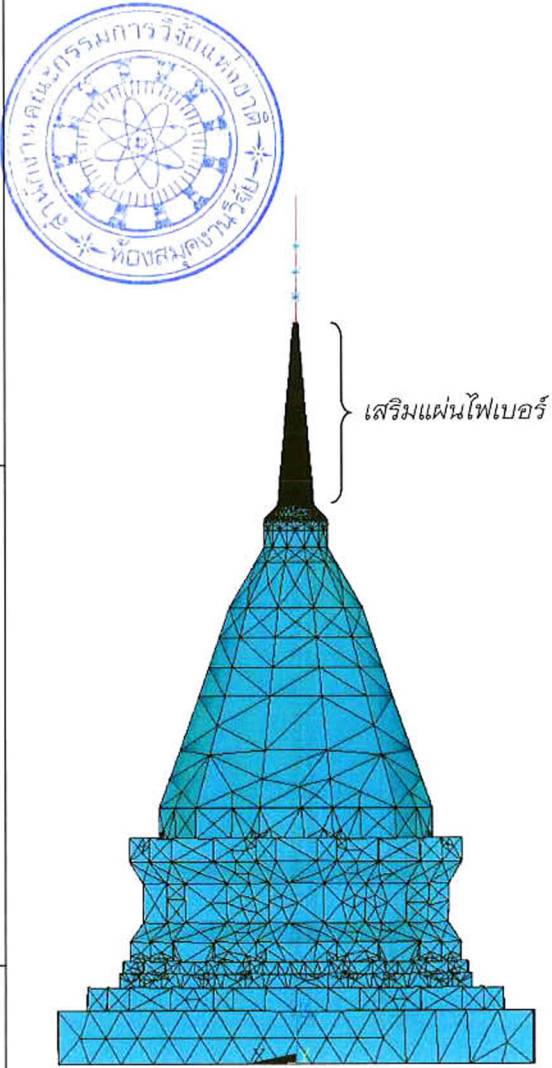
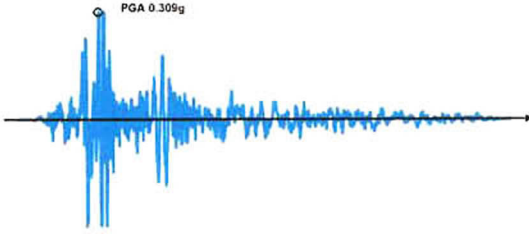
๓.๒.๒ วิเคราะห์พฤติกรรมในการรับแรงแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์พฤติกรรมในการรับแรงแผ่นดินไหว จะใช้วิธี Time History Analysis เนื่องจากวิธีนี้เหมาะกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามข้อมูลความเร่งของพื้นดิน กำหนดให้แรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางเดียวที่ฐานของเจดีย์ คือ แนวราบทางแกน x คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกใช้จะใช้คลื่นที่หามาจากหัวข้อ ๓.๒.๑ โดยประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่ปรับแก้จาก Morgan Hill 1984, Imperial Valley และ Kocaelic, Turkey 1999 ตามลำดับ แล้วนำทั้ง ๓ คลื่นที่ได้ไปทำการวิเคราะห์กับแบบจำลองที่ได้จากหัวข้อ ๓.๑ โดยตัวอย่างรูปแบบที่จะทำการวิเคราะห์แสดงดังตาราง ๓.๗

ตาราง ๓.๗/ แบบจำลองในการวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์

คลื่นแผ่นดินไหว	แบบจำลอง
แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ Morgan Hill 	
รอยเลื่อนแม่ทา Imperial Valley 	
รอยเลื่อนแม่จัน Kocaeli, Turkey 	

ตาราง ๓.๗ (ต่อ) แบบจำลองในการวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหวของเจดีย์

คลื่นแผ่นดินไหว	แบบจำลอง
แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ Morgan Hill 	 เสริมแผ่นไฟเบอร์ เสริมกำลังโดยแผ่นไฟเบอร์
รอยเลื่อนแม่ทา Imperial Valley 	
รอยเลื่อนแม่จัน Kocaeli, Turkey 