

การประเมินปรากฏการณ์ประธานวัดอรุณราชวราราม ในการต้านทานแผ่นดินไหว

Assessment of the Main Prang in Temple of Dawn on Seismic Resistance

ปฐมพงษ์ จอมทอง^{*1}, ชยานนท์ หารรรษภิญโญ² และ ชินพัฒน์ บัวชาติ³

Pathompong Jomthong^{*1}, Chayanon Hansapinyo² and Chinnapat Buachart³

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

E-mail: ¹thompong6@gmail.com, ²chayanon@eng.cmu.ac.th, ³chinapat@eng.cmu.ac.th

Telephone Number: 053-944156, Fax: 053-892376

บทคัดย่อ

โบราณสถานมีอายุยาวนานนั้นมักจะอ่อนแอและเสียหายได้ง่ายโดยเฉพาะกับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งเมื่อได้รับความเสียหายแล้วการบูรณะให้เหมือนเดิมเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ดังนั้นจึงควรมีการเตรียมการป้องกันความเสียหายไว้ก่อน บทความนี้นำเสนอผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อองค์พระปรางค์ประธานวัดอรุณราชวราราม โดยวิธีทางพลศาสตร์ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้ได้จำลองโครงสร้างพระปรางค์ประธานวัดอรุณราชวรารามเพื่อรับแรงจากคลื่นแผ่นดินไหวในอดีตจำนวน 9 รูปแบบที่แตกต่างกันสามกลุ่มคือ 1. แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ตามทิศทางไปข้างหน้า (near-fault ground motions with forward directivity) 2. แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) และ 3. แผ่นดินไหวระยะไกล (far-fault ground motions) ที่ได้รับการปรับค่าให้มีความรุนแรงตรงกับสเปกตรัมแผ่นดินไหวในพื้นที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์พระปรางค์มีความถี่ธรรมชาติพื้นฐานจากเท่ากับ 1.208 s ผลของคลื่นแผ่นดินไหวทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดที่รอยต่อระหว่างลานประทักษิณกับซุ้มทิศเท่ากับ 14.7 MPa และหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ลานประทักษิณเท่ากับ 4.13 MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ซึ่งมีค่า 2.68 MPa และ 0.27 MPa ตามลำดับ ดังนั้นควรมีการวางแผนการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเพื่อให้มีความสามารถในการรับแรงที่มากยิ่งขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายขององค์พระปรางค์จากแรงแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ABSTRACT

A historic building having long age is vulnerable and easily damaged especially by seismic force. The restoration of the damaged building to the original one difficult. Hence, preparedness for the damage becomes crucial. This paper presents a study on the effect of earthquake on the main prang in Temple of Dawn using dynamic analysis option in finite element program. The structural model of the building was subjected to nine modified past earthquakes waves which were divided into three groups as (1) near-fault ground motions with forward directivity, (2) near-fault ground motions with fling and (3) far-fault ground motions. The wave modification was performed based on the earthquake spectrum in the area. The results showed that the fundamental natural period was 1.208 s. Under earthquake excitations, the maximum compressive stress occurred at joint between Pa Thaksin ground and facade was 14.7 MPa and the maximum tensile stress occurred at Pa Thaksin ground was 4.13 MPa. They were respectively higher than 2.68 MPa and 0.27 MPa of the allowable values. Therefore, the strengthening of the main

prang should be considered to prevent the damage of main prang under the forthcoming earthquake situation.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากและยังมีการเกิดภัยพิบัติต่างๆ มากมายโดยภัยพิบัติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นั่นคือ แผ่นดินไหวที่สร้างความเสียหายได้อย่างมากแก่สิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคารบ้านเรือน อาคารเพื่อการพาณิชย์ รวมไปถึงสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์อย่าง โบราณสถาน ซึ่งโบราณสถานนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากทำให้วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างนั้นเสื่อมสภาพและไม่แข็งแรง เมื่อได้รับความเสียหายจะทำให้เกิดความเสียหายหนักกว่าสิ่งก่อสร้างอื่นๆ

พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเป็นพระเจดีย์ทรงปรางค์ซึ่งดัดแปลงมาจากพระปรางค์ดั้งเดิมเป็นสถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สักการะบูชาของศาสนาพราหมณ์และฮินดู แต่สำหรับพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเป็นสถาปัตยกรรมที่ผสมผสานระหว่างพุทธศาสนาและฮินดู วัตถุประสงค์หลักนั้นสร้างด้วยความศรัทธาในคตินิยมของพุทธศาสนา ซึ่งในปัจจุบันพระปรางค์วัดอรุณมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาที่ใช้งานอย่างยาวนานและได้มีภัยธรรมชาติเกิดขึ้นกับพระปรางค์ทำให้เกิดความเสียหายกับพระปรางค์หลายครั้ง เช่น การเกิดฟ้าผ่าที่องค์พระปรางค์ การทรุดตัวของดินที่พื้นลานหน้าพระปรางค์ ปัญหาน้ำกัดเซาะ และเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปัจจุบันก็เป็นปัญหาใหญ่เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะตรวจสอบและประเมินสมรรถนะของพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเพื่อให้ทราบถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับพระปรางค์ในอนาคตและสามารถหาวิธีการแก้ไขปัญหาและบูรณะได้

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับโบราณสถานสำคัญต่างๆ ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวมากมายทั้งงานวิจัยในประเทศ เช่น โบราณสถานทางภาคเหนือของประเทศไทย [1, 2] ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเกิดค่าหน่วยแรงดึงในวัสดุที่ใช้ออกก่อสร้างมากกว่าหน่วยแรงที่

ยอมให้แต่หากมีการเสริมกำลังดึงก็จะช่วยให้ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงได้ โบราณสถานทางภาคกลาง [3-5] งานวิจัยบอกได้ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีค่าไม่มากนักแต่วัสดุค่อนข้างมีการเสื่อมโทรม หน่วยแรงที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลต่อในอนาคตข้างหน้าได้ และมีงานวิจัยทางโบราณสถานหรือสถานที่ทางประวัติศาสตร์ที่สำคัญในต่างประเทศ เช่น โบสถ์ขนาดใหญ่อายุกว่า 1200 ปีในประเทศเยอรมัน [6] หอคอยอิฐก่อในประเทศอิตาลี [7] และโบราณสถานต่างๆ ในประเทศเนปาล [8] พบว่าค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่งผลต่อเสถียรภาพของโบราณสถานและมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านเห็นได้ว่าแผ่นดินไหวนั้นมีผลกระทบต่อโบราณสถานมากดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 [9] โดยยังพบว่าโครงสร้างเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวมักจะเกิดหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดในวัสดุที่สร้างองค์พระเจดีย์เกินกว่าค่ากำลังที่จะรับได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาสมรรถนะในองค์พระปรางค์วัดอรุณราชวราราม ซึ่งเป็นพระปรางค์องค์สำคัญองค์หนึ่งในประเทศไทยและเป็น โบราณสถานที่เก่าแก่อายุมายาวนานเป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมของประเทศไทยโดยอยู่ภายใต้สภาวะจำลองของการเกิดแผ่นดินไหวในแบบต่างๆ เพื่อหาทางป้องกันการเสียหายขององค์พระปรางค์เนื่องจากแผ่นดินไหวที่อาจจะเกิดขึ้น

ตารางที่ 1 ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทย [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2088	ยอดเจดีย์หลวง จ.เชียงใหม่หักจากความสูง 86 เมตร เหลือเพียง 60 เมตร
พ.ศ. 2217	ยอดเจดีย์หักพังหลายหลายแห่งที่เชียงใหม่

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทย [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2088	ยอดเจดีย์หลวง จ.เชียงใหม่หักจากความสูง 86 เมตร เหลือเพียง 60 เมตร
พ.ศ. 2217	ยอดเจดีย์หักพังหลายแห่งที่เชียงใหม่
พ.ศ. 2258	แผ่นดินไหวหนัก พระเจดีย์วิหารหักพัง 4 ตำบล
พ.ศ. 2532	ยอดเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพหัก
พ.ศ. 2550	ยอดฉัตรพระธาตุจอมกิติหักและเกิดรอยร้าวในตัวพระธาตุ
พ.ศ. 2554	พระธาตุเจดีย์หลวงที่เชียงใหม่หักโค่น
พ.ศ. 2555	บ้านเรือนประชาชนเกิดรอยร้าวและเสียหายเล็กน้อย จ.ภูเก็ต
พ.ศ. 2557	<ul style="list-style-type: none"> - ยอดฉัตร ศาลาจตุรมุข วัดร่องขุน มีสภาพเอียง - โรงเรียนพานพิทยาคม จ.เชียงราย พังทลายลง - บ้านเรือนประชาชนใน จ.เชียงราย พังเสียหาย - ถนนได้รับความเสียหาย มีการยกตัวออกจากกัน

ตารางที่ 2 ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศ [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2111	พระเจดีย์ เมืองย่างกุ้ง พังทลายลงมาถึงชั้นกลาง
พ.ศ. 2172	ฉัตรยอดพระเจดีย์ย่างกุ้งหัก
พ.ศ. 2300	ฉัตรยอดพระเจดีย์มูตางในเมืองหงสาวดีหัก

ตารางที่ 2 (ต่อ) ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศ [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2553	แผ่นดินไหวที่เฮติ บ้านเมืองพังเสียหาย และมีผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก
พ.ศ. 2556	เกิดแผ่นดินไหวที่ปากีสถาน บ้านเรือนประชาชนชนพังเสียหาย 90% ของทั้งหมดมีผู้บาดเจ็บและล้มตายเป็นจำนวนมาก
พ.ศ. 2558	แผ่นดินไหวที่เนปาล สร้างความเสียหายแก่โบราณสถานต่างๆ และอาคารเก่าแก่จนเสียหายไม่เหลือเดิม
พ.ศ. 2558	แผ่นดินไหวที่อัฟกานิสถาน อาคารบ้านเรือน โรงเรียน พังเสียหาย
พ.ศ. 2559	เกิดแผ่นดินไหวในเมืองคумаโมโตะ มีบ้านเรือนเสียหายและสถานที่สำคัญเช่น โบราณสถานเก่าแก่ปราสาทคумаโมโตะ ศาลเจ้าอะโสะ
พ.ศ. 2559	แผ่นดินไหวที่เอกวาดอร์ ส่งผลให้บ้านเรือนเสียหาย ถนนและทางยกระดับพังเสียหาย

2. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษามีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

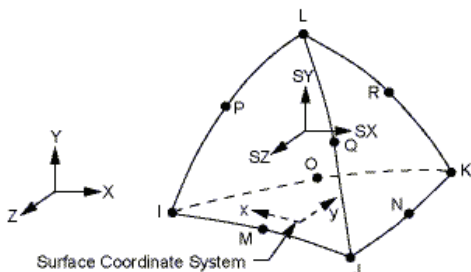
2.1 ข้อมูลทางรูปทรงเรขาคณิตขององค์เจดีย์

ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของพระปรางค์วัดอรุณราชวราราม เช่นประวัติความเป็นมา ลักษณะต่าง ๆ ขององค์พระปรางค์ แบบสถาปัตยกรรมขององค์พระปรางค์ เพื่อใช้ในการจำลองโมเดลโครงสร้างขององค์พระปรางค์ โดยองค์พระปรางค์ที่ทำการจำลองจะมีความสูงจากฐานถึงปลายยอดประมาณ 74.50 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานประมาณ 44.50 เมตร

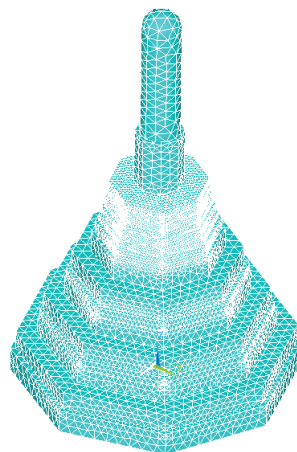
2.2 จำลองโมเดลโครงสร้างขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามในโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์

ทำการจำลองโครงสร้างขององค์พระปรางค์จากข้อมูลที่ได้รวบรวมมาโดยใช้ solid element แบบ เอลิเมนต์สามมิติรูปกรวยที่มี 10 จุดต่อ (second-order tetrahedral element) ในการจำลองโมเดลคังรูปที่ 1 และโมเดลมีจำนวนชิ้นส่วนเท่ากับ 105,667 ชิ้นส่วน และจำนวนจุดต่อเท่ากับ 151,260 จุดต่อ คังรูปที่ 2 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองโมเดลโดยใช้ค่ากำลังปริซึมของอิฐก่อของโบราณสถาน [10] เนื่องจากไม่สามารถนำอิฐก่อของจริงมาทำการทดสอบได้และมีสมมติฐานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- สมมติให้ภายในองค์พระปรางค์ตันและวัสดุมีสภาพที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- ทำการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างหลักขององค์พระปรางค์เท่านั้น (แบบเชิงเส้น)
- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 1,000 MPa
- ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.15
- มวลต่อปริมาตรเท่ากับ 1,800 kgm³
- จุดรองรับที่บริเวณฐานเป็นแบบยึดแน่นทั้งสามทิศทาง
- ค่ากำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ (fm') เท่ากับ 2.68 MPa
- ค่ากำลังดึงประลัยของวัสดุก่อ (fm') เท่ากับ 0.27 MPa ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ



รูปที่ 1 solid element tetrahedral 10 node



รูปที่ 2 แบบจำลองโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์

2.3 จำลองคลื่นแผ่นดินไหวที่จะใช้ในการวิเคราะห์

เลือกใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะคลื่นต่างกัน ทั้งหมด 3 กลุ่ม [11] ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีคลื่นแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้ [12]

กลุ่มที่ 1 แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ตามทิศทางไปข้างหน้า (near-fault ground motions with forward directivity) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางน้อยกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษา กับแหล่งกำเนิด และมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่ทิศทางข้างหน้าของพื้นที่ศึกษาและจะแผ่ขยายไปยังพื้นที่ศึกษา รูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ค) ซึ่งจะมีคลื่นที่ใช้ดังนี้

- Loma prieta (P0736), 1989 (t=40.0 s)
- Kobe (P1057), 1995 (t = 40.9 s)
- Northridge (P1005), 1994 (t = 15.0 s)

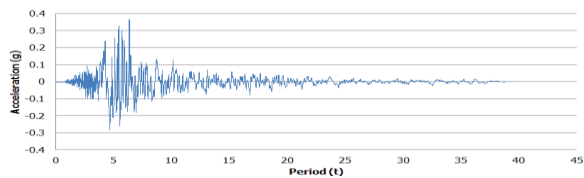
กลุ่มที่ 2 แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางน้อยกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษา กับแหล่งกำเนิด และมีค่าความเร็วสะท้อนเพียงระนาบเดียว ซึ่งจะมีคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้คือ คลื่น Chi Chi, 1999 โดยคลื่นจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ รูปแบบการเคลื่อนไหวคลื่นแบบเป็นจังหวะ (pulse-like ground motion) และรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบไม่เป็นจังหวะ (non-pulse-like ground motion) รูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ง-จ) โดยใช้ค่าดังต่อไปนี้

- Chi Chi (TCU068), 1999 (t = 102.0 s)

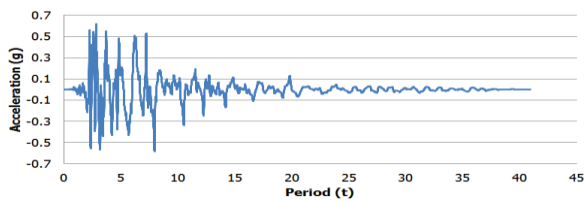
- (Pulse-like ground motion)
- Chi Chi (TCU072), 1999 (t = 76.0 s)
- (Non-pulse-like ground motion)
- Chi Chi (TCU074), 1999 (t = 63.0 s)
- (Non-pulse-like ground motion)

กลุ่มที่ 3 แผ่นดินไหวระยะไกล (far-fault ground motions) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางมากกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษากับแหล่งกำเนิดรูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ข-ฉ) ซึ่งจะมีคลื่นที่ใช้ดังนี้

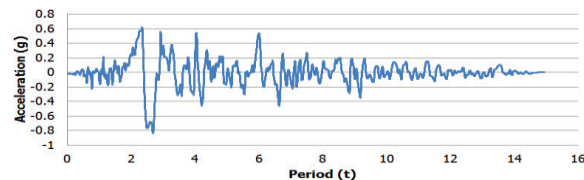
- Landers (P0864), 1992 (t = 80.0 s)
- San Fernando (P0056), 1971 (t = 48.0 s)
- Northridge (P0936), 1994 (t = 50.0 s)



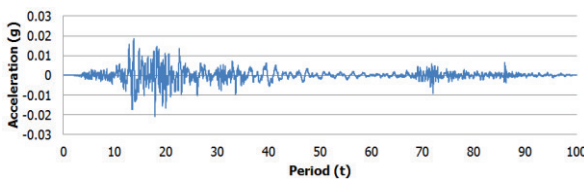
(ก)



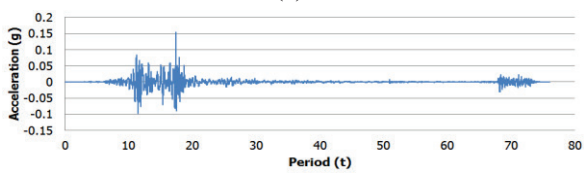
(ข)



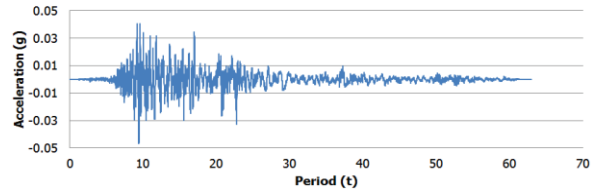
(ค)



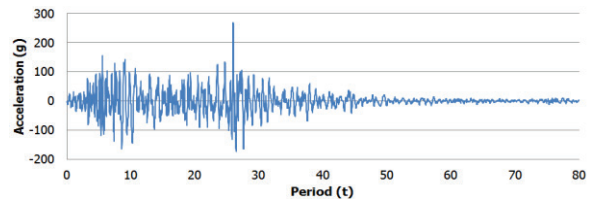
(ง)



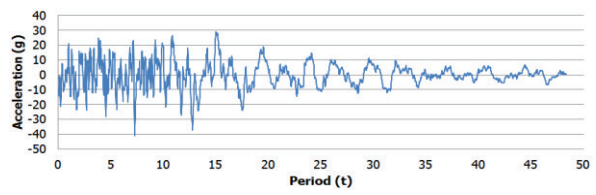
(จ)



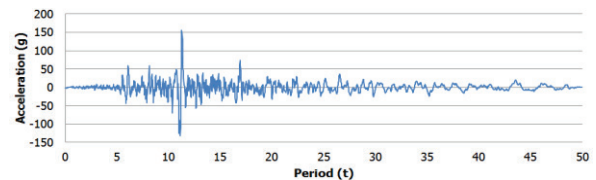
(ฉ)



(ช)



(ซ)



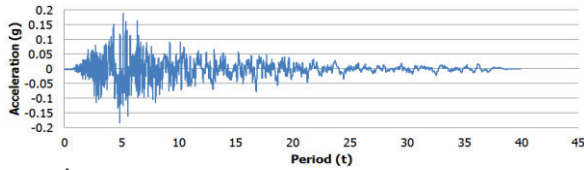
(ฅ)

รูปที่ 3 ค่าความเร่งในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหว

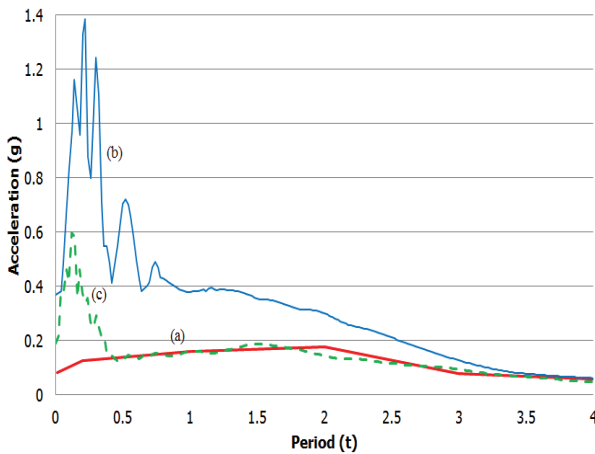
- (ก) คลื่น Loma prieta (P0736), 1989
- (ข) คลื่น Kobe (P1057), 1995
- (ค) คลื่น Northridge (P1005), 1994
- (ง) คลื่น Chi Chi (TCU068), 1999
- (จ) คลื่น Chi Chi (TCU072), 1999
- (ฉ) คลื่น Chi Chi (TCU074), 1999
- (ช) คลื่น Landers (P0864), 1992
- (ซ) คลื่น San Fernando (P0056), 1971
- (ฅ) คลื่น Northridge (P0936), 1994

เมื่อได้ทำการรวบรวมข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวทุกประเภทดังที่กล่าวในข้างต้นแล้ว จึงได้ทำการปรับค่า (matching) คลื่นแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Seismomatch [13] เพื่อจะทำการปรับค่าคลื่นที่ได้มา กับสเปกตรัมตอบสนองในโซนที่ 5 จาก มยผ. 1302 [14]

ให้ได้คลื่นที่ตรงกับความรุนแรงของประเทศไทย ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 คลื่น Loma prieta (P0736), 1989 ที่ทำการปรับค่า (matching) แล้ว



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองจากโปรแกรม Seismomatch (a) เส้นกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองในโซนที่ 5 จาก มยพ. 1302 [14] (b) เส้นกราฟจากคลื่นแผ่นดินไหวจริง (c) เส้นกราฟคลื่นแผ่นดินไหวที่ได้ทำการปรับค่า Matching กับเส้นกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองจาก มยพ. 1302 [14]

2.4 ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวที่กำหนดไว้กับโมเดลจำลอง

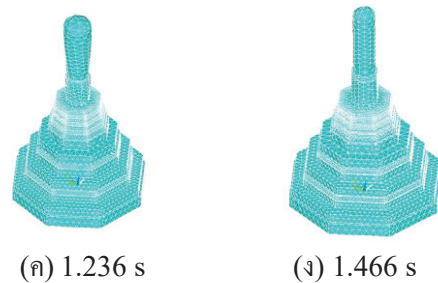
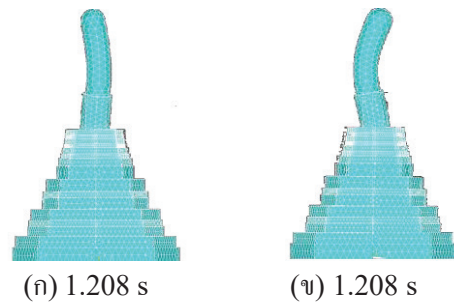
โดยจำลองแผ่นดินไหวในรูปของความเร่งในแนวราบที่ฐานขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับองค์พระปรางค์ จากนั้นจึงทำการสรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะจากผลวิเคราะห์ที่ได้

3. ผลการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาการตรวจสอบและประเมินพฤติกรรมของพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามสามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองของพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดพื้นฐานอยู่ที่ 1.208 s และมีรูปแบบการสั่นไหว (fundamental mode shape) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานทั้ง 5 รูปแบบแรก

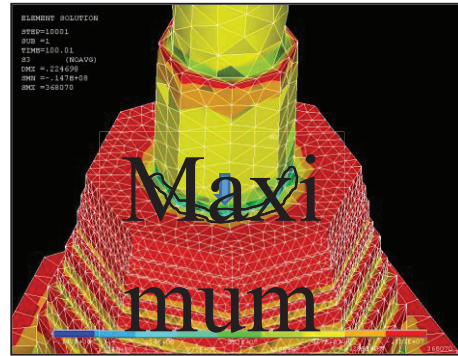
3.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างของพระปรางค์เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมขององค์พระปรางค์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 สรุปได้ว่า

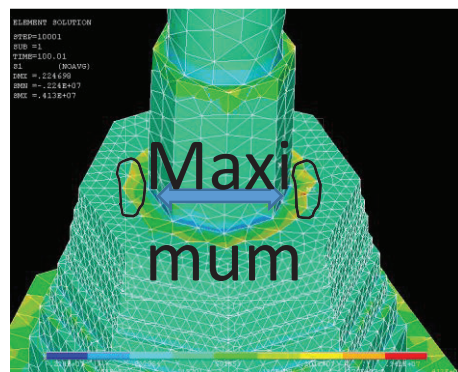
ตารางที่ 3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว

ชื่อคลื่นแผ่นดินไหว	แรงดึง (MPa)	แรงอัด (MPa)	การเคลื่อนตัว (m)
คลื่นกลุ่มที่ 1			
Loma prieta	3.86	13.00	0.215
Kobe	3.86	13.00	0.213
Northridge	3.73	13.90	0.214
คลื่นกลุ่มที่ 2			
Chi Chi 068	4.13	14.70	0.225
Chi Chi 072	4.11	14.30	0.220
Chi Chi 074	4.12	14.50	0.220
คลื่นกลุ่มที่ 3			
Landers	3.84	13.10	0.214
San Fernando	3.74	13.80	0.215
Northridge	3.85	13.10	0.212

จากตารางที่ 3 แผ่นดินไหวกลุ่มที่ 2 ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของยอดพระปรางค์ หน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึงมากที่สุด โดยค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายยอดประมาณ 22.5 เซนติเมตร หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างลานประทักษิณและซุ้มทิศ (รูปที่ 7) มีค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 14.7 MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงอัดที่รับได้ประมาณ 5 เท่า และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณ (รูปที่ 8) มีค่าเท่ากับ 4.13 MPa มากกว่าหน่วยแรงดึงที่รับได้ประมาณ 15 เท่า ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณนี้เป็นผลเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันส่งผลให้เกิดแรงกระทำที่บริเวณนี้มากที่สุด และผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในรูปที่ 6 (ก)



รูปที่ 7 หน่วยแรงอัดประธานสูงสุดที่เกิดขึ้นกับพระปรางค์ที่บริเวณรอยต่อระหว่างลานประทักษิณและซุ้มทิศ



รูปที่ 8 หน่วยแรงดึงประธานสูงสุดที่เกิดขึ้นกับพระปรางค์ที่บริเวณลานประทักษิณ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้เสนอผลการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในองค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักขององค์พระปรางค์ จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า

องค์พระปรางค์มีค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานจากการวิเคราะห์โม โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ที่ 1.208 s

คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ปลายยอดขององค์พระปรางค์มากที่สุดประมาณ 22.5 เซนติเมตร อีกทั้งยังทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดในองค์พระปรางค์

หน่วยแรงอัดสูงสุดจะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดที่รับได้ประมาณ 5 เท่า และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าหน่วยแรงดึงที่รับได้ประมาณ 15 เท่า

ตำแหน่งของหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณและซุ้มทิศ และหน่วยแรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณ ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกันและเกิดการเสียรูปมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (fundamental mode shape)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมา ควรมีการพิจารณาบูรณะหรือเสริมกำลังให้โครงสร้างในบริเวณซุ้มทิศและบริเวณลานประทักษิณให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุภวัฒน์ วิภาคสงเคราะห์. การประเมินการไหวสะเทือนจากแผ่นดินไหวของเจดีย์พระธาตุคอกยสุเทพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2554.
- [2] กนกวรรณ ขานะถนอม. พฤติกรรมเชิงสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ในเขตเมืองเชียงใหม่ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553.
- [3] ชนาฉัตร อภิชาติชะกุล. การวิเคราะห์และทวนสอบแบบจำลองของโบราณสถานอิฐก่อ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549.
- [4] วรศักดิ์ กนกกุลชัย. การวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ภูเขาทองเพื่อการบูรณะ. *โยธาสาร* 2540; 09(12).
- [5] สุดชาย พานสุวรรณ. การวิเคราะห์โบราณสถานการก่ออิฐเชิงวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ; 2543.
- [6] Kuhlmann,W. Historic Building under earthquake load, Institute of Structural Statics and Dynamics, Aachen University, 2003.
- [7] Capinerti, A., Invernizzi, S. and Lacidogna, G. In situ damage assessment and nonlinear modeling of a historical masonry tower. *Engineering Structures*, 2005; 27: 387-395.
- [8] Jaishi, B., Ren, W.X., Zong, Z.H. and Maskey, P.N. Dynamic and seismic performance of old multi-tiered temples in Nepal. *Engineering structures*, 2003; 25: 1827-1839.
- [9] Statistic Data. Meteorological Department, Ministry of Digital Economy and Society, Thailand, 2016, [online] available: <http://www.earthquake.tmd.go.th/home.php>
- [10] สุภวิทย์ พรเจริญโรจน์. ผลของความหนาของชั้นปูนต่อกำลังรับน้ำหนักของปรีซึมอิฐมอญ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [11] Statistic Data. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California and Berkeley, 2012, [online] available: <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- [12] Dabaghi, M. and Kiureghian, A.D. Stochastic Modeling and Simulation of Near-Fault Ground Motions for Performance-Based Earthquake Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2014.
- [13] SeismoMatch. Seismosoft (Ltd), 2012, [online] available: <http://www.seismosoft.com/home>
- [14] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ. 1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, กระทรวงมหาดไทย, 2552.