การประมาณค่าตัวแปรทางพลศาสตร์ของเจดีย์วัดอุโมงค์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับจากวิธีประวัติเวลา

Estimation of Dynamic Parameter of Umong Stupa Using Inverse Analysis Through Time History Method

ปิติ ประทุมขำ[1,*] ชินพัฒน์ บัวชาติ[2] ชยานนท์ หรรษภิญโญ[3] นเรเมต ตันติสุขุมาล[4] Mitsuhiro Miyamoto[5] Manabu Matsushima[6]

[1,2,3,4]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

[5,6]Faculty of Engineering, Kagawa University

**Corresponding author; E-mail address: piti_p@cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การประมาณค่าทางพลศาสตร์ขององค์เจดีย์วัดอุโมงค์ ดำเนินการวิจัยโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งตอบสนองขององค์เจดีย์ที่บริเวณยอด และฐานขององค์เจดีย์เพื่อวัดความเร่งตอบสนองขององค์เจดีย์ ทั้งทิศเหนือ-ใต้ และ ทิศตะวันออก-ตะวันตก หลังจากนั้นทำการประมาณความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์ในเบื้องต้นด้วยการวิเคราะห์ฟูเรียร์ และใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าทางพลศาสตร์ขององค์เจดีย์วัดอุโมงค์อันได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ และสัมประสิทธิ์ความหน่วงขององค์เจดีย์ จากการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์ฟูเรียร์ และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: องค์เจดีย์วัดอุโมงค์, วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ, ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง, ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง, วิธีของนิวมาร์ค

Abstract

This article presents estimation of dynamic parameters of Umong stupa by using inverse analysis through time history method. The accelerations response of Umong stupa was measured at base and top positions. The fundamental frequency of stupa was estimated via Fourier analysis of measured acceleration response. Then, accurate values of fundamental frequency and damping coefficient were computed from the inverse analysis technique through Newmark's time stepping method. The result shows very close value of fundamental frequency from Fourier analysis and inverse analysis technique.

Keywords: Umong stupa, Inverse analysis, fundamental frequency, damping coefficient, Newmark's method

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

เจดีย์ และโบราณสถานต่าง ๆ ในจังหวัดเชียงใหม่ส่วนมากใช้อิฐเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ปัจจุบันเจดีย์ที่เป็นโบราณสถานเก่าแก่หลายแห่งมีการเสื่อมสภาพลงมากจากสิ่งแวดล้อม ทำให้ความสามารถในการรับแรงลดน้อยลงมาก ทำให้หลายหน่วยงาน และประชาชนเกิดความวิตกกังวลถึงการเสื่อมสภาพของโบราณสถานหลายๆแหล่ง

แผ่นดินไหว คือธรณีพิบัติภัยชนิดหนึ่งที่ปลดปล่อยพลังงานเพื่อระบายความเครียดหรือความเค้นที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาอย่างฉับพลัน เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเจดีย์ และโบราณสถานต่าง ๆ และมีแนวโน้มว่าจะส่งผลกระทบได้รุนแรงกว่าสาเหตุอื่น ๆ หากเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด

งานวิจัยนี้สนใจทราบวิธีประเมินค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างของโบราณสถานด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Inverse analysis) และ วิธีฟูเรียร์ (Fourier analysis) เพื่อเป็นประโยชน์ในการต่อยอดศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโบราณสถานอื่น ๆ ต่อไป

โดยโบราณสถานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือ เจดีย์วัดอุโมงค์ ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ สร้างขึ้นในสมัยพระเจ้ามังรายเมื่อปี พ.ศ. 1839 และได้บูรณะเพิ่มเติมในสมัยพระเจ้ากือนา เจดีย์วัดอุโมงค์ตั้งอยู่บนเนินขนาดเล็กเป็นเจดีย์ทรงระฆังคว่ำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานวัดได้ 16.48 เมตร. และมีความสูง 25.72 เมตร มีปริมาตรรวมโดยประมาณ 1,267.7 ลูกบาศก์เมตร (โดยสมมุติว่าองค์พระธาตุเป็นทรงตัน) เป็นเจดีย์ที่ได้รับอิทธิพลจากศิลปะพม่าและพัฒนาจนเป็นแบบพื้นเมือง [1]

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติ ที่มักเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด หรือเกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกเคลื่อนตัวเข้าปะทะกันหรือเคลื่อนตัวออกจากกันอย่างฉับพลัน คลื่นแผ่นดินไหวจะเคลื่อนตัวจากจุดจุดหนึ่งใต้พื้นโลก นักธรณีจะเรียกจุด

ดังกล่าวว่าจุดโฟกัสหรือจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่แท้จริง (Hypocenter) มักเกิดบริเวณขอบของแผ่นเปลือกโลกที่เป็นแนวของแผ่นดินไหวเดิม หรือที่เรียกว่ารอยเลื่อนของแผ่นดินไหว การเคลื่อนที่เนื่องจากชั้นหินหลอมละลาย (Mantle) ที่อยู่ภายใต้เปลือกโลกได้รับพลังงานจากความร้อนที่อยู่ใต้พิภพทำให้แผ่นเปลือกโลกเกิดการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลา เมื่อบริเวณของขอบชิ้นเปลือกโลกอยู่ในบริเวณใด จนมีรอยร้าวของหินใต้เปลือกโลก (Fault) บริเวณนั้นก็จะเกิดความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหว ทั้งนี้แผ่นดินไหวยังสามารถเกิดจากฝีมือของมนุษย์ได้ด้วย เช่นการทำระเบิด การสร้างเขื่อน การจราจร หรือการทำเหมือง ประเทศที่มีความเสี่ยงเกิดแผ่นดินไหวค่อนข้างสูง ได้แก่ ประเทศฟิลิปปินส์ ชิลี สหรัฐอเมริกา [2]

จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter) เป็นจุดบนพื้นผิวโลกที่อยู่เหนือจุดโฟกัสหรือจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่แท้จริง (Hypocenter) ที่ปล่อยคลื่นแผ่นดินไหว (Seismic waves) ออกมา ที่อยู่ลึกลงไป 15 - 400 เมตร โดยทั่วไปความลึกจากจุดกำเนิดถึงผิวดิน หากความลึกน้อยกว่า 70 กิโลเมตร ถือเป็นแผ่นดินไหวแบบตื้น (Shallow earthquakes) อาจเกิดขึ้นระหว่างการชนกันของแผ่นเปลือกโลก หรือเรียกอีกอย่างว่า Interplate earthquake ซึ่งมีความรุนแรงและมีโอกาสอาจเกิดสึนามิสูง หากมีความลึกไม่เกิน 300 กิโลเมตร เป็นแบบกลางหรือเรียกอีกอย่างว่าแผ่นดินไหวภายในแผ่นเปลือกโลก และหากมีความลึกมากกว่า 300 กิโลเมตรขึ้นไปจะเป็นแผ่นดินไหวแบบลึก (Deep earthquake) หรือแผ่นดินไหวในชั้นเนื้อโลก (Intraslab earthquake) โดยทั่วไป การวัดค่าขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude) เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่แผ่นเปลือกโลกปล่อยออกมา ในรูปการสั่นสะเทือนคำนวณได้จากการตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวัด เป็นปริมาณบ่งชี้ขนาด ณ บริเวณจุดศูนย์กลางขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีด้วยกันในปัจจุบัน มีหลากหลายขนาด เช่น มาตราท้องถิ่น (Local magnitude) ขนาดของคลื่นหลัก (Body-wave magnitude) มาตราคลื่นผิว (Surface magnitude) และมาตราขนาดโมเมนต์ (Moment magnitude) เป็นต้น [3]

2.2 การวัดความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว

ในงานวิจัยนี้การวัดความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว ผู้วิจัยได้ทำการวัดอัตราเร่งที่กระทำต่อตัวโครงสร้างเจดีย์ทั้งบริเวณที่ฐาน (Ch2) บริเวณยอด (Ch3) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยผ่านอุปกรณ์วัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ที่ติดอยู่ในจุดต่างๆ ของเจดีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเจดีย์วัดอุโมงค์กำหนดให้เป็นการประเมินโครงสร้างแบบ ระบบที่มีอิสระเดียว (Single degree of freedom) จากนั้นจึงนำอัตราเร่งทั้งสองค่ามาคำนวณผลต่างซึ่งให้ได้อัตราเร่งของยอดเทียบกับฐาน แล้วจึงทำการประเมินการสั่นของโครงสร้างด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีนิวมาร์คแบบอัตราเร่งเฉลี่ย (Average acceleration by Newmark's method) ในการประเมินอัตราเร่งของเจดีย์เทียบกับฐานนั้น คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิจัยนี้คือแผ่นดินไหวในสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์ ขนาด 5.9 ริกเตอร์ วันที่ 12 มกราคม 2561 เวลา 01:26 น. [4]



รูปที่ 1 เจดีย์วัดอุโมงค์ (สวนพุทธธรรม) จังหวัดเชียงใหม่ [1]



รูปที่ 2 อุปกรณ์วัดอัตราเร่ง (Accelerometer) Seismic Acceleration Sensor ด้วยระบบ ITK [5]

2.3 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

การสั่นขององค์เจดีย์สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$m\ddot{u} \quad c\dot{u} \quad ku \quad p\ t \tag{1}$$

โดยที่ $p\ t$ $m\ddot{u}_g$ เมื่อ $\ddot{u}_g$ คืออัตราเร่งของแผ่นดินไหว (ดังแสดงในรูปที่ 3) เมื่อนำมวล m มาหารตลอดทั้งสมการที่ (1) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\ddot{u} \quad 2 \quad _n \dot{u} \quad \frac{2}{n}u \quad \ddot{u}_g \tag{2}$$

โดยที่ $\ddot{u}$ หมายถึงอัตราเร่งสัมพัทธ์ของบริเวณยอดองค์เจดีย์เทียบกับฐาน $_n$ หมายถึงความเร็วเชิงมุมธรรมชาติของโครงสร้าง หมายถึงอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง $\dot{u}$ หมายถึงอัตราเร็วสัมพัทธ์ และ u หมายถึงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของบริเวณยอดองค์เจดีย์เทียบกับฐาน

รูปที่ 3 ระบบที่มีอิสระเดียว (Single degree of freedom) ซึ่งมีการสั่นเนื่องจากแผ่นดินไหว [6]

ซึ่งแบบจำลองระบบที่มีอิสระเดียวจะถูกนำไปใช้ในการประเมินตัวแปรทางพลศาสตร์ของโครงสร้างขององค์เจดีย์ต่อไป

3. การวิเคราะห์และการคำนวณตัวแปรทางพลศาสตร์

3.1 วิธีประวัติเวลาของนิวมาร์ค (Newmark's time stepping method)

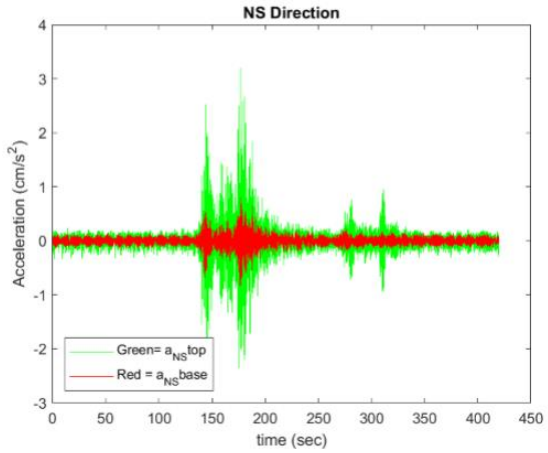
วิธีประวัติเวลาของนิวมาร์ค (Newmark's time stepping method) คือวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสอง (Second-order differential equation) [6] โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนรูปเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เป็นวิธีที่ใช้ในระบบการตอบสนองแบบพลศาสตร์ โดยมีการประมาณของค่าการเคลื่อนที่ และอัตราเร่งในเวลาปัจจุบัน $i \quad 1$ จากค่าการเคลื่อนที่ ความเร็ว และอัตราเร่งในอดีต i ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4)

$$\dot{u}_{i\ 1} \quad \dot{u}_i \quad [(1 \quad) \ t]\ddot{u}_i \quad (\quad t)\ddot{u}_{i\ 1} \tag{3}$$

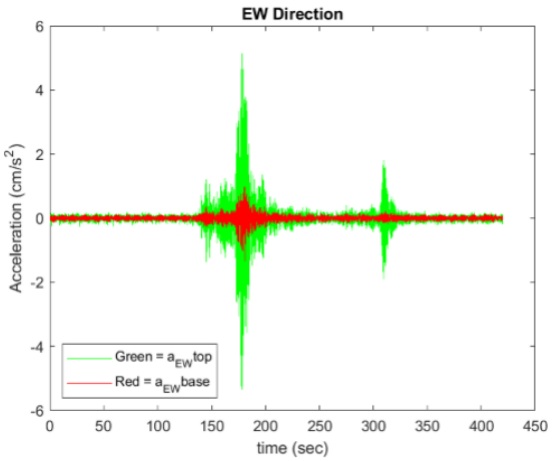
$$u_{i\ 1} \quad u_i \quad (\ t)\dot{u}_i \quad [(0.5 \quad)(\ t)^2]\ddot{u}_i \quad [\quad (\ t)^2]\ddot{u}_{i\ 1} \tag{4}$$

โดย $\dot{u}_{i\ 1}$ คืออัตราเร็วในเวลาปัจจุบัน $\dot{u}_i$ คืออัตราเร็วในอดีต t คือความแตกต่างของช่องเวลา u_i คือการเคลื่อนที่ในอดีต และ $u_{i\ 1}$ คือการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน กำหนดให้ γ และ β เป็นค่าคงที่ โดย $1/2$ และ งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า $1/4$ (Average acceleration) ซึ่งไม่มีข้อจำกัด ในส่วนของ อจำกัดป ดย

ความเสียหายในสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา โดยข้อมูลอัตราเร่งบริเวณส่วนต่างๆ ขององค์เจดีย์วัดอุโมงค์ที่ได้จากเครื่องวัดอัตราเร่ง ในแนวทิศเหนือ-ใต้ (NS) และทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) แสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ข้อมูลอัตราเร่งบริเวณฐานและบริเวณยอดของเจดีย์เนื่องจากแผ่นดินไหวในทิศเหนือ-ใต้ (NS)

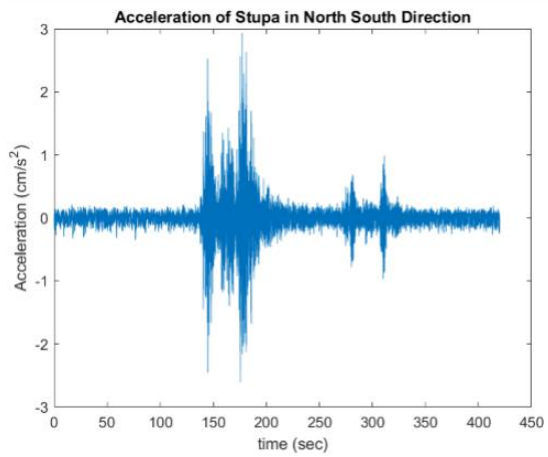


รูปที่ 6 ข้อมูลอัตราเร่งบริเวณฐานและบริเวณยอดของเจดีย์เนื่องจากแผ่นดินไหวในทิศ ตะวันออก-ตะวันตก (EW)

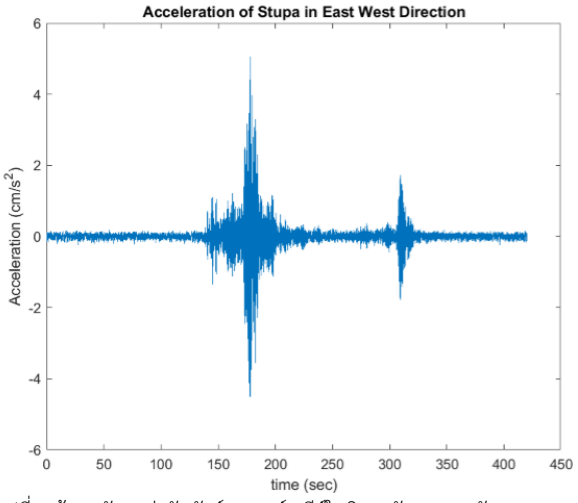
3.3 การวิเคราะห์ฟูเรียร์

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนใด ๆ มักอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์สัญญาณพื้นฐานที่นิยมใช้กันมาก ก็คือการวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier analysis) [7] เมื่อความถี่ใดมีค่าสูงผิดปกติก็จะอาจจะนำมาใช้เป็น ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในเบื้องต้น

การวิเคราะห์ฟูเรียร์เริ่มต้นจากนำข้อมูลในรูปที่ 5 และ 6 มาคำนวณผลต่างของความเร่งระหว่างยอดเจดีย์กับฐานเจดีย์ในทิศเหนือ-ใต้ (Top-base, NS) และทิศตะวันออก-ตะวันตก (Top-base, EW) ซึ่งความต่างของอัตราเร่งดังกล่าว แสดง ในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

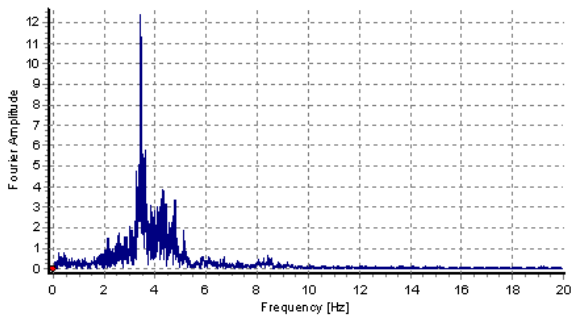


รูปที่ 7 ข้อมูลอัตราเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ในทิศเหนือ-ใต้ (Top-base, NS)



รูปที่ 8 ข้อมูลอัตราเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (Top-base, EW)

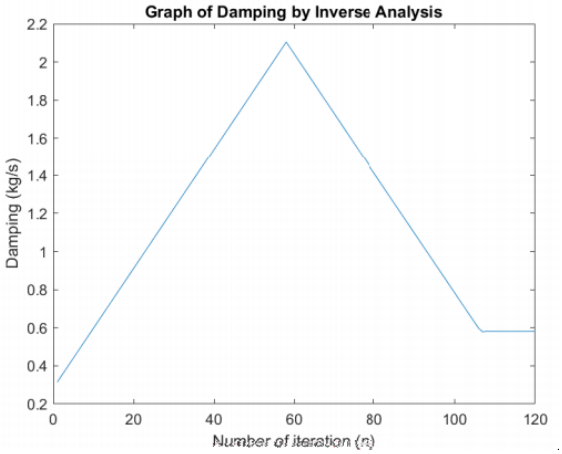
จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลความเร่งจากรูปที่ 7 และ 8 ด้วยวิธีฟูเรียร์โดยโปรแกรมสำเร็จรูป [8] ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ฟูเรียร์จะเป็นข้อมูลในช่วงเวลาที่ 130 ถึง 250 วินาที เนื่องจากมีค่าอัตราเร่งสูงกว่าช่วงเวลาอื่น จากรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติขององค์เจดีย์จะมีค่าประมาณเท่ากับ 3.44 Hz ในทิศเหนือ-ใต้ (NS) และ 3.52 Hz ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) ตามลำดับ



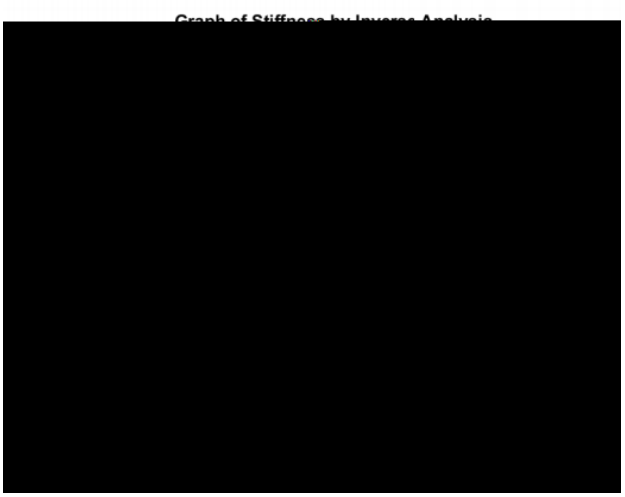
รูปที่ 9 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของความเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ในทิศเหนือ-ใต้ (NS)

รูปที่ 10 การวิเคราะห์ฟูเรียร์ของความเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)

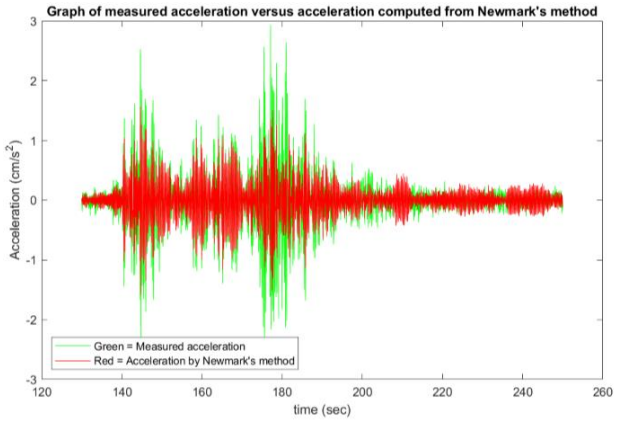
3.4 การวิเครา ศ



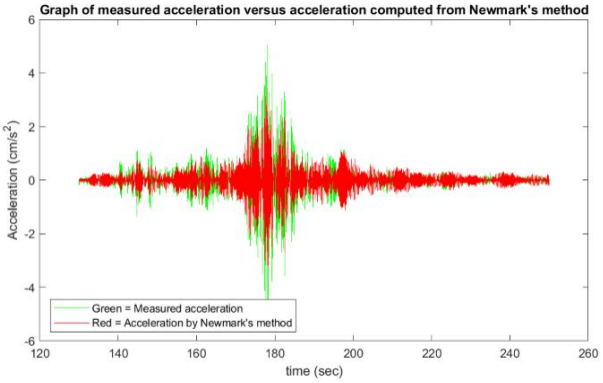
รูปที่ 13 กราฟการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจากการคำนวณโดยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)



รูปที่ 14 กราฟการลู่เข้าของค่าความแข็งของเจดีย์จากการคำนวณโดยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)



รูปที่ 15 อัตราเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ที่วัดได้ เทียบกับจากการคำนวณวิธีประวัติเวลาของนิวมาร์ค ในทิศเหนือ-ใต้ (NS)



รูปที่ 16 อัตราเร่งสัมพัทธ์ขององค์เจดีย์ที่วัดได้เทียบกับจากการคำนวณวิธีประวัติเวลาของนิวมาร์ค ในตะวันออก-ตะวันตก (EW)

4. บทสรุป

ผู้วิจัยได้ทราบค่าประมาณคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของเจดีย์วัดอุโมงค์ (สวนพุทธธรรม) จังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้อิทธิพลของอัตราเร่งของแผ่นดินไหว ที่เกิดขึ้นในสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์ ขนาด 5.9 ริกเตอร์ ณ วันที่ 12 มกราคม 2561 เวลา 01:26 น. โดยพบว่า

1. ความถี่ธรรมชาติโดยประมาณของเจดีย์โดยการวิเคราะห์อัตราเร่งของการสั่นที่เกิดขึ้นองค์เจดีย์ด้วยวิธีฟูเรียร์เท่ากับ 3.44 Hz ในทิศเหนือ-ใต้ (NS) และความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 3.52 Hz ในทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW)

2. ความถี่ธรรมชาติโดยประมาณของเจดีย์ด้วยวิธีวิเคราะห์ย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 3.50 Hz ทั้งในแนวทิศเหนือ-ใต้ (NS) และเท่ากับ 3.56 Hz แนวทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) ซึ่งสามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนเทียบกับความถี่ธรรมชาติที่ประเมินด้วยวิธีฟูเรียร์มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 1.74 ในทิศเหนือใต้ และร้อยละ 1.13 ในทิศตะวันออกตะวันตก

3. จากวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับทราบค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c) เท่ากับ 0.715 และ 0.5813 kg/sec ค่าความแข็งของเจดีย์ (k) ได้เท่ากับ 484.70 และ 500.2 N/cm ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนความหน่วง ( ) ได้เท่ากับ 0.0162 และ 0.0130 ในทิศทางเหนือใต้ (NS) และตะวันออกตะวันตก (EW) ตามลำดับ

ดังนั้นจึงพบว่าการประมาณตัวแปรทางพลศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ ดังที่เสนอมานี้ มีความถูกต้องแม่นยำในระดับที่เชื่อถือได้ ข้อมูลตัวแปรทางพลศาสตร์ของตัวเจดีย์วัดอุโมงค์(สวนพุทธธรรม) ในทิศทาง-เหนือใต้ (NS) และทิศทางตะวัน-ออกตะวันตก (EW) มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากรูปทรงของเจดีย์วัดอุโมงค์แบบระฆังคว่ำนั้นเป็นโครงสร้างที่สมมาตร

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากสำนักศิลปากรที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ และวัดอุโมงค์ (สวนพุทธธรรม) และได้รับทุนสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

[1] Buachart, C., Hansapinyo, C., and Pratomkhum P. (2019). Dynamic Monitoring of Wat-Umong Stupa Under Natural Vibration. *The 24th National Convention on Civil Engineering (NCCE24)*, Udonthani, Thailand, 10-12 July 2019, pp.1-3.

[2] พิธาน ไพโรจน์. (2553). *การลดทอนคลื่นของแผ่นดินไหวระยะไกลในประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 5-11.

[3] ณัฐวัฒน์ วัดวิเศษ. (2560). *กลไกการเกิดแผ่นดินไหวตามเขตมุดตัวของเปลือกโลก หมู่เกาะฟิลิปปินส์*. การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[4] สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว. (2561). *รายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง เดือนมกราคม พ.ศ. 2561*. กรมอุตุนิยมวิทยา, หน้า 13.

[5] aLab Incorporated. (2015). *Seismic Acceleration Sensor ITK System for Structural Health Monitoring*. Tokyo, pp. 1-4.

[6] Chopra, Anil K. (2012). *Dynamics of Structures*. Prentice-Hall, pp. 165-199.

[7] Miyamoto M. and T. Hanazato, T. (2015), Vibration Characteristics of Historical Masonry Buildings Based on Seismic Observation, *The 2nd International Conference on Preservation Maintenance and Rehabilitation of Historic Buildings and Structures*, Porto, Portugal, 22-24 July 2015, pp. 789–797.

[8] SeismoSoft Ltd. (2018). *Earthquake Software for Signal Processing of Strong-Motion data*. Retrieved 25 February 2019 from https://seismosoft.com/products/seismosignal

[9] Matsushima, M. and Matsui, K. (1991). Investigation on Dynamic Characteristics of Existing Circuit Breaker by Structural Identification Method. *The 9th Int. Conf. on Computing in Engineering Science*, Patras, Greece, 20-25 April 1991, pp. 3-5.