

การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร ต่อโครงสร้างโบราณสถาน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา Assessment of Traffic-Induced Vibration Effects on Historical Structures in Ayutthaya

วีระ ชูปทอง และนคร ภู่วโรดม*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Weera Choopthong and Nakhorn Poovarodom*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,
Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการตรวจวัดและศึกษาผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรที่อาจมีผลกระทบต่อความมั่นคงของโบราณสถานจากการสำรวจภาคสนาม โดยศึกษาการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนที่แพร่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นที่ต่าง ๆ ที่มีสมบัติของชั้นดินที่แตกต่างกัน ซึ่งหาค่าอัตราส่วนของขนาดคลื่นที่วัดได้ระหว่างหัววัดและพิจารณาพร้อมกับระยะห่างของหัววัด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนการลดทอนของคลื่นมีความสัมพันธ์กับสมบัติของดินในรูปค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยเฉลี่ยของชั้นดิน ซึ่งการลดทอนของคลื่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีอัตราสูงกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาในพื้นที่ศึกษาอื่นเนื่องจากชั้นดินที่แข็งกว่า และพบว่าค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาภายใต้สภาพที่รุนแรงกว่าสภาพที่เกิดกับโบราณสถาน ยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่แนะนำในมาตรฐานด้านผลกระทบจากการสั่นสะเทือนและงานวิจัยในอดีต

คำสำคัญ : การสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร; การตรวจวัดการสั่นสะเทือน; การลดทอนของการสั่นสะเทือน; โบราณสถาน; พระนครศรีอยุธยา

Abstract

This study investigates effects of traffic-induced vibration on historic structures by field measurements. Attenuation rates of ground acceleration propagated from its source at different locations having different geotechnical properties were determined from vibration measurement. The attenuation rate was considered as a ratio of the amplitudes between two sensors and the distance between them. The results of the attenuation rate were dependent on soil property in

term of an average shear wave velocity. The attenuation rate in Phra Nakhon Sri Ayutthaya was higher than in other studied area due to stiffer soils underneath. The highest vibration velocity found in Phra Nakhon Sri Ayutthaya, under more extreme condition than the condition at historic sites, was lower than the recommendation provided in an international standard of vibration effect on structure and past researches.

Keywords: traffic induced vibration; vibration measurement; attenuation of vibration; historic structure; Ayutthaya

1. บทนำ

ประเทศไทยมีโบราณสถานที่สำคัญที่มีความงดงามและทรงคุณค่าทางประวัติศาสตร์มากมาย ตัวอย่างที่สำคัญแห่งหนึ่ง คือ อุทยานประวัติศาสตร์จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ได้รับการพิจารณาจากองค์การยูเนสโกที่ยกย่องให้เป็นมรดกโลก โบราณสถานในเกาะเมืองอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาจำนวนมากในปัจจุบันกำลังได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ รวมถึงผลจากการขยายตัวของเศรษฐกิจและชุมชน ซึ่งหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลกระทบและเพิ่มระดับความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง คือ การสั่นสะเทือนที่เป็นผลมาจากการจราจรในชุมชนเมืองและโดยรอบโบราณสถาน ซึ่งถึงแม้ปัจจัยนี้ได้ถูกพิจารณาว่าอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถาน แต่ยังมีได้รับการศึกษาอย่างเพียงพอที่จะใช้ในการตัดสินใจและการวางแผนจัดการการป้องกันผลกระทบ เพื่อการดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างโบราณสถานให้มีความมั่นคงแข็งแรงสืบต่อไป

การสั่นสะเทือนเกิดจากการที่ยานพาหนะเคลื่อนผ่านผิวถนนที่มีความขรุขระแล้วก่อให้เกิดแรงกระทำที่เป็นแบบแรงพลวัต (dynamic force) ซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นการสั่นสะเทือนที่สามารถแพร่ออกจากแหล่งกำเนิด เดินทางผ่านตัวกลาง คือ ดินที่มีสมบัติต่าง ๆ จนถึงฐานรากของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างที่ตั้งอยู่เกิดการสั่นไหว การสั่นสะเทือนที่รุนแรงส่วนมาก

มีปัจจัยมาจากยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่ และดินเป็นดินอ่อนที่มีการส่งผ่านคลื่นการสั่นสะเทือนได้ดี นอกจากนี้ความขรุขระของพื้นผิวทำให้เกิดแรงกระทำแบบพลวัต หากความขรุขระของผิวนอนมีลักษณะเป็นคลื่น เมื่อยานพาหนะวิ่งผ่านด้วยความเร็วหนึ่ง อาจทำให้เกิดการกระแทกจากยานพาหนะเป็นจังหวะหรือมีความถี่ ซึ่งหากมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของดินจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงเนื่องจากการสั่นพ้อง (resonance) ระดับการสั่นสะเทือนอาจรุนแรงยิ่งขึ้นหากความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ทำให้เกิดการสั่นพ้องกับโครงสร้างอีกครั้ง

การศึกษาผลกระทบจากการจราจรสามารถทำได้โดยการตั้งเครื่องมือบันทึกการสั่นสะเทือนไว้ที่บริเวณจุดใกล้เคียงกับโครงสร้างที่สนใจศึกษา และนำมาประมวลผลเป็น ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และองค์ประกอบความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน และนำไปประเมินผลกระทบโดยการเปรียบเทียบกับข้อแนะนำระดับการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ที่ใช้เป็นสากล งานวิจัยนี้เป็น การดำเนินการเพื่อศึกษาปัญหาของการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรที่อาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างโบราณสถาน โดยศึกษาลักษณะของคลื่นการสั่นสะเทือน การแพร่หรือการลดทอนของคลื่นสั่นสะเทือน และประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนบนพื้นดินใกล้กับ

แหล่งกระตุ้นจากการจราจร โดยมุ่งศึกษากับพื้นที่หลัก ในอำเภอเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อให้มีข้อมูลด้านผลที่อาจเกิดขึ้นต่อความมั่นคงของโบราณสถาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับการสั่นสะเทือนที่พื้นดินเนื่องจากการจราจร ในบริเวณใกล้เคียงกับโบราณสถาน อุทยานประวัติศาสตร์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และศึกษาสัมบัติของดินในด้านการแพร่ของคลื่นการสั่นสะเทือน ด้วยการตรวจวัดจริงเพื่อประเมินระดับความรุนแรงของปัญหาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรต่อความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถานเหล่านั้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาในวิจัยนี้ คือ อำเภอเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในบริเวณใกล้กับโบราณสถานที่สำคัญ และใกล้แหล่งที่มีการจราจร

หนาแน่น และรวมถึงศึกษาในพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลบางส่วน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะการแพร่ของคลื่นที่บริเวณที่ชั้นดินมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน โดยตำแหน่งที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย บริเวณถนนหลัก ในอำเภอเมือง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่มีการจราจรหนาแน่น คือ สี่แยกวัดพระญาติ และวงเวียนเจดีย์วัดสามปลื้ม และบริเวณใกล้โบราณสถานใกล้ถนน คือ หน้าวัดมหาธาตุ ถนนป่าไท และเจดีย์สุริโยทัย ถนนอุทอง รวมทั้งมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อศึกษาอิทธิพลของชั้นดินต่อการลดทอนคลื่นการสั่นสะเทือนสำหรับพื้นที่ในจังหวัดปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ ในบริเวณที่มีการสัญจรของรถจำนวนมาก และมีการสั่นสะเทือนที่รุนแรงชัดเจนด้วย โดยแหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน คือ จากการจราจร ยกเว้นที่ตำแหน่ง PT02 เป็นผลสำรวจจากการตอกเสาเข็มของการก่อสร้างอาคาร

ตารางที่ 1 ตำแหน่งที่ตรวจวัดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร

| Station | Location | Coordinates |
|---------|---|-----------------------|
| AY01 | สี่แยกวัดพระญาติ ถนนโรจนะ พระนครศรีอยุธยา | 14.353369, 100.599514 |
| AY02 | วงเวียนเจดีย์วัดสามปลื้ม ถนนโรจนะ พระนครศรีอยุธยา | 14.353724, 100.591537 |
| AY03 | หน้าวัดมหาธาตุ ถนนป่าไท พระนครศรีอยุธยา | 14.355451, 100.568519 |
| AY04 | เจดีย์สุริโยทัย ถนนอุทอง พระนครศรีอยุธยา | 14.352411, 100.547237 |
| PT01 | หลัง มธ.รังสิต ถนนคลองหลวง ปทุมธานี | 14.066316, 100.574969 |
| PT02 | สถานที่ก่อสร้าง อาคาร SC 2 มธ.รังสิต ปทุมธานี | 14.070794, 100.606091 |
| PT03 | สถานีบริการ NGV มธ.รังสิต ถนนคลองหลวง ปทุมธานี | 14.065889, 100.599094 |
| BK01 | ถนนพุทธมณฑลสาย 1 เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร | 13.787286, 100.426047 |
| SK01 | ถนนเทพารักษ์ สมุทรปราการ | 13.583670, 100.787406 |

สมบัติของชั้นดินในตำแหน่งที่ศึกษาต่าง ๆ ได้ศึกษาด้วยเทคนิคการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนพื้นดิน (microtremor test) และวิเคราะห์ผลด้วยวิธี

spatial autocorrelation (SPAC) [1] ซึ่งเป็นการหาค่าความเร็วเฟส (phase velocity) ของคลื่นผิวดินในช่วงความถี่ที่ต่างกันบนพื้นฐานความสัมพันธ์

ระหว่างสเปกตรัมเชิงพื้นที่และเวลา โดยการตรวจวัดองค์ประกอบในแนวตั้งของคลื่นผิวดินหลายจุดพร้อมกันในรูปแบบ array และคลื่นผิวดินที่ได้ คือ โหมดพื้นฐานของคลื่นเรย์เลห์ เมื่อประเมินค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์เชิงสเปกตรัม ระหว่างคลื่นที่จุดศูนย์กลางและที่จุดใด ๆ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ spatial autocorrelation ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ ระยะทาง สำหรับคูการตรวจวัดที่ระยะใด ๆ เมื่อนำค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ spatial coefficient ซึ่งแสดงถึงค่าพลังงานที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นผ่านตัวกลาง สำหรับความเร็วเฟสของคลื่น (phase velocity) ที่ระยะหนึ่ง ๆ ซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์กับ

ความถี่ของคลื่นในรูปของ dispersion curve ซึ่งใช้ในการคำนวณเป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยจากพื้นถึงชั้นดินลึก 30 เมตร (Vs30) ได้ต่อไป ซึ่งในการศึกษานี้ใช้วิธีการประเมินค่า Vs30 จากค่าความเร็วเฟสที่ความยาวคลื่น 40 เมตร [2]

ตารางที่ 2 แสดงค่า Vs30 ของพื้นที่ตัวอย่าง ผลการศึกษาแสดงว่าชั้นดินของพื้นที่ศึกษาในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีค่า Vs30 ประมาณ 220-230 m/s หมายถึงชั้นดินมีความแข็งกว่าชั้นดินของพื้นที่ศึกษาในจังหวัด ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยจากพื้นถึงชั้นดินลึก 30 เมตร (Vs30)

| Site | Vs30 (m/s) |
|--|------------|
| วัดมหาธาตุ พระนครศรีอยุธยา (AY03) | 215 |
| สวนศรีสุริโยทัย พระนครศรีอยุธยา (AY04) | 233 |
| วัดไชยวัฒนาราม พระนครศรีอยุธยา | 217 |
| ถนนคลองหลวง-เชียงราก ปทุมธานี (PT01) | 176 |
| ถนนพุทธมณฑลสาย 1 ตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร (BK01) | 139 |
| ถนนเทพารักษ์ สมุทรปราการ (SK01) | 91 |

2.2 เครื่องมือการตรวจวัดการสั่นสะเทือน

เครื่องมือสำหรับวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัววัดความเร็วแบบ 3 ทิศทาง (X, Y, Z) จำนวน 4 ชุด และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลการตรวจวัดและคอมพิวเตอร์ โดยที่หัววัดความเร็วทำหน้าที่ตรวจจับผลการสั่นสะเทือนในรูปของความเร็ว ณ ตำแหน่งที่ตั้งหัววัด โดยสร้างเป็นสัญญาณแบบ analog และส่งผ่านอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเพื่อแปลงสัญญาณแบบ analog เป็นสัญญาณแบบ digital และบันทึกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดลงในส่วนบันทึกความจำของคอมพิวเตอร์ เครื่องมือ

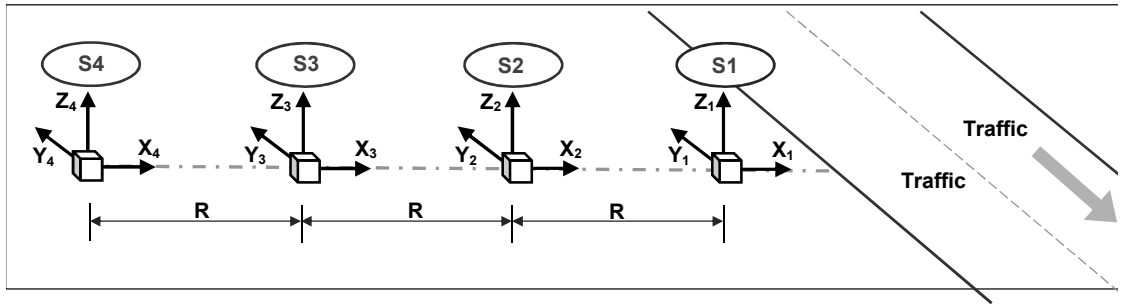
สามารถตรวจวัดความถี่ในช่วงตั้งแต่ 0.1-50 Hz เครื่องมือวัดมี resolution ของการแปลงสัญญาณ 24 bits ข้อมูลเก็บที่ความถี่ (sampling rate) ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 1,000 Hz (การเก็บข้อมูล 1,000 จุดต่อวินาที) ค่าหน่วยการวัดของเครื่องมือคือ micro-m/s และค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดที่สามารถวัดได้ (Gain=0 dB) เท่ากับ ± 2.5 cm/s

2.3 การสำรวจภาคสนาม

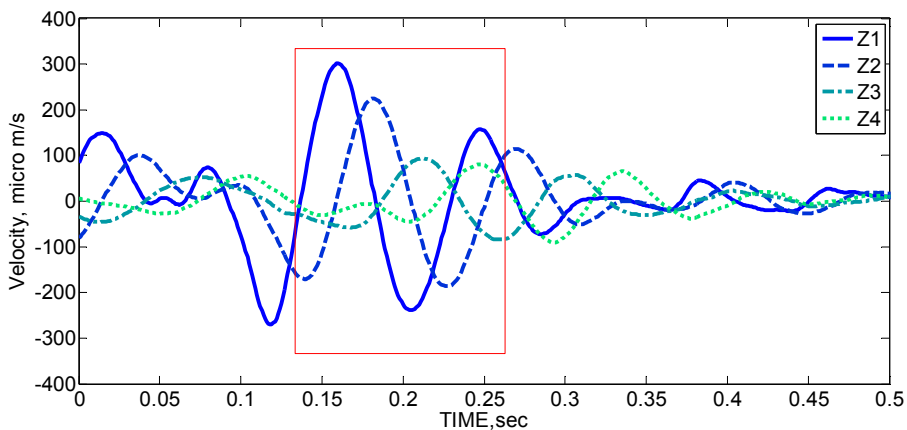
การตรวจวัดการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องมือข้างต้น หัววัดที่ซื้อมีทั้งสิ้น 4 หัว ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ทั้ง 3 แกน แต่เนื่องจากช่องรับสัญญาณของอุปกรณ์

บันทึกข้อมูลมีจำนวน 8 ช่อง จึงจำเป็นต้องเลือกเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนเพียง 2 แกนต่อหัววัด การจัดเรียงหัววัดทั้ง 4 แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2 โดยเรียงหัววัดเป็นแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแนวของถนน เรียงให้แต่ละหัววัดมีระยะห่างเท่ากัน (R) และกำหนดชื่อ

แกน X คือ แนวตั้งฉากกับถนน แกน Y คือ แนวขนานกับถนน และแกน Z คือ แนวตั้ง โดยการทดสอบเบื้องต้นพบว่าการสั่นสะเทือนหลักเกิดขึ้นในแนว Z จึงบันทึกเฉพาะแนว X และ Z สำหรับแต่ละหัววัด



รูปที่ 2 การวางหัววัดและแกนอ้างอิง



รูปที่ 3 ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนในแนวตั้งสำหรับการวิเคราะห์การลดทอนของคลื่น

ตัวอย่างของข้อมูลการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของหัววัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถสังเกตได้ถึงการลดทอนของคลื่นที่หัววัดต่าง ๆ จากหัววัดที่ 1 (Z1) ที่วางใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นการสั่นสะเทือน ถึงหัววัดที่ 4 (Z4) ที่อยู่ไกลที่สุดจากแหล่งกำเนิด โดยอัตราส่วนของค่าสูงสุดในแต่ละลูกคลื่น ได้แก่ การลดทอนจากหัวที่ 1 ไปหัวที่ 2 ($V2/V1$) และระหว่างแต่ละหัววัดต่าง ๆ คือ $V3/V1$, $V4/V1$,

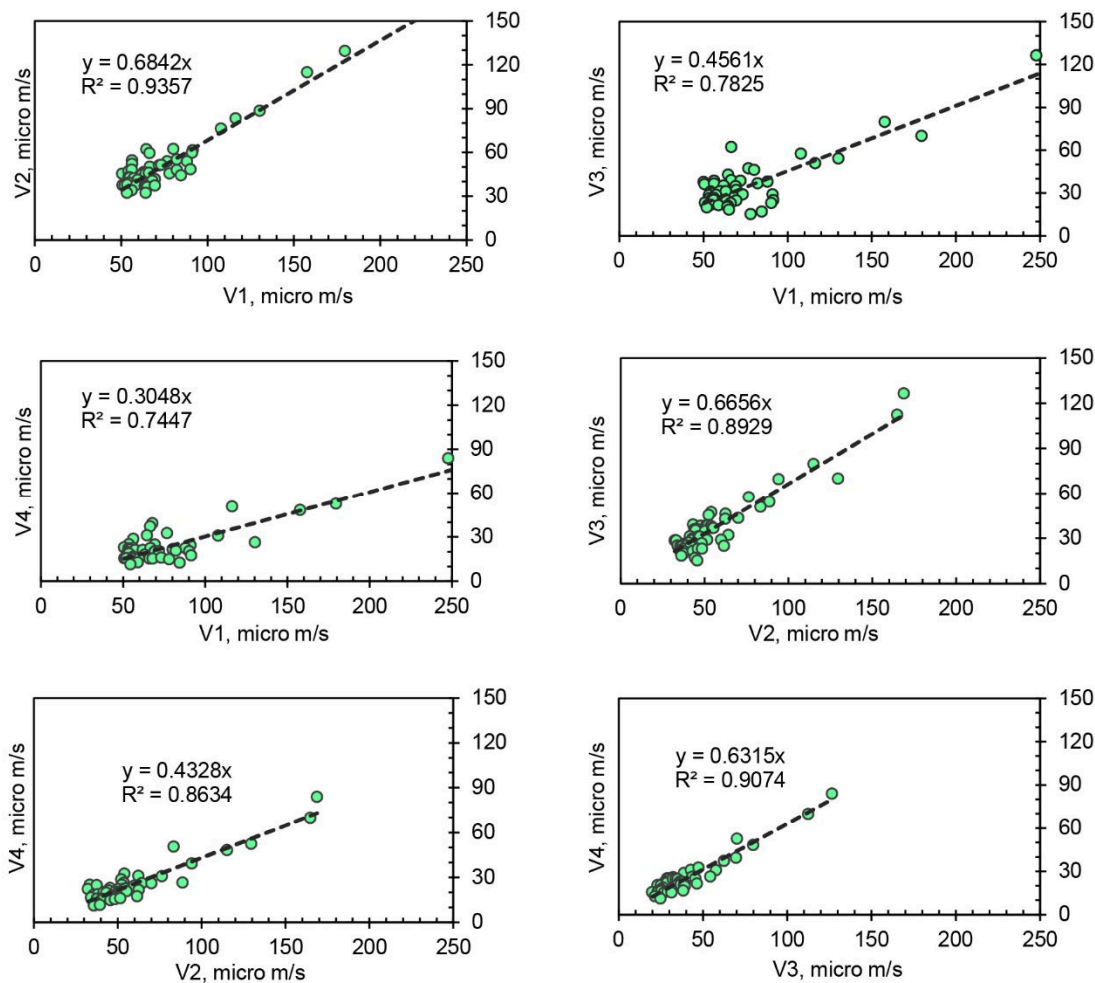
$V3/V2$, $V4/V2$ และ $V4/V3$ จะนำมาใช้ศึกษาอัตราการลดทอนตามระยะทางที่วัดออกจากแหล่งกำเนิดต่อไป

3. ผลการศึกษา

ความสัมพันธ์ของข้อมูลคลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรแสดงเป็นกราฟ โดยแกนนอนเป็นค่าแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้จากหัววัดที่ใกล้แหล่งกำเนิด

คลื่น และแกนตั้งแสดงเป็นค่าแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้จากหัววัดที่วางไกลออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่น ตัวอย่างของความสัมพันธ์ที่ได้จากการตรวจวัดจากวัด

มหาธาตุ แสดงในรูปที่ 4 สำหรับค่า V2/V1, V3/V1, V4/V1, V3/V2, V4/V2 และ V4/V3



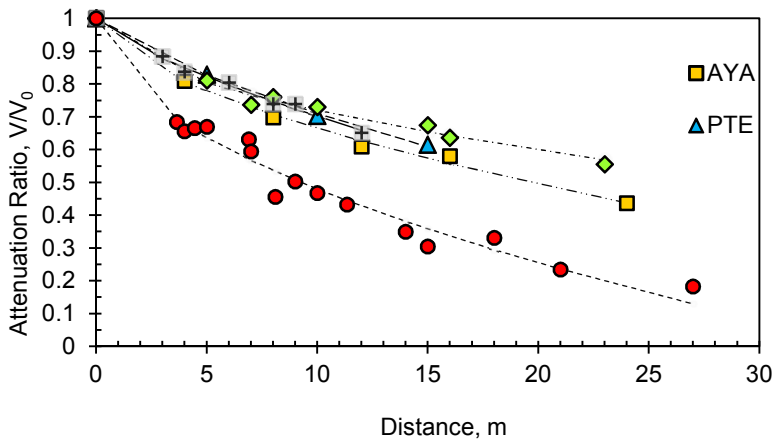
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการสั่นสะเทือนที่หัววัดที่ไกลแหล่งกำเนิด (แกนนอน) กับหัววัดที่ไกลแหล่งกำเนิด (แกนตั้ง)

ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดในรูปสมการ $y = mx$ พร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination) แสดงในแต่ละรูปย่อย ค่าอัตราส่วน m ของแต่ละชุดข้อมูลใช้นำเสนอเป็นอัตราการลดทอน (attenuation ratio) ของคลื่นตามระยะทางได้ โดยค่า $m = y/x$ เป็นอัตราส่วนของ

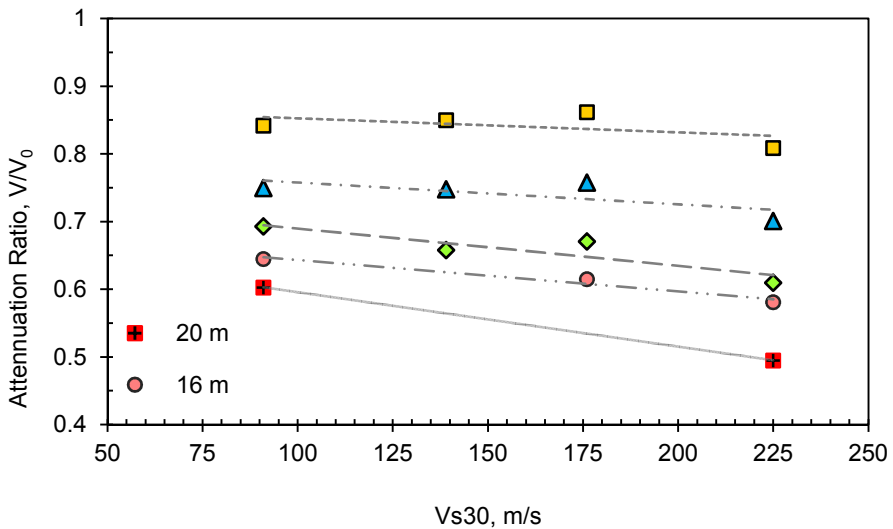
แอมพลิจูดของหัววัดที่อยู่ไกลหารด้วยค่าของหัววัดที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน และมีค่าน้อยกว่า 1.0 และเมื่อนำค่าอัตราส่วนการลดทอนดังกล่าวมาเขียนในรูปความสัมพันธ์ก็บ่งชี้ระหว่างหัววัดสามารถได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการตรวจวัดที่ระยะต่าง ๆ พบว่าค่าอัตราส่วนการลดทอนที่แสดงในแกนตั้ง

ของกราฟ มีความสัมพันธ์กับระยะที่คลื่นแพร่ไป (R) ที่แสดงในแกนนอนของกราฟ สำหรับที่พิกัด (0,1) ไม่ใช่เป็นค่าจากการตรวจวัด แต่เป็นค่าที่ควรเกิดขึ้นตามอุดมคติ เนื่องจากที่ตำแหน่ง 0 เมตร ต้องไม่มีการลดทอนของคลื่นจากแหล่งกำเนิด โดยผลจากการศึกษาของทุกพื้นที่ที่แสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 5 ที่เป็นผลของค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดในหลายครั้ง นอกจากนี้สำหรับการตรวจวัดในบริเวณใกล้เคียงกัน เช่น ใน

จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผลของการตรวจวัดทุกตำแหน่ง (ยกเว้นที่บริเวณวัดมหาธาตุ) แสดงด้วยสัญลักษณ์ AYA ส่วนผลของวัดมหาธาตุที่ผลมีความแตกต่างออกไปแสดงด้วยสัญลักษณ์ MHT สำหรับผลจากตำแหน่งที่ศึกษาในจังหวัด ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ แสดงด้วยสัญลักษณ์ PTE BKK และ SPK ตามลำดับ



รูปที่ 5 อัตราการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนตามระยะทางของบริเวณที่ศึกษา



รูปที่ 6 อัตราการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนตามค่า Vs30 ของบริเวณที่ศึกษา

การพิจารณาการลดทอนสำหรับพื้นที่ต่าง ๆ ในรูปที่ 5 พบว่ามีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งมีแนวโน้มของอัตราการลดทอนของคลื่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AYA) สูงที่สุด (โดยยกเว้นที่บริเวณ MHT) และอัตราการลดทอนของคลื่นในจังหวัดสมุทรปราการ (SPK) มีค่าต่ำที่สุด โดยเมื่อพิจารณาพร้อมกันค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยจากพื้นถึงชั้นดินลึก 30 เมตร (Vs30) ตามตารางที่ 2 พบว่าอัตราการลดทอนของคลื่นมีค่าแปรตาม Vs30 นั่นคือในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่มีค่า Vs30 สูงกว่าบริเวณอื่น อันหมายความว่าชั้นดินมีความแข็งกว่า และอัตราการลดทอนที่ลดลงสอดคล้องกับค่า Vs30 ที่ลดลงตามลำดับ คือ ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และในจังหวัดสมุทรปราการมีค่า Vs30 ต่ำกว่าบริเวณอื่น หรือชั้นดินมีความอ่อนกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับสภาพความแข็งของชั้นดิน โดยคลื่นมีการลดทอนตามระยะทางได้มากในบริเวณชั้นดินแข็ง และการลดทอนในชั้นดินอ่อนเกิดขึ้นได้น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่แสดงอัตราการลดทอนของคลื่นตามค่า Vs30 ของบริเวณที่ศึกษา (ยกเว้นที่บริเวณ MHT)

สำหรับบริเวณ MHT ที่มีอัตราการลดทอนอย่างรวดเร็วมากแม้เปรียบเทียบกับบริเวณอื่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่มีค่า Vs30 ใกล้เคียงกันนั้น เนื่องจาก ระยะทางจากถนนบริเวณหน้าวัดถึงตำแหน่งที่ตรวจวัดประกอบด้วยโครงสร้างของพื้นดินที่ต่างกันหลายรูปแบบ ได้แก่ ทางเท้า ท่อระบายน้ำ ทางจักรยาน แล้วจึงเป็นพื้นดิน ซึ่งมีลักษณะต่างจากบริเวณอื่นที่ตรวจวัดที่มีความต่อเนื่องของโครงสร้างของพื้นดิน จึงเป็นสาเหตุให้คลื่นการสั่นสะเทือนไม่สามารถเดินทางแพร่ได้อย่างอิสระและต่อเนื่อง และเป็นผลให้การลดทอนของการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดมีอัตราสูงกว่าบริเวณใกล้เคียงกันในจังหวัดพระ-

นครศรีอยุธยา

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการลดทอน (attenuation ratio) กับระยะทางที่คลื่นแพร่ไป (R) สามารถพัฒนาให้เป็นสมการเพื่อใช้ทำนายระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนได้ โดยแสดงในรูปสมการที่ 1

$$\text{Attenuation Ratio} = 1 - \alpha R^\beta \quad (1)$$

โดยที่ α และ β คือ ค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จาก การวิเคราะห์เชิงถดถอย ผลของการวิเคราะห์แสดงดัง ตารางที่ 3 ผลที่ได้จากรูปที่ 5 และตารางที่ 3 สามารถใช้ทำนายอัตราการลดทอนและระดับความรุนแรงของคลื่นการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งที่ตั้งโครงสร้างโบราณสถาน หรือโครงสร้างอื่น ๆ ได้ต่อไป

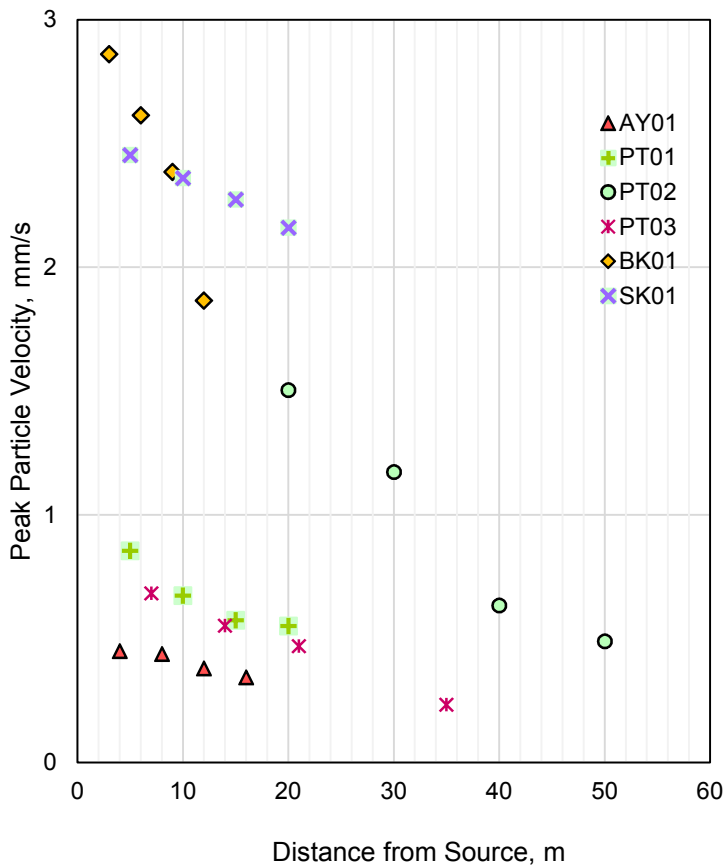
ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดทอนกับระยะทางที่คลื่นแพร่ไป

| Site | α | β |
|------|----------|---------|
| MHT | 0.1570 | 0.5197 |
| AYA | 0.0858 | 0.5917 |
| PTE | 0.0527 | 0.7403 |
| BKK | 0.0533 | 0.7474 |
| SPK | 0.0850 | 0.5178 |

นอกจากนั้น จากการตรวจวัดในแต่ละสถานที่ พบว่ามีระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน โดยขึ้นกับปริมาณ และความเร็วของรถที่สัญจร การประเมินผลจากการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อความมั่นคงของโครงสร้างจำเป็นต้องมีข้อมูลด้านระดับความรุนแรง และความถี่ของการเกิดขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณา ซึ่งผลจากการตรวจวัดสูงสุดที่บันทึกได้ในแต่ละพื้นที่ศึกษาและที่ระยะห่างต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิด แสดงดังรูปที่ 7 โดยพบว่าค่าความเร็วของการสั่น

สะเทือนที่เกิดขึ้น มีค่าสูงมากในบริเวณที่มีรถขนาดใหญ่วิ่ง และวิ่งด้วยความเร็วสูง ตัวอย่างที่มีค่าสูงสุดในการศึกษานี้ คือ บริเวณถนนพุทธมณฑลสาย 1 (BK01) ที่เป็นถนนใหญ่และมีรถบรรทุกขนาดใหญ่วิ่งด้วยความเร็ว ซึ่งค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดประมาณ 2.9 mm/s ที่ระยะประมาณ 3 เมตร จากถนน ส่วนบริเวณอื่นมีระดับการสั่นสะเทือนที่น้อยลงตามลำดับ คือ ถนนเทพารักษ์ จังหวัดสมุทรปราการ (SK01) ถนน

เชียงราก จังหวัดปทุมธานี (PT01, PT03) และถนนโรจนะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (AY01) และสำหรับตัวอย่างที่จุด PT02 แสดงค่าการตรวจวัดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม ซึ่งพบว่าระดับการสั่นสะเทือนมีความรุนแรงสูงกว่าผลจากการจราจรที่วัดได้ในบริเวณใกล้เคียงกันมากและมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการจราจรในพื้นที่ดินอ่อนกว่า



รูปที่ 7 ค่าสูงสุดของระดับการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ในแต่ละพื้นที่ศึกษา

สำหรับระดับการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่สี่แยกวัดพระญาติ ถนนโรจนะ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นที่สุดในเขตอำเภอเมือง พบว่าค่าสูงสุดของการสั่นสะเทือน

สูงสุดประมาณ 0.5 mm/s ที่ระยะทางประมาณ 4 เมตร จากแหล่งกำเนิด ซึ่งค่านี้จะลดลงเมื่อคลื่นแพร่ออกไป และค่าที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่อื่น ๆ ที่ศึกษาในจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีค่าต่ำกว่าค่านี้อย่างสิ้น ดั้งนั้น

หากประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อโบราณสถาน โดยใช้ค่าที่รุนแรงที่สุดจากตำแหน่ง AY01 และเปรียบเทียบกับเกณฑ์แนะนำในมาตรฐานของสากลและงานวิจัยในอดีต ที่มีเกณฑ์โดยสรุปดังตัวอย่าง คือ

(1) DIN (Deutsches Institut für Normung) [3] ของประเทศเยอรมัน หมายเลข 4150-3 ฉบับ ค.ศ. 1999 หัวข้อ 6.1 Effects on the structures as a whole เกณฑ์สำหรับอาคารที่ควรอนุรักษ์มีค่าแนะนำสำหรับความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่ควรเกิน 3 mm/s โดยที่มาตรฐาน DIN 4150-3 นี้ เป็นมาตรฐานต้นแบบสำหรับ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. ๒๕๕๓) เรื่อง กำหนดมาตรฐานความสั่นสะเทือนโดยทั่วไปที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารและส่วนประกอบของอาคาร [4] และมีเนื้อหาเทียบเท่ากัน

(2) Bachmann และคณะ (1995) [5] เสนอค่าสูงสุดสำหรับความเร็วอนุภาคของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของโครงสร้างที่ควรอนุรักษ์มาก เนื่องจาก การจรรยา ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1 mm/s

(3) Departments of the Army and Air force, USA (1995) [6] ได้ให้คำแนะนำไว้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับพื้นผิวภายนอกของอาคารที่มีอายุมาก ระดับการสั่นสะเทือนไม่ควรมีค่าเกิน 0.05 in/s หรือ 1.27 mm/s

(4) California Department of Transportation (2002) [7] ได้กำหนดเกณฑ์สำหรับระดับการสั่นสะเทือนที่ฐานของโครงสร้าง เพื่อป้องกันความเสียหายจากการสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่องของอาคารเก่าหรืออนุสาวรีย์ต่าง ๆ ระดับการสั่นสะเทือนไม่ควรมีค่าเกิน 2 mm/s

หากใช้เกณฑ์ที่เข้มงวดที่สุดตาม Bachmann และคณะ (1995) ค่าสูงสุดของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งไม่ควรมีค่ามากกว่า 1 mm/s ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวยังมีค่ามากกว่าผลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งติดถนน

และอยู่บนถนนที่มีการจราจรหนาแน่นที่สุดของเมือง ดังนั้น ผลกระทบจากการจราจรต่อโบราณสถานที่ตั้งอยู่ไกลจากถนนและเกิดการลดทอนด้วยอัตราค่อนข้างมาก จึงไม่ควรเป็นปัญหาต่อความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถาน

4. สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาด้านปัญหาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างโบราณสถานด้วยการตรวจวัด โดยดำเนินการในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่เป็นแหล่งโบราณสถาน และดำเนินการศึกษาเปรียบเทียบกับพื้นที่อื่นที่มีสภาพชั้นดินที่แตกต่างกัน มีผลสรุปจากการศึกษาที่สำคัญดังนี้

5.1 คลื่นการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรมีลักษณะ คือ การสั่นสะเทือนเกิดในแนวแกนตั้งเป็นหลัก และระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งมีการลดทอนตามระยะทางที่คลื่นแพร่ไป

5.2 อัตราการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับสภาพความแข็งของชั้นดิน โดยคลื่นมีการลดทอนตามระยะทางได้มากในบริเวณชั้นดินแข็ง และการลดทอนในชั้นดินอ่อนเกิดขึ้นได้น้อยกว่า โดยอัตราการลดทอนของคลื่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีค่าสูงที่สุดเนื่องจากชั้นดินมีค่า Vs30 สูง และอัตราการลดทอนของคลื่นในจังหวัดสมุทรปราการมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากชั้นดินมีค่า Vs30 ต่ำมาก

5.3 ผลการศึกษาได้สามารถพัฒนาเป็นสมการสำหรับทำนายอัตราการลดทอนและระดับความรุนแรงของคลื่นการสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งที่ตั้งโครงสร้างของพื้นที่ศึกษาได้

5.4 ผลการตรวจวัดระดับความรุนแรงของคลื่นอันเนื่องมาจากผลของการจราจรพบว่าระดับการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในจังหวัดพระนครศรี-

อยุธยา ที่ถึงแม้ตรวจวัดที่สภาพรุนแรงกว่าสภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงต่อโครงสร้างโบราณสถานนั้น ยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่แนะนำในมาตรฐานด้านผลกระทบจากการสั่นสะเทือนและงานวิจัยในอดีต ดังนั้นผลกระทบจากการจราจรต่อโบราณสถานที่ตั้งอยู่ไกลจากถนน และเกิดการลดทอนด้วยอัตราค่อนข้างมาก จึงไม่ควรเป็นปัญหาต่อความมั่นคงของโครงสร้างโบราณสถาน

5.5 ผลความต่อเนื่องของโครงสร้างของพื้นดิน และการทำรบกวนกันการแพร่ของคลื่นการสั่นสะเทือนสามารถช่วยเพิ่มอัตราการลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนได้ โดยพบได้จากตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัดบริเวณหน้าวัดมหาธาตุ จึงอาจใช้เป็นแนวทางการลดผลกระทบของคลื่นการสั่นสะเทือนได้

5.6 การศึกษานี้เป็นการศึกษาปัญหาพื้นฐาน ที่พิจารณาลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นในสภาพจริง โดยไม่ได้คำนึงถึงผลของพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชั้นดินที่อาจมีผลมากขึ้นเมื่อระดับการสั่นสะเทือนสูงมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 และทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ขอขอบคุณสำนักศิลปากรที่ 3 พระนครศรีอยุธยา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

6. รายการอ้างอิง

[1] Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special

reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Instit. 22: 415-456.

[2] Konno, K., Suzuki, T., Kamata, Y. and Nagao, T., 2007, Estimation of average S-wave velocity of ground using microtremors at strong-motion sites in Yokohama, J. Jap. Soc. Civil Eng. 63: 639-654.

[3] Deutsches Institut für Normung, 1999, DIN 4150-3, Structural Vibration, Part 3: Effects of Vibration on Structures.

[4] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2553, ประกาศเรื่อง กำหนดมาตรฐานความสั่นสะเทือนโดยทั่วไปที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารและส่วนประกอบของอาคาร.

[5] Bachmann, H., Ammann, W.J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G.H., Klein, G.K., Lande, G.J., Mahrenholtz, O., Natke, H. G., Nussbaumer, H., Pretlove, A. J., Rainer, J.H., Saemann, E. and Steinbeisser, L., 1995, Vibration problems in structures: practical guidelines, Birkhauser.

[6] Departments of the Army and Air force, 1995, Noise and vibration control, Technical Report Army TM 5-805-4, Air Force AFJMAN 32-1090.

[7] California Department of Transportation, 2002, Transportation related earth-borne vibrations, Technical advisory, vibration, TAV-02-01-R9601.