

การศึกษาระดับการรับรู้ของบุคคลจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถี A Study of Personal Vibration Perceptibility of Buraphavithi Elevated Expressway

พัทธพงษ์ อาสนจินดา*

หน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: pattarapong@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับที่มีผลต่อการรับรู้ของบุคคล โดยพิจารณากรณีศึกษาการรับรู้ของผู้ปฏิบัติงาน ณ ด่านชำระค่าผ่านทางทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถีจำนวน 3 ด่าน ได้แก่ ด่านชลบุรี ด่านวงแหวนรอบนอก และด่านบางนา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการทรัพยากรบุคคลและเป็นข้อมูลประกอบแนวทางในการประเมินโครงสร้างทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถี การศึกษาได้ทำการทดสอบภาคสนามทั้งสามด้านเป็นเวลาด้านละประมาณ 12 ชั่วโมง โดยตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง บริเวณด่านรับชำระค่าผ่านทางช่องซ้ายสุดซึ่งเป็นช่องบริการสำหรับยานพาหนะทุกประเภท และพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทยานพาหนะ ลักษณะทางกายภาพของด่าน ระดับการสั่นสะเทือนที่ผิวทางและบริเวณตู้รับชำระค่าผ่านทาง จากนั้นจึงทำการประเมินระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนจากค่าแอมพลิจูดของสัญญาณความเร่งและความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสากลต่างๆ จากการศึกษาพบว่าด่านชลบุรีมีระดับการสั่นสะเทือนที่รุนแรงที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองด่าน โดยมีระดับสูงสุดถึงระดับไม่พอใจ และระดับสูงสุดของทั้งด่านวงแหวนรอบนอกและด่านบางนาอยู่ในระดับรู้สึกได้ ซึ่งพบว่าอาจมีสาเหตุจากลักษณะของด่านชลบุรีซึ่งมีช่องบริการรถบรรทุกหนักอยู่ในตำแหน่งปลายยื่นของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง จึงเกิดความเร่งการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าด่านอื่น อีกทั้งยังพบว่าเกาะติดตู้รับชำระค่าผ่านทางสามารถลดความรุนแรงของการสั่นสะเทือนได้เมื่อเทียบกับที่ผิวทาง โดยมีแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าที่ผิวทางโดยเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 17 อีกทั้งพบว่าการเคลื่อนที่ในจังหวะออกตัวของยานพาหนะที่ใกล้เคียงกับช่องจราจรข้างเคียงสามารถเพิ่มแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนและระดับการรับรู้ได้รุนแรงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การรับรู้การสั่นสะเทือน, ทางพิเศษยกระดับ, ทางพิเศษบูรพาวิถี, ผลตอบสนองความเร่งของโครงสร้าง

Abstract

This research studied the vibration level of elevated expressway structure affecting to personal perceptibility for 3 stations of Buraphavithi expressway including Chonburi, outer-ring road and Bangna stations. The purpose was to evaluate the vibration level affecting to the officers. The results could be useful for human resource administration and guideline for structural assessment of Buraphavithi expressway. Field testing was conducted for 12 hours for each station. Vertical acceleration response was measured at the first lane from the left-hand side which is for all vehicular types. Effects of relevant factors such as vehicle type, physical property of the station, vibration amplitudes at pavement and toll booth were considered. Evaluation on vibration perceptibility level was carried out from amplitude and frequency of acceleration response. The international criterions were selected for comparison. It was found that Chonburi station allowed the strongest level at "unpleasant". The outer-ring road and Bangna stations allowed perceptibility level at "perceptible". This was because the considered traffic lane of Chonburi station is at the cantilever end of the prestressed concrete box-girder section. The induced acceleration amplitude was therefore larger than other stations. Besides, the concrete base of the toll booth could reduce the amplitude of vibration for 17% in average. Moreover, the scenario that two vehicles at the adjacent lanes driving off the stations simultaneously could enhance vibration amplitude to be stronger, significantly.

Keywords: vibration perceptibility, elevated expressway, Buraphavithi expressway, structural acceleration response

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้บริการทางพิเศษยกระดับมากขึ้นเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเดินทาง และเมื่อมีปริมาณยานพาหนะเพิ่มมากขึ้นทำให้โครงสร้างทางพิเศษยกระดับเกิดการสั่นสะเทือนสูงขึ้น ซึ่งสามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนอย่างชัดเจนแม้ในขณะที่อยู่ในยานพาหนะ โดยบริเวณสามารถรับรู้การสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจนคือ บริเวณด้านเก็บค่าผ่านทางยกระดับ เนื่องจากมีการชะลอความเร็วยานพาหนะสลับกับการเร่งความเร็ว อีกทั้งยังเป็นบริเวณที่บุคคลหยุดนิ่งอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆ และเคลื่อนที่อย่างช้าๆ และมีการกระจุกตัวของยานพาหนะเป็นจำนวนมาก ทั้ง รถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก ซึ่งการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของพนักงานเก็บค่าผ่านทาง และผู้ขับขี่ยานพาหนะที่รอคิวชำระค่าผ่านทาง

ปัจจุบันมีการศึกษาผลกระทบเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อบุคคลมากมาย อาทิ โครงสร้างอาคารสูง อัฒจันทร์สนามกีฬา เป็นต้น แต่ยังไม่มีการศึกษาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับ และส่งผลกระทบต่อความรู้สึกการสั่นสะเทือนของบุคคลในระดับใด และยังไม่มีการศึกษาหรือจัดทำเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างประเภททางยกระดับว่าส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของบุคคลอย่างไร การศึกษาด้วยการทดสอบเพื่อประเมินผลกระทบของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างประเภททางยกระดับจึงมีประโยชน์เพื่อใช้สำหรับการบริหารจัดการจัดการบุคลากรบริเวณด้านเก็บค่าผ่านทาง หรือใช้สำหรับการวางตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ สิ่งปลูกสร้างด้านบนทางด่วนพิเศษยกระดับ

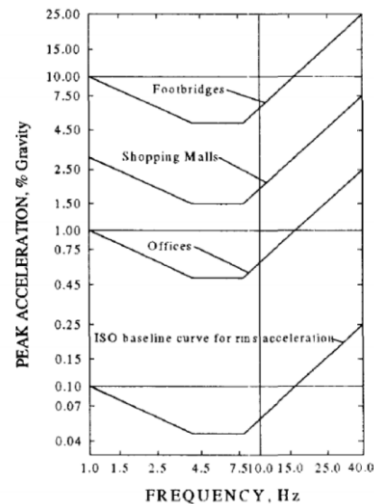
งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับเพื่อพิจารณาว่ามีผลกระทบต่อความรู้สึกการสั่นสะเทือนต่อบุคคลที่ปฏิบัติงาน ณ บริเวณด้านชำระค่าผ่านทางมากน้อยเพียงใด และถือเป็นงานวิจัยแรกในประเทศไทยที่ทำการทดสอบโดยทำการตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ผิวทางและที่ฐานรองรับของตู้รับชำระค่าผ่านทางซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน ซึ่งขนาดความเร่งและความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปประเมินเป็นระดับการรับรู้ของบุคคลด้วยเกณฑ์มาตรฐาน

2. การรับรู้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งต่อมนุษย์

การสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของมนุษย์ในแง่ของความรู้สึกที่ถูกรบกวน ทำให้เกิดความรู้สึกรำคาญ ไม่สบาย และส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ การศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อมนุษย์โดย Reier และ Meister [1] นั้นเริ่มทดสอบโดยพิจารณาการรับรู้ของผู้ทดสอบที่ยืนอยู่บนโต๊ะทดสอบและทำการเขย่าด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน และได้ข้อสรุปซึ่งแนะนำให้แบ่งช่วงการรับรู้ออกเป็น 6 ระดับได้แก่ 1) ไม่สามารถรับรู้การสั่นสะเทือนได้ (not perceptible) 2) รับรู้การสั่นสะเทือนได้เพียงเล็กน้อย (slightly perceptible) 3) รับรู้การสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจน (distinctly perceptible) 4) รับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง (strongly perceptible) 5) รู้สึกถูกรบกวน (disturbing) และ 6) รู้สึกถูกรบกวนอย่างมาก (very disturbing) โดยการรับรู้ในแต่ละระดับจะพิจารณาจาก

ขนาดการกระจัดของการสั่นสะเทือนและความถี่การสั่นสะเทือน ในขณะที่การศึกษาของ Wiffin และ Leonard [2] นั้นพิจารณาค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของการสั่นสะเทือน (peak particle velocity) สำหรับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง โดยพิจารณาเพียงแอมพลิจูดหรือขนาดของความเร็วอนุภาคสูงสุดเท่านั้นโดยไม่พิจารณาผลของความถี่การสั่นสะเทือน

มาตรฐาน ISO-2631 [3,4] ได้จำแนกระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่มีต่อมนุษย์อย่างง่ายโดยแบ่งเป็น 2 ระดับได้แก่ ระดับการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ กับระดับการสั่นสะเทือนที่ยอมรับไม่ได้ โดยพิจารณาการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 1 – 40 Hz โดยค่าที่ยอมรับได้จะขึ้นกับประเภทของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่หากต้องการพิจารณาถึงระดับการรับรู้โดยละเอียด สามารถพิจารณาได้จากขนาดของความเร่งการสั่นสะเทือน โดยระดับการรับรู้แบ่งออกเป็น 6 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลที่ยอมรับได้โดยใช้ค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดโดยจำแนกตามประเภทอาคารของ ISO-2631:1997 [3]

ตารางที่ 1 การสั่นสะเทือนและผลการรับรู้ของมนุษย์ของ ISO-2631-1:1997 [3]

ระดับการสั่นสะเทือน	ผลกระทบต่อมนุษย์
$< 0.315 \text{ m/s}^2$	ปกติ (Not Uncomfortable)
$0.315 - 0.63 \text{ m/s}^2$	มีความรู้สึกไม่สบายเล็กน้อย (A little uncomfortable)
$0.5 - 1 \text{ m/s}^2$	มีความรู้สึกไม่สบายปานกลาง (Fairly uncomfortable)
$0.8 - 1.6 \text{ m/s}^2$	มีความรู้สึกไม่สบาย (Uncomfortable)
$1.25 - 2.5 \text{ m/s}^2$	มีความรู้สึกไม่สบายอย่างมาก (Very uncomfortable)
$> 2 \text{ m/s}^2$	มีความรู้สึกไม่สบายอย่างรุนแรง (Extremely uncomfortable)

นอกจากเกณฑ์ของ ISO แล้ว มาตรฐานสากลอื่น ๆ เช่น ข้อเสนอแนะการประเมินผลกระทบที่มีต่อมนุษย์เนื่องจากการสั่นไหวของอาคารที่แหล่งกำเนิดไม่ใช่การกระเปิดของประเทศอังกฤษ BS 6472 [5] หรือเกณฑ์ของสถาบันมาตรฐานแห่งชาติ ประเทศสหรัฐอเมริกา ANSI S3.29 [6] พิจารณาด้วยความเร็วอนุภาคสูงสุด ขณะที่มาตรฐาน DIN4150-3 [7] ของประเทศเยอรมนี นั้นให้พิจารณาจากค่าความเร็วสูงสุดซึ่งมีระดับที่ยอมรับ

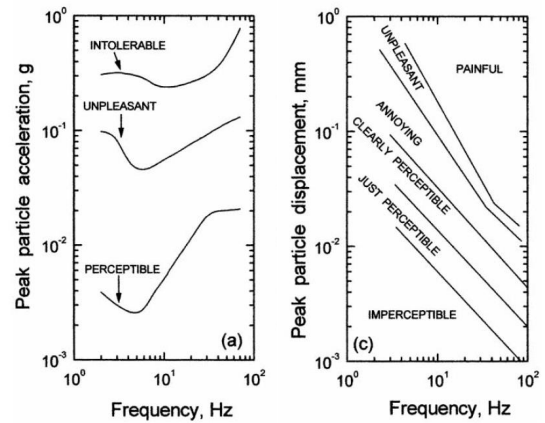
ได้แบ่งตามช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นสามช่วงได้แก่ 0 - 10 Hz, 10 - 50Hz และ 50 - 1000 Hz โดยที่เกณฑ์ดังกล่าว [5,6,7] เหล่านี้ต่างมีระดับที่ยอมรับได้แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแบ่งระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของมนุษย์นั้นมีความแตกต่างและมีแนวทางการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างหลากหลาย ทั้งนี้เพราะระดับการรับรู้ของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นสะเทือนนั้นสามารถทำให้เทียบเคียงกันได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างของบุคคล อายุ สุขภาพ สิ่งแวดล้อม หรือแม้แต่การทดสอบซึ่งผู้ทดสอบนั้นอาจทราบล่วงหน้าแล้วว่าจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น จึงยากต่อการหลีกเลี่ยงการลำเอียงในการให้ผลการทดสอบ จึงเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะได้เกณฑ์มาตรฐานการประเมินที่สอดคล้องกันในทุกระดับ

Athanasopoulos และ Pelekis [8] ได้รวบรวมผลการศึกษาและเกณฑ์มาตรฐานต่างเข้าด้วยกัน และได้แบ่งระดับของการรับรู้ให้สอดคล้องตามลักษณะของผลตอบสนองที่ตรวจวัด โดยหากประเมินด้วยค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดนั้นจะสามารถจำแนกระดับได้ 4 ระดับ และหากประเมินด้วยการวัดค่าการกระจัดอนุภาคสูงสุด จะสามารถแบ่งได้ 6 ระดับ โดยพิจารณาความถี่ของการสั่นสะเทือนในช่วง 1-100 Hz แสดงดังรูปที่ 2 แต่หากตรวจวัดด้วยค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดนั้น จะพิจารณาความถี่ของการสั่นสะเทือนในช่วง 2 - 25 Hz และสามารถจำแนกได้เป็น 2 กรณีได้แก่ การสั่นไหวอย่างต่อเนื่องหรือแบบคงที่ (steady state) และการสั่นไหวแบบชั่วขณะ (transient) โดยระดับการรับรู้ของทั้งสองกรณีนี้จะแตกต่างกัน โดยในสภาวะคงที่ที่จะแบ่งออกได้ 6 ระดับ ขณะที่สภาวะชั่วขณะจะแบ่งออกได้ 5 ระดับ โดยรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3

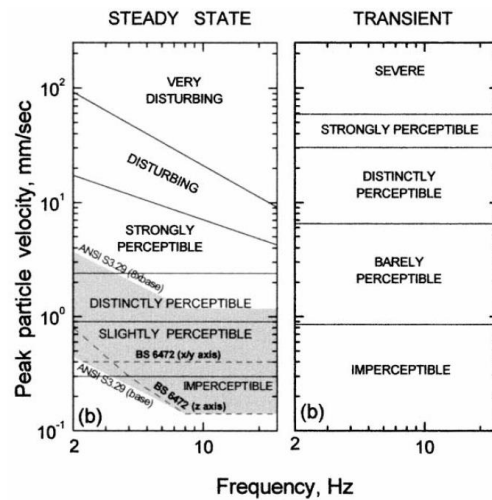
ธนะเมศร์ ประจวบกุลวัฒน์ [9] ได้ทำการทดสอบและสำรวจระดับการรับรู้ของทางพิเศษบูรพาวิถี ด่านชลบุรี โดยใช้ผู้ทดสอบอาสาสมัครประเมินระดับความรับรู้ของการสั่นสะเทือนเมื่อมีรถเคลื่อนที่เข้า-ออกของรับชำระค่าผ่านทาง โดยผลการศึกษาพบว่าข้อสรุปของระดับการรับรู้ได้ยากเนื่องจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นรวดเร็วและมีจำนวนมากทำให้เกิดความรู้สึกละเลยได้ อีกทั้งยังไม่สามารถจำแนกให้ละเอียดได้ เนื่องจากมีเวลาตอบแบบสำรวจที่จำกัดจากการประเมินด้วยเหตุการณ์ของยานพาหนะรายคัน

ดังนั้นเพื่อให้การศึกษานี้ได้ข้อสรุปโดยไม่มีกรลำเอียงของข้อมูล การเก็บสำรวจข้อมูลจึงพิจารณาจากผลตอบสนองที่ตรวจวัดได้ของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับบริเวณช่องรับชำระค่าผ่านทาง โดยไม่ทำการสำรวจการรับรู้ของบุคคลจากการสัมภาษณ์หรือตอบแบบสอบถาม โดยจะประเมินด้วยเกณฑ์การประเมินที่เสนอโดย Athansopoulos และ Pelekis [8] จากสัญญาณความเร่งเพียงเท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้เป็นหัววัดความเร่ง ซึ่งหากจะแปลงค่าเป็นความเร็วอนุภาคของการสั่นสะเทือนนั้นจะต้องใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลข ซึ่งค่าความเร็วที่คำนวณได้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้จากค่าเริ่มต้น (initial condition) ของระบบ เช่นเดียวกับการแปลงเป็นการกระจัดด้วยการอินทิเกรตสองชั้น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีขอบเขตที่จะพิจารณาผลการรับรู้ที่ประเมินได้จากค่าความเร่งเพียงเท่านั้น โดยใช้กราฟดังรูปที่ 2 ในด้านซ้ายมือ ซึ่งจะจำแนกระดับการรับรู้ได้ 4 ระดับได้แก่ 1) ไม่สามารถรับรู้ได้ (imperceptible) 2) สามารถรับรู้ได้

(perceptible) 3) รู้สึกไม่พอใจ (unpleasant) และ 4) ไม่สามารถทนได้ (intolerable)



รูปที่ 2 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลโดยใช้ค่าความเร่งอนุภาคสูงสุด (ซ้าย) หรือค่าการเปลี่ยนตำแหน่งอนุภาคสูงสุด (ขวา) [8]



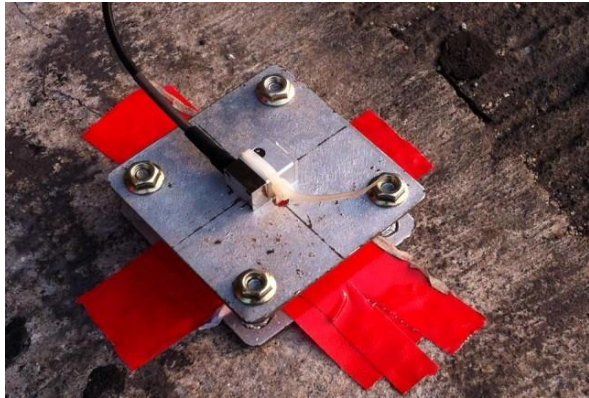
รูปที่ 3 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลที่พิจารณาจากค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดในสภาวะคงที่ (ซ้าย) และสภาวะชั่วขณะ (ขวา) [8]

3. วิธีการศึกษา

3.1 การทดสอบภาคสนาม

การศึกษาพิจารณาโครงสร้างทางพิเศษยกระดับที่มีการสัญจรของยานพาหนะด้วยความเร็วสูงและมียานพาหนะหลากหลายประเภทใช้ทาง จึงพิจารณาทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถีเป็นกรณีศึกษา การทดสอบภาคสนามได้ทำการวัดขนาดความเร่งการสั่นสะเทือนของทางพิเศษบูรพาวิถี ณ ด้านชำระค่าผ่านทางที่สังเกตได้ว่ามีปริมาณรถมากจำนวน 3 ด้าน ได้แก่ 1) ทางลดด่านชลบุรี (ทิศทางขาออก) ณ กิโลเมตรที่ 54 2) ทางลดด่านวงแหวนรอบนอก (ทิศทางขาเข้า) ณ กิโลเมตรที่ 9 และ 3) ทางลดด่านบางนา (ทิศทางขาเข้า) ณ กิโลเมตรที่ 8

ลักษณะโครงสร้างของทางพิเศษบูรพาวิถีเป็นโครงสร้างซึ่งสร้างจากชิ้นส่วนหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง (prestressed segmental box girder) โดยจะใช้หัววัดความเร่ง (acceleration transducer) ซึ่งยึดติดกับฐานปรับระดับได้ดังรูปที่ 3 และนำไปติดตั้งที่บริเวณตู้เก็บค่าผ่านทางในช่องบริการด้านซ้ายสุดซึ่งเป็นช่องสำหรับยานพาหนะทุกประเภท โดยเฉพาะยานพาหนะหนักซึ่งจำเป็นต้องเข้าในช่องนี้ และได้ตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนที่ผิวทางและที่บนเกาะคอนกรีตซึ่งเป็นฐานรองรับของตู้รับชำระค่าผ่านทาง



รูปที่ 3 การติดตั้งหัววัดความเร่ง

หัววัดความเร่งจะถูกต่อเข้ากับเครื่องรวมสัญญาณความถี่สูง (high-frequency data acquisition) และเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 2,000 Hz แสดงดังรูปที่ 4 โดยการตรวจวัดจะบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลาประมาณ 8:00 น. จนถึง 22:00 น. เพื่อให้ครอบคลุมทุกช่วงเวลาทั้งช่วงเวลาที่เร่งด่วนซึ่งมีปริมาณรถมาก และช่วงเวลาอื่นที่มีจำนวนรถน้อยเช่นกัน อีกทั้งยังได้ติดตั้งกล้องวงจรปิด IP Camera เพื่อบันทึกภาพเหตุการณ์ที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านช่องชำระค่าผ่านทาง สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจในจังหวะที่ยานพาหนะเข้าจอดที่ช่องชำระค่าผ่านทางเพื่อชำระเงิน และเคลื่อนที่ออก ซึ่งจะพิจารณาการสั่นสะเทือน 1 กรณีจากการชำระค่าผ่านทางของยานพาหนะ 1 คัน



รูปที่ 4 เครื่องรวมสัญญาณความถี่สูง

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณยานพาหนะที่ตรวจวัดการสั่นสะเทือนได้ของด่านชลบุรี ด่านวงแหวนรอบนอก และด่านบางนา ซึ่งมีจำนวนเหตุการณ์ตรวจวัดยานพาหนะได้จำนวน 2,143 คัน, 2,766 คัน และ 2,178 คัน ตามลำดับ รวมทั้งหมดจำนวน 7,087 คัน

ตารางที่ 2 จำนวนยานพาหนะที่ตรวจวัดการสั่นสะเทือนได้

เวลา	จำนวนรถ (คัน)		
	ด่านชลบุรี	ด่านวงแหวนรอบนอก	ด่านบางนา
08:00 – 09:00 น.	191	139	243
09:00 – 10:00 น.	217	234	215
10:00 – 11:00 น.	179	182	128
11:00 – 12:00 น.	188	231	172
12:00 – 13:00 น.	212	219	N/A
13:00 – 14:00 น.	148	230	N/A
14:00 – 15:00 น.	46	228	N/A
15:00 – 16:00 น.	N/A	180	173
16:00 – 17:00 น.	N/A	192	198
17:00 – 18:00 น.	204	261	259
18:00 – 19:00 น.	197	N/A	258
19:00 – 20:00 น.	186	248	195
20:00 – 21:00 น.	195	244	238
21:00 – 22:00 น.	180	178	99
รวม	2,143	2,766	2,178
รวมทั้งหมด	7,087		

หมายเหตุ: N/A หมายถึงไม่ได้ตรวจวัดเนื่องจากหยุดพักเครื่องมือและปัญหาทางเทคนิค

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าในบางช่วงเวลามีการหยุดพักการเก็บสำรวจข้อมูลเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าจากเครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) ซึ่งผู้ทดสอบจะต้องคอยสลับเครื่องสำรองไฟฟ้าที่แบตเตอรี่กำลังจะหมดเพื่อนำไปชาร์จสลับกับเครื่องสำรองไฟฟ้าที่ชาร์จกระแสเต็มแล้ว และต้องมีการหยุดพักอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีความร้อนสูงจากการใช้งานต่อเนื่องหลายชั่วโมง โดยในการทดสอบที่ด่านบางนานั้นเกิดฝนตกขึ้นจึงจำเป็นต้องหยุดการทดสอบเพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ จึงทำให้หยุดพักไปเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

3.2 ปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์

จากผลการตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือน ข้อมูลที่เก็บสำรวจได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อพิจารณาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

1) ผลของประเภทยานพาหนะ

โดยพิจารณาเปรียบเทียบระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนเทียบกับประเภทของยานพาหนะ เนื่องจากยานพาหนะแต่ละประเภท มีจำนวนเพลาน้ำหนักเพลารวมถึงพฤติกรรมการใช้ความเร็วที่เข้าออกด่านที่แตกต่างกันของรถแต่ละประเภท

2) ผลของความแตกต่างทางกายภาพของด้าน

โดยพิจารณาความแตกต่างของระดับความเร่งการสั่นสะเทือนที่ผิวทางกับบนเกาะคอนกรีตซึ่งเป็นฐานรองรับของตู้รับชำระค่าผ่านทาง เพื่อพิจารณาการลดทอนระดับการรับรู้จากผิวทางโดยตรงไปถึงผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ภายในตู้เก็บค่าผ่านทาง ดังแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งทั้งสองตำแหน่งในรูปที่ 5 และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากลักษณะทางกายภาพของทั้งสองด้าน

3) ผลของช่วงเวลาใช้เส้นทาง

โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนเทียบกับช่วงเวลาใช้เส้นทาง เช่น ช่วงเวลาเร่งด่วนซึ่งมีปริมาณรถจำนวนมาก เทียบกับช่วงเวลาอื่นที่มีปริมาณรถน้อย ซึ่งอาจเคลื่อนที่เข้าด้านด้วยอัตราหน่วงความเร็วที่สูงกว่า

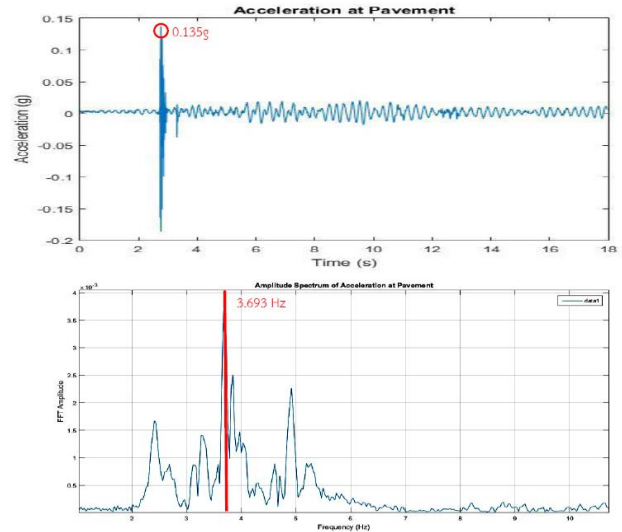


รูปที่ 5 ตำแหน่งตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ผิวทางและบนฐานรองรับคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง

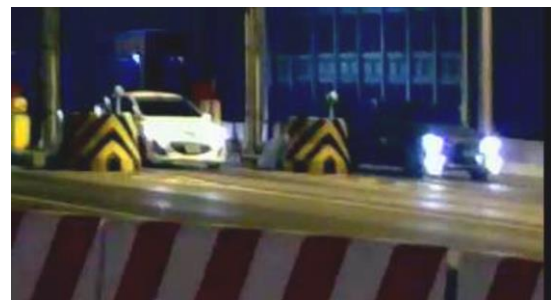
3.3 การประเมินระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคล

ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาคัดแยกให้เป็นข้อมูลของยานพาหนะรายคัน ซึ่งจะถูกนำไปหาค่าแอมพลิจูดสูงสุด (peak acceleration) และหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT) จากนั้นจะถูกนำไปพล็อตลงกราฟระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลของเกณฑ์ที่เสนอโดย Athansopoulos และ Pelekis [8] ดังรูปที่ 2 (ซ้ายมือ) ซึ่งสามารถประเมินด้วยค่าความเร่งอนุภาคสูงสุด (peak particle acceleration) หรือความเร็วอนุภาคสูงสุด (peak particle velocity) หรือการเปลี่ยนตำแหน่งอนุภาคสูงสุด (peak particle displacement) ซึ่งจะเห็นว่ามึระดับการรับรู้ที่ละเอียดไม่เท่ากัน แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการประเมินด้วยความเร่งอนุภาคสูงสุด ซึ่งเกณฑ์การประเมินด้วยมาตรฐาน ISO-2631:1997 [3] ดังรูปที่ 1 นั้นสามารถประเมินได้เช่นเดียวกันเพียงแต่จะสามารถจำแนกได้เพียงระดับที่ยอมรับได้หรือยอมรับไม่ได้เท่านั้นและขึ้นกับประเภทของอาคาร รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ในหน่วยของความเร่งโน้มถ่วงโลก (g) และสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณที่แปลงได้จากกระบวนการ FFT ของเหตุการณ์ที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าจอด

และออกจากช่องรับชำระค่าผ่านทาง 1 คัน โดยในแต่ละเหตุการณ์จะมีกล้องวงจรปิดบันทึกภาพไว้ เพื่อใช้ตรวจสอบเหตุการณ์ประกอบกรวิเคราะห์ประเมิน ดังเช่นรูปที่ 7



รูปที่ 6 ตัวอย่างการระบุค่าความเร่งสั่นสะเทือนอนุภาคสูงสุดและการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนด้วยสเปกตรัมจากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)

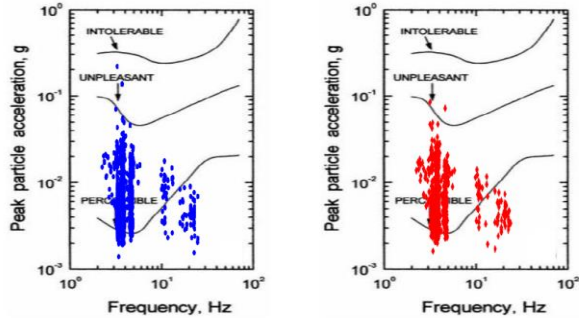


รูปที่ 6 ตัวอย่างการระบุค่าความเร่งสั่นสะเทือนอนุภาคสูงสุดและการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนด้วยสเปกตรัมจากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)

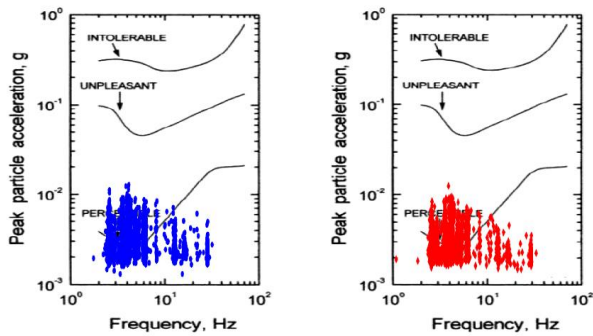
4. อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการทดสอบที่วิเคราะห์หาค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดและความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ได้ของจุดวัดบนผิวทางและจุดวัดบนฐานรองรับคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง ของด้านชลบุรี ด้านวงแหวนรอบนอก และด้านบางนา แสดงดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 ตามลำดับ โดยรูปฝั่งซ้ายมือคือผลประเมินที่ได้จากความเร่งที่ผิวทาง ขณะที่รูปฝั่งขวามือคือผลประเมินจากความเร่งที่ฐานคอนกรีต จะสังเกตได้ว่าทั้งสามด้านนั้นมีค่าความเร่งและระดับการรับรู้ที่ฐานคอนกรีตลดลงจากที่ผิวทาง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างทั้งสามด้านแล้ว พบว่าด้านชลบุรีมีระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนสูงที่สุด โดยมีระดับการรับรู้สูงสุดที่ระดับ “รู้สึกไม่พอใจ” (unpleasant) โดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับ “สามารถรับรู้ได้” (perceptible) โดยมีความถี่การ

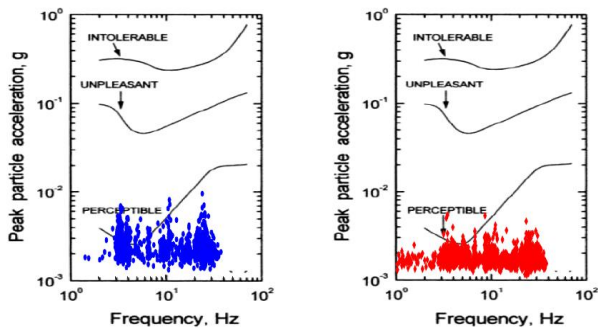
สั่นสะเทือนในช่วงประมาณ 2-6 Hz ขณะที่มีการเกิดที่สั่นสะเทือนในช่วง 10 Hz ขึ้นไป ซึ่งทำให้บางกรณีอยู่ในระดับที่ “ไม่สามารถรับรู้ได้” (imperceptible)



รูปที่ 8 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลของด่านชลบุรี เมื่อตรวจวัดที่ผิวทาง (ซ้าย) และบนฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (ขวา)



รูปที่ 9 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลของด่านวงแหวนรอบนอก เมื่อตรวจวัดที่ผิวทาง (ซ้าย) และบนฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (ขวา)



รูปที่ 10 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลของด่านบางนา เมื่อตรวจวัดที่ผิวทาง (ซ้าย) และบนฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (ขวา)

ขณะที่ด่านวงแหวนรอบนอกและด่านบางนา มีระดับการรับรู้สูงสุดที่ระดับ “สามารถรับรู้ได้” (perceptible) เท่านั้น และมีความถี่การสั่นสะเทือนที่กระจายตัวมากกว่าด่านชลบุรี อีกทั้งพบว่าสำหรับด่านบางนานั้นส่วนมากแล้วอยู่ในระดับที่ “ไม่สามารถรับรู้ได้” (imperceptible)

เมื่อเปรียบเทียบผลของฐานรองรับคอนกรีตนั้นจะพบว่า ค่าความถี่การสั่นสะเทือนบนฐานคอนกรีตนั้นแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ส่งผลให้ค่าความเร่ง

อนุภาคสูงสุดมีค่าลดลง ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดโดยเฉลี่ยของที่ผิวทางและที่บนฐานคอนกรีต ซึ่งพบว่าฐานคอนกรีตสามารถลดทอนค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดได้ในช่วงประมาณ 13% - 22% โดยด้านบางนานั้นฐานคอนกรีตสามารถลดทอนการสั่นสะเทือนได้มากที่สุด และโดยเฉลี่ยทั้งสามด้านแล้วแสดงว่าฐานคอนกรีตสามารถลดทอนค่าความเร่งลงได้ประมาณ 16.7%

จากผลการทดสอบที่สังเกตได้จากรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 นั้นน่าสนใจอย่างยิ่งว่าเพราะเหตุใดด่านชลบุรีจึงมีระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนที่รุนแรงกว่าอีกสองด่านมาก เมื่อได้เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของช่องรับชำระค่าผ่านทางแล้วพบว่า ตำแหน่งช่องรับชำระค่าผ่านทางของด่านชลบุรีนั้นอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับบริเวณริมสวนปีกของชั้นส่วนหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงมากกว่าด้านวงแหวนรอบนอกและด่านบางนา ซึ่งตู้รับชำระค่าผ่านทางจะอยู่ในตำแหน่งที่ขยับเข้ามาใกล้แนวกึ่งกลางหน้าตัดมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 11 ในขณะที่ลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ นั้นไม่แตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่าด่านชลบุรีมีระดับการรับรู้ที่รุนแรงกว่าเนื่องจากตำแหน่งของช่องรับชำระค่าผ่านทางด้านซ้ายมือสุดอยู่ในตำแหน่งที่โครงสร้างทางมีการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) ได้สูงกว่า ทำให้เกิดค่าความเร็วและความเร่งการสั่นสะเทือนที่สูงกว่าด้านวงแหวนรอบนอกและด่านบางนาอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดที่ตรวจวัดได้ บริเวณผิวทางและบนฐานรองรับคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทางของแต่ละด่าน

ด่าน	ค่าเฉลี่ยของความเร่งอนุภาคสูงสุดที่ผิวทาง (g)	ค่าเฉลี่ยของความเร่งอนุภาคสูงสุดที่ฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (g)	อัตราการลดทอนค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดจากผิวทางสู่ฐานคอนกรีต (%)
ชลบุรี	0.006573	0.005602	14.77
วงแหวนรอบนอก	0.003576	0.003086	13.70
บางนา	0.002268	0.001759	22.44
รวม			*16.71

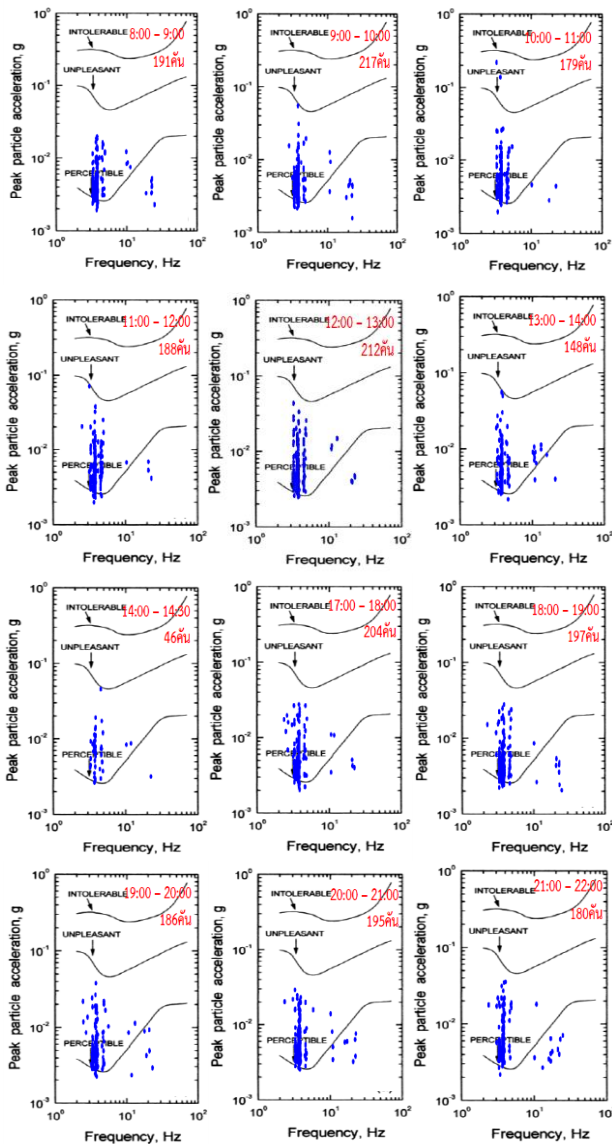
*ค่าอัตราการลดทอนค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดจากผิวทางสู่ฐานคอนกรีตในช่องรวมได้จากการถ่วงน้ำหนักด้วยจำนวนยานพาหนะในแต่ละด่าน



รูปที่ 11 ตำแหน่งของตู้รับชำระค่าผ่านทางช่องซ้ายมือสุดของด่านชลบุรี (ซ้าย) และด่านวงแหวนรอบนอก (ขวา)

สำหรับผลของช่วงเวลาใช้ทางซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระดับการรับรู้ นั้น เมื่อพิจารณาจากด่านชลบุรีซึ่งมีระดับการรับรู้ที่สูงกว่าอีกสองด่าน โดยจำแนกข้อมูลระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนตามช่วงเวลาใช้ทางในแต่ละชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 8:00 น. จนถึง 22:00 น. ดังรูปที่ 12 พบว่าช่วงเวลา 10:00 - 11:00 น. นั้นไม่ใช่ช่วงเวลาที่ปริมาณยานพาหนะสูงสุดแต่มีเหตุการณ์ที่มีระดับ

การรับรู้สูงสุดในระดับ “รู้สึกไม่พอใจ” (unpleasant) ขณะที่ช่วงเวลานั้น ๆ นั้นโดยส่วนมากแล้วมีระดับการรับรู้ในระดับที่ “สามารถรับรู้ได้” (perceptible) โดยเหตุการณ์ส่วนใหญ่มีค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดในช่วงประมาณ 0.002g – 0.02g (0.002 – 0.02 เท่าของความเร่งโน้มถ่วงโลก) และเป็นที่น่าสังเกตว่าการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่มีค่าความถี่ใกล้เคียงกัน โดยไม่ขึ้นกับประเภทยานพาหนะหรือช่วงเวลาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นไปได้ว่าความถี่ในช่วง 3-5 Hz นี้เป็นความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทางยกระดับ และช่วงเวลาใช้ทางไม่มีผลต่อระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 12 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลที่ตรวจวัดได้ที่ผิวทาง ในแต่ละช่วงเวลาของด่านชลบุรี

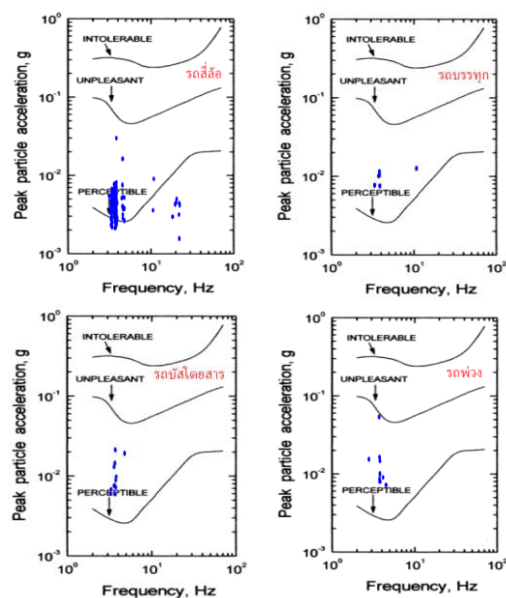
ตารางที่ 4 แสดงผลของประเภทยานพาหนะที่มีต่อระดับการรับรู้ โดยประเภทยานพาหนะที่พิจารณาแบ่งออกเป็น 4 ประเภทได้แก่รถจักรยานยนต์หรือรถประเภทสี่ล้อ รถบรรทุก รถบัสโดยสาร และรถพ่วง โดย

พิจารณาช่วงโมเมนต์ที่มีปริมาณยานพาหนะมากที่สุด พบว่ารถสี่ล้อมีปริมาณมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 85% และยานพาหนะประเภทอื่นๆซึ่งมีจำนวนพลาดั้งแต่สามพลาดขึ้นไปประมาณ 15% จากผลการประเมินระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของด่านชลบุรี

ในรูปที่ 13 พบว่าประเภทยานพาหนะไม่ส่งผลต่อระดับการรับรู้อย่างมีนัยสำคัญ รถประเภทสี่ล้อสามารถมีค่าความเร่งการสั่นสะเทือนสูงกว่ารถบรรทุกได้เช่นกัน ซึ่งจากการตรวจสอบเหตุการณ์จากภาพวิดีโอในกล้องวงจรปิดพบว่า เหตุการณ์ที่มีระดับการรับรู้ถึงระดับ “รู้สึกไม่พอใจ” (unpleasant) นั้นเกิดจากสองเหตุการณ์ต่อไปนี้ 1) รถสี่ล้อเคลื่อนที่เข้าออกช่องรับชำระค่าผ่านทางที่พร้อมเพรียงกันกับรถสี่ล้อในช่องรับชำระค่าผ่านทางข้างเคียง และ 2) รถพ่วงบรรทุกก๊าซหรือของเหลวซึ่งมีน้ำหนักมากเคลื่อนที่เข้าออกด่าน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนที่รุนแรงขึ้นนั้นเกิดจากการเสริมกันของผลตอบสนองความเร่งการสั่นสะเทือนของช่องจราจรที่ติดกัน หรือเกิดจากการเคลื่อนที่เข้าออกด่านของยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก

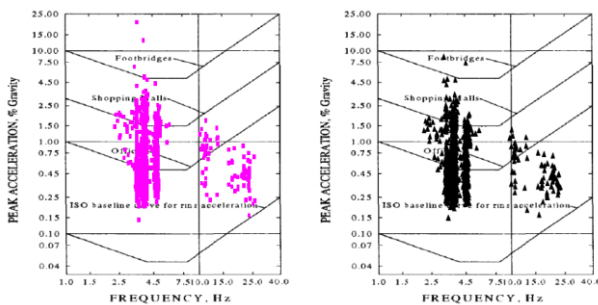
ตารางที่ 4 สัดส่วนของประเภทยานพาหนะที่เข้าช่องชำระค่าผ่านทางซ้ายมือสุด ใน 1 ชั่วโมงที่มีปริมาณยานพาหนะผ่านสูงสุดของแต่ละด่าน

ประเภทยานพาหนะ	ชลบุรี		วงแหวนรอบนอก		บางนา		รวม	
	(คัน)	(%)	(คัน)	(%)	(คัน)	(%)	(คัน)	(%)
รถสี่ล้อ	188	86.64	196	75.10	243	93.82	627	85.07
รถบรรทุก	6	2.76	52	19.92	5	1.93	63	8.55
รถบัสโดยสาร	12	5.53	5	1.92	9	3.48	26	3.53
รถพ่วง	11	5.07	8	3.06	2	0.77	21	2.85
รวม	217	100	261	100	259	100	737	100%



รูปที่ 13 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลที่ตรวจวัดได้ที่ผิวทางจำแนกตามประเภทของยานพาหนะ ในช่วงโมเมนต์ที่มีปริมาณยานพาหนะสูงสุดของด่านชลบุรี

นอกจากการประเมินระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนด้วยค่าความเร่งอนุภาคสูงสุดของ Athanasopoulos และ Pelekis [8] และเนื่องจากยังไม่มีการศึกษาในระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางยกระดับมาก่อน ผู้วิจัยจึงนำเกณฑ์ของ ISO-2631:1997 [3] มาใช้พิจารณาว่าการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถีที่ศึกษานี้ สามารถเทียบเคียงกับโครงสร้างอาคารประเภทใด โดยรูปที่ 14 แสดงถึงระดับการยอมรับได้ของมนุษย์จากการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ตรวจวัดได้ที่ผิวทาง (รูปซ้ายมือ) และบนฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (รูปขวามือ) ของทั้งสองด้านรวมกัน โดยพบว่าระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของมนุษย์จากการสั่นไหวที่บริเวณช่องรับชำระค่าผ่านทางของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับอยู่ในระดับที่เทียบเท่ากับระดับที่ยอมรับได้ของอาคารประเภทสำนักงานและห้างสรรพสินค้า



รูปที่ 14 ระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนของบุคคลของด้านชลบุรีเมื่อประเมินด้วยมาตรฐาน ISO-2631:1997 [3] กรณีตรวจวัดที่ผิวทาง (ซ้าย) และบนฐานคอนกรีตของตู้รับชำระค่าผ่านทาง (ขวา)

5. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษที่มีผลต่อการรับรู้ของบุคคลได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

- 1) การประเมินระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนด้วยความเร่งโดยใช้เกณฑ์ของ Athansopoulos และ Pelekis [8] สามารถจำแนกระดับการรับรู้ของบุคคลได้ละเอียดกว่ามาตรฐาน ISO 2631: 1997 [3]
- 2) การสั่นสะเทือนที่มีระดับการรับรู้ในระดับสูงสุดที่พบคือที่ด้านชลบุรีด้วยระดับ “รู้สึกไม่พอใจ” (unpleasant) ตามเกณฑ์ประเมินที่เสนอโดย Athansopoulos และ Pelekis [8] ซึ่งพบว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกิดจากรถบรรทุกหนักเคลื่อนที่ออกจากตู้รับชำระค่าผ่านทางในเวลาใกล้เคียงกันกับตู้รับชำระค่าผ่านทางข้างเคียง ซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่เสริมกัน
- 3) การสั่นสะเทือนที่ผิวจราจรมีขนาดที่สูงกว่าบนเกาะคอนกรีตที่ติดตั้งตู้รับชำระค่าผ่านทาง ผู้ปฏิบัติงานในตู้จะรับรู้ระดับการสั่นสะเทือนที่มีขนาดลดลงในช่วง 13 – 22% โดยมีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 17% แสดงให้เห็นว่าฐานรองรับของตู้รับชำระค่าผ่านทางสามารถนำไปพิจารณาศึกษาออกแบบเพิ่มเติมให้ลดระดับการสั่นสะเทือนลงได้ ซึ่งจะส่งผลต่อเจ้าพนักงานผู้ปฏิบัติงานได้โดยตรง

4) ด้านชลบุรีมีระดับการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อการรับรู้ของบุคคลชัดเจนมากที่สุด โดยมาจากลักษณะทางกายภาพของตำแหน่งช่องจราจรของระบรถทุกหนักในช่องจราจรซ้ายสุด ที่อยู่ในตำแหน่งปลายยื่นของหน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่อง จึงมีค่าความเร่งสูงกว่าด้านวงแหวนรอบนอกและด้านบางนาที่ตู้รับชำระค่าผ่านทางริมสุดไม่ได้ตั้งอยู่บริเวณปลายหน้าตัดคาน

5) ช่วงเวลาในการใช้เส้นทางไม่เสริมให้ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานอย่างมีนัยสำคัญ

6) ประเภทยานพาหนะมีผลต่อระดับการสั่นสะเทือนอย่างมีนัยสำคัญ โดยยานพาหนะหนักได้แก่ รถบรรทุก รถโดยสาร รถพ่วง รถกึ่งพ่วง มีระดับการสั่นสะเทือนใกล้เคียงกัน ในขณะที่รถยนต์นั่งส่วนบุคคลสี่ล้อทั่วไปมีระดับการสั่นสะเทือนที่ต่ำเนื่องจากมวลที่น้อยกว่ามาก โดยเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดระดับการรับรู้การสั่นสะเทือนสูงกว่าปกติได้แก่ การเคลื่อนที่เข้าออกช่องรับชำระค่าผ่านทางพร้อมกันในช่องจราจรที่อยู่ติดกัน และการเคลื่อนที่เข้าออกด้านของยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก เช่นรถพ่วงบรรทุกของเหลว

7) เมื่อเปรียบเทียบระดับการรับรู้ของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับบูรพาวิถีพบว่า มีระดับการรับรู้สั่นสะเทือนที่ยอมรับได้เทียบเคียงกับโครงสร้างประเภทสำนักงานและห้างสรรพสินค้า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ ขอขอบคุณนายเอกราช ปัญญาโรจน์ และนายทัตเทพ เวทประสิทธิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บสำรวจข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 134/2559 และได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการจัดตั้งหน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Reiher, H. and Meister, F.J. (1931). The effect of vibration on people. *U.S. Air Material Command*, 2(11), pp. 381-6.
- [2] Wiffin, A. C. and Leonard, D. R. (1971). A survey of traffic induced vibrations. *Transport and Road Research Laboratory*, 57 pp.
- [3] International Standard ISO 2631-1. (1997). Mechanical Vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General Requirements, *International Standards Organization*.
- [4] International Standard ISO 2631-2. (1989). Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 2: Human

- Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings, *International Standards Organization*.
- [5] British Standards Institution, BS 6472:1992. (1992). Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). *British Standards Institution*, London.
- [6] American National Standards Institute, ANSI S3 29-1993. (1993). Guide to the evaluation of human exposure to vibrations in buildings. *Acoustical Society of America*, New York, NY.
- [7] Deutsches Institut für Normung, DIN 4150: Parts 1, 2 and 3. (1983). Vibrations in buildings: effects on structures. *Provisional Standards Revised Draft - Part 3*, Berlin.
- [8] Athanasopoulos, G.A. and Pelekis, P.C. (2000). Ground vibrations from sheet pile driving in urban environment : measurements, analysis and effects on buildings and occupants, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, pp. 371-387.
- [9] ณะเมษฐ์ ประจวบกุลวัฒน์ (2559). การศึกษาผลกระทบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางพิเศษยกระดับ ที่มีผลต่อการรับรู้ของบุคคลบริเวณสถานีข้ามราคาผ่านทาง. งานนิพนธ์บัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ งานก่อสร้างและงานโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [10] Kelley, P.L., Dellorusso, S.J., and Russo, C.J. (1980). Building response to adjacent excavation and construction. *Effects of construction on structures, Geotechnical Special Publication, ASCE*, 84, pp. 80-97.
- [11] Lenzen, K.H. (1966). Vibration of Steel Joist – Concrete Slab Floors. *Engineering Journal, AISC*, 133-136.
- [12] Skipp, B.O. (1997). Ground vibration-codes and standards. *Proceedings of the Conference on Ground Dynamics and Man-made Processes*. Institution of Civil Engineers, London.
- [13] Von Gierke, H. E. and Goldman, D. E. (1988). Effects of shock and vibration on man. *Shock and vibration handbook*, McGraw-Hill, pp. 41–58.