

**การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน
จากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
Field Verification of Bridge Natural Frequency Identification
from Acceleration Response of Passenger Car**

อิฐวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์¹ พัทธพงษ์ อาสนจินดา^{2*}

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Athiwat Maneeratroj¹ Pattarapong Asnachinda^{2*}

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,

169 Saensuk, Muang, Chonburi 20131

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,

169 Saensuk, Muang, Chonburi 20131

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม เพื่อนำเสนอกระบวนการวิเคราะห์และรูปแบบการทดสอบที่เหมาะสม รวมไปถึงศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยได้ทำการทดสอบภาคสนามกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้นและใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลเป็นยานพาหนะทดสอบ ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถหาค่าได้ด้วยวิธีทางอ้อมจากกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งที่นำเสนอ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่ากระบวนการที่นำเสนอสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ในทุกกรณีทดสอบ ซึ่งพบว่าค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เป็นความถี่ที่มีค่าตรงกันกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดทางตรงที่สะพาน

คำสำคัญ: ความถี่ธรรมชาติของสะพาน, การทดสอบทางอ้อม, รถยนต์นั่งส่วนบุคคล, ผลตอบสนองความเร่ง

ABSTRACT

This research studied bridge natural frequency identification from a passenger car's acceleration response by field testing. The research aimed to propose the analytical process and the appropriate testing scenario. In addition, effect of relevant parameters was studied. The field test was carried out with short span reinforce concrete bridges and passenger car as the test vehicles. The bridge natural frequency can be identified by using indirect method from the proposed process of signal analysis of the measured acceleration response. Regarding to the result of experimental study, it was

revealed that the proposed process was able to identify the bridge fundamental frequency in every experimental case. Moreover, it was observed that the analyzed frequencies were exactly the same to those obtained from the direct measurement to the bridge.

Keyword: Bridge natural frequency, indirect test, passenger car, acceleration response.

1. บทนำ

การประเมินสภาพความแข็งแรงของสะพานโดยทั่วไปแล้วนั้นจะมุ่งประเด็นไปที่การหาค่าความถี่ของสะพาน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการตรวจสอบ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นพารามิเตอร์พื้นฐาน ซึ่งหากเกิดความเสียหายกับตัวโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพต่างๆ จะส่งผลให้ค่าสตีฟเนสของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่เนื่องจากวิธีการหาค่าความถี่ในปัจจุบัน จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยตรงที่สะพาน ซึ่งเกิดความยากลำบากในการติดตั้งและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งกลายเป็นข้อจำกัดของวิธีทางตรง ด้วยเหตุนี้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อม (indirect approach) จึงเป็นวิธีที่ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อความสะดวก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนิน วิธีการทดสอบทางอ้อมนั้น ทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดผลตอบสนองความถี่ไว้ที่ยานพาหนะทดสอบแทนการติดตั้งโดยตรงที่สะพาน ซึ่งมีแนวคิดที่ว่าสะพานจะส่งต่อการสั่นไหวไปยังยานพาหนะซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยยานพาหนะจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น (exciter) ให้เกิดการสั่นไหวและตัวรับ (receiver) ผลตอบสนองการสั่นไหวในช่วงเวลาเดียวกัน โดยงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้ยืนยันความเป็นไปได้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทดสอบทางอ้อมทั้งในด้านการศึกษาเชิงทฤษฎี [1-5] การทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม [6-9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งการศึกษาจะทำการทดสอบในภาคสนามกับสะพานจริงที่มีการใช้งานในปัจจุบันด้วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีอยู่ในตลาดรถยนต์ของประเทศไทย โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เคลื่อนผ่าน และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT) ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่จากเทคนิคการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD) [3,5] รวมทั้งเพิ่มเติมวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ นั้น จะพิจารณาระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ และศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวจากระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีทดสอบจากหัววัดความถี่ที่ติดตั้งที่สะพานโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะสัญจรผ่านนั้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติโดยเป็นผลจากมวลและความถี่ของยานพาหนะ [10,11] โดยผลการศึกษาจะนำเสนอแนวทางการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อมต่อไป

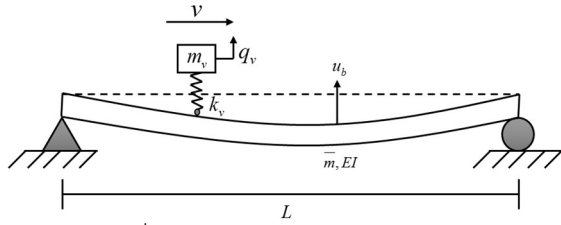
บุคคลที่มีอยู่ในตลาดรถยนต์ของประเทศไทย โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เคลื่อนผ่าน และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT) ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่จากเทคนิคการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD) [3,5] รวมทั้งเพิ่มเติมวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ นั้น จะพิจารณาระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ และศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวจากระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีทดสอบจากหัววัดความถี่ที่ติดตั้งที่สะพานโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะสัญจรผ่านนั้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติโดยเป็นผลจากมวลและความถี่ของยานพาหนะ [10,11] โดยผลการศึกษาจะนำเสนอแนวทางการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อมต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

งานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะที่

เคลื่อนผ่าน (vehicle-bridge interaction) [1,3,6] โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อจำลองพฤติกรรมนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะ

จากแบบจำลองดังรูปที่ 1 สามารถวิเคราะห์หาผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ [5] ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของยานพาหนะเทียบกับเวลาดังสมการที่ 1

$$\ddot{q}_v(t) = \sum_n \left\{ \underbrace{\ddot{A}_{dl,n} \cos\left(\frac{(n-1)\pi V}{L}t + \ddot{A}_{dr,n} \cos\left(\frac{(n+1)\pi V}{L}t - \ddot{A}_{v,n} \cos\omega_n t\right)}_{\text{Driving Frequency}} + \underbrace{\ddot{A}_{bl,n} \cos\left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi V}{L}t\right) - \ddot{A}_{br,n} \cos\left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi V}{L}t\right)}_{\text{Bridge Frequency}} \right\} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีองค์ประกอบของสัญญาณความเร่งหลายความถี่ด้วยกัน ได้แก่ 1) ความถี่ขับเคลื่อนของยานพาหนะ $\eta = n\pi V / L$ 2) ความถี่ของยานพาหนะ (ω_v) และ 3) ความถี่ของสะพานซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติของสะพานและเบี่ยงเบนด้วยค่าความถี่ขับเคลื่อน ($\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$ และ $\omega_{br,n} = \omega_b + \eta$) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะในสมการที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1 และสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 8

โดยหากพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งของยานพาหนะเพื่อพิจารณาองค์ประกอบความถี่ของสะพานแล้วนั้น จากสมการข้างต้น พบว่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น ได้แก่ ความเร็วของยานพาหนะ มวลของยานพาหนะ และความถี่ของยานพาหนะ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองความเร่งของยานพาหนะ

สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์
$\ddot{A}_{dl,n}$	$A_{dl,n} \omega_{b,n-1}^2 S_{n-1}^2$
$\ddot{A}_{dr,n}$	$A_{dr,n} \omega_{b,n+1}^2 S_{n+1}^2$
$\ddot{A}_{v,n}$	$A_{v,n} \omega_v^2$
$\ddot{A}_{bl,n}$	$A_{bl,n} \omega_{b,n}^2 (1 - S_n)^2$
$\ddot{A}_{br,n}$	$A_{br,n} \omega_{b,n}^2 (1 + S_n)^2$

$$\text{โดยที่} \quad A_{dl,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)} \quad (2)$$

$$A_{dr,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} \quad (3)$$

$$A_{v,n} = \frac{2\Delta_{st,n} \mu_n^2 S_n^2}{(1 - S_n^2)} \left[\frac{1}{(1 - \mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)(1 - \mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} - \frac{1}{(1 - \mu_n^2(1 - S_n^2))(1 - \mu_n^2(1 + S_n)^2)} \right] \quad (4)$$

$$A_{bl,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_n^2(1 - S_n)^2)} \quad (5)$$

$$A_{br,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_n^2(1 + S_n)^2)} \quad (6)$$

$$S_n = \frac{n\pi V}{L\omega_{b,n}} = \frac{\eta}{\omega_{b,n}} \quad (7)$$

$$\Delta_{st,n} = \frac{-2m_v g L^3}{n^4 \pi^4 EI} \quad (8)$$

2.2 วิธีการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD)

วิธีการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ได้ถูกเสนอและประยุกต์ใช้ในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณความเร่งที่มีองค์ประกอบจากหลายค่าความถี่ [3] โดยวิธี EMD ใช้การประมาณลักษณะฟังก์ชันของสัญญาณเพื่อแยกสัญญาณออกเป็นองค์ประกอบที่โหมดความถี่ย่อยต่างๆ ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันโหมดแท้จริง (Intrinsic Mode Function, IMF) โดยฟังก์ชันโหมดของสัญญาณซึ่งมี

ความถี่สูงหรือมีคาบสั้นจะถูกแยกออกมาเป็นลำดับต้นๆ และฟังก์ชันโหมดที่มีความถี่ต่ำกว่าหรือคาบยาวกว่าจะถูกแยกออกมาตามลำดับถัดไป และจะหยุดเมื่อไม่สามารถแยก IMF ออกได้อีก ซึ่งผลรวมของฟังก์ชันโหมดทั้งหมดและสัญญาณคงเหลือจากการหักลบด้วย IMF ที่แยกออกจากสัญญาณไปแล้วจะมีค่าเท่ากับสัญญาณตั้งต้น แสดงได้ดังสมการที่ 9 โดยสมมติฐานของวิธี EMD เพื่อระบุสัญญาณใดมีคุณสมบัติเป็น IMF จะประกอบด้วย 2 เงื่อนไข ได้แก่ 1) จำนวนยอดของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด และจำนวนของข้อมูลที่ข้ามผ่านเส้นค่าเฉลี่ยศูนย์ของสัญญาณ (zero-mean) ต้องมีจำนวนที่เท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 1 ค่า และ 2) ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นกรอบ (envelope line) หรือเส้นที่ลากเป็นขอบของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดต้องเท่ากับ 0

$$\mathbf{a}_v = \sum_{j=1}^n \mathbf{IMF}_j + \mathbf{r}_n \quad (9)$$

โดยที่ $\mathbf{a}_v$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งตรวจวัด

$\mathbf{r}_n$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งที่เหลือซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบความถี่เดียว

งานวิจัยนี้ได้นำประโยชน์ของวิธี EMD มาประยุกต์โดย IMF ที่ความถี่ต่างๆซึ่งแยกออกมาได้จะถูกนำมาพิจารณาว่า IMF ใดไม่ได้มาจากพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ได้แก่ IMF ซึ่งมีความถี่ตรงกับพฤติกรรมการสั่นไหวของช่วงล่างรถยนต์ทดสอบที่สั่นไหวจากการสั่นไหวตามปกติซึ่งมิใช่เกิดจากการสั่นไหวของสะพาน และ IMF ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนในการตรวจวัด จากนั้นจึงนำ IMF ดังกล่าวนี้ออกจากสัญญาณความเร่งตรวจวัดดังสมการที่ 10 ก่อนนำมาวิเคราะห์ความถี่จากสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ต่อไป ซึ่งกระบวนการที่อธิบายข้างต้นนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตซึ่งพิจารณาว่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของสะพานคือ IMF ตัวสุดท้ายที่มีคาบยาวที่สุด [3]

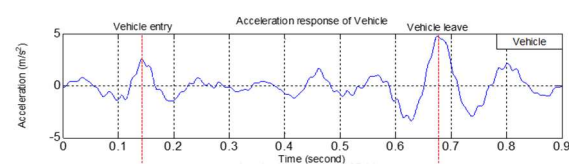
$$\overline{\mathbf{a}}_v = \mathbf{a}_v - \mathbf{IMF}_v \quad (10)$$

โดยที่ $\overline{\mathbf{a}}_v$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งตรวจวัดที่นำไปวิเคราะห์ความถี่

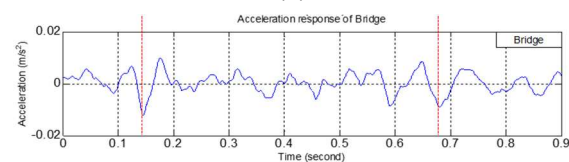
$\mathbf{IMF}_v$ คือ เวกเตอร์องค์ประกอบของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ไม่ได้มาจากสะพาน

2.3 วิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง

ในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน ในช่วงรอยต่อบริเวณคอสะพานที่มีความไม่ราบเรียบ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากความขรุขระนี้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2



(ก)



(ข)

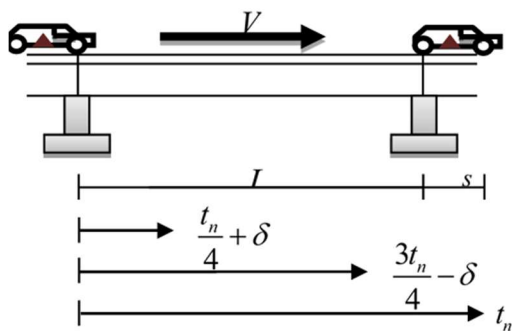
รูปที่ 2 สัญญาณความเร่งที่เกิดการกระแทกของ

ยานพาหนะช่วงเข้าและออกจากสะพาน

(ก) รถยนต์ทดสอบ และ (ข) สะพาน

ด้วยเหตุนี้ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของสะพานจึงมีองค์ประกอบความถี่เนื่องจากการสั่นไหวจากผลของความขรุขระดังกล่าว ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากการสั่นไหวที่ไม่ได้เกิดจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะที่เคลื่อนผ่าน โดยผลดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้สังเกตพบการกระแทกในสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นเพื่อลดผลของการกระแทกที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงเห็นว่าหากพิจารณาช่วงสัญญาณความเร่งเฉพาะเวลาที่รถยนต์อยู่ในช่วงสะพานทั้งสองเพลลา และทำการตัดช่วงสัญญาณความเร่งบริเวณที่รถยนต์ผ่านช่วงรอยต่อสะพานที่มีการกระแทกออกน่าจะได้ผลลัพธ์ในการแยกองค์ประกอบความถี่ของสะพานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่งเพื่อลดผลของความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นขณะยานพาหนะเคลื่อนผ่านบริเวณคอสะพาน

จากการทดสอบในขณะที่ยานพาหนะที่มีความยาวช่วงเพลลา s เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านสะพานที่มีความยาวช่วง L ซึ่งทำให้เกิดการกระตุ้นทั้งหมดของยานพาหนะตั้งแต่เข้าจนกระทั่งออกจากสะพานที่เวลา t_n เท่ากับ $L+s$ เพื่อความสะดวกในการตัดสัญญาณ จะพิจารณาแบ่งช่วงสัญญาณความเร่งออกเป็น 4 ส่วน และตัดสัญญาณความเร่งที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ $\frac{t_n}{4}$ ได้แก่ ที่เวลา $\frac{t_n}{4}$ และเวลา $\frac{3t_n}{4}$ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคันสำหรับการทดสอบนี้ เนื่องจากในการทดสอบความเร็วยานพาหนะอาจจะไม่ได้คงที่ตลอดการทดสอบดังนั้น เพื่อให้ช่วงการตัดสัญญาณครอบคลุมและมั่นใจได้มากขึ้นว่าเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน จะพิจารณาช่วงสัญญาณที่ตัดช่วงทั้งสองฝั่งเพิ่มอีกฝั่งละ δ ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณา δ เท่ากับ 10% ของค่า $\frac{t_n}{4}$ ทั้งช่วงขาเข้าสะพานและขาออกสะพาน โดยเพิ่มช่วงเวลาที่เริ่มตัดสัญญาณสำหรับขาเข้า และหักลบออกในช่วงเวลาที่เริ่มตัดสัญญาณสำหรับขาออก เพื่อให้มั่นใจได้ว่าช่วงที่ตัดสัญญาณนั้นเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่ในช่วงสะพานเต็มคัน ดังแสดงในรูปที่ 3

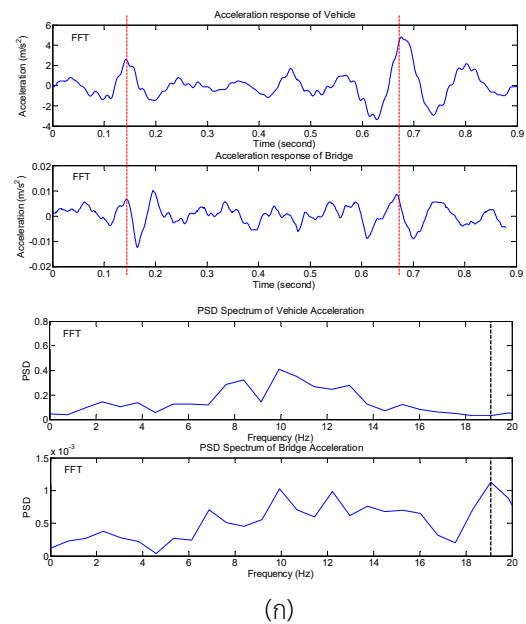


รูปที่ 3 การตัดช่วงสัญญาณความเร่ง

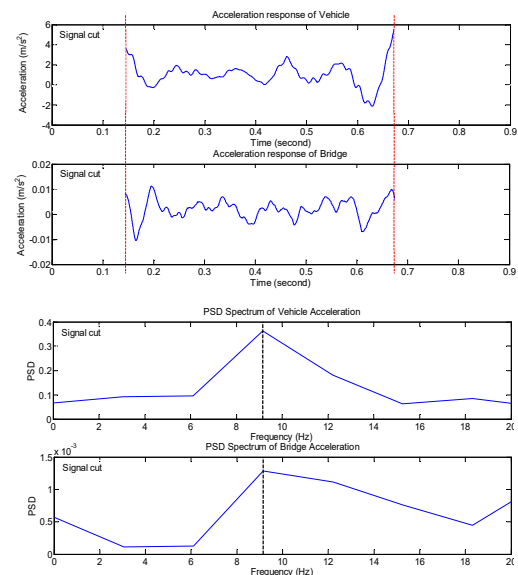
เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าช่วงสัญญาณความเร่งที่ทำการตัดเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน จึงจะได้เงื่อนไขของระยะห่างช่วงเพลลาของรถยนต์ (s) ที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับความยาวช่วงสะพานและช่วงเวลาที่ตัดสัญญาณดังสมการที่ 11

$$s \leq \frac{\left(\frac{t_n}{4} + \delta\right)L}{\frac{3t_n}{4} - \delta} \quad (11)$$

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ปกติ และการใช้วิธีการตัดสัญญาณ ซึ่งพบว่าจะได้ยอดความถี่จากสเปกตรัมที่ชัดเจนขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 สัญญาณความเร่งและสเปกตรัม

(ก) FFT และ (ข) วิธีการตัดช่วงสัญญาณ

3. การทดสอบภาคสนาม

3.1 การทดสอบภาคสนาม

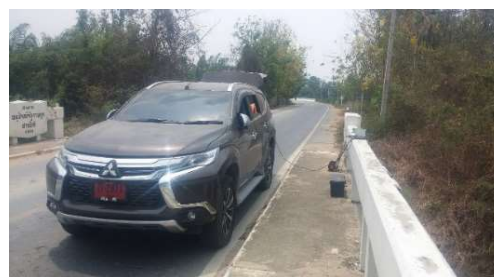
สะพานที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นสะพานคอนกรีตช่วงสั้นทั้งแบบคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดลพบุรี รับผิดชอบโดยกรมทางหลวงชนบท โดยสะพานที่ถูกเลือกมาทดสอบจำนวน 3 สะพานที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งสะพานลักษณะนี้มีจำนวนมากในประเทศไทย โดยก่อนการทดสอบภาคสนามนั้นต้องทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทั้ง 3 ตัว โดยเลือกใช้การทดสอบการสั่นไหวอิสระ (free vibration test) ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทั้ง 3 แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ใช้ทดสอบ

สะพาน	ความยาวช่วง (m)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	สัญลักษณ์
สะพานพ.ศ. 2550	9	12.21	B1
สะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์	8	15.26	B2
สะพานห้วยหนองซาก	9	10.68	B3

3.2 ยานพาหนะทดสอบ

ยานพาหนะที่ใช้ทดสอบจะเลือกจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่สามารถหาได้ในตลาดรถยนต์ภายในประเทศไทย โดยถูกเลือกมา 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) คือ รถยนต์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น Pajero Sport ปี 2016 และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (pickup truck) คือ รถยนต์ยี่ห้อ Toyota รุ่น Hilux Vigo Champ ปี 2012 ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรถยนต์ทั้งสองประเภทมีความถี่ที่เป็นผลของการสั่นไหวที่ต่างกันและมีช่วงล่างที่ต่างกัน



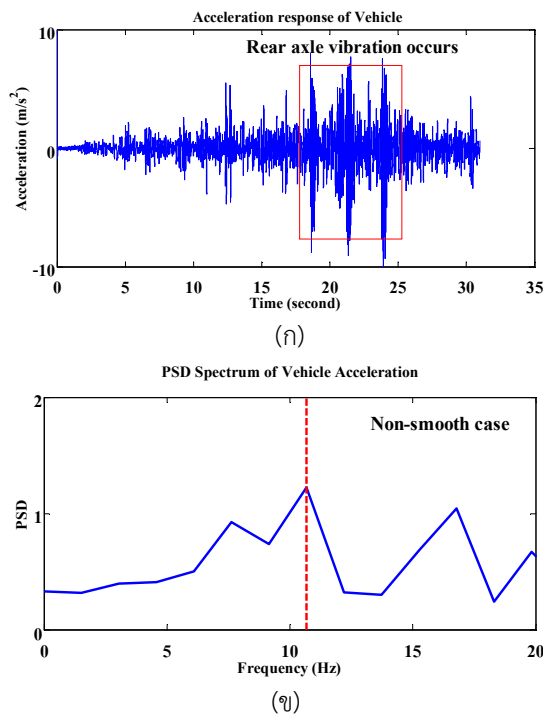
(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ยานพาหนะทดสอบ
(ก) SUV และ (ข) Pickup

ในการศึกษานี้ได้ทดลองติดตั้งหัววัดความเร่งที่ตัวถังในช่วงกึ่งกลางช่วงเพลลา และที่บริเวณใต้เพลลาหลัง ซึ่งพบว่ามีค่าความถี่จากสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้ง ณ กึ่งกลางช่วงเพลลา ไม่พบความถี่ของสะพานซึ่งอาจเป็นเพราะช่วงล่างรถยนต์อาจดูดซับขนาดการสั่นสะเทือนของสะพานไปจนไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งบริเวณใต้เพลลาหลังพบว่ามีค่าความถี่ของสะพานแฝงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการสั่นไหวของตัวยานพาหนะด้วยการทดสอบให้รถยนต์เคลื่อนผ่านแถบขรุขระสำหรับชะลอความเร็ว (rumble stripes) บนพื้นถนนราบ ดังลักษณะสัญญาณในกรอบสีแดงที่แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งเพลลาจะมีการสั่นไหวที่ไม่ได้เกิดจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะ โดยการสั่นไหวดังกล่าวคล้ายกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าและออกสะพานในช่วงรอยต่อซึ่งไม่ราบเรียบ ทำให้ได้ค่าความถี่ที่พิจารณาได้ว่าเป็นผลจากยานพาหนะ ซึ่งจะพิจารณาความถี่นั้นให้เป็นความถี่ที่สามารถคัดกรองทิ้งได้ในการวิเคราะห์ โดยตารางที่ 3 แสดงค่าความถี่ของรถยนต์ทดสอบทั้งรถ SUV และรถ Pick up ที่พบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านแถบชะลอความเร็ว



รูปที่ 6 สัญญาณความเร่งและสเปกตรัมที่เพลาลังของรถ SUV ขณะเคลื่อนที่บนพื้นถนนที่มีแถบขรุขระชะลอความเร็ว
(ก) สัญญาณความเร่ง (ข) สเปกตรัม

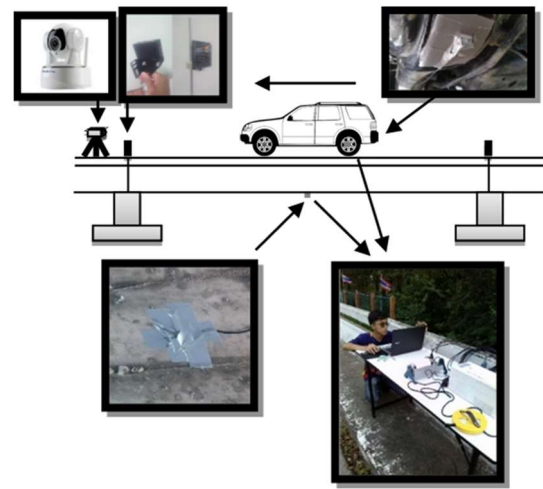
ตารางที่ 3 ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังของรถยนต์ทดสอบเกิดการสั่นไหว เมื่อเคลื่อนที่บนพื้นถนนที่มีแถบขรุขระชะลอความเร็ว

ยานพาหนะ	น้ำหนัก (kg)	ความถี่ที่พบ ขณะที่เกิด การสั่นไหว (Hz)	ความยาว ช่วงล้อ (mm)
SUV	2,100	10.68	2,800
Pickup	1,920	9.155	3,085

3.3 การเตรียมการทดสอบ

อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสัญญาณความเร่ง คือ หัววัดความเร่ง (acceleration transducer) รุ่น AS-2GB ยี่ห้อ KYOWA ซึ่งสามารถวัดความเร่งได้สูงสุด 2g โดยทำการติดตั้งหัววัดความเร่งทั้งที่สะพานและยานพาหนะทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่กึ่งกลางความยาว

ช่วงของสะพาน โดยอยู่ในตำแหน่งที่แนวล้อของยานพาหนะเคลื่อนผ่านและที่กึ่งกลางเพลาลังของยานพาหนะและทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบใช้แสงที่บริเวณปลายสะพานเพื่อช่วยตัดสัญญาณในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดในการทดสอบภาคสนามแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลทดสอบจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ 25,000 Hz ซึ่งเป็นความละเอียดค่าสูงสุดของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยได้ทำการกรองสัญญาณรบกวนด้วยการกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low-pass Butterworth filter) ที่ 45 Hz

3.4 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านในภาคสนามนั้น จะทำการทดสอบด้วยกันทั้งหมด 39 กรณี โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ 3 ชนิด ได้แก่ สะพาน ยานพาหนะทดสอบและความเร็วของยานพาหนะ ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งในกรณีของสะพาน พ.ศ. 2550 (B1) พบว่าบริเวณที่ตั้งของสะพานนั้นเชื่อมต่อกับทางโค้งราบจึงทำให้ยากต่อการทำความเร็วของยานพาหนะที่ความเร็วสูง จึงทำการทดสอบได้ที่ความเร็ว 4 ระดับ ในช่วง 20-50 กม./ชม. เท่านั้น

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนในการทดสอบ

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว*
B1	SUV Pickup	7 ระดับความเร็ว
B2		ในช่วง 20-80
B3		กม./ชม.

*สะพาน B1 ทดสอบ 4 ระดับความเร็ว 20-50 กม./ชม.

3.5 ค่าความคลาดเคลื่อน

จากงานวิจัยในอดีต [10,11] และจากผลการศึกษา นั้น พบว่าการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานจะสั่นไหวด้วยความถี่ซึ่งบิดเบือนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติด้วยผลของยานพาหนะ ทำให้หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนโดยเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงนั้นจะประเมินได้ถึงความสามารถในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ แต่ไม่สะท้อนถึงพฤติกรรมของระบบการทดสอบทางอ้อม แต่เมื่อหากพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่การสั่นไหวที่เกิดขึ้นตรวจวัดโดยตรงที่ได้ห้องสะพาน จะแสดงได้ว่าวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมซึ่งวัดความถี่การสั่นไหวจากยานพาหนะนั้นมีพฤติกรรมเหมือนกับความถี่ที่สะพานเกิดการสั่นไหวจริงหรือไม่ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่พิจารณาจึงประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนของความถี่สะพานที่ประมาณได้เทียบกับความถี่ธรรมชาติซึ่งได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระดังสมการที่ 12 และความคลาดเคลื่อนของความถี่สะพานที่ประมาณได้เทียบกับความถี่ของสะพานที่สั่นไหวเมื่อรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพานหรือเรียกอย่างย่อว่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ดังสมการที่ 13

$$error_{f_{natural}} = \left(\frac{|f_{indirect} - f_{bridge}|}{f_{bridge}} \right) \times 100 \% \quad (12)$$

$$error_{f_{ambient}} = \left(\frac{|f_{indirect} - f_{ambient}|}{f_{ambient}} \right) \times 100 \% \quad (13)$$

โดยที่ f_{bridge} คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการทดสอบและตรวจวัดการสั่นไหวอิสระที่โครงสร้างสะพาน

$f_{ambient}$ คือ ความถี่การสั่นไหวของสะพานเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ทดสอบซึ่งได้จากการตรวจวัดที่โครงสร้างสะพาน

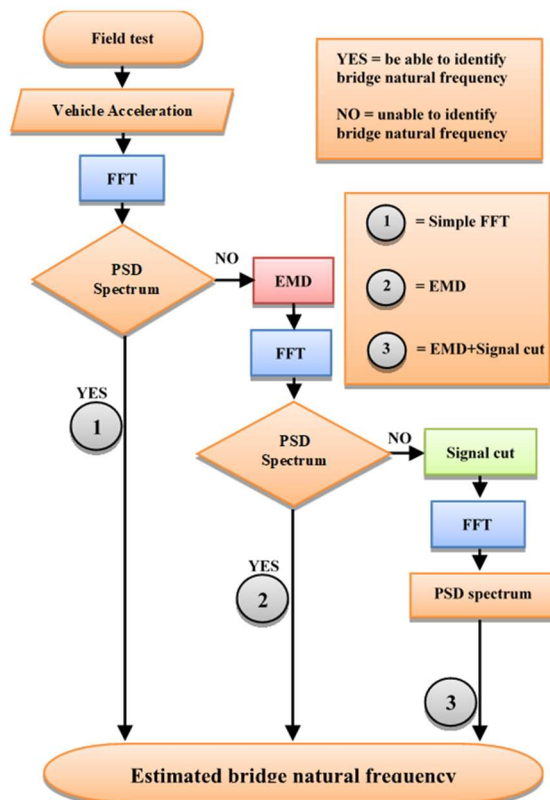
$f_{indirect}$ คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อม ซึ่งได้จากการตรวจวัดที่เพลารถยนต์ทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

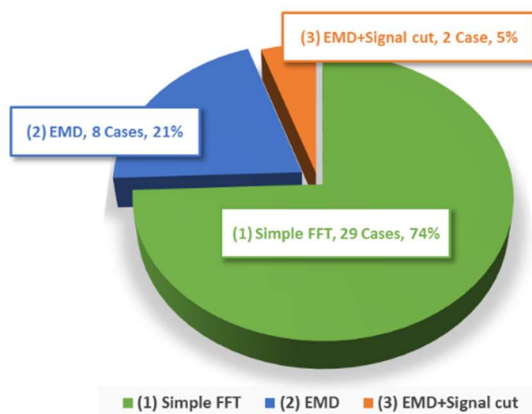
4.1 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งเพื่อระบุค่าความถี่สะพาน

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหากระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์ความถี่ของสะพานจะพิจารณาจากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากรถยนต์ทดสอบ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วตามปกติ (Simple FFT) 2) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่หักลบ IMF ที่ไม่พึงประสงค์ออกจากวิธีแยกแบบเชิงประจักษ์ก่อนแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD) และ 3) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งในขั้นตอนที่ 2 (EMD) ซึ่งได้นำมาทำการตัดช่วงสัญญาณแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD + Signal cut) โดยทั้งสามขั้นตอนมีกระบวนการวิเคราะห์ดังในรูปที่ 8

ทั้งนี้การวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนจะมุ่งเน้นไปที่การระบุค่าความถี่โดยเทียบกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงเพื่ออธิบายว่าวิธีทางอ้อมสามารถใช้แทนวิธีทางตรงได้หรือไม่ จากนั้นจึงพิจารณาระดับความถูกต้องของเมื่อเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน



รูปที่ 8 แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 9 แผนผังสัดส่วนการระบุค่าความถี่ได้ของแต่ละขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความถี่

ผลการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการในขั้นตอนแรก (Simple FFT) สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ 29 กรณีจาก 39 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 74 ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่ากรณีส่วนใหญ่ที่สามารถระบุค่าตอบได้ถูกต้องในขั้นตอนนี้คือยานพาหนะที่สัญจรด้วย

ความเร็วประมาณ 40-60 กม./ชม. โดยยานพาหนะที่มีความเร็วต่ำและสูงกว่าช่วงดังกล่าวพบว่าจะระบุค่าความถี่ได้ยาก เนื่องจากหากรถยนต์เคลื่อนที่เข้าเกินไปจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถและสะพานได้น้อย

ในขณะที่หากรถยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินไปจะทำให้สัญญาณมีความละเอียดของข้อมูลที่ต่ำ และด้วยช่วงเวลาที่สั้นมากจึงทำให้สะพานสั่นไหวได้จำนวนน้อยรอบซึ่งอาจทำให้ระบุค่าความถี่ได้ยากยิ่งขึ้น อีกทั้งความละเอียดของสเปกตรัมความถี่ที่ได้จาก FFT จะมีค่าเท่ากับส่วนกลับของระยะเวลาของสัญญาณตรวจวัด ดังนั้นโดยปกติแล้วกรณีรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าจะได้สเปกตรัมความถี่ที่มีความละเอียดต่ำกว่ากรณีรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ

จากกระบวนการแรก พบว่ามีกรณีที่ยังไม่สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้จำนวน 10 กรณี จึงได้นำไปวิเคราะห์ในกระบวนการที่สอง (EMD) โดยนำสัญญาณความถี่มาแยก IMF ด้วยวิธี EMD และตัด IMF ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรถยนต์ทดสอบออกจากสัญญาณความถี่ตรวจวัด แล้วจึงนำสัญญาณไปสร้างสเปกตรัมจากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อระบุค่าความถี่ของสะพานต่อไป ซึ่งพบว่าขั้นตอนนี้สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ถึง 8 กรณี จาก 10 กรณีที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้จากการขั้นตอนแรก หรือคิดเป็นร้อยละ 21 ของกรณีทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี EMD สามารถกำจัดค่าความถี่ที่ไม่พึงประสงค์จากการสั่นของรถยนต์ออกจากสัญญาณหลัก และทำให้สเปกตรัมที่ได้มีค่าความถี่ของสะพานที่ชัดเจนและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดทางตรง

อย่างไรก็ตามจากกระบวนการที่สอง ยังพบว่ามี 2 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของกรณีทั้งหมดที่ยังไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้ จึงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการสุดท้าย ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการที่ยานพาหนะมีการสั่นสะเทือนมากจากผลของความขรุขระหรือความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวทางบริเวณรอยต่อคอสะพาน ดังนั้นในขั้นตอนนี้สัญญาณความถี่ที่แยก

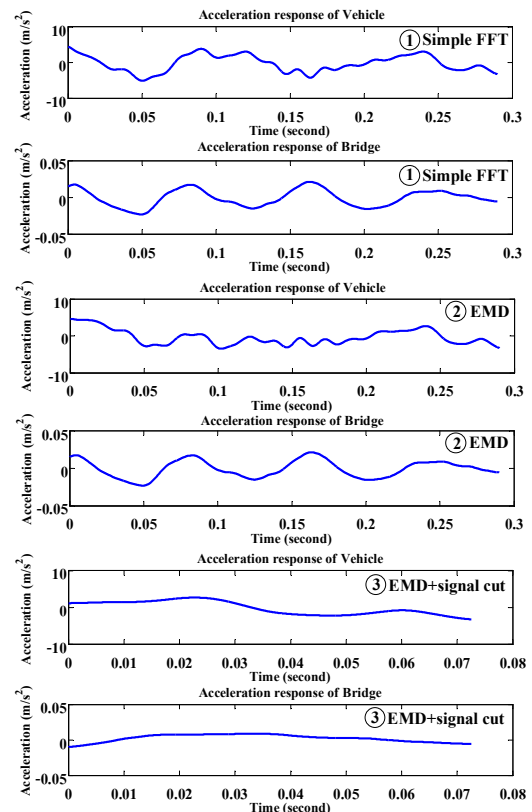
องค์ประกอบของยานพาหนะด้วยวิธี EMD แล้ว จะถูกนำมาตัดช่วงเวลาในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกในช่วงรอยต่อของสะพานออก เพื่อเป็นการลดผลการสั่นสะเทือนของตัวรถยนต์เองดังที่ได้สังเกตและอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการตัดสัญญาณในขั้นตอนสุดท้าย (EMD + Signal cut) นี้แล้ว พบว่าค่าความเร่งของยานพาหนะและค่าสเปกตรัมที่ได้สามารถสังเกตและระบุค่าความถี่ของสะพานได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ

จากกระบวนการทั้งสามขั้นตอน สามารถแสดงได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ในทุกกรณีทดสอบ โดยผลลัพธ์ของแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบด้วยวิธีทางอ้อมและวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่นำเสนอสามารถใช้แทนการทดสอบทางตรง ที่เป็นการตรวจวัดโดยตรงที่สะพาน เนื่องจากการสั่นของยานพาหนะได้ เนื่องจากค่าความถี่ที่ได้นั้นตรงกันกับค่าความถี่จากสเปกตรัมของค่าความเร่งที่ติดตั้งใต้ท้องสะพานในทุกกรณีที่ทดสอบ

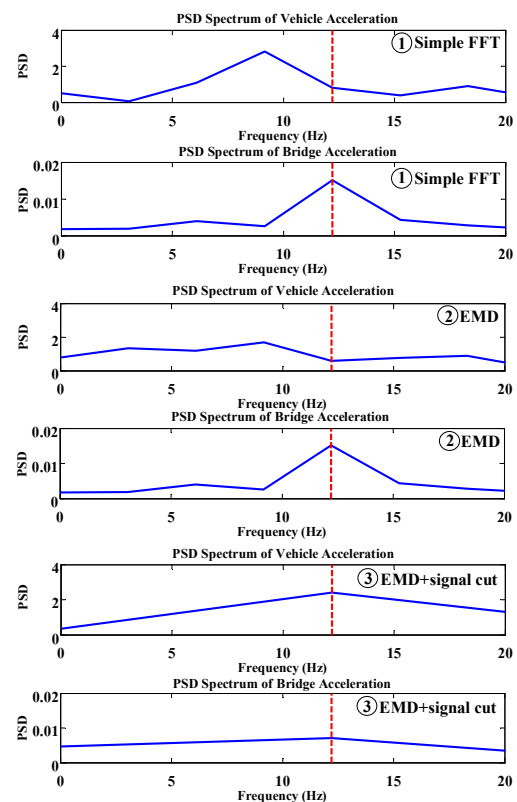
4.2 ผลของพารามิเตอร์

4.2.1 ประเภทและความถี่ของสะพาน

สะพานที่ทำการศึกษา 3 แห่ง ซึ่งพบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติที่ทดสอบได้แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าประเภทและความถี่ของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่จากสัญญาณความเร่งเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่าความถี่ที่ตรวจวัดทางตรงของทั้งสามสะพานด้วยกระบวนการที่นำเสนอมีค่าเป็นศูนย์ในทุกกรณี เมื่อทดสอบด้วยรถยนต์ทั้งประเภท SUV และ Pickup ดังแสดงในตารางที่ 5 นั้นแสดงว่าเมื่อทำการทดสอบกับสะพานที่มีความถี่เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบความถี่ของสะพานจะสังเกตจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากยานพาหนะได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อค่าความถี่ของสะพานและยานพาหนะแตกต่างกันมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันลดลง ซึ่งแสดงว่าวิธีการทดสอบทางอ้อมนี้สามารถใช้แทนการทดสอบทางตรงได้ทุกกรณีสำหรับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้น



รูปที่ 10 สัญญาณความเร่งของรถประเภท Pickup



รูปที่ 11 สเปกตรัมความถี่ของรถยนต์ประเภท Pickup

4.2.2 ประเภทของยานพาหนะ

ยานพาหนะทดสอบที่ใช้เป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) ซึ่งยานพาหนะทดสอบที่เลือกใช้นี้มีน้ำหนักและลักษณะช่วงล่างที่ต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า รถประเภท SUV ที่ใช้เป็นยานพาหนะทดสอบนั้น ทำให้ระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงได้ง่ายกว่า โดยส่วนมากแล้วสามารถระบุความถี่ได้จากกระบวนการ FFT แบบทั่วไป และทุกกรณีสามารถระบุความถี่สะพานได้ในขั้นตอนของ EMD โดยไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตัดช่วงสัญญาณมาช่วยในการวิเคราะห์

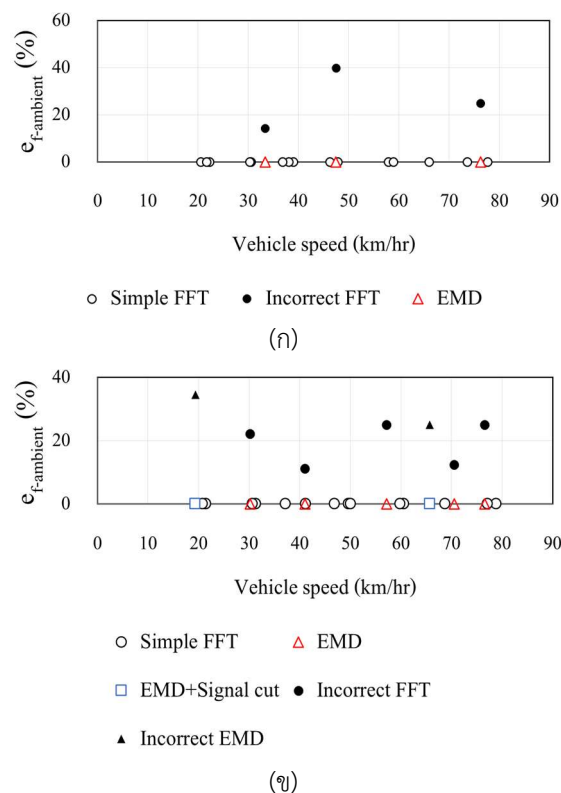
ในขณะที่รถประเภท Pickup มีหลายกรณีที่พบว่า จำเป็นต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่มากขึ้นทั้งการใช้วิธี EMD และการตัดช่วงสัญญาณ ถึงจะได้ค่าความถี่สะพาน โดยรูปที่ 12 แสดงถึงระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่สะพานจากการทดสอบทางตรง ของรถประเภท SUV และ Pickup

จากรูปที่ 12 จะสังเกตได้ว่ารถยนต์ประเภท SUV ที่เลือกใช้ไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับรถประเภท Pickup เนื่องจากว่ารถประเภท SUV มีน้ำหนักที่มากกว่าทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่ได้ชัดเจนกว่า [12] และการที่ช่วงล่างของรถประเภท SUV ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความหน่วงที่สูงกว่า ทำให้การสั่นไหวของยานพาหนะที่ถูกกระตุ้นจากสะพานหยุดสั้นได้เร็วกว่ารถประเภท Pickup และในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้ผลการสั่นไหวของรถยนต์เองมีแอมพลิจูดมากซึ่งอาจไปบดบังความถี่ของสะพานได้ โดยเฉพาะกรณีของรถประเภท Pickup ที่ช่วงล่างมีความหน่วงต่ำกว่ารถประเภท SUV ซึ่งช่วงล่างมีความนุ่มนวลและความหน่วงสูงกว่า จึงทำให้การสั่นสะเทือนของรถที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยความชุกหรือผลของรอยต่อบริเวณปลายสะพานมีผลต่อสัญญาณความถี่ที่นานกว่ากรณีที่ยานพาหนะมีความหน่วงสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการ EMD เข้ามาช่วยเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ของยานพาหนะออกจาก

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่จากการวัดทางตรง

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{ambient}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD + Signal cut
B1	SUV	22.31	0		
		30.54	0		
		38.98	0		
		47.86	0		
	Pickup	19.37	46.87	34.60	0
		30.17	22.21	0	
		37.20	0		
		46.89	0		
		57.14	25.02	0	
		65.72	25.02	25.02	0
		76.60	25.02	0	
B2	SUV	20.57	0		
		30.33	0		
		38.09	0		
		47.45	40.01	0	
		57.95	0		
		66.05	0		
		77.63	0		
	Pickup	21.44	0		
		31.30	0		
		41.03	11.14	0	
		49.66	0		
		60.63	0		
		70.59	12.45	0	
		78.90	0		
B3	SUV	21.74	0		
		33.34	14.28	0	
		36.88	0		
		46.28	0		
		58.91	0		
		73.64	0		
		76.23	25.02	0	
	Pickup	20.78	0		
		30.68	0		
		41.22	0		
		50.08	0		
		59.89	0		
		68.79	0		
		77.14	0		

สัญญาณความเร่งที่ตรวจวัด ซึ่งจะช่วยให้ยอดของค่าความถี่สะพานในสเปกตรัมเด่นชัดขึ้น



รูปที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้
เทียบกับค่าความถี่จากการวัดทางตรง
(ก) รถ SUV และ (ข) รถ Pickup

4.2.3 ความเร็วยานพาหนะ

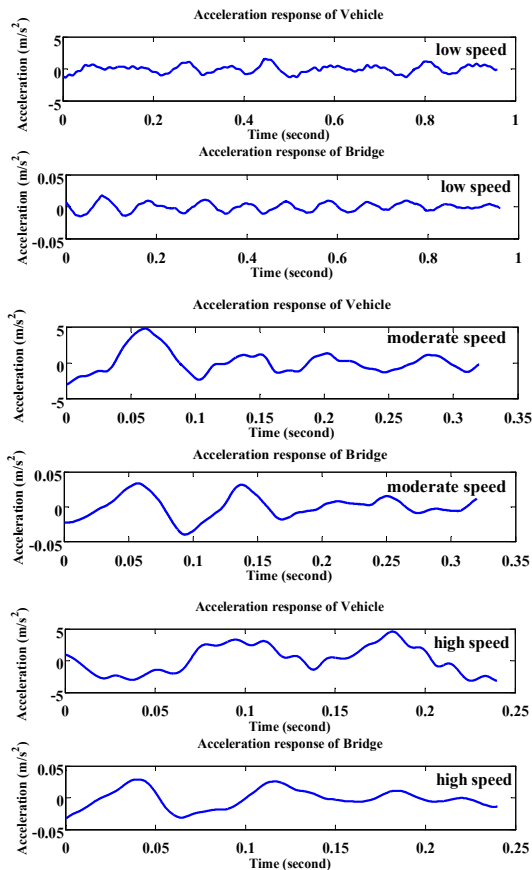
การทดสอบนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของยานพาหนะ โดยใช้ความเร็วคงที่อยู่ระหว่าง 20-80 กม./ชม. จากผลการทดสอบพบว่า กรณีที่สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากวิธีทางตรง โดยใช้เพียงขั้นตอนการระบุค่าด้วยวิธี Simple FFT ของสัญญาณความเร่งที่ได้จากรถยนต์ซึ่งเคลื่อนที่ในช่วงความเร็วปานกลางประมาณ 40-60 กม./ชม. มีจำนวนมากกว่าเมื่อใช้สัญญาณความเร่งที่ความเร็วของรถยนต์ในช่วงที่ช้าเกินไปหรือสูงเกินไป เนื่องจากช่วงความเร็ว 40-60 กม./ชม. การสั่นไหวของยานพาหนะมีแอมพลิจูดมากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวและ

สะท้อนการสั่นไหวกลับไปที่ยานยนต์ทดสอบได้ จึงสังเกตความถี่สะพานได้ชัดเจนในสเปกตรัมความถี่ และเป็นความเร็วที่ไม่สูงเกินไปจนทำให้การสั่นของรถยนต์ทดสอบมีผลการสั่นไหวเด่นเกินกว่าสะพานจนความถี่ของสะพานจากสเปกตรัมถูกบดบังด้วยค่าความถี่ของรถยนต์ทดสอบ

ในกรณีที่รถยนต์ทดสอบสัญญาณด้วยความเร็วต่ำ (ช้ากว่า 40 กม./ชม.) ทำให้การสั่นไหวของสะพานเนื่องจากรถยนต์ทดสอบมีแอมพลิจูดที่ต่ำ จึงทำให้อาจสังเกตเห็นยอดความถี่ของสะพานในสเปกตรัมได้ไม่ชัดเจนถึงแม้จะมีความละเอียดของสเปกตรัมความถี่สูงจากระยะเวลาของสัญญาณที่นานกว่าก็ตาม และจะสังเกตได้ยากขึ้นหากความถี่ของสะพานมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของรถยนต์ทดสอบ ทำให้ไม่สามารถระบุความถี่ใดความถี่หนึ่งได้อย่างชัดเจน

ในกรณีที่ยานพาหนะสัญญาณด้วยความเร็วสูงกว่า 60 กม./ชม. จะเห็นว่าค่า $e_{f_{ambient}}$ ที่เกิดขึ้นมีค่ามากเนื่องมาจากยานพาหนะอยู่บนสะพานด้วยช่วงเวลาที่ยาว และการสั่นไหวของระบบมีจำนวนที่น้อยรอบ และด้วยผลของจำนวนข้อมูลที่ยาวลงในช่วงเวลาที่สั้น ประกอบกับความละเอียดของสเปกตรัมความถี่ที่ต่ำจากระยะเวลาของสัญญาณที่สั้นจึงมีแนวโน้มที่ยากต่อการระบุความถี่ของสะพานได้ละเอียดและถูกต้อง อีกทั้งยานพาหนะมีโอกาสที่จะเกิดการสั่นสะเทือนจากรอยต่อบริเวณปลายสะพานทั้งสองด้านมากขึ้นจากการสัญญาณด้วยความเร็วสูง ทำให้ผลของค่าความถี่ของยานพาหนะเองมีองค์ประกอบในสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้มากขึ้น ผลของการสั่นไหวด้วยความถี่ของสะพานจึงสังเกตได้ยากขึ้นในสเปกตรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวถึงผลของความขรุขระที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการระบุค่าความถี่สะพาน [13,14] โดยลักษณะสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่แตกต่างกันเนื่องจากระดับความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าลักษณะสัญญาณความเร่งเนื่องจากการสั่นไหวของรถยนต์เทียบกับสะพานในช่วงความเร็วปานกลางจะมีความคล้ายคลึงมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถยนต์ทดสอบมีพฤติกรรมในการสั่นไหวที่

สอดคล้องกับการสั่นไหวของสะพาน ทำให้ความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดทางอ้อมแสดงถึงความถี่ของการสั่นไหวของสะพาน มากกว่ากรณีรถยนต์ทดสอบสั่นจรด้วยความเร็วต่ำ หรือความเร็วสูง



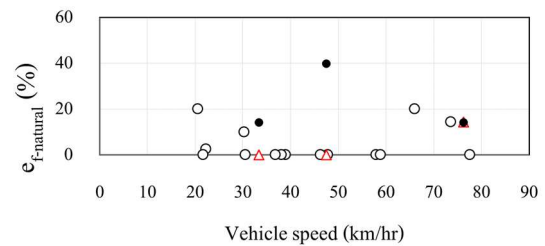
รูปที่ 13 สัญญาณความเร่งของรถยนต์ทดสอบและสะพานในช่วงความเร็วทดสอบที่แตกต่างกัน

4.3 ความถูกต้องของการหาค่าความถี่

ธรรมชาติจริงของสะพาน

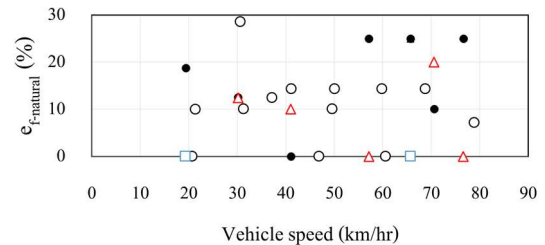
ในการทดสอบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ระบุได้จากกระบวนการที่ได้นำเสนอกับค่าความถี่จริงของสะพานที่ได้จากสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งได้สะพานเพื่อหา ระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่สามารถระบุได้ พบว่า ความถี่ที่ระบุได้จากสัญญาณความเร่งของรถประเภท SUV มีความถูกต้องมากกว่ารถประเภท Pickup ดังแสดงในรูปที่ 14 เนื่องจากว่าพฤติกรรมของรถ SUV มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ซึ่งระดับ

ความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนออยู่ในช่วงร้อยละ 87.55 และร้อยละ 85.67 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับรถประเภท SUV และ Pickup ตามลำดับ



○ Simple FFT △ EMD ● Incorrect FFT

(ก)



○ Simple FFT ● Incorrect FFT
△ EMD ▲ Incorrect EMD
□ EMD+Signal cut

(ข)

รูปที่ 14 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน

(ก) รถ SUV และ (ข) รถ Pickup

จากผลของความเร็วยานพาหนะที่ส่งผลต่อความละเอียดของสเปกตรัมความถี่และระดับความถูกต้องของการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน เพื่อให้การใช้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและมีความเชื่อถือได้ในการใช้ติดตามประเมินสภาพความแข็งแรงตามอายุของโครงสร้างสะพาน จึงแนะนำให้การทดสอบแต่ละรอบเวลาของการประเมินใช้ยานพาหนะคันเดิมและใช้ความเร็วของยานพาหนะทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งก่อนหน้า เพื่อให้มีความละเอียดใกล้เคียงกันและสามารถเทียบอัตราการลดทอนของค่าความถี่ที่ระบุได้ว่ามีนัยสำคัญกับสภาพความแข็งแรงของสะพานอย่างไร

5. สรุปผล

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน จากผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งบุคคล รวมทั้งผลจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาแนวทางการทดสอบ และกระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้จากผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยกระบวนการที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณความถี่ (EMD + Signal cut) ดังรูปที่ 8 พบว่าสามารถระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้คำตอบเดียวกันกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพานในทุกกรณี

(2) สำหรับสะพานคอนกรีตช่วงสั้น ความแตกต่างกันของความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่ของสะพานโดยวิธีการทดสอบทางอ้อม ซึ่งแสดงว่าวิธีการทดสอบทางอ้อมสามารถใช้ได้กับสะพานคอนกรีตแบบแผ่นพื้น และมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อทดสอบกับสะพานที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากยานพาหนะ

(3) ประเภทของยานพาหนะไม่ได้มีผลต่อระดับความถูกต้องของการประมาณความถี่สะพานอย่างมีนัยสำคัญ แต่อาจจะส่งผลต่อความชัดเจนของแอมพลิจูดของสเปกตรัมความถี่ของสะพาน โดยเมื่อพิจารณาในด้านของพฤติกรรมการสั่นไหวของยานพาหนะกับสะพานพบว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั้งประเภท SUV และ Pickup ที่นำมาศึกษาสามารถนำมาใช้ระบุความถี่ของสะพานได้ตรงกับความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรงที่สะพานเมื่อมียานพาหนะสัญจรผ่าน โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยรถยนต์ทั้งสองประเภะนั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยระดับความถูกต้องของค่าความถี่จริงของสะพานที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนออยู่

ในช่วงร้อยละ 87.55 และร้อยละ 85.67 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรถ SUV และ Pickup ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามจากลักษณะของสเปกตรัมความถี่ที่วิเคราะห์ได้นั้นพบว่ารถยนต์ทดสอบที่มีช่วงล่างที่มีลักษณะของช่วงล่างที่มีช่วงล่างนุ่มนวลหรือมีความหน่วงสูงกว่าจะสามารถสังเกตยอดความถี่จากสเปกตรัมได้ง่ายกว่าจึงเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่ารถยนต์ประเภทที่ช่วงล่างมีความนุ่มนวลน้อยกว่าหรือมีความหน่วงที่ต่ำกว่า

(4) ความเร็วของยานพาหนะเป็นปัจจัยหลักที่ต้องให้ความสำคัญในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณความถี่ โดยความเร็วของยานพาหนะที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความเร็วปานกลางประมาณ 40-60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงความเร็วที่เพียงพอต่อการกระตุ้นการสั่นไหวของสะพานและทำให้เกิดคลื่นการสั่นไหวที่ชัดเจนโดยที่พฤติกรรมการสั่นไหวยานพาหนะยังคงสอดคล้องกับพฤติกรรมของสะพาน การความเร็วในการทดสอบที่สูงส่งผลให้ความละเอียดของสเปกตรัมจาก FFT ลดลง เป็นเหตุให้ระดับความละเอียดของค่าความถี่สะพานที่ประมาณได้ลดลงด้วยเช่นกัน

(5) ผลการศึกษาที่ได้แสดงว่าการทดสอบด้วยวิธีการอ้อมสามารถใช้เป็นแนวทางการประเมินความเสียหายเนื่องจากการลดค่าคงของค่าความถี่ธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่พิจารณามีแนวโน้มที่ถูกต้องด้วยระดับความละเอียดของข้อมูลใกล้เคียงกัน การทดสอบในแต่ละครั้งควรเลือกใช้ยานพาหนะทดสอบคันเดิมและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยประเภทยานพาหนะและจำนวนสะพานที่จำกัด ซึ่งยังมีสะพานที่มีลักษณะองค์อาคารและความยาวช่วงที่แตกต่างกันออกไป เช่นเดียวกับรถยนต์อีกหลายประเภทที่ยังไม่ได้ถูกนำมาทดสอบ โดยมีลักษณะช่วงล่างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของประเภทและช่วงล่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาระบบการทดสอบแบบทางอ้อมเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 และแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี ที่อนุญาตให้ทำการทดสอบภาคสนามในโครงสร้างสะพานที่ทำการวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนายพงศ์ศิริ พร้อมพันธุ์ และนายธีรยุทธ ตีลังผล นิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบภาคสนาม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. B. Yang, C. W. Lin and J. D. Yau, "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, pp. 471–493, 2004.
- [2] P. J. McGetrick, A. Gonzalez and E. J. O'Brien, "Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters," *Insight Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, vol. 51(8), pp. 433–438, 2009.
- [3] Y. B. Yang and K. C. Chang, "Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 32, pp. 718–739, 2009.
- [4] A. Niyomsuk and P. Asnachinda, "Determination of bridge natural frequency from vehicle acceleration response," in *The 20th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2015, pp. 1-8. (in Thai)
- [5] A. Niyomsuk and P. Asnachinda, "Experimental verification of bridge natural frequency identification from vibration acceleration response of vehicle," in *The 21st National Convention on Civil Engineering*, Songkhla, Thailand, 2016, pp. 1-8. (in Thai)
- [6] C. W. Lin and Y. B. Yang, "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification," *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 1865–1878, 2005.
- [7] C. W. Kim, R. Isemoto, T. Toshinami, M. Kawatani, P. J. McGetrick and E. J. O'Brien, "Experimental investigation of drive-by bridge inspection," in *The 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5)*, Cancún, México, pp. 1-9, 2011.
- [8] D. M. Siringoringo and Y. Fujino, "Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: analytical and experimental study," *Advances in Structural Engineering*, vol. 15(3), pp. 443–459, 2011.
- [9] Y. B. Yang, K. C. Chang and Y. C. Li, "Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 353–362, 2013.
- [10] D. Cantero and E. J. O'Brien, "Tracing the evolution of bridge natural frequencies as a vehicle traverses the bridge," in *The 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2013)*, Lisbon, Portugal, pp. 1-9, 2013.

- [11] R. Lalthlamuana and S. Talukdar, “Conditions of visibility of bridge natural frequency in vehicle vertical acceleration,” *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 25-33, 2016.
- [12] Y. B. Yang, W. F. Chen, H. W. Yu and C. S. Chan, “Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies,” *Engineering Structures*, vol. 57, pp.222–231, 2013.
- [13] K. C. Chan, F. B. Wu and Y. B. Yang, “Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle,” *Interaction and Multiscale Mechanics*, vol. 3(4), pp. 299–308, 2010.
- [14] Y. B. Yang, Y. C. Li and K. C. Chan, “Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: a theoretical study,” *Acta Mechanica*, vol. 223(8), pp. 1851–1861, 2012.