

การพัฒนาอุปกรณ์วัดแรงดึงในเคเบิลชนิดพกพา

DEVELOPMENT OF PORTABLE EQUIPMENT FOR CABLE TENSION FORCE MONITORING

พัชรพล บัวทุม¹ พัทธพล คงปัญญากุล² พีรพัฒน์ จิตตาพิณจมาศ³ และ ศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การศึกษาโครงการปริญญาโทฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์แบบพกพาสำหรับการตรวจสอบแรงดึงในสายเคเบิลของสะพานซึ่ง โดยวิธีการวัดความถี่การสั่นของสายเคเบิลด้วยอุปกรณ์วัดสัญญาณความเร่งการสั่นและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคำนวณเป็นค่าแรงดึงในสายเคเบิลได้ สถานที่ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ที่สะพานพระราม 8 ในสายเคเบิลที่หลากหลายค่าแรงดึงและมีสภาวะต่าง ๆ กันไป จากการดำเนินงานวิจัยพบว่าอุปกรณ์นี้มีราคาถูก มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดึงในสายเคเบิลได้จริง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมสะพานได้ ผลจากการดำเนินงานวิจัยนี้ มีส่วนช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไทย รวมถึงเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานและความปลอดภัยที่มากขึ้นของอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย

คำสำคัญ : แรงดึงในสายเคเบิล, วิธีการวัดความถี่การสั่น, อุปกรณ์วัดสัญญาณความเร่ง

Abstract

This study presents the development of a portable equipment for monitoring tension forces in stayed cables using the vibration frequency method. The accelerometer measures the acceleration of the vibration on the stayed cable, then processes the data to calculate the tension force. The system was tested on Rama VIII stayed cables with varying tension levels and varying conditions, the results demonstrated accuracy and reliability. The portable equipment system provides a low-cost and practical solution for stayed cable tension force monitoring, with potential applications in civil infrastructure and bridge engineering. The findings of this study contribute to the development of efficient and effective technology for Thailand's industry and infrastructure to provide opportunities for improved safety and performance.

Keywords: cable force, vibration frequency method, accelerometer

1. คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีสะพานขึง (Cable-Stayed Bridge) อยู่ มาก เช่น สะพานพระราม 8, สะพานพระราม 9, สะพานภูมิพล 2, สะพานกาญจนาภิเษก รวมถึงสะพานคู่ขนานสะพานพระราม 9 ที่กำลังก่อสร้างในปัจจุบัน ซึ่งสะพานเหล่านี้มักจะต้องบำรุงรักษาและตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์ของสะพานอย่างสม่ำเสมอเพื่อความปลอดภัยต่อสาธารณชน วิธีหนึ่งในการตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์ของสะพานเบื้องต้น คือการตรวจสอบสายเคเบิลแบบไม่ทำลาย โดยสามารถตรวจสอบว่าสายเคเบิลยังคงมีการรับแรงดึงถูกต้องตามข้อกำหนดไว้หรือไม่ วิธีนี้สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณค่าความเร่งของการสั่นของสายเคเบิล เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นความถี่การสั่นธรรมชาติของสายเคเบิลและสามารถคำนวณเป็นแรงดึงในสายเคเบิลได้

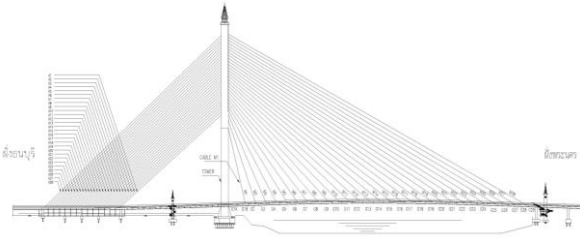
อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งในปัจจุบัน มีหลากหลายและจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อใช้งานในประเทศไทย การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการร่วมพัฒนาอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้สะดวก และสามารถใช้งานง่ายโดยไม่ต้องมีผู้เชี่ยวชาญ โดยยังคงให้ค่าแรงดึงที่มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม เพื่อส่งเสริมนวัตกรรมของประเทศไทยและสามารถลดการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศได้

2. ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สะพานพระราม 8

สะพานพระราม 8 เป็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาที่เชื่อมระหว่างฝั่งธนบุรีกับฝั่งพระนคร โครงสร้างสะพานลักษณะเป็นสะพานขึงแบบอสมมาตร (Asymmetry Cable-Stayed Bridge) เสาเดี่ยว 3 ระบาย กล่าวคือ ขึงด้วยเคเบิลระนาบคู่บริเวณตัวสะพานหลัก (Main Bridge) จำนวน 28 คู่ และขึงด้วยเคเบิลระนาบเดี่ยวช่วงหลังสะพาน (Back Span) จำนวน 28 เส้น ตัวสะพานมีความยาวรวม 475 เมตร ประกอบด้วยช่วงตัวสะพานหลักยาว 300 เมตร และช่วงหลังสะพานยาว 175 เมตร โดยใน

สะพานพระราม 8 นี้มีเสาขนาดใหญ่เพื่อรับสายเคเบิลเพียงเสาเดียวบนฝั่งธนบุรี และไม่มีตอม่อกลางน้ำที่จะกีดขวางทางการไหลของน้ำหรือบดบังความสว่างของตัวสะพาน [1]

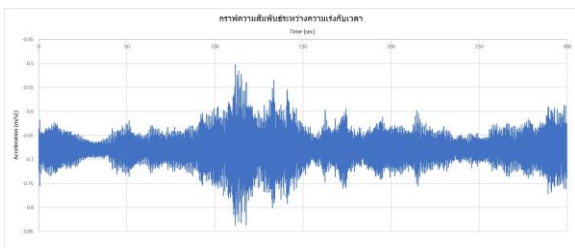


รูปที่ 1 สะพานพระราม 8

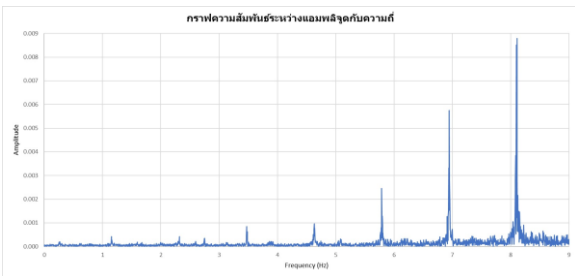
ที่มา : รายงานโครงการตรวจสอบโครงสร้างและระบบเฝ้าติดตามพฤติกรรมสะพาน (Bridge Health Monitoring System) สะพานพระราม 8 (2013)

2.2 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform หรือ FFT เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) ที่ใช้เพื่อแปลงสัญญาณที่อยู่ในรูปโดเมนของเวลา หรือ Waveform ให้มาอยู่ในรูปโดเมนของความถี่ หรือ Spectrum โดยแสดงออกมาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับความถี่



รูปที่ 2 ตัวอย่างสัญญาณความถี่ในรูปโดเมนของเวลา



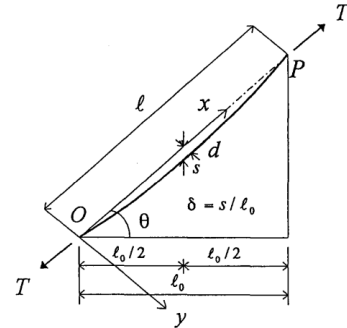
รูปที่ 3 ตัวอย่างสัญญาณที่ถูกแปลงด้วย FFT ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับความถี่

2.3 Vibration Frequency Method

วิธีการประมาณค่าแรงดึงในสายเคเบิลด้วยการสั่น (Vibration-Based Method) เป็นหนึ่งในวิธีการหลักที่ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายทั้งจากนักวิจัยในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งประเด็นที่สำคัญของวิธีความถี่ของการสั่น คือจำเป็นต้องระบุความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิลให้ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากความถี่ธรรมชาติมีผลต่อความถูกต้องของแรงดึงในสายเคเบิลโดยตรง โดยสูตรและทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงในสายเคเบิลที่จะกล่าวถึงในบทความต่อไป เน้นการพิจารณาในความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความถี่ธรรมชาติ เสริมด้วยผลกระทบจากการดกท้องข้าง (Sag) และค่าความแข็งเชิงตัด (Flexural rigidity) ของสายเคเบิล

โดยปกติแล้ว วิธีการวิเคราะห์ค่าแรงดึงในสายเคเบิลนี้ จะมีการตั้งสมมติฐานบางอย่างเพื่อมาใช้ในการคำนวณ นั่นคือสมมติฐานที่ว่าด้วยการสั่นของสายเคเบิล (Stay-cable) จะเป็นการสั่นแบบในระนาบ (in-plane) ซึ่งจะไม่เกิดควมคู่กันกับการสั่นแบบนอกระนาบ (Out-of-plane)

จากผลงานวิจัยของ Zui et al. (1996) [3] ได้เสนอสมการของ Shimada (1994) ที่อธิบายพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของสายเคเบิล (Dynamic behaviors of cable) ภายใต้สมมติฐานข้างต้น



รูปที่ 4 Free Body Diagram ของแรงกระทำในสายเคเบิล

ที่มา : Zui, Hiroshi, Tohru Shinke, and Yoshio Namita. "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method." Journal of structural engineering 122.6 (1996):Page 651

$$m \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - h(t) \frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2.3-1)$$

โดยที่ x คือ The coordinate along the length of cable, v คือ Deflection in the y -direction due to vibration, m คือ Mass per unit length, EI คือ Flexural rigidity of cable, $h(t)$ คือ Dynamic tension caused by vibration, T คือ Cable force และ t คือ Time

โดยสมการที่ (2.3-1) ถูกแก้ให้ออกมาในรูปแบบอย่างง่ายได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงในสายเคเบิลและความถี่ธรรมชาติ สมการที่ได้นั้นจำแนกได้เป็นหลายประเภท ดังนี้

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} - \frac{mgl \sin \theta}{2} \quad (2.3-2)$$

โดยที่ f_n คือ ความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหว mode ที่ n (1, 2, 3, ...) และ $mgl \sin \theta$ เป็นค่าของการดกท้องข้างที่ถูกปรับแก้ทำให้ดูเหมือนว่าเป็นน้ำหนักตัวเอง (self-weight) ของสายเคเบิล ซึ่งถ้าละเว้นพิจารณาผลของการดกท้องข้าง (Sag) จะได้

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (2.3-3)$$

ในสมการ (2.3-3) ถ้าหากว่าสายเคเบิลมีความยาวและขลุคมาก สามารถละเว้นความแข็งเชิงตัด (Flexural rigidity) ในการประมาณแรงดึงในสายเคเบิลได้ [2] จะได้สมการเป็น

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (2.3-4)$$

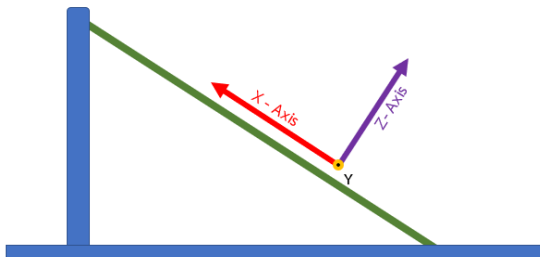
สมการ (2.3-4) Flat taut string theory เป็นแนวทางเบื้องต้นในการคำนวณแรงดึงของสายเคเบิล อย่างไรก็ตาม สูตรนี้มีข้อจำกัดสำหรับเคเบิลที่เป็นสายยาว เพราะมีการละเว้นผลของการดกท้องข้าง (Sag) และความแข็งเชิงตัด (Flexural rigidity) ของเคเบิล

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การตรวจวัดค่าแรงดึงในสายเคเบิลสะพานพระราม 8 ซึ่งเป็นสะพานประเภทสะพานขึง (Cable-Stayed Bridge) ต้องทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิล โดยจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจจับความถี่ของการเคลื่อนไหวหรือการสั่นของสายเคเบิลได้ ซึ่งเครื่องมือชิ้นนี้คือ อุปกรณ์ตรวจวัดความถี่ (Accelerometer) โดยมีการใช้ค้อนยางทุบสายเคเบิลเพื่อเป็นการกระตุ้นการสั่นของสายเคเบิล จากนั้นตัวเซนเซอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดความถี่ที่ถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ จะสามารถตรวจจับความถี่ของสายเคเบิลได้ออกมาในรูปแบบความถี่-เวลา และจะใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) ในการแปลงค่าออกมาให้ได้ความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิลนั้น หลังจากนั้นจึงทำการแทนค่าสมการและได้ค่าแรงดึงในสายเคเบิล

ผู้ดำเนินงานวิจัยได้กำหนดแกนต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

- แกน x เป็นไปตามแนวขนานกับสายเคเบิลไปยังจุดยึดฝั่ง Pylon
- แกน y อยู่ในระนาบหน้าตัดของสายเคเบิล โดยอยู่ในแนวนอน
- แกน z อยู่ในระนาบหน้าตัดของ Cable โดยอยู่ในแนวตั้ง

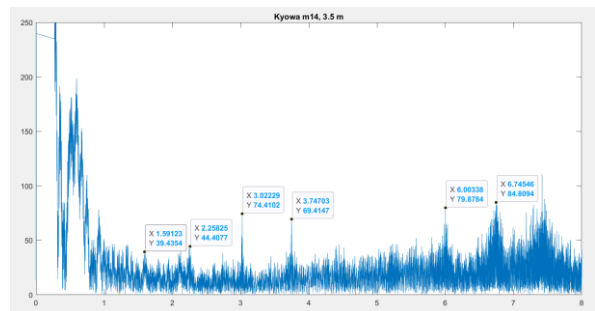


รูปที่ 5 แกน x, y, z ที่กำหนดเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

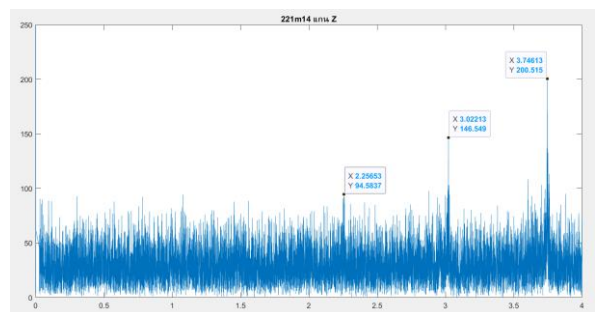
ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดความถี่ 2 ประเภทคือ ประเภทวัดความถี่ได้ 1 แกน (Kyowa) และประเภทวัดความถี่ได้ 3 แกน (Engineering Expert International, EEI) จากการทดสอบอุปกรณ์ 3 แกน เบื้องต้นเมื่อนำข้อมูลกราฟความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิลในแกน y และแกน z มาเปรียบเทียบกัน พบว่าทั้งสองแกน ไม่มีความแตกต่างกันมากนักในด้านความถี่ธรรมชาติ mode ต่าง ๆ ที่ได้ แต่ทฤษฎีที่ใช้ดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มีการตั้งสมมติฐานว่าการสั่นของสายเคเบิล (Stay-cable) จะเป็นการสั่นแบบในระนาบ (In-plane) ซึ่งจะไม่เกิดควบคู่กันกับการสั่นนอกระนาบ (Out-of-plane) ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ข้อมูลเฉพาะแกน z เท่านั้น

ในการเก็บข้อมูล ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญ เพราะเป็นสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูลที่เก็บมาได้ สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์วัดความถี่ (Accelerometer) ที่สายเคเบิล หากต้องการให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและชัดเจน ควรที่จะติดตั้งอุปกรณ์ให้ห่างจากจุดยึด (Anchor) มากที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสายเคเบิลที่ไม่ได้เคลื่อนไหวอย่างอิสระบริเวณใกล้จุดยึด (Anchor) คณะผู้ดำเนินงานวิจัยจึงมีการกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด 3 ตำแหน่งเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ โดยมีปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์สองประการ คือ ความชัดเจนและสมบูรณ์ของข้อมูล ความสะดวกและปลอดภัยในการติดตั้งอุปกรณ์

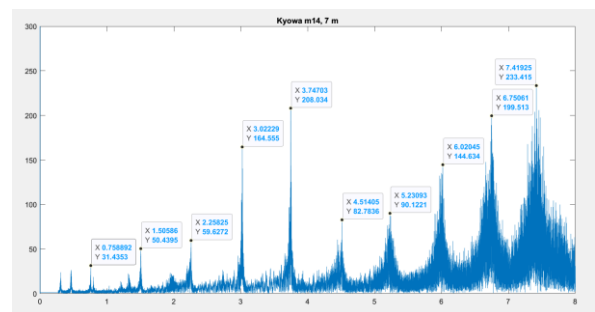
โดยตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ได้แก่ 3.5 เมตรจากพื้นตามแนวตั้ง, 7 เมตร จากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล และ 5 เมตรจากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล หลังจากการวัดแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ Fast Fourier Transform (FFT) มาเปรียบเทียบกันแล้ว ได้ข้อสรุปว่า ที่ระยะ 3.5 เมตร ไม่สามารถอ่านข้อมูลความถี่ธรรมชาติใน mode ต้น ๆ ได้ชัดเจนในบางสายเคเบิล แต่ที่ระยะ 5 และ 7 เมตร สามารถอ่านข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและชัดเจน ดังนั้นตำแหน่งที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความถี่ (Accelerometer) จึงเป็นตำแหน่งที่ระยะ 5 ถึง 7 เมตรจากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล ดังรูปที่ 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 และ 6.6



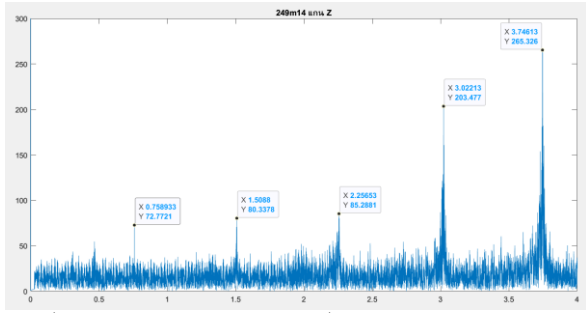
รูปที่ 6.1 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 3.5 เมตรจากแนวตั้งบนเส้นเคเบิล M14S ด้วยอุปกรณ์จาก Kyowa



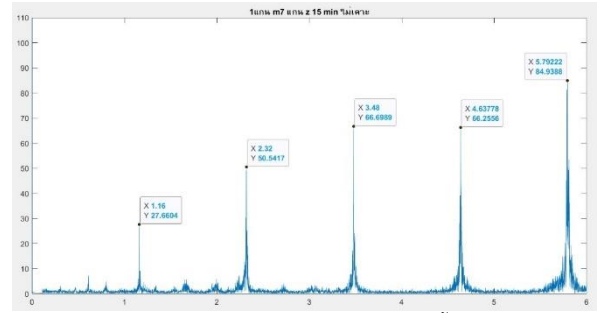
รูปที่ 6.2 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 3.5 เมตรจากแนวตั้งบนเส้นเคเบิล M14S ด้วยอุปกรณ์จาก EEI



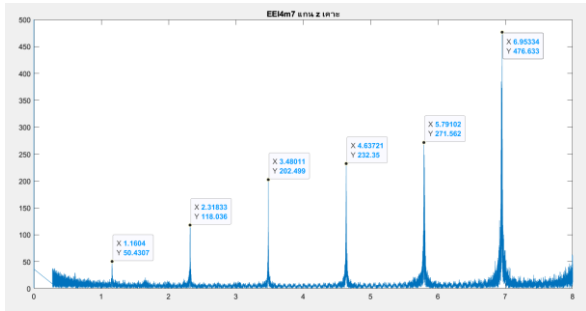
รูปที่ 6.3 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 7 เมตร จากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล บนเส้นเคเบิล M14S ด้วยอุปกรณ์จาก Kyowa



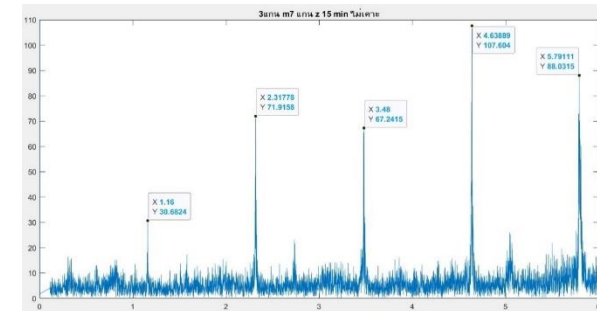
รูปที่ 6.4 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 7 เมตร จากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล บนเส้นเคเบิล M14S ด้วยอุปกรณ์จาก EEI



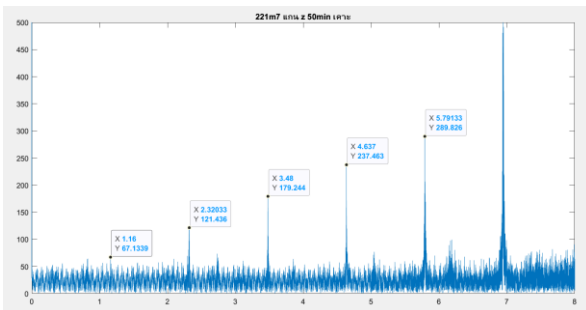
รูปที่ 7.1 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง Kyowa เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 6.5 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 5 เมตร จากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล บนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์จาก Kyowa



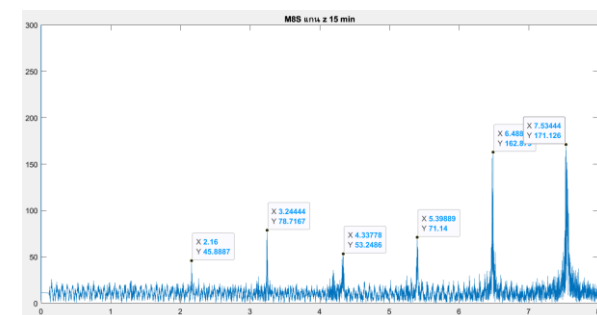
รูปที่ 7.2 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI เป็นเวลา 15 นาที



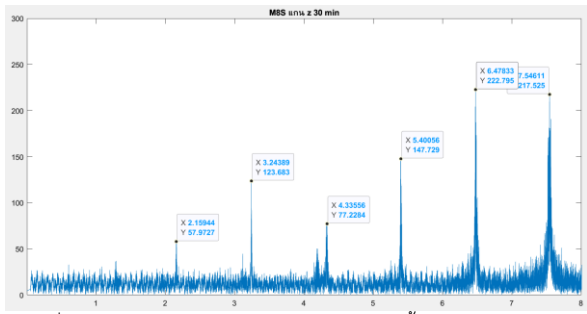
รูปที่ 6.6 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง 5 เมตร จากจุดยึดตามแนวขนานกับสายเคเบิล บนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์จาก EEI

การกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเป็นสามระยะ ได้แก่ 15, 30 และ 45 นาที เมื่อนำข้อมูลทั้งสามระยะเวลาที่วัดได้จากสายเคเบิลตัวอย่างทั้ง 3 เส้น จะได้ข้อสรุปว่าหากใช้เวลาเก็บข้อมูลมากขึ้น กราฟที่ได้ก็จะสามารถเห็นความถี่ธรรมชาติได้ชัดเจนมากขึ้น ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการเก็บข้อมูล 15 นาที ในสายเคเบิลที่มีระยะไกลและมีผลของการตกท้องช้าง (Sag) มาก จะไม่สามารถอ่านค่าความถี่ธรรมชาติได้อย่างครบถ้วนเพราะมีสัญญาณรบกวนจำนวนมาก แต่กราฟจากการเก็บข้อมูลระยะเวลา 30 และ 45 นาที สามารถอ่านความถี่ธรรมชาติได้ชัดเจน จึงได้ข้อสรุปว่าเพื่อให้ได้ความถี่ธรรมชาติครบถ้วนและชัดเจนทุก mode จึงใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจาก EEI ของงานวิจัยในครั้งนี้คือ 45 นาที

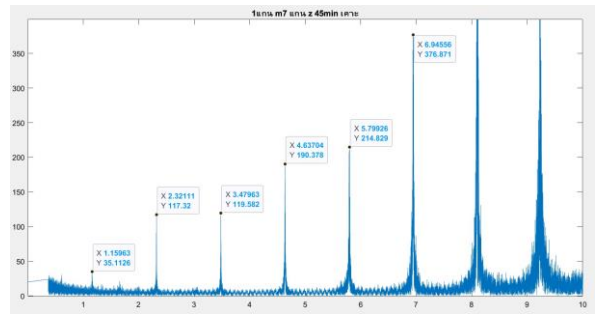
หลังจากได้ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการนำผลที่ได้จากการตรวจวัดของอุปกรณ์วัดความเร่งแบบ 3 แกน (EEI) ไปเปรียบเทียบกับอุปกรณ์วัดความเร่งที่ได้มาตรฐานและได้รับการยอมรับในวงกว้าง (Kyowa) เพื่อให้เห็นสิ่งที่ควรต้องได้รับการพัฒนาของอุปกรณ์วัดความเร่งแบบ 3 แกน (EEI) โดยมีตัวแปรควบคุมคือเวลาและตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 15 นาทีพบว่า อุปกรณ์วัดความเร่งแบบ 3 แกน (EEI) ยังให้ผลออกมาไม่ชัดเจนมากนัก ซึ่งยากต่อการอ่านค่าความถี่ธรรมชาติ ในขณะที่อุปกรณ์วัดความเร่งจาก Kyowa ให้ผลออกมาชัดเจน ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองต่อเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์วัดความเร่งแบบ 3 แกน (EEI)



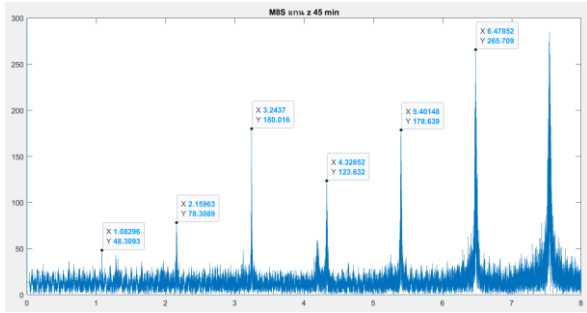
รูปที่ 8.1 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M8S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI เป็นเวลา 15 นาที



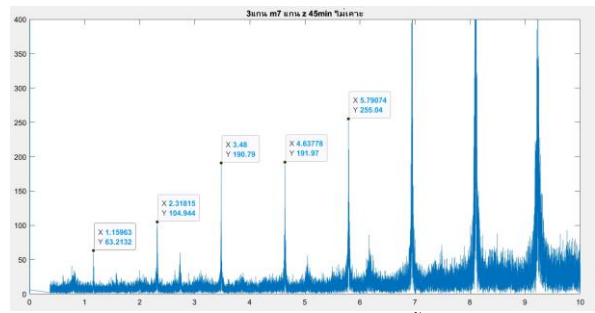
รูปที่ 8.2 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M8S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 9.2 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง Kyowa แบบ มีการเคาะ

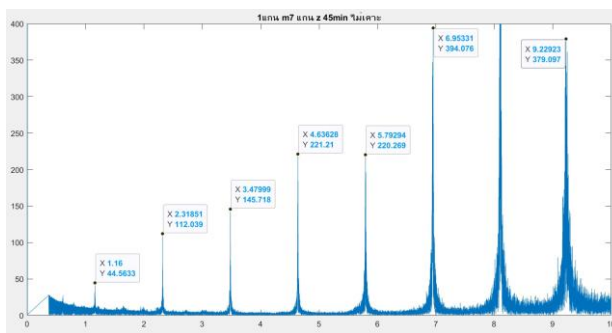


รูปที่ 8.3 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M8S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI เป็นเวลา 45 นาที

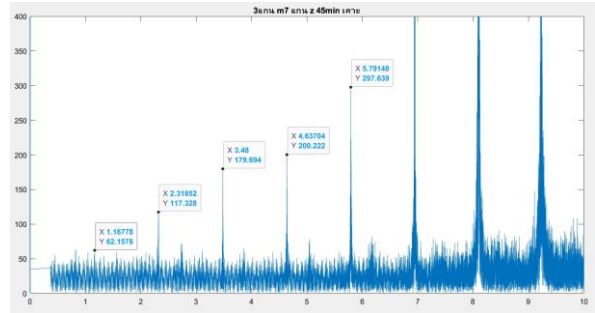


รูปที่ 9.3 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI แบบ ไม่มีการเคาะ

ในการเก็บข้อมูลผู้ดำเนินงานวิจัยมีการตั้งสมมติฐานว่าการเคาะสายเคเบิลด้วยค้อนยาง จะช่วยให้ข้อมูลที่ได้รับความเข้มข้นของสัญญาณมากขึ้น กล่าวคือสามารถเห็นความถี่ธรรมชาติได้ชัดเจนมากขึ้น จึงดำเนินการทดลองเก็บข้อมูลเป็นเวลา 45 นาที โดยเคาะสายเคเบิลด้วยค้อนยางที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตรจากอุปกรณ์ และสะพานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปิดใช้งานปกติ พบว่าการเคาะสายเคเบิลช่วยให้ Amplitude มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งในอุปกรณ์จาก Kyowa และ EEI แต่ในขณะเดียวกันก็มีสัญญาณรบกวนมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยในอุปกรณ์จาก EEI จะเห็นสัญญาณรบกวนมากขึ้นชัดเจนกว่าอุปกรณ์จาก Kyowa ส่งผลให้การอ่านค่าความถี่ธรรมชาติใน mode ต่าง ๆ ทำได้ยากขึ้น ทางคณะผู้ดำเนินงานวิจัยจึงเห็นว่า ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในข้อสมมติฐานที่ว่า การเคาะสายเคเบิลจะช่วยให้สัญญาณชัดเจนมากขึ้นจริงหรือไม่ เนื่องจากการทดสอบในครั้งนี้มีการเคาะเพียงตำแหน่งเดียวในระยะเวลาเดียว สภาพแวดล้อมของสะพานมีการเปิดใช้งานปกติ จึงไม่สามารถสรุปประเด็นนี้ได้ชัดเจน



รูปที่ 9.1 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง Kyowa แบบ ไม่มีการเคาะ



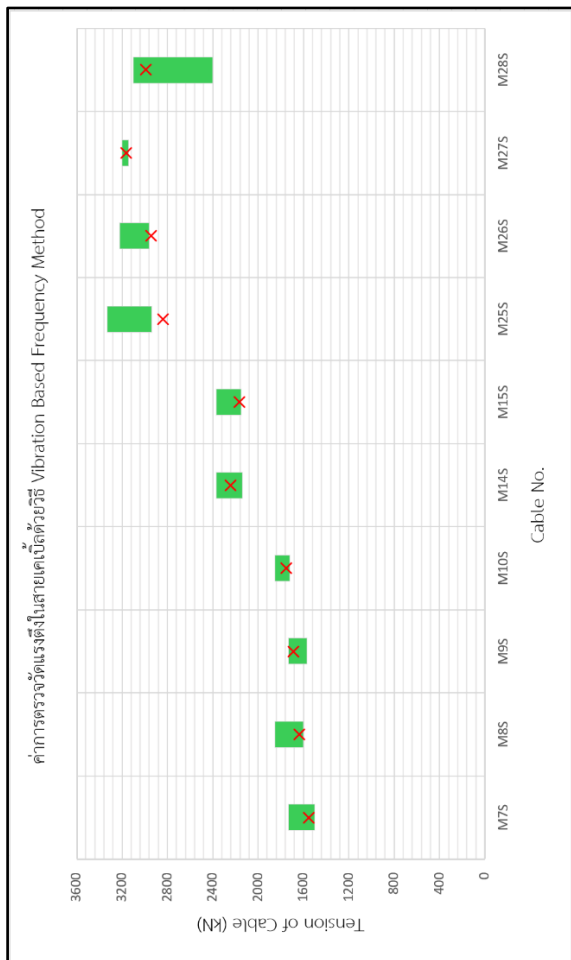
รูปที่ 9.4 กราฟ FFT จากการเก็บข้อมูลบนเส้นเคเบิล M7S ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง EEI แบบ มีการเคาะ

จากการทดลองดังกล่าว จึงทดลองติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการใช้งานวัดความถี่สัญญาณความเร่งจากการสั่น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ EEI เป็นเวลา 45 นาที และไม่มีการเคาะสายเคเบิลด้วยค้อนยาง ในสภาพแวดล้อมสะพานมีการเปิดใช้งานปกติ จากการวิเคราะห์ข้อมูลความถี่ธรรมชาติของสายเคเบิลที่วัดได้พบว่าค่าความถี่ที่วัดได้ในปัจจุบัน (2023) เปรียบเทียบกับในอดีต (2013) (ตารางที่ 1) พบว่ามีความแตกต่างกันมากที่สุดเพียง 3.74% จึงสามารถสันนิษฐานเบื้องต้นจากค่าความถี่ธรรมชาติที่วัดได้ ว่าสายเคเบิลสะพานนี้ยังมีการรับแรงดึงที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัดในอดีต (2013) และ เมื่อนำข้อมูลค่าแรงดึงที่เคาะทำการวัดในอดีตจากรายงานโครงการตรวจสอบโครงสร้างและระบบฝ้าติดตามพฤติกรรมสะพานพระราม 8 (2013) มาวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาค่าคุณสมบัติ (Properties) $4m^2$ ของสายเคเบิลและนำไปวิเคราะห์เป็นค่าแรงดึงที่วัดได้จากการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงที่วัดได้ในอดีตพบว่า ค่าแรงดึงในสายเคเบิลเส้น M7S, M8S,

M9S, M10S, M14S, M15S, M27S และ M28S ในปัจจุบันยังคงมีค่าแรงดึงอยู่ในช่วงระหว่างค่าแรงดึงสูงสุด-ต่ำสุด จากการตรวจวัดในอดีต โดยมีเพียงสายเคเบิล M25S และ M26S ที่มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดึงต่ำสุดที่เคยทำการวัดในอดีตเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติที่วัดได้ในปัจจุบัน (2023) และในอดีต (2013)

สายเคเบิล	Frequency, 2013 (Hz)	Frequency, 2023 (Hz)	%diff, Frequency
M7S	1.14	1.160	1.75
M8S	1.07	1.082	1.14
M9S	0.98	1.017	3.74
M10S	0.94	0.949	0.91
M14S	0.74	0.757	2.35
M15S	0.71	0.713	0.39
M25S	0.47	0.462	-1.65
M26S	0.47	0.462	-1.70
M27S	0.46	0.462	0.43
M28S	0.40	0.404	0.92



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดึงจากการตรวจวัดในอดีต (แท่งสีเขียว) และค่าแรงดึงที่วัดได้จากดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ (สีแดง)

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์วัดค่าสัญญาณความเร่งการสั่นจากบริษัท Engineering Expert International (EEI) ให้ค่าการตรวจวัดที่มีความแม่นยำเพียงพอ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมสะพานได้ โดยจากการทดลองวัดค่าแรงดึงในสายเคเบิลบนสะพานพระราม 8 จำนวน 10 เส้น พบว่า 8 ใน 10 เส้น มีค่าแรงดึงอยู่ในช่วงสูงสุด - ต่ำสุด จากค่าแรงดึงที่เคยวัดได้ในอดีต และมีเพียงสายเคเบิล 2 เส้น ที่มีค่าแรงดึงต่ำกว่าค่าที่เคยวัดได้ในอดีต

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาโครงการปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ การให้คำแนะนำ รวมถึงช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานวิจัยนี้

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ศ. ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการปริญญาโทฉบับนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ ข้อมูลและความคิดเห็นต่าง ๆ ที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย ให้โครงการปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท Engineering Expert International (EEI) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นในการศึกษาโครงการปริญญาโทฉบับนี้ รวมถึงยังคงให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการดำเนินการจัดทำข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมาตลอดทุกขั้นตอนในการจัดทำโครงการปริญญาโทฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ กรุงเทพมหานคร (กทม.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานสถานที่ สะพานพระราม 8 เพื่อศึกษาและดำเนินงานวิจัยโครงการปริญญาโทฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการตรวจสอบโครงสร้างและระบบเฝ้าติดตามพฤติกรรมสะพาน (Bridge Health Monitoring System) สะพานพระราม 8 (2013)
- [2] Hidayat, Irpan, Made Suangga, and Gerardo Siagian. "Validation value of cable force using the accelerometer." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 195. No. 1. IOP Publishing, 2018.
- [3] Zui, Hiroshi, Tohru Shinke, and Yoshio Namita. "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method." Journal of Structural Engineering 122.6 (1996): 651-656.