

การประเมินโครงสร้างสะพานจากค่าการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง

Bridge Structural Evaluation from Self-weight Induced Deflection

ชยกร จำปาทอง¹ ณภัทร ศิริชัยพัฒนา² ณภัทร สอนเนย³ และ ศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว⁴

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

บทคัดย่อ

การแอ่นตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักตัวเองเกิดขึ้นเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วทำการปลดนั่งร้าน เป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินความแข็งแรงของสะพาน แต่อย่างไรก็ดีวิธีในการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานในปัจจุบันเป็นวิธีการวัดโดยตรงทำโดยการสุ่มตัวอย่างคานหนึ่งช่วงมาทำการทดสอบ และวัดค่าการแอ่นตัว ซึ่งไม่สะท้อนความจริงของทั้งสะพาน อีกทั้งยังมีต้นทุนในการทดสอบที่สูง เนื่องจากต้องมีการติดตั้งนั่งร้าน ดังนั้นวิธีการวัดการแอ่นตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักตัวเองโดยใช้เครื่องมือวัดมุมเอียงที่เสนอในบทความฉบับนี้จึงมีความน่าสนใจในการนำไปใช้งาน เนื่องจากติดตั้งได้ง่าย สามารถนำไปวางบนสะพานได้โดยตรง ไม่ต้องติดตั้งนั่งร้าน สามารถทดสอบได้เร็วไม่ต้องรอให้สร้างสะพานเสร็จเมื่อปลดค้ำยันสามารถทำการทดสอบได้เลย สะท้อนค่าจริงเนื่องจากสามารถทำได้ทั้งสะพาน และมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีการทดสอบสะพานแบบเดิม สำหรับการทดสอบจะจำลองการวัดสะพานโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดการแอ่นตัวบนคานตัวอย่างขนาด 9 เมตร จากนั้นจึงทำการจำลองการแอ่นตัวโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีค่าความแม่นยำในการวัดสูง ซึ่งเมื่อนำเทคนิคที่นำเสนอจำลองบนช่วงสะพาน 40 เมตรก็พบว่ามีความละเอียดเพียงพอที่จะนำไปใช้งานจริง

คำสำคัญ: เครื่องมือวัด, การแอ่นตัว, การทดสอบแบบสถิต, สะพาน

Abstract

The deflection of a bridge under its own weight is an important variable in assessing its strength. However, the current testing method of load carrying capacity involves directly measuring deflection by randomly selecting a sample beam and testing its deflection, which may not accurately reflect the behavior of the entire bridges. Additionally, this testing method is expensive due to the need to install a testing rig. Therefore, a method for measuring deflection using an inclinometer tool that

can be placed directly on the bridge is of interest for practical use. This method is easy to install, can be placed directly on the bridge without the need for temporary scaffolders, and is quick to perform once the supports have been removed. The inclinometer tool can accurately reflect the deflection of the entire bridge and is more cost-effective than direct load testing methods. In testing, the array of inclinometers was installed on a sample beam of 9 meters, and deflection was simulated using Fourier transform theory. The obtained test results showed high accuracy. The accuracy from a simulation on a 40-meter bridge span using the proposed technique was found to be acceptable for actual bridge application.

Key words: Measuring instrument; Deflection; Static test; Bridge

1. บทนำ

การแอ่นตัวของสะพานในสภาวะโหลดที่ออกแบบไว้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการประเมินความปลอดภัยของสะพาน[2] เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ที่สามารถให้ผลการวัดค่าการแอ่นตัวที่มีความเสถียรและเชื่อถือได้มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดการแอ่นตัวของสะพานโดยตรงในการบำรุงรักษาสะพานที่มีอายุมาก ในการประเมินความปลอดภัยของสะพานและในการรับรองสะพานใหม่ที่สร้างขึ้นใหม่ วิธีการวัดโดยตรง ต้องใช้เชือกเหล็กเพื่อเชื่อมต่อสะพานกับเซ็นเซอร์ที่วางอยู่บนพื้นหรือโครงสร้างรองรับที่จุดวัดที่เลือกไว้ แต่วิธีการวัดโดยตรงนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้บนสะพานที่ข้ามลยสองฝั่งของแม่น้ำ ทางรถไฟ ทางหลวงและทะเล และสะพานที่มีช่วงห่างมาก เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ค้ำยันจำนวนมากในการติดตั้งเซ็นเซอร์

เพื่อเอาชนะข้อเสียของการวัดโดยตรง จึงได้มีการประดิษฐ์วิธีการวัดการบิดของสะพานโดยไม่ต้องสัมผัสกับสะพานโดยตรง มีวิธีการวัดการโค้งหัวใจของสะพานที่ไม่ต้องสัมผัสกับสะพานเอง ได้แก่ Inertial deflection measurement method ที่ใช้เซ็นเซอร์การสั่นสะเทือนที่มีความละเอียด

สูงและแม่นยำ วิธีการนี้มีความละเอียดสูงแต่ไม่สามารถวัดการโค้งงอของสะพานที่ไม่เคลื่อนไหวได้ เนื่องจากความสามารถในการตอบสนองต่ำของเซนเซอร์ต่อความถี่ต่ำ ทำให้ต้องทำการแก้ไขผลการวัด และวิธีการนี้ไม่สามารถวัดการการแอ่นตัวของสะพานภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ วิธีการวัดการวัดการการแอ่นตัวของสะพานโดยใช้อุปกรณ์แสงไฟฟ้า (photoelectric bridge deflection measurement method) มีความเร็วสูง และสามารถทำงานอัตโนมัติได้ แต่อุปกรณ์มีราคาสูงและวิธีการนี้มีความเสี่ยงต่อการรบกวนจากฝนและหมอก นอกจากนี้ วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับสะพานที่ไม่สามารถหาจุดสังเกตการณ์ที่คงที่ได้ภายในระยะ 500 เมตร จึงจำเป็นต้องมีวิธีการวัดที่ใช้ไม่ต้องสัมผัสกับสะพานเอง และวิธีการวัดโดยใช้เครื่องวัดการการแอ่นตัว เป็นวิธีการที่สามารถวัดการการแอ่นตัวของสะพานได้โดยติดตั้งเซนเซอร์ลงบนสะพานโดยตรง

วิธีการวัดการการแอ่นตัวของสะพานด้วยเครื่องวัดมุมเอียง คือการวัดมุมการหมุนในแนวตั้งของจุดควบคุมหลายจุดบนสะพานโดยใช้เครื่องวัดเอียง แล้วคำนวณค่าการบิดของสะพานจากค่าการเอียงนั้นๆ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดไว้ วิธีการทดสอบนี้สามารถวัดได้พร้อมกันทั้งการบิดของสะพานและมุมการหมุนของจุดที่ติดตั้งเครื่องวัด มีข้อดีดังนี้[2]

1. สามารถทดสอบการการแอ่นตัวของสะพานภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์และจลน์ได้
2. ง่ายต่อการติดตั้งและไม่จำเป็นต้องมีจุดอ้างอิงแบบนิ่ง
3. มีความแม่นยำสูง แต่มีราคาต่ำ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อควบคุมคุณภาพการก่อสร้างสะพานและให้ครอบคลุมทุกการก่อสร้าง จำเป็นต้องหาค่าการการแอ่นตัวของสะพาน ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดมุมเอียงตรวจสอบคุณภาพการก่อสร้างสะพานที่แสดงผลได้ทันที นอกจากนี้โดยเครื่องมือดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการการแอ่นตัวของสะพานกับคานทดลอง โดยจะจำลองการการแอ่นตัวและคำนวณค่าผิดพลาดของการวัด ทำให้เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างสะพานในทุกกรณี

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปริมาณ (quantitative research) ซึ่งเป็นวิธีค้นหาความรู้และความจริง โดยเน้นที่ข้อมูลเชิงตัวเลข ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการวัดการการแอ่นตัวของสะพานโดยใช้เครื่องวัดมุมเอียง
2. ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลการการแอ่นตัวของคานโดยใช้เครื่องวัดมุมเอียง และเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (LVDT sensor)
3. จำลองการการแอ่นตัวของคานออกมาเป็นโครงการการการแอ่นตัว

4. เปรียบเทียบค่าการการแอ่นตัวจากการวัดด้วยเครื่องวัดมุมเอียงเทียบกับเครื่องวัดการเคลื่อนที่ ซึ่งให้ผลที่มีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากเป็นวิธีการวัดตรง แล้วคำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดด้วยเครื่องวัดมุมเอียง

5. ทำการทดสอบโดยจำลองการการแอ่นตัวของ สะพานความยาวช่วง 40 เมตร โดยทำบนคานเหล็กกล่องความยาว 9 เมตร และเปรียบเทียบค่าการการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับที่จำลองจากโปรแกรม CSI Bridge แล้วคำนวณค่าความผิดพลาดของการวัด

6. สรุปผลการวิจัย

4. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้จัดทำได้ทบทวนเอกสาร แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

4.1 ความปลอดภัยและสภาวะใช้งาน

สภาวะการใช้งาน [1] คือการที่องค์อาคารสามารถรับน้ำหนักปกติโดยที่ยังไม่พังหรือแตกร้าว ซึ่งไม่เพียงแต่ต้องมีกำลังรับน้ำหนักอย่างปลอดภัยเท่านั้น เพราะในขณะที่รับน้ำหนักเต็มที่คานอาจเกิดการการการแอ่นตัวที่มากเกินไปหรือการการแอ่นตัวในระยะยาวเนื่องจากน้ำหนักคงค้างอาจทำให้เกิดการเสียหายได้ ดังนั้นนอกเหนือจากความสามารถในการรับน้ำหนักแล้ว การการแอ่นตัวเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความปลอดภัย และสภาวะใช้งานขององค์อาคาร

4.2 การการแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักตัวเอง

กล่าวคือ เมื่อคานได้รับน้ำหนักบรรทุกขนาดต่าง ๆ มากกระทำลงบนคาน น้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจะทำให้คานนั้นการการแอ่นตัวลงมาจากแนวเดิม ซึ่งระยะการการแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักตัวเองของคานนั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำบนคานดังกล่าว

โดยการวัดค่าการการแอ่นตัวภายใต้แรงกระทำต่าง ๆ จะพิจารณาบนคานตัวอย่างที่มีรูปแบบของแรงกระทำแตกต่างกันตามแต่ละตำแหน่งที่แยกกัน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้ายในการคำนวณค่าการการแอ่นตัว [5] การใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์

4.3 เครื่องมือวัดการการแอ่นตัว

การวัดค่าการการแอ่นตัวของคานสามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป โดยมีทั้งวิธีการวัดทางตรงและทางอ้อม ซึ่งในรายงานฉบับนี้นำเสนอ ทั้งหมด 2 วิธี [3] ได้แก่ วิธีการวัดความต่างระดับแม่นยำ (Precision Level Measurement Method) และ วิธีการวัดความโน้มเอียง (Inclination Measurement Method)

4.3.1 วิธีการวัดความต่างระดับแม่นยำ (Precision Level Measurement Method)

หลักการของ Precision Level Measurement Method คือการวัดความแตกต่างของความสูงระหว่างจุดสองจุดบนพื้นโดยใช้กระบอกรับระดับ

โดยวิธีการวัดดังกล่าวสามารถประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายอีกทั้งยังมีความแม่นยำที่สูง และเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการวัดการโก่งตัวของสะพานในทางวิศวกรรมเชิงประยุกต์ อย่างไรก็ตามเมื่อระยะในการวัดมีระยะที่มากและจำนวนจุดการวัดมีจำนวนมาก ประสิทธิภาพการวัดจะต่ำ อีกทั้งจุดที่ทำการวัดต้องอยู่ในสภาวะสถิตย์หรือไม่เคลื่อนที่ เพราะการสั่นสะเทือนของพื้นผิวสะพานอาจส่งผลต่อการวัด ทำให้ค่าการแอ่นตัวที่ได้มีคลาดเคลื่อนมากขึ้นได้

4.3.2 วิธีการวัดความโน้มเอียง (Inclination Measurement Method)

วิธีการ Inclination Measurement Method [3] คือการวัดมุมการหมุนในแนวตั้งของจุดที่สนใจในแนวตั้งบนสะพานด้วยเครื่องวัดความลาดเอียง จากนั้นคำนวณค่าการแอ่นตัวจากสมการทางคณิตศาสตร์

เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ วิธีทดสอบนี้สามารถวัดการแอ่นตัวได้พร้อมกันทั้งช่วงความยาวของสะพาน รวมทั้งวัดมุมการหมุนในแนวตั้งของแต่ละตำแหน่งของเครื่องมือ

วิธีการใช้เครื่องวัดมุมเอียงนี้มีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงอย่างละเอียดมากขึ้นในส่วนต่อไป

1. ไม่จำเป็นต้องมีตำแหน่งสังเกตการณ์คงที่ใกล้สะพาน เนื่องจากมีเครื่องวัดเอียงติดตั้งอยู่บนสะพานโดยตรง วิธีนี้ลดความขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมลง ซึ่งมีข้อดีมากกว่าวิธีการวัดการบิดของสะพานโดยตรง และวิธีการวัดการบิดของสะพานด้วยแสงไฟ วิธีนี้เหมาะสำหรับการวัดการบิดของสะพานที่มีระยะสูงและมีอุปสรรคอื่น ๆ อยู่ข้างล่างสะพาน
2. วิธีการใช้เครื่องวัดมุมเอียงนี้ช่วยลดเวลาปิดสะพานได้อย่างมาก เนื่องจากเครื่องวัดเอียงสามารถติดตั้งได้อย่างสะดวก
3. เครื่องวัดมุมเอียงสามารถวัดการแอ่นตัวภายใต้แรงที่กระทำบนสะพานแบบสถิตและแบบจลน์ได้ทั้งคู่
4. การทดลองเปรียบเทียบและทดสอบในการใช้งานจริงมากมายเป็นจำนวนมาก ได้ยืนยันได้ว่าวิธีการนี้มีความแม่นยำสูง
5. เครื่องวัดมุมเอียงมีราคาต่ำ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้

4.4 เครื่องวัดมุมเอียง (Inclinometer) [3]

เครื่องมือวัดมุมเอียงประกอบด้วยตัววัดความจุและระบบเซอร์โวที่ไม่ต้องใช้พลังงานเข้าร่วมด้วยกัน โดยจะหมุนเมื่อส่วนของสะพานหมุนได้ โหลดและลูกตุ้มที่มีแรงเฉื่อยในเครื่องมือวัดมุมเอียงจะเอียงตามไปด้วย ความจุแบบความเอียงสามารถตรวจจับและสร้างสัญญาณไฟฟ้าโดยวงจรที่ออกแบบอย่างละเอียด ซึ่งเป็นสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกี่ยวข้องกับส่วนของสะพาน จากสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ ผู้ใช้สามารถหาค่ามุมเอียงของส่วนของสะพานได้ สำหรับความละเอียดในการวัดของเครื่องมือวัดมุมเอียงจะอยู่ที่ 0.001 องศา

4.5 สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาและสืบค้นข้อมูลในการหาค่าการแอ่นตัวของคาน พบว่ามีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

4.5.1 Euler-Bernoulli beam theory [1]

หรือ Classical Beam Theory เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการประมาณค่าการแอ่นตัวของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกในแนวขวาง โดย 2 สมมติฐานพื้นฐานของทฤษฎีนี้คือ

1. เส้นรอบวงแข็งของวัสดุยึดหยุ่นไม่มากเกินไป หรือเรียกว่า "The deformations remain small" ซึ่งหมายความว่าเกิดการเกิดเส้นรอบวงแข็งของวัสดุไม่สามารถยืดหรือหดไปมากเกินไปโดยที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ

2. ภาพตัดขวางของตัวพื้นฐานของคานโครงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการบิดเบี้ยว หรือเรียกว่า "The cross sections of the beam under deformation, remain normal to the deflected axis" ซึ่งหมายความว่าเมื่อเกิดการบิดเบี้ยวของคานโครง ขอบเขตของตัวพื้นฐานของคานโครงจะยังคงเป็นขวางตั้งอยู่แนวตั้งเดิมที่เหมือนเดิมกับแกนที่โค้งอยู่

ซึ่งจะสามารถนำมาประมาณหาค่าการแอ่นตัวของคานได้ดังที่แสดงในสมการที่ (1)

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

โดย $y(x)$ คือ ค่าการแอ่นตัวในหน่วยเมตร, x_i คือ ระยะห่างจากจุดรองรับในหน่วยเมตร, M คือ โมเมนต์ดัดบนคานมีหน่วยเป็นกิโลนิวตันเมตร, E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานทดสอบ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคานทดสอบ มีหน่วยเป็น เซนติเมตรยกกำลัง 4

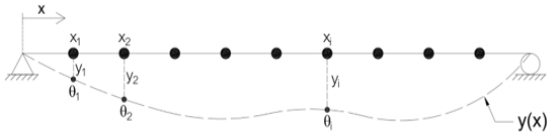


รูปที่ 1 สมมติฐาน Undeformed cross-sections

4.5.2 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform)

ในการแปลงค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมที่ถูกบันทึกมาเป็นการแอ่นตัวที่แท้จริงของคาน จะถือว่า Inclinometers จำนวน n ตัว เนื่องจากทุกฟังก์ชันสามารถแสดงเป็นรูปแบบอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) ได้ สมการความโค้งของคานใดๆ ($y(x)$) จึงถือเป็นผลรวมของฟังก์ชัน n -sin ซึ่งแต่ละฟังก์ชันมีแอมพลิจูดเท่ากับ q_i (Modal Amplitude) ดังแสดงในสมการ (2) เมื่อสามารถเขียนความโค้งในรูปอนุกรมฟูเรียร์ได้แล้ว การเคลื่อนที่เชิงมุมในแต่ละตำแหน่งสามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ของมันที่

สอดคล้องกับสมการ (2) เนื่องจาก Inclinometers มีจำนวนจำกัด จึงต้องแยกสมการ (3) ดังแสดงในสมการ (4) หลังจากการแบ่งจุดในการคำนวณแล้ว สิ่งที่ไม่ทราบเพียงอย่างเดียวคือเวกเตอร์แอมพลิจูดโมดอล ซึ่งสามารถแก้สมการได้ผ่านสมการ (5) เมื่อทราบแอมพลิจูดของโมดอลแล้ว ก็จะสามารถคำนวณค่าการเบี่ยงเบนแบบแยกส่วนได้



รูปที่ 2 การใช้อินคลิโนมิเตอร์วัดค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงมุม

$$y(x) = \sum_{j=1}^j \sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \cdot q_j \quad (2)$$

$$\theta(x) = y'(x) = \sum_{j=1}^j \frac{j\pi}{L} \cdot \cos\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \cdot q_j \quad (3)$$

$$\theta(x_i) = \sum_{j=1}^j \frac{j\pi}{L} \cdot \cos\left(\frac{j\pi x_i}{L}\right) \cdot q_j = A_{ij} q_j \quad (4)$$

$$\hat{q} = A^{-1}\theta \quad (5)$$

โดย x_j คือ ระยะห่างจากจุดรองรับในหน่วยเมตร, $y(x)$ คือ ค่าการแอ่นตัวในหน่วยเมตร, x คือ ความโน้มเอียงของคานในหน่วยเรเดียน, q คือ Modal Amplitude, j คือ Modal Number

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบการจำลองการแอ่นตัวตามเป้าหมาย

5.1.1. ผลการทดสอบก่อนปรับแก้

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการแอ่นตัวโดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด หรือไม่สามารถทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุอย่างแน่นอน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบนี้เพื่อนำข้อมูลไปปรับแก้ผลของค่า EI โดยผลที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการแอ่นตัวตามเป้าหมายก่อนปรับแก้ EI

ค่าการแอ่นตัวเป้าหมาย (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
10.00	13.92	39.23
20.00	27.62	38.10
30.00	41.44	38.13
40.00	55.02	37.56

ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวมากที่สุดแตกต่างจากค่าการแอ่นตัวเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้เฉลี่ยอยู่ที่ 38.62 % ดังนั้นต้องมีการปรับแก้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด เพื่อให้ค่าการแอ่นตัวมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมาย

5.1.2. ผลการปรับแก้ค่า EI

คณะผู้วิจัยได้ทำการคำนวณปรับแก้ค่า EI โดยค่า EI ที่ปรับแก้แล้วทำให้ค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกับค่าการแอ่นตัวเป้าหมายมากขึ้น เนื่องจากการคำนวณค่า EI ดังกล่าวใช้ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริงที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ เมื่อคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า EI ด้วยสมการการแอ่นตัวของแต่ละกรณีของการใส่น้ำหนักบรรทุกคงที่ทำให้ได้ค่า EI ที่สะท้อนกับความ เป็นจริง โดยได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการปรับแก้ค่า EI

ค่าการแอ่นตัวเป้าหมาย (มิลลิเมตร)	น้ำหนักกำหนด (กก./ม.)	EI เดิม (กก./ม. ²)	EI ใหม่ (กก./ม. ²)
10	7.64	65309	46888
20	15.28		47262
30	22.92		47250
40	30.56		47451

จากผลการทดสอบพบว่า EI ปรับแก้มีค่าน้อยลงกว่า EI เดิม โดยค่า EI ปรับแก้มีค่าเท่ากับ 65,309 กิโลกรัม-ตารางเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ EI เดิมซึ่งมีค่าเท่ากับ 47,289 กิโลกรัม-ตารางเมตร เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดและวัสดุทดสอบ

5.1.3. ผลการทดสอบหลังปรับแก้ EI

จากที่คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการแอ่นตัวก่อนปรับแก้ EI พบว่าค่าการแอ่นตัวนั้นแตกต่างกับเป้าหมายอยู่ โดยค่าการแอ่นตัวที่แตกต่างกันทาง คณะผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่าความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด ไม่ทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคานจริง และจากรอยเชื่อมคาน คณะผู้วิจัยจึงทำการคำนวณย้อนกลับด้วยสมการการแอ่นตัวของคานอย่างง่าย โดยมีผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการแอนตัวตามเป้าหมายหลังปรับแก้ EI

ผลของการแอนตัวที่กึ่งกลางคานทดลองเทียบกับค่าการแอนตัวเป้าหมาย หลังปรับแก้มีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.48 %

ค่าการแอนตัวเป้าหมาย (มิลลิเมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
10.00	10.46	4.60
20.00	20.37	1.87
30.00	30.56	1.88
40.00	40.63	1.57

5.2 ผลการทดสอบความสามารถในการอ่านค่า

5.2.1. ผลการทดสอบความสามารถในการอ่านค่าของเครื่องมือ หลังจากปรับแก้ค่า EI

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการแอนตัวของคานอย่างง่ายหรือคานช่วงเดียว ความยาว 9 เมตรด้วยเครื่องมือวัดทั้งสองรูปแบบได้แก่ เครื่องวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) และเครื่องวัดมุมเอียง (Inclinometer) โดยวัดค่าการแอนทดสอบเพื่อยืนยันทฤษฎีที่นำมาใช้ในการแปลงข้อมูล โดยได้ผลการทดสอบการแอนตัวดังตารางที่ 4 - 7

ตารางที่ 4 น้ำหนักกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 5.535 กิโลกรัมต่อเมตร และค่าการแอนตัวเป้าหมายเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
2.25	-7.69	-6.95	9.65
4.50	-10.46	-10.04	4.04
6.75	-7.69	-7.27	5.56
9.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5 น้ำหนักกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 11.071 กิโลกรัมต่อเมตร และค่าการแอนตัวเป้าหมายเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
2.25	-15.03	-13.89	7.58
4.50	-20.37	-19.63	3.67
6.75	-14.87	-14.07	5.35
9.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 6 น้ำหนักกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 16.606 กิโลกรัมต่อเมตร และค่าการแอนตัวเป้าหมายเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
2.25	-22.52	-21.04	6.59
4.50	-30.56	-29.70	2.83
6.75	-22.19	-21.34	3.82
9.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 7 น้ำหนักกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 22.142 กิโลกรัมต่อเมตร และค่าการแอนตัวเป้าหมายเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอนตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
2.25	-29.94	-28.23	5.71
4.50	-40.63	-39.76	2.14
6.75	-29.45	-28.64	2.75
9.00	0.00	0.00	0.00

จากผลการทดสอบดังที่แสดงในตารางที่ 4 - 7 พบว่าค่าการแอนตัวที่ได้จากสองเครื่องมือในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าแตกต่างกันประมาณ 2.14 - 9.65 % โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อน้ำหนักกำหนดเป้าหมายเพิ่มมากขึ้น

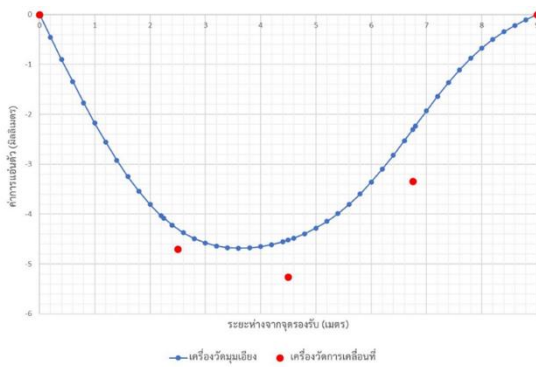
5.2.2. ผลการทดสอบความสามารถในการอ่านค่าของเครื่องมือด้วยผลแรงกระทำไม่คงที่

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้วัดและการจำลองเส้นโค้งการแอนตัวของคานด้วยการทำการทดสอบการกระจายของน้ำหนักบรรทุกทุก 17.78 กิโลกรัม/เมตร ที่กระทำลงบนบางช่วงคาน โดยได้จำลองรูปแบบของการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่ช่วง 0 - 0.25L, 0.75L - L, 0 - 0.5L และ 0.5L - L ได้ผลการทดสอบในแต่ละช่วงดังนี้

5.2.2.1 ผลการทดสอบบนช่วง 0 - 0.25L (ที่ช่วง 0 ถึง 2.25 เมตร)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบบนช่วง 0 - 0.25L

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
2.25	-4.71	-4.08	13.26
4.50	-5.26	-4.52	14.10
6.75	-3.34	-2.31	30.94

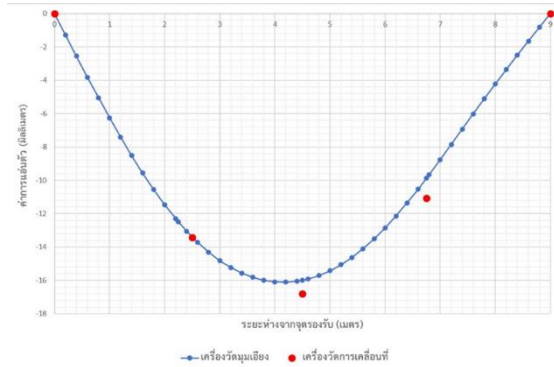


รูปที่ 3 เส้นโค้งการแอ่นตัวของกาทดสอบบนช่วง 0 - 0.25L

5.2.2.3 ผลการทดสอบบนช่วง 0 - 0.5L (ที่ช่วง 0 ถึง 4.5 เมตร)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบบนช่วง 0 - 0.5L

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
2.25	-13.45	-12.49	7.09
4.50	-16.83	-15.99	5.01
6.75	-11.09	-9.88	10.95

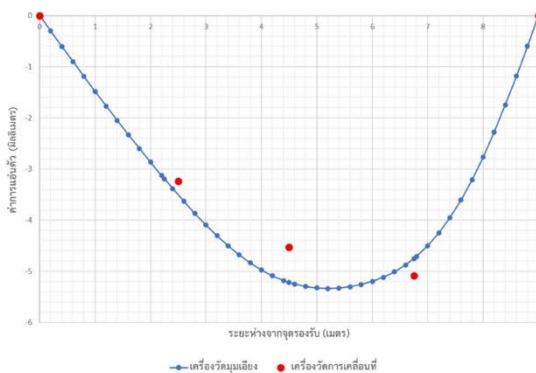


รูปที่ 5 เส้นโค้งการแอ่นตัวของกาทดสอบบนช่วง 0 - 0.5L

5.2.2.2 ผลการทดสอบบนช่วง 0.75L - L (ที่ช่วง 6.75 ถึง 9 เมตร)

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบบนช่วง 0.75L - L

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
2.25	-3.24	-3.19	1.47
4.50	-4.53	-5.22	15.28
6.75	-5.08	-4.75	6.48

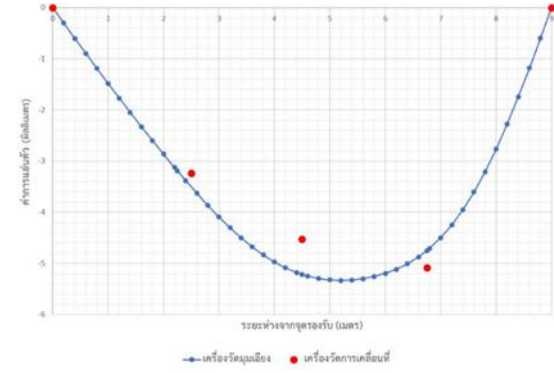


รูปที่ 4 เส้นโค้งการแอ่นตัวของกาทดสอบบนช่วง 0.75L - L

5.2.2.3 ผลการทดสอบบนช่วง 0.5L - L (ที่ช่วง 4.5 ถึง 9 เมตร)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบบนช่วง 0 - 0.5L

ตำแหน่งจากจุดรองรับ (เมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
2.25	-11.41	-11.14	2.31
4.50	-17.02	-17.04	0.12
6.75	-13.32	-13.36	0.29



รูปที่ 5 เส้นโค้งการแอ่นตัวของกาทดสอบบนช่วง 0 - 0.5L

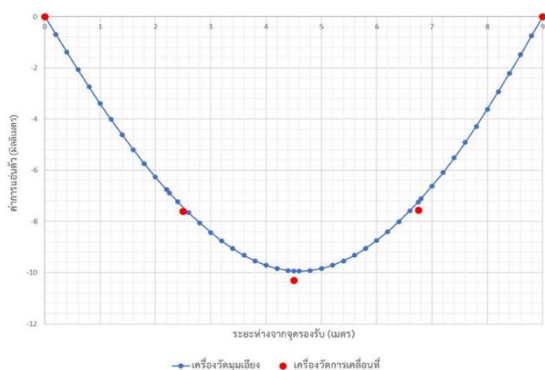
จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกไม่คงที่ การแปลงค่าการแอ่นตัวของคานจากค่ามุมเอียง เมื่อเทียบกับการแอ่นตัวจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่พบว่าผลการทดลองมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวอยู่ระหว่าง 0.21 - 30 % โดยช่วงที่มีความเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงคือช่วง 0 - 0.25L กับ 0.75L - L เนื่องจากเส้นโค้งการแอ่นตัวไม่เหมือนกับเส้นโค้งการแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ ซึ่งถ้าสังเกตรูปที่ 3 ณ ตำแหน่ง 6 เมตร เส้นโค้งการแอ่นตัวมีการเริ่มเปลี่ยนฟังก์ชันส่งผลให้ช่วง 6-9 เมตร เหลืออินคลิโนมิเตอร์ในการสร้างเส้นโค้งการแอ่นตัวเพียง 2 ตัว (ตำแหน่ง 7.2 และ 9 เมตร) ส่งผลให้ค่าที่แปลงมีโอกาสคลาดเคลื่อนสูง

5.3 ผลการทดสอบเทียบกับแบบจำลองสะพานจริง 40 เมตร

คณะผู้วิจัยต้องการจำลองการแอ่นตัวของสะพานตามโปรแกรม CSI Bridge ที่มีช่วงความยาว 40 เมตร ภายใต้น้ำหนักตัวเองพบว่ามีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วง 44.1 มิลลิเมตร เมื่อแปลงอยู่ในช่วงความยาวคาน 9 เมตร ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจะอยู่ที่ 9.92 มิลลิเมตร ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบเทียบกับแบบจำลองสะพานจริง 40 เมตร

ค่าการแอ่นตัวเป้าหมาย (มิลลิเมตร)	ค่าการแอ่นตัวจากเครื่องวัดมุมเอียง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
9.92	9.93	0.1



รูปที่ 6 เส้นโค้งการแอ่นตัวของการทดลองการแอ่นตัวของสะพาน 40 เมตร

จากการทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือทำให้ทราบว่าเครื่องวัดมุมเอียงนั้นสามารถอ่านค่าการแอ่นตัวได้อย่างตรงไปตรงมา ทางผู้วิจัยจึงนำผลการแอ่นตัวของเครื่องวัดมุมเอียงมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวเป้าหมาย ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน 0.1%

6. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

เป้าหมายของงานปริญญานิพนธ์นี้คือการหาวิธีการตรวจสอบคุณภาพสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกตัวเองที่สะดวกและรวดเร็ว คณะผู้จัดทำจึงได้นำเสนอวิธีการแปลงมุมเอียงเพื่อสร้างเส้นโค้งการแอ่นตัว ซึ่งคือวิธีการวัดมุมโดยใช้เครื่องมือวัดมุมเอียงโดยอาศัยทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเส้นโค้งการแอ่นตัว ด้วยการทดลองภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่เพื่อจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของสะพานที่มีความยาวช่วง 40 เมตร

6.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่และศึกษารวมกันที่เกี่ยวข้องเพื่อแปลงค่ามุมเอียงจากเครื่องวัดมุมเอียงที่ติดตั้งบนคานทดสอบเป็นเส้นโค้งการแอ่นตัวให้ใกล้เคียงกับค่าการแอ่นตัวเป้าหมายกำหนด โดยเทียบกับวิธีการวัดตรงด้วยเครื่องวัดการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกไม่คงที่ โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีคานของออยเลอร์ในการกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกเป้าหมาย และทฤษฎีการแปลง ฟูเรียร์ในการแปลงค่ามุมที่วัดได้เป็นค่าการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ และสามารถนำไปสร้างเป็นเส้นโค้งการแอ่นตัว จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยเครื่องวัดการเคลื่อนที่จึงได้ค่า EI ของคานทดสอบ ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนพฤติกรรมจริงของคานทดสอบ ทำให้สามารถจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานทดสอบด้วยทฤษฎีออยเลอร์ได้อย่างแม่นยำ

2. เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์กับการทดสอบ ณ น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ในแต่ละกรณี พบว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากวิธีการวัดความโน้มเอียงมีความแม่นยำสูง เมื่อเทียบกับวิธีการวัดตรง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.04% จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือวัดมุมเอียงมีความน่าเชื่อถือ

3. เมื่อแปลงค่าการแอ่นตัวของสะพานจริงมีความยาวช่วง 40 เมตร ที่ได้จากโปรแกรม CSI Bridge มาแปลงตามอัตราส่วนความยาวมาเป็นค่าการแอ่นตัวของคานทดสอบช่วงความยาว 9 เมตร พบว่าค่าการแอ่นตัวจากวิธีวัดความโน้มเอียงโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าการแอ่นตัวที่แปลงจากโปรแกรม CSI Bridge โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่กึ่งกลางคานอยู่ที่ 0.1% อีกทั้งลักษณะเส้นโค้งการแอ่นตัวใกล้เคียงกับเส้นโค้งการแอ่นตัวของสะพานจริง จึงสรุปได้ว่าวิธีวัดความโน้มเอียงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจำลองการแอ่นตัวของสะพานจริงได้

4. จากสภาพแวดล้อมที่ทำการติดตั้งคานและทดสอบด้วยการวางจตุรรองรับที่มีความสูงจำกัดส่งผลให้การติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่ทำได้ยาก เมื่อคำนึงถึงสภาวะการทำงานจริงที่อาจมีข้อจำกัดในการทำงานมากกว่าห้องทดลองทำให้วิธีการวัดตรงทำได้ยากเช่นกัน ในขณะเดียวกัน การติดตั้งเครื่องวัดมุมเอียงสามารถติดตั้งได้ง่ายเนื่องจากสามารถติดตั้งได้

บนคานทดสอบและมีความสะดวกสบายในการใช้งาน ดังนั้นวิธีวัดความโน้มเอียงด้วยเครื่องวัดมุมเอียงจึงเหมาะสำหรับสภาวะการทำงานที่จำกัดมากกว่าวิธีการวัดโดยตรง

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ด้านวัสดุทดสอบ

ควรเลือกคานทดสอบที่ไม่มีรอยเชื่อมตลอดช่วงความยาวคาน เนื่องจากบริเวณที่มีรอยเชื่อมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเลือกคานที่ไม่มีรอยเชื่อมจะให้ผลการทดลองที่สะท้อนความเป็นจริง รวมถึงคานทดสอบมีการทาสีทำให้ผิวสัมผัสไม่สมบูรณ์ อาจมีรอยขรุขระ ที่เกิดจากฟองอากาศ

6.2.2 ด้านสภาพการทำงาน

เครื่องมือในการทดสอบมีความไวในการตอบสนองสูง ควรทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่คงที่ เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบแบบสถิต จึงไม่ควรถูกรบกวนจากสิ่งภายนอกที่จะทำให้ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น

6.2.3 ด้านเครื่องมือทดสอบ

ควรติดตั้งสายดินเข้ากับกล่องแปลงสัญญาณเนื่องจากผลของสัญญาณการรบกวนทาง แม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้น อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์ที่ถูกรบกวนเกิดข้อบกพร่องในการทำงาน และในบางกรณีก็อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อตัวของผู้ที่ใช้งานอุปกรณ์เหล่านั้นได้อีกด้วย นอกจากนี้การอ่านค่าภายใต้หน้าหนักบรรทุกไม่คงที่ควรปรับตำแหน่งหรือเพิ่มตัวอินคลิโนมิเตอร์บริเวณที่มีการใส่โหลดเพราะช่วงของเส้นโค้งการอ่านแต่ละแบบต้องมีจำนวนอินคลิโนมิเตอร์อย่างน้อย 3 ตัว มาแปลงโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการทางวิศวกรรมโยธา ตามหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทางวิศวกรรม ศ.ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอย่างสูงในการช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานโครงการ ทำให้การจัดทำปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณศรัณย์ เรืองศรี และคุณวรากร อิมรักษา วิศวกรจากบริษัท เอ็นจิเนียริ่ง แอ็กส์เพิร์ท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ให้ความกรุณาในการยืมเครื่องมือและแนะนำการใช้งานเครื่องมือในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นปีและผู้ให้คำปรึกษาทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดการจัดทำปริญญาานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bauchau, O.A., Craig, J.I. "Euler-Bernoulli beam theory". Structural Analysis. Solid Mechanics and Its Applications, vol 163. Springer, Dordrecht, 2009.
- [2] Hou, X. M., Yang, X. S. and Huang, Q. "Using Inclinometers to Measure Bridge Deflection". *Journal of Bridge Engineering*, pp. 564-569, Sep. 2005.
- [3] Shao, S. S., Zhang, Y. X., Xu, Y. F. and Li, Z. F. "Application of Inclination Sensor in Deflection Deformation Deflection of Bridge", *31st Chinese Control and Decision Conference*, June. 2019.
- [4] Sun, L. M., Li, Y. X. and Zhang, W. "Experimental Study on Continuous Bridge-Deflection Estimation through Inclination and Strain". *Journal of Bridge Engineering*, 2020.
- [5] Wu, Y. and Li, J. "Deflection Measurement for Bridges Based on Secant Inclination". *Open Journal of Civil Engineering*, 11, pp. 427-433, 2021. <https://doi.org/10.4236/ojce.2021.114025>