

## การจำลองกระบวนการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานด้วย การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Simulation of Bridge Load Testing Process by Finite Element Model

กฤษฎา ลากพณิชกุล<sup>1,2\*</sup> ชัยศักดิ์ พิสิษฐไพบูลย์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>2</sup> บริษัท ชีโน-ไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)

\*Corresponding author; E-mail address: Kritsada.lap@dome.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

สะพานในประเทศไทยส่วนใหญ่ที่ถูกสร้างและใช้งานมากกว่า 25 ปี ควรต้องได้รับการตรวจสอบและประเมินโครงสร้าง ในกรณีที่จะมีการขนส่ง น้ำหนักบรรทุกหรือขนาดรถซึ่งมากกว่าที่กฎหมายกำหนดไว้ เช่นเดียวกับ การก่อสร้างในโครงการรถไฟฟ้าสายสีชมพูที่จะต้องมีการขนส่งคานทางวิ่งด้วยรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ ซึ่งต้องผ่านสะพานข้ามแยกหลักสี่ ดังนั้น การศึกษาจึงใช้สะพานข้ามแยกหลักสี่ ถนนแจ้งวัฒนะเป็นกรณีศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ให้ผลทางวิศวกรรมที่แม่นยำเพียงพอและใช้เวลาดำเนินการที่รวดเร็ว เพื่อใช้ในการจำลอง กระบวนการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน รวมไปถึงการจำลองการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีผลความคลาดเคลื่อนของการโก่งตัวไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดเมื่อเทียบกับการทดสอบภาคสนาม รวมทั้งยังใช้ระยะเวลาในการดำเนินการที่รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการทดสอบสะพาน และการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ในทางปฏิบัติต่อไป

คำสำคัญ: แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน, การจำลองกระบวนการทดสอบสะพาน

### Abstract

Almost of the bridges in Thailand, that have been built and used for more than 25 years, need to be assessed when the vehicle weight exceeds the legal limit. The Laksi Intersection Bridge was chosen as the case study because this bridge needs to support a heavy truck, which carried a huge guide way beam for construction of a part of the pink line monorail project. The objective of this research is to create a Finite element model (FEM) for simulation of the bridge load testing and transportation of Heavy truck. The finite element model needs to be accurate in terms of deflection and a short processing time. The results showed that the difference deflection between finite element

model and field test were indicated in the criteria in this work. Therefore, these finite element models can be used for simulation of bridge load testing and transportation of heavy truck.

Keywords: Finite element model, Bridge load test, Simulation of the Bridge Load testing

### 1. บทนำ

#### 1.1 คำนำ

การก่อสร้างในโครงการรถไฟฟ้าสายสีชมพู มีความจำเป็นต้องขนส่งคานทางวิ่ง (Guide Way Beam) จากโรงงานผลิตขึ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปบริเวณ อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี เข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง ตามถนนติวานนท์, ถนนแจ้งวัฒนะและถนนรามอินทรา โดยที่รถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ซึ่งจะมีน้ำหนักและจำนวนเพลามากกว่าที่กฎหมายกำหนด [1] จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานก่อนการใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบสะพานภาคสนามภายใต้ น้ำหนักบรรทุกสถิตและพลวัตนั้น จัดว่าเป็นวิธีการทดสอบที่เป็นที่นิยมทั้งในประเทศไทย [2-3] และในต่างประเทศ [4-5] เพื่อใช้ในการประเมินกำลังของสะพาน และเมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้น มักจะมีการประเมินกำลังของสะพานด้วยวิธีการคำนวณ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ในรูปของ Safety index [6] ขณะเดียวกัน การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการประเมินผลการวิเคราะห์โครงสร้างควบคู่ไปกับการทดสอบสะพานภาคสนาม ก็เป็นที่นิยมโดยทั่วไป เช่นเดียวกัน โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประเมินค่าต่างๆที่สำคัญได้ อาทิ การประเมินค่าอัตราส่วนการกระจายของน้ำหนักบรรทุก (Distribution factor) ระหว่างการทดสอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

โดยที่การใช้งานแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มักจะมีข้อสงสัยเรื่องความแม่นยำของการให้ผลทางวิศวกรรม ที่จะขึ้นกับข้อมูลที่ใส่และความละเอียดของแบบจำลอง ซึ่งโดยหลักการ ความแม่นยำของการให้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะแปรผันตามความละเอียดของแบบจำลองโดยตรง ยิ่งแบบจำลองมีความละเอียดมาก ก็จะทำให้ผลทางวิศวกรรมที่แม่นยำมากขึ้นตามกันไป แต่ทั้งนี้ในหลายๆ กรณีในทางปฏิบัติ

พบว่า การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองมากเช่นเดียวกัน ซึ่งจะไม่เหมาะสมต่อการนำมาปรับใช้ในทางปฏิบัติในหลายๆ กรณี กรณีการทดสอบสะพานเพื่อใช้ในการขนส่งคานทางวิ่งก็เช่นเดียวกัน หากทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เวลานาน อาจส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการตัดสินใจในการใช้งานของสะพานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยจึงสนใจในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดเพียงพอต่อการให้ผลทางวิศวกรรมที่แม่นยำ แต่ใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ยังไม่ค่อยมีผู้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองที่มีความละเอียดน้อยจนถึงความละเอียดปานกลางและนำมาใช้ในการจำลองกระบวนการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน หรือหากมีการศึกษาการทดสอบสะพาน ก็มักจะเน้นไปที่วิธีการทดสอบภาคสนามเป็นหลัก โดยไม่ได้มุ่งเน้นไปที่ผลของความละเอียดของแบบจำลอง ทั้งนี้ Murray และคณะได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีความละเอียดน้อย ตั้งแต่รูปแบบ 2D Grillage, แบบจำลองละเอียดปานกลาง 3D Frame & Shell ไปจนถึงแบบจำลองที่มีความซับซ้อน 3D Solid [7] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์รูปแบบของ 3D Frame & Shell มีการให้ผลทางวิศวกรรมที่ยอมรับได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การสร้างแบบจำลองความละเอียดปานกลาง 3D Frame & Shell โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 [8] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เป็นที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในการนำมาสร้างแบบจำลองของโครงสร้างสะพานสำหรับมาใช้ในการงานวิจัยทางวิชาการ [5,9,10,11] นอกจากนี้งานวิจัยนี้จะนำเสนอภาพรวม ขั้นตอน วิธีการในการทดสอบสะพาน และวิธีการในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดปานกลาง ที่เพียงพอต่อการให้ผลทางวิศวกรรมที่แม่นยำด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

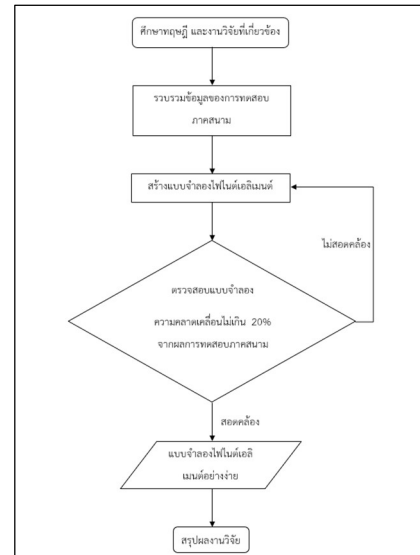
สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ความละเอียดปานกลาง ที่ให้ผลทางวิศวกรรมที่แม่นยำเพียงพอต่อการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เพื่อใช้ในการจำลองการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพาน และใช้ในการจำลองผลตอบสนองของโครงสร้างจากการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ โดยเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลไม่นาน เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการศึกษาในงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากนั้นรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบภาคสนาม [11] และแบบรายละเอียดการออกแบบ (Detailed design drawing) ของสะพาน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 Version 22 [8] หลังจากนั้นจึงกำหนดน้ำหนักบรรทุกสถิตแล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้าง แล้วจึงทำการเปรียบเทียบผลการโก่งตัวของคานสะพานตัวใน (Interior beam) ซึ่งจะเป็นคานตัวเดียวกันกับที่ติดตั้ง

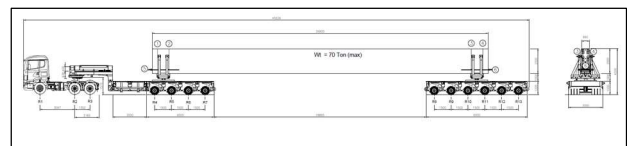
อุปกรณ์การทดสอบภาคสนาม ซึ่งการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างจะยังคงอยู่ในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic behavior) และเมื่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์สมมติฐานความคลาดเคลื่อนทั่วไปที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม คือ ไม่เกินร้อยละ 20 จึงนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว มาใช้ในการจำลองการทดสอบน้ำหนักบรรทุกพลวัต และจำลองการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

### 2.2 การขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่งของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร

รถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง (Guide way beam) ของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีชมพู ซึ่งคานทางวิ่งนั้นจะมีน้ำหนักมาตรฐานที่ 70 ตัน ซึ่งจากรูปแบบของรถบรรทุกพ่วงจะพบว่า น้ำหนักบรรทุกลงเพลานี้ไม่เกินที่กฎหมายกำหนด แต่จะมีจำนวนเพลามากกว่ารูปแบบมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด [1] คือ จำนวน 13 เพลา ตลอดความยาวรวมประมาณ 42 เมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 2 โดยก่อนที่จะสามารถทำการวิ่งขนส่งจริงของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่นั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบภาคสนาม เพื่อประเมินความปลอดภัยของสะพานก่อน จึงทำให้ต้องมีการทดสอบภาคสนามภายใต้ น้ำหนักบรรทุกสถิตและพลวัต

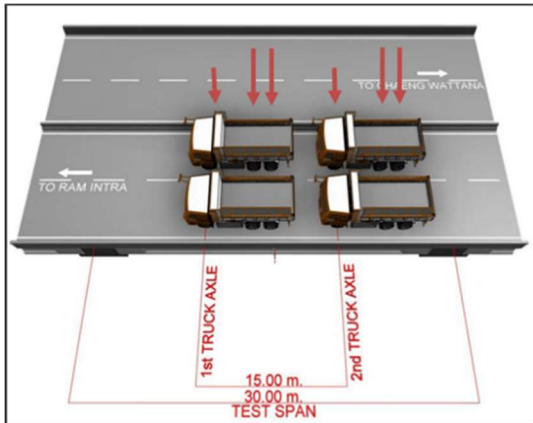


รูปที่ 2 รถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง

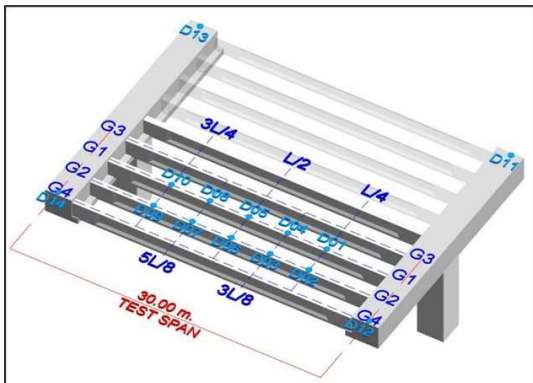
### 2.3 การทดสอบภาคสนามภายใต้ น้ำหนักบรรทุกสถิต

ดำเนินการโดยใช้รถบรรทุกขนาด 25 ตัน จำนวน 4 คัน (จำนวน 6 เพลา) จะค่อยๆ เคลื่อนผ่านสะพาน โดยจะขยับตำแหน่งครั้งละ 2.5 เมตร และใช้ตำแหน่งล้อหน้าของรถบรรทุกแถวที่ 1 ในการกำหนดตำแหน่งทดสอบ (Testing Position No.) ซึ่งวัดระยะจากแนวคานขวางของสะพานด้านที่รถวิ่งเข้า โดยทำการทดสอบในช่วงคานสะพานที่เลือกไว้เพียง 1 ช่วง

สะพาน เนื่องจากข้อจำกัดที่สะพานจะต้องสามารถใช้งานการจราจรได้ตามปกติ ซึ่งในภาคสนามจะมีการทดสอบทั้งสิ้น 30 ตำแหน่ง แต่งานวิจัยนี้จะพิจารณาตำแหน่งการทดสอบที่ 9, 10, 11, และ 12 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่น้ำหนักของล้อรถบรรทุกทั้ง 6 เพลาจะอยู่ในช่วงความยาวของคานรูปตัวไอทั้งหมดดังรูปที่ 3 และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการโก่งตัวดังรูปที่ 4 ติดตั้งที่ระยะ  $L/4$ ,  $3L/8$ ,  $L/2$ ,  $5L/8$ , และ  $3L/4$  ตามลำดับ และจะได้ผลการทดสอบ คือ ค่าการแอนตัวแนวตั้ง (Vertical Displacement) และค่าความเครียด (Strain)



รูปที่ 3 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ Displacement Transducer

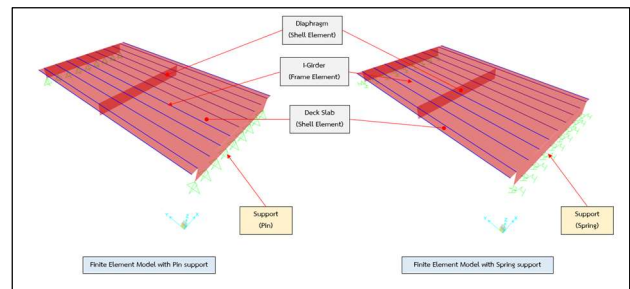
#### 2.4 การทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกพลวัต

หลังจากทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกสล็อตแล้ว จึงทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกพลวัตโดยให้รถบรรทุกขนาด 25 ตัน จำนวน 4 คัน เคลื่อนที่ผ่านช่วงสะพานที่ทำการเลือกไว้ ด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และ 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ โดยจะยังสามารถแสดงผลจากอุปกรณ์ตรวจวัดเช่นเดียวกันกับการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต

#### 2.5 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการสร้างจำลองการทดสอบน้ำหนักบรรทุก งานวิจัยนี้ใช้การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 Version 22 ซึ่งจะมีแบบจำลอง 2 รูปแบบคือ 1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจุดรองรับเป็น Pin และ 2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจุดรองรับ

เป็น Spring โดยที่การกำหนดค่าคุณสมบัติความแข็งเกร็งของ Spring จะใช้การสมมติฐานจากข้อมูลที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยการสร้างแบบจำลองโดยใช้คุณสมบัติวัสดุ, ขนาดหน้าตัด และระยะต่างๆของสะพาน จากแบบรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง (Detailed design drawing) ของสะพาน ซึ่งจะมีข้อมูลที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองตามตารางที่ 1 ขณะที่การใช้รูปแบบของโครงสร้างที่สำคัญ จะใช้รูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็น 3D Frame&Shell ซึ่งการกำหนดให้คานรูปตัวไอเป็น Frame element ขณะที่พื้น (Slab) และ Diaphragm จะกำหนดให้เป็น Shell element ตามตารางที่ 2 จากนั้นทำการกำหนดน้ำหนักบรรทุกต่างๆที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย น้ำหนักพื้นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต และน้ำหนักแผ่นกันทางวิ่ง, น้ำหนักบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต ซึ่งการกำหนดน้ำหนักบรรทุกในโปรแกรม SAP2000 จะใช้การกำหนดน้ำหนักแบบจุด (Point load) ที่ละตำแหน่งการทดสอบดังรูปที่ 6 โดยจะมีตำแหน่งและขนาดน้ำหนักบรรทุกดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเน้นศึกษาที่ตำแหน่งการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสล็อตที่ 9, 10, 11, และ 12 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่น้ำหนักของล้อรถบรรทุกทั้ง 6 เพลาจะอยู่ในช่วงความยาวของคานรูปตัวไอทั้งหมด และจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้าง หลังจากนั้นจึงนำมาหาค่าการโก่งตัวของคานช่วงใน (Interior beam) ที่จุดกึ่งกลางคาน ระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต เมื่อผลการเปรียบเทียบมีความคลื่อนอยู่ในเกณฑ์สมมติฐานที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม คือ มีคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 จึงจะนำแบบจำลองนั้น มากำหนดน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving load) ของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกพลวัตและการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ ซึ่งการใส่น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving load) ดังรูปที่ 7 นั้น เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเส้นอิทธิพล (Influence Line) และหลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างอีกครั้ง เพื่อนำผลมาใช้ประโยชน์ในกรณีที่จะนำไปใช้งานด้านอื่นๆ เพิ่มเติมในอนาคต เช่น การวิเคราะห์การรับน้ำหนักของคานคอนกรีตรูปตัวไอ เป็นต้น

ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองที่มีจุดรองรับเป็น Spring จะมีการปรับแก้ค่าตัวแปรในกรณีที่ได้ผลการโก่งตัวไม่อยู่ในสมมติฐานเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ โดยทำการปรับค่าคุณสมบัติความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของ Spring ที่ได้จากการสมมติฐานค่าความแข็งเกร็งจากข้อมูลแบบรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างและข้อมูลที่เกี่ยวข้องของสะพาน

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

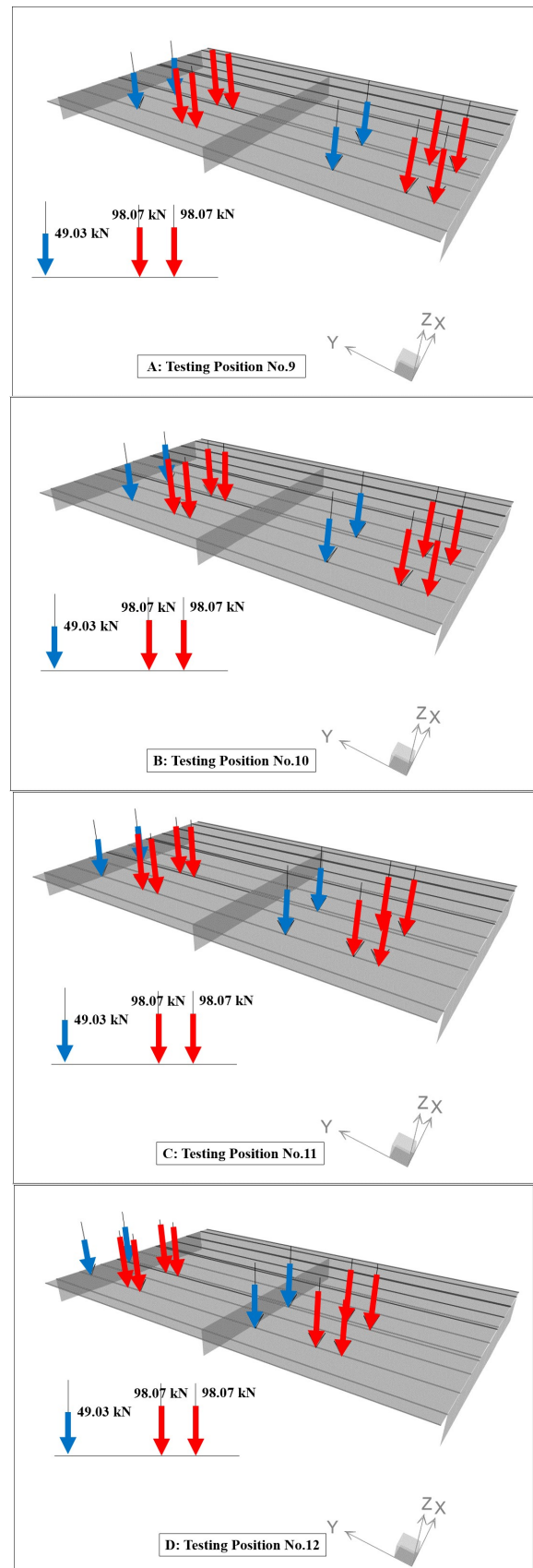
Bridge type of structure: Simple span I-Girder		
Typical span length	30.000	m.
Total length	510.000	m.
Traffic lane	4	lanes
Width	12.460	m.
I-Girder		
Span length (support to support)	28.000	m.
Spacing	1.950	m.
Cross section - Height	1.800	m.
- Width	0.650	m.
Concrete compressive strength	42	MPa
Slab (Topping with Asphaltic 5 cm.)		
Slab thickness	0.200	m.
Concrete compressive strength	36	MPa
End Diaphragm (At support)		
thickness	0.500	m.
Concrete compressive strength	36	MPa
Intermediate Diaphragm (At middle)		
thickness	0.250	m.
Concrete compressive strength	36	MPa

ตารางที่ 2 การเลือกใช้รูปแบบโครงสร้างในโปรแกรม SAP2000

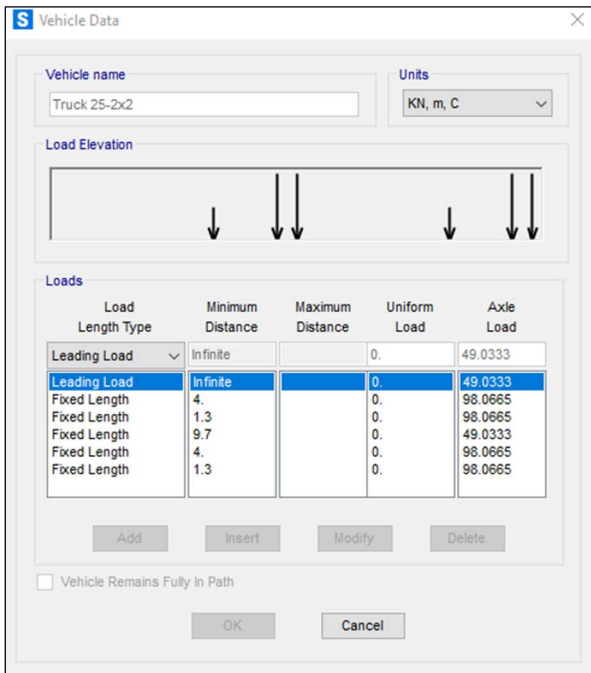
Real Structure	Element Type in SAP2000
Support	Pinned, Spring
End Diaphragm	Shell (Thick)
Intermediate Diaphragm	Shell (Thin)
I-Girder	Frame Element
Slab	Shell Thin

ตารางที่ 3 ตำแหน่งและขนาดของน้ำหนักแบบจุด จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต

Testing Position No. and Location	Location of Point load (m.)					
	P1 (49.05 kN)	P2 (98.10 kN)	P3 (98.10 kN)	P4 (49.05 kN)	P5 (98.10 kN)	P6 (98.10 kN)
No.9 and 1 <sup>st</sup> Axle at 19.000 m.	19.00	15.00	13.70	4.00	0.00	-1.30
No.10 and 1 <sup>st</sup> Axle at 21.500 m.	21.50	17.50	16.20	6.50	2.50	1.20
No.11 and 1 <sup>st</sup> Axle at 24.000 m.	24.00	20.00	18.70	9.00	5.00	3.70
No.12 and 1 <sup>st</sup> Axle at 26.500 m.	26.50	22.50	21.20	11.50	7.50	6.20



รูปที่ 6 การใส่น้ำหนักแบบจุดจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกสล็อต



รูปที่ 7 การกำหนดน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving Load)

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิต

ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตวัดได้จากอุปกรณ์ทดสอบ โดยจะมีผลที่สำคัญที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ ผลการโก่งตัวในแนวดิ่ง ตามตารางที่ 4 จะแสดงผลการโก่งตัวจากตำแหน่งการทดสอบที่ 9 ถึง 12 สำหรับค่าที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวอ่อนตัว (Displacement transducer) ตำแหน่ง D5 หรือบริเวณจุดกึ่งกลางของคาน G1 ซึ่งจะได้ค่าการโก่งตัวจากตำแหน่งการทดสอบเท่ากับ 4.24 มิลลิเมตร, 4.52 มิลลิเมตร, 4.51 มิลลิเมตร, และ 4.23 มิลลิเมตรตามลำดับ

#### 3.2 ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกพลวัต

ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกพลวัตโดยที่ใช้รถบรรทุกจำนวน 4 คันวิ่งด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะให้ค่าการโก่งตัวสูงสุด จะเป็นไปตามตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดการโก่งตัว

(Displacement transducer) เท่ากับ 3.87 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และ 3.57 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตร/ชั่วโมงตามลำดับ ขณะที่ค่าอื่นๆที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบนี้จะสามารถนำไปใช้ในการศึกษาหรือวิเคราะห์ข้อมูลด้านอื่นๆ ต่อไป

#### 3.3 ผลการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง

ผลการติดตามการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่งของโครงการรถไฟฟาสายสีชมพูจำนวน 13 ครั้ง ตามตารางที่ 6 จะแสดงให้เห็นถึงค่าการโก่งตัวสูงสุดขณะขนส่งในแต่ละครั้ง ซึ่งพบว่า การโก่งตัวสูงสุดที่คาน G1 อยู่ที่ 6.76 มิลลิเมตร

#### 3.4 ผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า เมื่อได้ทำการกำหนดน้ำหนักบรรทุกสถิต ที่ตำแหน่งการทดสอบที่ 9, 10, 11, และ 12 นั้น จะได้ผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวระหว่างผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิต และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสองรูปแบบจุดรองรับ (Pin และ Spring) ตามตารางที่ 7 และรูปที่ 8 ซึ่งหลังจากการปรับค่าความแข็งเกร็งของจุดรองรับแบบสปริงแล้ว จะทำให้ได้ค่าการโก่งตัวในแนวดิ่งที่จุดกึ่งกลางคานทั้งสองแบบจำลอง (จุดรองรับแบบ Pin และ Spring) อยู่ในสมมติฐานเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งถือว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปใช้ในการจำลองการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของสะพานได้

#### 3.5 ผลการจำลองการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง

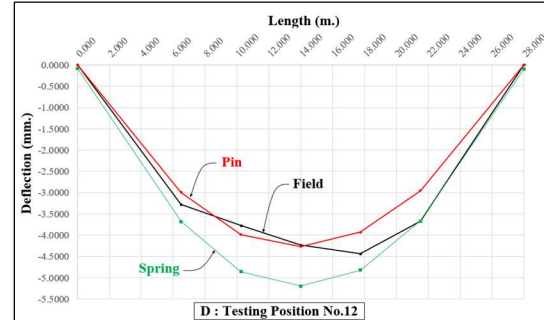
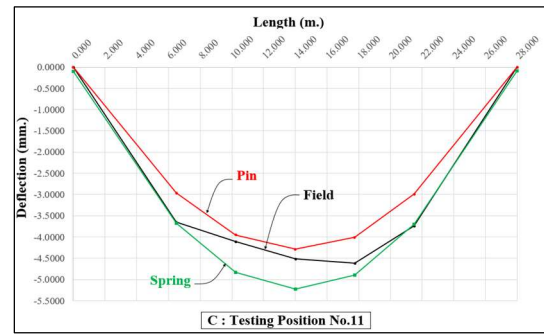
หลังจากที่ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความแม่นยำทางวิศวกรรมเพียงพอแล้ว จึงทำการกำหนดน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving load) ลงในแบบจำลอง จึงได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นไปตามตารางที่ 8 และรูปที่ 9 ถึง 12 ซึ่งจะแสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากรูปแบบน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ซึ่งจำลองการขนส่งด้วยรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่งในโครงการรถไฟฟาสายสีชมพู จะให้ค่าการโก่งตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจุดรองรับเป็น Pin และ Spring ที่ 6.667 และ 7.820 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งจะใกล้เคียงกับการขนส่งจริงที่ 6.760 มิลลิเมตร และนอกจากนี้ยังให้ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดซึ่งสามารถนำไปใช้ด้านอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การวิเคราะห์การรับน้ำหนักของคานคอนกรีตรูปตัวไอ เป็นต้น

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิต (จากอุปกรณ์ Displacement Transducer)

Testing Position No.	Displacement Transducer (mm.)									
	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10
9	-3.75	-3.44	-3.99	-4.25	-4.24	-4.56	-4.16	-3.88	-3.21	-2.96
10	-3.83	-3.55	-4.18	-4.43	-4.52	-4.83	-4.54	-4.27	-3.58	-3.31
11	-3.65	-3.40	-4.11	-4.35	-4.51	-4.81	-4.62	-4.36	-3.74	-3.46
12	-3.28	-3.05	-3.77	-4.00	-4.23	-4.55	-4.43	-4.14	-3.67	-3.37

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกพลวัต

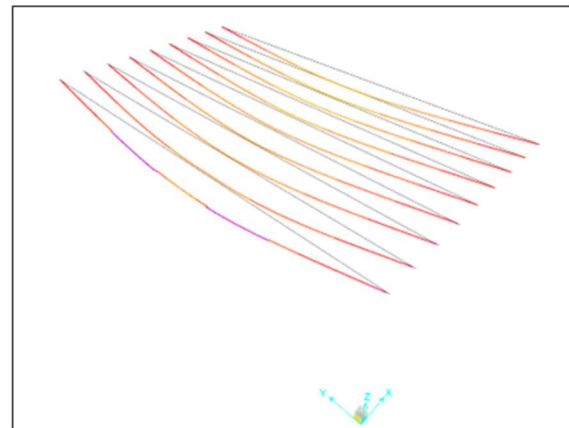
No.	Maximum Deflection Beam G2 (mm.)	Maximum Deflection Beam G1 (mm.)
1	-4.41	-5.21
2	-6.07	-6.76
3	-3.54	-3.87
4	-4.22	-5.53
5	-4.15	-4.43
6	-4.42	-4.76
7	-2.66	-3.01
8	-4.06	-4.92
9	-2.59	-3.29
10	-4.01	-5.11
11	-4.12	-4.92
12	-4.19	-5.18
13	-4.92	-5.54



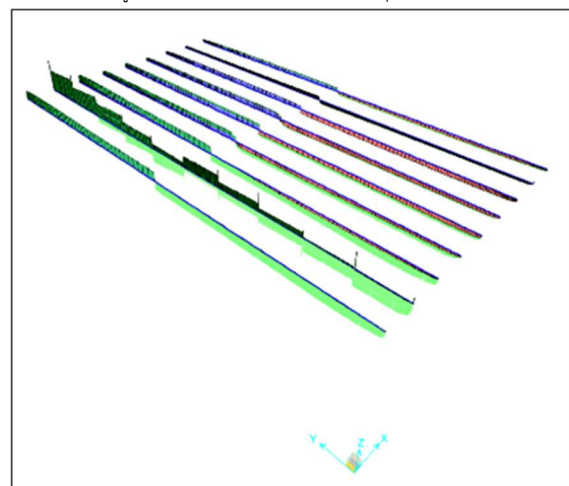
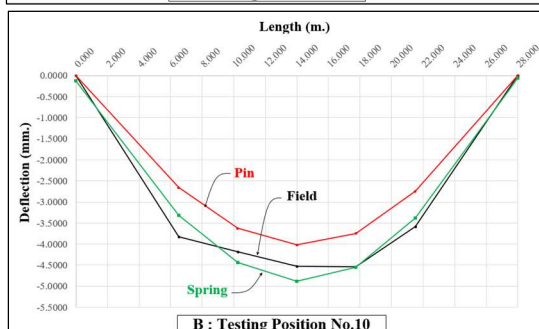
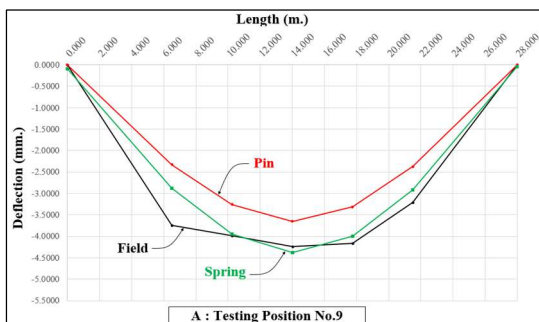
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบการโก่งตัวระหว่างการทดสอบภาคสนามและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 6 ผลการตรวจวัดจากการขนส่งคานทางวิ่ง

Item	4-Truck 20 km./hr.	4-Truck 40 km./hr.
Maximum Girder Deflection (mm.)	-3.87	-3.57
Maximum Girder Location	D6	D6
Maximum Pier Cap Deflection (mm.)	-1.76	-1.56
Maximum Strain (Micron)	51	49
Maximum Strain Location	S16	S7
Acceleration Peak Amplitude Band (G)	0.0369	0.0319



รูปที่ 9 การโก่งตัวจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่



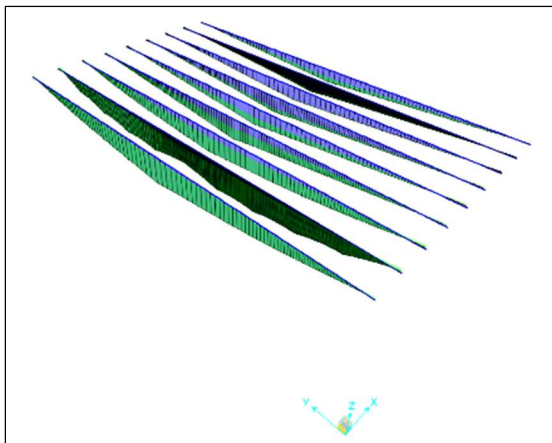
รูปที่ 10 แรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบการโก่งตัวของคานตัวใน (Interior Beam) ระหว่างการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิต และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

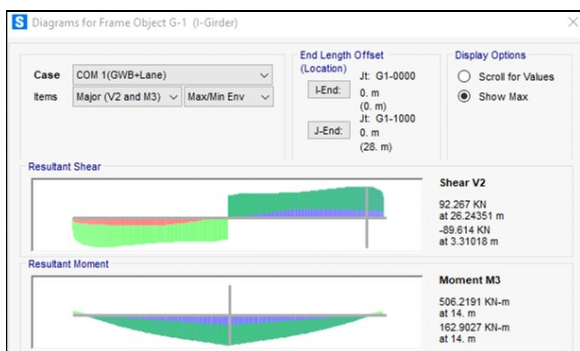
Testing Position No.	Protocol	Point of Length at Beam (m.)						
		Deflection at point (mm.)						
		0.000	6.500	10.250	14.000	17.750	21.500	28.000
9	Field test	0.0000	-3.7500	-3.9900	-4.2400	-4.1600	-3.2100	0.0000
	FEM-Pin	0.0000	-2.3259	-3.2601	-3.6495	-3.3153	-2.3722	0.0000
	FEM-Spring	-0.0940	-2.8777	-3.9489	-4.3853	-4.0034	-2.9123	-0.0473
10	Field test	0.0000	-3.8300	-4.1800	-4.5200	-4.5400	-3.5800	0.0000
	FEM-Pin	0.0000	-2.6592	-3.6242	-4.0191	-3.7466	-2.7457	0.0000
	FEM-Spring	-0.1210	-3.3129	-4.4336	-4.8799	-4.5573	-3.3858	-0.0644
11	Field test	0.0000	-3.6500	-4.1100	-4.5100	-4.6200	-3.7400	0.0000
	FEM-Pin	0.0000	-2.9664	-3.9548	-4.2906	-4.0101	-2.9942	0.0000
	FEM-Spring	-0.1037	-3.6695	-4.8338	-5.2298	-4.8991	-3.7022	-0.0835
12	Field test	0.0000	-3.2800	-3.7700	-4.2300	-4.4300	-3.6700	0.0000
	FEM-Pin	0.0000	-2.9919	-3.9847	-4.2627	-3.9305	-2.9546	0.0000
	FEM-Spring	-0.0850	-3.6823	-4.8548	-5.1960	-4.8172	-3.6679	-0.1021

ตารางที่ 8 ค่าการโก่งตัวจากการขนส่งจริงและแบบจำลอง

Protocol	Deflection at Mid-span (mm.)
Truck transport (Table 6)	6.760
FEM-Pin	6.666
FEM-Spring	7.820



รูปที่ 11 โมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่



รูปที่ 12 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่

#### 4. การวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตและพลวัต พบว่า การโก่งตัวสูงสุดของคานรูปตัวไอ (I-Girder) ตัวใน อยู่ที่ 4.83 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับ การโก่งตัวสูงสุดจากการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ ที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่งที่มีผลการโก่งตัวสูงสุด 6.76 มม. ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน AASHTO (L/800) [13] จึงถือได้ว่า สะพานข้ามแยกหลักสี่ ถนนแจ้งวัฒนะมีความปลอดภัยในการใช้งาน ขณะที่การประเมินแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ความคลาดเคลื่อนของผลการโก่งตัวของแบบจำลองยังคงอยู่ในเกณฑ์สมมติฐานความคลาดเคลื่อนโดยทั่วไปที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม จึงสามารถใช้ในการจำลองกระบวนการทดสอบสะพานและการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงได้ ทั้งในรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกสถิตที่ใช้การกำหนดน้ำหนักแบบจุด (Point load) และรูปแบบน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ (Moving load)

#### 5. บทสรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตและพลวัต มีค่าการโก่งตัวสูงสุด 4.83 มิลลิเมตร ขณะที่การขนส่งของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่ที่ใช้ขนส่งคานทางวิ่ง มีค่าการโก่งตัวสูงสุด 6.76 มิลลิเมตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน AASHTO จึงสรุปได้ว่า สะพานข้ามแยกหลักสี่ ถนนแจ้งวัฒนะ มีความปลอดภัยในการใช้งานขนส่งของรถบรรทุกพ่วงขนาดใหญ่
- แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดสอบภาคสนาม และแบบรายละเอียดการออกแบบ (Detailed design drawing) ของสะพาน มีการให้ผลการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์สมมติฐานความคลาดเคลื่อนทั่วไปที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรมคือ ไม่เกินร้อยละ 20 จึงถือว่า แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการจำลองการทดสอบสะพานหรือการขนส่งต่างๆ หรือใช้ในการจำลองสะพานอื่นๆ ที่

มีรูปแบบเดียวกัน ในกรณีที่ต้องการข้อมูลเบื้องต้นก่อนการทดสอบจริงได้ โดยเสนอให้ใช้แบบจำลองที่มีจุดรองรับเป็น Spring ในกรณีที่สามารถหาค่าคุณสมบัติความแข็งแรง (Stiffness) ได้ เนื่องจากจะให้ผลการโก่งตัวที่สูงกว่าจุดรองรับแบบ Pin ซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างปลอดภัย (Conservative) มากกว่า

3. จากการสร้างศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การใช้งานแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดของแบบจำลองปานกลาง คือ รูปแบบ 3D Frame & Shell ด้วยโปรแกรม SAP2000 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองการทดสอบน้ำหนักบรรทุกหรือจำลองการขนส่งของรถบรรทุกพ่วงที่มีขนาดใหญ่ได้ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูง (3D Solid) ซึ่งใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองนาน ซึ่งการใช้แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ ในกรณีที่ต้องการการตัดสินใจที่รวดเร็ว

นอกจากนี้จากการศึกษานี้ยังมีข้อเสนอแนะต่อการใช้งานสะพานอื่นๆ ในประเทศไทยที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 25 ปีนั้น ควรต้องได้รับการบำรุงรักษาและประเมินสุขภาพของสะพานเป็นระยะๆ รวมไปถึงควรต้องมีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกภาคสนามในกรณีที่จะมีการใช้งานในรูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนดด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] “ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดิน และผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่ได้กำหนดหรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหาย เดินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน (ฉบับที่ 8) พ.ศ. 2558” (2558, 13 มีนาคม). *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 132 ตอนพิเศษที่ 57 ง, หน้า 24-25.
- [2] กิตจาภรณ์ ปิ่นละมัย (2559). *การตรวจสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานกรุงเทพมหานครเพื่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสะพาน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [3] ณัฐพร รักษากิจ (2561). *การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกและตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบคานซิง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] Dong, C., Bas, S., Debees, M., Alver, N. and Catbas, F. N. (2020). Bridge Load Testing for Identifying Live Load Distribution, Load Rating, Serviceability and Dynamic Response. *Frontiers in Built Environment*, 6, 46.
- [5] Abedin, M., Basalo, F., Kiani, N., Mehrabi, A. B. and Nanni, A. (2022). Bridge load testing and damage evaluation using model updating method. *Engineering Structures*, 252, 113648.
- [6] ประเสริฐ รังสีเสนีย์พิทักษ์ (2559). *การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างทางยกระดับคู่ขนานลอยฟ้าบรมราชชนนี โดยวิธี Load Rating*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] Murray, C. D., Arancibia, M. D., Okumus, P. and Floyd, R. W. (2019). Destructive testing and computer modeling of a scale prestressed concrete I-girder bridge. *Engineering Structures*, 183, pp.195-205.
- [8] Computers & Structures, Inc. (2022). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*.
- [9] Atmaca, B. (2021). Size and post-tensioning cable force optimization of cable-stayed footbridge. *Structures*, 33, pp. 2036-2049.
- [10] Alsayed, M., Lin, L., and Hassan, J. (2021). Static behavior of partially earth-anchored cable-stayed bridge of different side-to-main span ratios: super-long span system with crossing cables. *Structures*, 33, pp.3736-3745
- [11] Hester, D., Koo, K., Xu, Y., Brownjohn, J. and Bocian, M. (2019). Boundary condition focused finite element model updating for bridges. *Engineering Structures*, 198, 109514
- [12] สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง (2555). *คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [13] The American Association of State Highway and Transportation Officials. (1996). *Standard Specifications for Highways Bridges 16th Edition*. The American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.