

การศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่จากความเครียดทาง
พลศาสตร์ของสะพานโดยใช้แบบจำลองย่อส่วน
A Study of Classification and Weight Determination of Moving Truck from Dynamic
Bridge Strain by Using Scaled Model

ศุภชัย เชื้อเกตุ และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา*
S. Chuaket and P. Asnachinda*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University
*Corresponding author E-mail: pattarapong@eng.buu.ac.th

(Received: December 1, 2017, Revised: November 6, 2018, Accepted: November 15, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการจำแนกประเภทพร้อมหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ โดยใช้เพียงผลตอบสนองความเครียดของสะพานและปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลาล้อหรือกล้องวิดีโอสำหรับประมวลผลภาพถ่าย ซึ่งสามารถลดต้นทุนของระบบและลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลตอบสนองจราจรจำนวนมาก โดยระบบที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกจากจำนวนเพลาล้อและระยะห่างเพลาล้อซึ่งคำนวณจากสัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานที่ได้ถูกปรับปรุงค่าเพื่อเพิ่มความชัดเจนและความถูกต้องในการคำนวณ และใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์วิเคราะห์หาความเร็ว จำนวนเพลาล้อ และระยะห่างเพลาล้อของรถบรรทุกจากรูปแบบของสัญญาณความเครียดที่สองตำแหน่งจราจร จากนั้นจึงคำนวณน้ำหนักเพลาล้อและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ปัญหาแบบย้อนกลับของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำเคลื่อนที่กับผลตอบสนองความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน และเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติในกระบวนการสุดท้าย การศึกษาได้พิจารณารถบรรทุกตั้งแต่ 2 เพลาล้อถึง 7 เพลาล้อ โดยผลการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนพบว่า ระบบที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องในทุกกรณีทดสอบ และหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 3.75 และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระบบมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 8.58

คำสำคัญ: การจำแนกประเภทรถบรรทุก ความเครียดของสะพาน การหาน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน แบบจำลองย่อส่วน

Abstract

This research aimed to develop the classification and weight determination of moving truck by using only bridge strain response without axle detector or video camera to compute vehicle type from recorded photos. This was to reduce the cost and complexity of data analysis due to large number of measurement responses. The proposed system was capable to classify vehicle configuration from amount of axles and axle spacings. Bridge strain signals in each bridge section were modified to improve signal distinction and accuracy in the computation. Concept of correlation coefficient of strain responses between two sections of the bridge was employed to analyze

moving speed, amount of axles and axle spacings. Based on the inverse problem of moving load and bridge dynamic response relationship, the system identified axle weight and gross weight using regularization least square with singular value decomposition (SVD) method. Moreover, to improve the accuracy of the analyzed truck weight, the updated static component (USC) technique was utilized in the final process. The study considered various truck type from 2-axle until 7-axle configurations type. Regarding to the experimental result from scaled model, it was found that the proposed system was able to successfully classify the truck configuration for all cases. The determination of truck gross weight allowed the average identification error of 3.75%. The maximum identification error was 8.58% at 95% confidence level.

Keywords: truck classification, bridge strain, bridge weigh-in-motion (B-WIM), scaled model

1. บทนำ

จากข้อจำกัดของด่านชั่งน้ำหนักถาวร (weigh station) ที่เกิดการชะลอตัวของกระแสจราจรบนเส้นทางที่มีการตรวจวัดและไม่สามารถควบคุมน้ำหนักได้อย่างทั่วถึงเนื่องจากผู้ขับขี่สามารถหลีกเลี่ยงสถานีตรวจวัด จึงได้มีการพัฒนาระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ที่เป็นระบบหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่อยู่บนผิวทาง โดยอาศัยโหลดเซลล์ (load cell) ฝังอยู่ใต้ผิวทางเพื่อใช้ในการตรวจวัดน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน โดยระบบ WIM มีหน้าที่คัดกรองรถบรรทุกก่อนเข้าสู่ด่านชั่งน้ำหนักถาวร เพื่อลดปริมาณการชะลอตัวของรถบรรทุกที่ต้องเข้าชั่งน้ำหนักในด่านชั่งน้ำหนักถาวร อย่างไรก็ตาม โหลดเซลล์ของระบบ WIM ซึ่งต้องติดตั้งบนผิวทางนั้นจะถูกสัมผัสกับล้อรถบรรทุกหนักโดยตรง ซึ่งการกระแทกจากเพลลา และการเคลื่อนตัวในแนวราบจากการเบรคหรือเร่งของล้อทำให้โหลดเซลล์เสื่อมคุณภาพได้เร็ว อีกทั้งในการซ่อมบำรุงจะต้องปิดเส้นทางจราจร เพื่อรีดผิวทางในการเข้าถึงอุปกรณ์ตรวจวัด ทำให้ระบบ WIM นี้มีค่าใช้จ่ายที่สูงในการใช้งานและซ่อมบำรุง เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ WIM จึงมีการพัฒนาระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองของสะพานแทนการใช้โหลดเซลล์บนผิวทาง โดยการนำมาตรวัดความเครียด (strain gage) ไปติดตั้งไว้ที่ผิวด้านใต้ของแผ่นพื้นสะพาน แล้วจึงนำข้อมูลความเครียดที่ตรวจวัดได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักรถบรรทุกในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยอาศัยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (inverse problem) ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยระบบดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน หรือ Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM) แรกเริ่มนั้น ระบบ B-WIM จะประมาณ

น้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกโดยอาศัยความสัมพันธ์ของน้ำหนักเพลลาและค่าความเครียดของสะพาน ด้วยหลักการของเส้นอิทธิพลทางสถิตย (static influence line) โดยพิจารณาค่าความเครียดของพื้นสะพานเนื่องจากแรงกระทำขนาดหนึ่งหน่วยกระทำในตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของสะพาน [1] ทั้งนี้ระบบจำเป็นที่จะต้องทราบความเร็วของรถบรรทุกเพื่อระบุตำแหน่งเพลลาขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้ถูกต้อง จึงจะสามารถประมาณน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นระบบ B-WIM จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลลา (axle detector) บนผิวทาง ซึ่งอาจเป็นแบบท่อวัดความดันลม (pressure tube) หรือแบบเทปสวิทช์ (tape switch) ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลลานั้นจะใช้ในการคำนวณหาความเร็ว ระยะทางเพลลา และจำนวนเพลลาของรถบรรทุก ก่อนที่จะคำนวณหาน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมเป็นลำดับสุดท้าย



รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาแบบติดตั้งบนผิวทาง [3]

โดยผลการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากหลักการเส้นอิทธิพลทางสถิตยนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากความเครียดของสะพานนั้นเป็นสัญญาณทางพลศาสตร์เนื่องจากผลของอัตราเร็วของรถ ความขรุขระของผิวทาง และปฏิสัมพันธ์

ระหว่างยานพาหนะและสะพาน (vehicle-bridge interaction) ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้เส้นอิทธิพลความเครียดทางสถิติจึงเกิดความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งการจำลองโครงสร้างยังพิจารณาสะพานด้วยแบบจำลองคาน

ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาวิธีการหาน้ำหนักเพลาบรรทุกขณะเคลื่อนที่ในโดเมนของเวลา (time-domain) [2] โดยพิจารณาการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางพลศาสตร์ ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่คำนวณได้ โดยวิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณหาน้ำหนักรวมของยานพาหนะได้และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม วิธีการหาน้ำหนักรถจากหลักการข้างต้นทั้งสองวิธีนั้นจำเป็นต้องทราบจำนวนเพลา ความเร็ว และตำแหน่งเพลาของรถบรรทุกก่อนจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักได้ในระดับความถูกต้องดังกล่าว

ต่อมาคณะกรรมการยุโรป หรือ WAVE [3] ได้พัฒนาระบบ B-WIM ซึ่งยังใช้เส้นอิทธิพลทางสถิติ แต่เป็นระบบที่ปราศจากอุปกรณ์ตรวจจับเพลา (free of axle detector, FAD) หรือเรียกว่า FAD B-WIM โดยการใช้ FAD sensor ติดตั้งบริเวณใต้ท้องสะพานแทนการใช้อุปกรณ์แบบเดิมที่ต้องติดตั้งบนผิวทาง เพื่อเลี่ยงการใช้อุปกรณ์บนผิวทาง (nothing on road, NOR) ที่เสื่อมสภาพเร็วและสามารถสังเกตได้เพื่อลดการเสี่ยงเส้นทางของผู้ขับขี่ที่อาจสังเกตเห็นอุปกรณ์บนผิวทาง ระบบ FAD นี้สามารถคำนวณความเร็ว จำนวนเพลาและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกได้โดยการเทียบลักษณะสัญญาณความเครียดจาก FAD sensor ที่ติดตั้งไว้สองตำแหน่งที่ผิวด้านใต้ของพื้นสะพาน อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ FAD sensor จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อล้อของรถบรรทุกเคลื่อนที่อยู่ในแนวที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง FAD sensor อีกทั้งจำเป็นต้องเลือกสะพานที่มีความเหมาะสมกับการใช้ FAD sensor ตามข้อเสนอแนะของ WAVE เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับความชัดเจนของสัญญาณที่ส่งผลกระทบต่อระดับความถูกต้องของการคำนวณข้อมูลระยะห่างเพลาบรรทุก สำหรับผลการคำนวณน้ำหนักรวมทางสถิติพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 25 ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของสะพาน

จากการศึกษาความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานแบบปราศจากข้อมูลระยะห่างเพลาและข้อมูลความเร็วรถ จึงมี

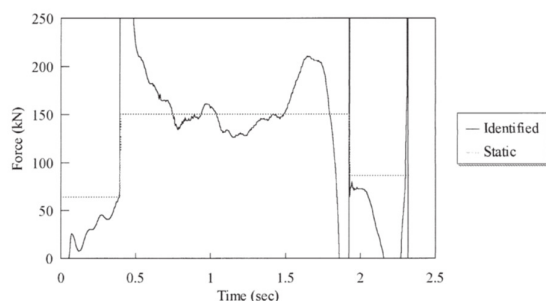
งานวิจัยที่เสนอวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกโดยใช้เพียงข้อมูลความเครียดของสะพานโดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ระหว่างความเครียดที่ตรวจวัดและความเครียดทางทฤษฎีจากหลักการของเส้นอิทธิพลทางสถิติ โดยทำการประมาณค่าความเร็ว ระยะช่วงเพลา และน้ำหนักรถบรรทุกที่ทำให้เกิดผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุด [4] โดยผลการศึกษาพบว่าการใช้เพียงสัญญาณความเครียดในการประมาณน้ำหนักเพลาสามารถทำได้และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15 อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณยังจำกัดอยู่ที่รถบรรทุกประเภท 2 เพลาเท่านั้น

เพื่อพิจารณาตำแหน่งของเพลาบรรทุกที่ชัดเจนขึ้นจึงมีการศึกษาผลของการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) หลายตัวในหน้าตัด โดยติดตั้งกระจายตามตำแหน่งในแนวขวางของแต่ละหน้าตัดสะพาน [5] ซึ่งพบว่าจะสามารถนำสัญญาณความเครียดของมาตรวัดความเครียดในแต่ละช่องจราจรมารวมกันและหาผลต่างกับผลรวมสัญญาณในอีกช่องจราจร จะได้ลักษณะสัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจนมากขึ้นที่บ่งบอกถึงจำนวนและตำแหน่งของเพลาบรรทุกที่เคลื่อนผ่านสะพานได้

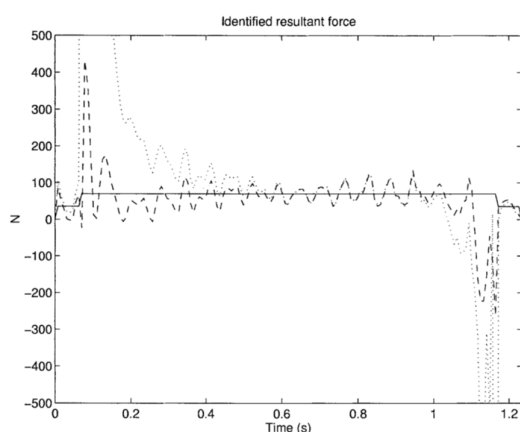
ในการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการทางพลศาสตร์นั้น พบว่าการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ที่มีความแปรปรวนของน้ำหนักเพลาเนื่องจากปัญหา ill-condition ของเมตริกซ์ในทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงของน้ำหนักเพลา โดยเฉพาะค่าน้ำหนักเพลา ณ เวลาที่เคลื่อนผ่านบริเวณจุดรองรับของสะพาน [6] ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 ดังนั้นเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความแปรปรวนของน้ำหนักเพลา เพื่อให้มีค่าสมเหตุสมผลมากขึ้น [7,8,9,10] ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามยังพบว่าถึงแม้จะลดความแปรปรวนของน้ำหนักเพลาโดยส่วนมากได้ แต่บริเวณจุดรองรับของสะพานยังมีค่าน้ำหนักเพลาที่ต่ำกว่าปกติอยู่มาก

จากนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาให้สูงขึ้น โดยพัฒนาการคำนวณในลักษณะการคำนวณซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาบริเวณใกล้จุดรองรับของสะพาน ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (Update Static Component Technique) หรือเรียกโดยย่อว่าเทคนิค USC [11,12] โดยผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักรถบรรทุกรวมทางสถิติที่คำนวณซ้ำสามารถเพิ่มความถูกต้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน

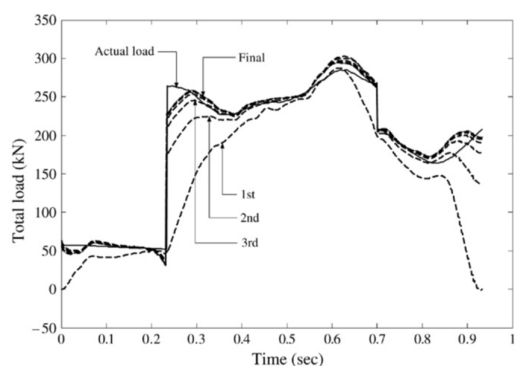
ร้อยละ 5 เท่านั้น ดังตัวอย่างของกราฟน้ำหนักบรรทุกที่วิเคราะห์ได้ในรูปที่ 4



รูปที่ 2 ลักษณะความแปรปรวนสูงของน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกจากผลการทดสอบภาคสนาม ซึ่งวิเคราะห์โดยไม่ได้ใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน [6]



รูปที่ 3 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกที่ไม่ใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (เส้นไขปลา) และใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (เส้นประ) เทียบกับน้ำหนักทางสถิติ (เส้นทึบ) [8]



รูปที่ 4 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกรวมของรถบรรทุกที่เพิ่มความถูกต้องด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ USC [11]

ต่อมาได้มีการศึกษาเทคนิค USC กับการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน และติดตั้งมาตรวัดความเครียดหลายตัวในหน้าตัดและพิจารณาค่าความเครียดเฉลี่ยในหน้าตัดเดียวกันในการวิเคราะห์ [12] ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์สามารถได้ค่าน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่ไม่แตกต่างกันไม่ว่ารถบรรทุกจะสัญจรในช่องจราจรใด อีกทั้งผลการศึกษาเชิงตัวแปรพบว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการคำนวณน้ำหนักที่มีแนวโน้มดีกว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณน้ำหนักจำเป็นต้องทราบความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักได้

จากการศึกษาการหาความเร็วและระยะห่างเพลาของรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยการหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าสามารถหาความเร็วของการสัญจรได้อย่างถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 และสามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ทุกกรณี [13] ต่อมาได้ทำการศึกษาการจำแนกประเภทและการหาน้ำหนักของรถบรรทุกจากความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานพบว่าสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ทุกกรณีและสามารถคำนวณหาน้ำหนักรวมรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 4 โดยศึกษากรณีรถบรรทุกประเภท 2-4 เพลา [14]

ในกรณีที่พิจารณาเฉพาะค่าน้ำหนักทางสถิติของน้ำหนักเพลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกนั้น อาจสามารถพิจารณาหลักการวิเคราะห์โดยใช้หลักของการแยกเส้นอิทธิพลความเครียด (strain influence line) ของโครงสร้างสะพานจริงจากการทดสอบภาคสนาม ซึ่งได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ [15,16] อย่างไรก็ตามระดับความถูกต้องของระบบจะขึ้นอยู่กับ การทดสอบในการปรับเทียบหาเส้นอิทธิพลความเครียดเพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งเส้นอิทธิพลความเครียดจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความเร็วของรถบรรทุกหรือปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุกที่อาจมีรูปแบบหรือสัญจรในความเร็วที่แตกต่างจากการปรับเทียบ รวมถึงผลจากการทำซ้ำ

จากงานวิจัยในอดีตดังกล่าวข้างต้นนั้น งานวิจัยส่วนมากนั้นยังอยู่ในระดับการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [1,2,10] หรือการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน [4,5,7,8,9,11,12,13,14] และผลลัพธ์ของวิธีการคำนวณบางวิธียังมีระดับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูง [1,2,6,7,8,9,10] และด้วยข้อจำกัดของวิธีการที่จำเป็นต้องทราบประเภท ความเร็ว จำนวนเพลลาและตำแหน่งของรถบรรทุกในช่วงเวลาที่บันทึกข้อมูล [1,2,6,7,8,9,10,11,12] และข้อจำกัดด้านความสามารถในการวิเคราะห์กับรถบรรทุกบางประเภทเท่านั้น [4,5,13,14] และการทดสอบภาคสนามยังมีความคลาดเคลื่อนสูง [3,6] หรือยังมีข้อจำกัดด้านระดับความถูกต้องซึ่งขึ้นกับการเปรียบเทียบภาคสนาม [15,16]

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีจำแนกประเภทและคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกโดยใช้เพียงผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสัญญาณความเครียดที่ติดตั้งได้ทั้งสะพานเพียงอย่างเดียว เพื่อพัฒนาวิธีการหาความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลในการจำแนกประเภทรถบรรทุก และคำนวณน้ำหนักเป็นลำดับสุดท้าย ซึ่งประโยชน์ของการศึกษาจะสามารถนำไปพัฒนาในการทดสอบภาคสนามต่อไปได้ เพื่อสามารถนำไปใช้ตรวจสอบและประเมินการบรรทุกเกินพิกัดของรถบรรทุกหนักตามที่กฎหมายกำหนดได้ โดยระเบียบวิธีวิจัยนั้นจะประยุกต์หลักการปรับปรุงสัญญาณความเครียด [5] เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับเพลลา ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินความเป็นไปได้และระดับความถูกต้องของการหาความเร็ว จำนวนเพลลา และระยะห่างเพลลา ด้วยสัญญาณความเครียดเพียงอย่างเดียว จากรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่ประเภท 2 เพลลาถึง 7 เพลลา เพื่อให้สามารถใช้ได้กับรถบรรทุกหลายประเภทได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลการจำแนกประเภท จำนวนเพลลา ระยะช่วงเพลลา และความเร็ว ที่คำนวณได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักของรถบรรทุกโดยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีเรกูลาร์ไรเซชันและซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพซิชั่น [7] และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) [10,11] เพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักรถบรรทุก ทั้งนี้ งานวิจัยนี้มีขอบเขตในการศึกษาโดยการทดสอบผ่านแบบจำลองย่อส่วนของสะพานและรถบรรทุก เพื่อให้สามารถ

ประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอจากการทดสอบของรถบรรทุกหลากหลายประเภท ที่มีน้ำหนัก และระดับความเร็วที่แตกต่างกัน ก่อนพัฒนาการวิจัยในการทดสอบภาคสนามกับโครงสร้างสะพานจริงต่อไป

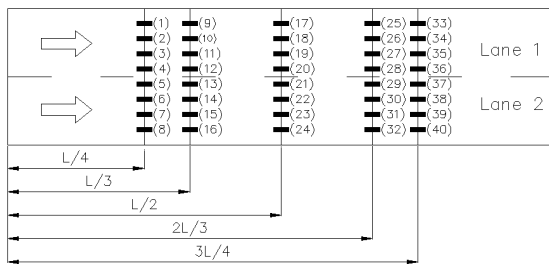
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนการจำแนกประเภท และน้ำหนักของรถบรรทุกจากสัญญาณความเครียดทางพลศาสตร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือการหาความเร็วโดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ขั้นตอนที่สอง คือการวิเคราะห์หาจำนวนและระยะห่างเพลลา ซึ่งขั้นตอนที่สองนี้จะสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ด้วยหลักการวิเคราะห์จุดยอด (peaks) ของสัญญาณที่บ่งบอกถึงตำแหน่งของเพลลาของรถบรรทุก และในขั้นตอนสุดท้าย คือการคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพซิชั่น และใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC technique) เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการคำนวณน้ำหนักรถบรรทุก อย่างไรก็ตามวิธีการในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทรถบรรทุกโดยมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.1 และหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการหาความเร็ว การจำแนกประเภทรถบรรทุก และการหาน้ำหนักรถบรรทุกจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ถึง 2.4 ตามลำดับ

2.1 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดสำหรับการจำแนกประเภทรถบรรทุก

การนำสัญญาณความเครียดในหน้าตัดสะพานทั้งสองหน้าตัดมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความเร็ว จะพบว่าหากสัญญาณความเครียดมีลักษณะความสูงในบริเวณที่ตรวจวัดไม่มาก หรือไม่สามารสังเกตเห็นยอดของความเครียดบริเวณจุดตรวจวัดได้อย่างชัดเจน จะทำให้ไม่สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ [8] ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณความเครียดให้มีความชัดเจนบ่งบอกถึงตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดจะช่วยทำให้สามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะสามารถคำนวณหาความเร็วของรถบรรทุกได้แล้วยังสามารถใช้สัญญาณความเครียดดังกล่าวคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกได้ จากข้อมูลทางด้านความเร็ว จำนวนเพลลา

และระยะห่างเพลารถบรรทุกทำให้สามารถจำแนกประเภทของรถบรรทุกได้ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดทั้งหมด 5 หน้าตัดเพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักเพลานในกรณีที่มีจำนวนเพลามากขึ้น และติดตั้งมาตรวัดความเครียดหน้าตัดละ 8 ตัว เพื่อใช้ในการปรับปรุงสัญญาณความเครียดในการจำแนกประเภทรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 5 การปรับปรุงสัญญาณความเครียดเพื่อจำแนกประเภทของรถบรรทุกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) โดยการหาค่าสัมบูรณ์ผลต่างของผลรวมสัญญาณความเครียดในช่องจราจรที่ 1 กับช่องจราจรที่ 2



รูปที่ 5 ผังตำแหน่งมาตรวัดความเครียดของสะพาน

$$\tilde{\epsilon}_i = \left| \sum \epsilon_i^{lane1} - \sum \epsilon_i^{lane2} \right| \quad (1)$$

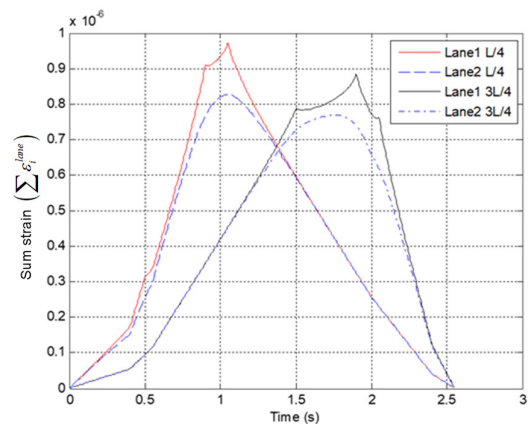
โดยที่ $\tilde{\epsilon}_i$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ปรับปรุงค่าแล้ว

$\sum \epsilon_i^{lane1}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 1

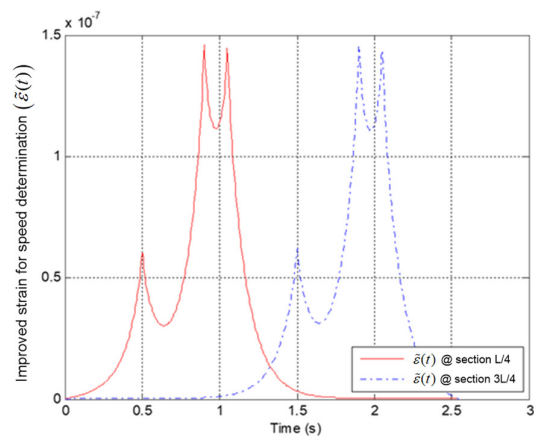
$\sum \epsilon_i^{lane2}$ คือ เวกเตอร์ผลรวมของสัญญาณความเครียด ณ หน้าตัดที่ i ที่ได้จากมาตรวัดความเครียดทุกตัวในช่องจราจรที่ 2

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลรวมของสัญญาณความเครียดทั้งสองช่องจราจร ณ หน้าตัด $L/4$ และ $3L/4$ เมื่อรถบรรทุกทุกคันเคลื่อนที่ผ่านในช่องจราจรที่ 1 จากการจำลองสัญญาณในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง โดยจำลองสะพานเป็นแผ่นบางและพิจารณาสัญญาณความเครียดจากน้ำหนักบรรทุกทุกตัวแรงกระทำแบบจุด และเคลื่อนแรงกระทำตามความยาวสะพานด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกทางสถิตย์คงที่ ซึ่งพบว่า

กราฟของผลรวมความเครียดในช่องจราจรที่แรงกระทำเคลื่อนที่ผ่านจะมียอดของสัญญาณเนื่องจากเพลารถ ในขณะที่ผลรวมความเครียดในอีกช่องจราจรจะไม่สามารถสังเกตเห็นผลของเพลารถได้ จึงทำให้ผลต่างของผลรวมความเครียดระหว่างช่องจราจรดังรูปที่ 7 โดยแกนตั้งของกราฟคือค่าความเครียดที่ใช้คำนวณความเร็ว ซึ่งได้จากการหาผลต่างของผลรวมค่าความเครียดระหว่างสองช่องจราจรดังสมการที่ (1) ซึ่งจากยอดของกราฟจะสามารถสังเกตได้ถึงจำนวนเพลารถและนำไปใช้หาความเร็วและระยะห่างเพลารถต่อไปได้



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลรวมสัญญาณความเครียดในแต่ละช่องจราจร ณ หน้าตัด $L/4$ และ $3L/4$ เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ในช่องจราจรที่ 1



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลต่างของผลรวมความเครียดระหว่างสองช่องจราจรจากสัญญาณตัวอย่างในรูปที่ 6

จากสมการที่ (1) จะเห็นได้ว่ารถบรรทุกสามารถสัญจรบนช่องจราจรใดก็ได้ เนื่องจากพิจารณาเฉพาะรูปร่างของสัญญาณ

ความเครียดที่ปรับปรุงแล้วเท่านั้น จึงสามารถพิจารณาค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลรวมของสัญญาณความเครียดระหว่างสองช่องจรรยาเพื่อนำไปใช้ในการจำแนกประเภทรถบรรทุกได้ต่อไป

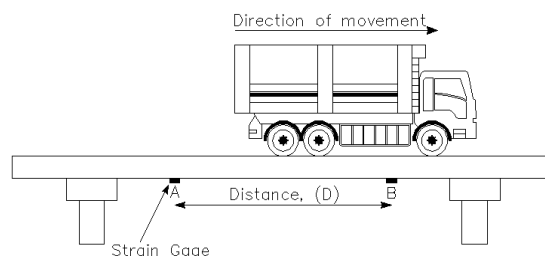
อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มีขอบเขตการพิจารณาแยกประเภทและหาหน้าหนักรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ข้ามสะพานทีละคัน ซึ่งยังไม่พิจารณาผลของเหตุการณ์ที่มียานพาหนะคันอื่นเคลื่อนที่ข้ามสะพานพร้อมกันในอีกช่องจราจร

2.2 การหาความเร็วจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การหาความเร็วของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด สามารถคำนวณได้ภายใต้สมมติฐานที่พิจารณาโดยประมาณว่ารถบรรทุกเคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็วคงที่ โดยใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) จากข้อมูลสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว 2 หน้าตัดสะพาน ตัวอย่างดังรูปที่ 8 พิจารณาสัญญาณความเครียดของสะพานที่ตำแหน่ง A และ B ซึ่งอยู่ในระยะ $L/4$ และ $3L/4$ ตามลำดับ ซึ่งหน้าตัดสองจุดนี้อยู่ห่างกันเป็นระยะ D ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L/2$ ซึ่งหลักการคือหากทราบเวลาที่ใช้ที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสองหน้าตัดนี้ได้ ก็จะสามารถคำนวณความเร็วได้ด้วยสมมติฐานของความเร็วคงที่ ดังนั้นหากสามารถพิจารณาจากกราฟสัญญาณความเครียดซึ่งทราบตำแหน่งเพลารถบรรทุกของทั้งสองหน้าตัดได้ จะสามารถใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเครียดสองหน้าตัดเพื่อหาเวลาที่เคลื่อนที่ผ่านระยะ D ได้ ทั้งนี้ก่อนที่จะใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คำนวณหาความเร็วรถบรรทุกต้องทำการปรับปรุงสัญญาณความเครียดสำหรับจำแนกประเภทรถบรรทุกก่อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) จะได้สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วที่มีค่า $\bar{\epsilon}_A$ และ $\bar{\epsilon}_B$ ที่บริเวณหน้า $L/4$ และ $3L/4$ ตามลำดับ

หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถคำนวณเวลาระหว่างสัญญาณความเครียดจากสองหน้าตัด ซึ่งเป็นเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ดังนั้นเมื่อทราบระยะห่างระหว่างหน้าตัดจึงทำให้สามารถคำนวณความเร็วของรถบรรทุกได้จากหลักการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยนี้ติดตั้งมาตรวัดความเครียดจำนวน 5 หน้าตัด

ที่ระยะ $L/4$, $L/3$, $L/2$, $2L/3$ และ $3L/4$ ดังนั้นการคำนวณความเร็วสามารถพิจารณาที่หน้าตัด $L/3$ และ $2L/3$ ได้เช่นกัน



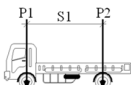
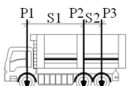
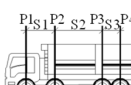
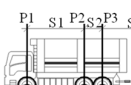
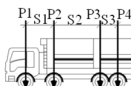
รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพาน

2.3 การหาจำนวนเพลาระยะห่างเพลาร

การหาจำนวนเพลาระยะห่างเพลารจะวิเคราะห์จากลักษณะทางกายภาพของสัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้ว โดยเลือกใช้สัญญาณความเครียดบริเวณหน้าตัด $L/2$ เนื่องจากบริเวณกึ่งกลางสะพานจะเกิดการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อทำการปรับปรุงความเครียดด้วยสมการที่ (1) แล้ว จะได้สัญญาณความเครียดที่มีความชัดเจน บ่งบอกถึงตำแหน่งเพลาร การพิจารณาของสัญญาณที่ปรับปรุงแล้วในช่วงระหว่างเพลารหน้าถึงเพลารหลังที่มีนัยสำคัญบ่งบอกถึงลักษณะและตำแหน่งเพลารของรถบรรทุกในแต่ละประเภทในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ผ่านจุดตรวจวัดที่ได้ติดตั้งไว้บริเวณใต้ท้องสะพาน และเนื่องจากการพิจารณาจำนวนเพลารและระยะห่างเพลารนั้นจะพิจารณาจากจำนวนและตำแหน่งของยอดของสัญญาณเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ขั้นตอนการตรวจจบบยอดสัญญาณทำได้สะดวก จึงนำค่าส่วนต่างความเครียดระหว่างช่องจรรยาจากสมการที่ (1) ไปหารด้วยค่าสูงสุด (maximum normalized) เพื่อให้เป็นค่าความเครียดซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูปที่ 9

การหาระยะห่างเพลารโดยใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB ตรวจจบบยอดของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระยะห่างเพลารที่มากที่สุดที่คำนวณได้ เพื่อให้ได้ยอดสัญญาณที่บ่งบอกตำแหน่งเพลารรถบรรทุก แล้วจึงคำนวณระยะห่างเพลารจากตำแหน่งยอดสัญญาณที่ตรวจวัดจากนั้นจึงแยกประเภทรถบรรทุกจากลักษณะทางกายภาพตามเงื่อนไขของระยะห่างเพลารและจำนวนเพลารที่คำนวณได้ โดยพิจารณาระยะห่างเพลารที่บ่งบอกว่าเพลารเหล่านั้นเพลารเดี่ยว หรือเพลารคู่ ดังแสดงในตารางที่ 1

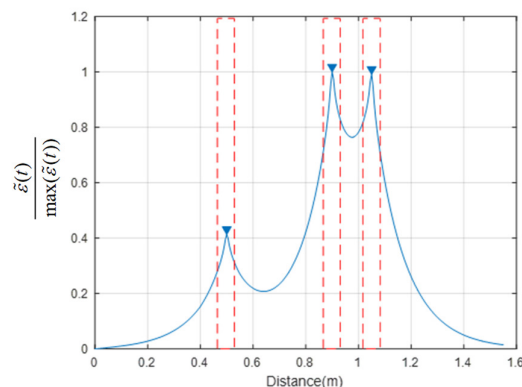
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำแนกประเภทรถบรรทุก

Truck type	Conditions :	
	No. of axle	Axle Spacing
	2	$S1 < a$ $S1 > b$
	3	$S1 < a$ $S1 > S2$ $S2 < b$
	4	$S1 > b$ $S1 < S2$ $S2 > S3$ $S2 < a$ $S3 < b$
	5	$S1 < a$ $S1 > S2$ $S2 < b$ $S3 < S4$ $S3 > b$ $S4 < a$ $S4 > b$
	6	$S1 < S2$ $S1 > b$ $S2 < a$ $S2 > S3$ $S3 < b$ $S4 < S5$ $S4 > b$ $S5 < a$ $S5 > b$
	7	$S1 > b$ $S1 < S2$ $S2 < a$ $S2 > S3$ $S3 < b$ $S4 < a$ $S4 > b$ $S4 < S5$ $S5 < a$ $S5 > b$ $S6 < b$

* หมายเหตุ $a = 0.8$ เมตร และ $b = 0.15$ เมตร สำหรับแบบจำลองรถบรรทุกย่อย (เทียบเท่าระยะในรถบรรทุกจริงที่ระยะ 8 เมตรและ 1.5 เมตร ตามลำดับ)

โดยที่ a คือระยะความยาวช่วงเพลามากที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับช่วงเพลารถบรรทุก ซึ่งหากระบบคานวณระยะช่วงเพลามากกว่าค่านี้จะพิจารณาว่าเป็นยานพาหนะคนละคัน และ b คือระยะความยาวที่มากที่สุดของกลุ่มเพลาคู่ เช่น เพลาคู่หลังของรถบรรทุกสิบล้อ ซึ่งหากระบบคานวณระยะช่วงเพลามากกว่าค่านี้ จะพิจารณาว่าสองเพลานั้นเป็นเพลาคู่เดียว โดย

ระยะที่พิจารณาสำหรับการทดลองนี้พิจารณาระยะของแบบจำลองรถบรรทุกย่อยส่วนที่ค่า a และ b เท่ากับ 0.80 และ 0.15 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเทียบเท่าในมิติของรถบรรทุกจริงที่ระยะ 8 เมตรและ 1.5 เมตร ตามลำดับระยะห่างเพลากลุ่มที่มากที่สุดใช้เป็นเงื่อนไขในการจำแนกโดยมีค่า 0.15 และ 0.20 เทียบเท่าระยะห่างเพลากลุ่มที่มากที่สุดของรถบรรทุกจริงที่มีค่า 1.5 และ 2.0 เมตร ตามลำดับ จากการย่อยส่วนลงจากขนาดจริง 10 เท่า



รูปที่ 9 สัญลักษณ์ความเครียดที่ใช้ระบุตำแหน่งเพลารถบรรทุกที่ได้จากสมการที่ (1) ซึ่งแปลงให้มีค่าสูงสุดหนึ่งหน่วยด้วยการหารค่าสูงสุด

2.4 การหาหน้าหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพาน

การหาผลตอบสนองของสะพานโดยการพิจารณาจากแรงที่กระทำแบบจุดเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพานด้วยการวิเคราะห์การสั่นไหวของสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) โดยพิจารณาน้ำหนักเพลารถบรรทุกด้วยแรงกระทำแบบจุดที่อยู่ในโดเมนของเวลาด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 10 และจำลองโครงสร้างสะพานด้วยชิ้นส่วนคาน (beam element) ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยสามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักเพลากับการเปลี่ยนตำแหน่งของสะพานได้ดังสมการที่ (2)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{Y}(x(t))\hat{\mathbf{P}}(t) \quad (2)$$

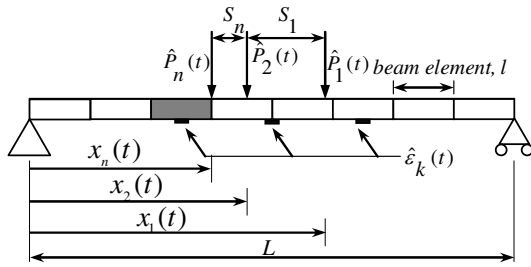
เมื่อ $\mathbf{u}(t)$ คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของสะพาน มีขนาด $d.o.f. \times n$ เมื่อ $d.o.f.$ คือจำนวนดีกรีความอิสระของสะพาน และ n คือจำนวนข้อมูลตรวจวัด ซึ่งหาได้จากผลคูณ

ของเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านกับความถี่บันทึกข้อมูล (sampling rate) ในหน่วย Hz

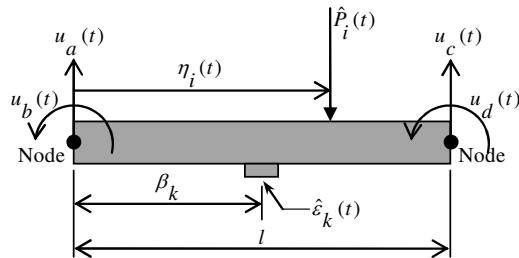
$\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ และ $\mathbf{K}$ คือ เมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความหน่วงและเมตริกซ์สติฟเนสของสะพานตามลำดับ ซึ่งเป็นเมตริกซ์จัตุรัสมีขนาด $d.o.f. \times d.o.f.$

$\hat{\mathbf{P}}(t)$ คือ น้ำหนักเพลลาของรถบรรทุก มีขนาด $n_p \times n$ โดย n_p คือจำนวนเพลลาของรถบรรทุก

$\mathbf{Y}(x(t))$ คือฟังก์ชันรูปร่างสำหรับแปลงน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกให้เป็นแรงกระทำที่ข้อของชิ้นส่วนคาน มีขนาด $d.o.f. \times n_p$



รูปที่ 10 ระบบการหาน้ำหนักระหว่างรถบรรทุกกับสะพาน



รูปที่ 11 ชิ้นส่วนคานในแบบจำลองสะพาน

สมการที่ (2) สามารถถูกจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อกับความเครียดตรวจวัดได้ โดยอาศัยวิธี state space เพื่อลดอันดับอนุพันธ์ให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 1 ซึ่งจะสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3)

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{P}} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาแต่ละจุดข้อมูลตรวจวัด จะได้ว่า

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times 1} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times 2d.o.f.} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y} \end{bmatrix}_{2d.o.f. \times n_p} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = [\hat{P}_1 \quad \hat{P}_2 \quad \dots \quad \hat{P}_{n_p}]^T_{n_p \times 1} \quad (7)$$

โดยที่ $\mathbf{X}$ คือ state variable ซึ่งประกอบด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อ $\mathbf{u}(t)$ และความเร็วของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อ $\dot{\mathbf{u}}(t)$

ทั้งนี้ผลตอบสนองที่ข้อของสะพาน $\mathbf{X}$ สามารถเชื่อมโยงกับค่าความเครียด ณ จุดตรวจวัดที่ k จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) ซึ่งจะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (9)

$$\varepsilon_k = -\left(\frac{\bar{y}}{I^3}\right) \times \{u_a \quad u_b \quad u_c \quad u_d\} \times \begin{Bmatrix} (12\beta_k - 6l) \\ l(6\beta_k - 4l) \\ -(12\beta_k - 6l) \\ l(6\beta_k - 2l) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

โดยที่ $\bar{y}$ คือระยะจากแกนสะเทินถึงผิวล่างของแผ่นพื้นสะพานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียด

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Q}\mathbf{X} \quad (9)$$

โดย ณ แต่ละจุดข้อมูลตรวจวัด จะได้ว่า

$\mathbf{Z}$ คือเวกเตอร์ของความเครียด จะมีขนาดเท่ากับ $k \times 1$

$\mathbf{Q}$ คือเมตริกซ์แปลงผลตอบสนองที่ข้อเป็นค่าความเครียดของสะพาน มีขนาดเท่ากับ $k \times 2d.o.f.$

จากสมการที่ (3) ถึงสมการที่ (7) จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete) ระหว่างข้อมูลที่ j และข้อมูลถัดไป $j+1$ ได้ดังนี้

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_j + \mathbf{G}_{j+1}\hat{\mathbf{P}}_j \quad (10)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{F} = \mathbf{c}^{\Lambda h} \quad (11)$$

ซึ่ง h คือผลต่างของช่วงเวลาระหว่างข้อมูลที่ j และ $j+1$ และ

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{I})\mathbf{B} \quad (12)$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (9) และเมื่อจัดเรียงข้อมูลแต่ละช่วงเวลาจะทำให้ระบบสามารถกระจายได้ดังสมการที่ (13) ซึ่งสามารถพิจารณาในรูปเมตริกซ์ที่มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (14)

$$\begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_1 \\ \hat{\mathbf{Z}}_2 \\ \hat{\mathbf{Z}}_3 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{Z}}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}\mathbf{G}_1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{G}_2 & 0 & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}^2\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{F}\mathbf{G}_2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \mathbf{Q}\mathbf{F}^{n-1}\mathbf{G}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{F}^{n-2}\mathbf{G}_2 & \cdots & \mathbf{Q}\mathbf{G}_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_0 \\ \hat{\mathbf{P}}_1 \\ \hat{\mathbf{P}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{P}}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{T}\bar{\mathbf{P}} \quad (14)$$

โดย $\bar{\mathbf{Z}}$ คือเวกเตอร์รวมของสัญญาณความเครียดมีขนาดเท่ากับ $(k \times n) \times 1$

$\mathbf{T}$ คือเมตริกซ์เชื่อมโยงระหว่างผลตอบสนองของสะพานกับน้ำหนักเพลลา มีขนาด $(k \times n) \times (n \times n_p)$

$\bar{\mathbf{P}}$ คือเวกเตอร์รวมของน้ำหนักเพลลา มีขนาด $(n \times n_p) \times 1$

จากสมการที่ (14) พบว่าในการคำนวณจะต้องมีจำนวนเมตริกซ์ของการวัดที่ไม่น้อยกว่าแรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างสะพานจึงจะสามารถคำนวณน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ ดังนั้นเมื่อจำนวนเพลลาของรถบรรทุกมากกว่าจำนวนเมตริกซ์ของการวัดจึงไม่สามารถคำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกได้ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยการสมมติให้เพลลาที่มีจำนวนแรงกระทำ 2 แรง ให้พิจารณาเป็นแรงกระทำสองแรงซึ่งมีขนาดเท่ากัน ทำให้เพลลาคู่ซึ่งเดิมพิจารณาเป็นตัวแปรแรงกระทำ 2 แรงสามารถพิจารณาให้เหลือเพียงตัวแปรแรงกระทำเดียวได้ ทำให้รถบรรทุกประเภทหลายเพลลาสามารถลดจำนวนตัวแปรลงได้ ซึ่งในกรณีนี้รถบรรทุกประเภท 7 เพลลาจะเหลือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเป็น

น้ำหนักเพลลาเพียง 5 เพลลา จึงสามารถวิเคราะห์จากความเครียดของสะพานที่ติดตั้งไว้จำนวน 5 หน้าตัดได้

ในการคำนวณน้ำหนักเพลลาบรรทุกขณะเคลื่อนที่ที่จะอาศัยสมการที่ (14) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีมาประยุกต์หาน้ำหนักเพลลาด้วยค่าความเครียดตรวจวัดจริง ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จากวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least-square) ร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (singular value decomposition, SVD) [10] ซึ่งจากผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุดนั้น จะพิจารณาจากเวกเตอร์ความเครียดที่ตรวจวัดได้ดังสมการที่ (15) กับเวกเตอร์ความเครียดทางทฤษฎีดังสมการที่ (16) ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางทฤษฎีจากสมการที่ (14)

$$\mathbf{Z}(t) = \{\varepsilon_1(t) \quad \varepsilon_2(t) \quad \cdots \quad \varepsilon_k(t)\}^T \quad (15)$$

เมื่อ $\varepsilon_k(t)$ คือ ความเครียดตรวจวัดที่หน้าตัด k และ

$$\bar{\mathbf{Z}}(t) = \{\hat{\varepsilon}_1(t) \quad \hat{\varepsilon}_2(t) \quad \cdots \quad \hat{\varepsilon}_k(t)\}^T \quad (16)$$

เมื่อ $\hat{\varepsilon}_k(t)$ คือ ความเครียดทางทฤษฎีที่หน้าตัด k

จากนั้นเมื่อใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน [8,9,10] เพื่อแก้ปัญหาการเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของตำแหน่งที่มีการเข้าออกของเพลลาบรรทุกซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างทันทีทันใด จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของส่วนต่างความเครียดยกกำลังสองดังสมการที่ (17)

$$E = \sum_{i=1}^n \left[(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}_i)^T (\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}_i) + \lambda \bar{\mathbf{P}}_i^T \bar{\mathbf{P}}_i \right] \quad (17)$$

โดยเทอมสุดท้ายในสมการที่ (17) คือการเพิ่มความราบเรียบให้กับน้ำหนักเพลลาเพื่อลดความแปรปรวนลง โดยที่ λ เป็นค่าคงที่ซึ่งเรียกว่าค่าเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization parameter, λ) หากค่า λ มีค่าน้อย จะทำให้คำตอบมีความใกล้เคียงกับข้อมูลแต่จะทำให้ได้ค่าน้ำหนักเพลลาที่มีการกวัดแกว่งทางพลศาสตร์สูงจนมีลักษณะที่ไม่สมเหตุผลผล แต่หากค่า λ มีค่ามาก แรงที่หาได้จะมีความราบเรียบแต่อาจมี

สัญญาณความเครียดที่ไม่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงนัก และหากค่า λ มีค่าเท่ากับศูนย์ การแก้ปัญหาก็จะเหมือนกับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ตามปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ค่า λ ที่เหมาะสม และเมื่อทำการแทนสมการที่ (14) ลงในสมการที่ (17) จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ซึ่งสามารถคำนวณหาน้ำหนักเพลลาของรถบรรทุกได้ด้วยวิธีการหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเครียดที่ตรวจวัดกับค่าความเครียดทางทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ (18)

$$E = \sum_{i=1}^n \left[(Z_i - T\bar{P}_i)^T (Z_i - T\bar{P}_i) + \lambda \bar{P}_i^T \bar{P}_i \right] \quad (18)$$

ในที่นี้จะใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน (singular value decomposition, SVD) ในการย่อยเมตริกซ์เชื่อมโยง T สำหรับการแก้ปัญหาที่เมตริกซ์เชื่อมโยง T เป็นเมตริกซ์ที่หาอินเวอร์สไม่ได้ ให้สามารถวิเคราะห์ได้คำตอบที่มีความถูกต้อง [10] โดยเมตริกซ์ T สามารถย่อยและมีขนาดเมตริกซ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังสมการที่ (19) ถึงสมการที่ (22)

$$T = U\Sigma V^T \quad (19)$$

เมื่อ

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_j \\ & & & & \ddots \end{bmatrix}_{(k \times n) \times (n \times n_p)} \quad (20)$$

$$U = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_i]_{(k \times n) \times (k \times n)} \quad (21)$$

$$V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_j]_{(n \times n_p) \times (n \times n_p)} \quad (22)$$

โดยที่ Σ คือ เมตริกซ์ซิงกูลาร์ ซึ่งค่าในแนวทแยงจะเป็นค่าซิงกูลาร์ (singular value) จากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน ซึ่งค่า σ_i เป็นปริมาณสเกลาร์

U คือออร์โทโกแนลลิตีเมตริกซ์ด้านหน้าจากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน ซึ่งจะประกอบด้วยเวกเตอร์หลักย่อย U_i ซึ่งมีขนาด $(k \times n)$ แถว 1 หลัก มาประกอบกัน

V คือออร์โทโกแนลลิตีเมตริกซ์ด้านหลังจากกระบวนการซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชันซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์หลักย่อย V_i ซึ่งมีขนาด $(n \times n_p)$ แถว 1 หลัก มาประกอบกันในลักษณะเดียวกับเมตริกซ์ U

เมื่อแทนเมตริกซ์ T จากสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (18) และหาอนุพันธ์เทียบกับน้ำหนักเพลลาเพื่อให้เกิดผลต่างยกกำลังสองน้อยที่สุด (minimization) จะสามารถจัดรูปสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักเพลลาที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความเครียดตรวจวัดและค่าความเครียดทางทฤษฎีได้ดังสมการที่ (23) [10]

$$\bar{P} = \sum_{j=1}^{n \times n_p} \frac{\sigma_j}{(\sigma_j^2 + \lambda)} (U_j^T Z_j) V_j \quad (23)$$

อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามสมการที่ (23) จะต้องเลือกใช้ค่า λ ที่เหมาะสมจึงจะได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งการหาค่า λ ที่เหมาะสมจะต้องใช้เวลาคำนวณมากจึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (USC) [11,12] ในการเพิ่มความถูกต้องให้กับวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน โดยเทคนิค USC มีข้อดีที่สามารถเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันพารามิเตอร์ได้สะดวก ไม่จำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นค่าเฉพาะและคำนวณค่าได้ยุ่งยาก โดยเทคนิค USC นี้สามารถเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ได้ด้วยการคำนวณซ้ำและจะรู้ค่าคำตอบสุดท้าย ซึ่งทำให้สัญญาณความเครียดทางทฤษฎีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดมากที่สุด สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเพื่อทำให้กระบวนการทำซ้ำนั้นหยุดลงได้แสดงไว้ดังสมการที่ (24)

$$\delta = \frac{\hat{P}_{statics}^i - \hat{P}_{statics}^{i-1}}{\hat{P}_{statics}^{i-1}} \times 100\% \quad (24)$$

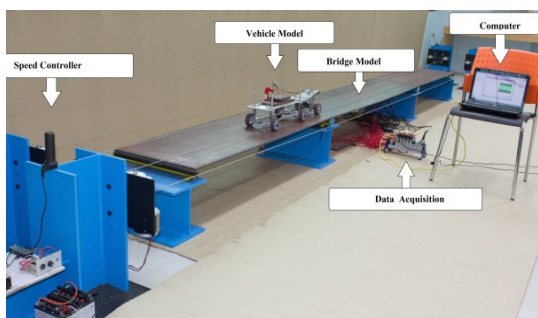
โดยที่ $\hat{P}_{statics}^i$ และ $\hat{P}_{statics}^{i-1}$ คือ น้ำหนักเพลลาทางสถิติที่คำนวณได้ในขั้นตอนปัจจุบัน และขั้นตอนก่อนหน้า

δ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ เพื่อเปรียบเทียบค่าของแต่ละรอบจากการทำซ้ำโดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้เท่ากับ 1%

3. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการจากแบบจำลองย่อส่วน โดยการออกแบบสะพานให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าสะพานจริง การทดสอบนี้ใช้อัตราส่วน 1:10 โดยมีลักษณะดังรูปที่ 12 และมีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

3.1 สะพานจำลอง (Bridge model)



รูปที่ 12 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

การออกแบบสะพานจำลองจะออกแบบให้สะพานมีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานจริง และใช้เหล็กรูปพรรณสำหรับการออกแบบสะพานจำลอง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกมีความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ 50, 200 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้พิจารณาสะพานช่วงเดียวมีจุดรองรับแบบธรรมดา (simple support) และเพื่อให้มีสภาพการทดสอบใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงจะออกแบบให้ระยะเวลาที่รถบรรทุกจำลองเคลื่อนที่ผ่านสะพานอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 วินาที ซึ่งเทียบเท่าระยะเวลาที่ใช้ของรถบรรทุกจริงในแต่ละประเภทเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสะพานความยาวช่วง 20 เมตร ค่าความเครียดสูงสุดเมื่อรถบรรทุกหนักเคลื่อนที่ผ่านสะพานจะมีค่าอยู่ในช่วง 70 ถึง 100 ไมโครสเตรนซึ่งเป็นค่าจริงที่คำนวณอ้างอิงจากสะพานจริง สะพานจำลองได้ถูกติดตั้งมาตรวัดความเครียดบริเวณใต้ท้องสะพานจำนวน 5 หน้าตัด แต่ละหน้าตัดติดตั้งมาตรวัดความเครียดจำนวน 8 ตัว โดยมีระยะห่างที่เท่าๆกัน เพื่อลดผลเนื่องจากการบิดของสะพาน โดยติดตั้งมาตรวัดความเครียดที่ระยะ $L/4$, $L/3$, $L/2$, $2L/3$ และ $3L/4$ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.2 รถบรรทุกจำลอง (Truck model)

รถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบจะจำลองให้มีพฤติกรรมที่คล้ายกับรถบรรทุกจริงในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 โดยสร้างจากวัสดุอลูมิเนียม สามารถเพิ่มน้ำหนักได้หลายระดับ ตั้งแต่ระดับน้ำหนักที่น้อยกว่าพิกัดจนถึงมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด ซึ่งค่าน้ำหนักของรถบรรทุกจำลองกำหนดโดยพิจารณาจากความเครียดของสะพานจริงจากน้ำหนักรถบรรทุกจริง โดยลักษณะของรถบรรทุกจำลองแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 รถบรรทุกจำลองประเภท 2-7 เพลา

โดยคุณสมบัติของรถบรรทุกจำลอง คือ สามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนัก และระยะห่างเพลาได้โดยอิสระ รูปแบบของรถบรรทุกจำลองที่ออกแบบสำหรับการศึกษานี้มี 6 รูปแบบ ได้แก่ รถบรรทุกประเภท 2 ถึง 7 เพลา โดยเทียบเคียงขนาดย่อส่วนกับรถบรรทุกจริง โดยรายละเอียดรถบรรทุกจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 2 และรถบรรทุกในแต่ละประเภทจะมีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 3 ระดับ คือ น้อยกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 เท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุกและมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 โดยรายละเอียดพิกัดน้ำหนักบรรทุกจำลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 รูปแบบรถบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

Truck type	Axle Spacing (m)					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2-Axle	0.420					
3-Axle	.0415	.0130				
4-Axle	0.180	0.350	0.130			
5-Axle	0.415	0.130	0.365	0.425		
6-Axle	0.180	0.350	0.130	0.365	0.425	
7-Axle	0.180	0.350	0.130	0.307	0.315	0.150

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

Truck type	Axle Weight (kg)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
2-Axle (L)	3.319	3.284					
2-Axle (M)	4.838	4.897					
2-Axle (H)	5.849	6.412					
3-Axle (L)	2.114	4.190	4.190				
3-Axle (M)	2.066	6.769	6.769				
3-Axle (H)	4.276	8.117	8.117				
4-Axle (L)	1.492	1.802	5.341	5.341			
4-Axle (M)	2.403	2.440	7.442	7.442			
4-Axle (H)	2.561	3.214	9.772	9.772			
5-Axle (L)	2.305	4.031	4.031	4.541	4.976		
5-Axle (M)	2.942	5.662	5.662	6.329	7.230		
5-Axle (H)	3.689	7.752	7.752	8.573	9.325		
6-Axle (L)	1.785	1.869	4.366	4.366	4.906	5.520	
6-Axle (M)	2.225	2.249	6.279	6.279	6.959	7.589	
6-Axle (H)	3.042	3.109	8.287	8.287	9.088	9.829	
7-Axle (L)	1.654	1.803	4.098	4.098	4.348	4.742	4.742
7-Axle (M)	1.738	1.989	5.623	5.623	6.066	7.107	7.107
7-Axle (H)	2.450	2.641	7.639	7.639	8.216	9.287	9.287

* หมายเหตุ

- L คือ กรณีน้ำหนักเบากว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30
- M คือ กรณีน้ำหนักเท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุก
- H คือ กรณีน้ำหนักหนักกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30

โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยความเร็วของรถบรรทุกที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ความเร็วต่ำด้วยที่ประมาณ 0.56 เมตรต่อวินาที ความเร็วปานกลางที่ประมาณ 1.11 เมตรต่อวินาที และความเร็วสูงที่ประมาณ 1.67 เมตรต่อวินาที ซึ่งเทียบเท่าเหตุการณ์จริงเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 20, 40 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จาก

การทดสอบทั้งหมด 54 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีมีการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง นับเป็นจำนวนทดสอบทั้งหมดได้ 162 ครั้ง เพื่อให้การทดสอบมีความเชื่อถือได้ โดยในการทำซ้ำของกรณีเดียวกันอาจมีความแตกต่างกันของค่าความเร็วอยู่เล็กน้อยจากการทดลอง

4. ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคำหาความเร็ว ระยะช่วงเพลาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของสะพาน โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การหาความเร็วของการสั่นโดยใช้หลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 2) การจำแนกประเภทรถบรรทุกจากการหาจำนวนเพลาระยะห่างเพลาน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีผลการศึกษาต่อไปนี้

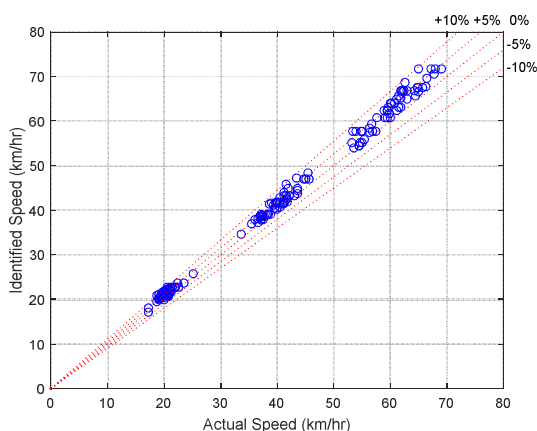
4.1 การหาความเร็วโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เมื่อนำความเครียดสำหรับหาความเร็วมาทำการคำนวณหาความเร็วด้วยหลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัด พบว่า สัญญาณความเครียดทั้ง 2 หน้าตัดเมื่อซ้อนทับกันจะทำให้ทราบระยะเวลาที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านจุด 2 จุด ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วของรถบรรทุกได้

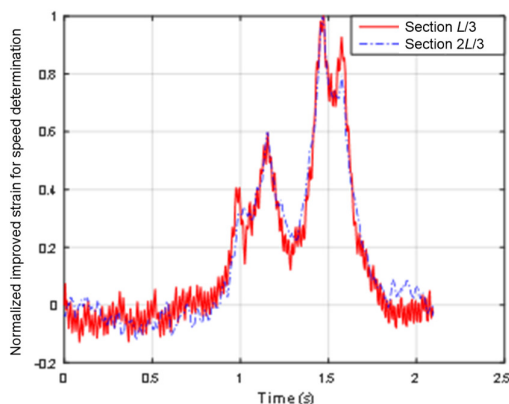
จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการสั่นสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ร้อยละ 10.63 ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิธีที่นำเสนอให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรถบรรทุกไม่เกินร้อยละ 8.74 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลจากระดับสัญญาณรบกวนและสมมติฐานในการหาความเร็ว หากสัญญาณความเครียดมีระดับสัญญาณรบกวนน้อยจะทำให้การหาความเร็วมีความถูกต้องมาก และหากมีระดับสัญญาณรบกวนมากขึ้นความถูกต้องในการหาความเร็วก็จะลดลงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดและเทคนิคการกรองสัญญาณรบกวน (noise filtering) ว่ามีประสิทธิภาพต่อการลดผลของสัญญาณรบกวนมากน้อยเพียงใด

จากสมมติฐานในการหาความเร็วโดยพิจารณาให้รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่พบว่ากรทดสอบในห้องปฏิบัติการยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมความเร็วให้คงที่ได้ ดังนั้นความเร็วที่ทดสอบจึงไม่ใช่ความเร็วที่คงที่มากนักโดยสังเกตได้จากรูปที่ 15 ซึ่งเป็นตัวอย่างสัญญาณความเครียดของรถบรรทุก

ประเภทสี่เพลลา เมื่อสัญญาณสำหรับใช้หาความเร็วทั้ง 2 หน้าตัดมาซ้อนทับกัน สัญญาณทั้ง 2 หน้าตัดจะไม่ซ้อนทับกันอย่างพอดี ดังนั้นจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากไม่ส่งผลต่อการจำแนกประเภทรถบรรทุกและยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้คำนวณน้ำหนักของรถบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 14 ผลการคำนวณความเร็วของรถบรรทุกในทุกกรณี

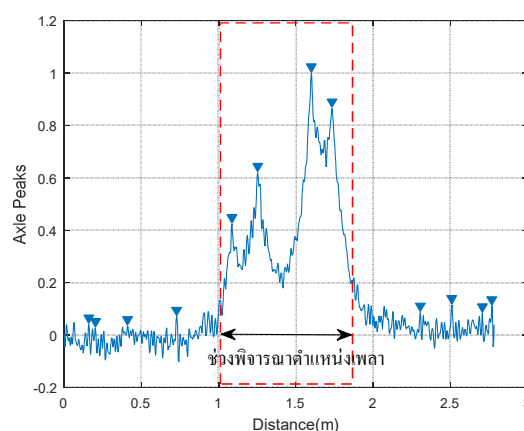


รูปที่ 15 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดของสองหน้าตัดที่ซ้อนทับกันด้วยหลักการของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ กรณีรถบรรทุกแบบสี่เพลลา

4.2 การจำแนกประเภทรถบรรทุก

วิธีการที่ใช้หาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาจะใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB ตรวจจับยอดสัญญาณ (peaks) ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยใช้สัญญาณความเครียดที่ปรับปรุงแล้วซึ่งถูกหารด้วยค่าสูงสุดให้มีแอมพลิจูดสูงสุด 1

หน่วย ณ หน้าตัดกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากค่าความเครียดมีแอมพลิจูดสูงและมียอดสัญญาณชัดที่สุด ดังนั้นจากรูปที่ 16 จะสังเกตได้ว่าพิจารณาตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่เป็นระยะไม่น้อยกว่ากึ่งกลางคานเป็นต้นไป ซึ่งในที่นี้คือที่ระยะ 1 เมตรของสะพานจำลอง โดยในการตั้งค่าฟังก์ชันสำหรับตรวจจับตำแหน่งเพลลาจะต้องกำหนดความสูงของยอดที่จะพิจารณาให้เป็นตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุก โดยในที่นี้ได้กำหนดให้ตรวจจับเฉพาะยอดสัญญาณที่มีค่าความสูงจากปลายยอดจนถึงฐานยอดไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของค่าสูงสุด ดังนั้นหากมียอดสัญญาณความเครียดในบริเวณใกล้เคียงมีค่าความสูงจากฐานยอดไม่ถึงร้อยละ 10 ของค่าสูงสุดแล้ว ระบบก็จะไม่ตรวจจับตำแหน่งยอดสัญญาณนั้นเป็นเพลลาของรถบรรทุก ด้วยหลักการนี้เมื่อได้ตำแหน่งเพลลาของรถบรรทุกก็จะคำนวณระยะห่างเพลลาได้ การจำแนกประเภทรถบรรทุกจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาของรถบรรทุก โดยทั่วไปรถบรรทุกจะมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถบ่งบอกถึงประเภทของรถบรรทุก ดังนั้นหลังจากที่คำนวณระยะห่างเพลลาและจำนวนเพลลาจะสามารถจำแนกประเภทรถบรรทุกและทำให้สามารถทราบพิกัดน้ำหนักตามกฎหมายของรถบรรทุกประเภทนั้นๆ ได้



รูปที่ 16 การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาด้วยฟังก์ชัน *findpeaks*

จากการศึกษาการจำแนกประเภทรถบรรทุกพบว่าการใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* ในโปรแกรม MATLAB สามารถหา ระยะห่างเพลลา จำนวนเพลลาและจำแนกประเภทรถบรรทุกได้อย่างถูกต้องในทุกกรณีศึกษา มีค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเพลลาที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยค่าความคลาด

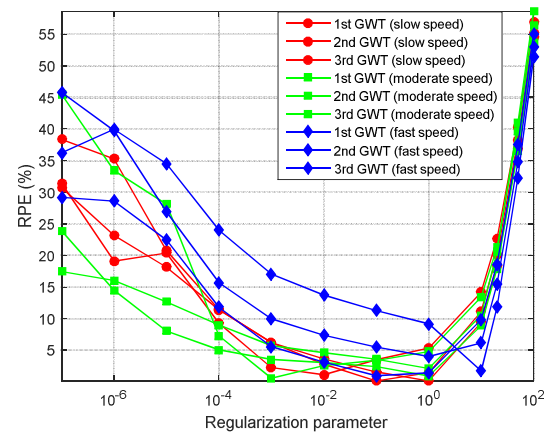
เคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อการจำแนกประเภทรถบรรทุก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถที่อาจไม่เป็นความเร็วคงที่โดยสมบูรณ์ และระดับสัญญาณรบกวนของระบบจึงส่งผลให้การตรวจจับยอดสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนรวมไปถึงค่าความคลาดเคลื่อนสะสมจากการคำนวณหาความเร็วในขั้นตอนก่อนหน้า

4.3 การหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพาน

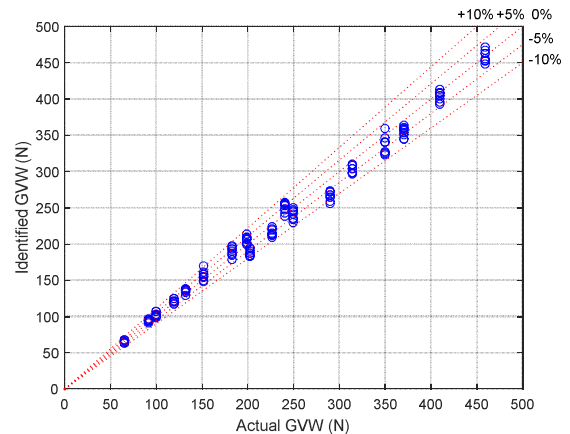
การหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยความเครียดทางพลศาสตร์ของสะพานด้วยหลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกัลลิ่งสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน โดยปราศจากการใช้เทคนิค USC จะยังมีความถูกต้องไม่มากนัก เนื่องจากองค์ประกอบของแรงมี 2 ส่วนด้วยกัน คือ องค์ประกอบทางสถิตยและองค์ประกอบทางพลศาสตร์ ในการคำนวณหาน้ำหนักเพียงครั้งเดียวจะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ถูกต้อง โดยยังขาดองค์ประกอบของน้ำหนักทางสถิตย ดังนั้นวิธีการคำนวณซ้ำหรือเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย (USC) จึงเข้ามาช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตยให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยได้เลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 0.1 ดังรูปที่ 17 ซึ่งเป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative percentage error, RPE) ของน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกกับค่าเรกูลาร์ไรเซชันใน 9 กรณีทดสอบ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [12] โดยจากรูปที่ 17 สามารถสังเกตได้ว่าค่าเรกูลาร์ไรเซชันสามารถเลือกใช้ได้กว้าง เมื่อใช้เทคนิค USC

สำหรับผลการคำนวณหาน้ำหนักกรรม (gross vehicle weight, GVW) ของรถบรรทุกทั้ง 162 การทดสอบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 18 และตัวอย่างค่าน้ำหนักเพลารถบรรทุกที่คำนวณจากวิธีการที่นำเสนอ กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพลาได้แสดงดังรูปที่ 19 ซึ่งสังเกตได้ว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับระดับความคลาดเคลื่อนของรถบรรทุกแต่ละประเภท แสดงไว้ดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่ามียางกรณีที่สามารถหาค่าน้ำหนักกรรมได้ใกล้เคียงที่ค่าความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.03 และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 3.75 โดยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถหาน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกแต่ละประเภทได้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงร้อยละ

4.77 – 10.66 โดยรถบรรทุกประเภท 2 เพลาเป็นประเภทที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเนื่องจากมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์น้อยที่สุด และหากพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดแล้วจะมีระดับความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.58 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกประเภท 3 เพลา ที่ 3 ระดับความเร็ว รวม 9 กรณี



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักกรรมของรถบรรทุกในทุกกรณีทดสอบ

จากการหาน้ำหนักกรรมของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยวิธีการที่กล่าวไว้พบว่า เทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตย (USC) สามารถปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิตยให้มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 19

ตารางที่ 4 ระดับความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมของรถบรรทุก

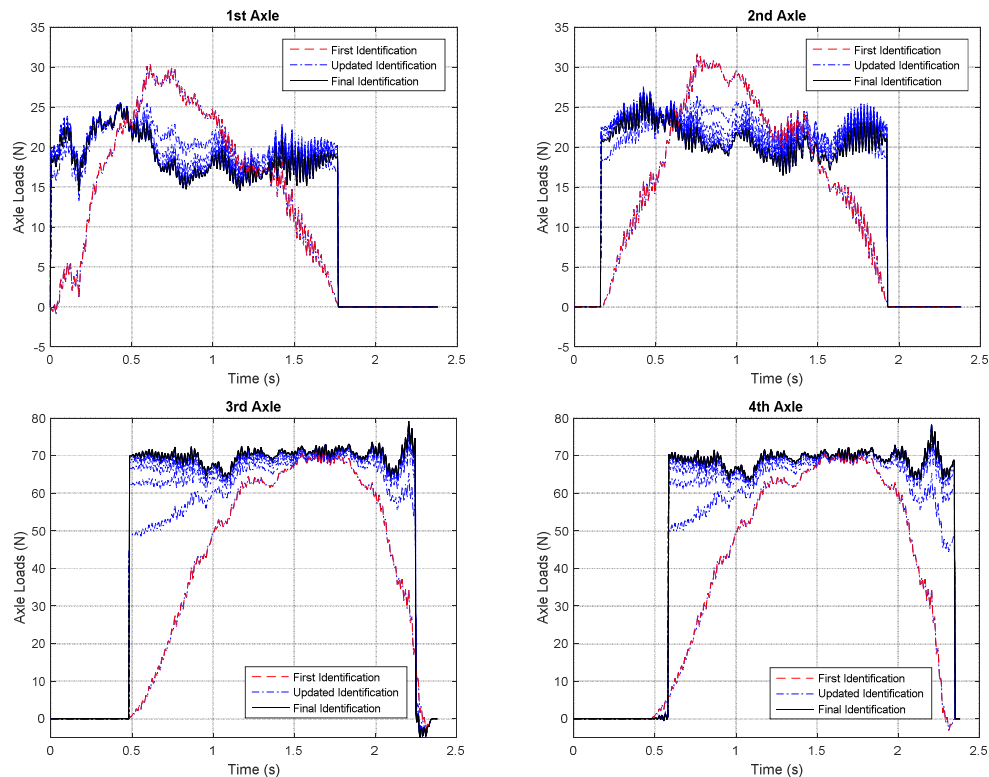
Truck type	Max. GVW error (%)	Min. GVW error (%)	Average GVW error (%)	Max. GVW error (%) at 95% Confidence level
2-axle	5.29	0.13	2.08	4.77
3-axle	11.64	0.31	3.38	7.47
4-axle	7.88	0.67	3.78	7.45
5-axle	11.59	1.84	6.76	10.66
6-axle	7.56	0.28	3.41	6.29
7-axle	8.19	0.03	3.41	7.71
Total	11.64	0.03	3.75	8.58

หมายเหตุ: ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย คำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

อย่างไรก็ตาม จากค่าน้ำหนักรวมของรถบรรทุกทางสถิติที่มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ แต่สำหรับการหาน้ำหนักเพลาทงสถิติพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยในบางกรณีพบค่าความคลาดเคลื่อนถึงกว่าร้อยละ 50 โดยเฉพาะเพลามี

น้ำหนักเบา เนื่องจากการเทียบความคลาดเคลื่อนในรูปของร้อยละ และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอาศัยการเทียบค่าความเครียดของสะพานซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำทุกๆเพลารถให้เกิดส่วนต่างยกกำลังสองที่น้อยที่สุด จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมมีค่าไม่มาก อีกทั้งระบบที่ใช้ดำเนินการวิเคราะห์น้ำหนักเพลานี้ในรูปของแรงกระทำทางพลศาสตร์ซึ่งไม่สามารถประเมินระดับความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์ได้เนื่องจากไม่ทราบแรงกระทำจริงในเพลารถ เพราะไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักที่เพลารถบรรทุกจำลองได้ ดังนั้นในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลารถจึงทำได้เพียงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการคำนวณกับน้ำหนักเพลาทงสถิติที่ได้จากการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทางสถิติเท่านั้น

สำหรับการจำแนกความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพานโดยใช้ตารางเปรียบเทียบความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ (Accuracy Classification of WIM) [17] แสดงไว้ดังตารางที่ 5



รูปที่ 19 การหาน้ำหนักของรถบรรทุกด้วยเทคนิค USC กรณีรถบรรทุกประเภท 4 เพล

ตารางที่ 5 เกณฑ์สำหรับจำแนกระดับความถูกต้องของระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ COST 323 [17]

Criteria (type of measurement)	Domain of use	Accuracy Classes: Confidence interval width (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
1. Gross weight	Gross weight > 3.5 t	5	7	10	15	20	25	>25
Axle load:	Axle load > 1 t							
2. group of axles		7	10	13	18	23	28	>28
3. single axle		8	11	15	20	25	30	>30
4. axle of a group		10	14	20	25	30	35	>35
Speed	$V > 30 \text{ km/h}^{(1)}$	2	3	4	6	10	10	>10
Axle spacing		2	3	4	6	10	10	>10
Total flow		1	1	1	3	5	5	>5

(1) For sensors which do not work statically or at very low speed

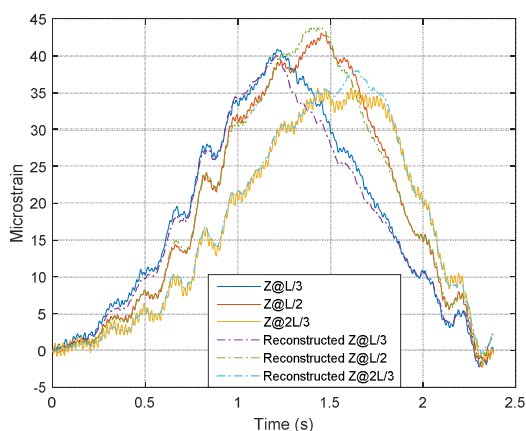
ตารางที่ 5 นั้นเป็นการจำแนกความถูกต้องประกอบด้วย 4 หลักเกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ความถูกต้องของน้ำหนักรวม น้ำหนักกลุ่มเพลาน้ำหนักเพลเดี่ยว และน้ำหนักของเพลากลุ่ม โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะระดับความถูกต้องของค่าน้ำหนักรวม โดยมีระดับความถูกต้องดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 พบว่าจากทั้งหมด 54 กรณีหลัก (แต่ละกรณีหลักทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง) มี 2 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในระดับ C(15) มี 8 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องในระดับ B(10) มี 12 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในระดับ B+(7) และ 29 กรณีหลักที่มีระดับความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ A(5) ซึ่งแสดงว่ากรณีส่วนมากนั้นมีระดับความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

เพื่อตรวจสอบว่าระบบที่นำเสนอขึ้นวิเคราะห์ได้ถูกต้องตามสมมติฐาน จึงพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ตรวจวัดกับสัญญาณความเครียดทางทฤษฎีที่สังเคราะห์ขึ้นจากค่าน้ำหนักเพลที่วิเคราะห์ได้ โดยแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะของสัญญาณความเครียดทั้งสองที่ใกล้เคียงกันนั้นบ่งบอกถึงระเบียบวิธีการค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่มีความถูกต้อง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณความเครียดที่หน้าตัด $L/3$ $L/2$ และ $2L/3$ มีค่าเท่ากับ 0.9974 0.9980 และ 0.9976 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการจำแนกระดับความถูกต้องของค่าน้ำหนักรวม

Truck type	Speed	GVW error (%)		
		Light	Medium	Heavy
2-Axle	Slow	A(5)	B+(7)	A(5)
2-Axle	Moderate	A(5)	A(5)	A(5)
2-Axle	Fast	A(5)	A(5)	A(5)
3-Axle	Slow	B(10)	A(5)	B+(7)
3-Axle	Moderate	A(5)	A(5)	B(10)
3-Axle	Fast	A(5)	C(15)	B+(7)
4-Axle	Slow	A(5)	B(10)	B+(7)
4-Axle	Moderate	A(5)	B+(7)	A(5)
4-Axle	Fast	A(5)	A(5)	B(10)
5-Axle	Slow	B+(7)	B+(7)	A(5)
5-Axle	Moderate	B(10)	B(10)	B+(7)
5-Axle	Fast	B(10)	C(15)	A(5)
6-Axle	Slow	A(5)	A(5)	A(5)
6-Axle	Moderate	B+(7)	B+(7)	A(5)
6-Axle	Fast	B(10)	B+(7)	A(5)
7-Axle	Slow	A(5)	A(5)	A(5)
7-Axle	Moderate	B(10)	B+(7)	A(5)
7-Axle	Fast	B(10)	B+(7)	A(5)



รูปที่ 20 ตัวอย่างสัญญาณความเครียดที่ได้จากการวัด และสัญญาณความเครียดที่สร้างขึ้น

จากผลการศึกษาด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนนี้ สามารถประเมินได้ว่ามีระดับความถูกต้องในเกณฑ์ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาทดสอบกับโครงสร้างสะพานจริงเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงต่อไป โดยระบบการหาน้ำหนักรถบรรทุกที่นำเสนอจะใช้เพียงมาตรวัดความเครียดซึ่งมีราคาไม่แพงติดตั้งบริเวณใต้ท้องสะพาน และยังสะดวกในการบำรุงรักษาโดยไม่กระทบกับการสัญจรของยานยนต์บนเส้นทาง จึงมีความคุ้มค่าอย่างมากทั้งในด้านของต้นทุนโดยใช้โครงสร้างที่มีอยู่แล้วในเส้นทาง และในด้านการบริหารจัดการ ซึ่งใช้จำนวนบุคลากรน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบด้านชั่งน้ำหนักบรรทุกถาวร และด้านชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่แบบฝังในผิวทาง ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการจำแนกประเภท และการหาน้ำหนักของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ด้วยการใช้เพียงผลการตอบสนองสัญญาณความเครียดของสะพานในแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้หลักการค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หาความเร็วของรถบรรทุก การใช้ฟังก์ชัน *findpeaks* จากโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปจำแนกประเภทรถบรรทุก และการใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชันและการคำนวณด้วยวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพสิชัน และเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ด้วยเทคนิคการปรับปรุง

องค์ประกอบทางสถิติ (USC) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1) การหาความเร็วรถบรรทุก การหาจำนวนเพลลาและระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกสามารถคำนวณเพื่อใช้จำแนกประเภทรถบรรทุกได้ถูกต้องทุกกรณีตามเงื่อนไขที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของรถบรรทุกโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพลลาหรือ FAD sensor โดยความคลาดเคลื่อนในการหาระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกเกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการคำนวณหาความเร็ว อีกทั้งเป็นผลมาจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์และระดับสัญญาณรบกวนของระบบ โดยข้อมูลทางความเร็วรถบรรทุก และประเภทของรถบรรทุกจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการนำไปคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกได้ต่อไป ระดับความถูกต้องของความเร็วรถบรรทุกและระยะห่างเพลลาที่คำนวณได้จะส่งผลกับระดับความถูกต้องของน้ำหนักเพลลาและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ

2) การคำนวณหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสะพานจากข้อมูลทางด้านความเร็วและประเภทรถบรรทุกที่คำนวณได้ในขั้นตอนก่อนหน้า พบว่าสามารถหาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ร้อยละ 3.75, 11.64 และ 0.03 ตามลำดับ และที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระบบที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.58 ซึ่งเมื่อเทียบกับระดับความถูกต้องตามมาตรฐาน COST 323 พบว่าวิธีการที่นำเสนอได้ผลลัพธ์โดยมีกรณีส่วนใหญ่ รวมไปถึงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของทุกกรณีอยู่ในระดับ A(5) ซึ่งเป็นระดับความถูกต้องสูงสุด ในขณะที่หากพิจารณาจากระดับความถูกต้องที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะอยู่ที่ระดับ B(10)

3) การพิจารณาเงื่อนไขของระยะห่างเพลลาของรถบรรทุกแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากกลุ่มเพลลาทำให้มีน้ำหนักเพลลาที่มีค่าเท่ากันจะสามารถลดจำนวนตัวแปรในการวิเคราะห์หลังได้ โดยสามารถจำแนกและหาน้ำหนักรถบรรทุกได้หลากหลายประเภทตั้งแต่ประเภท 2 เพลลาไปจนถึง 7 เพลลาด้วยการติดตั้งมาตรวัดความเครียด 5 หน้าตัด

4) ข้อสรุปข้างต้นเป็นผลการศึกษาจากการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนเท่านั้น ซึ่งจากระดับความถูกต้องที่ได้ถือ

ว่ามีความเหมาะสมที่จะพัฒนาการศึกษาต่อการประยุกต์กับโครงสร้างสะพานจริง เนื่องจากได้พิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ประเภทรถบรรทุก น้ำหนักบรรทุกและความเร็วในการสัญจร พบว่าการศึกษาดังกล่าวจะมีส่วนได้ผลลัพธ์ที่ดี อย่างไรก็ตามการศึกษายังต้องพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในทางปฏิบัติให้สามารถวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกในขณะที่อาจมียานพาหนะคันอื่นสัญจรข้ามสะพานพร้อมกันได้ รวมถึงการพัฒนาให้ใช้จำนวนมาตรวัดความเครียดที่น้อยลง รวมถึงประเมินระดับความคลาดเคลื่อนที่อาจเพิ่มขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสะพานจริงซึ่งมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าโครงสร้างสะพานจำลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 107/2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Moses, F. (1979). Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transport Engineering Journal ASCE*, 105(3), 233-249.
- [2] Law, S. S., Chan, T. H. T. & Zeng, Q. H. (1999). Moving force identification a frequency and time domains analysis. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 121(3), 394-401.
- [3] European Commission 4th Framework Programme Transport. (2001). *Weighing-in-motion of axle and vehicle for europe (WAVE) – Report of work package 1.2 Bridge WIM systems (B-WIM)*, Slovenia: University College Dublin.
- [4] Sangchuwong, P. (2007). *Determination of vehicle weight from bridge bending moment without axle detection*. (Unpublished master thesis). Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [5] Weerachantachart, N. (2003). *Determination of velocity and axle spacings of vehicles on bridges from strain signals*. (Unpublished master thesis). Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [6] Chan, T. H. T., Law S. S. & Yung, T. H. (2000). Moving force identification using an existing prestressed concrete bridge. *Engineering Structures*, 22, 1261-1270.
- [7] Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2000). Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses. *Journal of Sound and Vibration*, 236(4), 705-724.
- [8] Law, S. S., Chan, T. H. T. & Zeng, Q. H. (2001). Regularization in moving force identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(2), 136-148.
- [9] Law, S. S. & Fang, Y. L. (2001). Moving force identification: optimal state estimation approach. *Journal of Sound and Vibration*, 239(2), 233-254.
- [10] Zhu, X. Q. & Law, S. S. (2002). Moving loads identification through regularization. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 128(9), 989-1000.
- [11] Pinkaew, T. (2006). Identification of vehicle axle loads from bridge responses using update static component technique. *Journal of Engineering Structures*, 28(11), pp. 1599-1608.
- [12] Pinkaew, T. & Asnachinda, P. (2007). Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicle from the bending moment of bridge. *Journal of Engineering Structure*, 29(9), 2282-2293.
- [13] Chuaket, C. & Asnachinda, P. (2015). Identification of speed and axle spacing of a moving vehicle using dynamic bridge strain responses. *Proceeding of The 20th National Convention on Civil Engineering held in Chonburi Thailand, 8-10 July 2015* (pp. 1-8). King Mongkut's University of Technology North Bangkok. (in Thai)
- [14] Chuaket, C. & Asnachinda, P. (2016). Classification and weight identification of heavy vehicle from dynamic bridge strain. *Proceeding of The 21st National Convention on Civil Engineering held in Songkhla, Thailand, 28-30 June 2016* (pp. 1-8). Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- [15] Zhao, H. & Uddin, N. (2011). Influence line calculation of existing bridges in BWIM system. *Proceeding of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE-IASS) Symposium held in, London, UK, 20-23 September 2011* (pp. 1-8). International Association for Bridge and Structural Engineering.

- [16] Hua Zhao & Nasim Uddin. (2011). Innovative bridge weigh-in-motion system for enforcement application. *Proceeding of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE-IASS) Symposium held in, London, UK, 20-23 September 2011* (pp. 1-8). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [17] O'Brien, E.J. & Jehaes, S. (Eds.). (2002). *COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicle, Final Report (1993-1998)*. LCPC Publications.