บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

น้ำหนักรถบรรทุกและการกระจายน้ำหนักเป็นข้อมูลที่สำคัญ ที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) ข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตลอดจนการบำรุงรักษาถนนและสะพาน รวมทั้งการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับน้ำหนักรถบรรทุก น้ำหนักรถบรรทุกที่มีความถูกต้องนั้นมีความสำคัญต่อการวางแผนด้านนโยบายการขนส่งและการจราจร เพื่อที่จะได้มาถึงข้อมูลดังกล่าวนั้น ระบบ weigh-in-motion (WIM) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

ระบบ WIM คือ วิธีการหาข้อมูลต่าง ๆ เช่น น้ำหนักเพลา ระยะห่างระหว่างเพลา จำนวนเพลาของยวดยานพาหนะ ขณะที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพาน ซึ่งโดยปกติยวดยานพาหนะดังกล่าว มักจะเป็นรถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก รถพ่วง เพราะรถกลุ่มดังกล่าวจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างถนนและสะพาน

ในต่างประเทศ เช่น แคนาดา อเมริกา ฮ่องกง ไต้หวัน และออสเตรเลีย ได้มีการนำระบบ WIM มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบ WIM สามารถใช้ได้ทั้งกับผิวทาง (ถนน) หรือ สะพาน ในกรณีที่ใช้กับผิวทาง อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอนกรีตหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม (culvert) ซึ่งจะวางอยู่ใต้ถนนโดยที่ภายใน culvert นี้จะมีมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ติดตั้งอยู่ การใช้แผ่นโลหะติดตั้งอยู่บนผิวถนนโดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะถูกรองรับด้วยตัวเซลล์วัดน้ำหนัก (load cell) การใช้มาตรวัดความเครียดแนวตั้ง (vertical strain transducer) ฝังไว้ใต้ผิวทาง หรือการใช้พิโซอิเลคตริค (piezoelectric) ฝังไว้ที่ผิวทาง แต่เนื่องจากระบบนี้ มีข้อเสียคือ เมื่อต้องการที่จะซ่อมบำรุง จะต้องทำการลอกผิวทางออก อีกทั้งอาจต้องทำการปิดเส้นทางการจราจรระหว่างดำเนินการติดตั้งระบบ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเป็นระบบที่ใช้กับสะพาน ซึ่งจะเป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น มาตรวัดความเครียด (strain gauge) เครื่องตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ไปติดไว้ที่คาน (girder) ใต้สะพาน ข้อมูลที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ดังกล่าวสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนถนนหรือสะพานได้

สำหรับประเทศไทย การศึกษาในเรื่อง WIM ในอดีตที่ผ่านมามีค่อนข้างน้อย การเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกจะเก็บจากการที่ให้รถขึ้นชั่งน้ำหนักบนตราชั่ง ซึ่งทำให้เสียเวลามากและก่อให้เกิดปัญหาทางการจราจร นอกจากนั้นยังพบว่ามีปัญหาเรื่องการโกงน้ำหนัก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อถนนและสะพาน ดังนั้นจึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่จะนำระบบ WIM เข้ามาใช้ในการเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกในประเทศไทย เพื่อที่จะได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบการรับน้ำหนักจร (live load) และการวางแผนบำรุงรักษาถนนและสะพาน อีกด้านหนึ่งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมการบรรทุกน้ำหนักเกินของรถบรรทุกได้ด้วย

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Moses และคณะ (1979) สรุปว่าผลกระทบทางพลศาสตร์เป็นปัญหาหลักในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง เนื่องมาจากความขรุขระของผิวทางและการกระแทกที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักของตัวรถเอง เป็นผลให้แรงทางพลศาสตร์มีค่าเป็น 30-40% ของค่าทางสถิตซึ่งนำไปสู่การทำนายที่ผิดพลาดได้

เนื่องจากผลกระทบทางพลศาสตร์เป็นปัญหาหลักในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง Ghosn และ Xu (1988) จึงพิจารณาผลของแรงทางพลศาสตร์ โดยการเพิ่มพจน์ของโคไซน์และไซน์เข้าไปในสมการการเคลื่อนที่ และทำการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ (Fourier analysis) ซึ่งวิธีนี้จะทำให้หาแรงเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ได้ แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายถึง 50%

Ansari (1990) ได้ทำการกรองผลของพลศาสตร์ออกจากข้อมูลที่เก็บ โดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบดิจิตอล (digital filter) และใช้วิธีการเชบบี้เชบโพลีโนเมียล (Chebyshev polynomial) มาทำการจำลองเส้นอินฟลูเอนซ์ลายน์ (Influence line) เนื่องจากผลทางสถิตเท่านั้น ซึ่งจากเส้นอินฟลูเอนซ์ลายน์นี้จะทำให้สามารถหาค่าน้ำหนักเพลาแต่ละเพลาได้ และนำน้ำหนักเพลาแต่ละเพลามารวมกันจะได้น้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ด้วยอุปสรรคดังกล่าวกับการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง Moses (1979) และคณะได้เพิ่มการวัดความเค้นของสะพานเพื่อที่จะบรรลุผลในการคำนวณน้ำหนักของรถ Moses และคณะได้อธิบายว่าวิธีการวัดน้ำหนักจากคาน (girder) ของสะพานดีกว่าการวัดน้ำหนักรถจากผิวทาง แรงพลศาสตร์ที่ผิวสัมผัสของยางจะถูกกรองออกและลดลงโดยความเฉื่อยเนื่องจากมวล (massive inertia) ของสะพาน และอาจจะถูกกำจัดได้หมดด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) กับการทำนายบนพื้นฐานของความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลาจะสามารถหาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุกได้

Lamann และ Novak (1996) จากประเทศอเมริกา ได้นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (girder) เหล็ก 5 อัน เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความล้า ความเครียดจะถูกวัดภายใต้การจราจรปกติ โดยวิธีการของเรนโฟล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมและถูกบันทึกด้วยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (Stress Measuring System; SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีตที่ผ่านมา ภายใต้การจราจรปกติและทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโฟล rainflow และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Weighing System, TWS) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลาจากความเครียดในอดีต โดยการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ลายน์ (Influence line) ของสะพาน องค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกสามารถหาได้ โดยการใช้ตัวเซนเซอร์ 2 ตัวติดขนานกันไว้กับผิวทาง แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับทำการศึกษาของ Lamann และ Novak สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 3 สัปดาห์

Thater G., Chang P., Schelling D.R. และ Fu C.C. (1998) ได้นำระบบ WIM มาใช้ในการทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่โดยทำการจำลองในคอมพิวเตอร์แล้วทำการแยกผลทาง

พลศาสตร์ออกเพื่อหาน้ำหนักทางสถิต ด้วยการใช้เทคนิคการกรองผลทางพลศาสตร์เทียบเท่า (Equivalent Dynamic Filter Technique, EDFT) แยกแรงออกเป็นแรงทางพลศาสตร์และผลตอบสนองเสมือนทางสถิต (Pseudo static response) โดยใช้วิธีฟาสฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform) เทียบผลจากการแอ่นตัวเป็นสัดส่วน เรียกว่าอัตราส่วนการกรองเทียบเท่า (Equivalent filtering ratio, EFT) ผลที่ได้พบว่าสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณ และให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายน้ำหนักรถได้ถึง ±5% ในขณะที่ใช้ระบบ WIM ที่มีอยู่เดิมให้ความถูกต้องแม่นยำในช่วง ±10% เท่านั้น แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถหาน้ำหนักในแต่ละเพลาได้ และไม่ได้นำคุณสมบัติของสะพานจริงมาพิจารณา

Chan T.H.T., Law S.S., Yung T.H. และ Yuan X.R. (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการใช้ปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน รูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักคงที่ที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้หาน้ำหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยาตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพลา

Zhu X.Q., Law S.S. (1999) ได้ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงคาน ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์โดยหลักการของ Hamilton โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการของซุปเปอร์โพซิชันท์เชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยการทดสอบจากแบบจำลอง ใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียวในรูปของ Frequency – Time domain โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถจะถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลา และ 2 เพลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาไว้คงที่) เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วง (viscous damping) สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถหาได้โดยผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูเรียร์ทรานส์-ฟอร์ม (Fourier transforms) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา (time domain) ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้ด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้ โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งน้ำหนักของรถได้จากการเฉลี่ยค่าแรงที่หาได้ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 20% อีกทั้งการเฉลี่ยค่าแรงนี้ เมื่อพิจารณาจากแรงที่ได้จริงพบว่าลักษณะของแรงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง คือมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจนมีค่าลบในบางช่วง ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ทำให้ค่าเฉลี่ยที่ได้ไม่มีความเชื่อถือ จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

Chan T.H.T., Law S.S. และ Yung T.H. (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการใช้สะพานที่เป็นคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) โดยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดและ

เครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (girder) ของสะพานตลอดจนเครื่องตรวจนับจำนวนเพลา (axle sensors) ที่ผิวของทางของสะพาน รถบรรทุก 2 เพลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform) พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักใช้เวลานานมากถึง 30 นาที เมื่อใช้ Cpu รุ่น Pentium II 300MHz และน้ำหนักที่ทายได้ในโดเมนของเวลามีความแปรปรวนสูงมากจนไม่สามารถเชื่อถือได้ซึ่งเกิดจากสภาวะบกพร่อง (ill-condition) แม้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หาได้จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำถึง ± 5% ก็ตาม

Law S.S., Chan T.H.T. และ Zeng Q.H. (2001) ได้พบว่า การหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่าสภาวะบกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น Law S.S. และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการเรกูลาร์ไรเซชั่น (regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าเรกุลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ λ ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นานและสิ้นเปลือง อีกทั้งค่าที่เหมาะสมนี้ยังขึ้นกับลักษณะของตัวรถอีกด้วย

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ จะถูกวิเคราะห์โดยการใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (orthotropic rectangular theory) และหลักการของซุปเปอร์โพซิชันท์เชิงโหมด (modal superposition principle) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (time domain) โดยน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานกับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบางจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน รวมทั้งทำการทดสอบกับแบบจำลองย่อส่วน ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนที่ดีมากคือ ไม่เกิน 5% ในระดับสัญญาณรบกวนที่ต่ำมาก (1%) แต่เวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักจะต้องใช้เวลานานมากเพราะต้องมีการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าพารามิเตอร์ λ มีผลต่อการทายน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานและการหาน้ำหนักด้วยการใช้ความเร่งให้ผลที่ดีกว่าการใช้ความเครียด และพบว่าการเยื้องศูนย์มีผลให้ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

Law S.S. และ Fang Y.L. (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้เทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของเสตทเสปซ (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มูลา (recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซ็นเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิกิริยาตอบสนองของ

สะพาน ซึ่งการคำนวณด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มนี้ใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ และความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับเรกูลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์เช่นกันและไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ ซึ่งการใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก

คณะกรรมาธิการยุโรป (2001) ได้ทำการพัฒนาระบบ WIM ด้วยการใช้สะพานเป็นหลักเรียกว่า Bridge WIM หรือ B-WIM โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) จะคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบพร้อม ๆ กันเพื่อให้ได้ทั้งความเร็ว จำนวนเพลา ระยะห่างเพลา และน้ำหนักรวม และทำการพัฒนาการวิเคราะห์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็น 2 มิติ เพื่อคำนึงผลของตำแหน่งที่เยื้องศูนย์ตามแนวขวาง และตรวจสอบโดยทำการทดลองในสนามจริง โดยใช้สะพานที่มีลักษณะแบบ orthotropic deck และยังคำนึงถึงพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อมเช่น ผลของอุณหภูมิจากฤดูกาล และความชันตามแนวขวางของผิวทาง และยังทดสอบกับสะพานที่เป็นสะพานช่วงเดียวหรือหลายช่วง เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง มาตรวัดความเครียด ซึ่งระบบการหาน้ำหนักในงายวิจัยนี้มีผลคลาดเคลื่อนจากความเร็วและระยะห่างเพลาจากการทำนายพร้อมกัน พบว่าการวิเคราะห์แบบ 2 มิติสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำได้จากเดิมที่วิเคราะห์แบบมิติเดียว แต่ผลการหาแรงทางพลศาสตร์ยังไม่ดีพอเนื่องจากยังมีความแปรปรวนของข้อมูลที่สูง สำหรับผลการหาน้ำหนักรวมทางสถิตพบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm$ 10 %

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2002) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีโดเมนของเวลา (Time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองแบบคานต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้ขณะเคลื่อนที่ของรถและ รวมทั้งใช้วิธีการเรกูลาร์ไรเซชั่น (regularization) ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาและลดเวลาในการคำนวณ จากผลการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขสามารถหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (noise) ได้ และพบว่าการใช้ความเร่งเป็นพารามิเตอร์ในการหาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียด จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ และวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้ทั้งวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยการแก้ปัญหาใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชัน (singular value composition, SVD) และให้ความคลาดเคลื่อนที่มากน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน โดยให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 4% แต่ใช้เวลาในการคำนวณที่นานเนื่องจากขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่มาก และยังใช้เวลานานมากในการหาเรกูลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ (λ) ที่เหมาะสมที่สุดเช่นกันจึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน

Yu L. และ Chan T.H.T. (2002) ได้ทำการทดสอบหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยโมเมนต์ดัด โดยวิธีที่นำมาใช้ได้แก่วิธีโดเมนของเวลา (Time domain method; TDM) และวิธีโดเมนของความถี่และเวลา (Frequency time domain method, FTDM) และทำการเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ระบบสมการเชิงเส้นสองวิธีได้แก่ เทคนิคการใช้ซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ (pseudo-inverse matrix; PI) และวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชัน (singular value composition, SVD) รวมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่เลือกใช้ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถขณะเคลื่อนที่ จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด ผลการทายน้ำหนักที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำทั้งในวิธี TDM และ FTDM โดยเฉพาะในกรณีวิธี FTDM สามารถขจัดปัญหา

สภาวะบกพร่อง (ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิคซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบาย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ถือว่าดีคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5-10% แต่ค่าเรกุลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ (λ) มีผลในการหาน้ำหนักค่อนข้างมากในแต่ละกรณีกล่าวคือต้องหาค่า λ ค่าที่เหมาะสมที่สุดตลอดการคำนวณนั้นๆจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

R. J. Jiang, F. T. K. Au and Y. K. Cheung (2003) ได้ทำการศึกษาการหาพารามิเตอร์ของยานพาหนะขณะเคลื่อนที่บนสะพานได้แก่ มวลของตัวรถช่วงบนและล่าง ค่าความหน่วงของรถ ค่าสติฟเนสสปริงระหว่างมวลทั้งสอง และค่าสติฟเนสสปริงอีกค่าสำหรับผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับผิวสะพาน โดยทำการหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้พร้อม ๆ กันโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) โดยจำลองผลตอบสนองของสะพานขึ้น และใช้ความเร่งของการสั่นไหวของสะพานในขั้นตอนหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งให้ผลการหาค่าพารามิเตอร์ของในส่วนมวลรถที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ ขณะที่พารามิเตอร์ตัวอื่นมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง และการที่จำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำนั้นต้องการจำนวนตำแหน่งของการเก็บข้อมูล (station) หลายตำแหน่ง และการคำนวณใช้เวลาที่นานมากเนื่องจากระบบการคำนวณใช้วิธีการค้นหาข้อมูล (search) ที่เหมาะสมที่สุดจากขอบเขต (limits) ที่กำหนด

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2003a) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยข้อมูลความเร็วรถที่ไม่คงที่ โดยทำการศึกษารูปแบบการวัดสัญญาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ การใช้สัญญาณความเร่งของการสั่นไหวของสะพาน และการใช้สัญญาณความเครียดของสะพาน โดยทั้งสองวิธีทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โดยตรง (exact solution) ร่วมกับวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดและเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชั่นเช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น โดยทำการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ขณะที่การทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วนนั้นทำการศึกษาโดยใช้สัญญาณความเครียดเท่านั้น โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยของรถในช่วงการเคลื่อนที่บนสะพานมาวิเคราะห์แทนความเร็วจริงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากชะลอรถเพื่อให้มีความเร็วไม่คงที่ และยังศึกษาผลของความขรุขระและระดับของสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการหาแรงโดยการใช้สัญญาณความเร่งนั้นให้ผลที่แม่นยำกับแรงทางสถิติมากกว่าการใช้สัญญาณความเครียดซึ่งมีความแปรปรวนสูง (แรงที่หาได้มีการกวัดแกว่งที่สูง) โดยเฉพาะกับรถที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งยังทำการจำลองรูปแบบสะพานแบบคานต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าแรงที่คำนวณได้บริเวณที่รถผ่านจุดรองรับนั้นจะเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากจะเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ที่ตำแหน่งเข้าใกล้จุดรองรับ ซึ่งต้องการค่าพารามิเตอร์ในการเรกูลาร์ไรเซชั่นที่มีค่าน้อยที่ตำแหน่งเวลาที่รถเข้าใกล้จุดรองรับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น และยังพบว่าในการวิเคราะห์สะพานแบบต่อเนื่องนั้น ระดับสัญญาณรบกวนจะมีผลมากต่อการหาแรงเมื่อเทียบกับสะพานแบบช่วงเดียวปกติ

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2003b) ได้ทำการศึกษาการหาแรงขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลองโดยใช้สัญญาณการสั่นไหวจากโมเมนต์ดัดของสะพาน โดยวิธีที่นำมาศึกษานั้นประกอบด้วย 2 วิธี โดยวิธีแรกใช้พื้นฐานจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์โดยตรง (exact solution) ซึ่งจะหาแรงในลักษณะแยกเป็นเพลา (axle load) และอีกวิธีใช้พื้นฐานทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM solution) ซึ่งจะหาแรงได้ในรูปแบบของแรงในล้อ (wheel load) ซึ่งอิสระต่อกัน โดยทั้งสองวิธีนั้นได้ทำการแก้ปัญหาด้วยวิธียกกำลังสองน้อย

ที่สุดประกอบกับเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชั่น ซึ่งผลการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันนัก สำหรับแรงที่เคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน โดยวิธีแรก (exact solution) นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในตำแหน่งที่เยื้องจากกึ่งกลางสะพาน เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะแปรปรวนไวมากต่อตำแหน่งของจุดวัดสัญญาณ แต่ทั้งนี้ยังขึ้นกับจำนวนและรูปแบบตำแหน่งของการติดตั้งจุดวัดสัญญาณความเครียดที่ท้องสะพานอีกด้วย ส่วนจำนวนโหมดการสั่นไหวของสะพานนั้นมีผลน้อยต่อการหาแรง แต่การใช้จำนวนโหมดที่มากย่อมให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้จำนวนโหมดที่น้อย และยังพบว่าการหาแรงในลักษณะแบบเป็นเพลานั้นให้ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าการหาแรงในลักษณะแยกล้อซึ่งกันและกัน ซึ่งผลการทดสอบโดยรวมแล้วยังพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูง และการอ้างอิงผลที่ได้ด้วยการใช้ตัวคูณปฏิสัมพันธ์ (Correlation factor) นั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

Phonkrit Phanapavudhikun (2003) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบนสะพาน เพื่อหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งได้พิจารณาผลของการบิดโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการหาน้ำหนักเนื่องจากความเร็วและความขรุขระ พบว่าผลของการหาน้ำหนักรถมีความคลาดเคลื่อนอยู่ขึ้นกับการเลือกใช้เรกูลาร์ไรเซชั่นพารามิเตอร์ (λ) และค่าน้ำหนักที่ทายได้มาจากการเฉลี่ยแรงในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งบนสะพานทั้งสองเพลา ซึ่งเป็นการจำกัดการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้แม่นยำของแรงในเพลาได้สูงพอ และเนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางซึ่งจะทำให้มีจำนวนระดับขั้นความเสรีมาก ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถนานมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

Thawat Akarawittayapoom (2003) ได้นำเทคนิคการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง โดยตัดผลของการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยโมเมนต์ดัดของหน้าตัด และทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration Technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิคโปรแกรมมิงอีกครั้ง เพื่อให้ค่าน้ำหนักรถลู่เข้าหาค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรกของไดนามิคโปรแกรมมิง ผลที่ได้พบว่าน้ำหนักบรรทุกที่ทายได้มีความถูกต้องและแม่นยำสูงมาก มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คืออยู่ในช่วง $\pm$ 5% และได้ทำการยืนยันข้อมูลด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน แต่ยังขาดการทดลองเพื่อพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยสำคัญหลายปัจจัย เช่น ผลของตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร ผลของความขรุขระ จำนวนเพลาที่มากขึ้น และผลของสภาพจุดรองรับของสะพาน เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน โดยพิจารณาถึงปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำนายน้ำหนักของรถบรรทุก อันได้แก่ ผลของความขรุขระ การบิดในสะพานเนื่องจากตำแหน่งตามแนวขวางของการวิ่งในช่องจราจรช่องซ้ายหรือขวา ผลของจำนวนเพลาที่เพิ่มขึ้นจากเพลาหลังที่เป็นเพลาเดี่ยวเป็นเพลาคู่ และผลของสภาพของจุดรองรับ (support condition) หรือรูปแบบสะพานแบบหลายช่วง รวมทั้งจะทำการศึกษาถึงแรงในล้อรถขณะเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาน้ำหนักทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรถขณะเคลื่อนที่

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของผลตอบสนองของสะพานภายใต้การเคลื่อนที่ของรถ ด้วยการทดสอบแบบจำลองย่อส่วน
2. เพื่อทำการศึกษาถึงแรงพลศาสตร์ในเพลารถขณะเคลื่อนที่ (Dynamic axle force) บนสะพาน และความสัมพันธ์กับน้ำหนักทางสถิตของเพลา (Static axle force)
3. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพและความถูกต้องของวิธีการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยวิธี regularization ร่วมกับเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration technique) ในโดเมนของเวลา ภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. โครงสร้างสะพานจำลองทำด้วยแผ่นเหล็กที่มีความกว้างและความหนาคงที่ โดยควบคุมให้หน่วยแรงดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า 20% ของหน่วยแรงที่จุดคราก
2. การทดสอบจะพิจารณาผลของการวิ่งเข้าและออกของรถที่จุดรองรับ ด้วยสภาพเงื่อนไขบริเวณจุดรองรับ (boundary condition) ที่แตกต่างกัน
3. การทดสอบจะพิจารณาถึงผลของความขรุขระของสะพาน รวมทั้งผลของการบิดของตัวสะพานจากตำแหน่งการวิ่งทางขวางในช่องจราจร
4. ศึกษาผลของจำนวนเพลาที่เพิ่มขึ้นของรถบรรทุก โดยทำการเปลี่ยนเพลาหลังที่มีอยู่เดิมจากแบบเพลาเดี่ยวเป็นแบบเพลาคู่

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (Static gross weight) และน้ำหนักเพลาทางสถิต (Static axle weight) ของรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน
2. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของผลตอบสนองของสะพานจากแรงในเพลาของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่
3. ทำให้ทราบถึงระดับความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถบรรทุกจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
4. ทำให้ทราบว่าหลักการหาน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ มีความคลาดเคลื่อนและมีความเป็นไปได้เพียงพอที่จะนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่
5. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริง

1.6 การดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและตรวจสอบข้อมูลของการวิจัยที่ผ่านมา
2. ตรวจสอบแรงพลศาสตร์ในเพลารถที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (strain gauge) บริเวณเพลารถ
3. ทำการทดสอบผลของการบิดของสะพาน เนื่องจากตำแหน่งการวิ่งตามแนวขวางในช่องจราจร

4. ทำการทดสอบผลของความขรุขระของผิวทางจากแบบจำลองสะพานย่อส่วน
5. ทำการปรับแก้โปรแกรมการหาน้ำหนักให้สอดคล้องกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ผลของสภาพเงื่อนไขบริเวณจุดรองรับ ผลของจำนวนเพลารถที่เพิ่มขึ้นจากเพลาหลังที่เป็นแบบเพลาเดี่ยวเปลี่ยนเป็นแบบเพลาคู่ และผลของจำนวนรถที่เพิ่มขึ้นเป็นสองคัน
6. สร้างแบบจำลองย่อส่วนใหม่สำหรับใช้ในการทดลอง โดยการปรับสภาพเงื่อนไขที่จุดรองรับของสะพานจำลอง และเปลี่ยนเพลาหลังของรถจากเพลาเดี่ยวเป็นเพลาคู่
7. ทำการทดสอบผลการทายน้ำหนักเมื่อจำนวนเพลาที่เพิ่มขึ้นของรถบรรทุก โดยทำการแบ่งเพลาหลังจากเพลาเดี่ยวเป็นแบบเพลาคู่