บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

น้ำหนักรถบรรทุกและการกระจายน้ำหนักเป็นข้อมูลที่สำคัญ ที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) ข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตลอดจนการบำรุงรักษาถนนและสะพาน รวมทั้งการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับน้ำหนักรถบรรทุก น้ำหนักรถบรรทุกที่มีความถูกต้องนั้นมีความสำคัญต่อการวางแผนทางด้านเศรษฐศาสตร์และการดำเนินการทางด้านสำรวจ 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) และการวางแผนบำรุงรักษาถนนและ

สะพาน 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 โดยการนับจำนวนรอบของวิธี 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 มาใช้ในการทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของรถขณะเคลื่อนที่โดยทำการจำลองในคอมพิวเตอร์แล้วทำการแยกผลทางพลศาสตร์ออกเพื่อหาน้ำหนักทางสถิต ด้วยการใช้ Equivalent Dynamic Filter Technique (EDFT) แยกแรงออกเป็น Dynamics และ Pseudo static response โดยใช้ Fast Fourier Transform เทียบผลจากการแอ่นตัวเป็นสัดส่วน เรียกว่า 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) และเทคนิค 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) โดยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดและเครื่องตรวจวัดความเร่งที่คาน (girder)ของสะพานตลอดจนเครื่องตรวจนับจำนวนเพลา (axle sensors) ที่ผิวของทางของสะพาน รถบรรทุก 2 เพลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (fourier transform) พบว่าเวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักใช้เวลานานมากถึง 30 นาทีเมื่อใช้ 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 ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่า สภาวะที่บกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น Law S.S. และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการ Regularization เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ λ ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นานและสิ้นเปลือง

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%) แต่เวลาที่ใช้ในการหาน้ำหนักจะต้องใช้เวลานานมากเพราะต้องมีการหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสมในการคำนวณแต่ละครั้งอีกทั้งค่าพารามิเตอร์ λ มีผลต่อการทายน้ำหนักค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานและการหาน้ำหนักด้วยการใช้ความเร่งให้ผลที่ดีกว่าการใช้ความเครียด และพบว่าการเยื้องศูนย์มีผลให้ความคลาดเคลื่อนในการหาน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

Law S.S. และ Fang Y.L. (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่จากแบบจำลองย่อส่วน โดยการใช้เทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบ

ของเสตทเสปซ (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์สีฟฟอร์มูลา (recursive formular) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซ็นเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน ซึ่งการคำนวณด้วยการใช้รีเคอร์ซีฟฟอร์มนี้ใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ และความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับ regularization พารามิเตอร์เช่นกันและไม่สามารถละทิ้งพารามิเตอร์นี้ได้ ซึ่งการใช้ค่า regularization พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก

คณะกรรมาธิการยุโรป (2001) ได้ทำการพัฒนาระบบ WIM ด้วยการใช้สะพานเป็นหลักเรียกว่า Bridge WIM หรือ B-WIM โดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งในการ optimization จะคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบพร้อม ๆ กันเพื่อให้ได้ทั้งความเร็ว จำนวนเพลา ระยะห่างเพลา และน้ำหนักรวม และทำการพัฒนาการวิเคราะห์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็น 2 มิติ เพื่อคำนึงผลของตำแหน่งที่เยื้องศูนย์ตามแนวขวาง และตรวจสอบโดยทำการทดลองในสนามจริง โดยใช้สะพานที่มีลักษณะแบบ orthotopic deck และยังคำนึงถึงพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อมเช่น ผลของอุณหภูมิจากฤดูกาล และความชันตามแนวขวางของผิวทาง และยังทดสอบกับสะพานที่เป็นสะพานช่วงเดียวหรือหลายช่วง เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ซึ่งระบบการหาน้ำหนักในงายวิจัยนี้มีผลคลาดเคลื่อนจากความเร็วและระยะห่างเพลาจากการทำนายพร้อมกัน พบว่าการวิเคราะห์แบบ 2 มิติสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำได้จากเดิมที่วิเคราะห์แบบมิติเดียว แต่ผลการหาแรงทางพลศาสตร์ยังไม่ดีพอเนื่องจากยังมีความแปรปรวนของข้อมูลที่สูง สำหรับผลการหาน้ำหนักรวมทางสถิติให้ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง +/- 10 %

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2002) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีโดเมนของเวลา (time domain method) ด้วยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองแบบคานต่อเนื่อง โดยการใช้ความเครียดและความเร่งที่วัดได้ขณะเคลื่อนที่ของรถและ รวมทั้งใช้วิธีการ Regularization ในการคำนวณเพื่อเพิ่มขอบเขตในการแก้ปัญหาและลดเวลาในการคำนวณ จากผลการทดลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข สามารถหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก (noise) ได้ และพบว่าการใช้ความเร่งเป็นพารามิเตอร์ในการหาน้ำหนักแทนการใช้ความเครียด จะต้องใช้จำนวนโหมดที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ และวิธีการนี้ยังสามารถนำไปใช้ได้ทั้งวิธีการหาน้ำหนักแบบวิธีโดเมนของเวลาและวิธีโดเมนของความถี่และเวลา โดยการแก้ปัญหาใช้วิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชัน (Singular Value Decomposition; SVD) และให้ความคลาดเคลื่อนที่มากน้อยตามระดับของสัญญาณรบกวน โดยให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 4% แต่ใช้เวลาในการคำนวณที่นานเนื่องจากขนาดของเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่มาก และยังใช้เวลานานมากในการหาพารามิเตอร์ 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 Decomposition; SVD) รวมทั้งศึกษาผล

ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ความถี่ที่เลือกใช้ จำนวนโหมดทางพลศาสตร์ ความเร็วของรถขณะเคลื่อนที่ จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ในการวัด ผลการทายน้ำหนักที่ได้พบว่าการใช้เทคนิคซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชันสามารถเพิ่มความถูกต้องแม่นยำทั้งในวิธี TDM และ FTDM โดยเฉพาะในกรณีวิธี FTDM สามารถขจัดปัญหาสภาวะบกพร่อง (ill-condition) ได้ดีกว่าการใช้เทคนิคซูโดอินเวอร์สเมตริกซ์ และความคลาดเคลื่อนที่ได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบาย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ถือว่าดีคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 5-10% แต่ค่าพารามิเตอร์ λ มีผลในการหาน้ำหนักค่อนข้างมากในแต่ละกรณีกล่าวคือต้องหาค่า λ ค่าที่เหมาะสมที่สุดตลอดการคำนวณนั้นๆจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

Zhu X.Q. และ Law S.S. (2003) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการทายน้ำหนักรถ 2 วิธี คือ วิธีแรกจะหาน้ำหนักรถโดยตรงจากลักษณะของสะพานส่วนวิธีที่สองจะทำการหาน้ำหนักรถโดยใช้หลักการของทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์ ซึ่งจะทาการเปรียบเทียบผ่านแบบจำลองซึ่งจำลองลักษณะสะพานและรถบรรทุก ซึ่งศึกษาถึงค่าตัวแปรหลายตัวแปร เช่น จำนวนโหมดของการสั่นไหวที่นำมาใช้ จำนวนจุดข้อมูลที่ติดตั้งเครื่องมือวัด ตลอดจนผลของการเยื้องศูนย์ของแนวการวิ่งของรถ เป็นต้น พบว่าวิธีแรกค่าความแม่นยำของระบบจะขึ้นกับตำแหน่งการวิ่งของรถ ส่วนวิธีที่สองค่าความแม่นยำจะขึ้นกับปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

Law S.S., Bu J.Q., Zhu X.Q. และ Chan S.L.(2004) ทำการหาน้ำหนักรถโดยใช้หลักการของทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และทำการลดองศาอิสระระหว่างแบบจำลองรถทดสอบกับแบบจำลองสะพานด้วยวิธีคอนเดนเซชั่น (condensation technique) ซึ่งพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาสูงมากประมาณ + / - 15% จากนั้นทำการทดสอบหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่ด้วยแบบจำลองย่อส่วนโดยการใช้ผลตอบสนองของสะพานด้วยค่าความเครียดพบว่าจำนวนองศาอิสระระหว่างแบบจำลองรถทดสอบกับแบบจำลองสะพานที่ได้จากวิธีคอนเดนเซชั่น (condensation technique)จะต้องมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนของจุดวัดผลตอบสนองของสะพาน จึงจะได้ค่าความเครียดที่สอดคล้องกับแบบจำลองย่อส่วนแต่ไม่ได้กล่าวถึงค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรถทดสอบแต่อย่างใด

Polakrit Phanapavudhikun (2003) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบนสะพาน เพื่อหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งได้พิจารณาผลของการบิดโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการหาน้ำหนักเนื่องจากความเร็วและความขรุขระ พบว่าผลของการหาน้ำหนักรถมีความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ Regularization parameter (λ) และค่าน้ำหนักที่ทายได้มาจากการเฉลี่ยแรงในช่วงกลางของเวลาที่รถวิ่งบนสะพานทั้งสองเพลา ซึ่งเป็นการจำกัดการนำไปใช้งานและไม่สามารถให้ความแม่นยำของแรงในเพลาได้สูงพอ และเนื่องจากมีการใช้ทฤษฎีไฟไนต์เอเลเมนต์โดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางซึ่งจะทำให้มีจำนวนองศาอิสระมาก ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณหาน้ำหนักรถนานมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

Tawat Akarawittayapoom (2003) ได้นำเสนอเทคนิคการหาน้ำหนักรถขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง โดยตัดผลของการบิดของสะพานในการหาน้ำหนักด้วยโมเมนต์ดัดของหน้าตัดและทำการปรับปรุงให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ (iteration technique) โดยการนำเอาค่าความเครียดเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ที่ได้ มาทำการคำนวณในไดนามิคโปรแกรมมิงอีกครั้งเพื่อให้ค่าน้ำหนักรถลู่เข้าหาค่าที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าการคำนวณครั้งแรกของไดนามิคโปรแกรมมิง ผลที่ได้พบว่าน้ำหนักบรรทุกที่ทายได้มีความถูกต้องและแม่นยำสูง มีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมากคืออยู่ในช่วง +/- 5% ตลอดจนใช้เวลาในการทายน้ำหนักน้อยกว่าวิธีซิงกูลาร์แวลูคอมโพซิชันหลายเท่าและได้ทำการยืนยันข้อมูลด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน

Pattarapong Asnachinda (2004) ได้ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่บนสะพานด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วนสะพานและรถเป็นหลัก โดยใช้การคำนวณหาน้ำหนักด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง เพราะพบว่ามีความรวดเร็วกว่าวิธีซิงกูลาร์แวลูดีคอมโพซิชั่น ร่วมกับเทคนิคการคำนวณซ้ำเพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่คำนวณได้ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ มวลและความเร็วของรถบรรทุก, ระดับความขรุขระของพื้นผิวสะพาน, ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถตามแนวขวางของสะพาน, ประเภทฐานรองรับของสะพาน และผลของจำนวนเพลาของรถบรรทุก พบว่าการนำค่าความเครียดในหน้าตัดสะพานเดียวกันมาทำการเฉลี่ยและนำไปทายน้ำหนักจะสามารถลดผลของการบิดตัวของสะพานซึ่งเกิดจากตำแหน่งของรถตามแนวขวางได้ดี และรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำจะให้ผลการทายน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่ดีกว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามระดับของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน รูปแบบของฐานรองรับของสะพานนั้นมีผลต่อการทายน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ โดยสะพานแบบช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะให้ผลการทายน้ำหนักที่ดีกว่าสะพานแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้พบว่ากรณีรถบรรทุกแบบ 2 เพลาเคลื่อนที่บนสะพานช่วงเดียวที่พื้นผิวไม่มีความขรุขระนั้นให้ผลการทายน้ำหนักรวมที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง + / - 5% แต่ยังขาดการทดสอบในภาคสนามเพื่อสนับสนุนกระบวนการดังกล่าวว่าสามารถใช้กับสะพานจริงได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาการนำเทคนิคไดนามิคโปรแกรมมิงและเทคนิคการคำนวณซ้ำ (iteration technique) ไปใช้ในการหาน้ำหนักของรถที่สะพานจริง ตลอดจนเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนักด้วยการทดสอบบนโครงสร้างจริง

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องของวิธีการหาน้ำหนักรถโดยวิธีการคำนวณซ้ำเมื่อทำการทดสอบภาคสนาม

1.3.2 เพื่อพัฒนาปรับปรุงวิธีการหาน้ำหนักรถให้ถูกต้องเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากขึ้น

1.3.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานเพื่อใช้สำหรับติดตั้งใต้สะพานในการทดสอบภาคสนาม

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะสะพานช่วงเดียว

1.4.2 พิจารณาโครงสร้างสะพานที่มีพฤติกรรมภายในน้ำหนักบรรทุกที่เป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)

1.4.3 พิจารณาเฉพาะรถบรรทุก 10 ล้อ จำนวน 1 คัน วิ่งข้ามสะพาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ของรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน

1.5.2 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวิธีการหาน้ำหนักรถโดยวิธีการคำนวณซ้ำเมื่อทำการทดสอบภาคสนาม

1.5.3 ทำให้ไม่ต้องมีการหยุดรถเพื่อขึ้นชั่งน้ำหนักซึ่งเป็นการประหยัดเวลาของผู้ขับขี่

1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบและกำหนดมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกจร (live load)

1.5.5 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาการออกกฎหมายควบคุมรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกิน

1.5.6 ช่วยลดปัญหาการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

1.6 การดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาและตรวจสอบข้อมูลของการวิจัยที่ผ่านมา

1.6.2 ศึกษาและทำความเข้าใจวิธีการหาน้ำหนักด้วยการคำนวนซ้ำ

1.6.3 ศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์วัดความเครียดในสะพานซึ่งใช้สำหรับติดตั้งใต้สะพานในการทดสอบภาคสนามด้วยการทดสอบ

1.6.4 ทำการทดสอบเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ

1.6.5 ทำการเตรียมการทดสอบ

1.6.6 ทำการทดสอบภาคสนาม

1.6.7 วิเคราะห์ผลข้อมูล อภิปรายผล เสนอวิธีการปรับปรุง

1.6.8 จัดทำวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย