

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นจากการเปิดเผยของสำนักสิ่งแวดล้อม สังกัดกรุงเทพมหานครถึงข้อมูลจำนวนประชากรในกรุงเทพฯ มีไม่ต่ำกว่า 10 ล้านคน แบ่งเป็นประชากรที่จดทะเบียนเป็น คนกรุงเทพฯ อย่างเป็นทางการจำนวน 5.7 ล้านคน ที่เหลือเป็น ตัวเลขประชากรแฝง ทำให้เกิดปัญหาในการอาศัยอยู่ร่วมกันอย่างแออัด การเดินทางสัญจรของคนอาศัยอยู่ในเมืองหลวงซึ่งเป็นเมืองที่ใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของชาติถือเป็นปัญหาที่แก้ไขมาเป็นระยะเวลายาวนานและเป็นปัญหาสำคัญอันดับหนึ่งจากผลการสำรวจความคิดเห็นประชากรเกี่ยวกับความต้องการแก้ปัญหาของกรุงเทพมหานคร ซึ่งจากสถิติที่มีอยู่คือมีการเดินทางวันละ 17 ล้านเที่ยว แบ่งเป็นเดินทางโดยรถส่วนบุคคล 50% เดินทางโดยขนส่งสาธารณะ 50% (รถโดยสารประจำทาง 35% เรือโดยสาร 6% รถไฟฟ้าคนเมือง 5.5% รถไฟลอยฟ้า หรือ BTS 2.5% รถไฟฟ้าใต้ดิน หรือ MRT 1%) จากตัวเลขดังกล่าวพบว่าการจราจรทางบกถือเป็นการเดินทางหลัก ซึ่งเมื่อรวมตัวเลขการเดินทางโดยรถส่วนบุคคลและเดินทางโดยขนส่งสาธารณะเฉพาะในส่วนของการโดยสารประจำทางจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีตัวเลขถึง 85% ซึ่งยังไม่รวมถึงรถโดยสารรับจ้างสาธารณะต่างๆ ถึงแม้ว่าโครงข่ายถนนจะมีอยู่กว่า 1,000 สาย แต่ก็ยังคงไม่เพียงพอกับการให้บริการ

สะพานข้ามทางแยกบริเวณทางแยกต่างๆทั่วกรุงเทพมหานคร จึงถูกก่อสร้างขึ้นเพื่อลดปริมาณความหนาแน่นของการจราจรโดยเฉพาะบริเวณทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร โครงสร้างสะพานซึ่งเป็นโครงสร้างเหล็กซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างหลักที่อยู่เหนือพื้นดิน (Super structure) ได้แก่ เสาเหล็กกลมแบบเชื่อมประกอบ (Pier) คานเหล็กประกอบทางขวาง (Cross beam) คานเหล็กประกอบแบบ I-Girder พื้นสะพานคอนกรีตแบบสำเร็จรูป โดยคานเหล็กประกอบจะทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากพื้นสะพานลงสู่ปลายทั้งสองข้างของคานขวางในแต่ละด้านที่มีทิศทางการจราจรสวนทางกัน ทั้งนี้การก่อสร้างสะพานข้ามทางแยกมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อระบายการจราจรบนท้องถนนบริเวณทางแยก ดังนั้นเพื่อให้การจราจรเกิดการติดขัดขณะทำการก่อสร้างหรือมีผลกระทบกับการเดินทางสัญจร จึงต้องมีการก่อสร้างที่รวดเร็วจึงเป็นที่มาของการใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างสะพาน เพราะโครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าวัสดุชนิดอื่นเช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ แม้แต่โครงสร้างคอนกรีตอัดแรง แต่ทั้งนี้ข้อเสียของการใช้โครงสร้างเหล็กที่พบทั่วไปคือการแอ่นตัวและการสั่นไหวที่สูงกว่าโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นในการใช้งานสะพานเหล็กจึงอาจพบปัญหาเกี่ยวข้องกับการแอ่นตัวและการสั่นไหวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสะพานมีช่องทางเดินเท้า ก็มักก่อให้เกิดความรู้สึกรำคาญแก่ผู้สัญจรบนทางเดิน สำหรับสะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ไม่มีช่องทางเดินนั้น แม้สะพานจะสั่นไหวคนโดยสารในยานพาหนะก็รับรู้ได้ยาก เพราะยานพาหนะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามในบางกรณีพบว่าความหนาแน่นของการจราจรในสองทิศทางของสะพานข้ามทางแยกแตกต่างกันมาก เมื่อมีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่มีการจราจรคล่องตัวจะเกิดการสั่นไหวส่งผ่านไปยังฝั่งตรงข้ามที่มียานพาหนะจอดติดอยู่บนสะพาน ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายในห้องโดยสารจนรู้สึกได้อย่างรุนแรง

ปัญหาดังกล่าวเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมและผลกระทบของการสั่นไหวของสะพานต่อยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพาน โดยทำการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะที่จอดนิ่งบนคานซึ่งฐานรองรับทั้งสองด้านมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งอาศัยข้อมูลการเคลื่อนที่ของสะพานที่ได้จากการทดสอบจริงในภาคสนามของสะพาน เหล็กข้ามทางแยกแห่งหนึ่งภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านสะพานของรถบรรทุกด้วยความเร็ว 5, 30 และ 60 กม./ชม. ทำให้สามารถจำลองการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านให้กับยานพาหนะที่จอดนิ่งบนสะพานในลักษณะต่างๆได้ การศึกษานี้พิจารณาผลของจำนวนและตำแหน่งของยานพาหนะบนสะพาน รวมถึงคุณสมบัติด้านน้ำหนักและช่วงล่างของยานพาหนะ นอกจากนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพที่แท้จริงในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยกจึงได้มีการตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะบนสะพานอย่างต่อเนื่องระหว่างวันที่มีการให้บริการของสะพาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดียวกันกับที่กล่าวมาในข้างต้นพร้อมทั้งประเมินถึงผลกระทบต่อความรู้สึกจนทำให้เกิดความไม่สะดวกสบายจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของการจราจรตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ISO 2631-1 โดยจะพิจารณาเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการจราจรในแต่ละทิศทางมีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมากซึ่งทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นจนเป็นที่มาของงานวิจัยฉบับนี้

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกในแง่ความสะดวกสบายที่มีต่อการสั่นสะเทือน ตามมาตรฐานสากล (ISO 2631-1)

ISO 2631-1:1997 [6] เป็นมาตรฐานสากลที่สร้างขึ้นเพื่อกำหนดแนวทางในการประเมินถึงการสั่นสะเทือนที่มนุษย์สามารถรับรู้หรือรู้สึกได้ โดยใช้วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการประเมินถึงความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวผ่านความเร่งที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการประเมินความเร่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนโดยแหล่งกำเนิดจะถูกนำมาประเมินควบคู่ไปกับปัจจัยที่มีผลต่อความรู้สึกซึ่งได้แก่ ทิศทางของการสั่น ตำแหน่ง(ส่วนต่างๆของร่างกาย)ของการสั่นสะเทือน ลักษณะของสัญญาณความเร่งที่นำมาประเมิน ช่วงเวลาของการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือน เป็นต้น ทั้งนี้ทิศทางที่แตกต่างจากการสั่นสะเทือนบนร่างกายของมนุษย์ที่สัมผัสกับแหล่งกำเนิดการสั่นให้ผลทางความรู้สึกไม่เหมือนกันเช่น การสั่นไหวที่แผ่นหลัง กับการสั่นไหวที่บริเวณที่นั่งจะมีค่าที่แตกต่างกันทางความรู้สึก ดังนั้นในมาตรฐานจึงกำหนดพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติ ที่เรียกว่าค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละแนวแกน (Frequency weighting) ขึ้นเพื่อใช้ปรับรอกค่าการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งต่างๆให้อยู่ในแต่ละทิศทางตามแนวแกนนั้นๆ และสามารถประเมินความรู้สึกที่มนุษย์รับรู้ได้ในแต่ละแนวแกนที่พิจารณา

M. J. GRIFFIN (2007) [7] ได้ทำการทบทวนการคำนวณผลตอบสนองทางความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน BS 6841: 1987 ซึ่งพบว่าแท้จริงแล้วมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 มีพื้นฐานการร่างมาจากมาตรฐาน BS 6841: 1987 โดยมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 มีความซับซ้อนสำหรับผู้ใช้นามากกว่า แต่หากพิจารณาเพียงแค่ความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นไหวแล้วพบว่ามาตรฐานทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของมาตรฐานต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน ในเรื่องของการสร้างสมมติฐานขึ้นเหมือนกันคือ ขนาดของการสั่นที่ใช้ในแต่ละมาตรฐานถูกสมมติขึ้นว่ามีขนาดที่คงที่ตลอดซึ่งในความเป็นจริงอาจจะไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

Bonin G. และคณะ (2007) [8] ได้ทำการศึกษาผลการวิจัยถึงความรู้สึกสั่นไหวที่มนุษย์สามารถรู้สึกได้ และเกิดผลตอบสนองทางร่างกายภายในรถยนต์โดยสารที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นไหวตามส่วนต่างๆ โดยในการทดลองได้ใช้มาตรฐาน ISO 2631-1:1997 ซึ่งในการทดลองจะให้รถยนต์โดยสารดังกล่าวเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ที่ระดับต่างๆ ภายใต้พื้นผิวจราจรในสภาพจริงที่มีความขรุขระของพื้นผิวถนน เพื่อสังเกตถึงการสั่นไหวผ่านข้อมูลที่ตรวจจับโดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในห้องโดยสารของรถโดยสารที่ใช้ในการทดสอบ และนำค่าที่ได้มาทำการป้อนเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองให้รถยนต์โดยสารเป็นแบบจำลองเต็มรูปที่มี 8 องศาอิสระ ผลการประเมินความเร่งจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระและมีความเสียหายของผิวถนนโดยใช้มาตรฐาน ISO 2631 พบว่าความเร่งที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้เกิดความรู้สึกที่ไม่สะดวกสบายกับผู้ที่อยู่ภายในห้องโดยสารของรถยนต์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายประกอบด้วยความขรุขระ ความเสียหายของพื้นผิวถนน รวมทั้งความเร็วในการขับเคลื่อนของรถยนต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ทำให้เกิดปฏิกริยาร่วมกันทางพลศาสตร์ระหว่างรถยนต์และพื้นผิวสัมผัส โดยอิทธิพลจากความเสียหายของพื้นผิวจราจรที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้คุณภาพในการขับเคลื่อนลดลง ในขณะที่ความขรุขระของพื้นผิวจราจรเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดแรงกระทำทางพลศาสตร์ที่เพิ่มมากขึ้นระหว่างที่รถยนต์เคลื่อนที่และเหนี่ยวนำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นกับโครงสร้างรถยนต์และผู้โดยสารจนนำไปสู่ความรู้สึกไม่สะดวกสบาย

1.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่วิ่งผ่าน

Hassan Moghimi, Hamid R. Ronagh (2008) [9] ได้ทำการศึกษาถึงการสั่นไหวของสะพานที่มีผลกระทบต่อความรู้สึกได้ของคนที่อยู่บนสะพาน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Bonin G. และคณะ (2007) แต่มีความแตกต่างกันในส่วนของแหล่งกำเนิดการสั่นไหว โดยงานวิจัยนี้กล่าวถึงกรณีที่มีการสั่นไหวเกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสาร เมื่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์โดยสารทำให้สะพานมีการสั่นไหวส่งผลให้รถยนต์โดยสารเกิดการสั่นไหวตามกันไป โดยอ้างอิงถึงความถี่ในการสั่นไหวที่คนจะรู้สึกได้จากมาตรฐาน ISO ที่ระบุว่าความถี่ในช่วง 4 ถึง 8 Hz. เป็นความถี่ช่วงที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ถึงความรู้สึกสั่นไหวในแนวดิ่ง แบบจำลองทางพลศาสตร์ภายใต้แรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในการวิจัยนี้เป็นแบบจำลองสะพานแบบคอมโพสิตกล่าวคือ มีคานหลักเป็นโครงสร้างเหล็กและพื้นสะพานเป็นคอนกรีต ความยาวช่วง 60.5 ม. ความ

กว้าง 13.5 ม. และใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิจัยระบุว่าความเร็วของพาหนะที่เคลื่อนที่บนสะพานเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดกับผลตอบสนองของสะพาน เช่น ความเร็วของพาหนะเพิ่มขึ้นความเร่งทางพลศาสตร์ของสะพานก็เพิ่มขึ้นตามกัน ส่วนความถี่ของการสั่นมีผลกระทบน้อยมาก สำหรับในส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่มีน้ำหนักรวมสูงกว่า 10 % ของน้ำหนักสะพานควรจะมีการจำกัดความเร็วในการวิ่งผ่านสะพานอย่างเคร่งครัดเนื่องจากจะเป็นการกระตุ้นที่ตัวสะพานมากเกินไป ในงานวิจัยนี้ยังให้ความเห็นเกี่ยวกับช่องทางเดินข้างทาง (Sidewalk) ที่ปรากฏการสั่นไหวขึ้นในช่องทางเดินดังกล่าวเป็นอิทธิพลมาจากการเอียงศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะขณะวิ่งผ่านเป็นสาเหตุหลัก ทำให้สะพานเกิดการบิดตัวและส่งผลกระทบต่อผู้คนที่เดินอยู่บนไหล่ทางดังกล่าวรู้สึกถึงการสั่นไหวไปด้วย นอกจากนี้ยังให้คำแนะนำสำหรับการแอ่นตัวสูงสุดของสะพานที่ไม่เกินกว่า 6 มม.ต่อน้ำหนักกระทำแบบสถิต 100 กิโลนิวตัน ที่ตำแหน่งใดapunสะพานจะมีผลตอบสนองของสะพานที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ไม่คำนึงถึงผลของความขรุขระของพื้นผิวสะพาน

1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน

Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) [10] ได้ศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้แรงกระทำที่เคลื่อนที่ได้แบบจุดหลายแรงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่กลางช่วงคาน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการสั่นไหวของคานให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการของลากรางจ์ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง และใช้หลักการแปลงของลาปลาซในการหาผลตอบสนองทางพลศาสตร์ทั้งในส่วนของคานและมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ อัตราส่วนของมวล อัตราส่วนความหน่วง อัตราส่วนการปรับค่า ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สำหรับคานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ใหม่พื้นฐานเป็นโหมดที่มีอิทธิพลมากที่สุด ดังนั้นการพิจารณาเพียงโหมดที่หนึ่งจึงเพียงพอกับการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังค้นพบว่าการใช้มวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพในการลดการสั่นที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายชนิดเคลื่อนที่ได้ (distributed moving force) สำหรับกรณีของแบบจำลองของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ในงานวิจัยนี้ถูกพบว่า อัตราส่วนการกระจัดสูงสุด (The maximum displacement ratio) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างผลตอบสนองเชิงการกระจัดสูงสุดทางพลศาสตร์ที่บริเวณกลางช่วงของคาน (Maximum dynamic response) ต่อการกระจัดสูงสุดทางสถิต (Maximum static displacement) ที่บริเวณกลางช่วงของคานในกรณีที่อยู่ภายใต้แรงกระทำแบบจุด (Single point load) มีค่าต่ำกว่าสอง ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่น้ำหนักกระทำเคลื่อนที่แบบจุด ทั้งนี้ในกรณีแบบจำลองของคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบกระจายที่เคลื่อนที่ได้ไม่พบการสั่นพ้องจึงทำให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าสำหรับกรณีนี้มีข้อจำกัดอยู่ในวงแคบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถระบุประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าได้เฉพาะในกรณีนี้

Kwon, H.-C./Kim, M.-C./Lee, I.-W. (1998) [11] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของสะพานที่มีช่วงความยาว 3 ช่วงและติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบชุดเดียวที่บริเวณกลางช่วงของสะพานเช่นเดียวกันกับแบบจำลองของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) แต่อยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ที่ต่างกัน โดยใช้รถไฟความเร็วสูง TGV

เป็นกรณีศึกษา การศึกษาแบบจำลองทั้งของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) ได้ให้ความสนใจกับผลตอบสนองบริเวณกลางช่วงซึ่งมีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณดังกล่าวเหมือนกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การออกแบบมวลหน่วงปรับค่ามีค่าที่แนะนำในการออกแบบคืออัตราส่วนมวลควรมีค่าอยู่ในช่วง 1% ถึง 4% และหากมีการเพิ่มอัตราส่วนมวลจะเป็นการเพิ่มความเฉื่อยให้กับระบบมวลหน่วงปรับค่าซึ่งทำให้สามารถควบคุมการสั่นไหวที่สูงขึ้นได้ แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราส่วนมวลก็เป็นการเพิ่มการแอ่นตัวทางสถิต ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงควบคู่ไปพร้อมกัน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระบบมวลหน่วงปรับค่ามีผลกับการสั่นไหวแบบอิสระมากกว่าการสั่นไหวแบบชั่วคราวที่เกิดจากแรงกระทำ โดยความถี่ธรรมชาติที่หนึ่งของสะพานจะเป็นตัวปรับความถี่ของระบบมวลหน่วงปรับค่าให้เริ่มทำงาน โดยผลการทดลองพบว่ามวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองของสะพานลงได้จากเดิมในระบบที่ไม่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าในแบบจำลองจะเกิด ระยะกระจัดสูงสุดที่กลางช่วง 0.896 มม. แต่เมื่อมีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้าในแบบจำลองแล้วพบว่าระยะกระจัดสูงสุดที่กลางช่วงเหลือเพียง 0.7 มม.คิดเป็นการลดลงร้อยละ 21% อีกทั้งระบบที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ายังทำให้สภาวะที่เป็นการสั่นแบบอิสระซึ่งเกิดขึ้นหลังจากสภาวะที่มีการสั่นแบบชั่วคราวให้กลับสู่สภาวะเดิมได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบอีกด้วยว่าหากต้องการให้การควบคุมการสั่นไหวมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นควรจะมีการเพิ่มเงื่อนไขค่าเริ่มต้นให้กับระบบมวลหน่วงปรับค่า

Medina Andrés, Violeta (2006) [15] ได้ใช้แบบจำลองในการศึกษาแบบเดียวกับ Kwon, H.C. / Kim, M.C. / Lee, I.W. (1998) ซึ่งผลการศึกษาเป็นไปตามที่ Kwon, H.C. และคณะได้สรุปไว้แต่ถูกขยายผลการศึกษาโดยการประยุกต์ใช้มวลหน่วงปรับแบบหลายชุด (MTMD) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายชุดจะสามารถควบคุมผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของสะพานและรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอเฉพาะในกรณีที่ทั้งสะพานและรถไฟอยู่ภายใต้อิทธิพลของการสั่นพ้องในช่วงค่าความเร็วของรถไฟที่ใช้ในการออกแบบ(The design train speed) เท่านั้น นอกจากนี้ในงานวิจัยยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจะมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยว (Single TMD) เนื่องจากความถี่ที่ปรับคลาดเคลื่อนจากความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพาน อย่างไรก็ตามสำหรับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบหลายชุด (MTMD) ที่กำหนดให้มวลในแต่ละชุดมีค่าที่เท่าๆกันแม้ว่าจะมีการปรับช่วงความถี่ที่คลาดเคลื่อนจากความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของสะพานอยู่บ้างแต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่ามากนัก อีกทั้งระบบ MTMD ยังมีความน่าเชื่อถือและทนทานในแง่ประสิทธิภาพมากกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเดี่ยว

Xiaomin Shi and C.S. Cai (2008) [12] ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้มวลหน่วงปรับค่ากับสะพานช่วงเดียวที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าระบบเดียว เพื่อลดผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุก ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) แต่มีรูปแบบกรณีศึกษาที่หลากหลายกว่า โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีที่หนึ่งการเคลื่อนที่ไปด้วยกันแต่คนละช่องการจราจร กรณีที่สองรถบรรทุกเคลื่อนที่ตามกันแบบต่อเนื่อง ผลการศึกษาและข้อแนะนำได้แสดงให้เห็นว่า การใช้มวลหน่วงปรับค่าสามารถลดผลตอบสนองของสะพานและ

การสั่นพ้องเนื่องจากความหน่วงที่อยู่ในมวลหน่วงปรับค่าสามารถทำหน้าที่ลดการสั่นไหวในกรณีที่เกิดการสั่นพ้อง แต่ความหน่วงในมวลหน่วงปรับค่ามีความสามารถในการลดผลตอบสนองในส่วนที่เกิดแบบชั่วคราว (Transient response) ได้น้อยกว่าในส่วนที่เกิดจากการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) เพราะในความเป็นจริง ในขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านเกิดแรงกระทำที่สูงและเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นทำให้มวลหน่วงปรับค่าที่ติดตั้งแสดงผลตอบสนองไม่ทันกับแรงกระทำแต่ผลตอบสนองของมวลหน่วงปรับค่าจะเกิดขึ้นในภายหลังซึ่งเป็นสถานะที่โครงสร้างปรับตัวเข้าสู่การสั่นไหวแบบอิสระ ดังนั้นมวลหน่วงปรับค่าจึงมีผลกับสถานะการสั่นไหวแบบอิสระมากกว่า อีกทั้งการสั่นแบบอิสระมีรูปแบบโหมดการสั่นไหวในจำนวนโหมดที่มากกว่าการสั่นที่เกิดจากแรงกระทำชั่วคราวเนื่องจากการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างเกิดขึ้นตามโหมดของความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นๆในแต่ละโหมดรวมกัน ในขณะที่การสั่นไหวที่เกิดจากแรงกระทำชั่วคราวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากอาจเกิดความเด่นชัดจากความถี่ของแรงกระทำมากกว่าความถี่ธรรมชาติในโหมดหลักของโครงสร้าง ดังนั้นมวลหน่วงปรับค่าจึงมีคุณสมบัติในการใช้งานที่ดีต่อการควบคุมการสั่นแบบอิสระ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับคายังขึ้นกับความเหมาะสมของความยาวช่วงสะพาน โดยการใช้มวลหน่วงปรับค่ากับสะพานที่มีความยาวช่วงสั้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสะพานที่มีความยาวช่วงที่ยาวกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากความถี่ธรรมชาติของสะพานช่วงสั้นที่สูงกว่าสะพานช่วงยาวเนื่องจากสะพานสั้นมีค่าความแข็ง (stiffness) สูงกว่า

Fan Yang, Ramin Sedaghati, Ebrahim Esmailzadeh (2009) [13] ได้ศึกษาแบบจำลองของคานช่วงเดียวที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานแบบคาบและแบบสุ่ม ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) และ Kwon, H.-C./Ki, M.-C./Lee, I.-W. (1998) แต่ใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเหมาะสมสูงสุดของการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่สามารถจัดปัญหาการสั่นของโครงสร้างคานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจำนวนแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสิ้น 7 ชุดแบบจำลอง แต่ละแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (4 จุด) ผลการศึกษาพบว่าค่าความเหมาะสมสูงสุดจะให้ค่าผลตอบสนองเชิงกระจัดค่าหนึ่งที่เหมาะสมแต่หากมีการเบี่ยงค่าจากค่าดังกล่าวในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะมีผลอย่างมากในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความถี่ไปทำให้ทราบว่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความไวอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของคาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวผ่านมา ส่วนการเบี่ยงเบนค่าอัตราส่วนความถี่มีอิทธิพลกับค่าผลตอบสนองเชิงกระจัดน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการเบี่ยงเบนไปของอัตราส่วนความถี่ โดยการเบี่ยงเบนค่าอัตราส่วนความถี่จากค่าที่เหมาะสมสูงสุดที่คำนวณได้ในทิศทางที่น้อยลงจะให้ผลตอบสนองเชิงกระจัดที่น้อยกว่าการเบี่ยงเบนในทิศทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่าค่าเบี่ยงเบนของอัตราส่วนความถี่ในทิศทางลดลงจะให้ผลที่ดีกว่า

Farhad S. Samani, และ Francesco Pellicano (2009) [14] ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของคานช่วงเดียวที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าระบบเดียวภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lin, C.H. Cho (1993) แต่งานวิจัยมุ่งเน้นถึงความแตกต่างระหว่างมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้คานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาภายใต้น้ำหนัก

บรรทุกเคลื่อนที่เป็นแบบจำลองทางโครงสร้างที่ใช้ศึกษาควบคู่กับพฤติกรรมมวลหน่วงปรับค่า และเพื่อเป็นการควบคุมการแอ่นตัวทางสถิต (Static deflection) ระบบมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีมวลน้อยๆ ซึ่งในการวิจัยนี้กำหนดให้มวลมีค่าไม่เกินกว่า 5 % ของมวลรวมทั้งหมดของคาน การวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการหาค่าความเหมาะสมสูงสุด (Optimum response) ของมวลหน่วงปรับค่าที่สามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาได้ให้ความสนใจการสั่นไหวแบบชั่วคราว (Transient vibration) ซึ่งพบว่ามวลหน่วงปรับค่ามีผลกับการลดระดับสูงสุดของลูกคลื่นการสั่น (Amplitude of Vibration) ทางโครงสร้างได้ โดยสาระสำคัญอยู่ที่มวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้น (ชนิดลูกบาศก์ ; Cubic) มีความเหมาะสมกว่ากับการลดระดับสูงสุดของลูกคลื่นการสั่น แต่ในส่วนของมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นจะมีประโยชน์กว่ากับกรณีที่ต้องการสลายพลังงานการสั่นออกจากโครงสร้าง ซึ่งกรณีทั้งสองมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการศึกษายังระบุถึงตำแหน่งที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าทั้งสองแบบ โดยมวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้นจะมีระยะติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.53 ของความยาวช่วงคานจากจุดรองรับทางฝั่งซ้าย ส่วนมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นจะมีระยะติดตั้งที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.55 ของความยาวช่วงคานจากจุดรองรับทางฝั่งซ้าย ซึ่งทั้งสองตำแหน่งล้วนอยู่ใกล้กับตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวทางสถิตสูงสุด (กลางช่วง) ทั้งนี้สำหรับปัญหาเฉพาะของโครงสร้างคานภายใต้น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ยังไม่สามารถระบุได้ถึงข้อได้เปรียบที่แท้จริงของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบไม่เชิงเส้น (ฟังก์ชันการประมาณเป็นแบบลูกบาศก์) ที่เหนือกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเชิงเส้นที่ใช้สืบทอดกันมาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ เนื่องจากผลการศึกษาพบว่าผลการลดการสั่นไหวของทั้งสองระบบใกล้เคียงกันเมื่อใช้กับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ (คานช่วงเดียวมีจุดรองรับแบบธรรมดา)

จากงานวิจัยที่ศึกษาทั้งหมดในข้างต้น พบว่าการศึกษส่วนใหญ่จะศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของสะพานหรือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารอาจจะมีความรุนแรงมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพานจะเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงจนสามารถรับรู้ได้และอาจจะรุนแรงขึ้นจนทำให้เกิดความรู้สึกที่ไม่สะดวกสบายได้เมื่อต้องเผชิญกับการสั่นสะเทือนแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สอดคล้องกับปัญหาการสั่นสะเทือนของยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานที่เกิดการสั่นไหวบริเวณจุดรองรับทั้งสองข้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะ ตลอดจนถึงการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะได้ เพื่อให้สามารถรับทราบถึงปัญหาและนำประโยชน์จากผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขต่อไปในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานโดยการทดสอบในภาคสนาม
- 1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปัญหา
- 1.3.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมจากผลตอบสนองของรถยนต์โดยสารที่จอดนิ่งอยู่บนสะพานเนื่องจากการสั่นไหวของจุดรองรับ

- 1.3.4 เพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่จอดติดอยู่บนสะพานจากการสั่นไหวของจตุรกรรับ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาและทำการวิจัยประกอบไปด้วย

- 1.4.1 การวิเคราะห์จะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานที่มีลักษณะเป็นคานช่วงเดียวในระนาบสองมิติที่มีการกระจายของมวลและความแข็งอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว (Uniform mass and stiffness) โดยที่จตุรกรรับเคลื่อนที่ได้ในแนวดิ่ง
- 1.4.2 พิจารณาโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรม ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)
- 1.4.3 พิจารณาแบบจำลองเฉพาะรถยนต์โดยสารในรูปแบบของระบบองศาอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom)
- 1.4.4 การประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997
- 1.4.5 การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ในงานวิจัยนี้มีได้พิจารณาถึงผลจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าประโยชน์ที่ได้รับดังต่อไปนี้

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานที่ได้จากการทดลองภาคสนาม
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมและผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของรถยนต์โดยสารที่จอดติดอยู่บนสะพาน
- 1.5.3 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาแนวทางการแก้ไขเพื่อเพิ่มความสามารถในการให้บริการของสะพานข้ามทางแยกได้สำหรับสะพานที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน
- 1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์เพื่อออกแบบสะพานโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้บริการสะพานควบคู่กันไปในอนาคต

1.6 การดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตามลำดับดังต่อไปนี้

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและความเป็นไปได้ของหัวข้อวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งการวิจัยที่ผ่านมา
- 1.6.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
- 1.6.3 จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 1.6.4 ทำการทดสอบสะพานจริงในภาคสนาม
- 1.6.5 ศึกษาและเก็บรวบรวมคุณสมบัติของรถยนต์โดยสารจากแหล่งข้อมูลต่างๆ

- 1.6.6 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสัญญาณที่วัดได้กับสะพานทั้งในส่วนของการทดสอบโดยการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกและสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในระหว่างวันที่สะพานมีการเปิดให้บริการ
- 1.6.7 ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพาน
- 1.6.8 ประเมินความรุนแรงและผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถยนต์โดยสารจากแบบจำลอง
- 1.6.9 เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา และสรุปผลการศึกษา
- 1.6.10 จัดทำวิทยานิพนธ์