



การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้า
แอร์พอร์ตเรลลิงค์



ธนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้า
แอร์พอร์ตเรลลิงค์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้ามหานคร
เรลลิงค์"

ของ ธนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสูประดิษฐ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี้: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล
ผู้วิจัย	ชนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	พฤติกรรมการวิ่งของรถไฟ, วิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน, สะพานรถไฟ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แบบจำลองมัลติบอดี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี้ (Multibody Co-Simulation Method) โดยใช้ตัวอย่างสะพานและรถไฟจากโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล ในการสร้างแบบจำลอง นอกจากนี้ในการวิจัยยังได้ทำการทดสอบจริงโดยติดตั้งอุปกรณ์บนสะพานเพื่อตรวจวัดการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟแล่นผ่าน ผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการดำเนินการพบว่ารูปแบบของการสั่นสะเทือนและค่าการแอ่นตัวของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองฯ อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความเร่งที่เกิดขึ้นบนสะพานนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจเป็นผลมาจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความไม่สม่ำเสมอของผิวทาง (Track Irregularity) รวมไปถึงความสมบูรณ์ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของทางวิ่ง ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี้ ที่สามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนผลตอบสนองจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและโครงสร้างสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์

พฤติกรรมของระบบในสภาวะอื่นๆ ได้เช่น การเปลี่ยนระดับความเร็วของรถไฟ การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสะพาน ความไม่สม่ำเสมอของผิวทางในรูปแบบต่าง ๆ เป็นต้น



Title	DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL APPROACH FOR BRIDGE-TRAIN INTERACTION BY USING FEM AND MULTIBODY CO-SIMULATION:CASE STUDY AIRPORT RAIL LINK PROJECT
Author	THANASAK SRISAWAT
Advisor	Assistant Professor Rattapoohm Parichatprecha, D.Eng.
Co-Advisor	Songsak Suthasupradit, Ph.D.Eng.
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2021
Keywords	Running Behavior, Train-Bridge interaction, Finite Element Method, Multibody Simulation Method

ABSTRACT

This research aims to analyze the interaction response between trains and bridges by using Finite Element Method (FEM) and Multibody Co-Simulation model. The bridges and trains details were obtained from Thailand Airport Rail Link Project. In addition, actual tests were carried out by installing devices on the bridge to measure the vibration as the train passed. The tested results were used for comparison with the results from the mathematical models developed. It was founded that, the results of vibration mode and mid-span deflection from field experiment and numerical simulation are in good agreement. However, the significant differences of the bridge acceleration were found in some range of train speed. Those differences between bridge acceleration results may be caused by the effects of track irregularity and the condition of track components. This research has been shown that the finite element model with multi-body model can be applied for prediction of the behaviors of train-bridge dynamic interaction, effectively. Furthermore, this technique can also be applied to analyze the behaviors of the system in other conditions, such as variation of the train speed, bridge configuration

as well as degree of track Irregularity, etc.



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นทีปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว และรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาให้ คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

กราบขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นอย่างสูงทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษา ดูแลและอำนวยความสะดวก ในการดำเนินงานวิจัย

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่เฝ้าก้าลังใจและให้การสนับสนุน ในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมาและขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่จากรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์ ที่ได้ให้ ข้อมูลและช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบภาคสนามที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนิน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มี พระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็ประโยชน์ต่อพัฒนาระบบราง ทั้งในการ วิเคราะห์ หรือตรวจประเมินความปลอดภัย รวมถึงการออกแบบระบบรางเบื้องต้น

ธนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
ความสำคัญของงานวิจัย.....	4
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	5
ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
สะพาน (Box Girder).....	6
1. Pier Segment.....	6
2. Deviator Segment.....	7
3. Typical Segment หรือ Standard Segment.....	7
4. ชิ้นส่วนต่างๆ ของสะพานและหน้าที่.....	8
องค์ประกอบของตัวรถไฟ.....	8
1. ตัวรถ (Car body).....	8

2. แคร่หรือโบกี้ (Bogie)	8
แบบจำลองทางพลศาสตร์.....	9
1. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Railway vehicle dynamic model)	9
2. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ (Track dynamic model).....	11
3. การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interface)	12
4. ความขรุขระของทางรถไฟ (Track Irregularities).....	13
5. การสั่นสะเทือนของสะพาน (bridge vibration)	16
การสั่นพ้อง (Resonance).....	18
ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency).....	18
มาตรฐาน UIC776-2R ปี 2003.....	21
1. ความถี่ธรรมชาติของสะพาน.....	21
2. ความเร่งในแนวดิ่ง	22
3. การโก่งตัวของสะพาน.....	22
งานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มเติม	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
การทดสอบภาคสนาม	30
1. การติดตั้งเครื่องตรวจวัด (Instrument Installation).....	30
2. การติดตั้งบนสะพาน.....	32
3. การติดตั้งบนรถไฟ	33
4. ขั้นตอนการทดสอบ	34
5. ผลการค่าความเร็วในการทดสอบสะพาน	35
การพัฒนาแบบจำลองสะพานและรถไฟ.....	36

1. ระบบโครงสร้างสะพานรถไฟ.....	36
2. ระบบตัวรถไฟ.....	38
3. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน (Train-Bridge Interaction).....	41
การสอบเทียบแบบจำลองและการทดสอบ	42
1. ระบบสะพาน (Bridge).....	42
2. ระบบรถไฟ (Train)	44
การวิเคราะห์แบบจำลองพร้อมประเมินผล	44
บทที่ 4 ผลการวิจัย	45
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการทดสอบ.....	45
การตรวจประเมินคุณภาพของสะพานรถไฟ	47
ค่าการแอ่นตัวของสะพาน (Mid-Span Vertical Deflection).....	48
ค่าความเร่งกลางสะพาน (Mid-Span Vertical Acceleration).....	49
บทที่ 5 บทสรุป.....	51
สรุปผลการวิจัย.....	51
บรรณานุกรม	53
ประวัติผู้วิจัย	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 คุณสมบัติของสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟตามชั้นมาตรฐาน FRA (27) .14	
ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่นของความขรุขระ (เมตร) และย่านความถี่ของการสั่นสะเทือน (27).....	16
ตาราง 3 รูปแบบและความเร็วของการเดินรถระหว่างทำการทดสอบ.....	35
ตาราง 4 ค่าคุณสมบัติของหน้าตัดสะพานและน้ำหนักของสะพานที่มีความยาว 35.5 ม. 37	
ตาราง 5 อธิบายพฤติกรรมของจตุรรองรับทั้ง 4 จุดบนสะพานรถไฟ	37
ตาราง 6 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานระหว่างผลการตรวจวัดและแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....	43
ตาราง 7 เปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของสะพานระหว่างผลการตรวจวัดและแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	44
ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการตรวจวัดจริงของค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพาน	45
ตาราง 9 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการตรวจวัดจริงของค่าการความเร่งสูงสุดของสะพาน	46
ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวของสะพานและค่าร้อยละคงเหลือเทียบกับมาตรฐาน UIC 776-2R	49
ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์การความเร่งของสะพานและค่าร้อยละคงเหลือเทียบกับมาตรฐาน UIC 776-2R.....	50

สารบัญภาพ

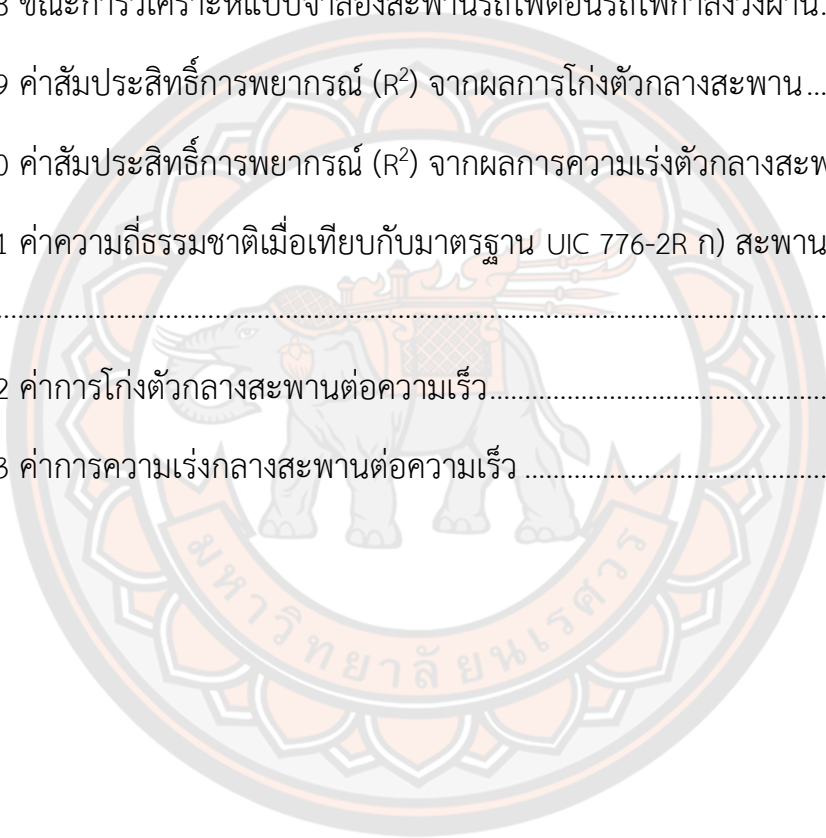
หน้า

ภาพ 1 วิวัฒนาการของแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพาน (2).....	2
ภาพ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8).....	2
ภาพ 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่ามวล (Mass) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8).....	3
ภาพ 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าการสลายพลังงาน (Damper) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8).....	3
ภาพ 5 แผนที่แนวเส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์.....	4
ภาพ 6 องค์ประกอบของโครงสร้างสะพานแบบ Viaduct Segmental boxes Girder (25)....	6
ภาพ 7 Pier Segment (25).....	7
ภาพ 8 Deviator Segment (25).....	7
ภาพ 9 Typical Segment (25).....	7
ภาพ 10 แคร่หรือโบกี้ (26).....	8
ภาพ 11 องค์ประกอบของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ.....	9
ภาพ 12 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสองมิติ.....	9
ภาพ 13 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสามมิติ.....	10
ภาพ 14 ตัวอย่างแบบจำลองรถไฟ TGV ในระนาบสามมิติ.....	10
ภาพ 15 แบบจำลองการรับน้ำหนักของทางรถไฟ.....	11
ภาพ 16 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ.....	12
ภาพ 17 แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง.....	13

ภาพ 18 ความขรุขระบนทางรถไฟ	13
ภาพ 19 ตัวอย่างกราฟสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟ.....	15
ภาพ 20 ตัวอย่างโปรไฟล์ของความขรุขระของทางรถไฟ	15
ภาพ 21 การสั่นสะเทือนของสะพานในสภาวะปกติและสภาวะสั่นพ้อง (resonance).....	16
ภาพ 22 ตัวอย่างค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นบนสะพานเมื่อรถไฟแล่นผ่านความเร็วต่างๆ	17
ภาพ 23 แรงแบบขบวน (series forces)	17
ภาพ 24 การแกว่งของลูกตุ้มการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้ม	18
ภาพ 25 การทดลองเรื่องการสั่นของมวลติดสปริง	19
ภาพ 26 จำนวนลูบของคลื่นนิ่งในเส้นเชือก ที่ขึงตึง ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความยาวคลื่นได้หลายค่า หรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ว่า.....	19
ภาพ 27 จำนวนลูบของคลื่นนิ่งในท่อปิดด้านหนึ่ง ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความถี่ได้หลายค่าหรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ว่า.....	20
ภาพ 28 การสั่นที่ความถี่ธรรมชาติของแผ่นบางรูปวงกลม	21
ภาพ 29 ขีดจำกัดของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (28)	21
ภาพ 30 ความเร่งในแนวตั้งและการโก่งตัวของสะพาน (28).....	22
ภาพ 31 แรงกระทำบนโครงสร้างสะพาน (29).....	23
ภาพ 32 การถ่ายแรงต่าง ๆ ไปที่ราง (29).....	23
ภาพ 33 กราฟ (a) ความเร่งแนวตั้ง, (b) ความเร่งด้านข้าง, (c) การเร่งความเร็ว, (d) ความเร่งการกลิ้งของล้อ (29).....	24
ภาพ 34 การพัฒนาของแบบจำลอง (31).....	25
ภาพ 35 องค์ประกอบของแบบจำลอง TTBDIM (31)	26
ภาพ 36 แบบจำลองการถ่ายแรงแบบไดนามิก (31)	27

ภาพ 37 ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกสะพานรถไฟ (32).....	28
ภาพ 38 ขั้นตอนสำหรับการทำซ้ำระหว่างประวัติ (32).....	29
ภาพ 39 Accelerometer ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	30
ภาพ 40 Lvdt ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	31
ภาพ 41 อุปกรณ์ Data Logger ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	31
ภาพ 42 อุปกรณ์ Trigger ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	32
ภาพ 43 การติดตั้งเครื่องตรวจวัดบนสะพาน ก) ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือ ข) รูปแบบการติดตั้ง.....	33
ภาพ 44 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง 3 แกนบนรถไฟ.....	34
ภาพ 45 รูปแบบการทดสอบสะพาน ก) แบบที่ 1 การทดสอบแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-Static) ข) แบบที่ 2 การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic).....	34
ภาพ 46 ขนาดหน้าตัดสะพาน.....	36
ภาพ 47 รูปแบบการติดตั้งของตัวสะพานกับต่อม่อ.....	36
ภาพ 48 อธิบายตำแหน่งจุดรองรับบนสะพานทั้ง 2 สะพาน.....	38
ภาพ 49 ตัวอย่างรูปร่างของแบบจำลองสะพานแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....	38
ภาพ 50 ระยะห่างระหว่างเพลลาและน้ำหนักของแต่ละตู้ของรถไฟแอร์พอร์ตลิงก์ชนิด Express Line.....	39
ภาพ 51 ก) แบบแคร่จากแบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ข) แบบจำลองรถไฟฟ้า แอร์พอร์ต เรล ลิงค์.....	39
ภาพ 52 ลักษณะของล้อรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ แบบ S1002.....	40
ภาพ 53 ลักษณะแบบจำลองระบบทางพลศาสตร์ของรถไฟ (8).....	40

ภาพ 54 ตัวอย่างรูปร่างของแบบจำลองรถไฟด้วยแบบจำลองรถไฟแบบมัลติบอดี (Multibody).....	41
ภาพ 55 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน.....	42
ภาพ 56 ขณะการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานรถไฟตอนรถไฟกำลังวิ่งผ่าน.....	43
ภาพ 57 ค่าความถี่ธรรมชาติและ Mode Shapes ของแบบจำลองสะพาน FEM	43
ภาพ 58 ขณะการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานรถไฟตอนรถไฟกำลังวิ่งผ่าน.....	44
ภาพ 59 ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) จากผลการโก่งตัวกลางสะพาน	46
ภาพ 60 ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) จากผลการความเร่งตัวกลางสะพาน.....	47
ภาพ 61 ค่าความถี่ธรรมชาติเมื่อเทียบกับมาตรฐาน UIC 776-2R ก) สะพานที่ 1 ข) สะพานที่ 2	48
ภาพ 62 ค่าการโก่งตัวกลางสะพานต่อความเร็ว.....	49
ภาพ 63 ค่าการความเร่งกลางสะพานต่อความเร็ว	50

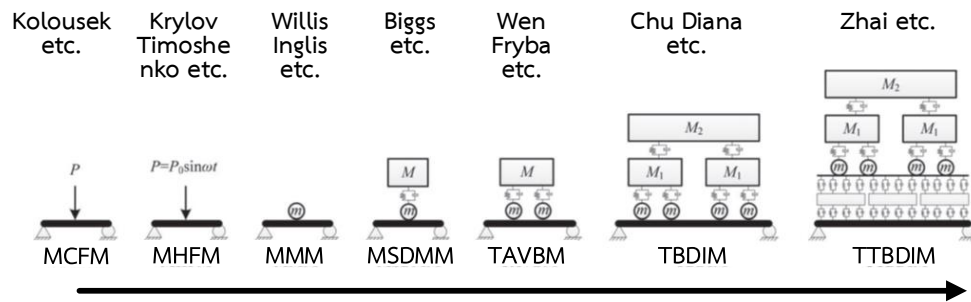


บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

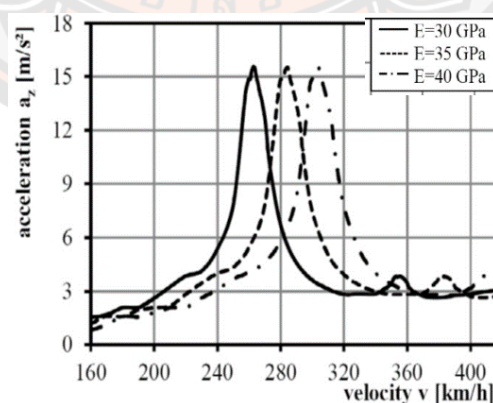
โครงสร้างสะพานรถไฟจะเกิดการสั่นสะเทือนเมื่อมีรถไฟแล่นผ่าน เนื่องจากแรงกระทำจากล้อรถไฟรวมทั้งการตอบสนองทางพลศาสตร์ของตัวสะพานเอง โดยพฤติกรรมดังกล่าวยังมีผลกระทบกลับไปสู่ตัวรถไฟ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการเดินรถ ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคนิควิธีหลายชนิดในการวิเคราะห์ เช่นการวิเคราะห์แบบ The Moving Constant Force Model (MCFM) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนและใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้านที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่น่าเชื่อถือกับสภาวะการใช้งานจริง จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองระบบตัวรถไฟเพื่อตอบสนองต่อผลกระทบของการความเร่งจากการเพิ่มสปริง (Spring) และตัวสลายพลังงาน (Damper) ของตัวรถไฟ ต่อมาจึงมีการพัฒนาแบบจำลองชนิด The Moving Spring-Damping-Mass Model (MSDMM) โดยมีการจำลองสปริง (Spring) และตัวสลายพลังงาน (Damper) เพียงชุดเดียวเพื่อมาแทนทั้งระบบ และได้พัฒนาระบบการวิเคราะห์ช่วงล่างโดยจำลองแคร่ (Bogie) และตู้รถไฟ (Car Body) ตามลำดับ ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงได้เพิ่มระบบของทางรถไฟลงในแบบจำลอง เช่น ราง (Rail) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastener) หมอนรองราง (Sleeper) และแผ่นรองราง (Rail Pad) โดยเป็นแบบจำลองชนิด Train-Track-Bridge Dynamic Interaction Model (TTBDIM) (1) วิวัฒนาการของการพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานดังแสดงในภาพ 1



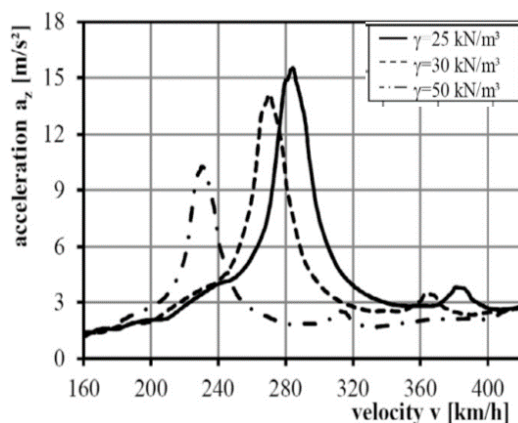
ภาพ 1 วิวัฒนาการของแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพาน (2)

จากงานวิจัยของ S. Schneider, & S. Marx (8) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสะพาน คือ

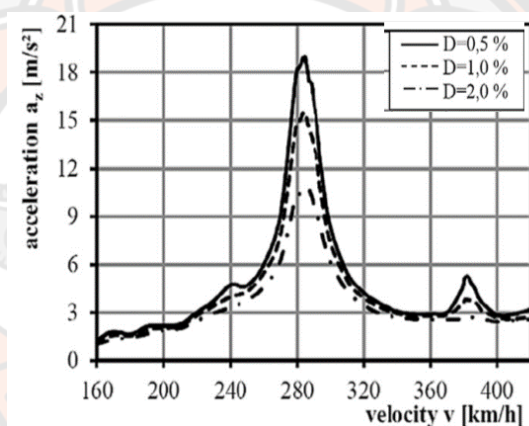
1. ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เมื่อเพิ่มความแข็งเกร็งของสะพานจะทำให้ความเร่งของสะพานเท่าเดิม แต่ความเร็วของรถไฟที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องจะสูงขึ้นตามค่าความแข็งเกร็งที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 2
2. มวล (Mass) เมื่อเพิ่มมวลของสะพานจะทำให้ความเร่งของสะพานต่ำลง แต่ในขณะเดียวกันก็จะเกิดการสั่นพ้องที่ความเร็วต่ำลงเช่นกัน ดังแสดงในภาพ 3
3. ตัวสลายพลังงาน (Damper) เมื่อเพิ่มค่าสลายพลังงานของสะพานจะทำให้ความเร่งของสะพานลดลง ในขณะที่ความเร็วของการสั่นพ้องมีค่าเท่าเดิมดังภาพ 4 (8)



ภาพ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8)



ภาพ 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่ามวล (Mass) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8)



ภาพ 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าการสลายพลังงาน (Damper) ที่ส่งผลต่อความเร่งของสะพาน (8)

ในด้านของตัวรถไฟ ปัจจัยหลักของคุณลักษณะที่มีผลกระทบต่อการเล่นสะเทือนของสะพาน คือ ความเร็ว (Speed) ระยะระหว่างล้อ (Wheel Base) น้ำหนักงเพลา (Axle Load) และ ชุดช่วงล่าง (Bogie)

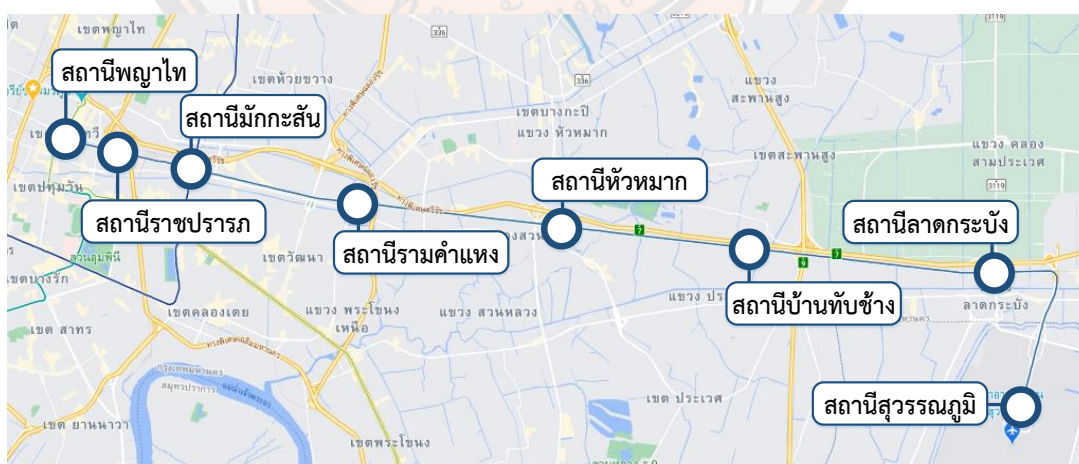
ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน (Train-Bridge Interaction) มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านงานวิเคราะห์การตอบสนองของสะพานเหล็กรถไฟ (5, 8) ช่วยแก้ปัญหาช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transition Zones) ระหว่างทางรถไฟแบบหินโรยทางกับสะพาน (9-11) สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยภายนอกได้เช่น แรงแลม (12) และผลกระทบจากการสั่นของโครงสร้างรถไฟสู่พื้นดินและผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารรอบข้าง (13, 14) รวมถึงใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การแตกร้าวของพื้นทางรถไฟแบบแผ่นพื้นคอนกรีต (Slab Track) (15)

เนื่องจากขณะรถไฟวิ่งผ่านสะพานจะเกิดการส่งผ่านแรงจากรถไฟสู่สะพาน และสะพานสู่รถไฟ เป็นการกระทำแบบกลับไปกลับมา จากพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้ในการวิเคราะห์มีความซับซ้อนสูง ในงานวิจัยนี้จะแบ่งแบบจำลองเป็น 2 ส่วน และเชื่อมโยงหรือสร้างปฏิสัมพันธ์ผ่านพฤติกรรมของแรงกระทำระหว่างล้อและราง โดยแบบจำลองที่กล่าวมาคือ แบบจำลองตัวรถไฟ จะใช้วิธีจำลองพฤติกรรมผ่านแบบจำลองมัลติบอดี้ (Multibody Simulation) (3, 4, 12, 16) ในขณะที่แบบจำลองสะพานจะใช้วิธีจำลองพฤติกรรมผ่านวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) (3-5, 17, 18)

ในการศึกษาในครั้งนี้คณะวิจัยจะเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์พฤติกรรมแบบปฏิสัมพันธ์ คือ Universal Mechanism (19) เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ออกแบบวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวโดยเฉพาะ และมีการใช้งานในระดับสากล โดยจะทำการเปรียบเทียบและพัฒนาประสิทธิภาพผลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบจริงทั้งแบบสถิตย์และแบบพลวัต

ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากปัจจุบันได้มีเส้นทางรถไฟเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะทางรถไฟแบบสะพานของรถไฟฟ้ามหานครในเมือง (Urban Lines) และรถไฟชานเมือง (Commuter Rail) ทั้งส่วนที่กำลังให้บริการและกำลังก่อสร้าง โดยจะพบว่าเส้นทางรถไฟที่จะวิ่งให้บริการบนโครงสร้างสะพานนั้นมีจำนวนค่อนข้างสูง เช่น โครงการรถไฟฟ้า BTS โครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ รวมไปถึงรถไฟฟ้ามหานครสายสีแดง ล้วนมีการวิ่งให้บริการบนสะพาน



ภาพ 5 แผนที่แนวเส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์

โครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ (ภาพ 5) ที่มีการเปิดให้บริการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 (ค.ศ. 2009) และในอนาคตอาจมีการใช้ทางเดินรถร่วมกับรถไฟความเร็วสูงภายใต้โครงการ รถไฟความเร็วสูงเชื่อมสามสนามบิน โครงสร้างรองรับทางวิ่งหลักของโครงการฯ จะเป็นสะพานรูปกล่อง โดยในปัจจุบันมีขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการ จำนวน 9 ขบวน ซึ่งเป็นรุ่น Siemens DeSiro ที่สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงสุดถึง 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

อย่างไรก็ตามเพื่อให้มั่นใจถึงความปลอดภัยของการให้บริการและประโยชน์ต่อการการวางแผนซ่อมบำรุง จำเป็นต้องมีการประเมินผลตอบสนองของโครงสร้างสะพานต่อการวิ่งของรถไฟ โดยการประยุกต์ใช้แนวทางวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานร่วมกับการตรวจวัดจริง จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมสะพานในเชิงปริมาณทั้งประหยัดงบประมาณในการทดสอบจริงลงอีกด้วย นอกจากนี้แนวทางในการวิเคราะห์ดังกล่าว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการอื่นๆ ได้ต่อไปในอนาคต

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี
2. เปรียบเทียบความแม่นยำของกระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดีกับการทดสอบภาคสนาม
3. ประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟในการตรวจประเมินคุณภาพของสะพานรถไฟ กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ภายใต้รถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ชนิด Express Line ช่วงความเร็ว 20 – 180 กม./ชม.
 - 3.1 ตรวจสอบการโก่งตัวของสะพานรถไฟโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ความยาว 35.5 ม. จำนวน 2 ตัว ตามมาตรฐาน UIC 776-2R (20)
 - 3.2 ตรวจสอบความเร่งของสะพานรถไฟโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ความยาว 35.5 ม. จำนวน 2 ตัว ตามมาตรฐาน UIC 776-2R (20)

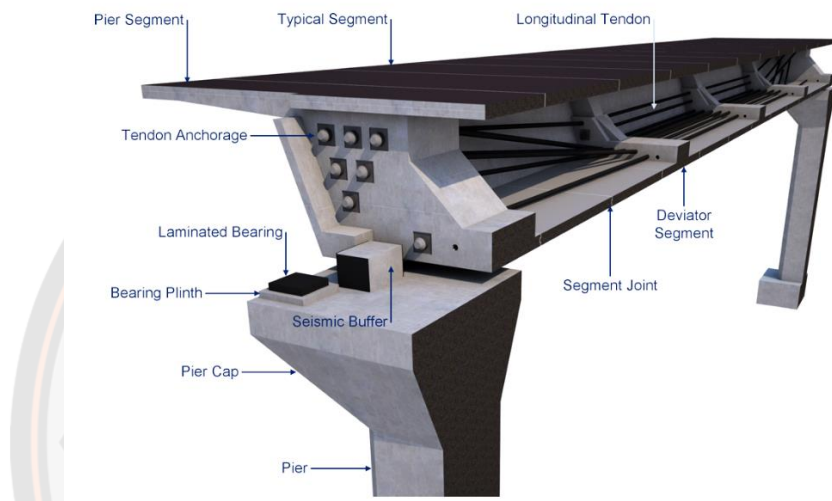
ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์สะพานรูปกล่อง (Box girder) รองรับทางวิ่ง 2 ทางขนาดความยาว 35.5 ม.
2. วิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ โดยใช้รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์แล่นผ่านตัวสะพานด้วยความเร็ว 20-180 กม./ชม.
3. วิเคราะห์สมรรถนะของสะพานต่อความเร็วโดยตรวจสอบค่าการสั่นสะเทือนและการโก่งตัวกลางสะพาน ตามมาตรฐาน UIC 776-2R ของสะพานทางตรง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สะพาน (Box Girder)

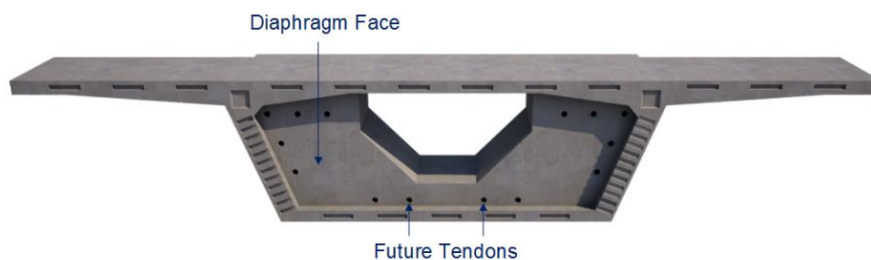


ภาพ 6 องค์ประกอบของโครงสร้างสะพานแบบ Viaduct Segmental boxes Girder (25)

โครงสร้างสะพานแบบ Viaduct Segment นั้น มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดกลางนำมาเรียงต่อกัน แล้วยึดเข้าหากันด้วย Tendons โดยมีชิ้นส่วน Pier Segment ซึ่งวางอยู่บนหัวเสาทั้งสองฝั่ง เป็นตัวรับแรงที่ถ่ายมาจาก Tendons และในแต่ละ Segment นั้น จะมี Shear Keys ทำหน้าที่รับแรงเฉือน (Shear Force) ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งอีกด้วย ทั้งนี้ประเภทของ Segment ที่ประกอบกันอยู่ในสะพานนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. Pier Segment

เป็นชิ้นส่วนที่วางอยู่บนหัวเสา ทำหน้าที่รับแรงที่ถ่ายมาจาก Tendons ผ่าน Anchorages ที่ติดตั้งอยู่ด้าน Bulkhead ทั้งนี้จำนวนของ Tendons หรือ Anchorages นั้น ขึ้นอยู่กับ Span Type ที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้



ภาพ 7 Pier Segment (25)

2. Deviator Segment

เป็นชิ้นส่วนที่พื้นด้านในมี Deviator Block ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแนวของ Tendons ที่ร้อยมาจาก Pier Segments เพื่อทำให้เกิด Lift-Up Force ทั้งนี้จำนวนของ Deviator Segment ขึ้นอยู่กับ Span Type ที่ออกแบบไว้เช่นกัน



ภาพ 8 Deviator Segment (25)

3. Typical Segment หรือ Standard Segment

เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ระหว่าง Pier Segment และ Deviator Segment ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีจำนวนที่มากที่สุดในช่วงของสะพาน และเป็นชิ้นส่วนที่ใช้คอนกรีตและเหล็กเสริมในปริมาณน้อยที่สุด



ภาพ 9 Typical Segment (25)

4. ชั้นส่วนต่างๆ ของสะพานและหน้าที่

ชั้นส่วนต่าง ๆ ในสะพานรถไฟโดยทั่วไปจะสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ชั้นส่วนโครงสร้างส่วนบน (Super structure) จะประกอบไปด้วยชั้นส่วนต่าง ๆ ที่อยู่เหนือตอม่อขึ้นไป อาทิเช่น Floor Beam, Main Girder, Stingers, Truss Member, Bearing และ Bracing เป็นต้น โดยที่ชั้นส่วนเหล่านี้จะทำหน้าที่รับน้ำหนักโดยตรงจากรถไฟและถ่ายเทน้ำหนักลงสู่โครงสร้างส่วนล่างต่อไป

2. ชั้นส่วนโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) จะอยู่ใต้ Bracing ทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักจาก Superstructure ลงสู่ฐานรากซึ่งประกอบไปด้วย Pier หรือ Abutment เป็นต้น

องค์ประกอบของตัวรถไฟ

1. ตัวรถ (Car body)

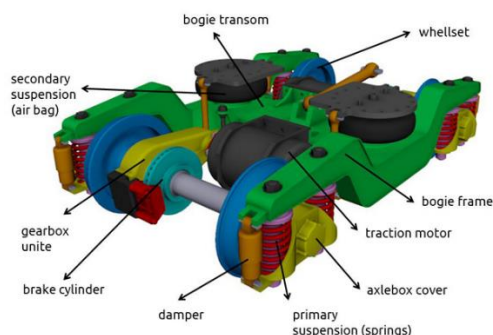
มีลักษณะเป็นห้องว่างหรือไว้สำหรับบรรทุกทุกคน สิ่งของต่าง ๆ

2. แคร่หรือโบกี้ (Bogie)

เป็นส่วนที่รองรับตัวรถไฟ โดยรถไฟ 1 ตู้ จะประกอบไปด้วย 2 โบกี้ ในแต่ละโบกี้จะประกอบไปด้วยระบบลดแรงสั่นสะเทือน (Suspension System) ดังนี้

ก. ระบบลดแรงสั่นสะเทือนหลัก (Primary Suspension System) ประกอบไปด้วย สปริง (springs) และ แดมเปอร์ (Dampers) อยู่ระหว่างโบกี้กับล้อ เป็นส่วนที่รับน้ำหนักหลักของระบบลดแรงสั่นสะเทือน

ข. ระบบลดแรงสั่นสะเทือนรอง (Secondary Suspension System) ประกอบไปด้วย ถูกลม (Air Bag) อยู่ระหว่างตัวรถกับโบกี้

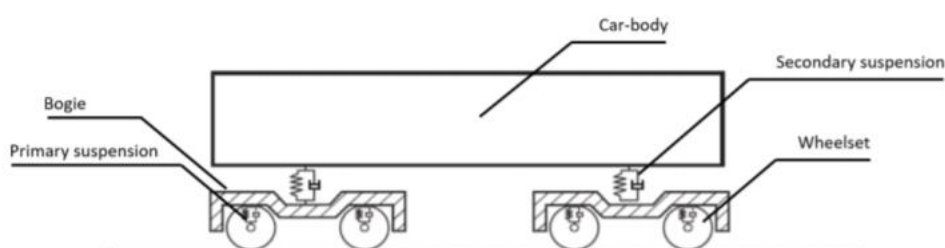


ภาพ 10 แคร่หรือโบกี้ (26)

แบบจำลองทางพลศาสตร์

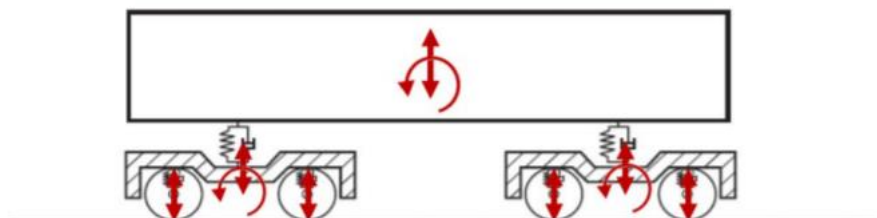
1. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Railway vehicle dynamic model)

ตัวรถไฟสามารถจำลองให้อยู่ในรูปของระบบมวลสปริง และแดมเปอร์ (mass, & spring, & damper system) สำหรับรถไฟทั่วไปในปัจจุบันนั้นระบบมวลจะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักคือ 1) ตัวรถ (car-body) 2) โบกี้ (bogie) และ 3) ชุดล้อ (wheelset) โดยในส่วนของระบบสปริงจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) ระบบรองรับระหว่างชุดล้อกับโบกี้ (primary suspension) และ 2) ระบบรองรับระหว่างโบกี้และตัวรถ (secondary suspension) ดังภาพ 11



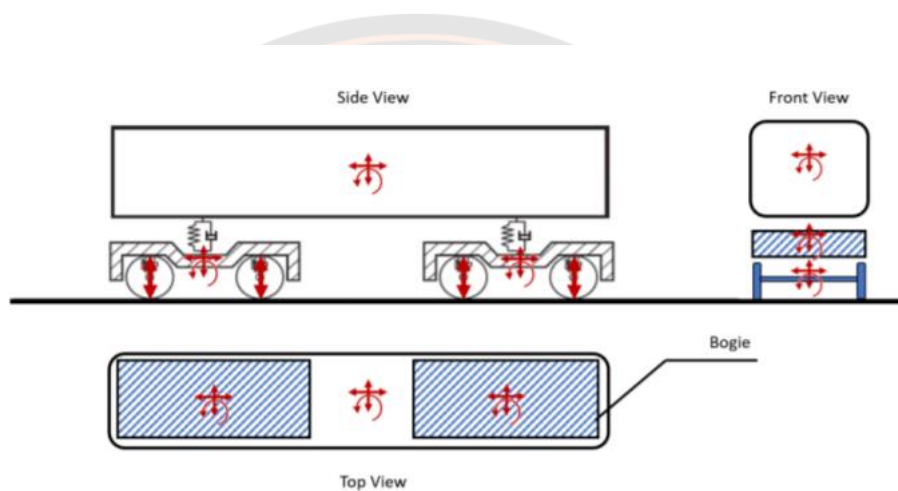
ภาพ 11 องค์ประกอบของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์อาจต้องคำนึงถึงรายละเอียดของการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interaction) ซึ่งเป็นจุดที่มีความซับซ้อนสูง โดยในบริเวณจุดสัมผัสจะเกิดทั้งแรงในแนวตั้ง แรงในแนวราบรวมทั้งการบิดบนผิวสัมผัส นอกจากนี้ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหน้าสัมผัสของล้อและรางจะทำให้เกิดการเลื่อนไถล (Creep age) ซึ่งส่งผลต่อแรงลัพท์ที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว ด้วยเช่นกันสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบริเวณทางตรง ซึ่งการสั่นสะเทือนหลักจะมาจากการเคลื่อนที่แนวตั้งนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองให้เป็นลักษณะสองมิติ โดยมวลของรถไฟจะมีการเคลื่อนที่หลักคือ การขยับขึ้นลง (Bounce) และการกระดก (Pitch) ดังภาพ 12

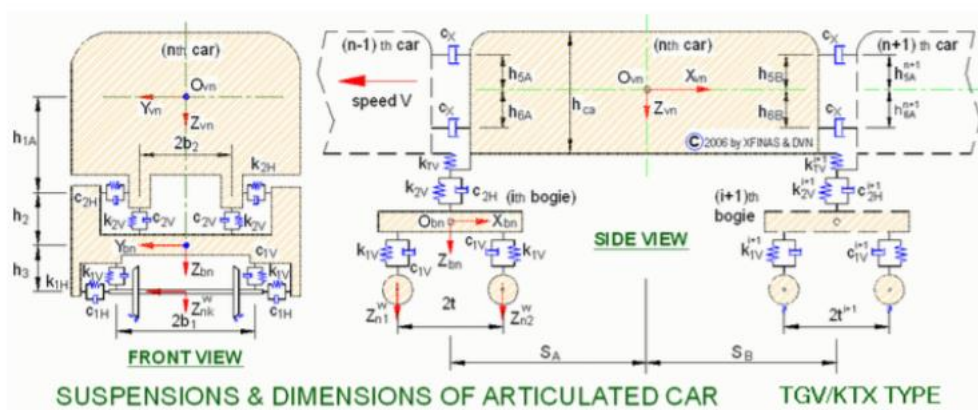


ภาพ 12 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสองมิติ

ในบางกรณีที่มีการสั่นสะเทือนทางด้านข้างมีความรุนแรงกว่าปกติ เช่น บริเวณทางโค้งหรือเส้นทางที่มีความขรุขระสูง อาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองแบบสามมิติ ซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวรถในทิศทางต่างๆ จะมีมากขึ้น โดยมีการขยับขึ้นลง (Bounce) การขยับด้านข้าง (Lateral) การเอียง (Roll) การกระดก (Pitch) และการเลี้ยว (Yaw) นอกจากนี้ ในกรณีที่แรงในแนวยาว (Longitudinal Forces) มีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของรถไฟอาจจำเป็นต้องเพิ่มการเคลื่อนที่ในแนวยาว (Longitudinal Movement) เข้าไปในแบบจำลองด้วยเช่นกันแสดงดังภาพ 13 และภาพ 14 แสดงตัวอย่างแบบจำลองรถไฟ TGV ในระนาบสามมิติ



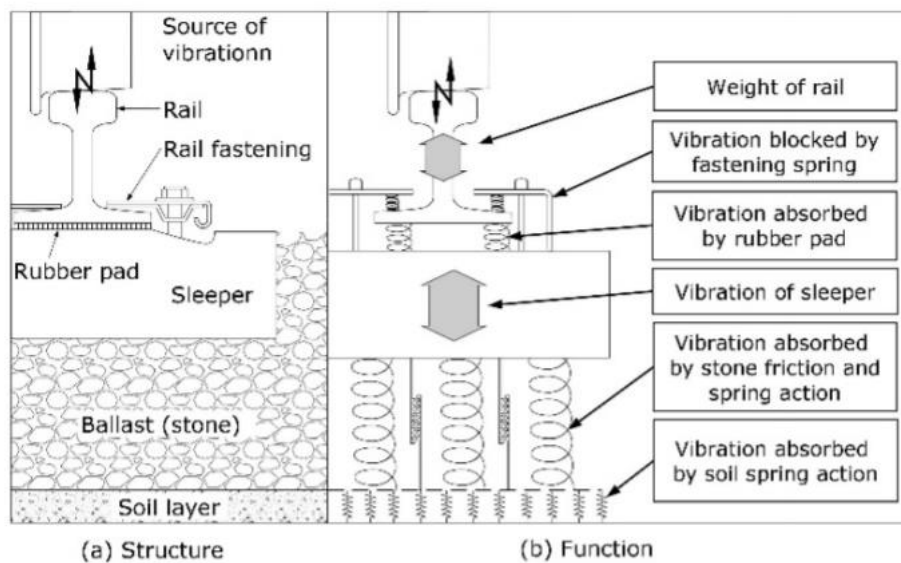
ภาพ 13 การเคลื่อนที่ (Degree Of Freedom) ของแบบจำลองรถไฟในระนาบสามมิติ



ภาพ 14 ตัวอย่างแบบจำลองรถไฟ TGV ในระนาบสามมิติ

2. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ (Track dynamic model)

ทางรถไฟประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วน โดยพฤติกรรมกรับน้ำหนักรับจะเริ่มจาก ล้อรถไฟกดลงสู่ราง จากนั้นแรงจะกระจายลงหมอนแต่ละท่อนรอบ ๆ ตำแหน่งของแรงที่กระทำผ่าน ทางอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง หมอนจะทำหน้าที่กระจายแรงอีกชั้นผ่านทางพื้นผิวสัมผัสใต้หมอนลงสู่ชั้น หินโรยทางและลงสู่พื้นดินในที่สุด แสดงดังภาพ 15



ภาพ 15 แบบจำลองการรับน้ำหนักของทางรถไฟ

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์อย่างง่ายนั้น องค์ประกอบต่าง ๆ บนทางรถไฟจะสามารถจำลองให้อยู่ในรูปแบบของระบบมวลและสปริงได้ดังต่อไปนี้

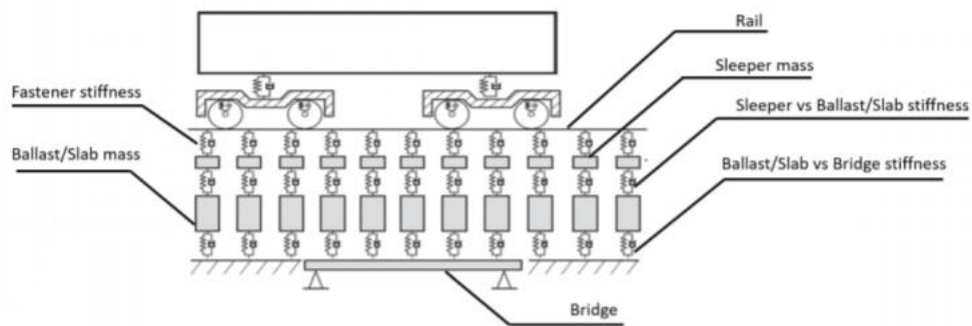
ราง (Rails) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นชิ้นส่วนคาน (beam) เพื่อรับแรงตัดในทางยาวโดยปกติสามารถใช้แบบจำลองแบบ Euler beam ซึ่งคำนึงถึงการดัดเพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในย่านความถี่สูงๆ อาจจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเฉือนบนหน้าตัดตรง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองแบบ Timoshenko beam

อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและแผ่นรองราง (Fastener & Rail pad) สามารถจำลองให้เป็นชิ้นส่วนสปริงและแดมเปอร์ หมอนรองราง (Sleeper) สามารถจำลองให้เป็นมวลคั่นระหว่างรางและชั้นหินโรยทางในบางกรณีที่ต้องคำนึงถึงการยึดหยุ่นของหมอน เช่น หมอนที่ทำจากวัสดุยืดหยุ่น อาจจำเป็นต้องจำลองถึงพฤติกรรมการดัดในแนวยาว และการยึดหยุ่นตัวในแนวตั้งด้วยเช่นกัน

ชั้นหินโรยทาง (Ballast) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริง และแดมเปอร์ โดยในบางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของชั้นหินโรยทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน

ชั้นพื้นทาง (Formation) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริงและแดมเปอร์ โดยในบางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของดินในชั้นพื้นทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน

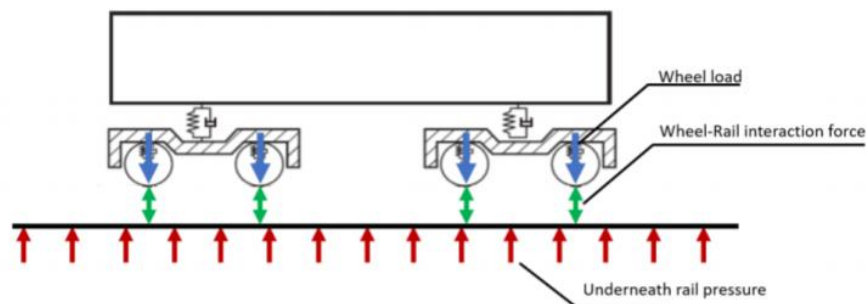
โครงสร้างอื่น ๆ เช่น สะพาน แผ่นพื้นคอนกรีต สามารถใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างอย่างง่าย (Simplified Model) หรือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) หรือเพื่อสร้างระบบมวล สปริงและแดมเปอร์ได้โดยต้องมีการตรวจสอบความถี่ (Vibration Frequency) และรูปแบบโหมด (Vibration Mode Shape) ของการสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับสถานะจริง โดยแสดงแบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ ดังภาพ 16



ภาพ 16 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของทางรถไฟ

3. การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Interface)

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนรถไฟนั้นมีผลมาจากการสั่นสะเทือนของทางรถไฟผนวกด้วยการสั่นสะเทือนบนตัวรถไฟเอง ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์จะต้องจำลองการส่งถ่ายแรงผ่านล้อไปสู่รางและรางกลับไปสู่ล้อได้สอดคล้องกับสถานะสมดุลทางพลศาสตร์ (Dynamic Equilibrium) แสดงดังภาพ 17



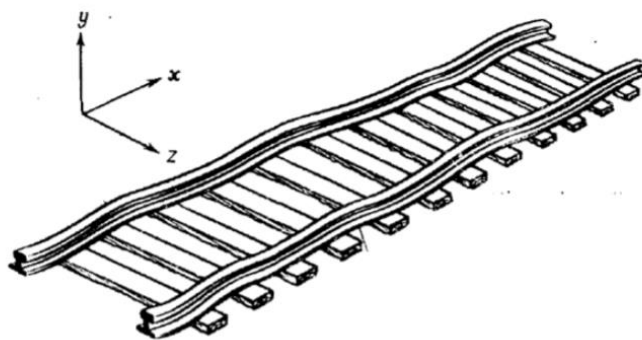
ภาพ 17 แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง

4. ความขรุขระของทางรถไฟ (Track Irregularities)

โดยปกติแล้วทางรถไฟจะมีความไม่สม่ำเสมอหรือความขรุขระ (Irregularities) ซึ่งจะมีขนาดมากขึ้นไปตามคุณภาพของการก่อสร้างและบำรุงรักษา โดยการเสื่อมสภาพของทางจะมีผลให้ขนาดของความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามกาลเวลา ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะสามารถจำลองผลของความขรุขระเข้าไปได้โดยสร้างรูปร่างของความขรุขระ (Track Irregularities Profile) ไปตามความยาวของทาง ซึ่งตามปกติจะมีอยู่ 4 ชนิด คือ

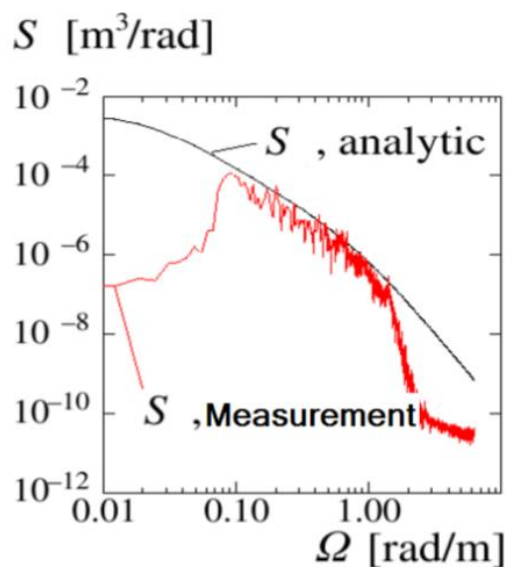
- 1) ความขรุขระในแนวตั้ง (Elevation)
- 2) ความขรุขระในแนวราบ (Alignment)
- 3) ความขรุขระในความต่างระดับของสันราง (Cross Elevation)
- 4) ความขรุขระในความกว้างทาง (Gauge)

โดยตัวอย่างความขรุขระบนทางรถไฟ แสดงภาพ 18

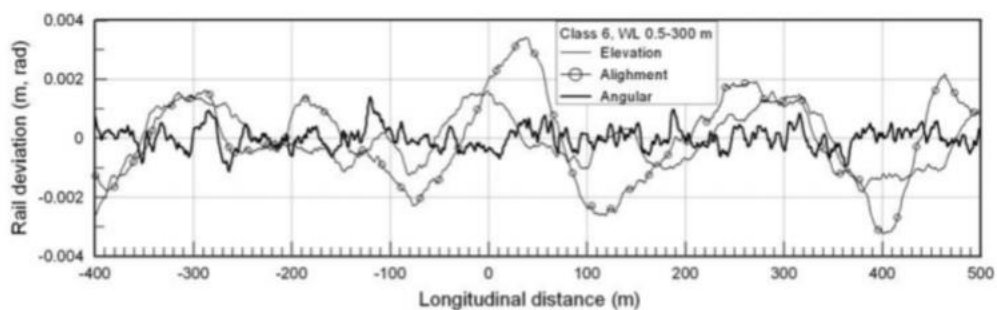


ภาพ 18 ความขรุขระบนทางรถไฟ

ภาพ 19 และภาพ 20 แสดงตัวอย่างกราฟสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟ และ ตัวอย่างโปรไฟล์ของความขรุขระของทางรถไฟ ตามลำดับ



ภาพ 19 ตัวอย่างกราฟสเปกตรัมความขรุขระของทางรถไฟ



ภาพ 20 ตัวอย่างโปรไฟล์ของความขรุขระของทางรถไฟ

ในการสร้างโปรไฟล์ความขรุขระจะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ ขนาดและความยาวคลื่นของความขรุขระ (Amplitude and wavelength of irregularity) โดยตัวแปรดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแรงที่กระทำต่อรถไฟในความเร็วต่าง ๆ ดังตาราง 2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่นของความขรุขระและย่านความถี่ในการสั่นสะเทือน ทั้งนี้ใ้ทำการวิเคราะห์จะต้องให้ความสำคัญในเลือกย่านของความถี่ที่สอดคล้องกับสภาวะจริง

ตาราง 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความยาวคลื่นของความขรุขระ (เมตร) และย่านความถี่ของการสั่นสะเทือน (27)

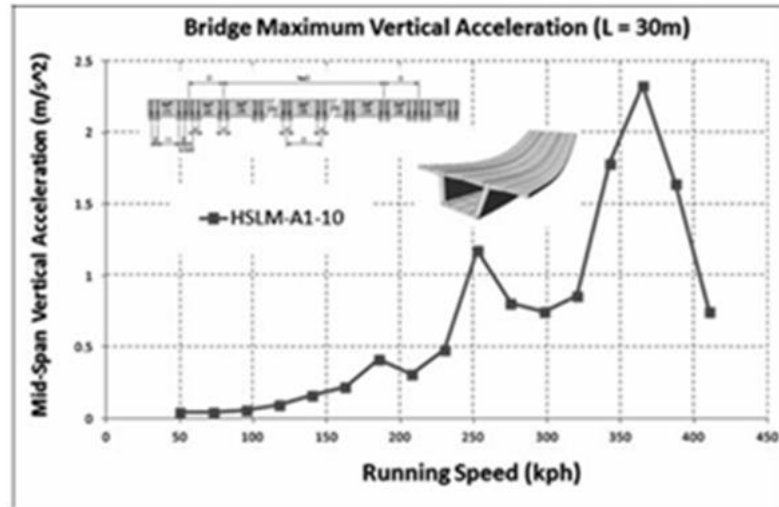
ความยาวคลื่น (Hz)	ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)			
	40	80	160	300
4 Hz	2.8	5.6	11	21
8 Hz	1.4	2.8	5.6	10
16 Hz	0.69	1.4	2.8	5.2
31.5 Hz	0.35	0.70	1.4	2.6
63 Hz	0.18	0.35	0.71	1.3
125 Hz	0.089	0.18	0.36	0.67
250 Hz	0.044	0.089	0.18	0.33

5. การสั่นสะเทือนของสะพาน (bridge vibration)

ในขณะที่รถไฟแล่นผ่านสะพานนั้นแรงจากล้อรถไฟจะถูกถ่ายลงสู่สะพานผ่านรางและทางวิ่งส่งผลให้สะพานเกิดการสั่นสะเทือน ในทางกลับกันเมื่อสะพานเกิดการสั่นสะเทือนแล้วก็จะส่งผ่านแรงกลับไปยังล้อรถไฟส่งผลให้การสั่นสะเทือนบนรถไฟเปลี่ยนไปจากปกติเช่นกัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างรถไฟ และสะพาน (bridge-train dynamic interaction) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงต่อรถไฟและสะพานได้ถ้าหากความเร็วของรถไฟนั้นอยู่ในช่วงที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องต่อสะพาน (resonance) ดังภาพ 21 แสดงการสั่นสะเทือนของสะพานในสภาวะปกติและสภาวะสั่นพ้อง (resonance) โดยจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงในการสั่นสะเทือนอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการสั่นพ้องขึ้น

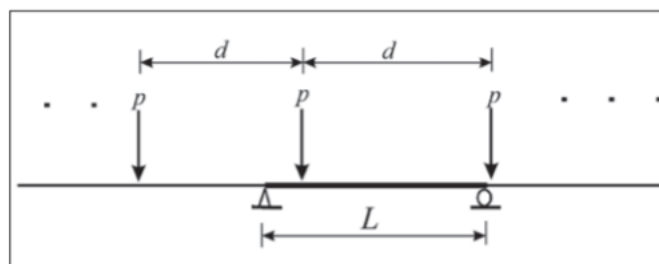


ภาพ 21 การสั่นสะเทือนของสะพานในสภาวะปกติและสภาวะสั่นพ้อง (resonance)



ภาพ 22 ตัวอย่างค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นบนสะพานเมื่อรถไฟแล่นผ่านความเร็วต่างๆ

ในการออกแบบสะพานเพื่อรองรับรถไฟนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ พฤติกรรมการสั่นพ้องของรถไฟและสะพานนั้นสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในขณะที่รถไฟแล่นอยู่ในย่านความเร็วต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของแรงกระทำจากล้อรถไฟมีรูปแบบเป็นแรงแบบขบวน (series forces) นั้นสามารถทำให้เกิดการสั่นพ้องต่อสะพานได้ ทั้งย่านความเร็วต่ำและความเร็วสูง ภาพ 22 แสดงตัวอย่างผลการตอบสนองของ สะพานแบบกล่อง (Box Girder) ที่เกิดจากการจำลองแรงแบบขบวน ดังแสดงใน ภาพ 23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดเกิดที่ความเร็ว 250 kph และ 350 kph ซึ่งเกิดจากการสั่นพ้องดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว



ภาพ 23 แรงแบบขบวน (series forces)

การสั่นพ้อง (Resonance)

การสั่นพ้องคือการที่วัตถุสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติโดยแอมพลิจูดของการสั่นมากขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าเป็นคลื่นเสียงก็จะทำให้เสียงดังมากขึ้น จนอาจทำให้วัตถุเสียหายได้ หรือเกิดความรำคาญได้ การสั่นพ้องเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ

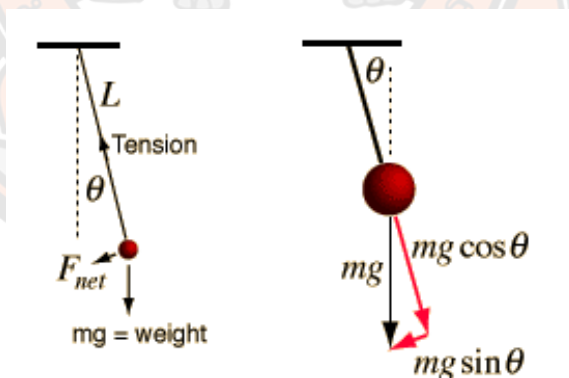
1. การสั่นพ้องด้วยแรง หมายถึงการสั่นพ้องที่เกิดขึ้นโดยการออกแรงกระทำกับวัตถุเป็นจังหวะที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุเป็นเวลานาน เมื่อลมพัดที่ความเร็วคงตัวค่าหนึ่งเป็นเวลานาน ซึ่งแรงลมพอดีกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน ทำให้สะพานเกิดการสั่นพ้อง แอมพลิจูดของการสั่นที่มากขึ้นทำให้สะพานขาด

2. การสั่นพ้องด้วยคลื่น หมายถึงการสั่นพ้องที่เกิดขึ้นโดยการส่งคลื่นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุกระทบกับวัตถุเป็นเวลานาน ดูตัวอย่างเพิ่มเติมในเรื่องการสั่นพ้องของเสียง

ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

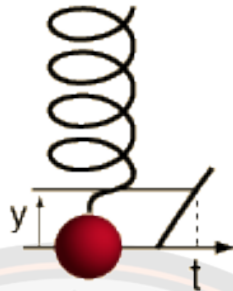
เมื่อทำให้วัตถุสั่นหรือแกว่งอย่างอิสระ วัตถุจะสั่นหรือแกว่งด้วยความถี่คงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ธรรมชาติ

$$\text{ความถี่ธรรมชาติในการแกว่งของลูกตุ้ม} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$









ภาพ 24 การแกว่งของลูกตุ้มการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้ม

$$\text{ความถี่ธรรมชาติในการสั่นของมวลติดสปริง} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



ภาพ 25 การทดลองเรื่องการสั่นของมวลติดสปริง

ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของเส้นเชือกที่ขึงตึง

	f_1	n	1	ความถี่มูลฐาน $f_1 = \frac{v}{2L}$ หรือเรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 1
	$f_2 = 2f_1$		2	ความถี่ $f_2 = \frac{2v}{2L}$ ฮาร์มอนิกที่ 2 $f_2 = 2f_1$
	$f_n = nf_1$		3	ความถี่ $f_3 = \frac{3v}{2L}$ ฮาร์มอนิกที่ 3 $f_3 = 3f_1$
			4	ความถี่ $f_4 = \frac{4v}{2L}$ ฮาร์มอนิกที่ 4 $f_4 = 4f_1$
			5	ความถี่ $f_5 = \frac{5v}{2L}$ ฮาร์มอนิกที่ 5 $f_5 = 5f_1$
			6	

ภาพ 26 จำนวนรูปของคลื่นนิ่งในเส้นเชือก ที่ขึงตึง ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความยาวคลื่นได้หลายค่า หรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ว่า

$$f = \frac{nv}{2L}$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ ความถี่ f_n เรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ n เนื่องจากอัตราเร็วคลื่นในเส้นเชือกมีค่าขึ้นอยู่กับความตึงเชือก T และมวลต่อหน่วยความยาว μ

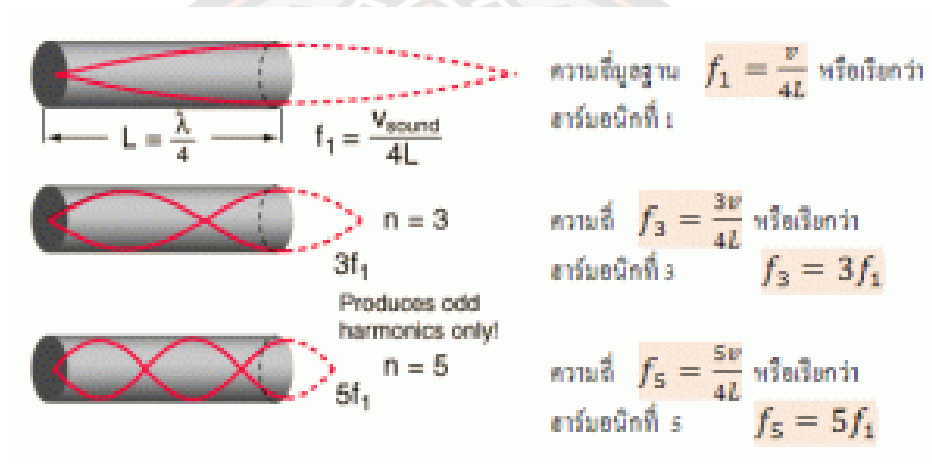
$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

ดังนั้นจึงเขียนได้ว่า

การทดลองเรื่องการสั่นพ้องของคลื่นในเส้นเชือก

ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของลำอากาศในท่อ

ท่อปลายปิดข้างหนึ่ง เมื่ออากาศในท่อสั้นตามยาว โดยอิสระจะเกิดคลื่นนิ่งขึ้นในท่อ ปลายปิดจะเป็นตำแหน่งบัพ(ของการกระจัด) ปลายเปิดจะเป็นตำแหน่งปฏิบัพ (ของการกระจัด) ดังนั้น ถ้าท่อยาว L

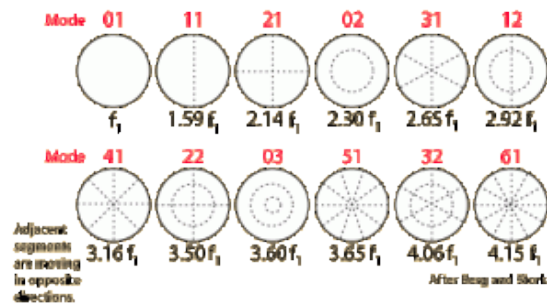


ภาพ 27 จำนวนลูปของคลื่นนิ่งในท่อปิดด้านหนึ่ง ยาว L จะสามารถเกิดคลื่นนิ่งที่มีความถี่ได้หลายค่าหรือเขียน เป็นสมการความสัมพันธ์ ได้ว่า

$$f_n = \frac{nv}{4L}$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ ความถี่ f_n เรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ n และ v เป็นอัตราเร็วของเสียงในอากาศขณะนั้นซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ คือ $V_t = 331 + 0.66t$ การทดลองเรื่องการสั่นพ้องของคลื่นในท่อปลายเปิดทั้งสองข้าง

ความถี่ธรรมชาติของวัตถุแผ่นบาง แผ่นวัตถุบางที่อ่อนตัวและถูกขึงให้ตึงหรือตรึงขอบได้ เช่น แผ่นหน้ากลอง เมื่อทำให้สั่นจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติได้หลายค่า การศึกษาเกี่ยวกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นวัตถุบางนี้มีประโยชน์มากในการออกแบบไดอะแฟรมของลำโพง



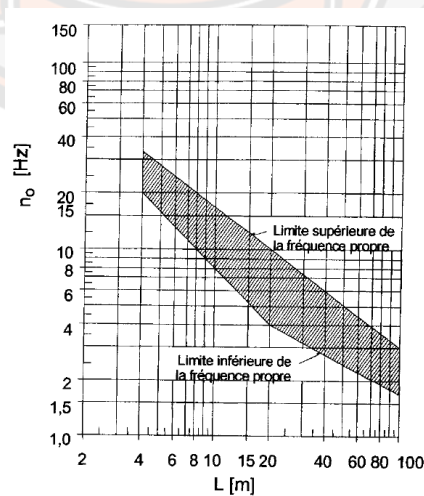
ภาพ 28 การสั่นที่ความถี่ธรรมชาติของแผ่นบางรูปวงกลม

มาตรฐาน UIC776-2R ปี 2003

มาตรฐาน UIC776-2R เป็นข้อกำหนดการออกแบบสำหรับรถไฟและสะพานโดยใช้หลักการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟ ราง และสะพาน ซึ่งเนื้อหาที่จะนำมาเปรียบเทียบกับในโครงการวิจัยเล่มนี้ คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน, การโก่งตัวของสะพาน และความเร่งในแนวตั้งของสะพาน

1. ความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ความถี่ธรรมชาติของสะพาน เป็นการสั่นของสะพานเนื่องจากน้ำหนักของตัวสะพานเอง โดยไม่มีแรงกระทำที่สะพาน ซึ่งในมาตรฐาน UIC776-2R ได้กำหนดค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ดังแสดงในภาพ 29 จากรูปจะเห็นได้ว่ายิ่งสะพานมีความยาวมากจะทำให้น้ำหนักของตัวสะพานมีค่ามาก ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของสะพานมีค่าน้อย



ภาพ 29 ขีดจำกัดของค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (28)

2. ความเร่งในแนวตั้ง

ความเร่งในแนวตั้ง เกิดจากการสั่นสะเทือนเชิงพลศาสตร์ที่เกิดจากตัวรถไฟมากระทำ ต้องมีค่าเท่ากับ $0.5g$ (4.91 m/s^2) ดังแสดงในภาพ 30 เพื่อไม่ให้รถไฟเกิดการตก

3. การโก่งตัวของสะพาน

เนื่องจากสะพานมีน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานเองและน้ำหนักบรรทุกจรของตัวรถไฟมากระทำ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการโก่งตัวของสะพาน ค่าการโก่งตัวต้องไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด (ภาพ 30) จึงถือว่าสะพานมีความปลอดภัยในขณะที่รถไฟวิ่งผ่าน

Criterion verified	Description	Limit value	Dynamic calculations under real trains or HSLM
Track stability and wheel/rail contact	Vertical accelerations - ballasted track - slab track	0.35 g (3.43 m/s ²) 0.5 g (4.91 m/s ²)	1 loaded track
Comfort and strength of the structure	Vertical deflections	L/600 or L/800	1 loaded track

ภาพ 30 ความเร่งในแนวตั้งและการโก่งตัวของสะพาน (28)

งานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มเติม

Van Nguyen Dinh (29) ได้ศึกษาและพัฒนาสูตรของการปฏิสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์สามมิติระหว่างสะพานและรถไฟความเร็วสูง โดยพิจารณาการสัมผัสของล้อและราง (Wheel-Rail) ให้มีการสูญเสียการสัมผัสระหว่างล้อและราง มีการพิจารณาความผิดปกติของสะพานและการกระจัด (displacement) ของพื้นบนสะพานเนื่องจากแรงบิด สมมุติฐานนี้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสะพานโดยมีองค์ประกอบเหมือนคาน 3 มิติ มีการเสนออัลกอริทึมเชิงตัวเลขในการแก้สมการการเคลื่อนที่ของชุดล้อ (Wheelset) สามารถประเมินการตอบสนองที่แท้จริงของชุดล้อ ได้ข้อสรุปในการศึกษานี้

การตอบสนองในแนวตั้งที่คำนวณจากแบบจำลอง 3 มิติใหม่ แสดงผลลัพธ์ของการตอบสนองที่ติดกับแบบจำลองสะพานเมื่อทดลองให้รถไฟวิ่งผ่านสะพานหนึ่งช่วง และสะพานต่อเนื่องสองช่วงที่ความเร็วต่าง ๆ ความเร็วที่สะท้อนกลับคืนมาของสะพานและรถไฟตรงกับความเร็วที่คำนวณจากความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์

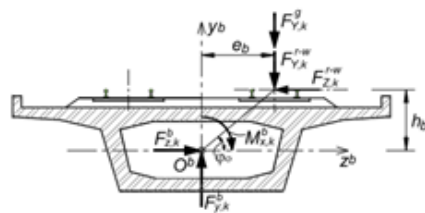
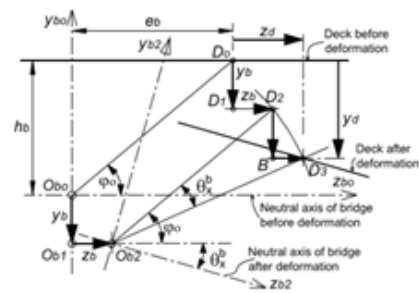


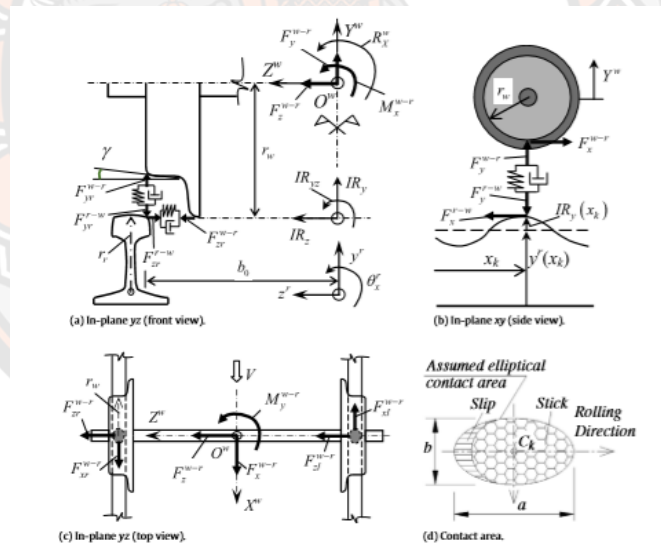
Fig. 4. Moment due to eccentric track.

4.1. External forces applied on the bridge



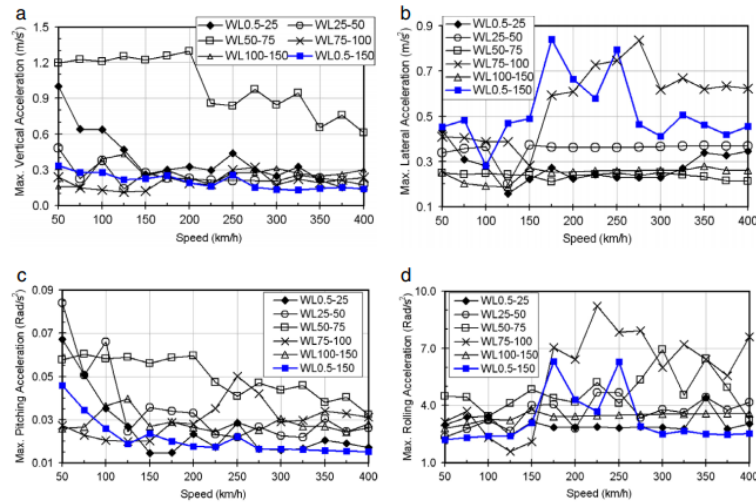
ภาพ 31 แรงกระทำบนโครงสร้างสะพาน (29)

การกระจัดในแนวตั้งและด้านข้างที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดขึ้นทันทีเมื่อเพิ่มความเร็รรถไฟ พบว่าเมื่อช่วงเวลาการกระโดดของล้อรถไฟ และการโค้งตัวของสะพานต่อเนื่องสองช่วงภายใต้แรงเคลื่อนที่คลื่นมีการขยายบริเวณทางออกมากกว่าช่วงทางเข้า การกระจัดของล้อรถไฟและราง คำนวณจากรูปแบบที่เสนอขึ้นมาใหม่ อัตราส่วนแรงด้านข้างต่อแรงแนวตั้งนำไปประเมินความเสี่ยงในการทรวง



ภาพ 32 การถ่ายแรงต่าง ๆ ไปที่ราง (29)

กรณีศึกษาให้รถไฟ 10 ขบวน ที่มีความเร็วหลายระดับตั้งแต่ 50–400 กม./ชม วิ่งผ่าน สะพาน การกระจัดของสะพานด้านข้างโดยส่วนใหญ่เป็นคลื่นสั้น WL 0.5-25 ม. ของความผิดปกติของราง และช่วง WL 50–75 ม. ของความผิดปกติของราง ส่งผลอย่างมากต่อการเร่งความเร็วของ ตัวถังรถไฟในแนวตั้งและมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระโดดของล้อ



ภาพ 33 กราฟ (a) ความเร่งแนวตั้ง, (b) ความเร่งด้านข้าง, (c) การเร่งความเร็ว, (d) ความเร่งการกลิ้งของล้อ (29)

Huile Li (30) ได้ศึกษาการคำนวณความเค้นสะพานตามการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของ สะพานรถไฟคู่ พบว่าการเกิดความเค้นภายใต้แรงกระทำของยานพาหนะมีความสำคัญต่ออายุการใช้งานของสะพานจึงต้องมีการระบุตำแหน่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้าง ในการทดลองจะเป็นการนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยจะใช้อยู่ 3 วิธีคือ วิธีเชิงเส้น, วิธีแรงเคลื่อนที่ และวิธีการที่ นำเสนอ(การวิเคราะห์การสั่นพ้อง) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดสอบคือ ความเร็วของรถไฟขณะ วิ่งผ่านและความผิดปกติของทางรถไฟ จากการเปรียบเทียบจะได้ คือ

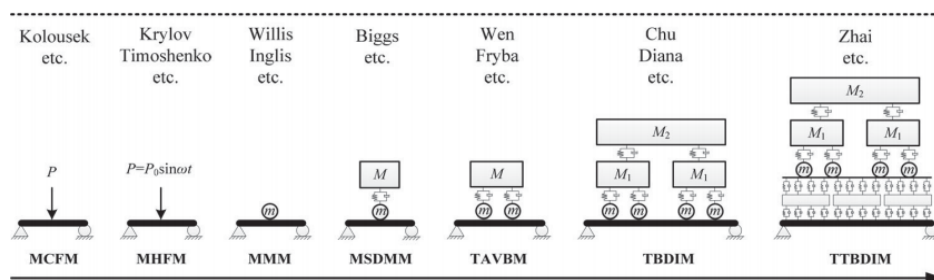
วิธีการที่นำเสนอ(การวิเคราะห์การสั่นพ้อง) สามารถตรวจสอบผลกระทบเชิงพลศาสตร์ในระบบได้ดีกว่า โดยวิธีการที่นำเสนอสามารถพิจารณาความเครียดที่เกิดขึ้นจริงได้ใกล้เคียงและละเอียด กว่า 2 วิธีที่นำมาเปรียบเทียบ

วิธีที่นำเสนอสามารถวิเคราะห์แรงที่เกิดจากความผิดปกติของทางรถไฟได้ (ซึ่งมีผลต่อความเค้นของราง) โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบของความผิดปกติของทางรถไฟ จะทำให้ข้อมูลรายละเอียดของการตอบสนองต่อความเครียดเชิงพลศาสตร์ของสะพานลดลง ซึ่งอาจมีความสำคัญต่อการประเมิน ความล้าของสะพาน การบำรุงรักษาและการปรับปรุงประสิทธิภาพของสะพาน

วิธีการที่นำเสนอสามารถพิจารณาการสั่นสะเทือนด้านข้างที่เกิดจากรถไฟขณะวิ่งผ่านได้ โดยแรงกระทำด้านข้างไม่ควรมองข้ามในการวิเคราะห์ความเครียดเชิงพลศาสตร์ของสะพาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความแข็งตามขวางของโครงสร้างต่ำ

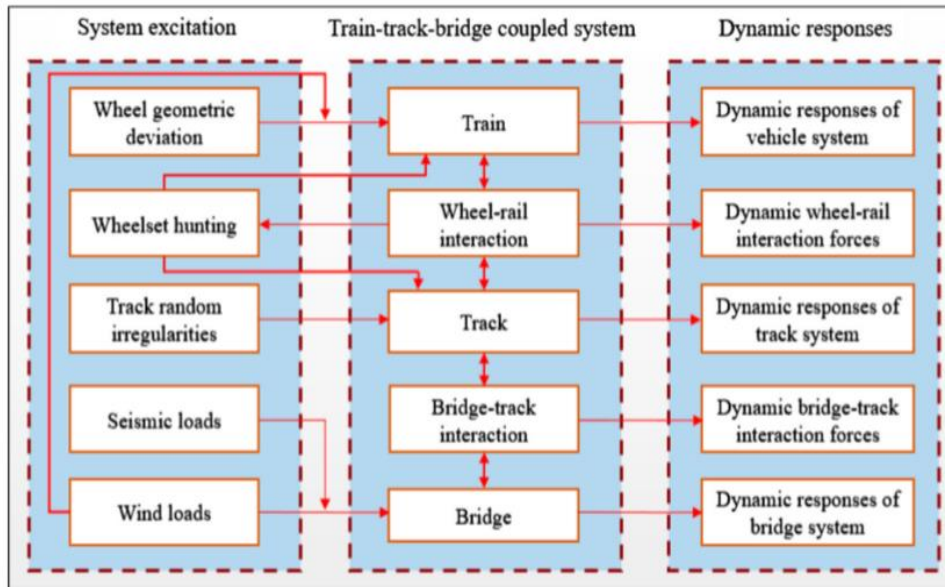
ข้อแนะนำสำหรับวิธีการนี้คือ: ประสิทธิภาพการคำนวณของวิธีการที่นำเสนอจะต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเมื่อตรวจสอบความเครียดของสะพาน เช่น ในแต่ละชั้นส่วนของสะพาน เป็นต้น ประสิทธิภาพของแบบจำลอง FE สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของวิธีการอย่างมีนัยสำคัญ

Wanming Zhai (30) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์ระหว่างรถไฟ-รางและสะพานซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของรถไฟ - ราง - สะพาน โดยทำการปรับปรุงและพัฒนาจากแบบจำลองโดยรวมแบบจำลองที่ได้รับการสนับสนุนโดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของแต่ละส่วนของระบบรถไฟ-รางและสะพาน การรวมแบบจำลองที่มีรายละเอียดและวิวัฒนาการของแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟกับสะพานที่เกิดผลลัพธ์เชิงพลศาสตร์ขึ้นโดยเริ่มจากเคลื่อนย้ายแรงค้ำที่ที่ง่ายที่สุดไปจนถึงรูปแบบปฏิสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์ ระหว่างรถไฟ- ราง - สะพาน (Train Track Bridge dynamic interaction)



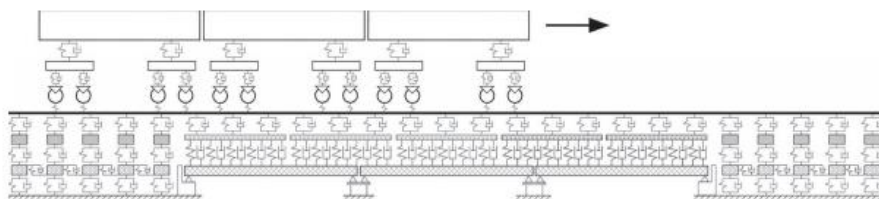
ภาพ 34 การพัฒนาของแบบจำลอง (31)

วิธีการสร้างแบบจำลองขององค์ประกอบหลักใน TTBDIM มีปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นตัวกระตุ้นทั้งความผิดปกติของโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายในระบบและแรงกระตุ้นภายนอกที่กระทำต่อชิ้นส่วนหลักของแบบจำลอง ชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อหรือสัมผัสกันจะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันแล้วเกิดผลลัพธ์เชิงพลศาสตร์ขึ้น



ภาพ 35 องค์ประกอบของแบบจำลอง TTBDIM (31)

ลักษณะการส่งผ่านแรงกระทำระหว่างล้อและรางรวมถึงแรงกระทำระหว่างทางรถไฟและสะพาน แรงกระทำเชิงพลศาสตร์ของตัวรถไฟจะส่งถ่ายแรงลงบนตัวแคร่ (Bogie) แล้วส่งผ่านไปยังรางและถ่ายลงไปที่หมอนรองราง (Sleeper) จากนั้นสุดท้ายก็ส่งไปยังชั้นพื้นของสะพาน (bridge deck) เป็นผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของทางรถไฟและสะพาน ในทางกลับกันการสั่นสะเทือนและการเสี้ยวรูปของสะพานส่งผลกระทบต่อ การสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟ เมื่อแรงที่เกิดจากการสัมผัสของล้อกับรางเปลี่ยนไปจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมแบบไดนามิกของระบบรถไฟ จากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า รถไฟ-ราง-สะพาน เมื่อมีแรงมากระทำจะเกิดการส่งถ่ายแรงไปยังส่วนต่าง ๆ ในทางตรงกันข้ามถ้าส่วนที่รับแรงกระทำส่วนใดส่วนหนึ่งมีปัญหา ก็เกิดผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ ไปด้วยในเวลาเดียวกัน เช่น เมื่อเพิ่มความเร็วของรถไฟจะเกิดความเร็วในการเคลื่อนที่บนรางรถไฟและสะพานที่มากขึ้น อาจทำให้เกิดการโต้ตอบแบบไดนามิกที่รุนแรง ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการวิ่งและความสะดวกสบายในการขับขี่ของรถไฟขณะวิ่งผ่านสะพาน

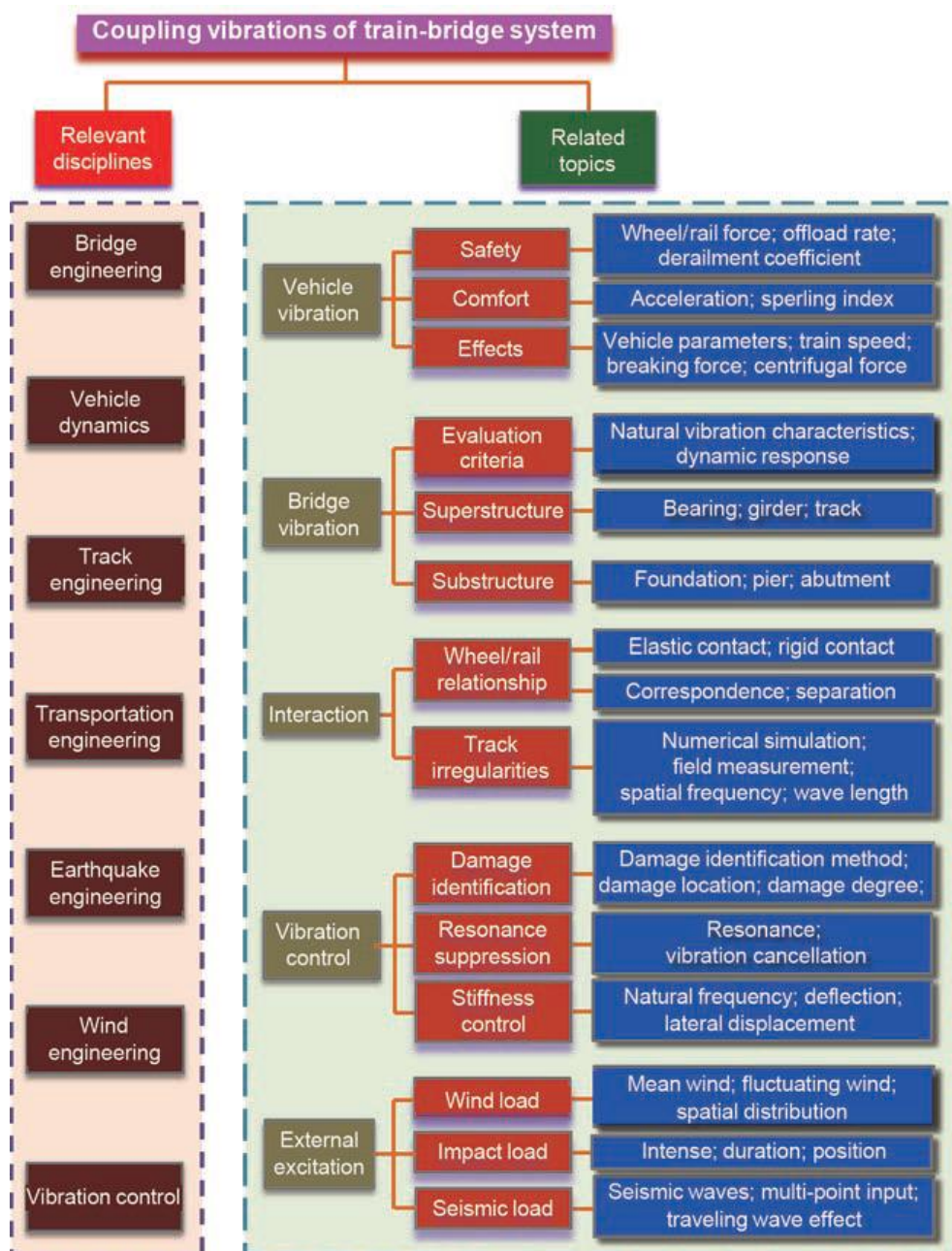


ภาพ 36 แบบจำลองการถ่ายแรงแบบไดนามิก (31)

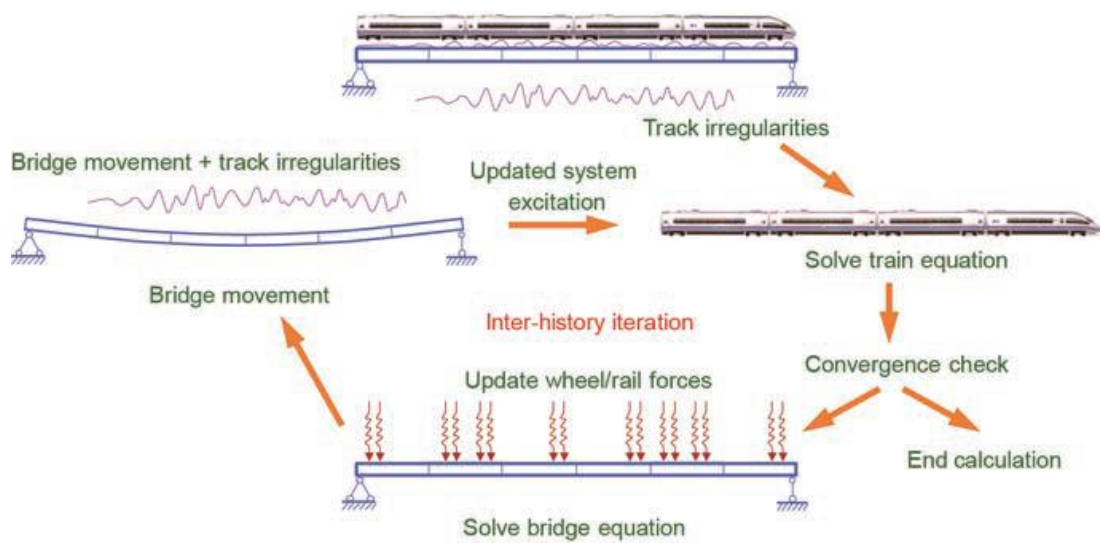
ความสำคัญของการสร้างแบบจำลอง (TTBDIM) แสดงให้เห็นถึงความละเอียดของการสัมผัสระหว่างล้อและรางและสามารถแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟกับสะพานเพื่อสามารถวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ได้อย่างแม่นยำและมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบแบบจำลองเพื่อประเมินความปลอดภัยและการตรวจสอบประสิทธิภาพระยะยาวของระบบรถไฟ - ราง - สะพาน ภายใต้การกระตุ้นต่าง ๆ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีปฏิสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์ระหว่างรถไฟ - ราง - สะพาน ในทางปฏิบัติใช้ในการประเมิน ปัญหาการสั่นสะเทือนของสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการใช้งานระบบขนส่งทางรางและความถี่ธรรมชาติที่เกิดจากรถไฟ

Nan Zhang, Yuan Tian, He Xia, (32) ปัญหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟกับสะพาน เริ่มต้นด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีทางรถไฟและต้องมีวิธีการประเมินผลสำหรับการออกแบบสะพานเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยและความมั่นคงของสะพานและรถไฟวิ่ง ปัญหานี้ศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีการจำลองเชิงตัวเลขและการศึกษาเชิงทดลอง ในระบบปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกของสะพานรถไฟที่เสนอในบทความนี้รูปแบบของยานพาหนะรถไฟถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการพลศาสตร์ของร่างกายที่แข็งตัวแบบจำลองของสะพานถูกสร้างขึ้นโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อ / รางแนวตั้งและด้านข้าง สมมติฐานที่สอดคล้องกันและทฤษฎีการคืบคลาน Kalker เชิงเส้นตามลำดับ ความผิดปกติของแท่งการเปลี่ยนรูปโครงสร้างโพลดลอมแรงปะทะของโครงสร้างความเสียหายโครงสร้างการขจัดฝุ่นและการทำงานของแผ่นดินไหวถือเป็นการกระตุ้นระบบ ระบบการตอบโต้แบบไดนามิกของสะพานรถไฟถูกแก้ไขโดยการวนซ้ำระหว่างประวัติศาสตร์ กรณีสึกษาการตอบสนองแบบไดนามิกของรถไฟความเร็วสูง CRH380BL ที่วิ่งผ่านสะพานออกแบบมาตรฐานในประเทศจีน การตอบสนองแบบไดนามิกของยานพาหนะและของระบบย่อยสะพานจะได้รับความเร็วตั้งแต่ 200 กม./ชม. ถึง 400 กม./ชม. และวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

สะพานรถไฟแบบ box girder รองรับ 2 เลน ความยาวสะพาน 32.7 ม. จำนวน 10 ช่วง ใช้รถไฟ CRH380BL จำนวน 16 ตู้ โดยจะเรียงระบบแบบ MTMTTMTM 2 ชุดต่อกัน โดย M = มีชุดขับเคลื่อนใต้ตู้ T คือตู้พ่วง ใช้ความเร็ว 200 ถึง 400 กม/ชม. วัดการสั่นกลางสะพานที่ 6 ทั้งแนวตั้ง และด้านข้าง



ภาพ 37 ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกสะพานรถไฟ (32)



ภาพ 38 ขั้นตอนสำหรับการทำซ้ำระหว่างประวัติ (32)

มีการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เชิงพลวัตสำหรับระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟกับสะพานและเสนอวิธีการแก้ปัญหา: ยานพาหนะรถไฟถูกสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการพลศาสตร์ของร่างกายที่แข็งแกร่งระบบย่อยของสะพานจะถูกจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และแนวล้อ / รางปฏิสัมพันธ์ด้านข้างจะถูกจำลองด้วยสมมติฐานที่สอดคล้องกันและโดยทฤษฎีครีพเคอเรลเชิงเส้นตามลำดับ ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานรถไฟถูกแก้ไขโดยการวนซ้ำระหว่างประวัติศาสตร์กรณีศึกษามุ่งเน้นไปที่การตอบสนองแบบไดนามิกของรถไฟ CRH380BL ที่วิ่งผ่านสะพานออกแบบมาตรฐานในระบบรถไฟความเร็วสูงของจีน พบว่ากองกำลังแนวตั้งและด้านข้างของล้อ / รางเพิ่มขึ้นตามความเร็วรถไฟขณะที่ยานพาหนะสูงสุดและการตอบสนองของสะพานเปลี่ยนไปในความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนเนื่องจากเสียงสะท้อนระหว่างรถยนต์และระบบย่อยของสะพาน มีความเป็นไปได้ที่จะมีการสั่นพ้องด้านข้างของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะแบบไดนามิกระหว่าง 275 กม./ชม. และ 300 กม./ชม. ขณะที่ไม่มี การสั่นพ้องของคลื่นในทิศทางแนวตั้งสำหรับกรณีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดสอบภาคสนาม

เนื่องจากการทดสอบครั้งนี้จะเลือกทดสอบสะพานรถไฟทั้งหมด 2 ตัว เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทางภาคสนาม ซึ่งเป็นสะพานแบบกล่อง (Box Girder) ขนาด 35.5 ม. เพื่อเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์สะพานรถไฟอีกต่อไป โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1. การติดตั้งเครื่องตรวจวัด (Instrument Installation)

1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

1.1.1 Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเร่งของการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยอาศัยหลักการที่เมื่ออุปกรณ์เกิดการสั่นไหวจะทำให้วงจรไฟฟ้าที่อยู่ภายในอุปกรณ์มีค่าความต้านทานหรือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงประเมินค่าความเร่งจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ดังกล่าว อุปกรณ์ Accelerometer จะใช้ในการวัดระดับการสั่นไหวและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง



ภาพ 39 Accelerometer ที่ใช้ในการตรวจวัด

1.1.2 Lvdt (Linear Variable Displacement Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการเสียดรูป โดยวัดค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง อาศัยการเคลื่อนตัวเข้า - ออกของการตรวจวัด (Rod) ที่สัมผัสกับโครงสร้างที่ต้องการทราบค่าการเคลื่อนที่ กำหนดให้เครื่องหมายลบเมื่อ

ระยะแอนตัวลงในแนว แกน Z ของโครงสร้าง เครื่องหมายบวกเมื่อระยะแอนตัวขึ้นในแนว แกน Z ของโครงสร้าง



ภาพ 40 Lvdv ที่ใช้ในการตรวจวัด

1.1.3 อุปกรณ์ Data Logger ชนิดไร้สายสำหรับบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บและแปลงข้อมูลจาก จากเซ็นเซอร์เข้ามาในรูปของสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งต่อไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล



ภาพ 41 อุปกรณ์ Data Logger ที่ใช้ในการตรวจวัด

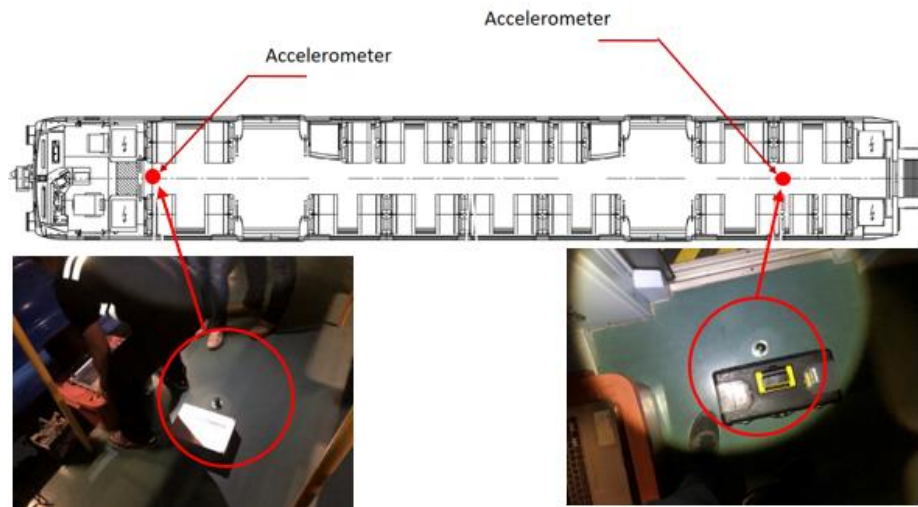
1.1.4 Trigger เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับระบุเวลาในช่วงที่ทำการทดสอบในจุดที่สนใจหากเวลาใดเวลาหนึ่งมีความสำคัญก็จะใช้อุปกรณ์นี้ เพื่อกำหนดจุดที่สนใจในการทดสอบ โดยอุปกรณ์นี้มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ และ 3 โวลต์ โดยปกติถ้าไม่มีเหตุการณ์สำคัญหรือจุดที่สนใจอุปกรณ์นี้จะมีค่าความต่างศักย์เป็น 2 โวลต์ หากมีเหตุการณ์ที่สนใจผู้ทำการทดสอบจะกดปุ่ม Trigger อุปกรณ์นี้จะมีค่าความต่างศักย์มาเป็น 3 โวลต์



ภาพ 42 อุปกรณ์ Trigger ที่ใช้ในการตรวจวัด

2. การติดตั้งบนสะพาน

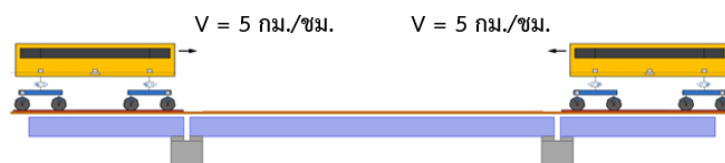
ในการติดตั้งเครื่องตรวจวัด (Sensors) จะติดตั้งทั้งหมด 2 ชนิด คือเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) 3 แกน จำนวน 1 ตำแหน่ง จะติดตั้งบริเวณตรงกลางสะพานและเครื่องตรวจวัดการแอ่นตัวของสะพาน (Linear Variable Differential Transformer) จำนวน 2 ตำแหน่ง จะติดตั้งบริเวณกึ่งกลางสะพานแต่เอียงไปทางขวาและซ้ายข้างละ 1.025 ม. ดังภาพ 43



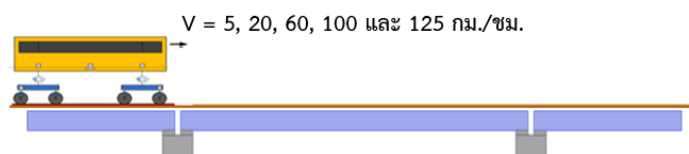
ภาพ 44 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง 3 แกนบนรถไฟ

4. ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งเป็นการทดสอบ 2 แบบ (ภาพ 45) คือ การทดสอบแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-Static) จะทดสอบโดยใช้รถไฟ 2 ขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 กม./ชม. สวนกันบริเวณกึ่งกลางสะพาน และการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic) จะใช้รถไฟเพียง 1 ขบวน เนื่องจากด้านความปลอดภัยและการควบคุมให้รถไฟสวนกันบริเวณกึ่งกลางสะพานในความเร็วสูงเป็นการยาก ในการทดสอบแบบพลวัตจะใช้ความเร็ว 5, 60, 100 และ 125 กม./ชม. ในการทดสอบ



(ก)



(ข)

ภาพ 45 รูปแบบการทดสอบสะพาน ก) แบบที่ 1 การทดสอบแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-Static)
ข) แบบที่ 2 การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic)

5. ผลการค่าความเร็วในการทดสอบสะพาน

ในการวางแผนการทดสอบ ได้กำหนดเป้าหมายให้สามารถตรวจวัดพฤติกรรมของสะพานภายใต้การใช้งานปกติของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ รวมทั้งรูปแบบการทดสอบซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน UIC 776-2R โดยทำการจัดวางน้ำหนักรถไฟเพื่อให้เกิดการตอบสนองสูงสุดบนสะพาน ทั้งนี้รูปแบบการเดินรถและความเร็วระหว่างทดสอบจริงเป็นไปตามตาราง 3

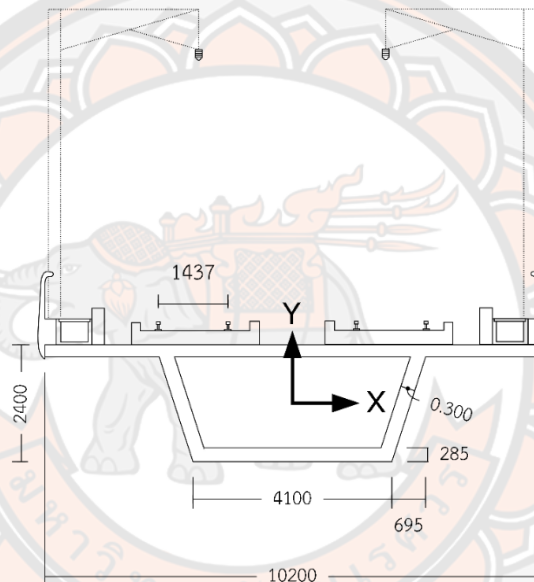
ตาราง 3 รูปแบบและความเร็วของการเดินรถระหว่างทำการทดสอบ

รูปแบบการทดสอบ	ความเร็ว (กม./ชม.)		ทิศทางการวิ่งของรถไฟ
	สะพานที่ 1	สะพานที่ 2	
2 Cars	5.99	5.52	Both Track
2 Cars	5.60	5.68	Both Track
1 Car	6.18	6.16	Ahead East : East Bound Track
1 Car	5.32	6.07	Ahead West : East Bound Track
1 Car	62.54	59.41	Ahead East : East Bound Track
1 Car	58.8	58.21	Ahead West : East Bound Track
1 Car	104.05	100.64	Ahead East : East Bound Track
1 Car	100.68	100.04	Ahead West : East Bound Track
1 Car	113.46	126.58	Ahead East : East Bound Track
1 Car	125.64	126.50	Ahead West : East Bound Track

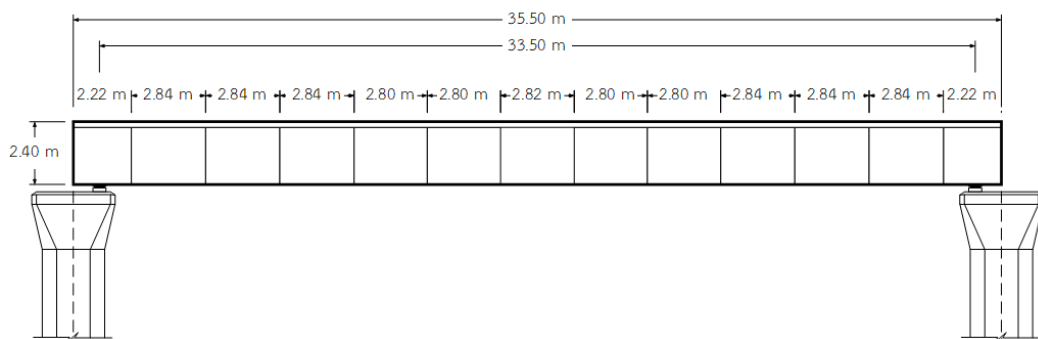
การพัฒนาแบบจำลองสะพานและรถไฟ

1. ระบบโครงสร้างสะพานรถไฟ

แบบจำลองสะพานรถไฟเป็นสะพานแบบกล่อง (Box Girder) แบบคานช่วงเดียว (Simple Beam) ที่มีขนาด 35.5 ม. เนื่องจากสะพานรูปแบบดังกล่าวมีการติดตั้งและใช้งานเป็นส่วนมากตลอดทั้งโครงการฯ โดยมีมิติด้านหน้าและด้านข้าง (ดังแสดงภาพ 46 และภาพ 47 ตามลำดับ) จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า มีขนาดหน้าตัด (Area) มวล (Mass) โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ตามตาราง 4



ภาพ 46 ขนาดหน้าตัดสะพาน



ภาพ 47 รูปแบบการติดตั้งของตัวสะพานกับตอม่อ

ตาราง 4 ค่าคุณสมบัติของหน้าตัดสะพานและน้ำหนักของสะพานที่มีความยาว 35.5 ม.

คุณสมบัติของสะพาน	ข้อมูล
พื้นที่ (ตร.ม.)	4.86
โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน x (I_x , ม. ⁴)	3.89
โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน y (I_y , ม. ⁴)	30.99
น้ำหนักสะพาน (ตัน)	414.07
น้ำหนักส่วนบนของสะพาน (ตัน)	277.80
น้ำหนักโดยรวม (ตัน)	691.87

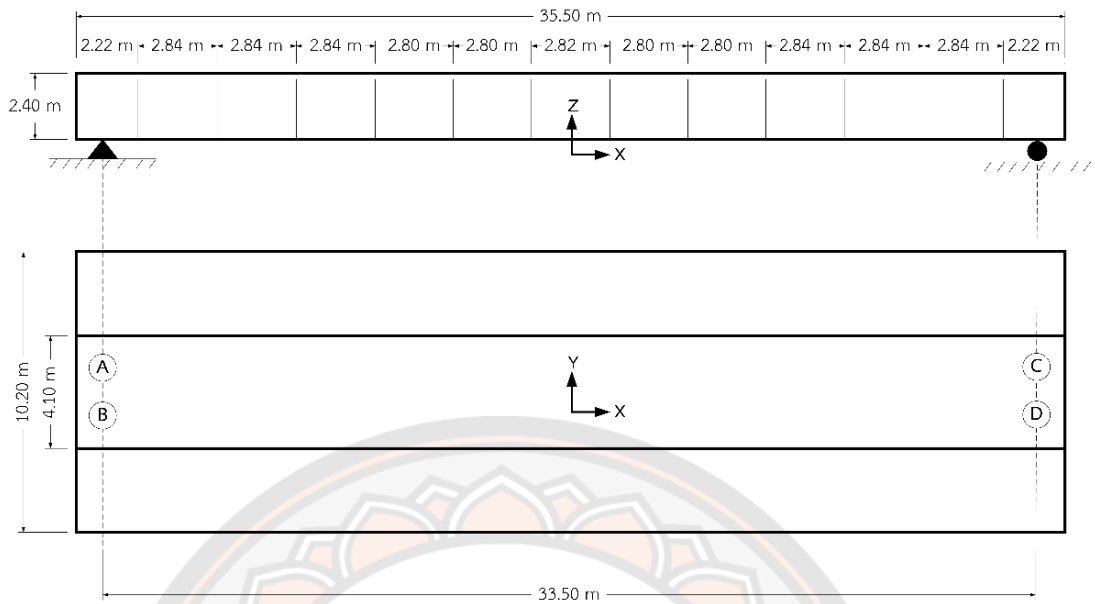
ระบบของโครงสร้างสะพานจะถูกจำลองโดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้ชิ้นส่วนชนิด Shell Element และปรับแก้แบบจำลองให้มีคุณสมบัติเบื้องต้นตามตาราง 4 โดยภาพ 49 แสดงตัวอย่างแบบจำลองสะพานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ส่วนตำแหน่งรองรับจะจำลองตามพฤติกรรมการติดตั้งของสะพานจะมีทั้งหมด 4 จุด ดังตาราง 5 และภาพ 49

สำหรับขั้นตอนตรวจสอบและพัฒนาความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง จะดำเนินการโดยนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์และปรับปรุงแบบจำลองให้มีผลความถี่ธรรมชาติและระยะใกล้ตัวกลางสะพานในสภาพสถิตย์ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับผลการทดสอบ โดยการปรับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

ตาราง 5 อธิบายพฤติกรรมของจุดรองรับทั้ง 4 จุดบนสะพานรถไฟ

ตำแหน่งจุดรองรับ	การเคลื่อนที่ตามแกน		
	X	Y	Z
A	0	1	0
B	0	0	0
C	1	1	0
D	1	0	0

หมายเหตุ: 0 = ไม่สามารถการเคลื่อนที่ได้ 1 = สามารถเคลื่อนที่ได้



ภาพ 48 อธิบายตำแหน่งจุดรองรับบนสะพานทั้ง 2 สะพาน

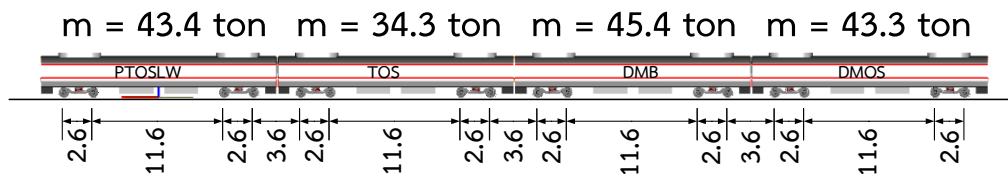


ภาพ 49 ตัวอย่างรูปร่างของแบบจำลองสะพานแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
(Finite Element Method)

2. ระบบตัวรถไฟ

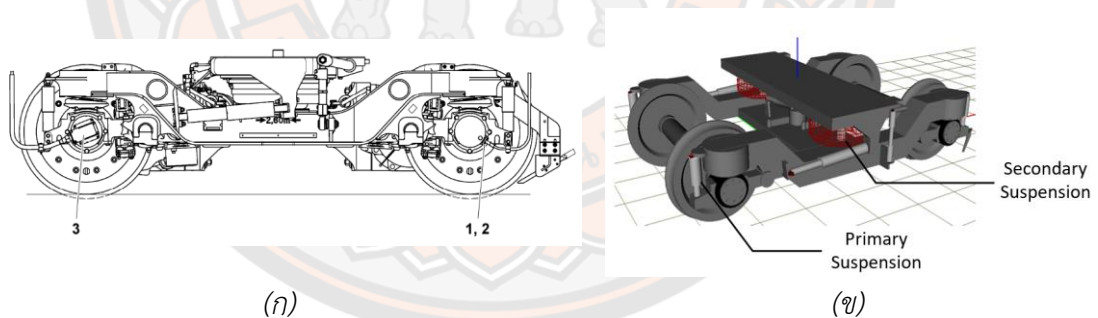
การพัฒนาแบบจำลองรถไฟจะใช้รถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ชนิด Express Line เป็นต้นแบบการจำลอง รถไฟชนิดนี้มีตู้โดยสารทั้งหมด 4 ตู้ 8 แคร่ แต่ละตู้มีน้ำหนักอยู่ประมาณ 40 ตัน ดังภาพ 50 จะมีระยะห่างของล้อใน 1 แคร่เท่ากับ 2.6 ม. ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางแคร่ถึงกึ่งกลาง

แคร่ใน 1 ตู้โดยสาร เท่ากับ 14.2 ม. และระยะห่างระหว่างตู้โดยสาร 2 ตู้ เมื่อเทียบกึ่งกลางแคร่ท้ายของตู้โดยสารแรกถึงกึ่งกลางแคร่แรกของตู้โดยสารที่สองเท่ากับ 6.2 ม.

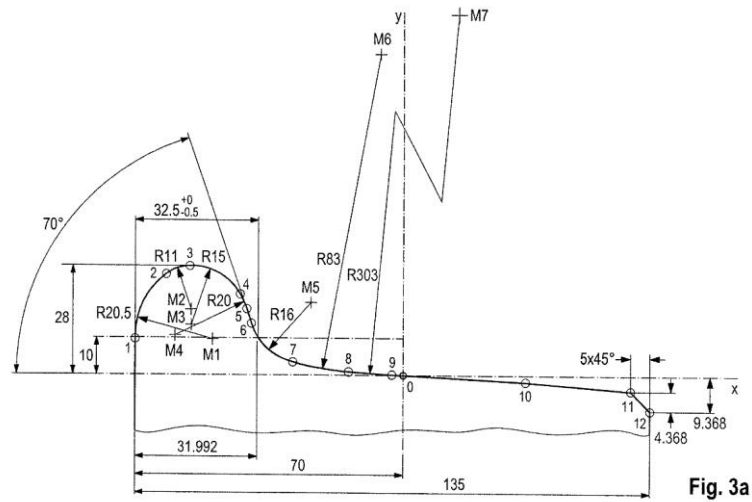


ภาพ 50 ระยะห่างระหว่างเพลาและน้ำหนักของแต่ละตู้ของรถไฟแอร์พอร์ตลิงก์ชนิด Express Line

แคร่ของรถไฟของโครงการฯ มีลักษณะคือมีชุดสลายพลังงานหลัก 2 ชุดคือชุดแรกอยู่ระหว่างล้อถึงแคร่ (Primary Suspension) ที่ประกอบด้วยสปริง (Spring) และชุดสลายพลังงาน (Damper) ส่วนชุดที่สองอยู่ระหว่างตัวแคร่ถึงตัวรถไฟ (Secondary Suspension) ใช้แบบถุงลม (Air Spring) ดังภาพ 51 และตัวล้อรถไฟจะใช้ S1002 ดังภาพ 52

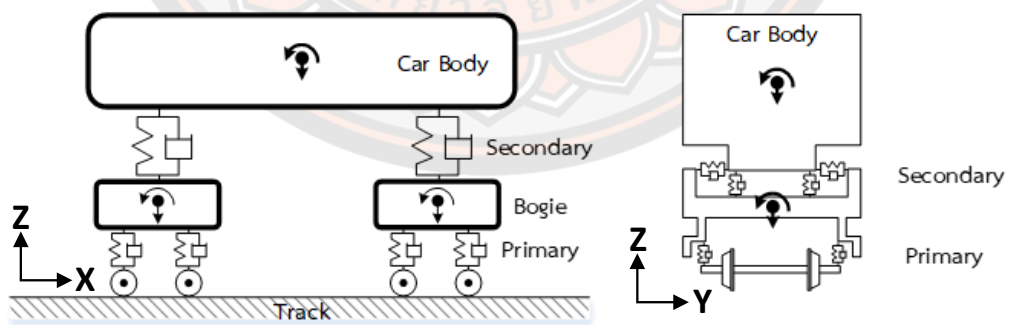


ภาพ 51 ก) แบบแคร่จากแบบรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ข) แบบจำลองรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์



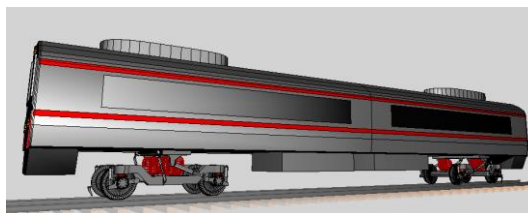
ภาพ 52 ลักษณะของล้อรถไฟไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ แบบ S1002

การจำลองพฤติกรรมของตัวรถไฟจะใช้แบบจำลองมัลติบอดี้ (Multibody Simulation Method) โดยตัวรถไฟ แคร่ และล้อ จะมีการเคลื่อนที่อิสระทุกทิศทาง (6 Degrees of Freedom) ระหว่างตัวรถไฟกับแคร่จะเชื่อมต่อโดยชุดสลายพลังงานที่จำลองเป็นสปริง (Spring) และแดมเปอร์ (Damper) รับแรงสองแกนคือแนวตั้ง (แกน Z) และด้านข้าง (แกน Y) ส่วนระหว่างแคร่กับชุดล้อจะเชื่อมต่อโดยชุดสลายพลังงานที่จำลองเป็นสปริง (Spring) และแดมเปอร์ (Damper) รับแรงหนึ่งแกนคือแนวตั้ง (แกน Z) โดยมีแผนผังแบบจำลองดังภาพ 53



ภาพ 53 ลักษณะแบบจำลองระบบทางพลศาสตร์ของรถไฟ (8)

จากการเก็บข้อมูลลักษณะพื้นฐานของชิ้นส่วนรถไฟ นำมาทำแบบจำลองรถไฟไฟฟ้าโดยใช้วิธีจำลองแบบมัลติบอดี้ (Multibody) โดยมีคุณสมบัติของชิ้นส่วนรถไฟตามข้อมูลทางโครงการฯ มอบให้ แบบจำลองที่ได้นำไปวิเคราะห์และปรับปรุงแบบจำลองให้มีผลความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับผลการทดสอบ



ภาพ 54 ตัวอย่างรูปร่างของแบบจำลองรถไฟด้วยแบบจำลองรถไฟแบบมัลติบอดี้ (Multibody)

3. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน (Train-Bridge Interaction)

ขณะที่รถไฟแล่นผ่านสะพานจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นต่อทั้งตัวรถไฟเองรวมทั้งสะพาน โดยมีทั้งสองระบบจะมีการเชื่อมต่อกันผ่านจุดสัมผัสระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Contact Points) พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของทั้งสองระบบจะส่งผลซึ่งกันและกัน (Interaction) จากการส่งผ่านแรงกระทำระหว่างล้อและราง โดยการจำลองพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ของรถไฟและสะพานจะมีการสร้างสมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (2) (5)

$$\begin{bmatrix} M_t & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_t \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_t & C_{tb} \\ C_{bt} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_t \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_t & K_{tb} \\ K_{bt} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_t \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_t \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

M คือ เมตริกซ์มวลของระบบ (Mass Matrix)

C คือ เมตริกซ์แดมเปอร์ของระบบ (Damper Matrix)

K คือ เมตริกซ์สติฟเนสของระบบ (Stiffness Matrix)

F คือ เวกเตอร์ของแรงต่างๆ ที่กระทำต่อระบบ

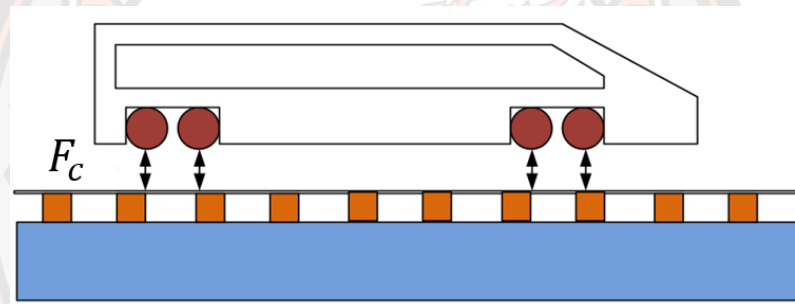
t, b และ tb หมายถึงเทอมที่เกี่ยวข้องกับ รถไฟ สะพาน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองระบบ ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม การนำสมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์ยังมีความยุ่งยาก เนื่องจากเมื่อรถไฟมีการเคลื่อนไปบนตำแหน่งต่าง ๆ ของสะพานนั้น จะทำให้ค่าเมตริกในเทอมที่เกี่ยวข้องกันของสองระบบ (tb) มีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ตลอดเวลา

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงทำการแยกระบบออกจากกัน (Decoupling) โดยทำการเปลี่ยนเทอม tb ให้อยู่ในรูปของแรงกระทำระหว่างล้อและราง (Wheel-Rail Contact Force, F_C) ดังภาพ 55 ซึ่งจะทำให้สามารถแยกสมการของระบบรถไฟและสะพานออกเป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยมีตัวแปรที่ใช้ร่วมกันคือ เวกเตอร์ F_C ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t = F_t + F_C \quad (3)$$

$$M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = F_b - F_C \quad (4)$$



ภาพ 55 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน

การคำนวณค่าแรงกระทำระหว่างล้อและราง (F_C) ได้ใช้เทคนิควิธี FASTSIM ของ Kalker (21) ที่มีการคำนึงถึงแรงกดในแนวตั้งแนวด้านข้าง รวมทั้งการคืบ (Creepage) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของล้อและรางขณะรถไฟกำลังเคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน

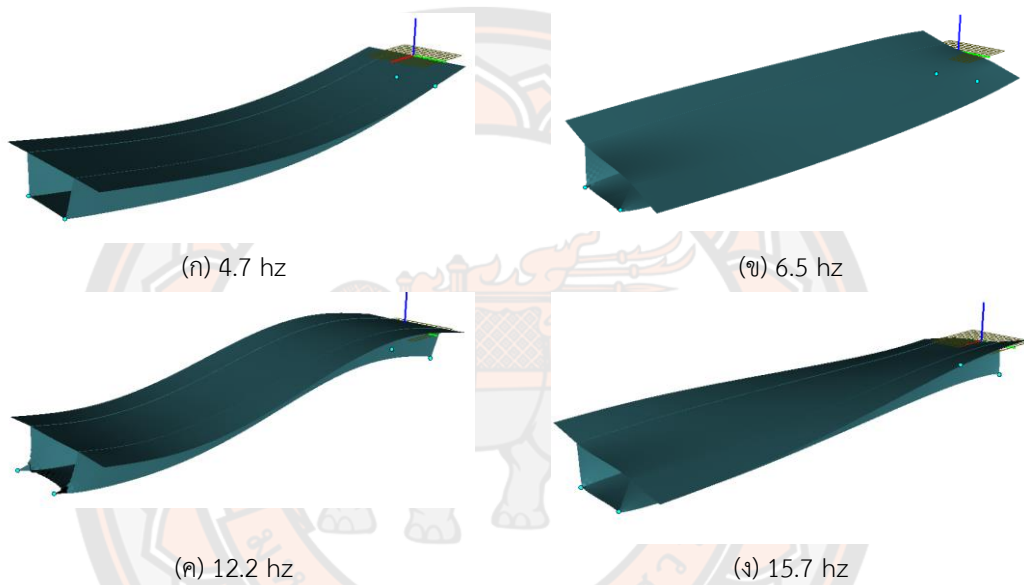
การสอบเทียบแบบจำลองและการทดสอบ

1. ระบบสะพาน (Bridge)

ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามของค่าความเร่งและการโก่ง ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของของโหมดที่ 1 (Bending Mode) พบว่ามีค่าประมาณ 4.76 Hz และ 4.67 Hz ของสะพานตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองดังภาพ 56 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตาราง 6 และตาราง 7



ภาพ 56 ขณะการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานรถไฟทอนรถไฟกำลังวิ่งผ่าน



ภาพ 57 ค่าความถี่ธรรมชาติและ Mode Shapes ของแบบจำลองสะพาน FEM

ตาราง 6 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานระหว่างผลการตรวจวัดและแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

สะพาน	ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 (Bending mode, Hz)		
	ผลจากการตรวจวัด	ผลจากแบบจำลอง	ร้อยละความแตกต่าง (%)
สะพานที่ 1	4.76	4.7	1.26
สะพานที่ 2	4.67	4.7	0.64

ตาราง 7 เปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของสะพานระหว่างผลการตรวจวัดและแบบจำลองระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

สะพาน	ค่าการโก่งตัวของสะพานต่อรถไฟ 1 ขบวน (ความเร็ว 5 กม./ชม.)		
	ผลจากการตรวจวัด	ผลจากแบบจำลอง	ร้อยละความแตกต่าง (%)
สะพานที่ 1	1.84	1.77	3.80
สะพานที่ 2	1.68	1.77	5.36

2. ระบบรถไฟ (Train)

ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลความเร่งและการเคลื่อนที่นำมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนโหมดหลักของรถไฟ ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ 1.36 Hz ส่วนของแบบจำลองได้ 1.64 Hz ซึ่งถือเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน (22, 23)

การวิเคราะห์แบบจำลองพร้อมประเมินผล

เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลองกับค่าการทดสอบจะทำการวิเคราะห์สะพานรถไฟในความเร็วต่างๆ จากความเร็วต่ำถึงความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์สามารถวิ่งได้ (180 กม./ชม.) โดยเริ่มจากความเร็ว 20 -180 กม./ชม. จะเพิ่มความเร็วทีละ 20 กม./ชม.

ในการวิเคราะห์จะเก็บค่าความเร่งและค่าการโก่งตัวของสะพานแต่ละความเร็ว เพื่อตรวจสอบค่าความปลอดภัยตามมาตรฐาน UIC 776-2R



ภาพ 58 ขณะการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานรถไฟทอนรถไฟกำลังวิ่งผ่าน

บทที่ 4

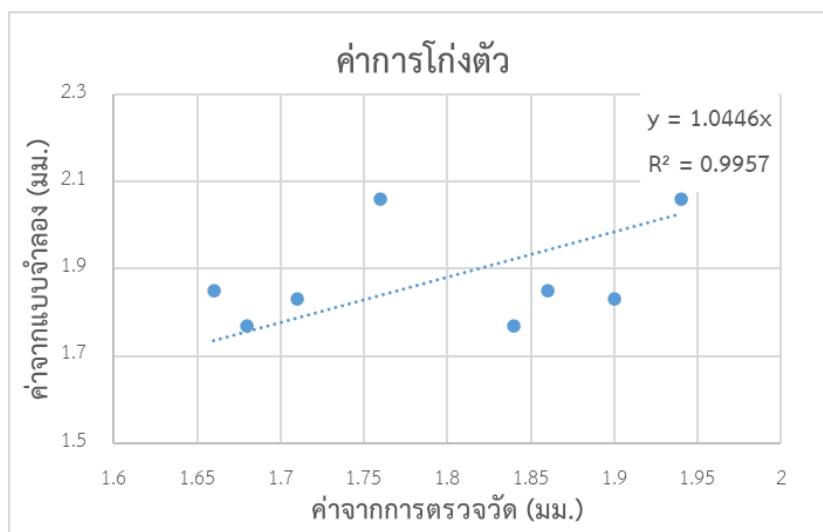
ผลการวิจัย

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการทดสอบ

ผลของการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการเก็บค่าการโก่งตัวของสะพานของเครื่องตรวจวัดการแอ่นตัวของสะพานในช่วงความเร็วที่ทดสอบพบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัดผ่านเครื่องตรวจวัดการแอ่นตัวของสะพาน โดยมีร้อยละความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.54-14.81 ดังตาราง 8 และเมื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) เท่ากับ 0.9957 ตามภาพ 59

ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการตรวจวัดจริงของค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพาน

ลำดับสะพาน	ความเร็ว (กม./ชม.)	ผลจากตรวจวัด (มม.)	ผลจากแบบจำลอง (มม.)	ร้อยละความ แตกต่าง (%)
สะพานที่ 1	5	1.84	1.77	3.8
	60	1.86	1.85	0.54
	100	1.9	1.83	3.75
	125	1.94	2.06	6.09
สะพานที่ 2	5	1.68	1.77	5.36
	60	1.66	1.85	9.94
	100	1.71	1.83	6.7
	125	1.76	2.06	14.81

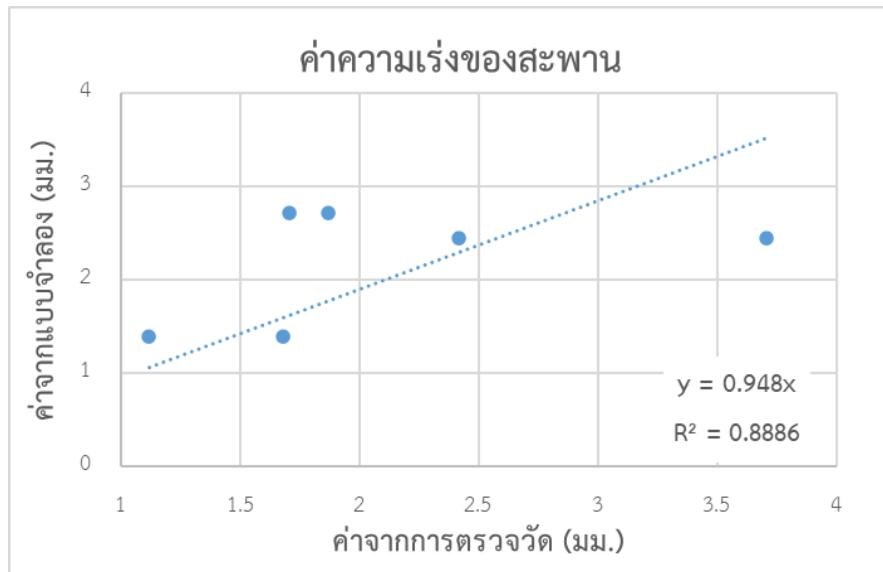


ภาพ 59 ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) จากผลการโก่งตัวกลางสะพาน

ผลการเปรียบเทียบวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการเก็บค่าความเร่งที่ได้จากการตรวจวัดของเครื่องมือวัดความเร่ง 3 แกน ในช่วงความเร็วที่ทดสอบ พบว่ามีความแปรปรวนค่อนข้างสูง โดยมีร้อยละความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.79-52.36 ดังตาราง 9 ทั้งนี้เนื่องมาจากในแบบจำลองไม่กำหนดค่าความขรุขระของรางและความไม่ปกติของทางวิ่งของสภาพทางจริง และเมื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) เท่ากับ 0.8886 ตามภาพ 60

ตาราง 9 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างรถไฟและสะพานกับการตรวจวัดจริงของค่าการความเร่งสูงสุดของสะพาน

ลำดับสะพาน	ความเร็ว (กม./ชม.)	ผลจากตรวจวัด (ม./วินาที ²)	ผลจากแบบจำลอง (ม./วินาที ²)	ร้อยละความ แตกต่าง (%)
สะพานที่ 1	60	1.12	1.39	19.61
	100	1.87	2.71	31.25
	125	2.42	2.44	0.79
สะพานที่ 2	60	1.68	1.39	20.98
	100	1.71	2.71	37.07
	125	3.71	2.44	52.36

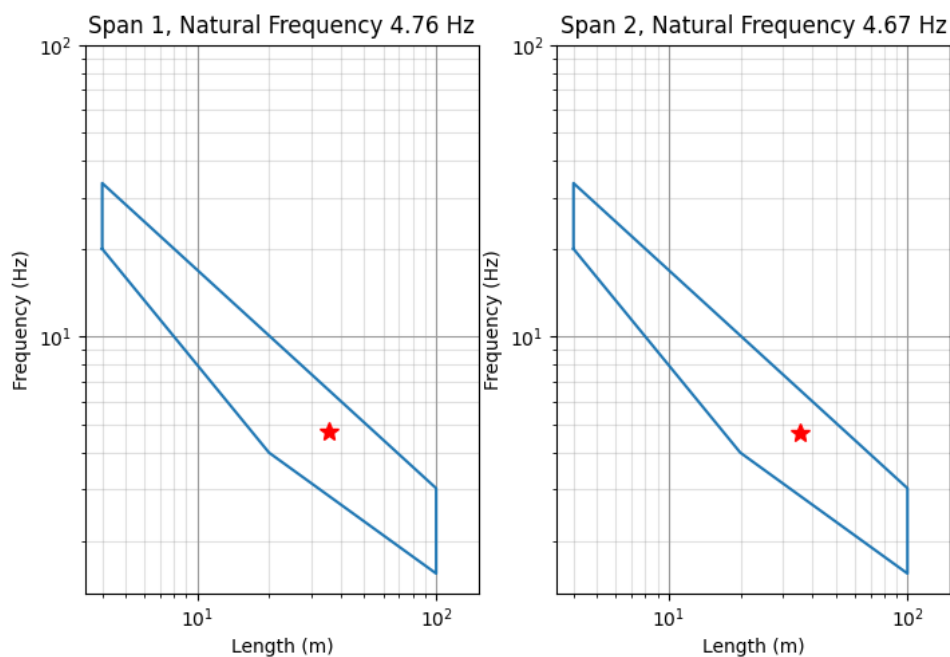


ภาพ 60 ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) จากผลการความเร่งตัวกลางสะพาน

การตรวจประเมินคุณภาพของสะพานรถไฟ

ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

ผลของความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการทดสอบพบว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานยาว 35.5 ม. มีค่าความถี่ธรรมชาติโหมด 1 (Bending mode) ประมาณ 4.76 Hz และ 4.67 Hz สะพานที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยผลของการตรวจสอบตามมาตรฐาน UIC 776-2R พบว่าสะพานทั้ง 2 ตัวยังอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดดังภาพ 61



ก

ข

ภาพ 61 ค่าความถี่ธรรมชาติเมื่อเทียบกับมาตรฐาน UIC 776-2R ก) สะพานที่ 1 ข) สะพานที่ 2

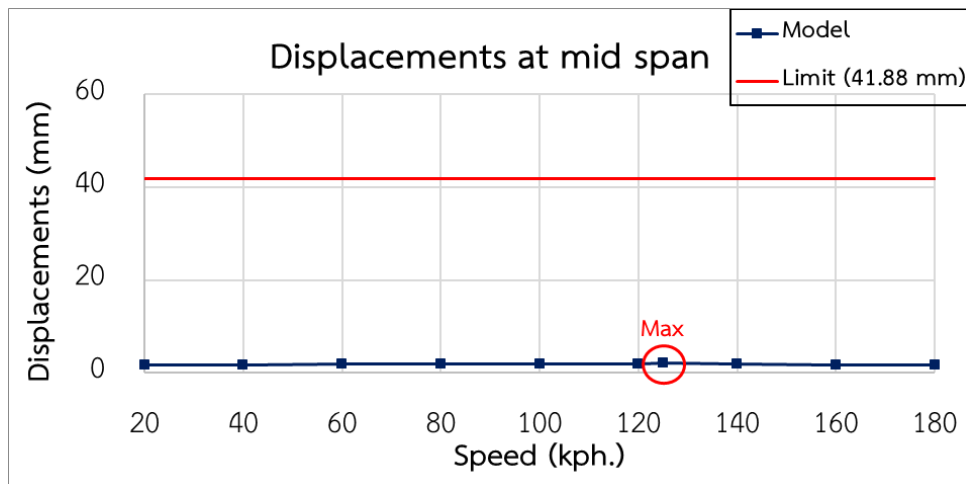
ค่าการแอ่นตัวของสะพาน (Mid-Span Vertical Deflection)

ค่าการโก่งตัวของสะพานจะแสดงถึงความแข็งแรงของสะพานทางมาตรฐาน UIC 776-2R ได้กำหนดค่าการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ

$$\text{Max Displacement} \leq L/800 \text{ (41.88 มม.)} \quad (5)$$

L = ความยาวของสะพานระหว่างจุดรองรับ

จากตาราง 10 ค่าแอ่นตัวสูงสุดตามมาตรฐาน UIC 776-2R ของสะพานความยาว 35.5 ม. (ความยาวของสะพานระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 33.5 ม.) มีค่าเท่ากับ 41.88 มม. และผลจากการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ (Bridge-Train Interaction) พบว่าค่าการโก่งตัวของสะพานมีค่าโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 2.06 มม. ที่ความเร็ว 125 กม./ชม. ยังเหลือช่วงความปลอดภัยเมื่อเทียบกับมาตรฐานร้อยละ 95.08 ดังภาพ 62



ภาพ 62 ค่าการโก่งตัวกลางสะพานต่อความเร็ว

ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวของสะพานและค่าร้อยละคงเหลือเทียบกับมาตรฐาน UIC 776-2R

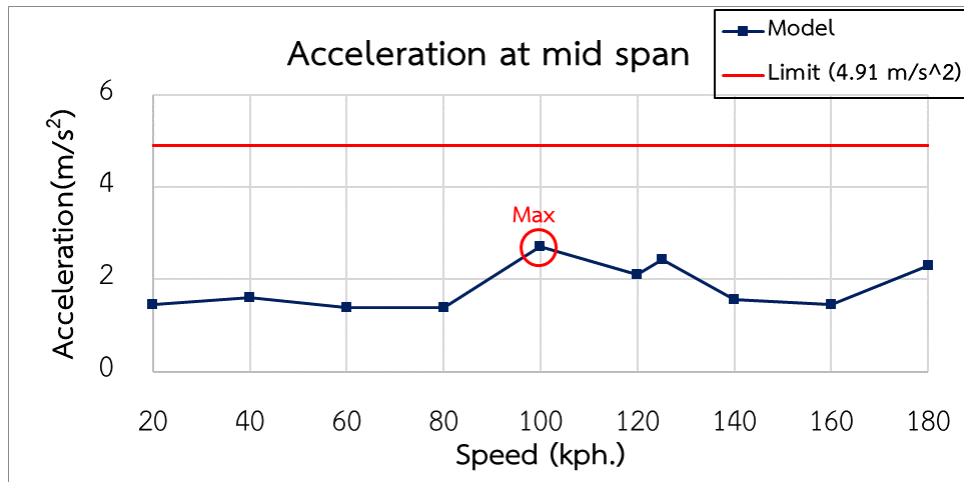
รายการ	ค่า
ค่าโก่งตัวสูงสุดที่มาตรฐาน UIC 776-2R กำหนด (มม.)	41.88
ค่าโก่งตัวจากการวิเคราะห์สูงสุด (มม.)	2.06 (125 กม./ชม.)
ร้อยละความปลอดภัยคงเหลือ	95.08

ค่าความเร่งกลางสะพาน (Mid-Span Vertical Acceleration)

ความเร่งของสะพานจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยทั้งตัวสะพานและตัวรถไฟ โดยมาตรฐาน UIC 776-2R ได้กำหนดค่าการความเร่งสูงสุดดังนี้

$$\text{Max Acceleration} \leq 0.5g \text{ (4.91 ม./วินาที}^2\text{)} \quad (6)$$

จากตาราง 11 ค่าความเร่งสูงสุดตามมาตรฐาน UIC 776-2R ได้ระบุข้อจำกัดของค่าการความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.5g (4.91 ม./วินาที²) และผลจากการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟ (Bridge-Train Interaction) พบว่าค่าความเร่งตัวของสะพาน มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 2.71 ม./วินาที² ที่ความเร็ว 100 กม./ชม. ยังเหลือช่วงความปลอดภัยเมื่อเทียบกับมาตรฐานร้อยละ 44.81 ดังภาพ 63



ภาพ 63 ค่าการความเร่งกลางสะพานต่อความเร็ว

ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์การความเร่งของสะพานและค่าร้อยละคงเหลือเทียบกับมาตรฐาน UIC

776-2R

รายการ	ค่า
ค่าความเร่งที่มาตรฐาน UIC 776-2R กำหนด (ม./วินาที ²)	4.91
ค่าความเร่งจากการวิเคราะห์สูงสุด (ม./วินาที ²)	2.71 (100 กม./ชม.)
ร้อยละความปลอดภัยคงเหลือ	44.81

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี้ที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจริงในสภาวะสถิตย์ (Static) แต่ในสภาวะพลวัต (Dynamic) ผลลัพธ์ที่ได้พบว่ามีค่าแปรปรวนค่อนข้างสูง อันอาจจะเนื่องมาจากปัจจัยภายนอก เช่น ความไม่สม่ำเสมอของทางวิ่ง ซึ่งหากมีการดำเนินการตรวจวัดและเก็บข้อมูลความผิดปกติของรางและทางวิ่งอาจจะช่วยให้สามารถปรับแก้แบบจำลองให้มีความแม่นยำได้มากยิ่งขึ้น

จากผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของกระบวนการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี้กับการทดสอบจริง พบว่า

ค่าการแอ่นตัวกลางสะพานของผลการวิเคราะห์กับการทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกันโดยร้อยละความแตกต่างสูงสุดเพียง 14.81

ค่าความเร่งกลางสะพานของผลการวิเคราะห์กับการทดสอบ มีความแปรปรวนสูงโดยมีค่าร้อยละความแตกต่างสูงสุดถึง 52.36

ผลการประเมินระดับความปลอดภัยของสะพานรถไฟโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ตามมาตรฐาน UIC 776-2R พบว่า

1. ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานรถไฟยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด
2. ค่าการโก่งตัวกลางสะพานยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด โดยมีค่าร้อยละความปลอดภัยคงเหลือเท่ากับ 95.08
3. ค่าความเร่งกลางสะพานยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด โดยมีค่าร้อยละความปลอดภัยคงเหลือของค่าความเร่งเท่ากับ 44.81

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความเร่งและค่าการโก่งตัวกลางสะพานจะมีค่าสูงที่ความเร็ว 100 และ 125 กม./ชม. ตามลำดับ ผลที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากความเร็วสูง (180 กม./ชม.) เนื่องมาจากพฤติกรรมของการสั่นพ้อง (Resonance) เพราะขณะรถไฟวิ่งผ่านสะพานจะเกิดแรงที่ล่อกระทำต่อสะพานแบบซ้ำจากล้อรถไฟที่มีจำนวนมากและมีระยะห่างของล้อที่คงที่ ทำให้เกิดความถี่ของแรงค่าหนึ่งที่จะแปรผันตามความเร็ว จากเหตุการณ์ข้างต้นพบว่าช่วงความเร็วที่ 100-125 กม./ชม.ทำให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าว

การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดีสามารถช่วยให้วิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวรถไฟและสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลองให้มีความแม่นยำ ดัชนีการวิจัยครั้งนี้ที่ยังขาดข้อมูลความไม่สม่ำเสมอของทางวิ่งในสภาพหน้างานจริง จึงอาจทำให้ค่าความเร่งกลางสะพานนั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. S. Zhu, "Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review," *Vehicle System Dynamics*, vol. 57, no. 7, pp. 984-1027, 2019.
2. Zhai W, Han Z, Chen Z, Ling L, Zhu S. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics*. 2019 Jul 3;57(7):984-1027.
3. D. Canteroa, & A. Rønnquist, "Numerical Evaluation of Modal Properties Change of Railway Bridges during Train Passage," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 2931-2936, 2017.
4. V. N. Dinh, K. D. Kim, & P. Warnitchai, "Dynamic analysis of three-dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel-rail contact model," *Engineering Structures*, vol. 31, no. 12, pp. 3090-3106, 2009.
5. K. Grębowski, & M. Zielińska, "Dynamic Analysis of Historic Railway Bridges in Poland in the Context of Adjusting Them to Pendolino Trains," *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 283-297, 2015.
6. H. Li, H. Xia, & M. Soliman. "Bridge stress calculation based on the dynamic response of coupled train-bridge system," *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 334-345, 2015.
7. N. Zhang, Y. Tian, & H. Xia, "A Train-Bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation," *Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 528-536, 2016.
8. S. Schneider, & S. Marx, "Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic," *Engineering Structures*, vol. 174, pp. 396-406, 2018.
9. H. Zhao, Y. Ding, & A. Li, "Dynamic Performance Evaluation of a High-Speed Four-Track Railway Bridge Traversed by Multiple Trains," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 32, no. 1, pp. 04017130, 2018.
10. Y. Shan, Y. Shu, & S. Zhou, "Finite-infinite element coupled analysis on the influence of material parameters on the dynamic properties of transition zones," *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 548-558, 2017.
11. H. Wang, & V. Markine, "Corrective countermeasure for track transition zones in railways: Adjustable fastener," *Engineering Structures*, vol. 169, pp. 1-14, 2018.

12. K. Giannakos, & S. Tsoukantas, "Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track: Influence of Changing Stiffness on Acting Forces," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 3548-3557, 2012.
13. J. M. Olmos, & M. Á. Astiz, "Non-linear vehicle-bridge-wind interaction model for running safety assessment of high-speed trains over a high-pier viaduct," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 419, pp. 63-89, 2018.
14. D. P. Connolly, P. Galvin, B. Olivier, A. Romero, & G. Kouroussis, "A 2.5D time-frequency domain model for railway induced soil-building vibration due to railway defects," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 120, pp. 332-344, 2019.
15. J. Hu, Y. Luo, Z. Ke, P. Liu, & J. Xu., "Experimental study on ground vibration attenuation induced by heavy freight wagons on a railway viaduct," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 37, no. 4, pp. 881-895, 2018.
16. J. Luo, S. Zhu, & W. Zhai, "An efficient model for vehicle-slab track coupled dynamic analysis considering multiple slab cracks," *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 557-568, 2019.
17. D. Gorbajuk, G. Brandstetter, & J. Fink, "Investigations for Simplified Consideration of Train-Bridge-Interaction based on Railjet High-speed Train," *Procedia Engineering*, vol. 156, pp. 116-123, 2016.
18. F. Ribes-Llario, C. Zamorano-Martín, S. Morales-Ivorra, & J. Real-Herráiz., "Study of vibrations in a short-span bridge under resonance conditions," *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, no. 5, pp. 3186-3196, 2016.
19. C. Mellier, "Optimal Design of Bridges for High-Speed Trains : Single and double-span bridges," TRITA-BKN. Master Thesis 301, 2010.
20. Y. Song, Y. Du, X. Zhang, & B. Sun, "Evaluating the Effect of Wheel Polygons on Dynamic Track Performance in High-Speed Railway Systems Using Co-Simulation Analysis" *Applied Sciences*, vol 9, pp 4165, 2019
21. UIC, "Design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge ", 2003.

22. J. J. Kalker, "A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact," *Vehicle System Dynamics* 11, pp. 1-13, 1982.
23. T. Arvidsson, & A. Andersson, "Train-Track-Bridge Interaction for non-ballasted Railway Bridges on High-Speed Lines," *Structural Engineering and Bridges*, 2017.
24. D. Gong, J. Zhou, W. Sun, Y. Sun, & Z. Xia, "Method of multi-mode vibration control for the carbody of high-speed electric multiple unit trains," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 409, pp. 94-111, 2017.
25. Viaduct Segmental boxes Girder, Pier Segment. [cited 2020 Jun 15] Available from: www.mckeller.co.th
26. Bogie. [cited 2020 Jun 15] Available from: <http://www.railsystem.net/bogie/>
27. ProjectOTP/2560/Project06/ManualDesign. (2015). [cited 2020 Jun 15] Available from: http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2560/Project06/ManualDesign.pdf
28. UIC776-2R. (2003). [cited 2020 Jun 15] Available from: <https://dokumen.site/download/uic-776-2r-design-requirements-for-rail-bridges-based-on-interaction-phenomena-a5b39f0608d41f>
29. Nguyen DV, Kim KD, Warnitchai P. Simulation procedure for vehicle-substructure dynamic interactions and wheel movements using linearized wheel-rail interfaces. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2009 Apr 1;45(5):341-56.
30. Li H, Xia H, Soliman M, Frangopol DM. Bridge stress calculation based on the dynamic response of coupled train-bridge system. *Engineering Structures*. 2015 Sep 15;99:334-45.
31. Zhai W, Han Z, Chen Z, Ling L, Zhu S. Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics*. 2019 Jul 3;57(7):984-1027.
32. Zhang N, Tian Y, Xia H. A train-bridge dynamic interaction analysis method and its experimental validation. *Engineering*. 2016 Dec 1;2(4):528-36.



ประวัติผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยพระนคร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	ชนศักดิ์ ศรีสวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	19 มีนาคม 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	28/1 หมู่ที่ 6 ตำบลวังลึก อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย 64120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร

