

การวิเคราะห์และแนวทางการออกแบบสำหรับบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและคันดิน ในทางรถไฟ

Analysis and Design Approaches for the Transition Zone between Bridges and Embankments in Railway Tracks

วิเชียร โสมณวัฒน์* และ สุรศักดิ์ นิยมพานิชพัฒนา

สาขาเทคโนโลยีโยธา, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ในเมือง
เมือง อุบลราชธานี 34000

Wichain Sommanawat* and Surasak Niyompanitpattana

Department of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University, Nai Mueang,
Mueang, Ubon Ratchathani, 34000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: wichain.s@ubru.ac.th

Received: Feb 02, 2024; Revised: Jun 04, 2024; Accepted: Jun 10, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์รูปแบบการปรับปรุงเสถียรภาพของบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างโครงสร้างสะพานและคันดินในทางรถไฟด้วยแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบบริเวณดังกล่าว โดยรูปแบบที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 3 วิธีนั้นได้รับการแนะนำไว้ในมาตรฐาน International Union of Railways (UIC) 719R ได้แก่ 1. Société Nationale des Chemins de fer Français method (SNCF), 2. Magyar Államvasutak method (MAV) และ 3. Deutsche Bahn method (DB) ในส่วนแรกนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างรางและสะพานของแบบจำลองได้ทำการสอบเทียบกับกรณี E1-3 จากมาตรฐาน UIC 774-3 ซึ่งผลการวิเคราะห์ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงจากมาตรฐาน นอกจากนี้พบว่าผลการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงลำดับก่อนหลังของแรงที่มากระทำจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการรวมกันโดยตรงของผลตอบสนองที่ได้จากแรงแต่ละประเภท จากนั้นทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพบริเวณเปลี่ยนผ่านทั้ง 3 รูปแบบโดยใช้คุณสมบัติของรางรถไฟตามมาตรฐาน UIC 54 และน้ำหนักตามมาตรฐาน U20 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในประเทศไทย ผลจากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบทั้ง 3 นั้นสามารถช่วยให้การทรุดตัวของบริเวณเปลี่ยนผ่านมีค่าลดลง โดยวิธี DB สามารถลดค่าการทรุดตัวได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 36.18 ส่วนวิธี SNCF และ MAV นั้นมีค่าเท่ากันคือร้อยละ 32.89 อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการทรุดตัวร่วมกับเทคนิคในการก่อสร้างจะพบว่าวิธี SNCF นั้นมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบและการก่อสร้างเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพในบริเวณเปลี่ยนผ่าน

คำสำคัญ: ทางรถไฟ, บริเวณเปลี่ยนผ่าน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This study presents an analysis of stability improvement methods for the transition zone between bridge structures and embankments in railway systems using the Finite Element Method (FEM) model. The study aims to provide guidelines for designing such transition zones. The three methods investigated are recommended by the International Union of Railways (UIC) standard 719R: 1. Société Nationale des Chemins de fer Français method (SNCF), 2. Magyar Államvasutak method (MAV), and

3. Deutsche Bahn method (DB). Initially, the interaction between the rail and bridge models was calibrated using the E1-3 case from the UIC 774-3, which yielded results close to the reference values. Additionally, it was found that analyzing the sequence of applied loads provides better results than directly combining the responses from each load type. Subsequently, the study examined the stability improvement of the transition zones using the rail properties from the UIC 54 and the load standards from U20, which are applicable in Thailand. The analysis revealed that all three methods effectively reduced settlement in the transition zone, with the DB method achieving the highest reduction at 36.18%, and the SNCF and MAV methods achieving an equal reduction of 32.89%. However, considering both settlement reduction and construction techniques, the SNCF method is recommended as the most suitable approach for the design and construction to improve the stability of transition zones.

Keywords: Railway track, Transition zone, Finite element method

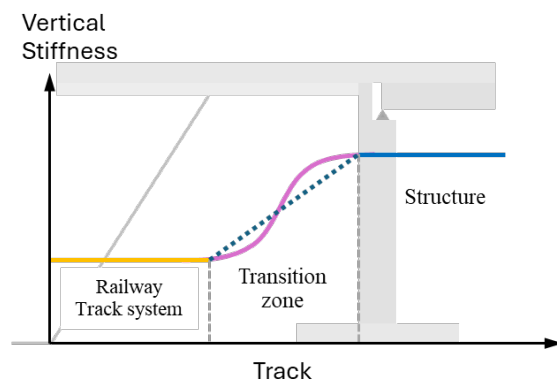
1. บทนำ

บริเวณเปลี่ยนผ่าน (Transition Zone) สำหรับโครงสร้างทางรถไฟ คือ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของระบบโครงสร้างอย่างทันทีทันใด เช่น บริเวณเชื่อมต่อระหว่างสะพานกับทางรถไฟ บริเวณดังกล่าวนี้มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อทางรถไฟและขบวนรถ เช่น เป็นสาเหตุให้รถไฟตกราง (Derailment) หรือส่งผลต่อความไม่สบายของผู้โดยสาร (Riding-Comfort) ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นมีข้อสันนิษฐาน 2 ประการ ประการแรกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของโครงสร้างโดยฉับพลัน โดยค่าความแข็งแรงของทางรถไฟบริเวณสะพานจะมีค่ามากกว่าทางรถไฟที่วางตัวอยู่บนคันดิน (Embankment) และ ค่าการทรุดตัวที่ต่างกัน (Differential Settlement) ระหว่างโครงสร้างสะพานและคันดิน [1] ทั้งนี้สัญญาณเตือนของพฤติกรรมอันนำไปสู่ความเสียหายข้างต้นสามารถสังเกตได้จากการเกิดฝุ่นขาว (White Spots) ขึ้นในบริเวณเปลี่ยนผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยฝุ่นขาวที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการขัดสีของหินโรยทางอันมีสาเหตุจากการเคลื่อนที่ของสะพานและการเพิ่มขึ้นของแรงทางพลศาสตร์ในชั้นหินโรยทาง [2],[3]



รูปที่ 1 การเกิดฝุ่นขาว (White Spots) ณ บริเวณเปลี่ยนผ่าน

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้สามารถสรุปแนวคิดหรือหลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบบริเวณเปลี่ยนผ่านได้ คือ ค่าความแข็งแรงในบริเวณเปลี่ยนผ่านนั้นควรแปรเปลี่ยนจากค่ามากที่บริเวณโครงสร้างสะพานไปยังค่าที่น้อยกว่าบริเวณคันดินอย่างค่อยเป็นค่อยไป[4] ดังแสดงในรูปที่ 2



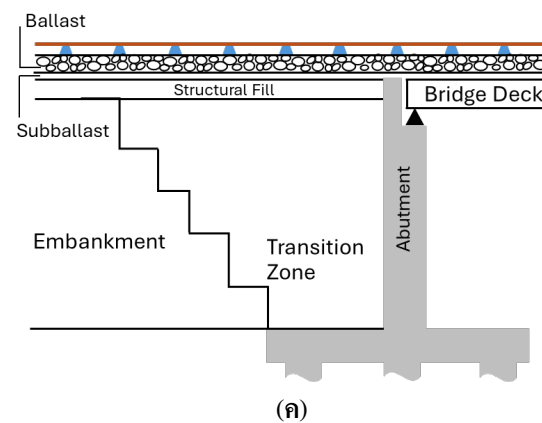
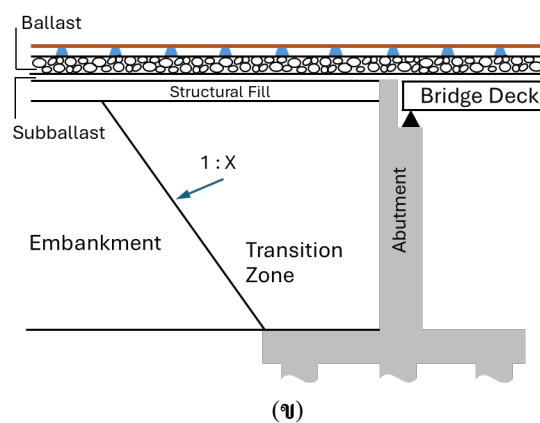
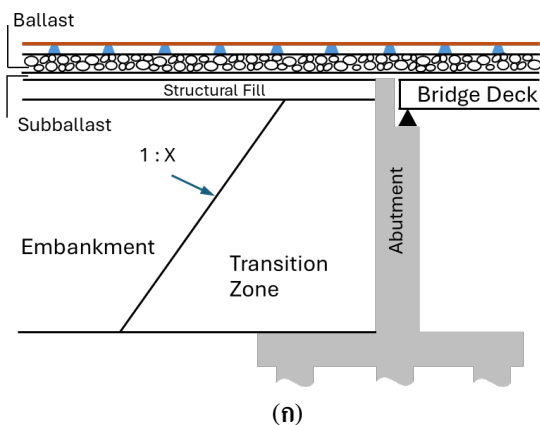
รูปที่ 2 แนวคิดในการออกแบบสำหรับบริเวณเปลี่ยนผ่าน

ปิยรัตน์ เปาแสง และคณะ [5] ได้ทำการรวบรวมเทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในบริเวณเปลี่ยนผ่าน โดยพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การปรับปรุงโครงสร้างส่วนล่าง ซึ่งได้แก่ ชั้นดินเดิม หรือ ชั้นหินโรยทางและการปรับปรุงโครงสร้างส่วนบน เช่น เพิ่มขนาดราง การใช้รางเสริม หรือการใช้แผ่นยางรองเป็นคัน ในส่วนของประเทศไทยนั้นพบว่ามีการใช้เทคนิครางเสริมโดยรางที่ใช้เสริมนั้นจะขึ้นมาจากโครงสร้างสะพานเข้ามายังบริเวณรางรถไฟที่อยู่บนคันดิน

มาตรฐานการออกแบบบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟบนสะพานและทางรถไฟบนคันดินนั้นยังไม่มีที่ชัดเจนหรือกำหนดเป็นรูปแบบที่แน่นอน อย่างไรก็ตามมีการเสนอแนวทางในการออกแบบบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและคันดินเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงอย่างค่อยเป็นค่อยไป

International Union of Railways (UIC) ได้ระบุถึงรูปแบบการก่อสร้างทางรถไฟบริเวณเปลี่ยนผ่านไว้ในมาตรฐาน UIC 719R [6] และในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยพิจารณา 3 รูปแบบ [7] จากมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 คือ

- 1) Société Nationale des Chemins de fer Français method (SNCF: France's National State-owned Railway Company)
- 2) Magyar Államvasutak method (MAV: Hungarian State Railways)
- 3) Deutsche Bahn method (DB: German Railway Company)



รูปที่ 3 แนวทางการออกแบบบริเวณเปลี่ยนผ่านโดย
มาตรฐาน UIC 719R (ก) SNCF method (ข) MAV method
(ค) DB method

จากรูปที่ 3 สามารถเห็นได้ว่า ทั้งสามวิธีนั้นมีการบังคับให้ค่าความแข็งแรงแปรเปลี่ยนอย่างค่อยเป็นค่อยไปจากบริเวณสะพานซึ่งมีค่าสูงไปยังบริเวณคันดินที่มีค่าน้อยกว่า ดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ในรูปที่ 2 โดยลักษณะความลาดชันของเส้นแบ่งระหว่างบริเวณเปลี่ยนผ่านและคันดินของวิธี SNCF นั้นมีลักษณะลาดเอียงลงมายังบริเวณคันดิน ในขณะที่วิธี MAV นั้นมีลักษณะเป็นเส้นลาดชันขึ้นมาจากด้านล่างของบริเวณเปลี่ยนผ่านเข้ามายังบริเวณคันดิน ซึ่งเป็นในลักษณะเดียวกับวิธี DB แต่ในกรณีของวิธี DB นั้นเส้นแบ่งดังกล่าวมีลักษณะเป็นขั้นบันได

สำหรับประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) [4] ได้จัดทำคู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟขึ้น โดยอ้างอิงมาตรฐานจากต่างประเทศ เช่น UIC สหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา ฯลฯ และมีเนื้อหาสำหรับการออกแบบบริเวณเปลี่ยนผ่าน ผู้ที่สนใจสามารถดาวน์โหลดได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

การศึกษาพฤติกรรมของทางรถไฟในบริเวณเปลี่ยนผ่านนั้นมีส่วนที่ต้องทำการศึกษาที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกันคือ ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างรางรถไฟกับสะพาน [8] และ ผลของการปฏิสัมพันธ์นั้นต่อบริเวณเปลี่ยนผ่านที่ซึ่งค่าความแข็งแรงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรางรถไฟและสะพานได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางเชื่อมยาวบนสะพาน

[9] โดยใช้สมมุติฐานแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งพบว่าการใช้ข้อสมมุติดังกล่าวนี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง และการเรียงลำดับ ก่อน-หลัง ของน้ำหนักที่กระทำนั้น ส่งผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าความแข็งแรงบริเวณเปลี่ยนผ่านมีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับรางบนสะพานเช่นกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวนั้น ไม่ได้ครอบคลุมไปยังบริเวณเปลี่ยนผ่าน

ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในบริเวณเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟ รวมทั้งแนวทางในการปรับปรุงเสถียรภาพบริเวณดังกล่าวได้ถูกทำการรวบรวม [10] อย่างไรก็ตามพบว่าการที่จะได้มาซึ่งแนวทางต่าง ๆ เหล่านั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการศึกษา เนื่องจากโครงสร้างต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบทางรถไฟนั้นมีความซับซ้อนแบบจำลองที่ใช้พบว่าส่วนมากพัฒนาขึ้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM: Finite Element Method) [11] และบางส่วนจากวิธีผลต่างสืบเนื่อง (FDM: Finite Difference Method) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากวิธีผลต่างสืบเนื่องนั้นมีความสามารถในการจำลองรูปร่างของปัญหาเมื่อมีความซับซ้อนได้ไม่ดันทันทีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [12]

โปรแกรมที่มีพื้นฐานการพัฒนามาจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น ANSYS ได้ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างวิธีการนำแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปมาวางเรียงในลักษณะรูปขั้นบันไดและวิธีดั้งเดิมที่ใช้การปรับปรุงวัสดุคันดิน [13] ผลจากการวิเคราะห์พบว่าวิธีแรกนั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ใช้ในนั้นไม่ได้รวมพฤติกรรมของสะพานที่มีผลต่อบริเวณเปลี่ยนผ่านเข้าไปร่วมพิจารณา

Paixão et al. [1] ได้พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ในรูปแบบปัญหาความเค้นในระนาบ (Plane-Stress Problem) โดยนำมาใช้ศึกษาบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและคันดิน ในกรณีศึกษาของสะพานรถไฟข้ามแม่น้ำ Sado ประเทศโปรตุเกส ซึ่งผลการศึกษาพบว่าผลจากการตรวจวัด ณ สถานที่ก่อสร้างให้ผลที่สอดคล้องกันกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งพัฒนาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ถูกพัฒนาขึ้น

[14] โดยในการวิเคราะห์ได้กำหนดให้เกิดการทรุดตัวขนาด 2 mm ที่บริเวณชั้นหิน โยธาทาง (Ballast) และชั้นดินเดิม (Subgrade) ในขณะที่โครงสร้างของสะพานไม่ให้เกิดการทรุดตัว ผลจากการวิเคราะห์พบว่าผลตอบสนองทางด้านพลศาสตร์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของทางรถไฟในบริเวณเปลี่ยนผ่านมีค่าสูงขึ้นกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป

การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของทางรถไฟในบริเวณจุดเปลี่ยนผ่านนั้นมีความสำคัญเช่นเดียวกับการใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์อาคาร หรือ โครงสร้างต่าง ๆ หากแบบจำลองมีความถูกต้องสามารถจำลองพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงแล้ว ผู้วิเคราะห์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างหรือค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ได้รูปแบบที่มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการตอบสนองซึ่งได้แก่ การเสียรูป (Deformation) และ หน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟในบริเวณเปลี่ยนผ่านเมื่อขบวนรถไฟวิ่งผ่านระหว่างรูปแบบที่ไม่มีการปรับปรุงเสถียรภาพกับทั้ง 3 วิธีที่แนะนำโดยมาตรฐาน UIC 719R เพื่อนำไปหารูปแบบที่เหมาะสมอันจะเป็นแนวทางสำหรับการใช้ออกแบบบริเวณดังกล่าวต่อไป

2. การวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

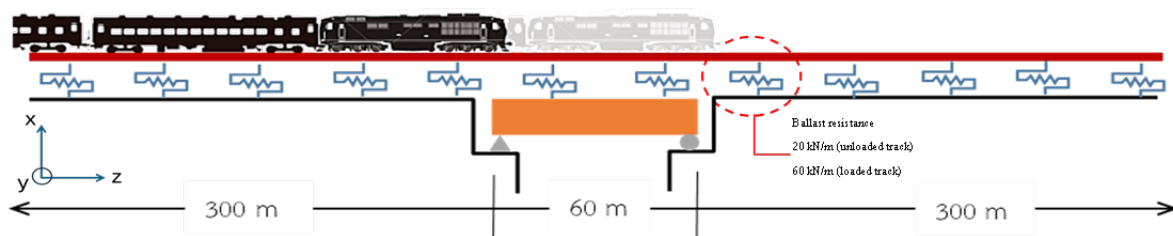
สำหรับการวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์นั้น โปรแกรม Midas Civil 2019 [15] ได้มีการพัฒนาตัวช่วยในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางรถไฟ (Rail Track Analysis Model Wizard) ทั้งนี้ผู้ที่สนใจสามารถดาวน์โหลดมาใช้ (Trial Version) เพื่อมาทำการศึกษาได้เป็นเวลา 30 วัน

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ 1) การจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างรางและสะพาน และ 2) การจำลองพฤติกรรมบริเวณเปลี่ยนผ่าน โดยในข้อ 1 นั้นจะมีตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 774-3 [16] ส่วนข้อ 2 นั้นรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของวัสดุจะใช้ตามที่แนะนำใน

มาตรฐาน UIC 719R โดยในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกมา 3 รูปแบบตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ขั้นตอนโดยสรุปของการวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีดังนี้

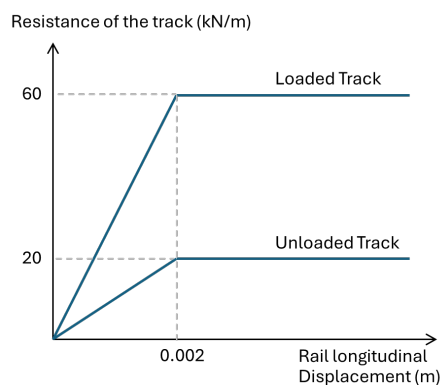
ทำการทดสอบแบบจำลองโดยใช้ปัญหาจากมาตรฐาน UIC 774-3 ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก D (Appendix D: Validation of the Computer Programs) โดยเลือกกรณี E1-3 ในการวิเคราะห์ซึ่งเป็นกรณีที่พบได้ทั่วไปในส่วนภูมิภาคของประเทศ จึงได้เลือกมาเพื่อเป็นกรณีศึกษาในการสอบเทียบแบบจำลองที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์

เมื่อผ่านการทดสอบ กล่าวคือมีค่าคลาดเคลื่อนของผลเฉลยประมาณร้อยละ 10–20 ซึ่งระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 774-3



รูปที่ 4 ปัญหากรณี E1-3 ตามมาตรฐาน UIC 774-3

2) สปริงที่เห็นในรูปเป็นการจำลองค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของรางรถไฟ (แกน z) โดยขึ้นหินโรยทาง (Ballast Resistance) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 kN/m และ 60 kN/m สำหรับกรณีที่ปราศจากน้ำหนักรถและเมื่อน้ำหนักจากรถไฟมากระทำตามลำดับ ทั้งสองกรณีมาตรฐาน UIC 774-3 ได้มีการจำกัดค่าการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของรางไว้ที่ 2 mm ซึ่งสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของรางรถไฟ

จึงทำการวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่านโดยใช้ค่าคงที่และค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดของราง น้ำหนักรถไฟ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ฯ ตามมาตรฐานของรถไฟในประเทศไทย จากนั้นทำการศึกษารูปแบบต่าง ๆ ของบริเวณเปลี่ยนผ่านที่แนะนำโดยมาตรฐาน UIC 719R ทั้ง 3 วิธี เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการดำเนินการก่อสร้าง

2.1 แบบทดสอบกรณี E1-3 ตามมาตรฐาน UIC 774-3

รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรางรถไฟและสะพานในกรณี E1-3 [16] มีดังนี้

1) ขบวนรถไฟมีความยาวทั้งสิ้น 300 m วิ่งผ่านสะพานช่วงเดียวซึ่งมีความยาวเท่ากับ 60 m ดังแสดงในรูปที่ 4

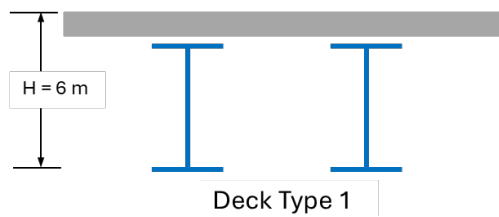
จากรูปที่ 5 สามารถเห็นได้ว่าความสัมพันธ์เป็นในลักษณะ Elastro-plastic model โดยในช่วงแรกค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของรางที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อค่าการเคลื่อนที่มีค่าสูงขึ้นจนเกินค่าพิคกที่ข้อมให้เมื่อนั้นค่าความต้านทานจะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป

3) น้ำหนักของขบวนรถไฟที่กระทำต่อรางรถไฟมีค่าเท่ากับ 80 kN/m กระทำในแนวตั้ง

4) แรงเนื่องจากการเบรคมีค่าเท่ากับ 20 kN/m กระทำในแนวราบตามทิศทางการเคลื่อนที่ของขบวนรถ

5) อุณหภูมิในรางรถไฟและสะพานมีค่าเท่ากับ 50°C และ 35°C ตามลำดับ

6) การจำลองพฤติกรรมของสะพานและรางรถไฟในการศึกษานี้ใช้ Beam element [17] ซึ่งความยาวของแต่ละชิ้นส่วนย่อยมีค่าเท่ากับ 1 m โดยสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นชนิดที่ 1 (Type 1) ซึ่งภาพหน้าตัดของสะพานรวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลของสะพานและรางรถไฟได้แสดงในรูปที่ 6 และตารางที่ 1 ตามลำดับ

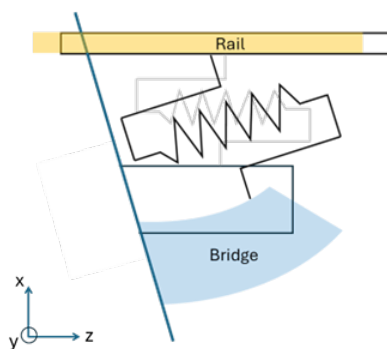


รูปที่ 6 หน้าตัดของสะพานชนิดที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชิงกลของสะพานและรางรถไฟ
กรณี E1-3

คุณสมบัติเชิงกล	สะพาน	รางรถไฟ
E (N/mm ²)	2.1×10^5	2.1×10^5
ν	0.3	0.3
α	1.14×10^{-5}	1.14×10^{-5}
A (m ²)	0.74	0.0153389
I_{yy} (m ⁴)	2.59	6.0726×10^{-5}
I_{zz} (m ⁴)	2.59	1.02091×10^{-5}
I_{xx} (m ⁴)	2.59	4.33934×10^{-6}
A_{sy} (m ²)	$=1000 \times A$	6.4723×10^{-3}
A_{sz} (m ²)	$=1000 \times A$	1.27397×10^{-2}

7) การแอ่นตัวของสะพานในแนวดิ่งสามารถทำให้เกิดหน่วยแรงในรางรถไฟขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อสะพานแอ่นตัวลงเนื่องจากแรงในแนวดิ่ง จะส่งผลให้รางรถไฟซึ่งยึดติดอยู่บนสะพานเคลื่อนที่เข้าหากัน ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขึ้นในรางรถไฟ สำหรับการจำลองพฤติกรรมระหว่างรางรถไฟและสะพานนั้น มาตรฐาน UIC 774-3 แนะนำว่าสามารถใช้ Rigid element เพื่อจำลองพฤติกรรมในบริเวณดังกล่าวได้ ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้สปริงที่มีความแข็งแรงในแนวดิ่ง (แกน x) เท่ากับ 1,000 GN/m



รูปที่ 7 การเกิดหน่วยแรงอัดในรางรถไฟเนื่องจากการแอ่นตัวของสะพาน

8) ในการวิเคราะห์นั้น อุณหภูมิ น้ำหนักของขบวนรถ และแรงที่เกิดจากความเร่งหรือการเบรกจะเป็นแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทางรถไฟและสะพาน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาทำการวิเคราะห์โดยแยกการวิเคราะห์ผลของแต่ละแรงที่กระทำแล้วนำมารวมกันโดยตรงจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มากเกินไปจริง (Overestimate) [18],[19] ดังนั้น จึงได้มีการเสนอให้ทำการวิเคราะห์โดยการคำนึงถึงลำดับขั้นการกระทำของแรงต่าง ๆ โดยนำผลที่เกิดขึ้นจากการกระทำของแรงก่อนหน้านั้นมาเป็นสถานะเริ่มต้นของการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป (Construction Stage Analysis) ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น [18],[19] ซึ่งในการศึกษานี้ผลของการวิเคราะห์จากอุณหภูมิจะถูกคงสภาพ (Maintain) และนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการวิเคราะห์ผลเนื่องจากน้ำหนักและแรงที่มากกระทำต่อไป มีผลทำให้แรงที่มากกระทำไม่สามารถเกินค่าของแรงครากที่กำหนดไว้และสามารถป้องกันโอกาสการเกิดผลลัพธ์ที่มีความมากกว่าความเป็นจริงได้

2.2 การศึกษาพฤติกรรมของบริเวณเปลี่ยนผ่าน

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรูปแบบบริเวณเปลี่ยนผ่านในแบบต่าง ๆ นั้นคุณสมบัติของรางได้เปลี่ยนมาเป็นรางรถไฟมาตรฐาน UIC 54 ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยมีคุณสมบัติเชิงกลที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2

อุณหภูมิของรางรถไฟและสะพาน รวมทั้งขนาดของสะพานและแรงเนื่องจากการเบรก ใช้ค่าเช่นเดียวกับกรณี E1-3 อย่างไรก็ตามน้ำหนักของขบวนรถที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในกรณีนี้คือ U20 ดังแสดงในรูปที่ 9

ในการศึกษานี้ค่าความแข็งแรงของวัสดุในบริเวณเปลี่ยนผ่านและคันดินมีค่าเป็น k_1 และ k_2 ตามลำดับ โดย $k_1 > k_2$ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณ k_1 นั้นต่อเนื่องมาจากโครงสร้างสะพานซึ่งมีค่าความแข็งแรงมากกว่าคันดิน ดังนั้น ค่า k_1 จึงมากกว่า k_2 เพื่อให้ค่าความแข็งแรงมีการแปรเปลี่ยนอย่างค่อยเป็นค่อยไปจากสะพานสู่คันดิน ค่าความแข็งแรงจะมีค่าคงที่ตลอดชั้นความหนาของคันดินที่ระยะห่างจากสะพาน $L = 5$ m จากนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามความสูงซึ่งมีอัตราความลาดชัน 1:1 โดยระยะความสูงของคันดิน $H = 12$ m ดังแสดงในรูปที่ 10

ค่า k_1 และ k_2 เป็นแบบจำลองอย่างง่าย (Simplified Model) ของวัสดุในบริเวณเปลี่ยนผ่านและคันดินให้เป็น Elastic foundation โดยใช้สปริงในการจำลองพฤติกรรม โดยในขั้นแรกจะพิจารณาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของ k_2 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณความชื้นในดิน คุณภาพของการบดอัด พบว่ามีค่าโดยประมาณอยู่ระหว่าง 45–250 MPa [1], [20–22] ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของ k_2 เท่ากับ 100 MPa ซึ่งเป็นตัวแทนของชั้นวัสดุที่ไม่อ่อนและแข็งแรงเกินไป

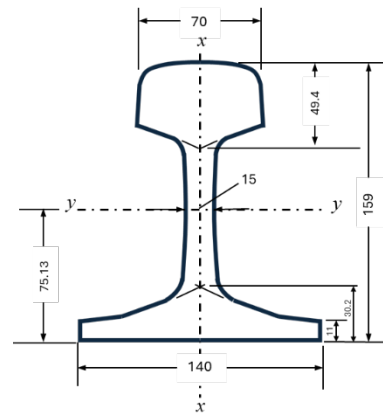
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง (k) และมอดูลัสยืดหยุ่น (E) ในรูปแบบ Linear elastic สามารถแสดงได้คือ

$$k = E \cdot A/L \quad (1)$$

โดย A คือพื้นที่หน้าตัด L คือความยาว จากการที่ Beam element ความยาวชิ้นส่วนละ 1 เมตร ถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมของรางรถไฟ ดังนั้น ความกว้างของพื้นที่รับแรงของสปริงจึงมีขนาดเท่ากับ 1 เมตร และความยาวของสปริงที่ใช้เท่ากับ 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 อาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (1) จะได้สมการที่ (2)

$$k = E \left(\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right) \cdot \frac{1(\text{m}^2)}{1(\text{m})} = E \left(\frac{\text{MN}}{\text{m}} \right) \quad (2)$$

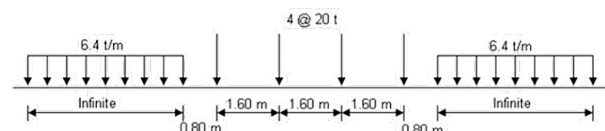
ดังนั้นค่าความแข็งแรงของคันดิน (k_2) จึงมีค่าเท่ากับ 100,000 kN/m (100 MN/m) ในการศึกษาครั้งนี้ทางรถไฟที่ทำการวิเคราะห์นั้นกำหนดให้เป็นทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง (IPR: Intercity Passenger Rail) ความเร็วสูงสุดในการให้บริการตามร่างมาตรฐานโดยสนข. [4] มีค่าเท่ากับ 100 km/hr เมื่อใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน (k_1/k_2) และความเร็วรถดังแสดงในรูปที่ 12 จะทำให้ได้อัตราส่วน (k_1/k_2) เท่ากับ 5.5 ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงของบริเวณเปลี่ยนผ่าน (k_1) เท่ากับ 550,000 kN/m นอกจากนั้นการวิเคราะห์จะใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นตอนของการกระทำของแรง



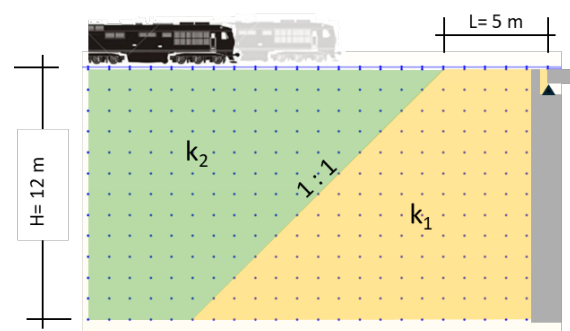
รูปที่ 8 หน้าตัดรางรถไฟมาตรฐาน UIC 54

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเชิงกลของรางรถไฟมาตรฐาน UIC 54

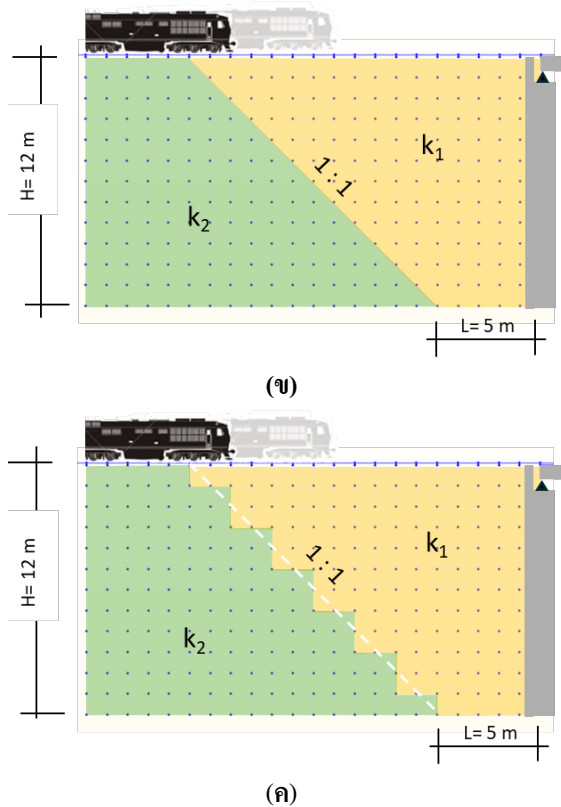
คุณสมบัติเชิงกล	รางรถไฟ (UIC 54)
E (N/mm ²)	2.1×10^5
ν	0.3
α	1.14×10^{-5}
A (m ²)	0.013954
I_{yy} (m ⁴)	4.6758×10^{-5}
I_{zz} (m ⁴)	8.384×10^{-6}
I_{xx} (m ⁴)	3.34×10^{-6}
A_{sy} (m ²)	0.005888
A_{sz} (m ²)	0.01159



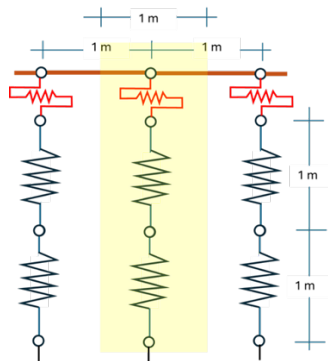
รูปที่ 9 น้ำหนักตามมาตรฐาน U20



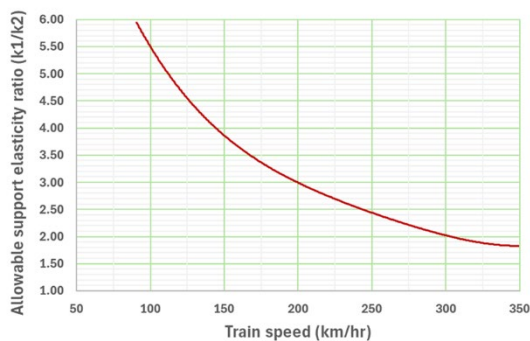
(ก)



รูปที่ 10 แบบจำลองบริเวณเปลี่ยนผ่าน ตามมาตรฐาน
UIC 719R (ก) SNCF model (ข) MAV model (ค) DB model



รูปที่ 11 การคำนวณค่าความแข็งแรงของสปริง

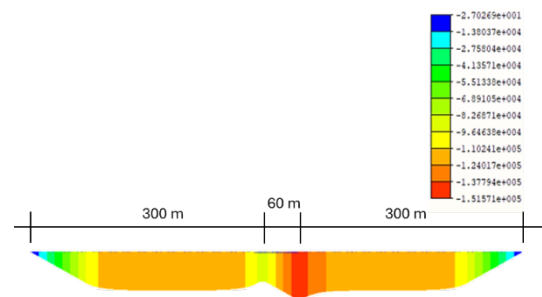


รูปที่ 12 อัตราส่วนของค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมบริเวณ
เปลี่ยนผ่าน

3. ผลการวิเคราะห์

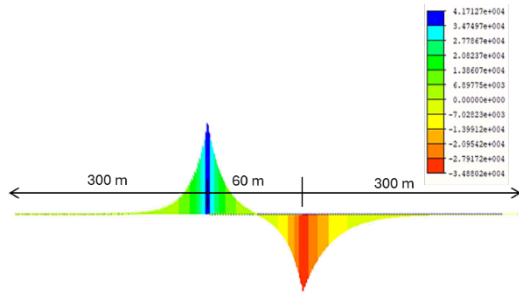
3.1 การทดสอบกรณี E1-3 จากมาตรฐาน UIC 774-3

รูปที่ 13 แสดงผลของการวิเคราะห์โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิจากรางรถไฟและสะพานร่วมกันโดยสามารถเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นในรางรถไฟมีค่าเท่ากับ 151.57 MPa (1.5157×10^5 kN/m²) โดยเกิดขึ้นที่บริเวณจุดรองรับแบบล้อเลื่อนของสะพาน ทั้งนี้เนื่องจากในกรณี E1-3 นั้น อุณหภูมิของรางรถไฟมีค่ามากกว่าสะพานทำให้รางรถไฟมีการขยายตัวมากกว่าสะพาน เป็นสาเหตุให้เกิดหน่วยแรงอัดขึ้นในรางรถไฟ ประกอบกับสะพานมีการเคลื่อนตัวที่จุดรองรับแบบล้อเลื่อนที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิเช่นกัน ทำให้รางรถไฟในบริเวณนั้นเสมือนถูกบีบอัดจึงทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุด ณ ตำแหน่งดังกล่าว



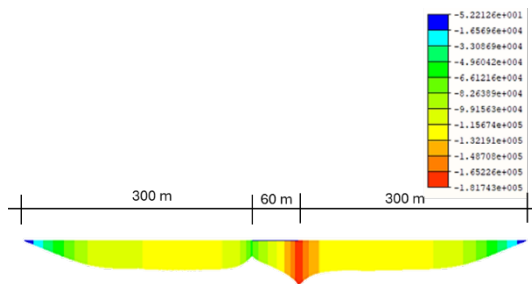
รูปที่ 13 หน่วยแรงในรางรถไฟเมื่ออุณหภูมิของรางรถไฟ
และสะพานเท่ากับ 50°C และ 35°C ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกจากขบวนรถ 80 kN/m ซึ่งกระทำในแนวดิ่งและแรงเนื่องจากการเบรกมีค่าเท่ากับ 20 kN/m โดยกระทำในแนวราบตามทิศทางการเคลื่อนที่ของขบวนรถดังแสดงในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงอัดมากที่สุดที่เกิดขึ้นในรางรถไฟมีค่าเท่ากับ 34.88 MPa หากพิจารณาผลของแรงกระทำทั้งหมดรวมกันแบบ โดยตรง (Superposition) ซึ่งก็คือการนำผลลัพธ์ที่ได้จากอุณหภูมิรวมกับผลจากน้ำหนักและแรงเบรกจะได้ว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในรางรถไฟมีค่าเท่ากับ 186.45 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 774-3 คือ 182.4 MPa พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.22 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เนื่องจากไม่เกินร้อยละ 10



รูปที่ 14 หน่วยแรงในรางรถไฟเมื่อมีน้ำหนักจากขบวนรถ และแรงเบรกกระทำ

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์โดยการคำนึงถึงลำดับของแรงที่มากระทำ ซึ่งในขั้นแรกจะให้อุณหภูมิแก่รางรถไฟและสะพานก่อนจากนั้นจึงกระทำด้วยแรงเนื่องจากน้ำหนักรถและแรงเนื่องจากการเบรก ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 181.74 MPa ดังแสดงในรูปที่ 15 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 774-3 จะพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนไปร้อยละ 0.36 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการรวมผลลัพธ์แบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์โดยการคำนึงถึงลำดับของแรงที่มากระทำจึงให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงกว่าการนำผลลัพธ์ในแต่ละส่วนมารวมกัน



รูปที่ 15 หน่วยแรงในรางรถไฟโดยการวิเคราะห์แบบ Construction stage analysis

3.2 การวิเคราะห์บริเวณเปลี่ยนผ่าน

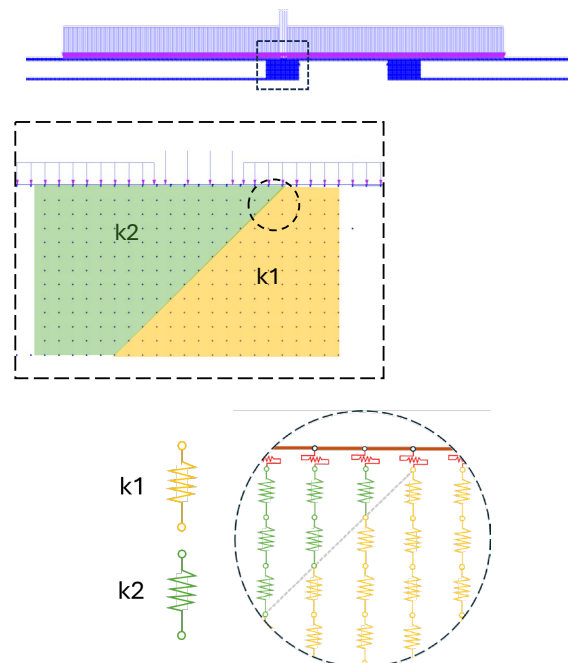
จากการทดสอบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรางรถไฟกับสะพานตามมาตรฐาน UIC 774-3 ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมนั้นให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้ ในลำดับขั้นต่อไปจึงเป็นการศึกษาถึงวิธีปรับปรุงเสถียรภาพที่แนะนำโดยมาตรฐาน UIC 719R ทั้งสามรูปแบบว่าจะส่งผลอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้คำนึงถึง

การเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของค่าความแข็งแกร่ง โดยใช้แบบจำลองที่ผ่านการทดสอบปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและสะพานจากหัวข้อ 3.1

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้เพิ่มการจำลองบริเวณเปลี่ยนผ่านเพื่อศึกษาการเสถียรภาพและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของทางรถไฟโดยแบ่งเป็น 4 กรณี สำหรับกรณีแรกนั้นจะไม่มีมีการปรับปรุงเสถียรภาพ ($k_1 = k_2$) และอีกสามกรณีที่เหลือเป็นกรณีที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพ ($k_1 > k_2$) ดังแสดงในรูปที่ 10

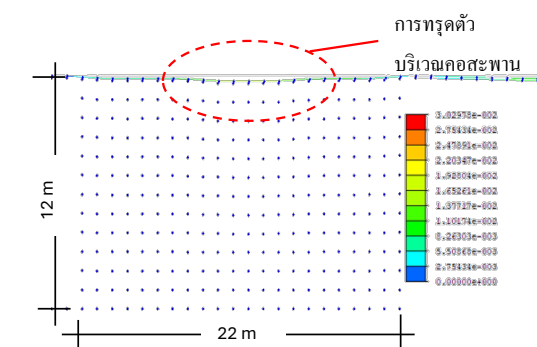
ลักษณะทางกายภาพของปัญหาในภาพรวมที่ทำการวิเคราะห์มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีตัวอย่าง E1-3 โดยความยาวของสะพานและทางรถไฟบนคันดินแต่ละข้างนั้นมีค่าเท่ากับ 60 m และ 300 m ตามลำดับ รวมเป็นระยะทางทั้งสิ้น 660 m

รูปที่ 16 เป็นตัวอย่างของรายละเอียดแบบจำลองที่ใช้เพื่อศึกษาบริเวณเปลี่ยนผ่านสำหรับวิธี SNCF โดยจุดที่แสดงให้เห็นนั้นเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนสปริง k_1 และ k_2 ($k_1 > k_2$) เพื่อใช้ในการจำลองค่าความแข็งแกร่งของบริเวณเปลี่ยนผ่าน สำหรับวิธี MAV และ DB นั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกันแตกต่างกันที่ทิศทางของแนวลาดเอียงและรูปแบบที่เป็นขั้นบันไดตามลำดับ

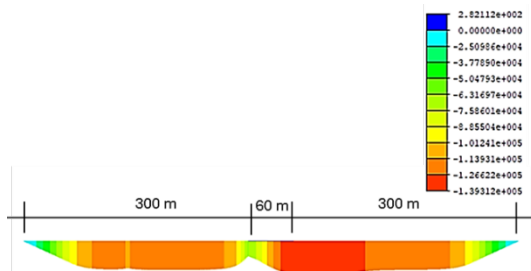


รูปที่ 16 แบบจำลองเพื่อศึกษาบริเวณเปลี่ยนผ่านในวิธี SNCF

การเสียดทานที่เกิดขึ้นในบริเวณเปลี่ยนผ่านสำหรับกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงเสียดทานภาพได้แสดงในรูปที่ 17 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการหลุดตัวที่บริเวณคอสะพานอันเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในบริเวณเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างสะพานและคันดินได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ค่าการหลุดตัวในแนวตั้งมากที่สุดจะอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของบริเวณเปลี่ยนผ่าน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0152 m นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการเกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดที่เกิดขึ้นในรางรถไฟ ณ บริเวณจุดรองรับของสะพานชนิดล้อเลื่อน (Roller Support) โดยมีค่าเท่ากับ 139.31 MPa ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 การหลุดตัวบริเวณคอสะพานกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงเสียดทานภาพ

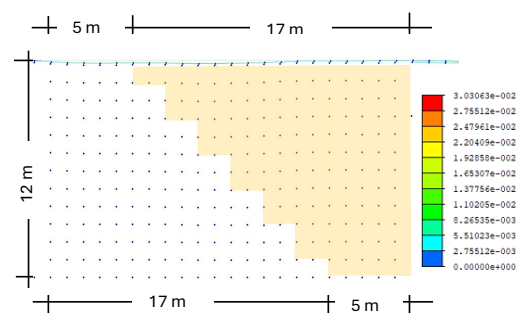


รูปที่ 18 หน่วยแรงในรางรถไฟกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงเสียดทานภาพ

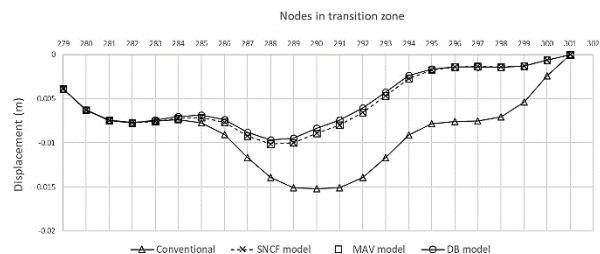
จากนั้นผลของการปรับปรุงเสียดทานภาพบริเวณเปลี่ยนผ่านทั้ง 3 แบบได้ทำการศึกษา ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่า การปรับปรุงเสียดทานภาพตามวิธี SNCF และ MAV นั้น ให้ค่าการหลุดตัวของรางรถไฟมากที่สุดที่บริเวณเปลี่ยนผ่านเท่ากันคือ 0.0102 m ในส่วนของวิธี DB นั้น ให้ค่าการหลุดตัวน้อยกว่าสองวิธีแรกโดยมีค่าเท่ากับ 0.0097 m

รูปที่ 19 เป็นการแสดงค่าการหลุดตัว ณ บริเวณเปลี่ยนผ่านในกรณีที่มีการปรับปรุงเสียดทานภาพตามวิธี DB ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 17 สามารถเห็นได้ว่าการหลุดตัวที่บริเวณคอสะพานนั้นสามารถลดลงได้ด้วยการเสริมเสียดทานภาพในบริเวณดังกล่าว

ค่าการหลุดตัวของทั้ง 4 กรณีตามแนวบริเวณเปลี่ยนผ่าน ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 20 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการปรับปรุงเสียดทานภาพนั้นส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในการต้านทานผลของแรงอันเกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ

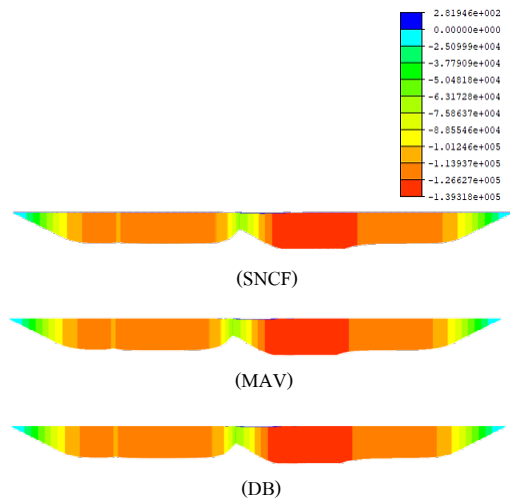


รูปที่ 19 ค่าการหลุดตัวบริเวณเปลี่ยนผ่านกรณีปรับปรุงเสียดทานภาพตามวิธี DB



รูปที่ 20 เปรียบเทียบค่าการหลุดตัว ณ บริเวณเปลี่ยนผ่านของทั้ง 4 กรณี

นอกจากนั้นผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมากที่สุดในรางรถไฟเนื่องจากการปรับปรุงเสียดทานภาพของบริเวณเปลี่ยนผ่านทั้ง 3 รูปแบบนั้น มีค่าไม่ต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีก่อนที่จะมีการปรับปรุงเสียดทานภาพดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางรถไฟจากการปรับปรุง
เสถียรภาพของทั้ง 3 วิธี

4. สรุปผล

1) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ พบว่ารูปแบบการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงลำดับชั้นของแรง ที่มากระทำกับโครงสร้างนั้นให้ผลเฉลยที่ดีกว่าการรวมกัน แบบโดยตรงของผลตอบสนองที่ได้จากแรงแต่ละประเภท แล้วนำมารวมกันซึ่งในการศึกษานี้ประเภทของแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ผลของแรงที่เกิดจากความแตกต่างของ อุณหภูมิระหว่างทางรถไฟและสะพาน แรงเนื่องจาก น้ำหนักขบวนรถไฟและผลของการเบรก

2) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้ทำการทดสอบในส่วน ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟและสะพานโดยทำการ วิเคราะห์ปัญหากรณี E1-3 ในมาตรฐาน UIC 774-3 ซึ่งผล จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงค่าระดับความถูกต้องที่สูง ของผลเฉลยจากแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยมีค่า คลาดเคลื่อนเกิดขึ้นร้อยละ 0.36 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างทางรถไฟและสะพานได้เป็นอย่างดี

3) รูปแบบของการปรับปรุงเสถียรภาพของบริเวณ เปลี่ยนผ่านตามที่เสนอไว้ในมาตรฐาน UIC 719R ซึ่งมี 3 รูปแบบได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติของรางรถไฟ ตามมาตรฐาน UIC 54 และน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ U20 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของทางรถไฟในประเทศไทย ผล จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงด้วยรูปแบบ

ทั้ง 3 นั้นสามารถช่วยให้การทรุดตัวบริเวณเปลี่ยนผ่านมีค่า ลดลง โดยการปรับปรุงเสถียรภาพตามวิธี DB นั้นให้ค่า การทรุดตัวน้อยที่สุด ซึ่งพบว่าค่าการทรุดตัวมากที่สุดมีค่า ลดลงร้อยละ 36.18 ส่วนวิธี SNCF และ MAV นั้นให้ค่า การทรุดตัวที่เท่ากัน โดยมีค่าการทรุดตัวมากที่สุดลดลงร้อยละ 32.89 สาเหตุที่ค่าการทรุดตัวของทั้งสองรูปแบบมีค่า เท่ากันนั้นเป็นเพราะว่ารูปแบบทั้งสองมีลักษณะที่เป็นส่วน กลับของกันและกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงใน บริเวณเปลี่ยนผ่านมีค่าเท่ากันจึงส่งผลให้ค่าการทรุดตัวมีค่า เท่ากันดังที่ปรากฏ

ในส่วนของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการ ปรับปรุงเสถียรภาพด้วยรูปแบบทั้ง 3 นั้นพบว่ามีค่าไม่ ต่างกันมากนักมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะค่าการทรุดตัวที่ เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของทางรถไฟจึง ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในทางรถไฟจากการปรับปรุง เสถียรภาพมีค่าไม่ต่างจากเดิม

นอกจากนั้นหากพิจารณาจากผลของการวิเคราะห์โดย พิจารณาแยกผลตอบสนองของแต่ละแรงที่กระทำจะพบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในรางรถไฟนั้นได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่ มาจากน้ำหนักของขบวนรถและแรงเนื่องจากการเบรก โดยหน่วยแรงอัดมากที่สุดจะเกิดขึ้นที่จุดรองรับของสะพาน ในฝั่งที่เป็นแบบล้อเลื่อน

4) สำหรับรูปแบบที่จะนำไปดำเนินการก่อสร้างนั้น หากพิจารณาเฉพาะค่าการทรุดตัวที่น้อยสุดเพียงอย่างเดียว วิธี DB จะเหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึง ขั้นตอนการก่อสร้าง รูปแบบ SNCF และ MAV น่าจะทำการก่อสร้างได้ง่ายกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธี SNCF กับ MAV นั้นจะพบว่ารูปแบบ SNCF ดูจะเหมาะสม กว่าเนื่องจากวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า ($k_1 > k_2$) ซึ่ง โดยปกติมีน้ำหนักมาก เช่น คอนกรีต หินขนาดใหญ่ จะ นิยมวางเรียงอยู่ด้านล่าง อย่างไรก็ตามสามารถใช้วัสดุเชื่อม ประสาน เช่น ซีเมนต์ ในการปรับปรุงค่าความแข็งแรงของ ชั้นวัสดุร่วมกับการใช้เทคนิคการบดอัดที่ให้ความแน่นสูง ก็สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการเสริมเสถียรภาพได้ อีกทางหนึ่ง [4]

5. ข้อเสนอแนะ

ค่า k_1 และ k_2 ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นการใช้แบบจำลองอย่างง่ายในการจำลองพฤติกรรมของวัสดุในบริเวณเปลี่ยนผ่านและคันดิน ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงควรทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อนั้นเห็นควรพัฒนาแบบจำลองโดยวิเคราะห์ในเชิงพลศาสตร์ (Dynamic) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพเป็นจริงมากกว่าแบบสถิตยศาสตร์ (Static) ที่ใช้วิเคราะห์ในโครงการวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังปฏิสัมพันธ์ของแรงระหว่างขบวนรถและทางรถไฟควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเช่นกัน

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไปในแบบ 2 มิติ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ในปริภูมิ 3 มิตินั้นควรทำการศึกษาต่อเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง รวมถึงการตรวจวัดค่าการเสียดทาน ค่าหน่วยแรงและความเครียด ณ สถานที่จริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Paixão, E. Fortunato and R. Calçada, "Transition zones to railway bridges: Track measurements and numerical modelling," *Engineering Structures*, vol. 80, pp. 435–443, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.09.024.
- [2] T. Dahlberg, "Railway track stiffness variations – consequences and countermeasures," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2010.
- [3] M. Banimahd, P. K. Woodward, J. Kennedy and G. Medero, "Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions," *Proc. of the Institution of Civil Engineers-Transport*, vol. 165, no. 3, pp. 205–214, doi: 10.1680/tran.10.00030.
- [4] Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP), Bangkok, Thailand. *Manual of design and construction of railway*, 2015. Accessed: Nov. 16, 2023 [Online]. Available: https://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2560/Project06/ManualDesign.pdf.
- [5] P. Paoleng, R. Parichatprecha and S. Suthasupradit, "Behavior of Railway Track at Transition Zone and Performance Improvement Techniques: A Review," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 74–87, 2018. (in Thai)
- [6] *Earthworks and track-bed layers for railway lines*, UIC 719R, International Union of Railways (UIC), Paris, France, 1994.
- [7] B. Dareeju, C. Gallage and M. Dhanasekar, "A comparative analysis of the conservative bridge transition design approaches," in *2014 Proc. Railway Excellence: Rail Transport for Vital Economy*, Robert Schweiger, ed., Adelaide, Australia, May 5–7, 2014, pp. 649–657.
- [8] C. Esveld, "Track stability and longitudinal forces," in *Modern railway track*, 2nd ed. Zaltbommel, Netherlands: MRT productions, 2001, ch. 7, sec. 7.3–7.4, pp. 212–223.
- [9] P. Ruge and C. Birk, "Longitudinal forces in continuously welded rails on bridge decks due to nonlinear track–bridge interaction," *Computers & Structures*, vol. 85, no. 7–8, pp. 458–475, 2007, doi: 10.1016/j.compstruc.2006.09.008.
- [10] R. Sañudo, L. dell'Olio, J.A. Casado, I.A. Carrascal and S. Diego, "Track transitions in railways: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 140–157, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.084.
- [11] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "Generalization of the finite element concepts. Galerkin-weighted residual and variational approaches," in *The Finite Element Method, Vol. 1: The Basis*, 5th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2000, ch. 3, sec. 3.2–3.6, pp. 42–60.

- [12] W. Kanok-Nukulchai, W. Sommanawat and C. Buachart, "Overview of the finite element method," *Thailand Engineering Journal*, vol. 74, no. 3, pp. 58–69, 2021. (in Thai)
- [13] J. Real-Herraiz, C. Zamorano-Martin, T. Real-Herraiz and S. Morales-Lvorra, "New Transition Wedge Design Composed by Prefabricated Reinforced Concrete Slabs," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, pp. 1431–1449, 2016, doi: 10.1590/1679-78252556.
- [14] H. Wang, VL. Markine, IY. Shevtsov and R. Dollevoet, "Analysis of the dynamic behaviour of a railway track in transition zones with differential settlement," in *Proc. of the 2015 Joint Rail Conference*, San Jose, CA, USA, Mar. 2015, pp. 1–7, doi: 10.1115/JRC2015-5735.
- [15] Midas Information Technology Co., Ltd., "Midas Civil." midasoft.com. <https://www.midasoft.com/bridge-library/civil/products/midascivil> (accessed Jun. 21, 2020).
- [16] *Track/Bridge Interaction – Recommendations for calculations*, UIC 774-3, International Union of Railways (UIC), Paris, France, 2001.
- [17] E. Oñate, "Slender plane beams. Euler-Bernoulli theory," in *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics: Volume 2: Beams, Plates and Shells*, Barcelona, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2013, ch. 1, sec. 1.3, pp. 6–20.
- [18] Midas Information Technology Co., Ltd., "Rail-structure interaction in accordance with UIC774-3." scribd.com. <https://www.scribd.com/document/451407580/Rail-Structure-interaction-midas-analysis-pdf> (accessed May 17, 2024).
- [19] Midas Information Technology Co., Ltd., "Railway bridge and composite girder bridge analysis." slideshare.net. <https://www.slideshare.net/MidasIT/rail-bridge-and-composite-girder-bridge-analysis> (accessed Apr. 20, 2024).
- [20] Q. Fu and C. Zheng, "Three-dimensional dynamic analyses of track-embankment-ground system subjected to high-speed train loads," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014, Art. no.924592, doi: 10.1155/2014/924592.
- [21] K. Dong, D. P. Connolly, O. Laghrouche, P. K. Woodward and P. Alves Costa, "The stiffening of soft soils on railway lines," *Transportation Geotechnics*, vol. 17, pp. 178–191, 2018, doi: 10.1016/j.trgeo.2018.09.004.
- [22] *Soil Young's modulus*, geotect data, Sep. 17, 2013, [Online]. Available: <https://www.geotesting.org/parameter/soil-young-s-modulus>.