

การจำแนกแบบจำลองการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟ โดยใช้การจัดกลุ่มตัวแปร

Variable-based classification of ballast empirical settlement models for railway track transition zones

ภานุเดช ชุ่มเย็น*, ชลพรพรช ภู่อันติสัมพันธ์ และ ศรณรินทร์ บุตรสะสม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University Rangsit Campus, Pathum Thani

*Corresponding author; E-mail address: cpanudec@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของโครงสร้างทางรถไฟ เช่น ช่วงต่อระหว่างคันทางและสะพาน มักเกิดการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างและแรงกระทำจากล้อรถไฟ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกและเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ประเมินค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางบริเวณดังกล่าว โดยใช้เกณฑ์การจัดกลุ่มตามระดับของตัวแปรนำเข้า ได้แก่ ตัวแปรระดับระบบ (จำนวนรอบเพลาล้อ แรงพลศาสตร์จากล้อสู่ราง ความเร็วรถไฟ) และตัวแปรระดับวัสดุหรือเฉพาะตำแหน่ง (จำนวนรอบการบดอัดของการซ่อมบำรุง ความเค้น และ อัตราส่วนความพรุนของหินโรยทาง) เพื่อประเมินความเหมาะสมของสมการต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในระดับโครงการ โดยแบบจำลองจำนวน 5 สมการที่มีโครงสร้างต่างกันถูกนำมาคำนวณค่าการทรุดตัวผ่านข้อมูลจากการศึกษา จากนั้นผลลัพธ์ถูกปรับค่ามาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้ม และวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรผ่านดัชนีความไวโดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองที่รวมตัวแปรจากทั้งสองระดับร่วมกันสามารถสะท้อนพฤติกรรมเฉพาะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้ชัดเจนที่สุด โดยเฉพาะตัวแปรด้านแรงพลศาสตร์และอัตราส่วนความพรุนที่แสดงค่าความไวสูงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ตัวแปรด้านความเร็วรถไฟและจำนวนรอบการบดอัดแสดงอิทธิพลต่ำ ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับบริบทของข้อมูลในระดับโครงการ เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ ออกแบบ และวางแผนบำรุงรักษาทางรถไฟในบริเวณที่มีความอ่อนไหวต่อการทรุดตัว

คำสำคัญ: แบบจำลองเชิงประจักษ์ การทรุดตัวของหินโรยทาง ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทางรถไฟ การวิเคราะห์ความไวของตัวแปร

Abstract

Transition zones in railway track structures such as the interface between embankments and bridges are typically locations where significant ballast settlement occurs due to structural discontinuity and repeated dynamic impacts from wheel loads. This study aims to classify and compare empirical models used to predict ballast settlement in such zones, using a framework that groups models based on the level of input variables. These include global variables (number of axle load cycles, dynamic wheel load, train speed) and local variables (number of tamping cycles, ballast stress and void ratio), with

the goal of evaluating the applicability of each model for use in real-world railway projects. Five empirical models with different structural forms were selected and applied to a case study. The predicted settlement results were normalized to allow trend comparison, and the influence of variables was evaluated using sensitivity analysis. The results indicate that models incorporating both global and local variables most accurately capture the localized behavior of transition zones. Moreover, dynamic wheel load and ballast void ratio consistently showed high sensitivity indices, highlighting their dominant influence on settlement prediction. In contrast, train speed and the number of tamping cycles exhibited low sensitivity, indicating limited influence. These findings provide a preliminary basis for selecting appropriate empirical models in project contexts where input data availability varies. The results support model-informed decision-making in track design, performance evaluation, and maintenance planning for transition zones with high vulnerability to long-term settlement.

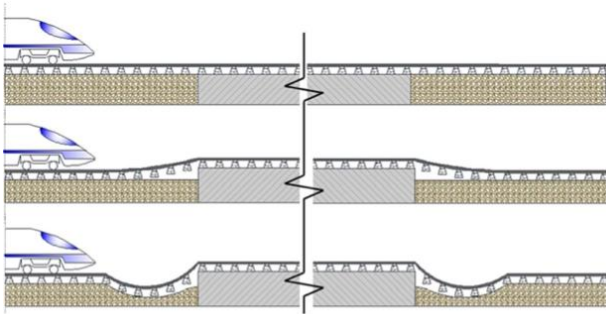
Keywords: Empirical model, Ballast settlement, Railway transition zones, Sensitivity analysis

1. บทนำ

บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (transition zones) ในระบบทางรถไฟคือพื้นที่ที่โครงสร้างทางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเฉียบพลัน เช่น จากคันทางดินถมเข้าสู่สะพานคอนกรีต หรือจากโครงสร้างหินโรยเข้าสู่ทางรถไฟแบบแผ่นคอนกรีต บริเวณเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากช่วงรางปกติ ทั้งในด้านโครงสร้างและพลศาสตร์ของการรับแรง โดยเฉพาะความไม่ต่อเนื่องของความแข็งแรงระหว่างวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้แรงจากขบวนรถ ไม่สามารถถ่ายเทได้เมื่อแล่นผ่านตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ส่งผลให้เกิดแรงกระทำและแรงสั่นสะเทือนสะสมมากกว่าปกติ โดยเฉพาะบริเวณหมอนรางและชั้นหินโรยทาง [1-2]

ผลจากแรงที่กระทำอย่างต่อเนื่องเหล่านี้ทำให้บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มเกิดความไม่ราบเรียบของแนวรางในอัตราที่สูงกว่าช่วงรางทั่วไปอย่างเด่นชัดตามที่แสดงในรูปที่ 1 ความเสียหายมักเริ่มต้นที่องค์ประกอบหลักของโครงสร้างทาง

เช่น หินโรยทาง หมอน และราง ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของทางรถไฟ โดยรวมทั้งในแง่ของความมั่นคงและความปลอดภัยในการใช้งาน [3]



รูปที่ 1 ลักษณะการทรุดตัวของโครงสร้างทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างคันดินและสะพานเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่อง [4]

ปัญหาเหล่านี้ยังนำไปสู่การระงับการบำรุงรักษาที่สูงขึ้นโดยพบว่า บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านต้องมีการบำรุงรักษาบ่อยกว่าช่วงรางทั่วไปถึง 6 เท่า ทั้งในรูปแบบของการบดอัดแน่น การเติมหินโรยทาง การเปลี่ยนหมอนรองทาง หรือแม้กระทั่งการเสริมโครงสร้างรองรับเพิ่มเติม ความถี่ในการซ่อมบำรุงไม่เพียงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในระยะยาว แต่ยังทำให้ต้องหยุดให้บริการหรือจำกัดความเร็วในการเดินรถ ซึ่งกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบรางโดยรวมอย่างชัดเจน [5]

ด้วยเหตุนี้ความเข้าใจในพฤติกรรมทรุดตัวของโครงสร้างทางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจึงเป็นประเด็นสำคัญ โดยเฉพาะในชั้นหินโรยทาง ซึ่งเป็นวัสดุที่อยู่ถัดจากหมอนรางและรับแรงกระแทกจากขบวนรถโดยตรง พฤติกรรมของชั้นหินโรยทางภายใต้แรงกระทำซ้ำมักเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและแสดงค่าการทรุดตัวได้ชัดเจนกว่าชั้นโครงสร้างลึก เช่น ดินฐานรอง อีกทั้งยังเป็นชั้นที่ต้องได้รับการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องมากที่สุด ในระบบราง [6] หากสามารถพยากรณ์การทรุดตัวของชั้นนี้ได้ล่วงหน้า ก็จะช่วยให้การวางแผนช่วงเวลาการบำรุงรักษา การบริหารงบประมาณ และการควบคุมความเสถียรของแนวรางในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพสนาม [7]

แนวทางในการประเมินค่าการทรุดตัวของโครงสร้างทางสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) การตรวจวัดภาคสนาม (2) การวิเคราะห์แนวโน้มจากข้อมูลระยะยาว และ (3) การใช้แบบจำลองทางวิศวกรรม สำหรับการตรวจวัดภาคสนามสามารถดำเนินการได้โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ เช่น กล้องวัดระดับ เซนเซอร์ตรวจจบบการเคลื่อนตัว ระบบการหาตำแหน่งทั่วโลกความละเอียดสูง หรือรถตรวจวัดแนวราง [2],[5] ซึ่งให้ข้อมูลที่แม่นยำและสะท้อนพฤติกรรมจริงของทางรถไฟได้โดยตรง ส่วนการวิเคราะห์แนวโน้มจากข้อมูลระยะยาวอาศัยข้อมูลที่เก็บสะสมจากการใช้งานจริงของระบบราง เช่น ค่าความสูงของแนวราง การบำรุงรักษาที่ผ่านมา หรือจำนวนขบวนรถที่แล่นผ่าน เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์หรือคาดการณ์การทรุดตัวในอนาคต [8]

อย่างไรก็ตาม แนวทางทั้งสองนี้ล้วนมีข้อจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ต้นทุนของอุปกรณ์ที่สูง และข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องมือในพื้นที่ที่ยังเปิดใช้งานอยู่ นอกจากนี้ การวิเคราะห์แนวโน้มยังจำเป็นต้องอาศัยฐานข้อมูลที่ครบถ้วนและมีความต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยมีประสิทธิภาพในกรณีของพื้นที่ใหม่ หรือเส้นทางที่ยังไม่มีประวัติการใช้งานสะสมเพียงพอ[2]

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางวิศวกรรม จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมโดยเฉพาะในขั้นตอนการวางแผนและออกแบบ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ แบบจำลองเชิงกล (mechanistic models), แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical models) และแบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical models) โดยแบบจำลองเชิงกลมีความแม่นยำสูง อิงจากทฤษฎีทางกลศาสตร์ของวัสดุ ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูปอย่างเป็นระบบ ทำให้ต้องใช้พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่ซับซ้อนและเข้าถึงยาก จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในระดับโครงการทั่วไปที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูล[9]

ในขณะที่แบบจำลองเชิงตัวเลข เช่น ไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) มีศักยภาพในการวิเคราะห์เชิงลึกและสามารถประเมินผลกระทบจากปัจจัยหลายด้านพร้อมกันได้ แต่จำเป็นต้องใช้เวลาประมวลผลนานและมีข้อกำหนดข้อมูลที่ละเอียดมาก รวมถึงต้องอาศัยทักษะและความเชี่ยวชาญเฉพาะทางในการสร้างและวิเคราะห์ผลลัพธ์ผ่านซอฟต์แวร์เฉพาะทาง[10] ในทางตรงกันข้าม แบบจำลองเชิงประจักษ์ ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยใช้ตัวแปรพื้นฐานที่สามารถวัดหรือประเมินได้จริงในสภาพแวดล้อมของโครงการ ทำให้โครงสร้างของสมการมีกระบวนการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นหรือการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันในระดับโครงการ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาแบบจำลองเชิงประจักษ์ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นหินโรยทาง[11]

ในปัจจุบันมีแบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับการประเมินการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งได้รับการพัฒนาและเผยแพร่ผ่านวารสารวิชาการ และรายงานทางเทคนิคของหน่วยงานด้านระบบราง [8],[12] แบบจำลองเหล่านี้มีความหลากหลายในแง่ของโครงสร้างสมการและชุดตัวแปรที่ใช้ โดยบางสมการอิงกับข้อมูลระดับระบบ เช่น จำนวนรอบการผ่านของล้อรถไฟหรือความเร็วของขบวนรถ ขณะที่บางสมการใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพวัสดุหรือพฤติกรรมเชิงจุลภาคของโครงสร้างทาง ความหลากหลายดังกล่าวทำให้เกิดความไม่ชัดเจนในการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาพสนามจริง หรือข้อจำกัดของข้อมูลในแต่ละโครงการ โดยเฉพาะในบริบทที่ต้องการการวางแผนเชิงป้องกันหรือการออกแบบเบื้องต้นอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ความแตกต่างของตัวแปรที่ปรากฏในแต่ละสมการ ทำให้ไม่สามารถประเมินได้อย่างเป็นระบบว่าตัวแปรแต่ละตัวมีอิทธิพลต่อค่าการทรุดตัวในระดับใด หรือในกรณีที่ไม่ปรากฏตัวแปรนั้นในสมการ จะส่งผลอย่างไรต่อแนวโน้มของผลลัพธ์ [13] การประเมินความแม่นยำหรือความน่าเชื่อถือของแต่ละสมการจึงไม่ใช่เป้าหมายหลักของการศึกษา เนื่องจากแบบจำลองเชิงประจักษ์เหล่านี้ล้วนผ่านการตรวจสอบและการใช้งานจริงในบริบทที่พัฒนามาแล้ว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อประเมินแนวโน้มของผลลัพธ์และศึกษาบทบาทของตัวแปรในแต่ละกลุ่มแบบจำลอง เพื่อให้สามารถเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับบริบทของข้อมูลและข้อจำกัดของแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการศึกษาไม่เพียงแต่ช่วยจัดระเบียบความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่มีอยู่ แต่ยังสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ให้สอดคล้องกับลักษณะข้อมูลหรือข้อจำกัดของโครงการ และช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในระดับแนวโน้ม โดยอิงจากกลุ่มของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทางรถไฟได้อย่างเป็นระบบ

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจำแนกและคัดเลือกแบบจำลองเชิงประจักษ์ตามประเภทของตัวแปรนำเข้า วิเคราะห์และเปรียบเทียบแนวโน้มของแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการประเมินค่าการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของโครงสร้างทางรถไฟ โดยมุ่งเน้นความเหมาะสมของโครงสร้างสมการและตัวแปรนำเข้าในบริบทการใช้งานจริง เพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการทรุดตัว ทั้งนี้ วัตถุประสงค์ย่อยของการวิจัยประกอบด้วย

- 1) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มผลลัพธ์ของแบบจำลองแต่ละชุดเปรียบเทียบภายใต้ข้อมูลกรณีศึกษาที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริง
- 2) เพื่อประเมินความไวของตัวแปรนำเข้าที่มีอิทธิพลสูงสุดในแต่ละแบบจำลอง โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อสนับสนุนการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรม

ขอบเขตของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการประเมินการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของโครงสร้างทางรถไฟ โดยจำกัดการวิเคราะห์เฉพาะแบบจำลองที่มีโครงสร้างสมการชัดเจน และใช้ตัวแปรนำเข้าที่สามารถวัดหรือประมาณได้ในบริบทโครงการจริง ภายใต้สมมติฐานของสภาพแวดล้อมทั่วไป ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์การทรุดตัวของชั้นดินรองรับ และไม่พิจารณาแบบจำลองที่ใช้ตัวแปรนำเข้าซึ่งเกี่ยวข้องกับรายละเอียดเชิงกลภายในระบบรถไฟ (rolling stock) เช่น ความแข็งแรงของระบบช่วงล่าง หรือพฤติกรรมการสั่นของชุดล้อ-เพลานอกจากนี้ การวิเคราะห์ในงานนี้ไม่ได้ครอบคลุมการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลภาคสนามจริงในเชิงความแม่นยำแบบสัมบูรณ์ แต่เน้นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบแนวโน้มของแบบจำลองภายใต้ชุดข้อมูลจำลองที่สอดคล้องกับสภาพใช้งานทั่วไป

3. กรอบแนวคิดและระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีพื้นฐานจากข้อสังเกตเชิงวิศวกรรมในบริบทของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของโครงสร้างทางรถไฟ เช่น ช่วงต่อระหว่างคันทางกับสะพานหรือโครงสร้างแข็งอื่น มักเกิดการทรุดตัวสะสมในชั้นหินรอยทางอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของชั้นโครงสร้างและแรงกระแทกซ้ำจากล้อรถไฟ ปรากฏการณ์นี้ส่งผลต่อเสถียรภาพของทางวิ่งและเพิ่มภาระด้านการบำรุงรักษา การใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมการทรุดตัว โดยอิงกับตัวแปรที่สามารถประเมินได้จากข้อมูลระดับโครงการจริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเหล่านี้มีความหลากหลายทั้งในด้านโครงสร้างสมการและชนิดของตัวแปร ทำให้เกิดความไม่ชัดเจนในการเลือกใช้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเปรียบเทียบแบบจำลองผ่านการจัดกลุ่มตามลักษณะตัวแปร การประเมินแนวโน้มของผลลัพธ์ภายใต้กรณีศึกษาจำลอง และการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร เพื่อประเมินความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้

งานวิจัยนี้เริ่มจากการรวบรวมแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการประเมินการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการและรายงานเทคนิคที่เกี่ยวข้อง โดยจำแนกแบบจำลองเหล่านี้ตามประเภทของตัวแปรนำเข้า เพื่อจัดกลุ่มเชิงแนวคิดอย่างเป็นระบบ จากนั้นจึงคัดเลือกแบบจำลองจำนวนหนึ่งที่มีโครงสร้างสมการหลากหลาย และประกอบด้วยตัวแปรที่สามารถประเมินได้ในระดับโครงการจริงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์ โดยใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาจำลองสภาพของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่ยังไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างทาง ข้อมูลดังกล่าวนำไปใช้คำนวณค่าการทรุดตัวจากแต่ละแบบจำลอง และดำเนินการปรับค่ามาตรฐาน (normalization) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มของ

ผลลัพธ์บนฐานข้อมูลเดียวกันได้อย่างเป็นระบบ จากนั้นจึงวิเคราะห์ความไวของตัวแปรนำเข้าที่ใช้ในแต่ละสมการ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบทีละตัวแปร ภายใต้กรอบการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร $\pm 20\%$ จากค่าฐาน เพื่อคำนวณค่าดัชนีความไว (Sensitivity Index) และประเมินระดับอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการทรุดตัวภายในแบบจำลองแต่ละชุด [14-15]

การคำนวณค่าการทรุดตัวจากแต่ละแบบจำลอง รวมถึงการปรับค่ามาตรฐานและวิเคราะห์ดัชนีความไว ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างเป็นระบบและรองรับการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีโครงสร้างต่างกัน

4. แบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับการประเมินการทรุดตัวชั้นหินรอยทาง

ในขั้นตอนนี้นำเสนอภาพรวมของแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการประเมินการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน โดยเริ่มจากการรวบรวมแบบจำลองจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงดำเนินการจัดกลุ่มตามลักษณะของตัวแปรที่ใช้ และเลือกแบบจำลองบางส่วนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบในขั้นตอนถัดไป

4.1 การรวบรวมและจัดกลุ่มแบบจำลอง

แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ในการประเมินค่าการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับตัวแปรต้นอย่างน้อยหนึ่งตัว โดยมีค่าคงที่หรือสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับเทียบกับข้อมูลจากภาคสนามหรือการทดลองในห้องปฏิบัติการ วรรณกรรมที่นำมาทบทวนในงานวิจัยนี้รวบรวมจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วารสารวิจัยด้านวิศวกรรมระบบราง และรายงานทางเทคนิคจากหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญ โดยคัดเลือกเฉพาะแบบจำลองที่มีการระบุโครงสร้างสมการชัดเจน จากการรวบรวมเบื้องต้น ได้แบบจำลองเชิงประจักษ์จำนวน 25 สมการซึ่งแสดงให้เห็นถึงความพยายามของแต่ละงานวิจัยในการอธิบายพฤติกรรมการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางในลักษณะที่หลากหลาย ทั้งในช่วงเวลาการเกิดและกลไกการสะสมของการทรุดตัว ความหลากหลายเชิงแนวคิดนี้จึงเป็นจุดตั้งต้นสำคัญที่สามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการกำหนดเกณฑ์สำหรับจำแนกประเภทของแบบจำลองในงานวิจัยนี้

จากการพิจารณาลักษณะของแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่รวบรวมได้พบว่า มีเกณฑ์ที่เป็นไปได้สำหรับการจำแนกแบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับการทรุดตัวของชั้นหินรอยทางจำนวน 4 ข้อ [13], [15] ได้แก่

แนวทางแรกคือ การจำแนกตามโครงสร้างของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณารูปแบบของสมการ เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น ฟังก์ชันพหุนาม ฟังก์ชันกำลัง ลอการิทึม หรือเอกซ์โพเนนเชียล แนวทางนี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะการตอบสนองของสมการต่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ชัดเจน เช่น อัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าทรุดตัวในแต่ละช่วงเวลา แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สามารถเชื่อมโยงโครงสร้างของสมการกับระดับของข้อมูลในภาคสนามได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ สมการที่ใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เดียวกันอาจใช้ตัวแปรที่แตกต่างกัน ซึ่งนำไปสู่อธิบายกลไกการทรุดตัวคนละลักษณะ และผลลัพธ์ที่ได้ก็อาจแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

แนวทางที่สอง คือ การจำแนกตามลักษณะของแหล่งข้อมูลและบริบทการพัฒนาแบบจำลอง โดยแบ่งตามประเภทของข้อมูลที่ใช้ ได้แก่ ข้อมูลภาคสนาม การทดลองในห้องปฏิบัติการ และข้อมูลจากการจำลอง รวมถึงช่วงเวลาหรือสภาพแวดล้อมที่สมการนั้นถูกพัฒนาขึ้น เช่น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในยุคก่อนที่ระบบตรวจวัดภาคสนามหรือแบบจำลองเชิงตัวเลขจะถูกใช้อย่างแพร่หลาย กับแบบจำลองยุคหลังที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลง

ด้านเทคโนโลยีและแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน นอกจากนี้แบบจำลองยังได้รับการพัฒนาจากบริบทเฉพาะของระบบรางในแต่ละภูมิภาค เช่น ยุโรป เอเชีย หรือออสเตรเลีย ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางและวัสดุพื้นฐานแตกต่างกัน แนวทางนี้มีข้อดีในการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองต่อการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมเฉพาะ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าเอกสารต้นทางไม่ได้อธิบายละเอียดเหล่านี้ไว้อย่างชัดเจน อีกทั้งบางแบบจำลองมีการใช้ข้อมูลจากหลายแหล่งและหลายช่วงเวลา ทำให้การจำแนกตามเกณฑ์นี้ไม่สามารถดำเนินได้อย่างเป็นระบบในทุกกรณี

แนวทางที่สามคือ การจำแนกตามจำนวนของตัวแปรที่ใช้ในสมการ โดยพิจารณาว่าสมการนั้นใช้ตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปรร่วมกัน แนวทางนี้มีข้อดีในด้านการประเมินระดับความซับซ้อนของแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่มีตัวแปรน้อยมักเหมาะกับบริบทที่ข้อมูลจำกัด ขณะที่แบบจำลองที่มีหลายตัวแปรสามารถแสดงอิทธิพลของหลายปัจจัยร่วมกันได้อย่างครอบคลุม อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของแนวทางนี้คือ จำนวนตัวแปรเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสะท้อนกลไกการทรุดตัวของรางได้อย่างสมบูรณ์ สมการที่ใช้ตัวแปรเท่ากันอาจมีพื้นฐานทางทฤษฎีหรือข้อมูลที่ต่างกัน โดยสิ้นเชิง จึงไม่เหมาะสำหรับใช้เปรียบเทียบความหมายเชิงกลไกระหว่างแบบจำลอง นอกจากนี้ แบบจำลองที่ใช้ตัวแปรเพียงหนึ่งตัวก็อาจถูกพัฒนาโดยใช้การวิเคราะห์ขั้นสูงหรือผ่านการปรับค่าพารามิเตอร์อย่างละเอียด จึงไม่สามารถตัดสินความซับซ้อนของแบบจำลองได้จากจำนวนตัวแปรเพียงอย่างเดียว

แนวทางสุดท้ายคือการจำแนกตามประเภทของตัวแปรที่ปรากฏในสมการ ซึ่งสะท้อนระดับของข้อมูลที่ใช้ในการอธิบายกลไกการทรุดตัวของโครงสร้างทาง โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม ได้แก่ ตัวแปรระดับระบบ (global variables) ซึ่งสะท้อนลักษณะโดยรวมของระบบทางรถไฟ เช่น จำนวนรอบเพลาล้อ ความเร็วของขบวนรถ โครงสร้างโดยไม่อ้างอิงตำแหน่งเฉพาะเจาะจง และตัวแปรระดับวัสดุหรือเฉพาะจุด (local variables) ซึ่งอิงกับพฤติกรรมเฉพาะตำแหน่งหรือวัสดุ เช่น ความเครียดได้หมอนรองราง ความพรุนของหินโรยทางในบริเวณศึกษา แนวทางนี้สามารถเชื่อมโยงกับระดับของข้อมูลที่แท้จริงในโครงการ โดยตัวแปรระดับระบบมักได้จากข้อมูลทั่วไปซึ่งสามารถเก็บได้จากระบบบันทึกของการเดินรถหรือแบบจำลองการวางแผนที่มีอยู่แล้ว จึงเข้าถึงได้ง่าย ครอบคลุมพื้นที่การใช้งาน และไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดเฉพาะในสนาม ในทางตรงกันข้ามตัวแปรระดับวัสดุหรือเฉพาะจุด ต้องอาศัยการวัดเฉพาะตำแหน่งหรือการจำลองที่ซับซ้อน โดยข้อมูลเหล่านี้มักได้จากการทดลองภาคสนาม ซึ่งมีต้นทุนสูง ใช้เวลาเก็บข้อมูลนาน และไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่กว้างหรือทุกจุดของโครงสร้างได้ในทางปฏิบัติ การแบ่งตามลักษณะนี้จึงสะท้อนถึงความพร้อมของข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริง และช่วยให้วิเคราะห์กลไกการทรุดตัวของโครงสร้างทางได้อย่างเป็นระบบ

อย่างไรก็ตาม แม้แนวทางนี้จะไม่แสดงความแตกต่างของรูปแบบสมการหรือที่มาของแบบจำลองอย่างครอบคลุม แต่ด้วยความชัดเจนในการจำแนกข้อมูลตามระดับการใช้งานจริง และความสอดคล้องกับเป้าหมายของการศึกษามากที่สุด งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เกณฑ์ประเภทของตัวแปรเป็นแนวทางหลักในการจำแนกแบบจำลอง เพื่อรองรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงโครงสร้างและแนวโน้มของผลลัพธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากเกณฑ์ประเภทของตัวแปรที่ปรากฏในสมการ แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่รวบรวมได้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักได้แก่ แบบจำลองที่ใช้เฉพาะตัวแปรระดับระบบ และแบบจำลองที่ใช้ทั้งตัวแปรระดับระบบและระดับวัสดุหรือเฉพาะจุดร่วมกัน ทั้งนี้ ไม่พบแบบจำลองที่ใช้เฉพาะตัวแปรระดับวัสดุอย่างเดียว ซึ่งสะท้อนแนวโน้มของการพัฒนาแบบจำลองเพื่อการใช้งานในระดับโครงสร้างหรือระดับโครงการ โดยมักอ้างอิงข้อมูลที่สามารถวัดหรือประเมินได้จากกระบวนการเดินรถ ในขณะที่ตัวแปรระดับวัสดุแม้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเฉพาะจุดได้ดี แต่หากปราศจากข้อมูลในระดับระบบร่วมด้วย จะไม่สามารถใช้ประเมินหรือวางแผนภาพรวมของโครงสร้างทางได้อย่างเพียงพอ

สามารถวัดหรือประเมินได้จากกระบวนการเดินรถ ในขณะที่ตัวแปรระดับวัสดุแม้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเฉพาะจุดได้ดี แต่หากปราศจากข้อมูลในระดับระบบร่วมด้วย จะไม่สามารถใช้ประเมินหรือวางแผนภาพรวมของโครงสร้างทางได้อย่างเพียงพอ

ตารางที่ 1 แบบจำลองเชิงประจักษ์ใช้เฉพาะตัวแปรระดับระบบ

ผู้พัฒนา(ปี)	Global Variables
Hettler (1984) [16]	N
Selig and Waters (1994) [11]	N
Fröhling (1998) [17]	N
Cuellar et al (2001) [18]	N
Thom and Oakley (2006) [19]	N
Sato (1997) [20]	N, P_{eq}
Estaire et.al (2017) [21]	N, P_{eq}
Hecke and Stichel (2000) [22]	N, P_{eq} , v

หมายเหตุ: N คือ จำนวนรอบเพลาล้อ (Number of axle load cycles), P_{eq} คือ แรงพลศาสตร์ที่ส่งผ่านจากล้อถึงโครงสร้าง (Dynamic wheel load) และ v คือความเร็วของรถไฟ (Train Speed)

ตารางที่ 2 แบบจำลองเชิงประจักษ์ใช้ทั้งตัวแปรระดับระบบและระดับวัสดุ

ผู้พัฒนา(ปี)	Global Variables	Local variables
Charoenwong et al (2022) [10]	N	σ_1, σ_3
Alva-Hurtado and Selig (1981) [23]	N	ϵ_0
Grossoni (2022) [24]	N	ϵ_0
Olsson et al.(2024) [25]	N	ϵ_0
Indraratna et al. (2013) [26]	N	n
Office for Research and Experiments, ORE (1970) [27]	N	σ_1, σ_3, n
Varandas (2010) [28]	N, P_{eq}	ϵ_0
Wang and Markine (2018) [4]	N, P_{eq}	ϵ_0
Shenton (1984) [29]	N, P_{eq}	L
Nguyen et.al (2016) [30]	N, P_{eq}	$\sigma_1, \sigma_3, \epsilon_0, n$

หมายเหตุ: σ_1 คือค่าความเค้นหลักอันดับที่ 1 (Maximum Principal Stress), σ_3 คือค่าความเค้นหลักอันดับที่ 3 (Minimum Principal Stress), ϵ_0 คือค่าการทรุดตัวเริ่มต้นของหินโรยทางก่อนทางรถไฟเปิดใช้งานจริง (initial ballast settlement), n คือ อัตราส่วนความพรุนของชั้นหินโรยทาง (Void ratio) และ L คือ จำนวนรอบของการซ่อมบำรุงหินโรยทางด้วยการบดอัดต่อจุดใดจุดหนึ่งบนแนวราง (Number of tamping Cycles)

แม้ว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่รวบรวมได้มีจำนวนทั้งสิ้น 25 สมการ แต่จากการตรวจสอบพบว่า สมการบางชุดได้รับการพัฒนาโดยกลุ่มผู้วิจัยหรือหน่วยงานเดียวกันเดียวกันในช่วงเวลาต่างกัน โดยมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในด้านสัมประสิทธิ์หรือค่าคงที่ อีกทั้งยังมีบางสมการที่ไม่ได้ระบุที่มาหรือกระบวนการได้มาของค่าคงที่อย่างชัดเจน จึงอาจไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบในระดับโครงสร้างของสมการอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกเฉพาะแบบจำลองที่มีโครงสร้าง

สมการและข้อมูลประกอบครบถ้วนเพียงพอ เหลือจำนวนทั้งหมด 18 สมการ แบ่งเป็นกลุ่มที่ใช้เฉพาะตัวแปรระดับระบบ 8 สมการ และกลุ่มที่ใช้ทั้งตัวแปรระดับระบบและระดับวัสดุหรือเฉพาะจุดรวมกัน 10 สมการ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

4.2 การเลือกแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ในการคัดเลือกแบบจำลองเชิงประจักษ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ งานวิจัยนี้พิจารณาจากความหลากหลายของประเภทตัวแปรระดับข้อมูลที่สามารถประเมินได้จากโครงการจริง และความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในระดับโครงการ โครงสร้างของแบบจำลองที่ได้รับการคัดเลือกต้องสามารถสะท้อนกลไกของการทรุดตัวได้ในลักษณะที่แตกต่างกัน และต้องใช้ตัวแปรที่สามารถหาได้จากข้อมูลภาคสนามหรือประมาณได้ในทางปฏิบัติ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มของผลลัพธ์และศึกษาบทบาทของตัวแปรในเชิงโครงสร้างได้อย่างเป็นระบบ

ในขณะเดียวกัน แบบจำลองที่มีตัวแปรค่าการทรุดตัวเริ่มต้นของชั้นหินโรยทาง (ϵ_0) ถูกตัดออกจากการพิจารณา เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้โดยตรงในสภาพสนาม ต้องอาศัยการสมมติซึ่งมีความแปรปรวนสูงตามลักษณะการก่อสร้างในแต่ละพื้นที่ ส่งผลให้ไม่เหมาะสมต่อการเปรียบเทียบเชิงโครงสร้างกับแบบจำลองอื่นที่ใช้ตัวแปรที่สามารถวัดหรือประมาณค่าได้ชัดเจนกว่า เช่น ความพรุนของวัสดุ (n) หรือจำนวนรอบการบดอัด (L) ซึ่งถึงแม้จะมีความแปรปรวนตามพื้นที่เช่นกัน แต่สามารถอ้างอิงได้จากข้อมูลมาตรฐานหรือหลักเกณฑ์การออกแบบในทางปฏิบัติ

จากเกณฑ์ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกแบบจำลองจำนวน 5 สมการ จากทั้งหมด 18 สมการ การเลือกด้วยจำนวนจำกัดนี้เพื่อให้สามารถให้นำเสนอผลการวิเคราะห์เป็นไปอย่างกระชับ ชัดเจน และครอบคลุมแนวโน้มหลักที่พบ โดยแบบจำลองที่ไม่ถูกเลือกบางส่วนมีลักษณะกลไกซ้ำซ้อนกับแบบจำลองที่ได้รับการคัดเลือก จึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมได้ในภาพรวมโดยไม่จำเป็นต้องนำเสนอซ้ำ

แบบจำลองที่ได้รับการคัดเลือกประกอบด้วย;

- 1) แบบจำลองของ Thom and Oakley ซึ่งใช้ตัวแปรระดับระบบ 1 ตัว คือ N (สมการที่ 1)
- 2) แบบจำลองของ Estaire et.al ซึ่งใช้ตัวแปรระดับระบบ 2 ตัว คือ N และ P_{eq} (สมการที่ 2)
- 3) แบบจำลองของ Hecke and Stichel ซึ่งใช้ตัวแปรระดับระบบ 3 ตัวแปร คือ N , P_{eq} และ v (สมการที่ 3)
- 4) แบบจำลองของ Shenton ซึ่งใช้ตัวแปรระดับระบบ 2 ตัว คือ N และ P_{eq} ร่วมกับตัวแปรระดับวัสดุ 1 ตัว คือ L (สมการที่ 4)
- 5) แบบจำลองของ ORE ซึ่งใช้ตัวแปรระดับระบบ 1 ตัว คือ N ร่วมกับตัวแปรระดับวัสดุ 3 ตัวแปร คือ σ_1 , σ_3 , และ n (สมการที่ 5)

$$S = [\log_{10}(N) - 2.4]^2 \quad (1)$$

$$S = 0.0004 P_{eq} \cdot N^{0.155} \quad (2)$$

$$S = 0.1 + 1x \cdot 10^{-9} N^{0.137} (2P_{eq})^3 v^{0.0004} \quad (3)$$

$$S = 1.1 \left(\frac{P_{eq}}{20} \right) ((0.69 + 0.028L) N^{0.2} + (2.7 \times 10^{-6}) N) \quad (4)$$

$$S = 0.082 (100n - 38.2) (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \times (1 + 0.2 \log N) \quad (5)$$

หมายเหตุ: S คือค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางภายใต้เงื่อนไขการใช้งานและบริบทของพื้นที่ที่กำหนด

5. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลอง

เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของแบบจำลองเชิงประจักษ์ทั้ง 5 สมการ งานวิจัยได้นำแต่ละสมการไปคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทาง โดยใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาที่สะท้อนลักษณะการใช้งานและบริบทของพื้นที่ในทางปฏิบัติให้มากที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละแบบจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าการทรุดตัว ผ่านการปรับค่ามาตรฐานเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์จากสมการต่าง ๆ บนพื้นฐานเดียวกัน

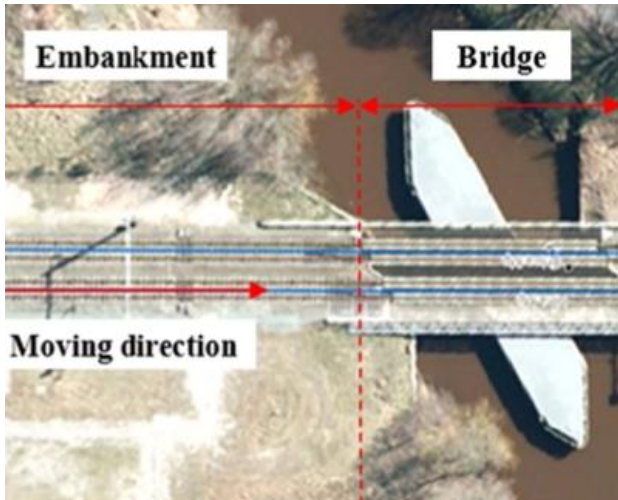
5.1 ข้อมูลทั่วไปของกรณีศึกษา

ในการคำนวณค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองเชิงประจักษ์ในกรณีศึกษา นี้ ได้กำหนดตัวแปรที่ใช้นำเข้า (Input) ในสมการต่าง ๆ โดยอิงจากลักษณะของโครงสร้างทางรถไฟที่ศึกษา ตามที่แสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 ลักษณะของโครงสร้างที่เลือกในกรณีศึกษานี้ถือว่าอยู่ในสภาวะวิกฤติมากที่สุด ในเชิงพฤติกรรมของทางรถไฟ เนื่องจากเป็นตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพร้อมกันทั้งในส่วนโครงสร้างทางด้านบน (superstructure) คือ การเปลี่ยนจากหินโรยทางเป็นแผ่นพื้นคอนกรีต และในส่วนโครงสร้างทางด้านล่าง (substructure) คือ การเปลี่ยนจากคันดินเป็นสะพานคอนกรีต ซึ่งทั้งสององค์ประกอบมีค่าความแข็ง (stiffness) ต่างกันอย่างชัดเจน ความไม่ต่อเนื่องในเชิงโครงสร้างนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นและการกระจายแรงในแนวตั้งอย่างฉับพลัน โดยเฉพาะในชั้นทางรอง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งให้เกิดการทรุดตัวสะสมบริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้าง ทำให้ตำแหน่งนี้เป็นพื้นที่ที่จำเป็นต้องวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวอย่างละเอียดเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาในระยะยาว

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดข้อมูลกรณีศึกษา[4]

รายการ	รายละเอียดข้อมูล
ลักษณะของโครงสร้าง	ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างโครงสร้างทางรถไฟ แบบมีหินโรยทางวางบนคันดินถมและ โครงสร้าง ทางรถไฟแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนสะพาน คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2
ความยาวของช่วงคันดินที่พิจารณา	ประมาณ 8 เมตร
ความยาวของสะพาน	ประมาณ 4 เมตร
การปรับปรุงคันดินบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน	ไม่มี
ประเภทรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ	รถไฟโดยสารเนเธอร์แลนด์ (Dutch passenger train)
น้ำหนักบรรทุกต่อขบวนรถไฟ	0.00035 MGT
จำนวนตู้โดยสารต่อขบวน	5 ตู้ต่อขบวนรถไฟ
จำนวนเพลต่อขบวน	20 เพล
ปริมาณการจราจรรวม	35 MGT ต่อปี (คิดจากน้ำหนักบรรทุกของขบวนรถไฟที่วิ่งผ่าน)
จำนวนขบวนรถไฟต่อปี	ประมาณ 100,000 ขบวน
N	2,000,000 เพลต่อปี
v	144 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
n	0.4
L	3 รอบจุดตลอดช่วงอายุใช้งานที่วิเคราะห์



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างทางรถไฟของพื้นที่กรณีศึกษา[4]

นอกจากนี้ พื้นที่ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในกรณีศึกษานี้ยังไม่มีมีการปรับปรุงคันดินหรือใช้วัสดุเสริมกำลังเพิ่มเติม เช่น จีโอกริด (Geogrid) หรือวัสดุเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ (Cement-Bound Granular Material) [31] ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างทางรถไฟในภาคสนามที่ยังไม่มีการปรับปรุงเสริมกำลัง การเลือกใช้กรณีศึกษาในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวของดินที่เกิดจากสภาพโครงสร้างเดิมโดยตรงโดยไม่ถูกรบกวนจากมาตรการเสริมแรงหรือการบำรุงรักษาเชิงรุก ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นกรณีอ้างอิงพื้นฐานในการประเมินความเหมาะสมและขอบเขตการใช้งานของแบบจำลองภายใต้บริบทของระบบรางในสภาพปฏิบัติทั่วไป

ปริมาณการจราจรถูกกำหนดเป็น 35 MGT ต่อปี โดยที่ MGT (Million Gross Tonnes) คือ หน่วยที่ใช้วัดน้ำหนักรวมของขบวนรถไฟ (รวมตัวรถและสิ่งบรรทุกทั้งหมด) ที่วิ่งผ่านจุดใดจุดหนึ่งตลอดระยะเวลาใช้งาน โดย 1 MGT เท่ากับหนึ่งล้านตันน้ำหนักรวม การกำหนดค่าดังกล่าวในงานนี้สะท้อนระดับการใช้งานของเส้นทางรถไฟที่มีความถี่ของขบวนรถโดยสารในระดับสูง[10] แม้ว่าค่าดังกล่าวจะสูงกว่าค่าปกติของเส้นทางในประเทศไทย แต่ถูกเลือกใช้เพื่อให้เห็นพฤติกรรมเชิงเปรียบเทียบของแบบจำลองภายใต้สภาพการใช้งานที่เข้มข้น ซึ่งช่วยเน้นจุดแตกต่างของพฤติกรรมการทรุดตัวตามชนิดของตัวแปรที่ใช้ในแต่ละแบบจำลอง

น้ำหนักรวมของขบวนรถไฟที่ใช้ในการจำลองอยู่ที่ 0.00035 MGT ต่อขบวน โดยมีจำนวนตู้ 5 ตู้ และ 20 เพลาต่อขบวน ทำให้คำนวณได้ว่ามีรถไฟประมาณ 100,000 ขบวนต่อปี หรือเท่ากับ 2,000,000 เพลาผ่านต่อปี ซึ่งใช้เป็นค่า N ในแบบจำลองเชิงประจักษ์ ในส่วนของความเร็วของรถไฟกำหนดไว้ที่ 144 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (เทียบได้กับ Dutch intercity service)[4] ส่วนจำนวนรอบการบดอัดหินโรยต่อจุด (L) ถูกสมมติเป็น 3 รอบตลอดช่วงอายุใช้งานที่วิเคราะห์ โดยอิงจากความเร็วของการซ่อมบำรุงในพื้นที่ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีทั้งการบดอัดปีเว้นปีแต่ไม่ใช่ทุกปี ณ จุดเดิม สำหรับ ค่าความพรุนของชั้นหินโรย (n) กำหนดไว้ที่ 0.4 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ชั้นหินมีการบดอัดมาระดับหนึ่งแต่ยังไม่แน่นเต็มที่ ค่านี้เหมาะสมกับคันดินที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยวัสดุเสริมกำลัง และยังสามารถเกิดการทรุดตัวได้อย่างต่อเนื่อง [10]

ในส่วนของแรงพลศาสตร์จากล้อและค่าความเค้นหลักอันดับที่หนึ่ง ซึ่งใช้ในสมการที่ 2 ถึง 5 ตามลำดับ ไม่ได้มาจากการวัดภาคสนามโดยตรง แต่ได้จากการนำแนวโน้มของผลลัพธ์จากงานวิจัยของ [4] โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับข้อมูลจากสนามจริงโดย P_{eq} กำหนดให้เป็นค่าเฉลี่ยของแรงแนวตั้งจากล้อทั้ง 4 บริเวณใกล้ทางเข้าตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ซึ่ง

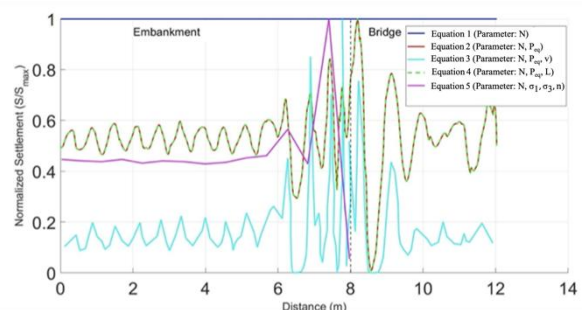
สะท้อนผลของ แรงกระทำจากล้อรถไฟที่รวมทั้งแรงสถิตยศาสตร์ (static) และแรงพลศาสตร์ (dynamic) เข้าด้วยกัน และมีค่าแปรผันตามปัจจัยพลศาสตร์ เช่น ความเร็วของรถไฟ สภาพทาง ความไม่เรียบของราง และคุณสมบัติของระบบช่วงล่างของรถไฟ ซึ่งทำให้ P_{eq} เป็นตัวแทนของแรงกระทำต่อชั้นทางที่มีลักษณะไม่คงที่ตามเวลา

เช่นเดียวกันกับ ค่าความเค้นหลักอันดับที่หนึ่ง ที่มีลักษณะแปรผันตามตำแหน่งและคุณลักษณะของวัสดุชั้นทาง โดยจะใช้ค่าตามกราฟความเค้นแนวตั้งที่ได้ถูกจำลองไว้ในรายงาน เนื่องจากเป็นทิศทางที่มีความเค้นสูงที่สุดในระบบ เนื่องจากแรงจากล้อนั้นกระทำในแนวตั้งโดยตรงผ่านรางลงสู่ชั้นทาง สำหรับค่าความเค้นหลักอันดับที่สาม ซึ่งไม่มีรายงานในงานอ้างอิงโดยตรง ได้มีการประมาณจากค่าความเค้นหลักอันดับที่หนึ่ง โดยใช้อัตราส่วน 30% ซึ่งอิงตามสมมติฐานในงานของ [20] ที่ระบุว่าความเค้นแนวนอนในชั้นหินโรยทาง มักมีค่าประมาณ 25–35% ของความเค้นแนวตั้ง โดยเฉพาะในสภาพที่ไม่มี แรงกักแนวด้านข้าง (Lateral confinement) กระทำรุนแรง

5.2 การวิเคราะห์แนวโน้มของผลลัพธ์

ผลการคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางจากแบบจำลองเชิงประจักษ์ทั้ง 5 สมการ พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยตรงมีขนาดและหน่วยที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากแต่ละสมการใช้ตัวแปรนำเข้าที่แตกต่างกันทั้งในด้านชนิด และในบางกรณียังพบว่า หน่วยที่ควรใช้กับตัวแปรนำเข้าไม่ได้ถูกระบุไว้ชัดเจน ซึ่งส่งผลให้ขนาดของค่าการทรุดตัวที่ได้จากแต่ละแบบจำลองอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยตรงในเชิงปริมาณ

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวจากแบบจำลองแต่ละประเภทได้บนพื้นฐานเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงนำค่าการทรุดตัวที่ได้จากแต่ละสมการมาปรับให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน โดยกำหนดให้ค่าการทรุดตัวสูงสุดในแต่ละกราฟเท่ากับ 1 แล้วแปลงค่าอื่น ๆ เป็นสัดส่วนจากค่าสูงสุดนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3 วิธีการนี้ช่วยให้สามารถเน้นวิเคราะห์ แนวโน้มและตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัว โดยไม่ถูกรบกวนจากขนาดเชิงตัวเลขของแต่ละสมการ ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากตัวแปรนำเข้าในบริบทเฉพาะ



รูปที่ 3 แนวโน้มการทรุดตัวชั้นหินโรยทางของแบบจำลองทั้ง 5 สมการหลังการปรับค่ามาตรฐาน

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ผ่านการปรับมาตรฐานแล้ว พบว่าแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ตัวแปรเวลาเพียงอย่างเดียว (สมการที่ 1) ให้แนวโน้มค่าการทรุดตัวที่สูงกว่าสมการอื่นอย่างชัดเจน และมีลักษณะราบเรียบต่อเนื่องตลอดช่วงวิเคราะห์ ไม่สามารถสะท้อนผลกระทบเชิงตำแหน่งบริเวณเปลี่ยนผ่านได้อย่างชัดเจน สำหรับแบบจำลองที่ 2 และ 3 ซึ่งเพิ่มตัวแปรแรงพลศาสตร์จากล้อรถไฟและความเร็วของรถไฟ ตามลำดับ พบว่าค่าการทรุดตัวลดลงจากแบบจำลองที่ 1 โดยเฉพาะแบบจำลองที่ 3 ซึ่งให้แนวโน้ม

ค่าการทรุดตัวที่ต่ำที่สุดอย่างเห็นได้ชัด และแสดงแนวโน้มการลดลงตลอดช่วงแนววิเคราะห์ แม้ในเชิงกลศาสตร์ ความเร็วที่เพิ่มขึ้นมักมีแนวโน้มทำให้เกิดแรงพลศาสตร์สูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างทาง แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองกลับลดลง แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของแบบจำลองเชิงประจักษ์ซึ่งพึ่งพาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่ได้จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลเฉพาะชุด ส่งผลให้ค่าทรุดตัวลดลงตามความเร็วในลักษณะที่ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงในสนาม และค่าการพยากรณ์ของแบบจำลองมีแนวโน้มต่ำเกินไป อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานในบริบทที่มิถุนการณ์มีความเร็วสูงหรือมีความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง

แบบจำลองที่ 4 ซึ่งเพิ่มตัวแปรระดับวัสดุ ได้แก่ จำนวนรอบการบดอัดหินโรย (L) ให้ค่าการทรุดตัวในระดับกลาง โดยไม่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเฉียบพลันตรงตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ส่วนแบบจำลองที่ 5 ซึ่งรวมตัวแปรระดับวัสดุและพฤติกรรมแรงกล ได้แก่ ความเค้นในแต่ละตำแหน่งของหินโรยทางและอัตราส่วนความพรุน ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากสมการอื่นอย่างชัดเจน โดยแสดงค่าการทรุดตัวสูงสุดในช่วงแคบที่ตรงกับตำแหน่งก่อนเข้าสู่สะพาน สอดคล้องกับตำแหน่งที่เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าความเค้นในโครงสร้าง ซึ่งสะท้อนลักษณะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับพฤติกรรมของความเค้นในโครงสร้างทาง อีกทั้งแบบจำลองนี้ยังคงค่าการทรุดตัวในระดับต่ำในตำแหน่งนอกจุดเปลี่ยนผ่านอย่างชัดเจน แสดงถึงศักยภาพในการแยกความแตกต่างเชิงพื้นที่ได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนความพรุนถูกนำไปรวมอยู่ในสมการร่วมกับค่าความเค้น จึงไม่สามารถแยกอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวได้อย่างชัดเจน

อีกประเด็นสำคัญคือ กราฟของแบบจำลองที่ 5 สั้นสุดบริเวณก่อนสะพานและไม่ได้แสดงผลบนโครงสร้างสะพาน เนื่องจากค่าความเค้นที่ใช้ในสมการมาจากข้อมูลเฉพาะในชั้นหินโรยทาง ขณะที่บนสะพานใช้โครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตที่ไม่ขึ้นวัสดุดังกล่าว แม้กราฟจะไม่ได้ครอบคลุมทั้งแนวทางทั้งหมด แต่ข้อมูลที่มีอยู่เพียงพอในการสะท้อนลักษณะการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้อย่างชัดเจน

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบเหล่านี้ ชี้ให้เห็นว่าลักษณะของตัวแปรนำเข้า ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อแนวโน้มของค่าการทรุดตัว แต่ยังมิพบาทในการควบคุมระดับของผลลัพธ์ในเชิงปริมาณอย่างชัดเจน เพื่อศึกษาบทบาทของตัวแปรเหล่านี้เป็นระบบ งานวิจัยจึงดำเนินการวิเคราะห์ความไว ต่อไปในหัวข้อถัดไป โดยใช้วิธีคำนวณค่าดัชนีความไว เพื่อประเมินว่าตัวแปรใดในแต่ละสมการมีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัว

6. การประเมินอิทธิพลเชิงสัมพัทธ์ของตัวแปรนำเข้าในแต่ละแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความไว โดยใช้ค่าดัชนีความไวในการสะท้อนระดับอิทธิพลของตัวแปรต่อผลลัพธ์ค่าการทรุดตัว ดำเนินการโดยการกำหนดให้ตัวแปรอื่นคงที่ และปรับเพิ่มหรือลดค่าของตัวแปรที่ต้องการประเมินในช่วง $\pm 20\%$ ของค่าฐาน (base value) เพื่อวัดผลกระทบต่อการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองแต่ละสมการโดยค่า SI คำนวณจากอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของค่าการทรุดตัว ต่อการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของค่าตัวแปร ตามสมการที่ 6

$$SI = \frac{\Delta s/s}{\Delta x/x} \quad (6)$$

โดยที่ Δs คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัว, s คือ ค่าฐานของการทรุดตัว, Δx คือ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนำเข้าที่ใช้วิเคราะห์ และ x คือ ค่าฐานของตัวแปรนั้น[14]

แนวคิดของสูตรนี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ความไวแบบที่ละตัวแปร ซึ่งเหมาะสมกับการเชิงประจักษ์ที่มีโครงสร้างคงที่และจำนวนตัวแปรไม่มากเกินไป โดยค่าดัชนีความไวที่คำนวณได้จะบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนั้นส่งผลมากน้อยเพียงใดต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง หากค่าดัชนีมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนั้นมีอิทธิพลสูงกว่าค่าเฉลี่ย ในขณะที่ค่าต่ำกว่า 1 บ่งชี้ว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ำหรือมีผลจำกัด

การวิเคราะห์นี้มุ่งเน้นเพื่อเปรียบเทียบความสำคัญสัมพัทธ์ของตัวแปรในแต่ละสมการ และระบุว่าแบบจำลองใดสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ได้ดีชัดเจนเมื่อค่าตัวแปรนำเข้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองต่อการบริหารใช้งาน และเงื่อนไขข้อมูลที่มี อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาค่า SI จากค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์การทรุดตัวเฉพาะในบริเวณคันดิน (embankment section) เนื่องจากช่วงคันดิน โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่วัสดุโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากหินโรยทางไปสู่โครงสร้างสะพาน เป็นบริเวณที่มีความอ่อนไหวต่อการทรุดตัวสูงที่สุด การประเมินในช่วงนี้จึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างทางได้ชัดเจนกว่าช่วงสะพาน ซึ่งโดยทั่วไปมีความแข็งแรงและเสถียรมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีความไวของตัวแปรนำเข้าในแต่ละสมการพบว่าลักษณะและความแรงของผลกระทบต่อการทรุดตัวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในแบบจำลองที่ 1 ซึ่งใช้เฉพาะตัวแปรนำเข้า N มีค่า SI อยู่ในช่วง 1.10–1.34 แสดงให้เห็นว่า N มีอิทธิพลในระดับที่เด่นชัดต่อการทรุดตัว โดยสะท้อนความสัมพันธ์เชิงเส้นที่เสถียรระหว่างปริมาณการจำนวนรอบซ้ำและการสะสมของความเสียหายในชั้นหินโรยทาง ขณะที่ในแบบจำลองที่ 2 ซึ่งเพิ่ม P_{eq} เข้ามา พบว่า P_{eq} มีค่า SI คงที่เท่ากับ 1.00 ในทุกกรณี สะท้อนว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลในระดับคงที่ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ และสามารถถ่ายทอดผลกระทบต่อการทรุดตัวได้อย่างเสถียร ในขณะที่ N ซึ่งเป็นตัวแปรร่วมในสมการเดียวกัน มีค่า SI อยู่ในช่วง 0.11–0.26 ซึ่งต่ำกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบ แสดงให้เห็นว่า P_{eq} ทำหน้าที่เป็นตัวแปรควบคุมหลักของแบบจำลองนี้

แบบจำลองที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย N, P_{eq} และ v พบว่า P_{eq} มีค่า SI สูงที่สุดในกลุ่มทั้งหมด (2.44–3.64) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลในระดับสูงต่อการทรุดตัว สะท้อนถึงบทบาทที่จำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับ P_{eq} ส่วน v มีค่า SI ต่ำมากจนใกล้ศูนย์ (ประมาณ 0.0004) แม้จะถูกรวมอยู่ในสมการ ซึ่งแสดงว่าความเร็วไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองนี้ ในขณะที่แบบจำลองที่ 4 ซึ่งเพิ่มตัวแปรนำเข้าระดับวัสดุเข้ามา ได้แก่ L พบว่า N ยังคงมีค่า SI สูง (1.12–1.73) ขณะที่ L แสดงค่า SI คงที่ในระดับต่ำมาก (0.0075) และ P_{eq} คงที่เท่ากับ 1.00 ในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่า แม้จะมีการใส่ตัวแปรระดับวัสดุเข้ามา แต่แบบจำลองยังไม่สามารถสะท้อนผลของการบำรุงรักษาด้วยการบดอัดหินโรยทางได้ชัดเจน

ในแบบจำลองที่ 5 ซึ่งพิจารณาตัวแปรระดับวัสดุเพิ่มเติม ได้แก่ σ และ n พบว่า n มีค่า SI สูงที่สุด (2.22) และคงที่ในทุกระดับการเปลี่ยนแปลง ขณะที่ σ มีค่า SI อยู่ในช่วง 1.80–2.10 และ N มีค่า SI ต่ำสุด (1.02–1.05) ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมของการทรุดตัวของโครงสร้างทางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของวัสดุและความเค้นสะสม มากกว่าปัจจัยการจำนวนรอบเพลาล้อเพียงอย่างเดียว

โดยสรุป แบบจำลองแต่ละสมการมีตัวแปรหลักที่ควบคุมค่าการทรุดตัวแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแบบจำลองและประเภทของตัวแปรนำเข้าที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 4 อย่างไรก็ตาม แม้ไม่สามารถเปรียบเทียบค่าดัชนีความไวข้ามสมการได้โดยตรง แต่ผลการวิเคราะห์แสดง

ให้เห็นว่า แรงพลศาสตร์จากล้อรถไฟ (P_{eq}) และอัตราส่วนความพรุนของหินโรยทาง (n) แสดงค่า SI สูงอย่างสม่ำเสมอภายในแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสอดคล้องกับหลักวิศวกรรมที่ชี้ว่าทั้งแรงกระทำเชิงพลศาสตร์และคุณสมบัติวัสดุมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมทรุดตัว

ตารางที่ 4 สรุปค่าดัชนีความไวของตัวแปรนำเข้าไปในแต่ละแบบจำลองเชิงประจักษ์

แบบจำลอง	ตัวแปรนำเข้า	ตัวแปรที่มี SI สูงสุด	ตัวแปรที่มี SI ต่ำสุด
1	N	N (SI= 1.34)	-
2	N, P_{eq}	P_{eq} (SI= 1.00)	N (SI= 0.11)
3	N, P_{eq} , v	P_{eq} (SI= 3.64)	v (SI= 0.00037)
4	N, P_{eq} , L	N (SI= 1.73)	L (SI= 0.0075)
5	N, σ , n	n (SI= 2.22)	N (SI= 1.02)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่มีค่าดัชนีความไวสูงสุดในแต่ละแบบจำลอง พบว่ามีลักษณะการตอบสนองต่อการปรับค่าตัวแปรนำเข้าไปที่แตกต่างกันออกไป โดยตัวแปร N ในแบบจำลองที่ 1 และ 4 แสดงพฤติกรรมเชิงเส้น กล่าวคือ ค่าการทรุดตัวเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรอย่างสมมาตร ส่วนในแบบจำลองที่ 2 และ 5 ซึ่งตัวแปร P_{eq} และ n มีค่า SI สูงสุดตามลำดับ แสดงพฤติกรรมที่คงที่ กล่าวคือ ค่า SI ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าตัวแปรถูกปรับเพิ่มหรือลดภายในช่วงที่กำหนด ขณะที่ P_{eq} ในแบบจำลองที่ 3 แสดงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น โดยการเพิ่มค่าทำให้ค่าการทรุดตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การลดค่ามีผลกระทบน้อยกว่าอย่างชัดเจน แสดงถึงลักษณะการตอบสนองแบบอสมมาตร ซึ่งข้อมูลเชิงพฤติกรรมเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงธรรมชาติของตัวแปรแต่ละชนิด และสามารถนำไปใช้ประกอบการเลือกตัวแปรนำเข้าไปในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาพข้อมูลและเป้าหมายของการใช้งาน

7. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อจำแนกแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ใช้ประเมินค่าการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟ โดยใช้เกณฑ์การจำแนกตามระดับของตัวแปรนำเข้าไปที่ปรากฏในแต่ละสมการ ได้แก่ ตัวแปรระดับระบบ และตัวแปรระดับตำแหน่งหรือวัสดุเพื่อประเมินความเหมาะสมของโครงสร้างสมการต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในระดับโครงการ จากการวิเคราะห์แนวโน้มของผลลัพธ์ พบว่าแบบจำลองที่รวมตัวแปรจากทั้งสองระดับร่วมกันสามารถสะท้อนพฤติกรรมเฉพาะของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้อย่างชัดเจน โดยแสดงค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันในเชิงพื้นที่ และตอบสนองต่อบริเวณวิกฤตได้ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้เฉพาะตัวแปรระดับระบบ โดยเฉพาะกรณีที่ใช้ตัวแปรด้านจำนวนรอบเพลาล้อเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีแนวโน้มการทรุดตัวในลักษณะคงที่และไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงเฉียบพลันในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขณะเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรนำเข้าไปแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแรงพลศาสตร์จากล้อรถไฟและคุณสมบัติของวัสดุชั้นหินโรยทางทาง มีอิทธิพลต่อการทรุดตัวในระดับสูง โดยแสดงค่าดัชนีความไวสูงกว่า 1 อย่างชัดเจนในหลายแบบจำลอง ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทของแรงกระทำและโครงสร้างวัสดุต่อพฤติกรรมโครงสร้างทาง ในทางกลับกัน ตัวแปรด้านความเร็วของรถไฟ หรือจำนวนรอบการบดอัดจากการซ่อมบำรุง แสดงค่าดัชนีความไวในระดับต่ำมาก บ่งชี้ถึงข้อจำกัดในการใช้งานเป็นตัวแปรหลักในแบบจำลองเชิงพยากรณ์

สำหรับข้อเสนอแนะงานวิจัยในลำดับถัดไป ควรนำแบบจำลองที่ผ่านการวิเคราะห์ในงานนี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนามจริง เพื่อประเมิน

ความแม่นยำเชิงสัมบูรณ์ และศึกษาความสอดคล้องของแบบจำลองกับพฤติกรรมทรุดตัวในสภาพการใช้งานจริง นอกจากนี้ ควรขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่กรณีที่มีการปรับปรุงโครงสร้างทางของตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน เช่น การเสริมความแข็งแรงของชั้นดินด้วยจีโอกรีต หรือวัสดุเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของมาตรการทางวิศวกรรมที่มีต่อความไวและประสิทธิภาพของแบบจำลองในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น อีกทั้งควรพิจารณาเชื่อมโยงแบบจำลองการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางกับแบบจำลองของชั้นดินรองรับ เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบโครงสร้างทางได้อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะในกรณีที่ชั้นดินมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ หรือมีแนวโน้มเสื่อมสภาพในระยะยาว ซึ่งมักส่งผลโดยตรงต่อการทรุดตัวสะสมของโครงสร้างทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณต่อ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นต้นสังกัดที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ทั้งในด้านวิชาการ ทรัพยากร และสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการศึกษาค้นคว้าอันเป็นพื้นฐานสำคัญที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Indraratna, M. Babar, T. Ngo, A. Gomes, and R. Kelly (2019). Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches. *Transportation Geotechnics*, vol.21
- [2] R. Sañudo, L. Dell'Olio, J. A. Casado, I. A. Carrascal, and S. Diego (2016). Track transitions in railways: A review. *Construction Building Material*, vol. 112
- [3] J. E. Nicks (2009). The bump at the end of the railway bridge. Texas A&M University, United States.
- [4] H. Wang and V. L. Markine. (2018). Methodology for the comprehensive analysis of railway transition zones. *Computers and Geotechnics*, vol. 99.
- [5] C. Esvelde (2001). *Modern Railway Track*, Second. Delft the Netherlands.
- [6] C. Charoenwong, D.P.Connolly, A. Colaco, P.A. Costa, P.K.Woodward, A. Romero and P.Galvin (2023). Railway slab vs ballasted track: A comparison of track geometry degradation. *Construction Building Material*, vol. 378.
- [7] K. Nasrollahi, J. C. O. Nielsen, E. Aggestam, J. Dijkstra, and M. Ekh (2023). Prediction of long-term differential track settlement in a transition zone using an iterative approach. *Engineering Structure*, vol. 283.
- [8] T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, and W. Powrie (2016). A review and evaluation of ballast settlement models using results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF). *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd.
- [9] B. Indraratna, W. Salim, and C. Rujikiatkarnjorn (2011). *Railway foundation design: Principles and practice*.

- [10] C. Charoenwong, D. P. Connolly, P. K. Woodward, P. Galvín, and P. A. Costa (2022). Analytical forecasting of long-term railway track settlement. *Computers and Geotechnics*, vol. 143.
- [11] E. T. Selig and J. M. Waters (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford.
- [12] A. Alqatawna, S. Sánchez-Cambronero, and M. I. Gallego (2023). Settlement Models Review for Ballasted Railway Tracks as a Tool to Analyze the Influence of the Horizontal Alignment Design in the Maintenance Period. *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., pp. 53–60.
- [13] T. Dahlberg (2001). Some railway settlement models – a critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, pp. 289–300.
- [14] G. A. Fenton and D. V. Griffiths (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering*. Wiley.
- [15] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, and J. S. Vinod (2014). *Advanced rail geotechnology – Ballasted track*.
- [16] A. Hettler (1984). Study on settlement behavior of ballast under cyclic loading. *Railway Technical Review (German Language Edition)*. vol. 33, no. 10.
- [17] R. D. Fröhling (1998). *Prediction of railway track performance*. University of Pretoria.
- [18] V. Cuellar, C. M. Ferregut, and S. Nazarian (2001). Modeling the degradation of railroad ballasted track using Markov chains. *Transportation Research Record*.
- [19] N. H. Thom and D. R. Oakley (2006). Predicting track settlement on ballast and non-ballast railway trackbeds. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, pp. 167–175.
- [20] Y. Sato (1997). *Track degradation and performance of ballasted track*.
- [21] J. Estaire, A. López Pita, and P. F. Teixeira (2017). Evaluation of high-speed railway track settlement using long-term data. *Transportation Geotechnics*, vol. 11, pp. 11–21.
- [22] L. Hecke and S. Stichel (2000). Modelling the dynamic vehicle-track interaction with respect to track settlement,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 33.
- [23] J. E. Alva-Hurtado and E. T. Selig (1981). Permanent deformation behavior of railroad ballast. *Transportation Research Record*, vol. 743, pp. 27–35.
- [24] I. Grossoni, S. Hawksbee, P. Jorge, Y. Bezin, and H. Magalhaes (2022). Prediction of track settlement at high-speed railway transitions between embankment and bridge in the proximity of a turnout. *Transportation Geotechnics*, vol. 37.
- [25] E. Olsson, D. Jelagin, S. Larsson, and F. Chen (2024). A numerical framework for modelling settlements of railway ballast layers. *Transportation Geotechnics*.
- [26] B. Indraratna, S. Nimbalkar, D. Christie, C. Rujikiatkamjorn, and J. S. Vinod (2013). Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 684–700.
- [27] Office for Research and Experiments (1970). *Various empirical models from ORE reports*. International Union of Railways (UIC).
- [28] J. N. Varandas, T. Höglund, and M. A. Silva (2010). Influence of track properties on the dynamic response of railway tracks. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 18.
- [29] M. J. Shenton (1984). Ballast deformation and track deterioration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1*, pp. 415–440.
- [30] D. H. Nguyen, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, and N. Khandelwal (2016). Modelling the deformation behaviour of railway ballast under cyclic loading using a shakedown approach. *Transportation Geotechnics*.
- [31] P. Chumyen, D. P. Connolly, P. K. Woodward, and V. Markine (2023). A comparison of earthwork designs for railway transition zones,” *Construction Building Material*, vol. 395.