

# แนวทางการวัดประสิทธิภาพของโครงสร้างทางรถไฟภายใต้สภาพการใช้งานจริง

## Efficiency measurement guild line for track structure under real service conditions.

น.ส. กมลรัตน์ งามเจริญ และ ดร. พงษ์พิพัฒน์ อานันทนสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล นครปฐม 73170 โทรศัพท์: 0-2889-2138 ต่อ 6521

E-mail: kamonrat.nga@mahidol.ac.th, pongpipat.ana@mahidol.ac.th

### บทคัดย่อ

การขนส่งทางรางเป็นรูปแบบ การขนส่งที่มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่า การขนส่งรูปแบบอื่น การที่จะทำให้ระบบการขนส่งรางมีประสิทธิภาพ คือการมีโครงสร้างทางที่สมบูรณ์ มีสมรรถนะที่เหมาะสมกับสภาพ การจราจรที่ได้คำนึงถึงการขยายตัวในอนาคตโดยสิ่งที่ใช้ในการตรวจสอบ สมรรถนะของโครงสร้างทางคือ การวัดการเสถียรของโครงสร้างทางใน สนาม การศึกษานี้จึงพิจารณาและนำเสนอวิธีการตรวจวัดการทรุดตัวของ โครงสร้างทางรถไฟในสนามภายใต้สภาพการใช้งานจริง (real service conditions) โดยวิธีการใช้มาตรวัดการทรุดตัวและแผ่นวัดแรงดัน (use of settlement and pressure table) เนื่องจากวิธีการนี้สามารถคำนวณการ ยุบตัวในแนวดิ่งของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง รวมถึงการ ทรุดตัว (settlement) ของชั้นดินคันทาง นอกจากนี้สามารถใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงโครงสร้างได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การทรุดตัวของโครงสร้างทาง,การเสถียรของโครงสร้างทางใน สนาม , ตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างทาง

### 1. บทนำ

การขนส่งระบบรางเป็นรูปแบบการขนส่ง ทั้งผู้โดยสารและสินค้า ที่มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น รัฐบาลได้เล็งเห็น ความสำคัญที่จะใช้การขนส่งระบบราง เป็นการลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ และการพัฒนาความเจริญไปสู่ส่วนภูมิภาค การเพิ่มความปลอดภัยในด้านการคมนาคม เพิ่มระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนโดยทั่วไป จึงจะได้มีการพัฒนาระบบการขนส่งทางรางโดยทั่วไปขึ้น (โครงการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมของประเทศงบประมาณ 2.2 ล้านๆ บาท) หนึ่งในโครงการหลักคือการก่อสร้างระบบรถไฟรางคู่ และการนำ ระบบรถไฟความเร็วสูงมาใช้

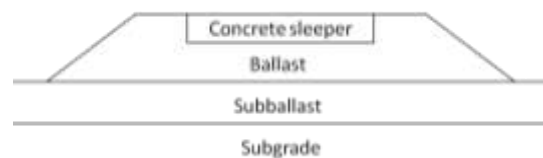
ส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง ที่จะทำให้ระบบการขนส่งรางเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ คือการมีโครงสร้างทางที่สมบูรณ์มีสมรรถนะที่เหมาะสม กับสภาพการจราจรที่ได้คำนึงถึงการขยายตัวในอนาคต การจะได้มาซึ่ง โครงสร้างทางที่สมบูรณ์นั้น เกิดจากองค์ประกอบหลักสองประการ กล่าวคือ 1 ได้รับการออกแบบที่เหมาะสมตามหลักวิศวกรรม และ 2 ได้มีการซ่อมบำรุงซึ่งเป็นไปตามความต้องการอย่างสม่ำเสมอ สิ่งที่ใช้ในการ

ตรวจสอบว่าทางรถไฟที่ได้รับการออกแบบนั้นมีสมรรถนะภาพเป็นไป อย่างที่ต้องการและมีอายุการใช้งานอีกมากเพียงใดก่อนที่จะต้องซ่อม บำรุงนั้น คือ การวัดการเสถียรของโครงสร้างทางในสนาม

การศึกษานี้ได้พิจารณา และนำเสนอวิธีการตรวจวัดการทรุดตัวของ โครงสร้างทางรถไฟในสนามภายใต้สภาพการใช้งานจริง (real service conditions)ที่เหมาะสม เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการตรวจสอบ ประสิทธิภาพของโครงสร้างทางโดยเฉพาะที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อนที่มี ปัญหาการเสถียรและทรุดตัวมาก นอกจากนั้นแล้ว วิธีการตรวจวัดนี้ สามารถใช้ในการช่วยวางแผนการซ่อมบำรุงโครงสร้างทางได้อีกด้วย

### 2. หลักการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟในกรณีที่ดินฐานรากอ่อน

โครงสร้างทางนั้นประกอบด้วยชั้น หินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทาง และชั้นดินคันทางตามแสดงในรูปที่ 1

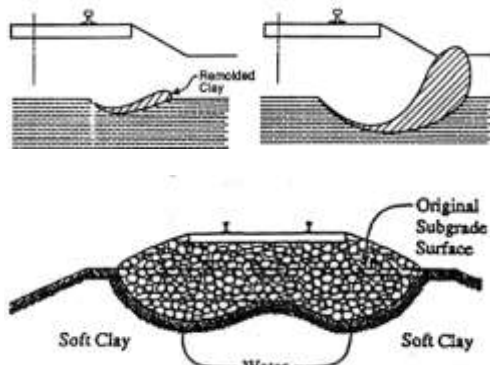


รูปที่ 1 โครงสร้างของทางรถไฟ

หลักการออกแบบโดยทั่วไปของโครงสร้างทางนั้นประกอบด้วยการ ประมาณความหนาที่เหมาะสมของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรย ทางโดยที่ระดับความเค้นอันเกิดจากน้ำหนักการจราจร ที่กระจายผ่าน หมอนรองรางผ่านชั้นหินโรยทางและรองหินโรยทางและมากระทำต่อชั้น ดินคันทางหรือดินธรรมชาติในที่สุด นั้นไม่ก่อให้เกิดการพังวิบัติของชั้น ดินเอง ระดับของความเค้นจากการจราจรที่เกิดขึ้นดินนั้น ได้รับ อิทธิพลจาก ความหนาและกำลังของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรย ทาง รวมทั้งโมดูลัสและกำลังของชั้นดินคันทาง

การพังวิบัติของชั้นดินคันทางหรือชั้นดินธรรมชาตินั้น คือการที่ ระดับของผิวชั้นดินนั้นเสียรูปยุบตัวลงในแนวดิ่ง ทำให้ชั้นหินโรยทาง

และหมอนเคลื่อนตัวไปด้วย สิ่งต่างๆเหล่านี้ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของรางขึ้นในที่สุด



รูปที่ 2 การพังวิบัติของชั้นดินคันทางหรือชั้นดินธรรมชาติ

โดยปกติการยุบตัวของระดับผิวดินเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ นั่นคือประการแรกดินค่อยๆถูกความเค้นบีบให้ปลิ้นออกด้านข้าง ดังแสดงในรูป 2a เกิดเป็นกระเปาะดินอยู่บริเวณชายของชั้นหินโรยทางปริมาณของดินที่ถูกบีบออกไปด้านข้างนี้ เพิ่มขึ้นไปพร้อมกับจำนวนเที่ยวรถและน้ำหนักกดเพลาสะสมที่ผ่านบริเวณดังกล่าว ประการที่สองดินเกิดการทรุดหรือตัวสะสมอันเกิดจากความเค้นเฉือน (deviator stress) โดยจะเกิดมากที่บริเวณใต้รางเพราะมีความปริมาณเค้นมากที่สุด การยุบตัวเฉพาะที่นี้ทำให้เกิดเป็นแอ่งหรือกระเปาะหินโรยทางอยู่ในชั้นดินดังแสดงในรูป 2b

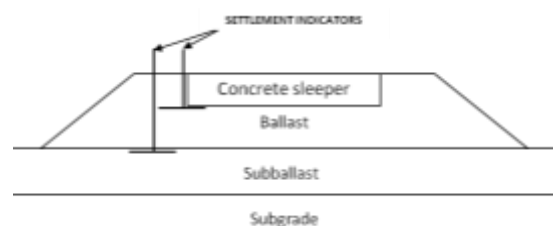
นอกจากนี้ระดับความเครียดจากการจราจร ต้องไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของชั้นหินโรยทาง ในลักษณะที่เกิดการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางก่อให้เกิดการเสียดสีสภาพภายในของชั้นหินโรยทาง (loss of internal stability) ทำให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้าง (lateral spreading) และเกิดการเสียรูปในแนวตั้งที่เพิ่มมากขึ้น

### 3. การวัดการทรุดตัวของโครงสร้างทางในสนามภายใต้สภาพการใช้งานจริง

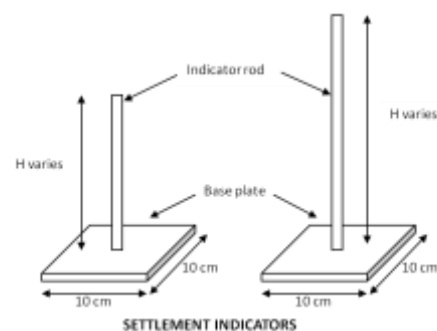
การทดสอบการแอ่นตัวของทาง ด้วยคานเบงเคลมัน (Benkelman beam deflection device) ค่าความแอ่นตัวของรางที่ได้จากคานเบงเคลมันนี้สามารถใช้คำนวณ track modulus เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบกันสะเทือน ล้อรถไฟกับราง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้ในการวิเคราะห์ความราบเรียบในการขับขี่ (Riding comfort) ในที่สุด ข้อดีของวิธีเหล่านี้คือสามารถเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ไปทำการทดสอบที่ตำแหน่งอื่นได้ง่ายอย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่ สามารถใช้วิเคราะห์การเสียรูปถาวรของทางเมื่อน้ำหนักกดเพลาสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

การใช้รถตรวจทาง (Track geometry car) คือพาหนะการตรวจสอบในระบบการขนส่งทางรถไฟ ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อนของทางโดยไม่ขัดขวางการดำเนินการทางรถไฟปกติ สามารถทำได้รวดเร็ว โดยใช้ระบบเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดและข้อมูลรายละเอียดต่างๆของการตรวจสอบ โดยไม่ต้องสัมผัสกับผิวราง บนที่กวดิโอได้อย่างต่อเนื่องและสามารถบอกสภาพความชำรุดได้โดยเสกานทุก 2 มิลลิเมตร พารามิเตอร์ที่วัดได้โดยทั่วไปเช่น ค่าระดับ(crosslevel)ของทั้งสองราง ตำแหน่งความโค้ง ค่าระดับความสูงของราง และ สามารถทราบค่าการทรุดตัวของรางได้เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐาน แต่ก็ไม่สามารถทราบว่าการทรุดตัวเกิดจากโครงสร้างทางในชั้นใด ดินเกิดการวิบัติหรือไม่ และยังมีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย

การใช้มาตรวัดการทรุดตัวและแผ่นวัดแรงดัน (Use of settlement indicators and pressure plates) เป็นการวัดค่าการทรุดตัวของโครงสร้างทางโดยตรง การวางมาตรวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆในช่วงทางเดียวกันนั้นทำให้สามารถคำนวณการยุบตัวในแนวตั้ง (Vertical deformation) ของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทางรวมถึงการทรุดตัว (Settlement) ของชั้นดินคันทางได้ด้วย การวัดการทรุดตัวของชั้นดินคันทางเปรียบเทียบกับเวลาหรือน้ำหนักกดเพลาสะสมนั้นจะใช้ในการพิจารณาว่าดินนั้นเกิดการพังวิบัติหรือไม่



ใส่รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งมาตรวัดการทรุดตัวและแผ่นวัดแรงดันในช่วงทางทดสอบ



ใส่รูปที่ 4 มาตรวัดการทรุดตัวและแผ่นวัดแรงดัน

การวัดการยุบตัวหรือการทรุดตัวนั้น ทำได้จากการติดตามการเคลื่อนตัวของมาตรวัดการทรุดตัวในแนวตั้ง จะมีการติดตั้งหมุดหมาย

(Benchmark) ที่จุดอันมั่นคงและไม่เคลื่อนที่ใกล้เคียงกับบริเวณช่วงทางทดสอบ (Experimental track section) เมื่อจะทำการวัดผู้ทดสอบใช้ไม้อ่านระดับ (Level staff) ตั้งอยู่บนมาตรวัด จากนั้นผู้ทดสอบอีกคนหนึ่งใช้กล้องระดับอ่านการเคลื่อนตัวของมาตรวัดในแนวตั้งเปรียบเทียบกับหมุดหมาย

การเสยรูปในแนวตั้งของชั้นหินโรยทาง ( $\delta_{ballast}$ ) และชั้นรองหินโรยทาง ( $\delta_{subballast}$ ) และการยุบตัวของชั้นดินคันทาง ( $\delta_{subgrade}$ ) นั้นคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

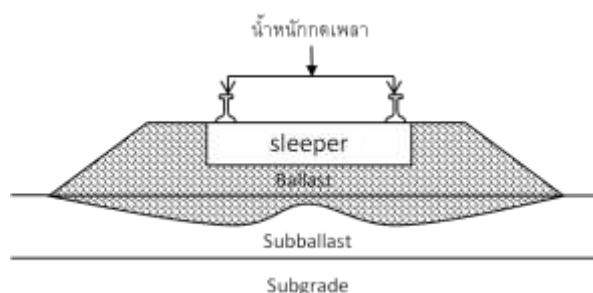
$$\delta_{ballast} = \Delta H_{sb} - \Delta H_b$$

$$\delta_{subballast} = \Delta H_{sg} - \Delta H_{sb}$$

$$\delta_{subgrade} = \Delta H_{sg}$$

โดยที่  $\Delta H_b$ ,  $\Delta H_{sb}$ ,  $\Delta H_{sg}$  คือ การเคลื่อนตัวของมาตรวัดการทรุดตัวที่วางอยู่บนชั้นหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทาง และชั้นดินคันทางตามลำดับ

จากการศึกษาผลการวัดการยุบตัวของชั้นหินโรยทาง (Selig and Waters 1994, Indraratna et al. 2010, Anantanasakul 2012) พบว่าการทรุดตัวนั้นเกิดมากหลังจากที่ชั้นหินโรยทางได้รับการก่อสร้าง หมอนและรางได้รับการติดตั้ง และเปิดเดินรถไฟในช่วงแรก หรือช่วงหลังจากที่ชั้นหินโรยทางของทางเดิมถูกเดิมหินและได้รับการบดอัด ดังนั้นโปรแกรมการวัดการทรุดตัวที่จะได้ทำนั้น จะเลือกช่วงทางทดสอบในทางรถไฟที่ได้รับการสร้างใหม่หรือที่ที่ได้รับการเดิมหินและบดอัดใหม่ คิดตั้งมาตรวัดการทรุดตัวจากนั้นเริ่มทำการวัด โดยวัดถี่ในช่วงแรกที่มีอัตราทรุดตัวและยุบตัวสูง จากนั้นลดความถี่ลง ช่วงเวลาการวัดที่วางแผนไว้คือ 1, 2, 4, 7, 15, 30 วัน 3, 6, 9, 12 เดือน หลังจากเปิดเดินรถไฟ



ในรูปที่ 5 ตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินโรยทาง

มาตรวัดการทรุดตัวควรทำจากวัสดุโลหะที่ไม่เป็นสนิม (เช่น เหล็กไร้สนิม) อันเกิดจากน้ำฝนและความชื้นในทาง มาตรวัดการทรุดตัวประกอบไปด้วยสองชิ้นส่วนคือส่วนฐานซึ่งเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 10 x 10 cm ความหนาประมาณ 5-10 mm และส่วนแท่งแกนวัด ซึ่งเป็นเหล็กเส้นกลมตัน ความแปรผันตามความหนาของบริเวณที่ต้องการวัด ประกอบกันด้วยการเจาะรูที่เสยและยึดด้วยน็อตตัวเมีย

สำหรับแผ่นวัดแรงดันนั้นมิใช่เพื่อวัดทดสอบความเค้นในแนวตั้งอันเกิดจากการจราจรของรถไฟที่วิ่งผ่านช่วงทางทดสอบ การวัดการทดสอบนั้นจะกระทำแบบ Real-time นั่นคือวัดขณะรถไฟวิ่งดิ่งนั้น ผลที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบพลวัต แผ่นวัดแรงดันเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะต้องมีระบบจ่ายไฟฟ้า (Electrical excitation or power supply) และระบบบันทึกข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์แบบเคลื่อนที่ได้ (Portable data acquisition system) ระบบการต่อเชื่อมที่เป็นไฟฟ้าและสายไฟทั้งหมดต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการสัมผัสกับหินโรยทางและกันน้ำ (Waterproof) เพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรอันจะก่อให้เกิดความผิดพลาดของผลการวัดและความเสียหายกับอุปกรณ์ทดสอบได้

การติดตั้งแผ่นวัดแรงดันนั้นทำหลังจากที่วางไม้หมอนและรางแล้วและคิดไว้ที่ได้ชั้นหินโรยทางและรองหินโรยทาง ชั้นหินโรยทางและรองหินโรยทางจะถูกเรือออก เพื่อติดตั้งแผ่นวัดแรงดันที่ตำแหน่งได้หมอนพอดี จากนั้นทำการถมวัสดุกลับคืนและทำการบดอัดเพื่อให้ได้ทางที่สมบูรณ์อีกครั้งหนึ่ง แผ่นวัดแรงดันเหล่านี้จะถูกติดตั้งห่างจากหน้าตัดที่มีมาตรวัดการทรุดตัวเป็นระยะ 1 ไม้หมอน (ประมาณ 60 ซม)

สำหรับการอ่านนั้น ควรกระทำเวลาเดียวกันกับที่ทำการอ่านการยุบตัวและทรุดตัวของชั้นโครงสร้างทางและอ่านเทียบกับน้ำหนักกดเพลลาและความเร็วรถที่ทราบเสมอเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของความเค้นจากการจราจรมายังส่วนต่างๆของโครงสร้างทางได้

เมื่อมีอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (linear displacement transducer) ที่สามารถวัดค่าด้วยความถี่สูงเพียงพอมาประกอบการใช้งาน จะทำให้สามารถวัดการทรุดตัวของโครงสร้างทาง และ track modulus ภายใต้อสภาพแบบพลวัต (Dynamic track response) จากการเคลื่อนที่ผ่านของโบกี้ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวัดลักษณะนี้จำกัดเฉพาะช่วงทางที่อุปกรณ์เหล่านี้ถูกติดตั้งอยู่เท่านั้น โดยมีพื้นฐานมาจาก Indraratna et al. 2010 และ Anantanasakul et al. 2012

## 4. สรุป

หลักการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟ ในกรณีที่ดินฐานรากอ่อนต้องมีความหนาที่เหมาะสม ของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง โดยความเค้น จากน้ำหนักการจราจรต้องไม่ก่อให้เกิดการพังพังตัวของชั้นดินเอง และความเครียดจากการจราจรต้องไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของชั้นหินโรยทาง จนทำให้เสียเสถียรภาพภายในของชั้นหินโรยทาง และทำให้เกิดการเสยรูปในแนวตั้งเพิ่มมากขึ้น

โดยการวัดการทรุดตัวของโครงสร้างทางในสนาม ภายใต้อสภาพการใช้งานจริงเพื่อตรวจสอบสมรรถนะภาพโครงสร้างทาง มีวิธีที่เป็นที่นิยมอยู่หลายวิธี ซึ่งจะใช้วิธีการใช้มาตรวัดการทรุดตัวและแผ่นวัดแรงดัน

(Use of settlement indicators and pressure plates) เนื่องจากจะสามารถ  
คำนวณการยุบตัวในแนวดิ่งของชั้นหินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง  
รวมถึงการทรุดตัวของชั้นดินคันทางได้อีกด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการส่งเสริมการศึกษาและวิจัยร่วมระบบขนส่งทาง  
ราง ที่มอบโอกาสและมอบทุนให้แก่ข้าพเจ้า และ บริษัท อิตาเลีย นไทย  
ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ฝึกงานและให้ความรู้ใน  
การทำโครงการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทพร. ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการ  
พัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย.  
พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
แห่งชาติ; 2555.
- [2] เจน บุญซื่อ. ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วน  
จำกัด แสงไทย; 2554.
- [3] ประทีป สุตะบุตร. คู่มือการปฏิบัติงานนายตรวจทาง (Inspector  
Manual) ภายใต้โครงการปรับปรุงศูนย์ฝึกอบรมการรถไฟแห่งประเทศไทย  
ไทย. กรุงเทพฯ: ม.ป.ท.; 2535.
- [4] Li, D., Selig, E.T. "Method for railroad track foundation design",  
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 1998,  
ASCE, 323-29.

