



กรมการขนส่งทางราง  
Department of Rail Transport

มขร. - C - 006 -2566

มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ  
(RAILWAY TRACK TRANSITION ZONE)



กองมาตรฐานความปลอดภัยและบำรุงทาง



514/1 Lon Luang Road, Dusit,  
Bangkok, Thailand 10300



<http://www.drt.go.th/>



Facebook/DRT.OfficialFanpage



## รายนามคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานการขนส่งทางราง

### คณะกรรมการ

1. นายพิเชฐ คุณาธรรมรักษ์  
กรรมการขนส่งทางราง ประธานกรรมการ
2. นางสลักขิณี พิสุทธิพิศุทธยา  
สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กรรมการ
3. นายเริงศักดิ์ ทองสม  
สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กรรมการ
4. นายกำพล บุญชม  
การรถไฟแห่งประเทศไทย กรรมการ
5. นายสุพัต พิพัฒน์กุล  
การรถไฟฟ้ามวลชนแห่งประเทศไทย กรรมการ
6. นายอานุกาภ เกียรติกำจร  
บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด กรรมการ
7. นายภณสินธุ์ ไพทีกุล  
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กรรมการ
8. นายเอกรัตน์ ไวยนิตย์  
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กรรมการ
9. นายอนุสรณ์ ทนหมื่นไวย  
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กรรมการ
10. นายสรารุช กาญจนพิมาย  
สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์ กรรมการ
11. นายประจักษ์ ทรัพย์มณี  
สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย กรรมการ
12. นายปิยชัย ชูเอม  
บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) กรรมการ
13. นายหลักฐาน ทองนพคุณ  
บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) กรรมการ
14. นายวรนิติ ช่อวิเชียร  
สมาคมวิศวกรที่ปรึกษาแห่งประเทศไทย กรรมการ



- |   |                                |
|---|--------------------------------|
| 15. นายทยากร จันทรางศุ<br>กรรมการขนส่งทางราง            | กรรมการ<br>และเลขานุการ        |
| 16. นายศุภฤกษ์ สูดยอดประเสริฐ<br>กรรมการขนส่งทางราง     | กรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 17. นางสาวภัณฑิรา ธนะโสภณ<br>กรรมการขนส่งทางราง         | กรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 18. นายปกรณ์ ศรีรักษา<br>กรรมการขนส่งทางราง             | กรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 19. นายเกริกเกียรติ อังคณาวิศิษฐ์<br>กรรมการขนส่งทางราง | กรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 20. นายกองพล ชุนเกาะ<br>กรรมการขนส่งทางราง              | กรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |

\*\*\*\*\*



## รายนามคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานโครงสร้างพื้นฐานด้านงานโยธา และความปลอดภัยของระบบราง

### คณะกรรมการ

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. นายอธิภู จิตรานุกเคราะห์<br>กรรมการขนส่งทางราง                                      | ประธานอนุกรรมการ           |
| 2. นายทยากร จันทรางศุ<br>กรรมการขนส่งทางราง  | รองประธานอนุกรรมการ        |
| 3. นายพิชญ พงษ์ไทย<br>การรถไฟแห่งประเทศไทย   | อนุกรรมการ                 |
| 4. นายขวัญ สุขคง<br>การรถไฟฟ้ามหานครแห่งประเทศไทย                                      | อนุกรรมการ                 |
| 5. นายสุพัต พิพัฒน์กุล<br>การรถไฟฟ้ามหานครแห่งประเทศไทย                                | อนุกรรมการ                 |
| 6. นางสาวพาขวัญ พูนจิตรบริสุทธิ์<br>สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน) | อนุกรรมการ                 |
| 7. นายอานุกาภ เกียรติกำจร<br>บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด                               | อนุกรรมการ                 |
| 8. นายหลักฐาน ทองนพคุณ<br>บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน)                | อนุกรรมการ                 |
| 9. นายวิสพล ลัญฉน์วัฒน์<br>บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)                  | อนุกรรมการ                 |
| 10. นายไพสุข ห่านชัย<br>บริษัท เอเชีย เอรา วัน จำกัด                                   | อนุกรรมการ                 |
| 11. นายดิศพล ผดุงกุล<br>วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์                   | อนุกรรมการ                 |
| 12. นายภณสินธุ์ ไพทีกุล<br>สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย             | อนุกรรมการ                 |
| 13. นายอเนก มีมุข<br>สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ                      | อนุกรรมการ                 |
| 14. นายศุภฤกษ์ สุตยอดประเสริฐ<br>กรรมการขนส่งทางราง                                    | อนุกรรมการ<br>และเลขานุการ |



- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 15. นางสาวภัณฑิรา ธนะโสภณ<br>กรรมการขนส่งทางราง         | อนุกรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 16. นายปกรณ์ ศรีรักษา<br>กรรมการขนส่งทางราง             | อนุกรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 17. นายเกริกเกียรติ อังคณาวิศิษฐ์<br>กรรมการขนส่งทางราง | อนุกรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |
| 18. นายกองพล ชุนเกาะ<br>กรรมการขนส่งทางราง              | อนุกรรมการ<br>และผู้ช่วยเลขานุการ |

\*\*\*\*\*

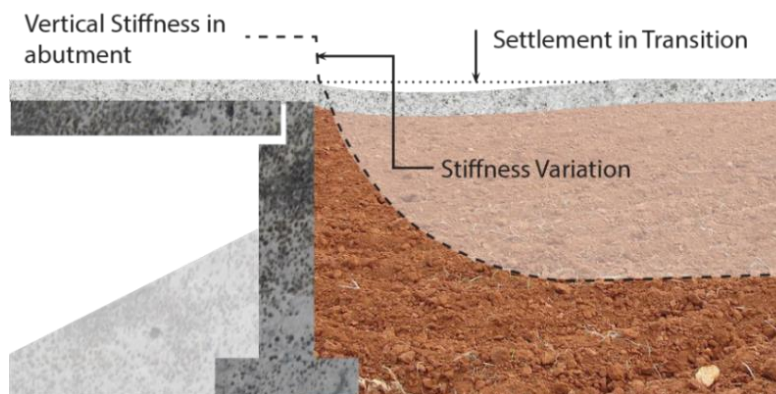


มขร. - C - 006 -2566  
มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ  
(RAILWAY TRACK TRANSITION ZONE)

## 1. บททั่วไป

### 1.1 หลักการพื้นฐาน

บริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างทางรถไฟบนโครงสร้างต่างชนิดกัน เช่น ตำแหน่งระหว่างช่วงรอยต่อทางรถไฟที่มีหินโรยทาง (ballasted track) กับทางรถไฟบนโครงสร้างคอนกรีต (slab track/ballastless track) รวมไปถึงทางรถไฟที่เชื่อมกับสะพาน (bridge) อุโมงค์ (tunnel) ท่อลอดระบายน้ำ (culvert) หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งแบบทันทีทันใด จะถูกพิจารณาให้เป็นตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (railway transition zone) ซึ่งในบริเวณที่กล่าวข้างต้น จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งแนวตั้ง (vertical stiffness) ของโครงสร้างรองรับทางรถไฟอย่างทันทีทันใด โดยบริเวณที่มีค่าความแข็งเกร็งต่ำกว่าจะมีการยุบตัวของทางรถไฟมากกว่า คุณสมบัติดังกล่าวจะส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของรถไฟและจะทำให้เกิดแรงกระแทกจากล้อที่กระทำต่อราง (wheel-rail impact force) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสื่อมสภาพและความเสียหายอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป และส่งผลต่อความรู้สึกสบายของผู้โดยสาร จึงจำเป็นต้องมีรอบการบำรุงรักษามากกว่าทางรถไฟในบริเวณอื่นรูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการทรุดตัวของดินบริเวณคอสสะพาน [1] เนื่องจากความแตกต่างของค่าความแข็งเกร็งระหว่างสะพานและคันดินบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ

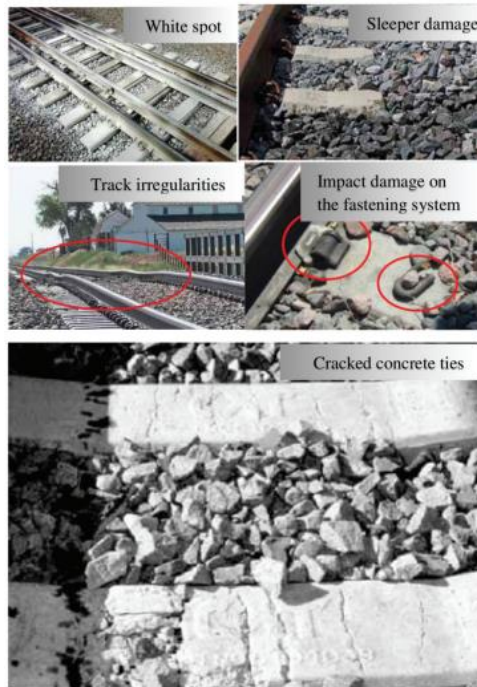


รูปที่ 1 ปัญหาการทรุดตัวของดินบริเวณคอสสะพาน

ที่มา : มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

จนท้ายที่สุดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อทางรถไฟทั้งการทรุดตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางรถไฟ [2] ได้แก่ การเกิดฝุ่นขาว (white spot) เนื่องจากการขัดสีกันของหินโรยทาง หมอนรองรางเสียหาย (sleeper damage) เนื่องจากแรงกระแทก ความไม่สม่ำเสมอของรางตามยาว (track irregularities) เนื่องจากพฤติกรรมทางพลวัตของระบบรถไฟ ความเสียหายกับระบบยึดเหนี่ยวรางรถไฟ

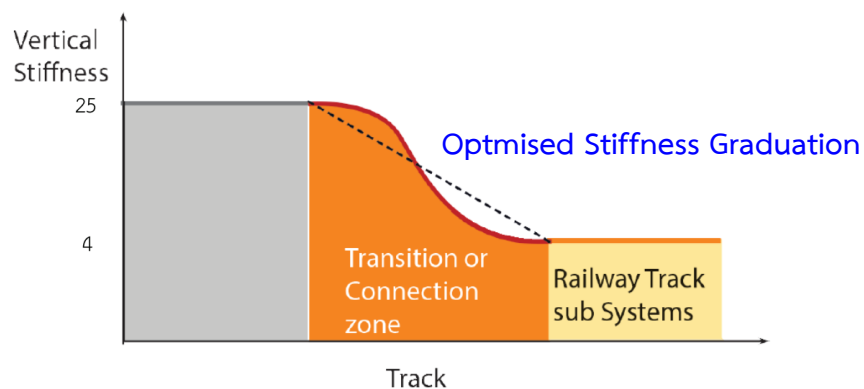
(rail fastening damage) เนื่องจากแรงดึงที่เกิดจากการหดตัวของทางรถไฟ และโครงสร้างหมอนรองรางร้าว (cracked concrete ties) เป็นต้น แสดงดังในรูปที่ 2 [3]



รูปที่ 2 ปัญหาด้านโครงสร้างทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ

ที่มา : Jenks, C. W. (2006). Design of track transitions. Transportation Research Board.

โดยทั่วไปทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและแบบพื้นคอนกรีตจะมีค่าความแข็งเกร็งแตกต่างกันประมาณ 6 เท่า ดังนั้น หลักการสำหรับการออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟอย่างเหมาะสม คือ การจัดการค่าความแข็งเกร็งบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (optimized stiffness graduation) แสดงดังในรูปที่ 3 รวมไปถึงมีการตรวจสอบและควบคุมการสั่นสะเทือนของรถไฟไม่ให้เกิดการกระแทกที่รุนแรงเกินไป เพื่อลดอัตราความเสียหายและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงทางรถไฟ



รูปที่ 3 การจัดการค่าความแข็งเกร็งบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทางรถไฟที่เหมาะสม

ที่มา : Giannakos, K. and S. Tsoukantas (2012) .Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track

## 1.2 วัตถุประสงค์

มาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟฉบับนี้ เป็นมาตรฐานแนะนำ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับแนะนำและอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐานและเทคนิคในการออกแบบ ก่อสร้างและปรับปรุงในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟขนาดกว้าง 1.000 เมตร (meter gauge) และขนาด 1.435 เมตร (standard gauge) ที่เชื่อมต่อระหว่างทางรถไฟที่มีหินโรยทางกับทางรถไฟที่ไม่มีหินโรยทางหรือทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต รวมไปถึงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟที่เชื่อมต่อกับสะพาน (bridge) อุโมงค์ (tunnel) ท่อทางลอดระบายน้ำ (culvert) และบริเวณอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งแบบทันทีทันใด ทั้งนี้ สามารถพิจารณาใช้มาตรฐานอื่นๆ ที่เทียบเท่าหรือตามข้อตกลงในสัญญา

## 1.3 ขอบเขต

1.3.1 มาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย

1.3.2 มาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับออกแบบ ก่อสร้างและปรับปรุงในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างบนทางรถไฟขนาดกว้าง 1.000 เมตร (meter gauge) และขนาด 1.435 เมตร (standard gauge) ที่เชื่อมต่อระหว่างทางรถไฟที่มีหินโรยทางกับทางรถไฟที่ไม่มีหินโรยทางหรือทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต รวมไปถึงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟที่เชื่อมต่อกับสะพาน (bridge) อุโมงค์ (tunnel) ท่อทางลอดระบายน้ำ (culvert) และบริเวณอื่นๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งแบบทันทีทันใด

## 1.4 มาตรฐานอ้างอิง

1.4.1 มาตรฐานการขนส่งทางราง มขร C-001-2564 มาตรฐานการแบ่งประเภททางรถไฟ (track classification standard)

1.4.2 มาตรฐานการขนส่งทางราง มขร C-005-2566 มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ (track components standard)

1.4.3 มาตรฐาน UIC719 R เรื่อง earthworks and track bed for railway lines

1.4.4 มาตรฐาน KR C-14080 เรื่อง interaction between track, vehicle, signal, structure, electricity

1.4.5 มาตรฐาน UIC-518 เรื่อง testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – safety track fatigue-running behavior

## 2. นิยามและสัญลักษณ์

### 2.1 นิยาม

ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (railway track transition zone) คือ จุดหรือบริเวณที่โครงสร้างรองรับทางรถไฟที่แตกต่างกันได้แก่ ตำแหน่งระหว่างช่วงรอยต่อทางรถไฟที่มีหินโรยทางกับทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต สะพาน อุโมงค์ ท่อลอดทางระบายน้ำ และบริเวณอื่นๆ ที่จะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งแนวตั้ง (vertical stiffness) แบบทันทีทันใด ดังนั้น ควรคำนึงถึงประเด็นตามมาตรฐาน UIC719R [5] ดังต่อไปนี้ เป็นพิเศษ





- 1) ประเภทของรอยต่อโครงสร้างทางรถไฟ ได้แก่ สะพาน ทางลอด ท่อลอดระบายน้ำ เป็นต้น
- 2) กระบวนการก่อสร้าง (the constructive process)
- 3) ความเร็วของรถไฟขณะที่อยู่บนราง (operational speed on the track)
- 4) ความยาวของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่เหมาะสม
- 5) การหลุดตัวในระยะยาวของโครงสร้างรถไฟที่ยอมรับได้

**ค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟ (railway track stiffness)** คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) เมื่อถูกแรงกระทำโดยล้อรถไฟ (wheel load) ที่กระทำกับโครงสร้างทางรถไฟ โดยค่าความแข็งเกร็งขึ้นอยู่กับโครงสร้างสองส่วน คือ โครงสร้างทางรถไฟและโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟ โดยค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟ ( $K$ ) ดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยอัตราส่วนของแรงกดต่อระยะการหลุดตัวหรือการแอ่นตัวของรางแสดงในสมการที่ 1

$$K = P/y \quad (1)$$

โดยที่  $K$  คือ ค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟ (track stiffness)  
 $P$  คือ น้ำหนักกระทำจากล้อรถไฟ (wheel load)  
 $y$  คือ การแอ่นตัวของราง (rail deflection)

ทั้งนี้ การแอ่นตัวของราง ( $y$ ) จะใช้ทฤษฎีการคำนวณโมดูลัสของการยึดหยุ่นทางรถไฟ (track modulus) ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับคานที่วางบนพื้นดิน (beam-on-elastic foundation) โดยที่การหาค่าการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งใดๆ บนราง ดังแสดงในสมการที่ 2

$$y(x) = -\frac{P \cdot \beta}{2u} \cdot e^{-\beta \cdot x} \cdot [\cos(\beta x) + \sin(\beta x)] \quad (2)$$

$$\text{และ } \beta = \left(\frac{u}{4EI_z}\right)^{\frac{1}{4}}$$

โดยที่  $E$  คือ โมดูลัสของการยึดหยุ่นของราง (modulus of elasticity of the rail)  
 $I_z$  คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของราง  
 $u$  คือ ค่าโดยประมาณของโมดูลัสของทางรถไฟ

ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเกร็งของทางรถไฟกับโมดูลัสของทางรถไฟ ( $u$ ) แสดงในสมการที่ 3

$$u = (K)^{4/3} / (64EI_z)^{1/3} \quad (3)$$

พื้นทางชั้น track concrete layer (TCL) คือ แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กตามยาวต่อเนื่องที่ไม่มีรอยต่อก่อสร้าง ณ ส่วนของดินถมคันทางและอุโมงค์ [6]

พื้นทางชั้น hydraulically stabilized base (HSB) คือ ชั้นพื้นทางที่อยู่ระหว่างชั้นพื้นทางคอนกรีต (track concrete layer) และชั้นดินเดิม ซึ่งก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-place) แบบไม่มีการเสริมเหล็ก [6]

## 2.2 สัญลักษณ์

สัญลักษณ์และความหมายที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในมาตรฐานตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการศึกษาในมาตรฐานฉบับนี้

สัญลักษณ์	ความหมาย
$K$	ค่าความแข็งเกร็ง (Track Stiffness) ของโครงสร้างทางรถไฟ
$L_{tran}$	ความยาวของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน
$K_{track,dyn}$	ค่าความแข็งเกร็งเชิงพลศาสตร์ในแนวตั้งของทางรถไฟ
$V$	ความเร็วของขบวนรถไฟ
$G_{tran}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความแข็งเกร็งของทางรถไฟ
$\Delta P$	การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงแนวตั้งที่ล้อหนึ่งด้าน
$P$	แรงแนวตั้งแบบสถิตที่ล้อหนึ่งด้าน
$E$	โมดูลัสของการยืดหยุ่นของราง (modulus of elasticity of the rail)
$I_z$	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของราง
$u$	ค่าโดยประมาณของโมดูลัสของทางรถไฟ
$y$	ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางรถไฟ
$TCL$	พื้นทางชั้น track concrete layer
$HSB$	พื้นทางชั้น hydraulically stabilized base



### 3. ปฏิสัมพันธ์ของรถไฟและทางรถไฟ

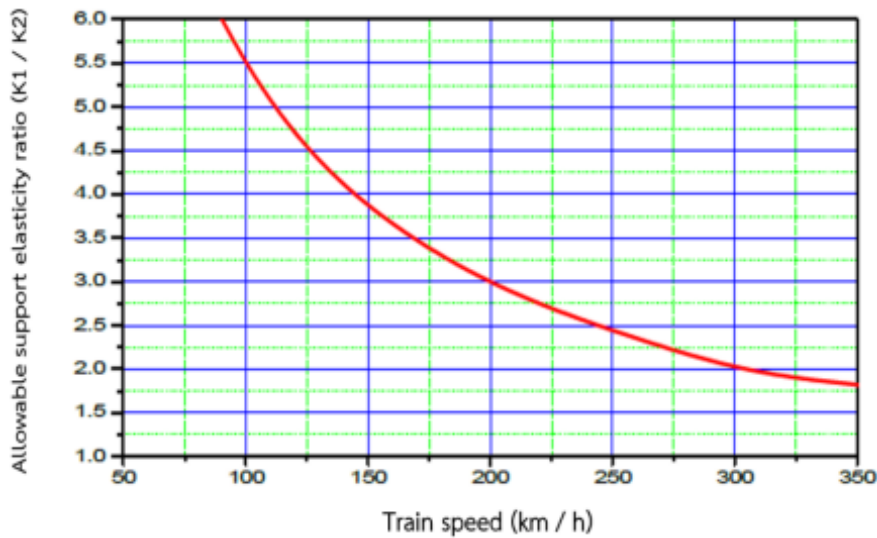
ในการเลือกใช้ค่าความแข็งแรงสำหรับทางรถไฟนั้น จะต้องวิเคราะห์และดำเนินการตรวจวัดถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของรถไฟที่ใช้งานบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านด้วย เพื่อตรวจสอบค่าการสั่นสะเทือนให้เป็นไปตามข้อกำหนด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพิกัดสูงสุดที่ยอมให้สำหรับรถไฟและทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ

คุณสมบัติที่ต้องการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่าพิกัดสูงสุดที่กำหนด
ค่าความเร่งแนวตั้งสูงสุดของตัวรถ	UIC-518 (simplified acceleration method)	1.3 เมตรต่อวินาที <sup>2</sup>
การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงแนวตั้งที่ล้อ	UIC-518 (simplified acceleration method)	60 เปอร์เซ็นต์
แรงกดขั้นต่ำใต้ราง	pressure pad หรือ indirect-method	ร้อยละ 70 ของแรงกดจากอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดต่อทางรถไฟ รวมไปถึงความปลอดภัยของรถไฟ จะต้องมีการควบคุมปัจจัยที่อาจเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟด้วย ดังนี้

- 1) การสั่นสะเทือนในแนวตั้งของรถไฟ
- 2) ค่าการทรุดตัวของโครงสร้างรองรับที่ยอมรับได้
- 3) ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทกที่ล้อ  $\frac{\Delta P}{P}$  (wheel load reduction ratio)
- 4) แรงยกที่อาจเกิดขึ้นต่อรางโดยควบคุมได้ด้วยการกำหนดค่าแรงกดขั้นต่ำที่ต้องมีใต้รางรถไฟ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ของแรงกดจากอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง โดยอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางแต่ละชุด จะต้องมีการสุ่มตรวจสอบและรับรองคุณภาพก่อนนำมาใช้งานจริง โดยมาตรฐาน korea code 14080 ของ Korea Rail Network Authority (KR) ได้แนะนำแนวทางการออกแบบค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรง ( $G_{tran}$ ) ระหว่างรอยต่อที่เหมาะสมกับความเร็วของรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ซึ่งสามารถใช้แผนภูมิอัตราส่วนของค่าความแข็งแรง (stiffness) ดังในรูปที่ 4 เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ



รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงค่าอัตราส่วนของค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟ (track stiffness) ที่เหมาะสมกับความเร็วของรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (speed on the track)

ที่มา : Korea Rail Network Authority (KR) (2012). KR C-14080: Interaction Between Track, Vehicle, Signal, Structure, Electricity; KR: Daejeon, Korea.

- 5) ความยาวของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (transition zone) ซึ่งเป็นระยะทางที่ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) มีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป ทั้งนี้ ระยะที่กำหนดนั้นมาจากการคำนวณหา ระยะทางที่ขบวนรถวิ่งผ่านภายในเวลา 0.5 วินาที ซึ่งสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4

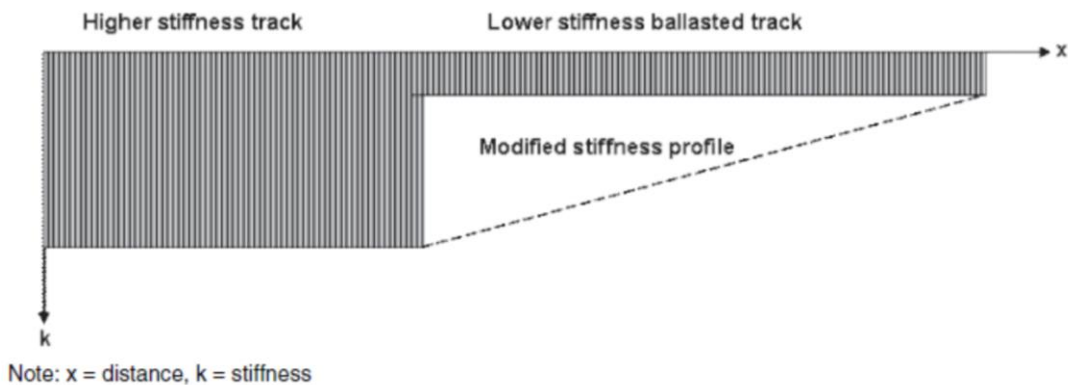
$$L_{tran} = V/7.2 \quad (4)$$

โดยที่  $L_{tran}$  คือ ความยาวของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (เมตร)  
 $V$  คือ ความเร็วของขบวนรถ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

- 6) ค่าความแข็งเกร็งเชิงพลศาสตร์ในแนวตั้งของทางรถไฟ (vertical dynamic track stiffness) ที่แนะนำ คือ  $K_{track,dyn} = 100$  กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เป็นการจำกัดให้ค่าการทรุดตัวของรางอยู่ในช่วง 1-1.5 มิลลิเมตร [8]
- 7) ค่าแนะนำของอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความแข็งเกร็งของทางรถไฟในช่วงบริเวณเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ (maximum track stiffness gradient) คือ  $G_{tran} = 2$  เมกกะนิวตันต่อเมตรต่อเมตร ( $MN/m/m$ ) [9]
- 8) ค่าความยาวและความแข็งเกร็งของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟที่แนะนำไว้ข้างต้นนั้น มีพื้นฐานมาจากน้ำหนักลงเพลา 20 ตัน หากต้องการค่าโดยละเอียดสามารถใช้การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของรถไฟและทางรถไฟ หรือใช้วิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนเพื่อสังเคราะห์ค่าดังกล่าวได้

#### 4. หลักการออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ

หลักการเบื้องต้นในออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ คือ การทำให้ค่าความแข็งเกร็งมีความราบเรียบมากที่สุด หรือในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จะต้องมีการจัดการให้ค่าความแข็งเกร็งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยการเพิ่มความแข็งเกร็งจากด้านที่มีค่าความแข็งเกร็งน้อยไปหาด้านที่มีค่าความแข็งเกร็งมากอย่างต่อเนื่อง



#### รูปที่ 5 หลักการเพิ่มความแข็งเกร็งของทางรถไฟในบริเวณที่มี

#### ความแข็งเกร็งน้อยไปสู่บริเวณที่มีค่าความแข็งเกร็งมาก

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร , รายงานการออกแบบ การศึกษาความเหมาะสมและออกแบบระบบรถไฟทางคู่เพื่อการขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์ (ระยะเร่งด่วน ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร)

โดยมีแนวทางและข้อพิจารณา ดังต่อไปนี้

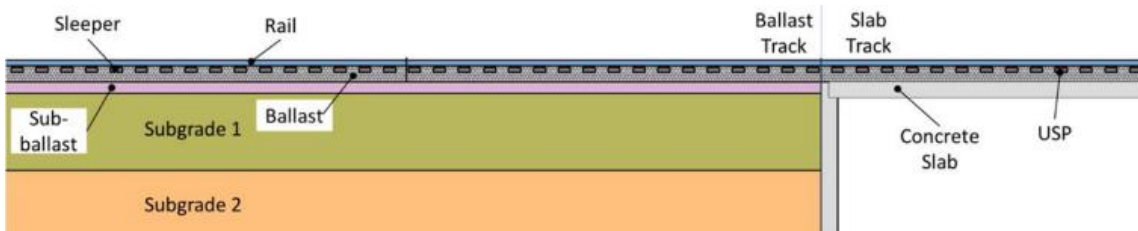
- 1) ค่าความแข็งเกร็งของทางรถไฟนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างสองส่วน คือ โครงสร้างทางรถไฟ (track structural component) และโครงสร้างที่รองรับทางรถไฟ (track substructure) ซึ่งในการออกแบบไม่ควรให้การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเกร็งของโครงสร้างทั้งสองส่วนอยู่บริเวณเดียวกัน
- 2) อิทธิพลของความไม่ต่อเนื่องบนทางรถไฟ (track discontinuity) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งเกร็งและก่อให้เกิดแรงกระแทกระหว่างล้อและรางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยจัดการค่าความแข็งเกร็งใด ๆ จะต้องกำหนดให้ตำแหน่งสิ้นสุดของการติดตั้งอยู่คนละตำแหน่งกัน
- 3) การออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ จะใช้หลักการออกแบบให้ค่าความแข็งเกร็งมีความราบเรียบมากที่สุด หรือในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จะต้องมีการจัดการให้ค่าความแข็งเกร็งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (optimized stiffness graduation) ได้แก่ การติดตั้งรางเสริม การเสริมแผ่นรองแบบยืดหยุ่น การขยายความกว้างของหมอนรองรางและการปรับปรุงชั้นรองพื้นทาง/คันดินถม เป็นต้น
- 4) หลีกเลี่ยงการวางจุดเชื่อมรางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟ



## 5. ข้อควรพิจารณาในการออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟในรูปแบบต่างๆ

### 5.1 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟที่มีหินโรยทางและทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต

ตำแหน่งช่วงรอยต่อระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง (ballasted track) กับทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง (ballastless track) หรือทางรถไฟที่วางบนโครงสร้างคอนกรีต (slab track) [10] ซึ่งจะพบในบริเวณที่เป็นตำแหน่งเปลี่ยนของรถไฟระหว่างเมือง (intercity railways) หรือรถไฟขนส่งสินค้า (freight railways) มีลักษณะแสดงดังในรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต

ที่มา : Buddhima Indraratna (2019). Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches



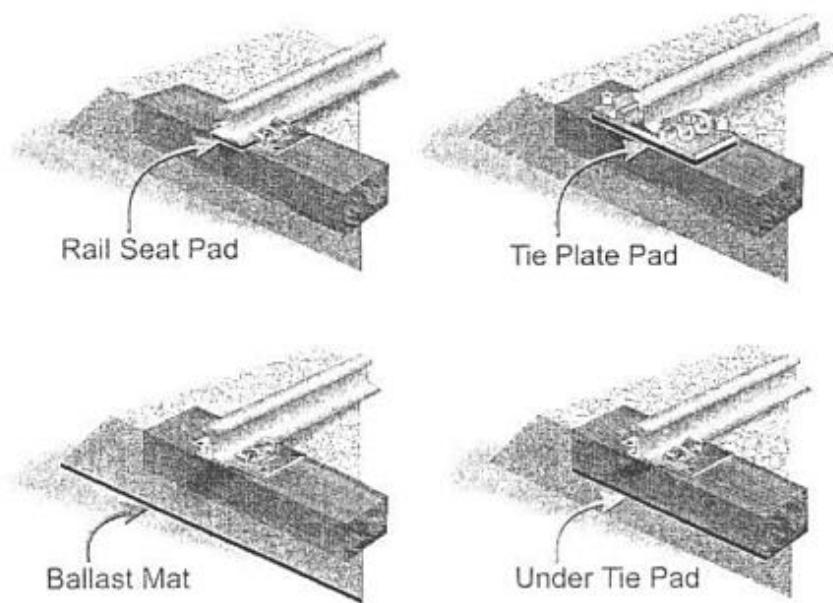
รูปที่ 7 ตัวอย่างตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและพื้นคอนกรีต

ที่มา : UIC719R ,Earthworks and track bed for railway lines.

มาตรฐานฉบับนี้ได้รวบรวมและสำรวจวิธีการปรับปรุงและนำมาประยุกต์ใช้ในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและบนพื้นคอนกรีต เพื่อลดการทรุดตัวของโครงสร้างรองรับทางรถไฟและเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยมีวิธีการ ดังต่อไปนี้

- 1) บริเวณดังกล่าวจะมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันทั้งแบบยืดหยุ่น (elastic deflection) และถาวร (permanent deflection) ซึ่งในการออกแบบจะต้องจัดการค่าความแข็งแรงให้เปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป

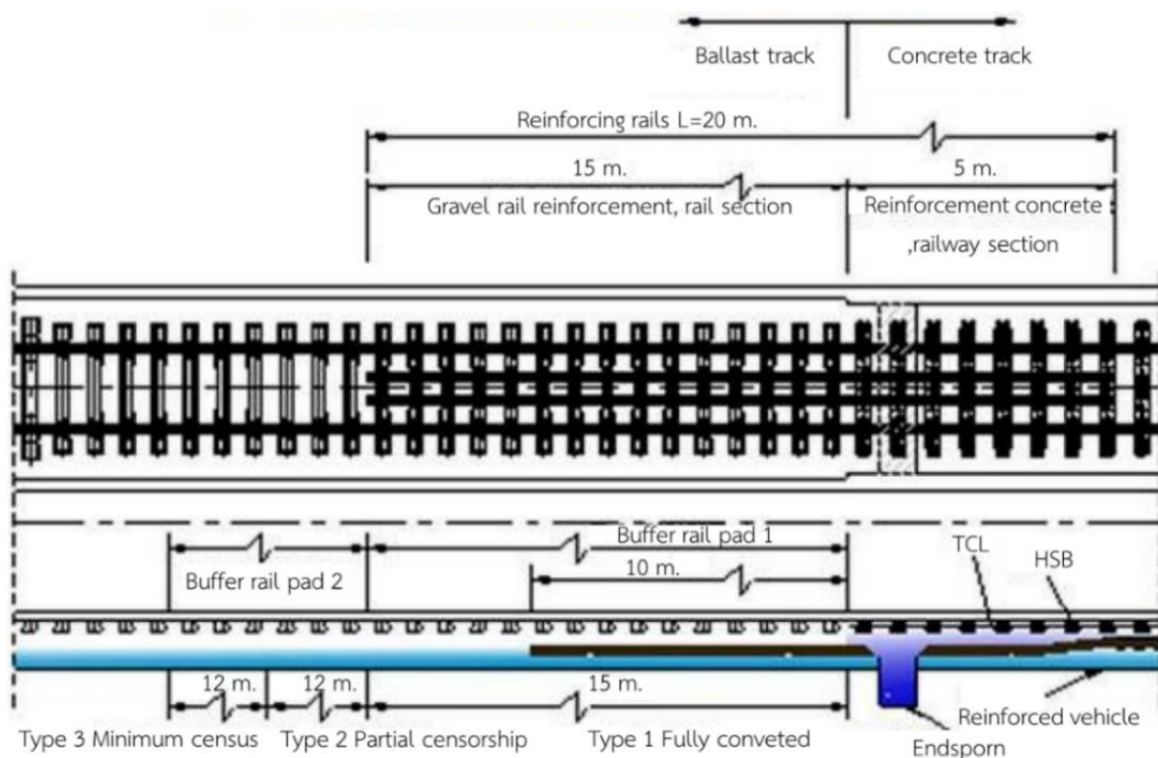
- 2) การปรับปรุงค่าความแข็งแกร่งของโครงสร้างทางรถไฟสามารถทำได้โดยการติดตั้งรางเสริมหรือรางกันตก (guard rail) เป็นระยะทาง 20 เมตร (ระยะ 5 เมตร ในด้านของทางรถไฟบนพื้นคอนกรีตและระยะ 15 เมตร บนทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง) หรือลดระยะห่างระหว่างหมอนคอนกรีตในทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง
- 3) การเสริมแผ่นรองรางแบบยืดหยุ่น (rail pads) การปรับปรุงชั้นรองพื้นทาง การเสริม under ballast mat (UBM) เช่น วัสดุ HDPE (high density polyethylene) และยาง (rubber) กับโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่าง (substructure) [14] เพื่อลดทอนการเปลี่ยนรูป (deformation) ของรางและลดการสั่นของหินโรยทาง แสดงดังในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การใช้แผ่นรองราง หรือ under ballast mat เพื่อช่วยให้ค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) มีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป

ที่มา : ธนศักดิ์ ศรีสวัสดิ (2021). การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี

- 4) ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางกับทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต ควรอยู่บนทางรถไฟช่วงทางตรง (หลีกเลี่ยงทางโค้งและประแจทางหลัก)
- 5) ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางกับทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต จะต้องอยู่บนโครงสร้างรองรับชนิดเดียวกัน ตามมาตรฐาน KR C-14080, track / vehicle / structure / electrical / signal interaction แสดงดังในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างการก่อสร้างบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง และทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต ตามมาตรฐาน KR C-14080

ที่มา : KR C-14080, track / vehicle / structure / electrical / signal interaction.

## 5.2 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟระหว่างทางรถไฟบนพื้นคอนกรีตต่างชนิดกัน

โดยทั่วไปแล้ว ทางรถไฟควรวางอยู่บนระบบพื้นคอนกรีตเพียงชนิดเดียว และควรหลีกเลี่ยงการใช้ระบบพื้นคอนกรีตต่างชนิดในสายทางเดียวกัน ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จะต้องมีการออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายของทางรถไฟบริเวณตำแหน่งจุดต่อ ทั้งจากแรงกระแทกจากรถไฟและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยมีข้อกำหนด ดังต่อไปนี้

- 1) ระดับของทางรถไฟทั้งสองระบบจะต้องออกแบบให้ค่าความแข็งเกร็งใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้รถไฟสามารถแล่นผ่านได้อย่างราบรื่น ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จะต้องมีการออกแบบให้มีจุดรองรับแบบพิเศษ เพื่อลดการกระแทกในบริเวณดังกล่าว
- 2) ทางรถไฟในสายทางที่มีระบบพื้นคอนกรีตต่างชนิดกัน จะต้องมีการรับรองจากผู้รับผิดชอบทางรถไฟ

## 5.3 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางบนคันดินและทางรถไฟบนสะพาน

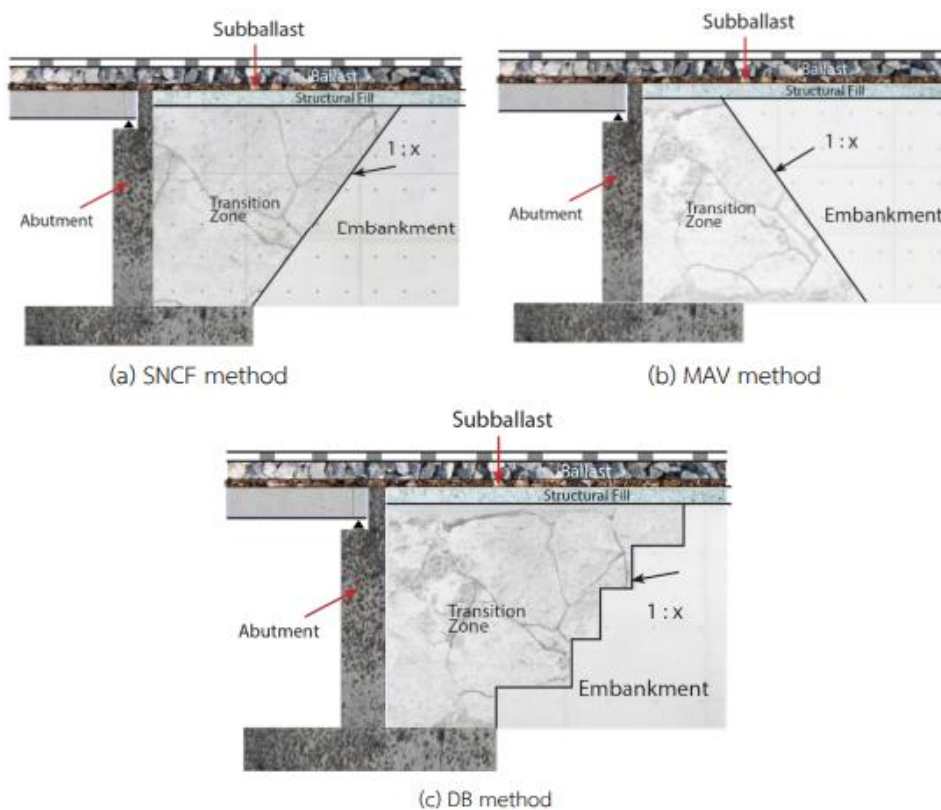
ประเทศไทยมีตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบริเวณสะพานรถไฟ อุโมงค์ ท่อลอดระบายน้ำ/ช่องน้ำ รวมกันถึงประมาณ 5,900 แห่ง ตลอดเส้นทางรถไฟประมาณ 4,400 กิโลเมตร [14] ในความรับผิดชอบของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยปัญหาการออกแบบหรือก่อสร้างตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทางรถไฟบนสะพานที่ไม่เหมาะสมจะนำไปสู่การบริหารจัดการและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมบำรุงรักษาที่สูง ดังนั้น มาตรฐานฉบับนี้ได้ทบทวนและ

รวบรวมวิธีปรับปรุงค่าความแข็งแกร่งในกรณีตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและทางรถไฟบนสะพาน [14] ดังต่อไปนี้

### 5.3.1 วิธีเสริมค่าความแข็งแกร่งด้วยการออกแบบความลาดชันของคันดิน

การออกแบบความลาดชันของคันดินถมคันทาง (slope embankment) บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านตามมาตรฐาน UIC 719R ได้แนะนำวิธีการที่ก่อสร้างพื้นที่ทางในบริเวณที่เป็นบริเวณเปลี่ยนผ่านทางรถไฟระหว่างดินถมคันทางและสะพาน โดยมี 3 วิธีแนะนำดังต่อไปนี้ [13] และแสดงดังในรูปที่ 10

- 1) SNCF Method ของประเทศฝรั่งเศส (France's National State owned Railway Company)
- 2) MAV Method ของประเทศฮังการี (Hungarian Railway)
- 3) DB Method ของประเทศเยอรมัน (German National Railway)



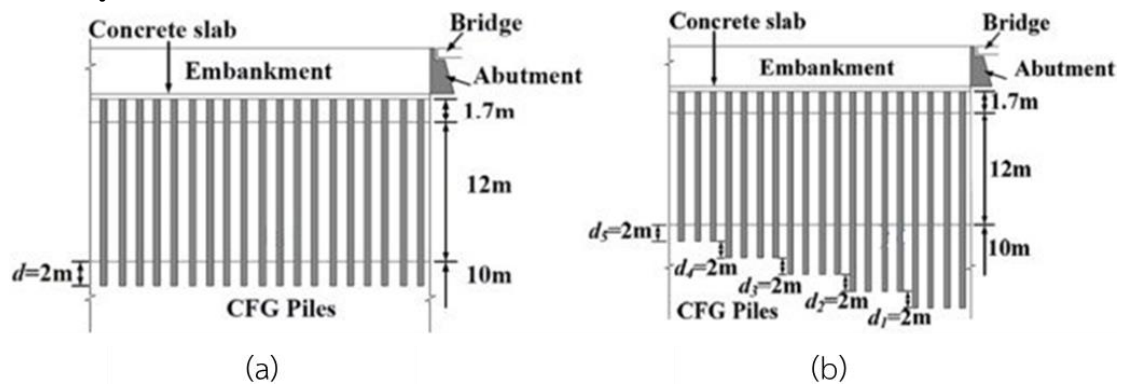
รูปที่ 10 มาตรฐานการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างดินถมและสะพาน ของ UIC 719R  
ที่มา : ปิยรัตน์ เปาเล้ง. พฤติกรรมบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟและเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพ

จะสังเกตได้ว่าทั้ง 3 วิธีข้างต้น มีแนวคิดในการก่อสร้างหรือปรับปรุงบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและดินถมคันทางที่แตกต่างกัน แต่อยู่ในหลักการเดียวกันคือการปรับค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ของบริเวณรอยต่ออย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยวิธีการออกแบบความลาดชันของดินถมคันทาง ทั้งวิธี SNCF (ประเทศฝรั่งเศส) และ MAV (ประเทศฮังการี) นั้นใช้ความชันเป็น 1:X ในการปรับค่าความแข็งแกร่ง

แต่ทั้งนี้สองวิธีแรกออกแบบค่าความชันเป็นทิศทางตรงข้ามกัน ในขณะที่ DB (ประเทศเยอรมัน) เลือกใช้วิธีการทำคันดินถมคันทางเป็นขั้นบันได (Benching) สำหรับการปรับค่าความแข็งแรง [8]

### 5.3.2 วิธีเสริมค่าความแข็งแรงด้วยการปรับความยาวเสาเข็มตามตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

นอกจากการใช้วิธีออกแบบความลาดชัน ณ ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างสะพานและคันดิน ทั้ง 3 วิธี โดยอ้างอิงมาจากมาตรฐาน UIC 719R ดังที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้นนั้น ยังมีการศึกษาวิธีเสริมค่าความแข็งแรงของบริเวณดังกล่าวด้วยการใช้เสาเข็มกรวดเถ้าลอยซีเมนต์ หรือ CFG (cement-fly ash-gravel) [16] สำหรับบริเวณดินอ่อนจำพวกดินเหนียว ส่วนดินประเภทอื่นสามารถพิจารณาใช้เสาเข็มอื่นตามการออกแบบได้ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง 2 รูปแบบด้วยกันคือ แบบแรกทำการออกแบบความยาวของเสาเข็มมีค่าเท่ากันตลอด และแบบที่สองคือออกแบบความยาวของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน แสดงดังในรูปที่ 11



รูปที่ 11 รูปแบบการศึกษาวิธีเสริมค่าความแข็งแรงของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างคันดินและสะพาน เมื่อ (a) ออกแบบให้ความยาวของเสาเข็มมีค่าเท่ากันตลอด และ

(b) ออกแบบให้ความยาวของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

ที่มา : W. Li and X. Bain (2016). Dynamic performance of pile-supported bridge-embankment transition zones under high-speed train moving loads, Procedia Engineering, 143,1059-1067.

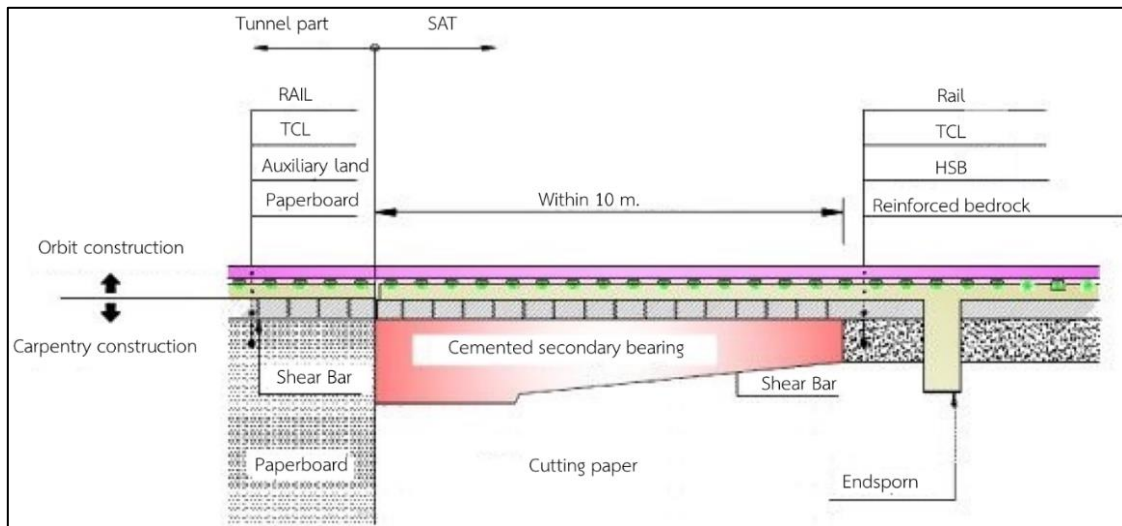
จากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite elements model) พบว่ารูปแบบ (b) ที่มีการออกแบบความยาวของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับบริเวณเปลี่ยนผ่านนั้น มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปได้ราบเรียบกว่าในรูปแบบแรก ซึ่งส่งผลดีต่อการตอบสนองเชิงพลวัตของโครงสร้างบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

### 5.4 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางบนคันดินและทางรถไฟในอุโมงค์

ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟระหว่างทางรถไฟระหว่างเมืองหรือรถไฟขบวนส่งสินค้ากับอุโมงค์ โดยตำแหน่งเปลี่ยนผ่านรูปแบบนี้ จะมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันทั้งแบบยืดหยุ่น (elastic deflection) และแบบถาวร (permanent deflection) ดังนั้น มาตรฐานฉบับนี้ได้ทบทวนและรวบรวมวิธีตามมาตรฐาน KR C-14080 (track / vehicle / structure / electrical / signal interaction) [13] ดังต่อไปนี้



- ในการก่อสร้างต้องแยกตำแหน่งระหว่างชั้น TCL ซึ่งอยู่ในอุโมงค์และชั้น HSB ของทางรถไฟบนคันดินถมคันทาง (embankment) ในบริเวณปากทางเข้าอุโมงค์โดยมีการหล่อพื้นคอนกรีตรองรับ (cemented secondary bearing) รวมทั้งติดตั้งเหล็กรับแรงเฉือน (shear bar) แสดงดังรูปที่ 12



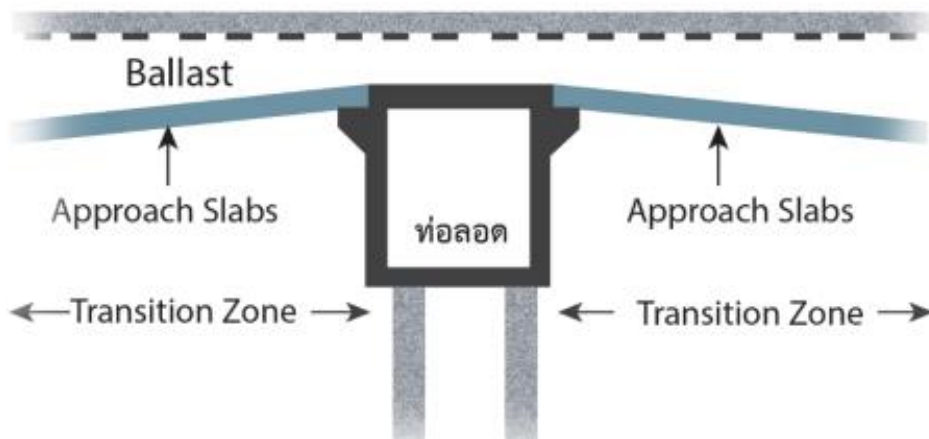
รูปที่ 12 การก่อสร้างบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟบนหินโรยทางและทางรถไฟ  
ในบริเวณปากอุโมงค์ ตามมาตรฐาน KR C-14080

ที่มา : KR C-14080, track / vehicle / structure / electrical / signal interaction.

### 5.5 ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระหว่างทางรถไฟแบบมีหินโรยทางบนคันดินและทางลอดระบายน้ำ

ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทางรถไฟแบบมีหินโรยทางบนคันดินถมคันทางและทางลอดระบายน้ำ (track drainage system) เป็นตำแหน่งเปลี่ยนผ่านอีกรูปแบบหนึ่งที่ต้องมีมาตรฐานและข้อกำหนดในเรื่องการก่อสร้างเป็นพิเศษ เพื่อป้องกันการทรุดตัวของคันดินและความเสียหายของระบบราง โดยมาตรฐานฉบับนี้ได้รวบรวมและสำรวจวิธีการปรับปรุงและนำมาประยุกต์ใช้ ดังต่อไปนี้

- 1) ควรเลือกใช้วัสดุประเภทพลาสติกที่มีคุณสมบัติคล้ายยาง (elastic-plastic) รองในแต่ละชั้นของโครงสร้างทางรถไฟ เพื่อป้องกันการพัดพาวัสดุเหล่านั้น หากมีการรั่วซึมของน้ำที่เกิดขึ้นบนชั้นของโครงสร้างทางรถไฟ
- 2) เมื่อมีการติดตั้งทางลอดระบายน้ำในชั้นดิน ควรมีพื้นทางชั้น hydraulically stabilized base (HSB) รองใต้ชั้นพื้นทางชั้น track concrete layer (TCL)
- 3) ทำการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของท่อลอดและติดตั้งพื้นคอนกรีตเชิงลาดคอสะพาน (approach slabs) ทั้งสองข้างของทางลอด เพื่อใช้ป้องกันปัญหาการสะดุดของรถไฟขณะวิ่งขึ้นสะพาน รวมไปถึงวิเคราะห์ถึงสภาพความพร้อมใช้งานและความเหมาะสมของทางรถไฟบริเวณท่อลอดเป็นระยะ ๆ ตามรอบของการซ่อมบำรุงทาง แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ภาพตัดขวางทางรถไฟในกรณีที่ผ่านมาท้อลอดระบายน้ำ



### บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) (2018). มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ.
- [2] Jenks, C. W. (2006). Design of track transitions. Transportation Research Board.
- [3] R. Sañudo (2022). Monitoring Track Transition Zones in Railways.
- [4] Giannakos, K. and S. Tsoukantas (2012) .Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track: Influence of Changing stiffness on acting forces. Sciverse ScienceDirect.48: p. 3548-3557.
- [5] UIC719R ,Earthworks and track bed for railway lines.
- [6] Jin-Wook Lee (2021). Evaluation of a Concrete Slab Track with Debonding at the Interface between Track Concrete Layer and Hydraulically Stabilized Base Course Using Multi-Channel Impact-Echo Testing.
- [7] Korea Rail Network Authority (KR) (2012). KR C-14080: Interaction Between Track, Vehicle, Signal, Structure, Electricity; KR: Daejeon, Korea.
- [8] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) (2018). คู่มือการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟ.
- [9] Trafikverket (2022) . Järnkoll –fakta om svensk järnväg [Iron check - facts about the Swedish railway] [Online]. (In Swedish). Available from : <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/jarnvag/jarnkoll--fakta-om-svensk-jarnvag>.
- [10] R. Sañudo, L. dell'Olio, J.A. Casado, I.A. Carrascal , S. Diego (2016). Track transitions in railways.
- [11] Buddhima Indraratna (2019). Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches.
- [12] AREMA, Vol. 1 Track / Chapter 30 Ties.
- [13] KR C-14080, Track / Vehicle / Structure / Electrical / Signal Interaction.
- [14] ชนศักดิ์ ศรีสวัสดิ (2021). การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองมัลติบอดี: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์.
- [15] ปิยรัตน์ เปาเล้ง (2018). พฤติกรรมบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟและเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพ.
- [16] W. Li and X. Bain (2016). Dynamic performance of pile-supported bridge-embankment transition zones under high-speed train moving loads', Procedia Engineering, 143,1059-1067.
- [17] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร , รายงานการออกแบบ (design report) การศึกษาความเหมาะสมและออกแบบระบบรถไฟทางคู่เพื่อการขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์ (ระยะเร่งด่วน ช่วงประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร)