กระทรวงคมนาคม
สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)

สทร. CT-1001:2569

มาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

(DESIGN OF CONCRETE SLEEPERS AND BEARERS)

- กลุ่มวิจัยและมาตรฐาน
- ทีมมาตรฐาน

กระทรวงคมนาคม
สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)

สทร. CT-1001:2569

มาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

(DESIGN OF CONCRETE SLEEPERS AND BEARERS)

- กลุ่มวิจัยและมาตรฐาน
- ทีมมาตรฐาน

www.rtrda.or.th info@rtrda.or.th rtrda.thailand @RTRDA_Th
@rtrdathailand rtrda.thailand Rail Technology Research and Development Agency

สทร. CT -1001:2569

มาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

(Design of Concrete Sleepers and Bearers)

ISBN 978-616-8382-21-9

พิมพ์ครั้งแรก เมษายน พุทธศักราช 2569 จำนวน 50 เล่ม

ลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน) กระทรวงคมนาคม

จัดทำโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน) กระทรวงคมนาคม

พิมพ์ที่ บริษัท วิชั่นพรีเพรส จำกัด

29/9 หมู่ 2 ตำบลลาดหลุมแก้ว อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี 12140

โทรศัพท์ 02-147-3175-6

คำนำ

สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน) หรือ สทร. ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตฉบับนี้ขึ้นเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมภายในประเทศให้มีขีดความสามารถในการผลิตหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตที่มีคุณภาพและได้มาตรฐานในระดับสากล

มาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตฉบับนี้ให้ข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต โดยครอบคลุมแนวทางในการเตรียมข้อมูลสำหรับการออกแบบ เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ และการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต มาตรฐานนี้ได้รับการพิจารณาและตรวจสอบอย่างรอบคอบผ่านกระบวนการรวบรวมข้อมูลจากมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ มาตรฐานสหภาพยุโรป (EN 13230) มาตรฐานประเทศออสเตรเลีย (AS 1085.14) และมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (AREMA Chapter 30) รวมถึงผ่านกระบวนการรับฟังความคิดเห็นทางเทคนิคจากผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นตัวแทนจากหน่วยงานสำคัญของภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคการศึกษา ทำให้มาตรฐานฉบับนี้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทยและสามารถนำไปใช้เทียบเคียงกับมาตรฐานในระดับสากลได้

สทร. หวังเป็นอย่างยิ่งว่ามาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตฉบับนี้จะมีส่วนผลักดันให้อุตสาหกรรมการผลิตหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตภายในประเทศสามารถเติบโตขึ้นได้อย่างยั่งยืนภายใต้มาตรฐานที่มีคุณภาพในระดับสากล

สารบัญ

	หน้า
1. ทั่วไป	1
2. ขอบข่าย	1
3. มาตรฐานอ้างถึง	2
4. นิยามและสัญลักษณ์	2
4.1 นิยาม	2
4.2 สัญลักษณ์	3
5. ข้อกำหนดทั่วไป	7
5.1 การคำนวณโมเมนต์ดัด	7
5.2 การทดสอบและเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต	11
5.3 ความคงทนของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต	12
6. การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต	12
6.1 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการคำนวณโมเมนต์ดัด	12
6.2 การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีต	15
6.3 การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนประแจคอนกรีต	18
7. การออกแบบหน้าตัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต	18
8. เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต	18
8.1 เกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสำหรับการเกิดรอยร้าวแรก	19
8.2 เกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษและน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ	20
9. การคำนวณหน่วยแรงของหมอนคอนกรีตอัดแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบ	21
10.เอกสารอ้างอิง	21
ภาคผนวก ก. หมอนคอนกรีต - การคำนวณโมเมนต์ดัด การกำหนดเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบและการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบ	22
ภาคผนวก ข. หมอนประแจคอนกรีต - การคำนวณโมเมนต์ดัด และสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง	35
ภาคผนวก ค. คำอธิบายเพิ่มเติม	37

รายนามคณะทำงานพิจารณาร่างมาตรฐานชิ้นส่วนระบบรางของประเทศ :
หมอนคอนกรีตและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

ดร.เสถียร เจริญเหรียญ	ประธานคณะทำงาน
สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)	
ดร.ทยากร จันทรางศุ	คณะทำงาน
นายศุภฤกษ์ สุดยอดประเสริฐ	
นายกองพล ชุนเกาะ	
กรมการขนส่งทางราง	
นายพิษณุ พงษ์ไทย	คณะทำงาน
นายถิรวัฒน์ สมศิริวัฒนา	
นายณัฐพงษ์ ฉ่ำใย	
การรถไฟแห่งประเทศไทย	
นายภูวิศ ตรีสุวรรณ	คณะทำงาน
นายวิชญุตร์ อารยโกศล	
นายเมธา หนูสลุง	
นายภิรวัฒน์ ช่างแย้ม	
การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย	
ดร.ภานุเดช ชุ่มเย็น	คณะทำงาน
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์	
ดร.อาณัติ หาทรัพย์	คณะทำงาน
นายภณสินธุ์ ไพทีกุล	
นายประยงค์ อรัญญะ	
นายวินัย ตุ้มทอง	
ศูนย์ทดสอบมาตรฐานระบบขนส่งทางราง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	
รศ. ดร.ชยุตม์ งามโขนง	คณะทำงาน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
รศ. ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	คณะทำงาน
นายทัศน์พล อินต๊ะปัญโญ	
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	
นายณัฐพล รัตนมาลี	คณะทำงาน
สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย	
นายจิตต์ เลวรรณ์	คณะทำงาน
นายสมบัติ จันทวาด	
บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)	
ดร.พัชริญา เพชรผ่อง	คณะทำงานและเลขานุการ
นายสฤษฎ์โรจ จันทร์เพิ่มพูนผล	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ
นายภาณุวัฒน์ น้อยสิน	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ
สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)	

สทร. CT-1001:2569
มาตรฐานการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต
(Design of Concrete Sleepers and Bearers)

1. ทั่วไป

หมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตเป็นส่วนหนึ่งของทางรถไฟที่ใช้รองรับรางรถไฟ โดยที่รางจะยึดติดกับหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตด้วยอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง และวางอยู่บนหินโรยทางหรือชั้นวัสดุอื่น ๆ ทั้งนี้ทางรถไฟมีความแตกต่างกันไปตามขนาดทาง ระดับทางและแนวเส้นทาง ความลาดเอียงของราง และระยะเรียงหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีต การออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ร่วมกับแรงกระแทกจากน้ำหนักบรรทุกที่มีลักษณะเป็นแรงกระทำซ้ำ และต้องพิจารณาร่วมกับความเร็วของรถไฟที่วิ่งอยู่บนราง

ดังนั้นการคำนวณน้ำหนักบรรทุกและแรงภายในสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตจึงมีรายละเอียดบางส่วนที่แตกต่างไปจากการคำนวณและออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงทั่วไป ซึ่งจำเป็นต้องมีมาตรฐานเฉพาะสำหรับการคำนวณน้ำหนักบรรทุกและแรงภายในสำหรับหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ทั้งนี้มาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมข้อกำหนดและรายละเอียดที่เกี่ยวกับการคำนวณและออกแบบดังกล่าว รวมทั้งมีเนื้อหาครอบคลุมไปถึงการออกแบบหน้าตัดหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ และการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบด้วย

2. ขอบข่าย

2.1 มาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมข้อกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

2.2 มาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมแนวทางในการเตรียมข้อมูลสำหรับการออกแบบ การกำหนดเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ และการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ตามที่ระบุในมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ถึงมาตรฐาน สทร. CT-2010 มาตรฐานชิ้นส่วนคอนกรีตแบบพิเศษสำหรับระบบราง

2.3 มาตรฐานฉบับนี้ใช้กับหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตทุกความยาว สำหรับทางรถไฟขนาด 1.000 m และ 1.435 m

2.4 มาตรฐานฉบับนี้ใช้หน่วยตามระบบเอสไอ (SI units) เป็นหลัก

2.5 เกณฑ์ที่กำหนดสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ให้เป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางราง และกฎหมายอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ซื้อ แต่หากมิได้มีการระบุเกณฑ์สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการไว้ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐานนี้

กรณีที่มีการใช้งานนอกเหนือจากขอบข่ายดังกล่าว สามารถนำหลักการทั่วไปที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ หากเกณฑ์ที่ระบุในมาตรฐานนี้ไม่เพียงพอ ให้พิจารณาลักษณะการใช้งานที่จะเกิดขึ้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ และวิธีการออกแบบที่เหมาะสมเพิ่มเติม

3. มาตรฐานอ้างถึง

ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทดสอบต่าง ๆ ซึ่งระบุไว้ในมาตรฐานฉบับนี้ให้เป็นไปตามมาตรฐานและเอกสารตามรายการดังต่อไปนี้

3.1 มาตรฐาน สทร. CT–2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

3.2 มาตรฐาน สทร. CT–2007 มาตรฐานหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว

3.3 มาตรฐาน สทร. CT–2008 มาตรฐานหมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแท่งคู่

3.4 มาตรฐาน สทร. CT–2009 มาตรฐานหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

3.5 มาตรฐาน สทร. CT–2010 มาตรฐานชิ้นส่วนคอนกรีตแบบพิเศษสำหรับระบบราง

3.6 มาตรฐาน สทร. CT–6011 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : ความต้านทานไฟฟ้า

3.7 มาตรฐาน สทร. CT–6012 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : การซับแรงกระแทก

3.8 มาตรฐาน สทร. CT–6013 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : การถอนออกของวัสดุฝังยึด

3.9 มยผ. 1102 มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรง

3.10 EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings

มาตรฐานอ้างถึงในมาตรฐานฉบับนี้ให้ใช้ฉบับล่าสุด แต่ทั้งนี้ต้องไม่ขัดแย้งกับมาตรฐานฉบับนี้

4. นิยามและสัญลักษณ์

4.1 นิยาม

คำศัพท์และนิยามที่ใช้ในมาตรฐานนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน สทร. CT-8001:2569 มาตรฐานบทนิยามเกี่ยวกับหมอนรองรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง เป็นสำคัญ โดยมีนิยามเฉพาะสำหรับมาตรฐานนี้ ดังนี้

“น้ำหนักกดเพลาระบุ” (nominal axle load) หมายถึง น้ำหนักกดเพลาจากน้ำหนักระบุของตัวรถไฟ

“น้ำหนักลงล้อระบุ” (nominal wheel load) หมายถึง น้ำหนักลงล้อในแนวดิ่งแบบสถิตซึ่งเป็นผลจากน้ำหนักกดเพลาระบุ

“น้ำหนักบรรทุกพิเศษ” (exceptional load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้เป็นบางครั้งตลอดอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีต

“น้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ” (accidental load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวตลอดอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีต

“โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ” (characteristic bending moment) หมายถึง โมเมนต์ดัดประกอบการออกแบบหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีต ซึ่งกำหนดโดยผู้ออกแบบทางรถไฟหรือคำนวณตามคำแนะนำในมาตรฐานฉบับนี้

“โมเมนต์ดัดทดสอบ” (test bending moment) หมายถึง โมเมนต์ดัด ณ สภาวะที่ผิวคอนกรีตของหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตเกิดรอยร้าวแรก ซึ่งสามารถคำนวณจากโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ

4.2 สัญลักษณ์

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในมาตรฐานฉบับนี้มีความหมายดังนี้

A = พื้นที่หน้าตัดของหมอนรองราง มีหน่วยเป็น m^2

A_c = พื้นที่หน้าตัดของหมอนรองรางที่ตำแหน่งกึ่งกลางหมอนรองราง มีหน่วยเป็น m^2

A_{nom} = น้ำหนักกดเพลาระบุ มีหน่วยเป็น kN

A_r = พื้นที่หน้าตัดของหมอนรองรางที่ตำแหน่งพื้นที่รองรับราง มีหน่วยเป็น m^2

b_c = ความกว้างของฐานหมอนที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm

b_r = ความกว้างของฐานหมอนที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm

b_{rail} = ความกว้างของฐานรางรถไฟ มีหน่วยเป็น mm

C_2 = มอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของหินโรยทางและชั้นดินคันทาง มีหน่วยเป็น MPa

e = ระยะจากกึ่งกลางพื้นที่รองรับราง ถึงขอบเขตการกระจายแรงจากฐานรากที่แผ่ออกในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ลงสู่แกนของโมเมนต์ความเฉื่อยของหมอนรองราง

e_p = ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดในการอัดแรง มีหน่วยเป็น mm

e_{pc} = ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดในการอัดแรงที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm

e_{pr} = ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัดในการอัดแรงที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm

$f_{ct,fl,fat}$ = กำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดจากความล้าเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ มีหน่วยเป็น MPa

$f_{ct,fl,t=28days}$ = กำลังดึงของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ภายใต้โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกสถิต มีหน่วยเป็น MPa

Fc_{0n} = น้ำหนักบรรทุกทดสอบอ้างอิงแรกเริ่มสำหรับการรับโมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN

Fc_{rn} = น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการรับโมเมนต์ดัดลบซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวแรกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN

Fr_0 = น้ำหนักบรรทุกทดสอบอ้างอิงแรกเริ่มสำหรับการรับโมเมนต์ดัดบวกที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN

Fr_r = น้ำหนักบรรทุกทดสอบสำหรับการรับโมเมนต์ดัดบวกซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวแรกที่ด้านล่างของพื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN

I_c = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดบริเวณกึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น cm^4

I_r = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดบริเวณพื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น cm^4

k_1 = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษของหมอนคอนกรีต โดยที่ k_{1d} เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการทดสอบแบบพลวัต และ k_{1s} เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการทดสอบแบบสถิต

k_2 = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุของหมอนคอนกรีต โดยที่ k_{2d} เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการทดสอบแบบพลวัต และ k_{2d} เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการทดสอบแบบสถิต

k_3 = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบความต้านทานต่อความล้าของหมอนคอนกรีต

k_b = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดบวกของหมอนประแจคอนกรีต

k_{bn} = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบของหมอนประแจคอนกรีต

k_d = สัมประสิทธิ์สำหรับการกระจายน้ำหนักลงล้อไปยังหมอนคอนกรีตที่อยู่ติดกันในทิศทางตามแนวราง

$k_{i,c}$ = สัมประสิทธิ์สำหรับการปรับเพิ่มโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต เมื่อคำนวณโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะของหมอนคอนกรีตโดยวิธีอย่างง่าย

$k_{i,r}$ = สัมประสิทธิ์สำหรับการปรับเพิ่มโมเมนต์ดัดที่พื้นที่รองรับราง เมื่อคำนวณโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะของหมอนคอนกรีตโดยวิธีอย่างง่าย

k_p = สัมประสิทธิ์สำหรับการปรับลดแรงกระแทกบนหมอนคอนกรีตตามสมบัติของแผ่นรองรางและสติฟเนสในแนวดิ่งของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

k_r = สัมประสิทธิ์สำหรับการปรับเพิ่มแรงปฏิกิริยาระหว่างหินโรยทางกับหมอนคอนกรีตเนื่องจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

k_t = สัมประสิทธิ์ตัวคูณที่ใช้ในการคำนวณตามเกณฑ์การทดสอบสำหรับการเกิดรอยร้าวแรกในการทดสอบแบบสถิตของหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

k_v = สัมประสิทธิ์สำหรับการปรับเพิ่มแรงบนหมอนคอนกรีต เนื่องจากความเร็วของรถไฟและการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณทางโค้ง

L = ความยาวของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น m

L_c = ระยะระหว่างเส้นกึ่งกลางของพื้นที่รองรับรางทั้งสองด้านของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น m

L_p = ระยะจากเส้นกึ่งกลางของพื้นที่รองรับรางไปยังขอบด้านล่างของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น m

$M_{c,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{c,neg,100}$ = โมเมนต์ดัดลบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต ภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 100 kN ซึ่งคำนวณโดยใช้หลักการคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น kN·m

M_k = โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติ ซึ่งประกอบด้วย $M_{k,b,neg}$ $M_{k,b,pos}$ $M_{k,c,neg}$ $M_{k,c,pos}$ $M_{k,r,neg}$ และ $M_{k,r,pos}$ มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,b,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบลักษณะเฉพาะที่ตำแหน่งใด ๆ ของหมอนประแจคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,b,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกลักษณะเฉพาะที่ตำแหน่งใด ๆ ของหมอนประแจคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,c,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบลักษณะเฉพาะที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,c,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกลักษณะเฉพาะที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,r,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบลักษณะเฉพาะที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{k,r,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกลักษณะเฉพาะที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

M_t = โมเมนต์ดัดทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย $M_{t,b,neg}$ $M_{t,b,pos}$ $M_{t,c,neg}$ $M_{t,c,pos}$ $M_{t,r,neg}$ และ $M_{t,r,pos}$ มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,b,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบทดสอบที่ตำแหน่งใด ๆ ของหมอนประแจคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,b,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกทดสอบที่ตำแหน่งใด ๆ ของหมอนประแจคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,c,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบทดสอบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,c,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกทดสอบที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,r,neg}$ = โมเมนต์ดัดลบทดสอบที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

$M_{t,r,pos}$ = โมเมนต์ดัดบวกทดสอบที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น kN·m

N_p = แรงในลวดอัดแรง เมื่อหมอนคอนกรีตมีอายุครบตามอายุการใช้งาน (สมมติที่ 40 ปี) มีหน่วยเป็น kN

$P_{m,t1}$ = แรงในลวดอัดแรงที่พื้นที่รองรับรางหรือที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต เมื่อหมอนคอนกรีตมีอายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น kN

$P_{m,t2}$ = แรงในลวดอัดแรงที่พื้นที่รองรับรางหรือที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต เมื่อหมอนคอนกรีตมีอายุ 40 ปี มีหน่วยเป็น kN

P_k = น้ำหนักบรรทุกพลวัตลงพื้นที่รองรับราง มีหน่วยเป็น kN

Q_k = น้ำหนักกดเพลาที่พิจารณาผลกระทบทางพลวัต มีหน่วยเป็น kN

V = ความเร็วสูงสุดของรถไฟ มีหน่วยเป็น km/h

W = มอดุลัสหน้าตัด มีหน่วยเป็น mm^3

$W_{c,bottom}$ = มอดุลัสหน้าตัดด้านล่างที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm^3

$W_{c,top}$ = มอดุลัสหน้าตัดด้านบนที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm^3

$W_{r,bottom}$ = มอดุลัสหน้าตัดด้านล่างที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm^3

$W_{r,top}$ = มอดุลัสหน้าตัดด้านบนที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm^3

$z_{c,top}$ = ระยะจากแกนของโมเมนต์ความเฉื่อยถึงผิวด้านบนของหมอนคอนกรีต มีหน่วยเป็น mm

λ = ระยะระหว่างแรง $P_k/2$ บนหมอนคอนกรีต ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่า $M_{k,r,pos}$ มีหน่วยเป็น mm

$\Delta f_{ct,fl,fat}$ = การสูญเสียกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดจากความล้าเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ มีหน่วยเป็น MPa

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t}$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียการอัดแรงในหมอนคอนกรีตอัดแรงที่ช่วงอายุใด ๆ ที่พิจารณา มีหน่วยเป็น MPa

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days}$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียการอัดแรงในหมอนคอนกรีตอัดแรงที่อายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น MPa

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years}$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียการอัดแรงในหมอนคอนกรีตอัดแรงที่อายุ 40 ปี มีหน่วยเป็น MPa

$\sigma_{ct,max}$ = หน่วยแรงดึงสูงสุดในคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะและการอัดแรง มีหน่วยเป็น MPa

5. ข้อกำหนดทั่วไป

5.1 การคำนวณโมเมนต์ดัด

5.1.1 น้ำหนักบรรทุก

ทางรถไฟต้องสามารถรับน้ำหนักบรรทุกซ้ำที่กระทำในทิศทางที่แตกต่างกัน 3 ทิศทางซึ่งเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันตลอดเวลาที่ใช้งาน ซึ่งน้ำหนักบรรทุกประกอบด้วย

1) น้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกดเพลาและการใช้งานปกติ
2) น้ำหนักบรรทุกในแนวขวาง ซึ่งเกิดจากแรงในการบังคับทิศทางของรางรถไฟ (guiding force)
3) น้ำหนักบรรทุกในแนวยาว ซึ่งเกิดจากการเร่งและการชะลอความเร็วของขบวนรถ และหน่วยแรงจากความร้อนในรางเชื่อมยาวอย่างต่อเนื่อง

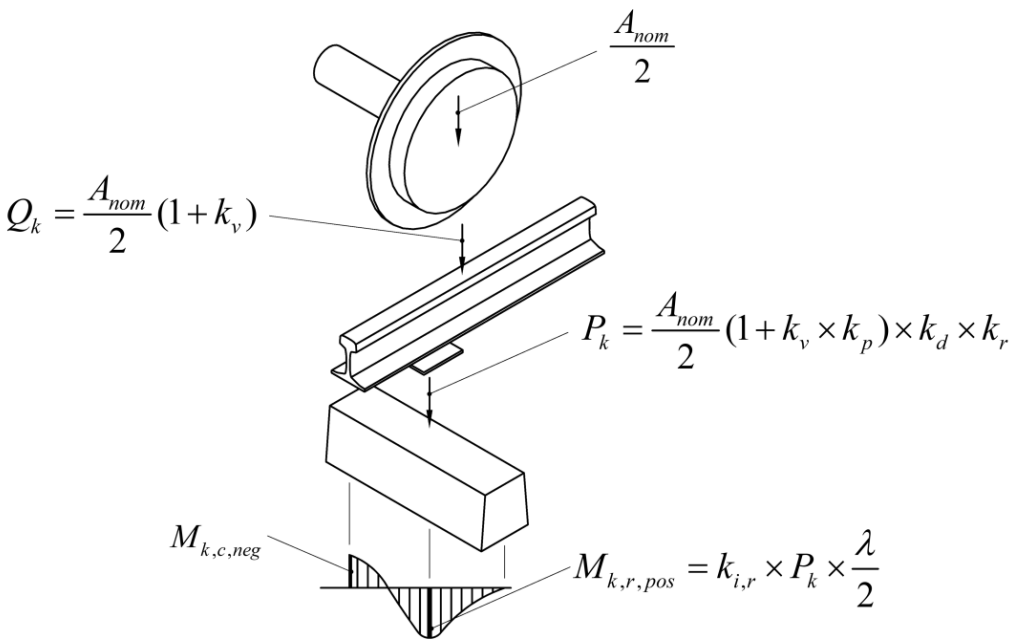
ภายใต้เงื่อนไขของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำทั้งหมดข้างต้น ทางรถไฟต้องสามารถคงรูปเรขาคณิตไว้ได้ อันได้แก่ ขนาดทางรถไฟ ระดับสันราง และแนวเส้นทางรถไฟ

5.1.2 การกระจายน้ำหนักบรรทุก

ในทางทฤษฎี การกระจายน้ำหนักบรรทุกลงหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตมีลำดับดังนี้ (รูปที่ 1)

1) น้ำหนักจากแคร่รถไฟ (bogie) ถ่ายลงเพลารถไฟเป็นน้ำหนักกดเพลา (A_{nom})
2) น้ำหนักกดเพลาจะเฉลี่ยถ่ายสู่รางรถไฟโดยล้อรถไฟเรียกว่า น้ำหนักลงล้อ (wheel load)
3) น้ำหนักลงล้อจะถ่ายลงราง และน้ำหนักลงรางจะถ่ายสู่หมอนรองรางบนพื้นที่รองรับราง เรียกว่า น้ำหนักลงพื้นที่รองรับราง (rail seat load)

น้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางที่รวมผลกระทบทางพลวัตหรือน้ำหนักบรรทุกพลวัตลงพื้นที่รองรับราง (P_k) จะนำไปใช้ในการคำนวณโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ (M_k) ซึ่งเป็นโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต



รูปที่ 1 การกระจายน้ำหนักบรรทุกลงหมอนคอนกรีต

(ข้อ 5.1.2 และข้อ 5.1.3.1)

การกระจายน้ำหนักบรรทุกให้พิจารณาหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตประกอบเสร็จ (assembly) อันประกอบด้วยราง อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง และหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตที่รองรับด้วยหินโรยทางหรือชั้นวัสดุอื่น เสมือนเป็นคานที่วางอยู่บนที่รองรับแบบยืดหยุ่น (beam on a continuous or discrete resilient support)

เนื่องจากการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากรางขึ้นกับโมเมนต์ความเฉื่อยของแนวราง ระยะเรียงหมอนรองรางหรือหมอนประแจคอนกรีต และความยืดหยุ่นโดยรวมของส่วนประกอบต่าง ๆ ของที่รองรับราง น้ำหนักบรรทุกลงพื้นที่รองรับรางจึงอาจคิดเป็นสัดส่วนหรือร้อยละของน้ำหนักลงล้อ

5.1.3 การคำนวณโมเมนต์ดัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตที่วางอยู่บนหินโรยทาง

การหาค่าโมเมนต์ดัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตที่วางอยู่บนหินโรยทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติสามารถใช้วิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

5.1.3.1 การคำนวณทางทฤษฎี (theoretical method)

วิธีการคำนวณทางทฤษฎีเริ่มจากการคำนวณน้ำหนักลงล้อ น้ำหนักกดเพลา และน้ำหนักลงพื้นที่รองรับราง โดยมีการพิจารณาถึงน้ำหนักบรรทุกพลวัตลงพื้นที่รองรับราง (P_k) ความยืดหยุ่นโดยรวมของส่วนประกอบต่าง ๆ ของที่รองรับราง รวมทั้งแผ่นรองรางสภาพยืดหยุ่นระหว่างหินโรยทางและชั้นดินคันทาง และการทรุดตัวของหินโรยทาง จากนั้นจึงนำ P_k ไปคำนวณค่า M_k โดยใช้หลักการของคานที่วางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น

รูปที่ 2 แสดงแผนผังและขั้นตอนในการคำนวณออกแบบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการออกแบบสำหรับหมอนคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ประกอบด้วย การหาค่า M_k โดยวิธีการคำนวณทางทฤษฎี (ข้อ 6) การออกแบบหน้าตัดของหมอนคอนกรีต (ข้อ 7) การทดสอบและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ (ข้อ 8) และการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีต (ข้อ 9) ทั้งนี้วิธีนี้ยังสามารถนำไปใช้กับหมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแท่งคู่และหมอนประแจคอนกรีตได้ด้วย

ค่า P_k ที่ใช้การคำนวณทางทฤษฎีอาศัยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ (รูปที่ 1 และข้อ 6.1) ได้แก่ k_d k_r k_p และ k_v

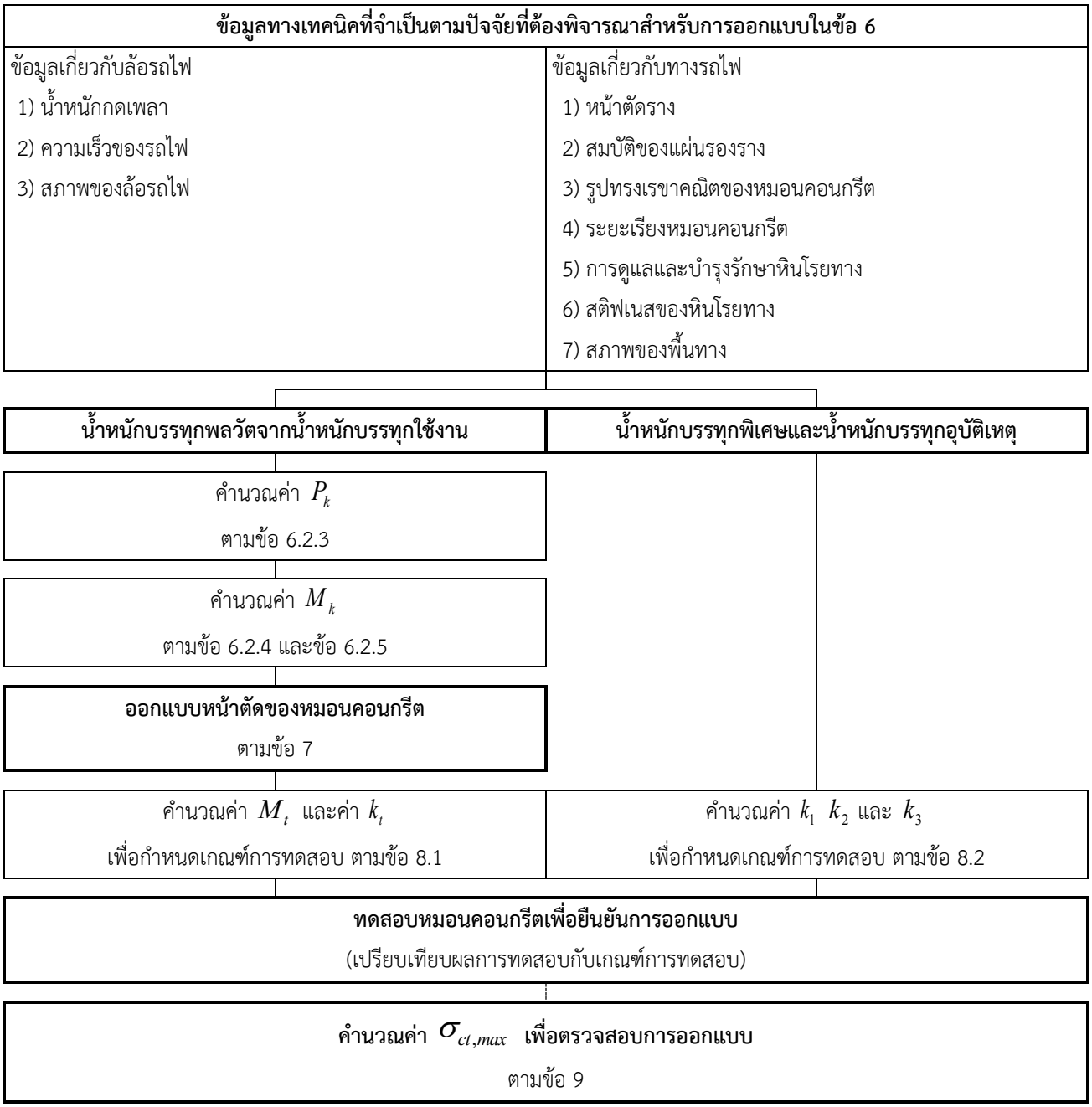
5.1.3.2 การวัดจริง (empirical method) ภายใต้สภาวะการใช้งาน

ค่า M_k สามารถคำนวณจากข้อมูลที่ได้มาจากการวัดจริงภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานโดยเก็บข้อมูลติดต่อกันเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี และมีจำนวนตัวอย่างของหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตเพียงพอที่จะนำไปคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดตามหลักทางสถิติได้

นอกจากนี้ค่า M_k ยังสามารถหาได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกกับหมอนคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 5 ปี ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ถึงมาตรฐาน สทร. CT-2009 มาตรฐานหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง โดยโมเมนต์ดัดทดสอบที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกให้พิจารณาตามที่ระบุในมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ทั้งนี้รายละเอียดและขั้นตอนในการหาค่า M_k จากการทดสอบมีระบุอยู่ในมาตรฐานสากล เช่น EN 13230-6:2020 Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design

วิธีนี้ยังสามารถนำไปใช้กับหมอนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแท่งคู่และหมอนประแจคอนกรีตได้ด้วย

หากต้องการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของหมอนคอนกรีตที่ใช้งานอยู่ ให้ทำการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดแบบกลับด้านที่พื้นที่รองรับราง และการทดสอบแบบพลวัตที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต



รูปที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณออกแบบและการตรวจสอบเพื่อยืนยันการออกแบบ สำหรับหมอนคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีทางทฤษฎี

(ข้อ 5.1.3.1)

5.1.3.3 การใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

การหาค่าโมเมนต์ดัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตโดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน จะช่วยประหยัดเวลาในการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

5.2 การทดสอบและเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

น้ำหนักลงล้อทำให้เกิดโมเมนต์ดัดบวกและโมเมนต์ดัดลบในหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตที่พื้นที่รองรับรางและที่กึ่งกลางหมอน ความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตเมื่อครบอายุการใช้งานจะถูกกำหนดโดยค่าโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักบรรทุกพลวัตลงพื้นที่รองรับรางและการกระจายแรงปฏิกิริยาของหินโรยทาง

5.2.1 รอยร้าวใต้พื้นที่รองรับรางภายใต้โมเมนต์ดัดบวกทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบแบบสถิตกับหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงด้วยโมเมนต์ดัดบวกทดสอบเพื่อยืนยันการออกแบบ ตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ผิวหน้าของหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงจะต้องไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดสำหรับหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงด้วยน้ำหนักบรรทุกพิเศษ ซึ่งคาดว่ามีโอกาสเกิดขึ้นเป็นบางครั้งตลอดอายุการใช้งาน รอยร้าวคงค้างหลังจากนำน้ำหนักบรรทุกพิเศษออกต้องมีขนาดกว้างไม่เกิน 0.05 mm ทั้งนี้เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบสามารถคำนวณได้จากการคูณ $M_{k,pos}$ ด้วยค่า k_1 ตามรายละเอียดในข้อ 8.2 และข้อ ก.4.3

เมื่อทำการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดสำหรับหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงด้วยน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ ซึ่งคาดว่ามีโอกาสเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวตลอดอายุการใช้งาน โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุต้องมีค่าไม่เกินกำลังดัดประลัยของหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทั้งนี้เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบสามารถคำนวณได้จากการคูณ $M_{k,pos}$ ด้วยค่า k_2 ตามรายละเอียดในข้อ 8.2 และข้อ ก.4.4

5.2.2 รอยร้าวที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดลบทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบแบบสถิตกับหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงด้วยโมเมนต์ดัดลบทดสอบ ตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ผิวหน้าของหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงต้องไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

ผู้ซื้ออาจยอมให้หมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงที่ติดตั้งและกำลังใช้งานอยู่มีรอยร้าวเกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่ง โดยต้องมีการตรวจสอบขนาดของรอยร้าวและความล้าที่เกิดขึ้นตามวิธีการที่ผู้ซื้อกำหนด

5.2.3 รอยร้าวใต้พื้นที่รองรับรางภายใต้โมเมนต์ดัดลบทดสอบ และรอยร้าวที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดบวกทดสอบ

ผู้ซื้อสามารถกำหนดให้มีการทดสอบเพิ่มเติมพร้อมกับการวัดขนาดของรอยร้าว เพื่อตรวจสอบการออกแบบหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีต หรือเพื่อตรวจสอบคุณภาพในการผลิตหมอนดังกล่าว หรือเพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใด ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการก่อสร้างทางรถไฟ

5.3 ความคงทนของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

ความคงทนของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

6. การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

6.1 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการคำนวณโมเมนต์ดัด

6.1.1 ล้อรถไฟ ทางรถไฟ และหินโรยทาง

6.1.1.1 สภาพของล้อรถไฟและทางรถไฟ

สภาพของล้อรถไฟและทางรถไฟมีผลต่อแรงกระแทกระหว่างล้อรถไฟและทางรถไฟ ดังนั้นล้อรถไฟและทางรถไฟจึงจำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุงให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

ผู้ซื้อต้องคำนึงถึงแผนงานในการซ่อมบำรุงล้อรถไฟและทางรถไฟ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ของล้อรถไฟที่อายุการใช้งานต่าง ๆ รวมถึงความเร็วสูงสุดของรถไฟเพื่อกำหนดค่า P_k k_1 M_k และ M_t

6.1.1.2 การกระจายน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งตามแนวราง

การกระจายน้ำหนักลงล้อไปยังหมอนคอนกรีตที่อยู่ติดกันตลอดแนวทางรถไฟขึ้นอยู่กับสติฟเนสโมเมนต์ดัดในแนวดิ่งของรางรถไฟ ระยะเรียงหมอนคอนกรีต สติฟเนสของแผ่นรองราง และสติฟเนสของหินโรยทางหรือดินพื้นทาง

ในการคำนวณค่า P_k ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า k_d เพื่อพิจารณาผลของการกระจายน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งตามแนวราง ซึ่งสามารถหาได้โดยการใช้ทฤษฎีคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น โดยกำหนดให้สติฟเนสของหินโรยทางมีค่าคงที่

นอกจากนี้ ผู้ซื้อยังต้องกำหนดค่า k_r เพื่อพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทางที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง โดยสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลการใช้งานจริง

6.1.1.3 การกระจายของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทางตามความยาวของหมอนคอนกรีต

การกระจายของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทางขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1) ความยาวและความกว้างของหมอนคอนกรีต
2) ลักษณะของหินโรยทาง ได้แก่ ขนาด สมบัติ สติฟเนส และความเสียหายของชั้นหินโรยทาง
3) ลักษณะของชั้นดินเดิมที่อยู่ใต้หินโรยทาง

การออกแบบหมอนคอนกรีตโดยวิธีอย่างง่ายจะสมมติให้แรงปฏิกิริยาของหินโรยทางมีการกระจายแบบสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้โมเมนต์ดัดที่วัดได้จากการใช้งานจริงมีค่าแตกต่างไปจากโมเมนต์ดัดที่ใช้ในการออกแบบ

ดังนั้นเพื่อให้มีการพิจารณาผลของความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ดัดที่วัดได้จากการใช้งานจริงกับโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอย่างง่าย ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า $k_{i,r}$ และค่า $k_{i,c}$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการเพิ่มค่าโมเมนต์ดัดที่พื้นที่รองรับรางและที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต ตามลำดับ

6.1.2 การติดตั้งทางรถไฟ

6.1.2.1 มิติและน้ำหนักของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

ความยาว ขนาดหน้าตัด และน้ำหนักของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตมีผลต่อเสถียรภาพของทางรถไฟและแรงปฏิกิริยาของหินโรยทาง ทั้งนี้การกำหนดความยาวและขนาดหน้าตัดของหมอนดังกล่าวขึ้นอยู่กับการขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้างและวิธีการติดตั้ง

6.1.2.2 วิธีการติดตั้งทางรถไฟ

น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างการติดตั้งทางรถไฟอาจมีค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดมากเกินไปในระหว่างการติดตั้ง

6.1.3 การออกแบบองค์ประกอบทางรถไฟ

6.1.3.1 แนวรางและระยะเรียงหมอนคอนกรีต

หมอนคอนกรีตท่อนเดียวจะรับน้ำหนักลงล้อเพียงส่วนหนึ่ง โดยหมอนคอนกรีตที่อยู่ติดกันจะช่วยแบ่งภาระการรับน้ำหนักลงล้อ

k_d สำหรับการกระจายน้ำหนักบรรทุกระหว่างหมอนคอนกรีตจะพิจารณาการกระจายตัวของน้ำหนักบรรทุกตามแนวราง (ข้อ 6.1.1.2)

6.1.3.2 อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

(1) การลดแรงกระแทกเนื่องจากอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

แผ่นรองรางสามารถลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตได้ ดังนั้นเพื่อให้มีการพิจารณาคุณสมบัติดังกล่าวตามประเภทของแผ่นรองราง ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า k_p ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน สทร. CT-6012 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : การซับแรงกระแทก โดยให้ปรับลดค่าที่ได้จากการทดสอบลง 25% เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของแผ่นรองรางที่ผ่านการใช้งานจริง

ผู้ซื้อต้องดูแลและบำรุงรักษาแผ่นรองรางให้เป็นไปตามมาตรฐานและกระทำเป็นประจำอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แผ่นรองรางอยู่ในสภาพดีเสมอซึ่งส่งผลให้ k_p มีค่าสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในการออกแบบ

(2) สติฟเนสในแนวดิ่งของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

สติฟเนสในแนวดิ่งของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสติฟเนสของทางรถไฟ ดังนั้นการคำนวณโมเมนต์ดัดจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงสติฟเนสในแนวดิ่งของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางในการเลือกใช้ค่า k_d และ k_p

(3) ความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางให้เป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-6011 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : ความต้านทานไฟฟ้า

(4) สมรรถนะด้านการถอนออกของวัสดุฝังยึด

การทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางด้านการถอนออกของวัสดุฝังยึดให้เป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-6013 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : การถอนออกของวัสดุฝังยึด

6.1.3.3 เสถียรภาพของทางรถไฟ

แรงต้านทานของหินโรยทางทั้งในแนวขวางและตามแนวยาวของทางรถไฟมีผลต่อเสถียรภาพของทางรถไฟ โดยแรงดังกล่าวขึ้นอยู่กับมิติและน้ำหนักของหมอนคอนกรีต และการวางหินโรยทาง ดังนั้นการออกแบบจึงต้องพิจารณาและตรวจสอบบริเวณต่อไปนี้เป็นพิเศษ

1) ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟบริเวณปลายรางเชื่อมยาว
2) ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟบริเวณปลายสะพาน
3) ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบนทางรถไฟบริเวณที่มีการเปลี่ยนแนวราง

6.1.4 ลักษณะการจราจรบนทางรถไฟ

6.1.4.1 น้ำหนักกดเพลา

น้ำหนักลงล้อในแนวดิ่งแบบสถิตคำนวณได้จากน้ำหนักกดเพลาระบุ (A_{nom}) โดยน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบหมอนคอนกรีตจะเป็นน้ำหนักบรรทุกต่อล้อ

6.1.4.2 ความเร็วสูงสุด

เพื่อให้การคำนวณโมเมนต์ดัดมีการพิจารณาผลของความเร็วสูงสุดของรถไฟ ผู้ซื้อต้องเป็นผู้กำหนดค่า k_v

6.1.4.3 น้ำหนักบรรทุกสำหรับทางโค้ง

การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุกพลวัตลงพื้นที่รองรับรางขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านบริเวณทางโค้งเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัย ดังนี้

1) น้ำหนักลงล้อในแนวดิ่งบนรางรถไฟเพิ่มขึ้นแบบกึ่งสถิต (quasi-static increase) เนื่องจากการยกโค้งของราง (super-elevation) ที่ไม่เพียงพอหรือมากเกินไป
2) แรงด้านข้างของล้อทำให้เกิดโมเมนต์ดัดเพิ่มเติมในหมอนคอนกรีต

ทั้งนี้ผู้ซื้อต้องเป็นผู้กำหนดค่า k_v โดยพิจารณาผลของปัจจัยดังกล่าวร่วมกัน

6.2 การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีต

6.2.1 ทั่วไป

การวิเคราะห์และออกแบบหมอนคอนกรีตต้องใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่พื้นที่รองรับราง และที่กึ่งกลางหมอน การคำนวณโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานเป็นการคำนวณโดยใช้สมมติฐานว่าทางรถไฟมีพฤติกรรมแบบอิลาสติก

ค่า M_k คำนวณมาจากน้ำหนักบรรทุกพลวัต P_k โดยใช้หลักการคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่นซึ่งมอดุลัสชั้นรองพื้นทางมีค่าคงที่ และใช้วิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้ในการคำนวณโมเมนต์ดัด

1) วิธีอย่างง่ายที่แนะนำในมาตรฐานนี้
2) วิธีทางทฤษฎีที่แนะนำในมาตรฐานสากล เช่น EN 13230-6:2020 Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design

6.2.2 การระบุค่าสัมประสิทธิ์ในการคำนวณค่า P_k

ผู้ซื้อต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ดังต่อไปนี้ เพื่อใช้ในการคำนวณค่า P_k โดยค่าแนะนำสำหรับสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแสดงอยู่ในข้อ ก.4

1) ค่า k_d (ข้อ 6.1.1.2 ข้อ 6.1.3.1 และข้อ 6.1.3.2) ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลดังนี้

1.1) ประเภททางรถไฟ

1.2) มิติของหมอนคอนกรีต

1.3) สติฟเนสของแผ่นรองราง

1.4) มอดุลัสของชั้นรองพื้นทาง

1.5) ระยะเรียงหมอนคอนกรีต

2) ค่า k_r (ข้อ 6.1.1.2)

3) ค่า k_p (ข้อ 6.1.3.2)

4) ค่า k_v (ข้อ 6.1.4.2 และข้อ 6.1.4.3)

5) ค่า $k_{i,r}$ และค่า $k_{i,c}$ (ข้อ 6.1.1.3)

6.2.3 การคำนวณค่า P_k ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติ

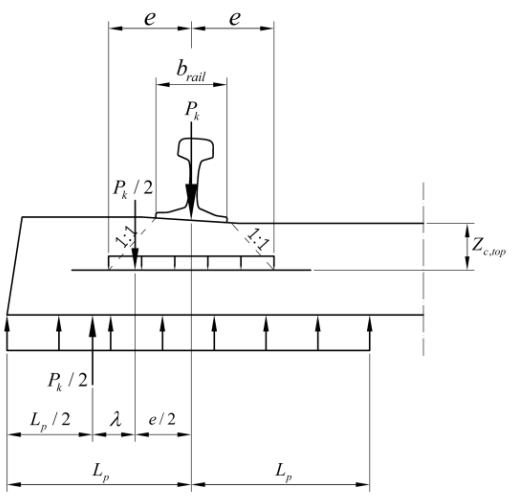
ค่า P_k ที่นำไปใช้ในการหาค่า M_k สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$P_k = \frac{A_{nom}}{2}(1 + k_p \times k_v) \times k_d \times k_r \qquad (1)$$

6.2.4 การคำนวณค่า M_k ที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต

โมเมนต์ดัดที่พื้นที่รองรับรางขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาของหินโรยทาง ความกว้างของฐานราง และรูปทรงเรขาคณิตของหมอนคอนกรีต

การคำนวณค่า $M_{k,r,pos}$ สามารถสมมติให้แรงปฏิกิริยาของหินโรยทางมีลักษณะเป็นแรงกระจายแบบสม่ำเสมอและมีค่าคงที่ตลอดช่วงความยาว $2L_p$ ภายใต้พื้นที่รองรับราง และใช้ค่า $k_{i,r}$ สำหรับการพิจารณาผลของการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทาง แบบจำลองสำหรับคำนวณค่า $M_{k,r,pos}$ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองสำหรับการคำนวณค่า $M_{k,r,pos}$

(ข้อ 6.2.4)

ค่า $M_{k,r,pos}$ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (2) ถึงสมการ (5) ซึ่งเริ่มต้นจากการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากฐานรางไปยังแกนของโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด ดังนี้

$$e = \frac{b_{rail}}{2} + z_{c,top} \tag{2}$$

จากนั้นค่า L_p สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$L_p = \frac{L - L_c}{2} \tag{3}$$

ระยะ λ ระหว่างแรง $P_k / 2$ คำนวณได้จากสมการ (4)

$$\lambda = \frac{L_p - e}{2} \tag{4}$$

และค่า $M_{k,r,pos}$ คำนวณได้จากสมการ (5) ทั้งนี้ข้อแนะนำสำหรับการคำนวณค่า $M_{k,r,neg}$ แสดงอยู่ในข้อ ก.3.1.2

$$M_{k,r,pos} = k_{i,r} \times \lambda \times \frac{P_k}{2} \tag{5}$$

6.2.5 การคำนวณค่า M_k ที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต

การคำนวณค่า $M_{k,c,neg}$ สามารถสมมติให้แรงปฏิกิริยาของหินโรยทางมีลักษณะเป็นแรงกระจายแบบสม่ำเสมอและมีค่าคงที่ และใช้ค่า $k_{i,c}$ สำหรับการพิจารณาผลของการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทาง

6.2.5.1 ทางรถไฟขนาด 1.435 m

ค่า $M_{k,c,neg}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้กับทางรถไฟขนาด 1.435 m ซึ่งมีค่าสติฟเนสและความกว้างที่ฐานของหมอนคอนกรีตแตกต่างกันสามารถคำนวณได้จากสมการ (6) ทั้งนี้รายละเอียดสำหรับค่า $M_{c,neg,100}$ แสดงอยู่ในข้อ ก.3.2.1

$$M_{k,c,neg} = k_{i,c} \times M_{c,neg,100} \times \frac{P_k}{100} \tag{6}$$

6.2.5.2 ทางรถไฟขนาด 1.000 m

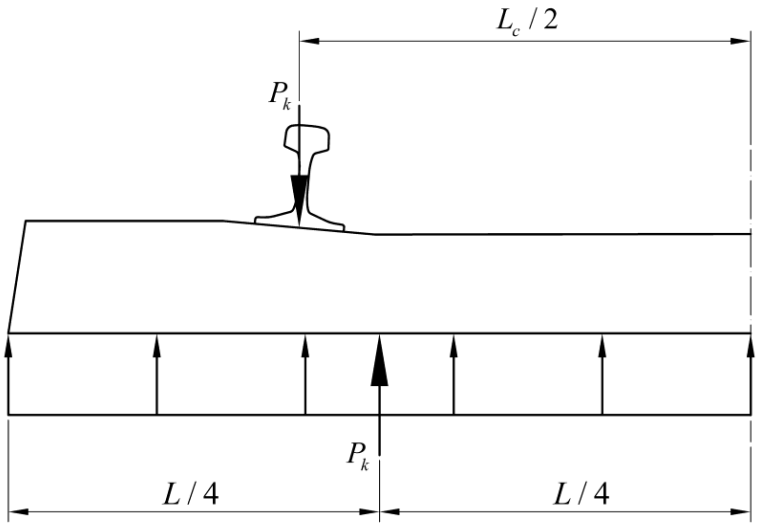
ค่า $M_{c,neg}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.000 m คำนวณได้โดยการสมมติให้แรงปฏิกิริยาของหินโรยทางมีค่าคงที่ตลอดความยาวของหมอนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4

สำหรับหมอนคอนกรีตที่มีความกว้างของฐานคงที่ และมีหน้าตัดสม่ำเสมอ ค่า $M_{c,neg}$ และ $M_{k,c,neg}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) และสมการ (8) ตามลำดับ

$$M_{c,neg} = \frac{-P_k \times (2L_c - L)}{4} \quad (7)$$

$$M_{k,c,neg} = k_{i,c} \times M_{c,neg} \quad (8)$$

สำหรับหมอนคอนกรีตที่มีความกว้างของฐานไม่คงที่หรือมีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ ให้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) ในการวิเคราะห์



รูปที่ 4 แบบจำลองสำหรับการคำนวณ $M_{c,neg}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.000 m

(ข้อ 6.2.5.2)

6.3 การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนประแจคอนกรีต

เนื่องจากความยาวของหมอนประแจคอนกรีตและตำแหน่งของพื้นที่รองรับรางมีความแตกต่างและหลากหลาย ค่า M_k จึงไม่สามารถคำนวณได้โดยวิธีทั่วไป ภาคผนวก ข. แสดงตัวอย่างค่า M_k สำหรับหมอนประแจคอนกรีตของประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรปที่คำนวณโดยใช้หลักการคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น

ทั้งนี้ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า $M_{k,b,pos}$ และค่า $M_{k,b,neg}$

7. การออกแบบหน้าตัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

การออกแบบหน้าตัดของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต โดยต้องอาศัยมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กหรือมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตอัดแรงตามที่ผู้ซื้อระบุประกอบการออกแบบ

8. เกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

เมื่อออกแบบหน้าตัดหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการทดสอบหมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตเพื่อยืนยันว่า หมอนคอนกรีตหรือหมอนประแจคอนกรีตที่ออกแบบไว้ผ่านเกณฑ์การทดสอบต่าง ๆ ตามที่กำหนด

8.1 เกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกสำหรับการเกิดรอยร้าวแรก

8.1.1 เกณฑ์การทดสอบหมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

พฤติกรรมในการรับแรงดัดของหมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงขึ้นอยู่กับมอดุลัสหน้าตัด แรงที่ใช้ในการอัดแรง และกำลังดัดของคอนกรีต ทั้งนี้แรงที่ใช้ในการอัดแรงและกำลังดัดของคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงตลอดอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

8.1.1.1 การสูญเสียกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ

กำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 2-3 สัปดาห์แรกหลังจากการผลิต แต่หลังจากนั้นกำลังดึงอาจมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามอายุการใช้งานเนื่องจากความล้า (fatigue) ภายใต้แรงกระทำซ้ำของน้ำหนักลงล้อ การเปลี่ยนแปลงของกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดจึงต้องพิจารณาทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

8.1.1.2 การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียการอัดแรง

การสูญเสียการอัดแรงของหมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต สภาพการใช้งาน และอายุการใช้งาน ทั้งนี้การสูญเสียการอัดแรงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่รอยร้าวแรกลดลง แรงที่ใช้ในการอัดแรงจะมีค่าลดลงตามอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตอัดแรงหรือหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่น (elastic shortening) ภายใต้แรงอัดของหมอนดังกล่าว การคืบ (creep) และการหดตัว (shrinkage) ของคอนกรีต และการคลายตัวของลวดอัดแรง (steel relaxation)

8.1.1.3 การคำนวณค่า M_t และค่า k_t

การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียการอัดแรง ($\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t}$) และการสูญเสียกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ ($\Delta f_{ct,fl,fat}$) ส่งผลให้หมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดลดลงตามอายุการใช้งาน ในการทดสอบยืนยันการออกแบบจึงต้องพิจารณาผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ หมอนคอนกรีตอัดแรงและหมอนประแจคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตขึ้นจึงต้องมีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดทดสอบแบบสถิตที่สูงกว่าโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ

ค่า M_t สำหรับการเกิดรอยร้าวแรกจึงคำนวณโดยพิจารณาโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะร่วมกับผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียการอัดแรงและการสูญเสียกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงกระทำซ้ำตามอายุการใช้งาน

สำหรับหมอนคอนกรีตอัดแรงที่อายุ 28 วัน ค่า M_t สำหรับการทดสอบแบบสถิตที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกคำนวณได้จากสมการ (9) ถึงสมการ (11)

$$M_t = M_k + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} + \Delta f_{ct,fl,fat}) \cdot W \tag{9}$$

$$\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} = \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days} \tag{10}$$

$$\Delta f_{ct,fl,fat} = f_{ct,fl,t=28days} - f_{ct,fl,fat} \tag{11}$$

ในการกำหนดเกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก (acceptance criteria) สำหรับการเกิดรอยร้าวแรกตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ค่า k_t คำนวณได้จากสมการ (12)

$$k_t = \frac{M_t}{M_k} \tag{12}$$

ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า k_t และนำค่า k_t ไปใช้ในการกำหนดเกณฑ์การทดสอบสำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรก ตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

ข้อเสนอแนะสำหรับการคำนวณค่า $\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t}$ และค่า $\Delta f_{ct,fl,fat}$ รวมทั้งสมการที่ใช้คำนวณค่า $M_{t,r,pos}$ $M_{t,r,neg}$ $M_{t,c,pos}$ และ $M_{t,c,neg}$ แสดงอยู่ในข้อ ก.4.2

ภาคผนวก ข. แสดงตัวอย่างค่า $M_{t,b,pos}$ และ $M_{t,b,neg}$ สำหรับหมอนประแจคอนกรีตของประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป

8.1.2 เกณฑ์การทดสอบหมอนคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับหมอนคอนกรีตเสริมเหล็ก รอยร้าวแรกไม่ใช้เป็นเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ

8.2 เกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษและน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ

ในช่วงอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต แรงกระแทกเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกพิเศษและน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุมีโอกาสเกิดขึ้นได้เป็นบางครั้งและครั้งเดียว ตามลำดับ โดยอาจเป็นผลมาจากความชำรุดเสียหายของล้อและราง จึงอาจทำให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ

การกำหนดเกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ให้คูณ M_k ด้วยค่า k_{1s} และค่า k_{1d}

การกำหนดเกณฑ์การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุตามมาตรฐาน สทร. CT-2006 มาตรฐานทั่วไปของหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต ให้คูณ M_k ด้วยค่า k_{2s} และค่า k_{2d}

ทั้งนี้ผู้ซื้อต้องกำหนดค่า k_{1s} k_{1d} k_{2s} และ k_{2d} ซึ่งมีค่าแนะนำอยู่ในข้อ ก.4

9. การคำนวณหน่วยแรงของหมอนคอนกรีตอัดแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบ

ในช่วงอายุการใช้งานของหมอนคอนกรีตอัดแรง รอยร้าวของคอนกรีตจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติต้องไม่เกิดขึ้น หน่วยแรงดึงสูงสุดของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะและการอัดแรง ($\sigma_{ct,\max}$) จึงต้องตรวจสอบว่ามีค่าไม่เกินกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดจากความล้าเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ ($f_{ct,fl,fat}$) ดังสมการ (13)

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{W} + \frac{M_k}{W} < f_{ct,fl,fat} \tag{13}$$

กรณีที่มีการตรวจสอบหน่วยแรงอัดสูงสุดเพื่อประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากแรงกระทำซ้ำ ผู้ซื้อและผู้จัดจำหน่ายต้องทำข้อตกลงร่วมกัน

ข้อมูลและขั้นตอนเพิ่มเติมในการคำนวณค่า $\sigma_{ct,\max}$ เพื่อตรวจสอบการออกแบบหมอนคอนกรีตอัดแรงแสดงอยู่ในข้อ ก.5

10. เอกสารอ้างอิง

10.1 สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน). (2569). *มาตรฐาน สทร. CT–8001:2569 มาตรฐานบทนิยามเกี่ยวกับหมอนรองรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง.*

10.2 British Standards Institution. (2020). *EN 13230-6:2020 Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design.*

10.3 European Railway Research Institute. (1970). *Question D71: Stresses in the rails, the ballast and in the formations resulting from traffic loads. Report No. 12: Repeated loading of clay and track foundation design.*

10.4 European Railway Research Institute. (1991). *Question ORE D170 Report 4: Study of different values which need to be taken into account with respect to the definition of the properties of concrete sleepers, and comparison of current testing methods.*

10.5 International Union of Railways. (2004). *Design of monoblock concrete sleepers.*

ภาคผนวก ก.
หมอนคอนกรีต - การคำนวณโมเมนต์ดัด การกำหนดเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ และการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบ

ก.1 ทั่วไป

ก.1.1 บทนำ

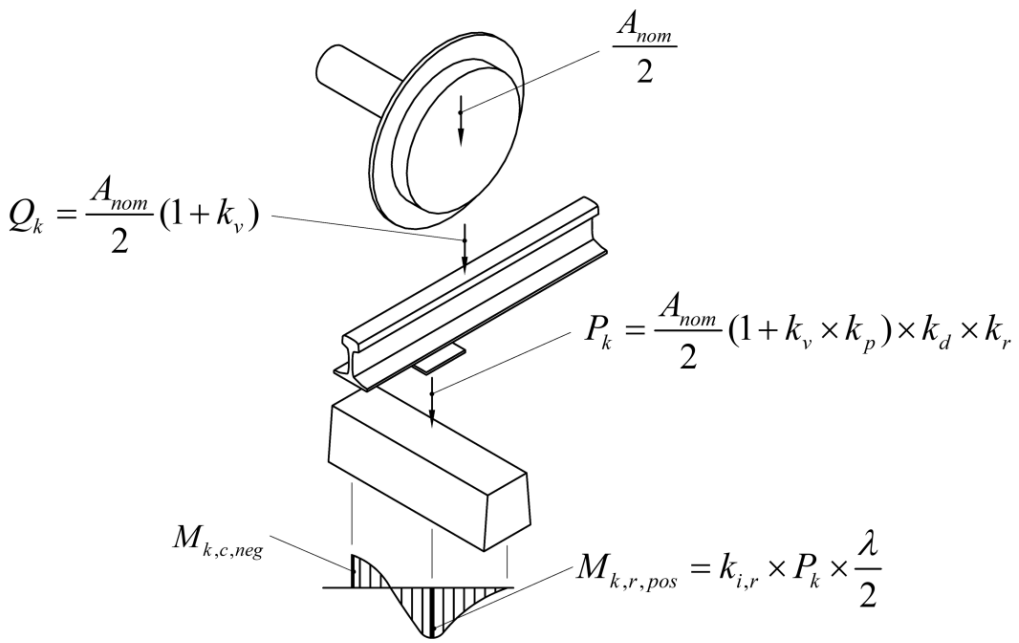
ภาคผนวกนี้ครอบคลุมการคำนวณโมเมนต์ดัด การกำหนดเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ และการคำนวณหน่วยแรงเพื่อตรวจสอบการออกแบบ โดยอ้างอิงตาม UIC 713:2004 Design of monoblock concrete sleepers ซึ่งพัฒนามาจาก Question ORE D71:1970 Stresses in the rails, the ballast and in the formations resulting from traffic loads. Report No. 12: Repeated loading of clay and track foundation design และ Question ORE D170:1991 Report 4: Study of different values which need to be taken into account with respect to the definition of the properties of concrete sleepers, and comparison of current testing methods ทั้งนี้มาตรฐานเหล่านี้ใช้แบบจำลองคานช่วงเดียวธรรมดาร่วมกับการใช้สัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากการเก็บข้อมูลเช่น การวัดค่าจากการใช้งานจริง การทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ ทั้งนี้วิธีการคำนวณน้ำหนักบรรทุก โมเมนต์ดัด และสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในภาคผนวกนี้ใช้แนวทางและข้อกำหนดเดียวกันกับ UIC 713:2004 Design of monoblock concrete sleepers และ EN 13230-6:2020 Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design และสามารถใช้ได้กับทางรถไฟทุกขนาด

ก.1.2 ขั้นตอนการคำนวณค่า M_k

การคำนวณโมเมนต์ดัดในหมอนคอนกรีตเป็นไปตามหลักการถ่ายแรงในแนวดิ่ง โดยเริ่มจากการหาค่า A_{nom} และไปสิ้นสุดที่การคำนวณโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะที่พื้นที่รองรับราง ($M_{k,r}$) และที่กึ่งกลางหมอน ($M_{k,c}$)

รูปที่ ก.1 แสดงการถ่ายแรงในแนวดิ่งของแบบจำลองอย่างง่าย สัมประสิทธิ์ และสมการที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัด รูปนี้ไม่ได้แสดงการปฏิสัมพันธ์แบบพลวัตระหว่างล้อ ราง และหมอนคอนกรีตเพื่อความง่ายในการทำความเข้าใจ ทั้งนี้การคำนวณหาโมเมนต์ดัดตามรูปที่ ก.1 จำกัดเฉพาะน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เป็นน้ำหนักบรรทุกสถิตและน้ำหนักบรรทุกพลวัตเท่านั้น

การกระจายของน้ำหนักบรรทุกตามแนวรางและการคำนวณโมเมนต์ดัดในหมอนคอนกรีตสามารถใช้ “แบบจำลองคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น” ได้



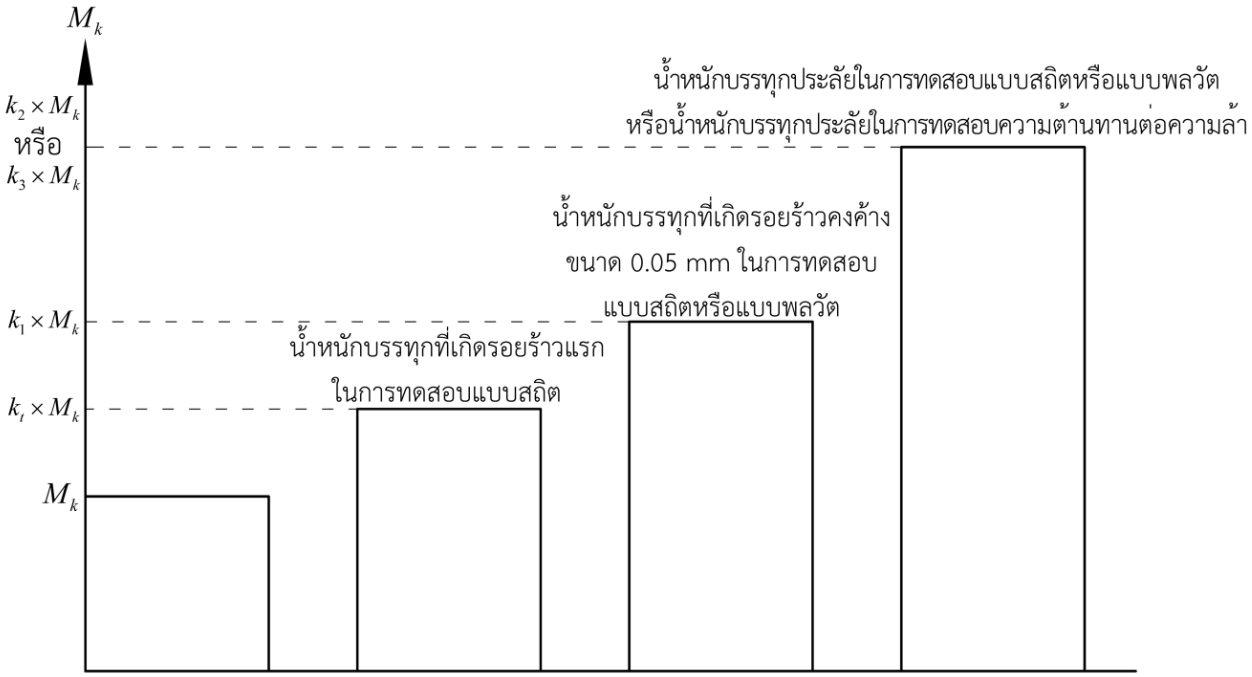
รูปที่ ก.1 การถ่ายแรงในแนวดิ่งและการคำนวณหาโมเมนต์ดัดในหมอนคอนกรีต

(ข้อ ก.1.2)

ก.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง M_k และ M_t

ค่า M_t มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกและค่า M_k ดังแสดงในรูปที่ ก.2 โดยน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ รอยร้าวและการวิบัติของหมอนคอนกรีตต้องเป็นดังนี้

1) สำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติ หมอนคอนกรีตอัดแรงต้องไม่มีรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด
2) สำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษ หมอนคอนกรีตอัดแรงอาจมีรอยร้าวเกิดขึ้นได้ แต่รอยร้าวนั้นต้องปิดลงหลังนำน้ำหนักบรรทุกออกไป
3) สำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ หมอนคอนกรีตอัดแรงต้องรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบได้ โดยโมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวต้องมีค่าต่ำกว่ากำลังดัดประลัยของหมอนคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ ก.2 น้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดสำหรับการทดสอบ

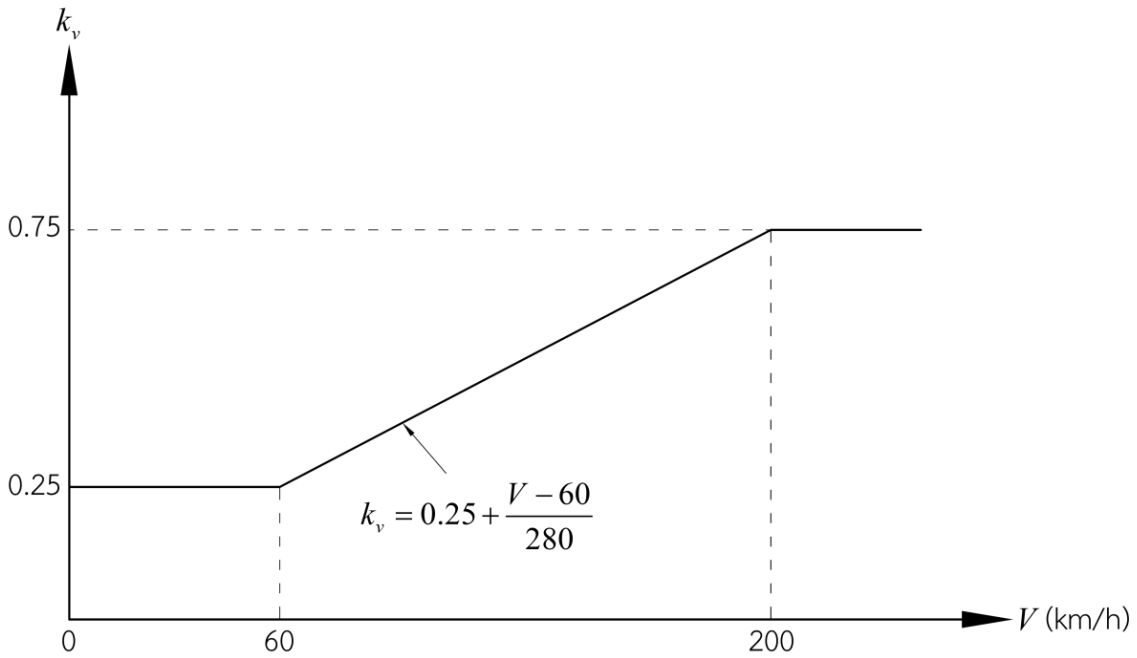
(ข้อ ก.1.3)

ก.2 น้ำหนักลงพื้นที่รองรับราง

ก.2.1 อิทธิพลของความเร็วสูงสุดของรถไฟ

ค่า k_v ใช้สำหรับการเพิ่มน้ำหนักลงล้อพลวัตจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานในสภาวะปกติเนื่องจากอิทธิพลของความเร็วสูงสุดของรถไฟและสภาพของทางรถไฟ

ค่า k_v ในรูปที่ ก.3 สามารถใช้กับทางรถไฟที่มีการชำรุดเสียหายบ้างตามอายุการใช้งานของทางรถไฟจากการใช้งานตามปกติ



รูปที่ ก.3 กราฟระหว่าง k_v และความเร็วสูงสุดของรถไฟ

(ข้อ ก.2.1)

ค่า k_v ในรูปที่ ก.3 ได้มาจากข้อมูลน้ำหนักลงล้อพลวัตจากทางรถไฟที่มีการชำรุดเสียหายบ้างจากการใช้งานตามปกติ โดยคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยบวกสองเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักลงล้อพลวัตที่วัดได้

สำหรับทางรถไฟที่มีความถี่ในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงมากกว่าทางรถไฟทั่วไป เช่น ทางรถไฟสำหรับรถไฟความเร็วสูง สามารถเลือกใช้ค่า k_v ที่ต่ำกว่าในรูปที่ ก.3 ได้

ก.2.2 อิทธิพลของแผ่นรองรางอิลาสติก

ค่า k_p ใช้สำหรับการพิจารณาประสิทธิภาพของแผ่นรองรางในการซับแรงกระแทก โดยพิจารณาจากค่าการลดแรงกระแทกของแผ่นรองราง (a) ซึ่งสามารถใช้ค่าที่เสนอแนะต่อไปนี้

1) สำหรับแผ่นรองรางที่มีคุณสมบัติในการซับแรงกระแทกต่ำ (a มีค่าน้อยกว่า 15%) ให้ใช้ค่า k_p เท่ากับ 1.00
2) สำหรับแผ่นรองรางที่มีคุณสมบัติในการซับแรงกระแทกปานกลาง (a มีค่าอยู่ระหว่าง 15% ถึง 30%) ให้ใช้ค่า k_p เท่ากับ 0.89
3) สำหรับแผ่นรองรางที่มีคุณสมบัติในการซับแรงกระแทกสูง (a มีค่ามากกว่า 30%) ให้ใช้ค่า k_p เท่ากับ 0.78

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาเลือกใช้ค่าจากการทดสอบตามมาตรฐาน สทร. CT-6012 มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง : การซับแรงกระแทก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของ k_p จากการทดสอบหลาย ๆ ครั้ง

ก.2.3 อิทธิพลของหินโรยทาง

ความผันแปรของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทางขึ้นอยู่กับการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง จากการเก็บข้อมูลโดยการวัดค่าแรงปฏิกิริยาจากการใช้งานจริงพบว่า แรงปฏิกิริยาที่มีความผันแปรอาจทำให้น้ำหนักลงพื้นที่รองรับรางมีค่าเพิ่มขึ้นได้ถึง 35%

ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ค่า k_r เท่ากับ 1.35 สำหรับการพิจารณาอิทธิพลของความผันแปรของแรงปฏิกิริยาของหินโรยทางเนื่องจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ก.2.4 การกระจายน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งตามแนวราง

ค่า k_d ใช้สำหรับการกระจายน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งตามแนวราง ซึ่งมีค่าแนะนำดังนี้

1) กรณีทั่วไปสำหรับรางที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 46 kg/m และระยะเรียงหมอนคอนกรีตไม่เกิน 0.65 m ให้ใช้ค่า k_d เท่ากับ 0.5
2) กรณีที่รางมีน้ำหนักมากและแผ่นรองรางซับแรงกระแทกได้น้อย ระยะเรียงหมอนคอนกรีตเท่ากับ 0.60 m ความยาวของหมอนคอนกรีตตั้งแต่ 2.30 m ถึง 2.60 m ค่ามอดุลัสของชั้นดินคันทางหรือ C_2 เท่ากับ 0.1 N/mm^3 ให้ใช้ค่า k_d ที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎี “คานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น” ในตารางที่ ก.1
3) กรณีอื่น ๆ ให้คำนวณค่า k_d โดยใช้ทฤษฎี “คานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น” ตามที่แนะนำในมาตรฐานสากล เช่น EN 13230-6:2020 Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design

ตารางที่ ก.1 ค่า k_d ที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น

(ข้อ ก.2.4)

(ที่มา : EN 13230-6:2020)

หน้าตัดราง	**โมเมนต์ความเฉื่อยของราง** cm^4	k_d
49E1	1,819	0.41
54E1	2,338	0.40
54E3	2,073	0.40
60E1	3,083	0.38

ก.3 การคำนวณค่า M_k

ก.3.1 การคำนวณค่า $M_{k,r,neg}$

ก.3.1.1 การระบุค่า $k_{i,r}$

วิธีคำนวณอย่างง่ายสามารถใช้ได้กับหมอนคอนกรีตที่มีค่า L_p ตั้งแต่ 0.35 m ถึง 0.55 m โดยให้ใช้ค่า $k_{i,r}$ เท่ากับ 1.6 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการวัดและคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยบวกสองเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ก.3.1.2 การหาค่า $M_{k,r,neg}$

สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.435 m และมีความยาวตั้งแต่ 2.50 m ถึง 2.60 m อาจสมมติให้ $M_{k,r,neg}$ มีค่าตามสมการ (ก.1)

$$M_{k,r,neg} = -0.5 \times M_{k,r,pos} \qquad (ก.1)$$

สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.435 m และมีความยาวน้อยกว่า 2.50 m อาจสมมติให้ $M_{k,r,neg}$ มีค่าตามสมการ (ก.2)

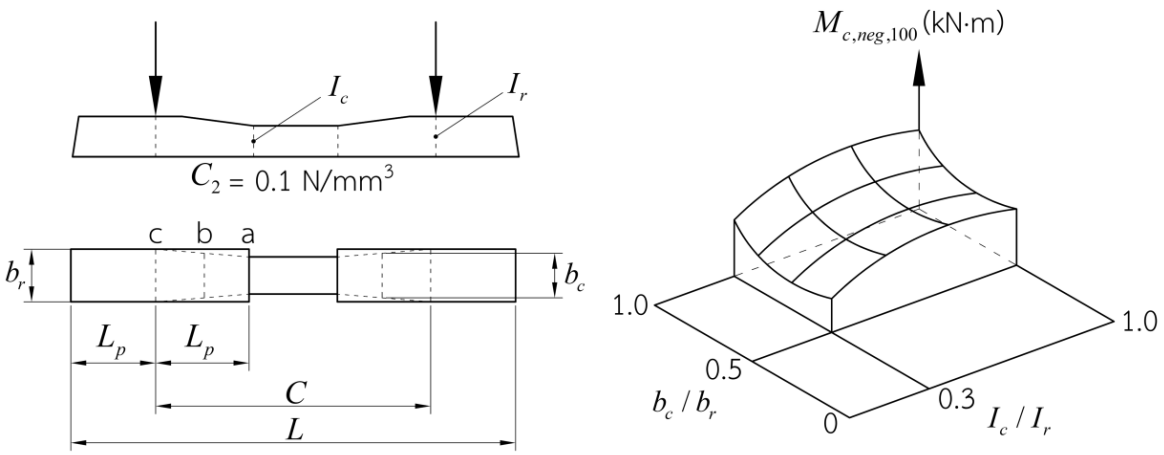
$$M_{k,r,neg} = -0.7 \times M_{k,r,pos} \qquad (ก.2)$$

ก.3.2 การคำนวณค่า $M_{k,c,pos}$

ก.3.2.1 การหาค่า $M_{c,neg,100}$

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า $M_{c,neg,100}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง $M_{c,neg,100}$ กับโมเมนต์ความเฉื่อยของหมอนคอนกรีตและความกว้างของฐานของหมอนคอนกรีตแสดงดังรูปที่ ก.4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

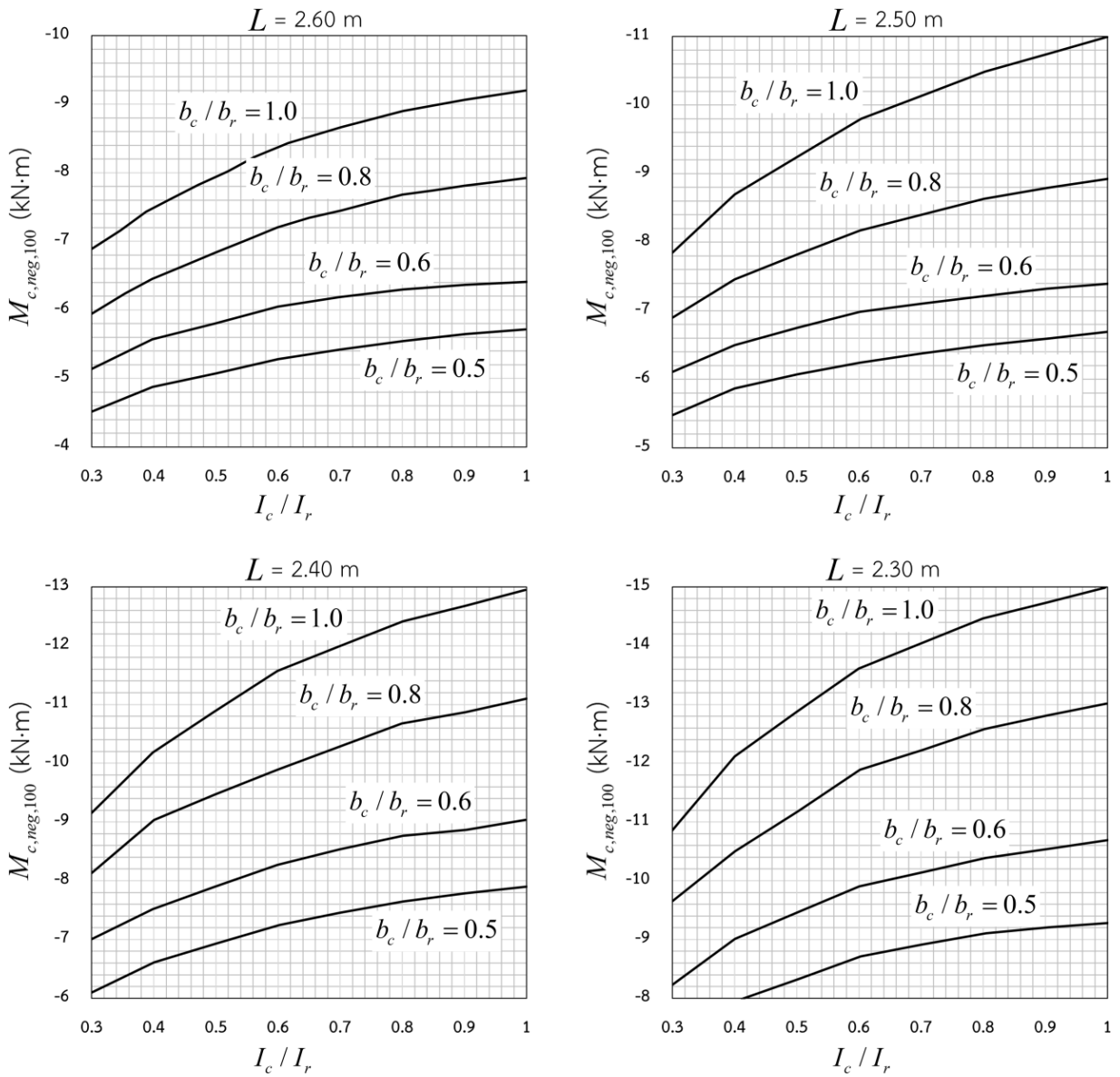
1) ค่า $M_{c,neg,100}$ ได้มาจากการใช้ค่า C_2 เท่ากับ 0.1 N/mm^3 และใช้สำหรับตำแหน่ง a ของบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัด
2) สำหรับตำแหน่ง b ของบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัด ค่า $M_{c,neg,100}$ อาจปรับลดลงได้ 5%
3) สำหรับตำแหน่ง c ของบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัด ค่า $M_{c,neg,100}$ อาจปรับลดลงได้ 10%
4) วิธีการคำนวณอย่างง่ายสามารถใช้ได้กับหมอนคอนกรีตซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 2.30 m ถึง 2.60 m และค่า I_r (รูปที่ ก.4 และรูปที่ ก.5) อยู่ในช่วง 200x10^6 mm^4 ± 20%



รูปที่ ก.4 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า $M_{c,neg,100}$ สำหรับหมอนคอนกรีต

(ข้อ ก.3.2.1)

ค่า $M_{c,neg,100}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.435 m แสดงอยู่ในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 กราฟค่า $M_{c,neg,100}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.435 m

(ข้อ ก.3.2.1)

(ที่มา : EN 13230-6:2020)

ก.3.2.2 การระบุค่า $k_{i,c}$

ค่า $k_{i,c}$ ที่แนะนำในตารางที่ ก.2 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป ค่า $k_{i,c}$ ในตารางเป็นอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกซึ่งได้จากการวัดหรือคำนวณที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต หลังเกิดการสูญเสียการอัดแรงและกำลังดึงของคอนกรีตภายใต้โมเมนต์ดัดกับค่า $k_{i,c}$ ที่คำนวณโดยใช้แบบจำลอง

ตารางที่ ก.2 ค่า $k_{i,c}$ สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.000 m และ 1.435 m

(ข้อ ก.3.2.2)

(ที่มา : EN 13230-6:2020)

ประเทศ	ทางรถไฟขนาด 1.000 m		ทางรถไฟขนาด 1.435 m	
	ความยาวของหมอนคอนกรีต m	$k_{i,c}$	ความยาวของหมอนคอนกรีต m	$k_{i,c}$
ออสเตรีย			2.60	2.1-2.4
เบลเยียม			2.50	2.0
ฝรั่งเศส			2.26	0.9
			2.40	1.0
			2.50	1.1
เยอรมัน			2.60	2.0
			2.40	1.5
เนเธอร์แลนด์			2.50	2.5
โปรตุเกส			2.60	1.6
สเปน			2.60	1.6
สวิตเซอร์แลนด์	2.00	1.6	2.60	1.4
อังกฤษ			2.50	0.5-0.8

ก.3.2.3 การหาค่า $M_{k,c,pos}$

สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.435 m และมีความยาวตั้งแต่ 2.20 m ถึง 2.60 m อาจสมมติให้ $M_{k,c,pos}$ มีค่าตามสมการ (ก.3)

$$M_{k,c,pos} = |0.7 \times M_{k,c,neg}| \qquad (ก.3)$$

สำหรับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในทางรถไฟขนาด 1.000 m และมีความยาวตั้งแต่ 1.30 m ถึง 2.00 m อาจสมมติให้ $M_{k,c,pos}$ มีค่าตามสมการ (ก.4)

$$M_{k,c,pos} = |1.0 \times M_{k,c,neg}| \qquad (ก.4)$$

ค่า $M_{k,c,pos}$ อาจหาได้จากการพิจารณาโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงตามแรงกระแทกแบบพลวัตบนหมอนคอนกรีต

ผู้ซื้อสามารถระบุได้ว่าต้องการให้มีการทดสอบเพื่อหาค่า $M_{k,c,pos}$ หรือไม่

ก.4 การระบุค่าสัมประสิทธิ์สำหรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบและเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ

ก.4.1 ทั่วไป

k_1 k_2 และ k_3 เป็นสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากผลการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดของหมอนคอนกรีตหลายแบบและหลายขนาด โดยสมมติให้ค่า k_d เท่ากับ 0.5 ตาม Question ORE D170:1991 Report 4: Study of different values which need to be taken into account with respect to the definition of the properties of concrete sleepers, and comparison of current testing methods

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกพิเศษและน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุไม่มีการกระจายน้ำหนักตามแนวราง หากกำหนดค่า k_d เป็นค่าอื่นที่ไม่ใช่ 0.5 ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทดสอบอ้างอิงแรกเริ่ม ให้ปรับค่า k_1 k_2 และ k_3 ด้วยค่า $0.5/k_d$

ก.4.2 การคำนวณค่า M_t

โมเมนต์ดัดทดสอบใช้ในการคำนวณหาค่า k_t สำหรับเกณฑ์การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวแรกที่พื้นที่รองรับรางและที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต

ค่า $M_{t,r,pos}$ และค่า $M_{t,r,neg}$ สำหรับการเกิดรอยร้าวแรกที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน อาจคำนวณโดยใช้สมการ (ก.5) และสมการ (ก.6) ตามลำดับ

$$M_{t,r,pos} = M_{k,r,pos} + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} + \Delta f_{ct,fl,fat})W_{r,bottom} \qquad (ก.5)$$

$$M_{t,r,neg} = M_{k,r,neg} + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} + \Delta f_{ct,fl,fat})W_{r,top} \qquad (ก.6)$$

ค่า $M_{t,c,neg}$ และค่า $M_{t,c,pos}$ สำหรับการเกิดรอยร้าวแรกที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน อาจคำนวณโดยใช้สมการ (ก.7) และสมการ (ก.8) ตามลำดับ

$$M_{t,c,neg} = M_{k,c,neg} + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} + \Delta f_{ct,fl,fat})W_{c,top} \qquad (ก.7)$$

$$M_{t,c,pos} = M_{k,c,pos} + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,\Delta t} + \Delta f_{ct,fl,fat})W_{c,bottom} \qquad (ก.8)$$

ในกรณีที่หมอนคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน ในวันที่ทำการทดสอบ ให้ปรับแก้ค่าการสูญเสียการอัดแรง

ข้อแนะนำเพิ่มเติมในการคำนวณค่า M_t มีดังนี้

1) สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานไม่น้อยกว่า 50 MPa หรือคอนกรีตที่มีกำลังอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานไม่น้อยกว่า 60 MPa ในการคำนวณค่า $\Delta f_{ct,fl,fat}$ อาจสมมติให้ $f_{ct,fl,t=28days}$ และ $f_{ct,fl,fat}$ มีค่าเท่ากับ 5.5 MPa และ 3.0 MPa ตามลำดับ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบ
2) การสูญเสียการอัดแรงตามอายุของหมอนคอนกรีต เนื่องจากการหดตัวแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงอัดของหมอนคอนกรีต การคืบและการหดตัวของคอนกรีต และการคลายตัวของลวดอัดแรงอาจใช้การคำนวณตาม มยผ. 1102 มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรง หรือ EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings หรือมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวกับคอนกรีตอัดแรง โดยการสูญเสียการอัดแรงทั้งหมดอาจสมมติให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 25 ของแรงที่ใช้ในการอัดแรงแรกเริ่ม (initial prestress force)
3) ที่อายุ 28 วัน หมอนคอนกรีตจะมีการสูญเสียการอัดแรงเท่ากับหนึ่งในสามของการสูญเสียการอัดแรงทั้งหมด (total loss)

ก.4.3 การคำนวณค่า k_1

น้ำหนักบรรทุกพิเศษเกิดขึ้นเนื่องจากมีเหตุการณ์ที่ทำให้น้ำหนักลงล้อมีค่าสูงกว่าน้ำหนักลงล้อลักษณะเฉพาะ (characteristic wheel load) เป็นอย่างมาก หรือมีความเสียหายรุนแรงเกิดขึ้นกับหินโรยทาง น้ำหนักบรรทุกพิเศษนี้อาจทำให้หมอนคอนกรีตเกิดรอยร้าว แต่เมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกไป รอยร้าวนี้จะปิดได้ด้วยแรงจากการอัดแรงหรือเหล็กเสริม

สำหรับรอยร้าวคงค้างในคอนกรีตที่มีความกว้างไม่เกิน 0.05 mm ระยะคอนกรีตหุ้มลวดอัดแรงจะยังป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อนของลวดอัดแรงไว้ได้

สาเหตุที่อาจทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกพิเศษ เช่น รถไฟบรรทุกสินค้าจนน้ำหนักเกิน ล้อรถไฟแบนลงที่ระดับความลึก 2 mm หรือช่องว่างขนาดใหญ่ใต้ปลายหมอนคอนกรีต

เพื่อป้องกันความเสียหายของหมอนคอนกรีตจากการรับน้ำหนักบรรทุกพิเศษ ให้ใช้ค่า k_1 ตามสมการ (ก.9) และสมการ (ก.10) สำหรับเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-2007 มาตรฐานหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว ถึงมาตรฐาน สทร. CT-2009 มาตรฐานหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

$$k_{1s} = 1.8 \times \frac{0.5}{k_d} \qquad (ก.9)$$

$$k_{1d} = 1.5 \times \frac{0.5}{k_d} \qquad (ก.10)$$

ก.4.4 การคำนวณค่า k_2

แรงกระแทกจากอุบัติเหตุทำให้หมอนคอนกรีตเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง เช่น คอนกรีตเกิดการกะเทาะหรือเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามภายหลังการเกิดอุบัติเหตุ หมอนคอนกรีตยังต้องทำหน้าที่พื้นฐานบางอย่างต่อไปได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น สามารถคงแนวรางเพื่อให้รถไฟยังคงวิ่งบนรางได้ และสามารถรับแรงจากรถไฟและถ่ายแรงลงสู่หินโรยทางได้

สาเหตุที่อาจทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ เช่น ล้อรถไฟแบนลงที่ระดับความลึกหลายมิลลิเมตร หรือรถไฟตกราง

เพื่อป้องกันความเสียหายของหมอนคอนกรีตจากการรับน้ำหนักบรรทุกอุบัติเหตุ ให้ใช้ค่า k_2 ตามสมการ (ก.11) และสมการ (ก.12) สำหรับเกณฑ์การทดสอบยืนยันการออกแบบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-2007 มาตรฐานหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว ถึงมาตรฐาน สทร. CT-2009 มาตรฐานหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

$$k_{2s} = 2.5 \times \frac{0.5}{k_d} \qquad (ก.11)$$

$$k_{2d} = 2.2 \times \frac{0.5}{k_d} \qquad (ก.12)$$

ก.4.5 การคำนวณค่า k_3

การทดสอบความต้านทานต่อความล้าสำหรับหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีตเป็นการจำลองพฤติกรรมในการเกิดรอยร้าวที่หน้าตัดคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

ทั้งนี้ k_3 แนะนำให้ใช้ค่าตามสมการ (ก.13) สำหรับเกณฑ์การทดสอบเพื่อยืนยันการออกแบบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน สทร. CT-2007 มาตรฐานหมอนคอนกรีตอัดแรงแท่งเดี่ยว ถึงมาตรฐาน สทร. CT-2009 มาตรฐานหมอนประแจคอนกรีตอัดแรง

$$k_3 = 2.5 \times \frac{0.5}{k_d} \qquad (ก.13)$$

ก.5 การคำนวณค่า $\sigma_{ct,max}$ เพื่อตรวจสอบการออกแบบ

ค่า $\sigma_{ct,max}$ ที่พื้นที่รองรับรางภายใต้ $M_{k,r,pos}$ คำนวณได้ตามสมการ (ก.14)

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{P_{m,t2}}{A_r} + \frac{P_{m,t2}e_{pr}}{W_{r,bottom}} + \frac{M_{k,r,pos}}{W_{r,bottom}} < f_{ct,fl,fat} \qquad (ก.14)$$

ค่า $\sigma_{ct,max}$ ที่พื้นที่รองรับรางภายใต้ $M_{k,r,neg}$ คำนวณได้ตามสมการ (ก.15)

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{P_{m,t2}}{A_r} + \frac{P_{m,t2}e_{pr}}{W_{r,top}} + \frac{M_{k,r,neg}}{W_{r,top}} < f_{ct,fl,fat} \qquad (ก.15)$$

ค่า $\sigma_{ct,max}$ ที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตภายใต้ $M_{k,c,pos}$ คำนวณได้ตามสมการ (ก.16)

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{P_{m,t2}}{A_c} + \frac{P_{m,t2}e_{pc}}{W_{c,bottom}} + \frac{M_{k,c,pos}}{W_{c,bottom}} < f_{ct,fl,fat} \qquad (ก.16)$$

ค่า $\sigma_{ct,max}$ ที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตภายใต้ $M_{k,c,neg}$ คำนวณได้ตามสมการ (ก.17)

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{P_{m,t2}}{A_c} + \frac{P_{m,t2}e_{pc}}{W_{c,top}} + \frac{M_{k,c,neg}}{W_{c,top}} < f_{ct,fl,fat} \qquad (ก.17)$$

ทั้งนี้ข้อแนะนำเพิ่มเติมในการคำนวณค่า M_t มีดังนี้

1) สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานไม่น้อยกว่า 50 MPa หรือคอนกรีตที่มีกำลังอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานไม่น้อยกว่า 60 MPa อาจสมมติให้ $f_{ct,fl,fat}$ มีค่าเท่ากับ 3.0 MPa หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบ
2) การสูญเสียการอัดแรงทั้งหมดอาจสมมติให้มีค่าเท่ากับ 25% ของแรงที่ใช้ในการอัดแรงแรกเริ่ม

ภาคผนวก ข.
หมอนประแจคอนกรีต - การคำนวณโมเมนต์ดัด และสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง

(ข้อ 6.3 และข้อ 8.1.1.3)

การคำนวณโมเมนต์ดัดสำหรับการออกแบบหมอนประแจคอนกรีตใช้หลักการคานวางบนที่รองรับแบบยืดหยุ่น ซึ่งสอดคล้องกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริง

การคำนวณค่า M_k จะกำหนดให้ $M_{k,b,pos}$ เท่ากับ $M_{k,b,neg}$

ทั้งนี้ค่า $M_{t,b,pos}$ และค่า $M_{t,b,neg}$ ของประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรปจะอยู่ในช่วง ±19.3 kN·m ถึง ±34.5 kN·m

ค่า $M_{k,b,pos}$ $M_{k,b,neg}$ $M_{t,b,pos}$ และ $M_{t,b,neg}$ รวมทั้งค่า k_b และ k_{bn} ของประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรปแสดงอยู่ในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะและโมเมนต์ดัดทดสอบสำหรับหมอนประแจคอนกรีต

(ภาคผนวก ข.)

(ที่มา : EN 13230-6:2020)

ประเทศ	รูปแบบของหมอนประแจคอนกรีต	ขนาดหน้าตัดของหมอนประแจคอนกรีต	$M_{k,b,pos}$ kN·m	$M_{k,b,neg}$ kN·m	$M_{t,b,pos}$ kN·m	$M_{t,b,neg}$ kN·m	k_b	k_{bn}
ออสเตรีย	ทุกรูปแบบ	กว้าง 300 mm ลึก 220 mm	25.0	-25.0	25.0	-25.0		
ฝรั่งเศส	ความยาว ≤ 2.60 m	กว้าง 300 mm ลึก 200 mm			19.3	-19.3	1.30 ถึง 1.40	
	ความยาว > 2.60 m	กว้าง 300 mm ลึก 200 mm			25.2	-25.2		
เยอรมัน	แบบ KS	กว้าง 300 mm ลึก 220 mm	22.5	-22.5	28.0	-30.0		
	แบบ W	กว้าง 300 mm ลึก 220 mm	22.5	-22.5	32.0	-30.0		
สเปน	ทุกรูปแบบ	กว้าง 300 mm ลึก 220 mm	22.5	-22.5	28.0	-30.0		
สหราชอาณาจักร	แบบ R ความยาว ≤ 4.50 m	ลึก 186 mm กว้าง 310 mm			31.0			
	แบบ R ยาว > 4.50 m	ลึก 186 mm กว้าง 310 mm			34.5			
	แบบ D	ลึก 205 mm กว้าง 265 mm			34.5			
	แบบ S	ลึก 160 mm กว้าง 310 mm			27.8			
เนเธอร์แลนด์	ทุกรูปแบบ	ลึก 200 mm กว้าง 300 mm	22.5	-22.5	28.0	-28.0	1.96	1.96
เบลเยียม	ทุกรูปแบบ	ลึก 215 mm กว้าง 300 mm	25.0	-25.0				
สวีเดน	ทุกรูปแบบ							

ภาคผนวก ค.
คำอธิบายเพิ่มเติม

ภาคผนวกนี้แสดงคำอธิบายเพิ่มเติมสำหรับเนื้อหาในมาตรฐานฉบับนี้เพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของมาตรฐาน พร้อมทั้งแสดงแผนผังลำดับขั้นตอนการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติให้กับผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบได้เข้าใจภาพรวมของกระบวนการในการคำนวณค่าต่าง ๆ

ค.1 คำอธิบายเพิ่มเติมสำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในมาตรฐานนี้

เนื่องจากมาตรฐานนี้มีการกำหนดสัญลักษณ์ประกอบตัวห้อย (subscript) จำนวนมากเพื่อสื่อความหมายเฉพาะ ภาคผนวกนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อขยายความหมายของสัญลักษณ์และตัวห้อยให้ชัดเจนขึ้น และสร้างความเข้าใจแก่ผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบ โดยแสดงรายละเอียดของสัญลักษณ์และตัวห้อยต่าง ๆ ไว้ในตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 คำอธิบายเพิ่มเติมสำหรับสัญลักษณ์และตัวห้อย

(ข้อ ค.1)

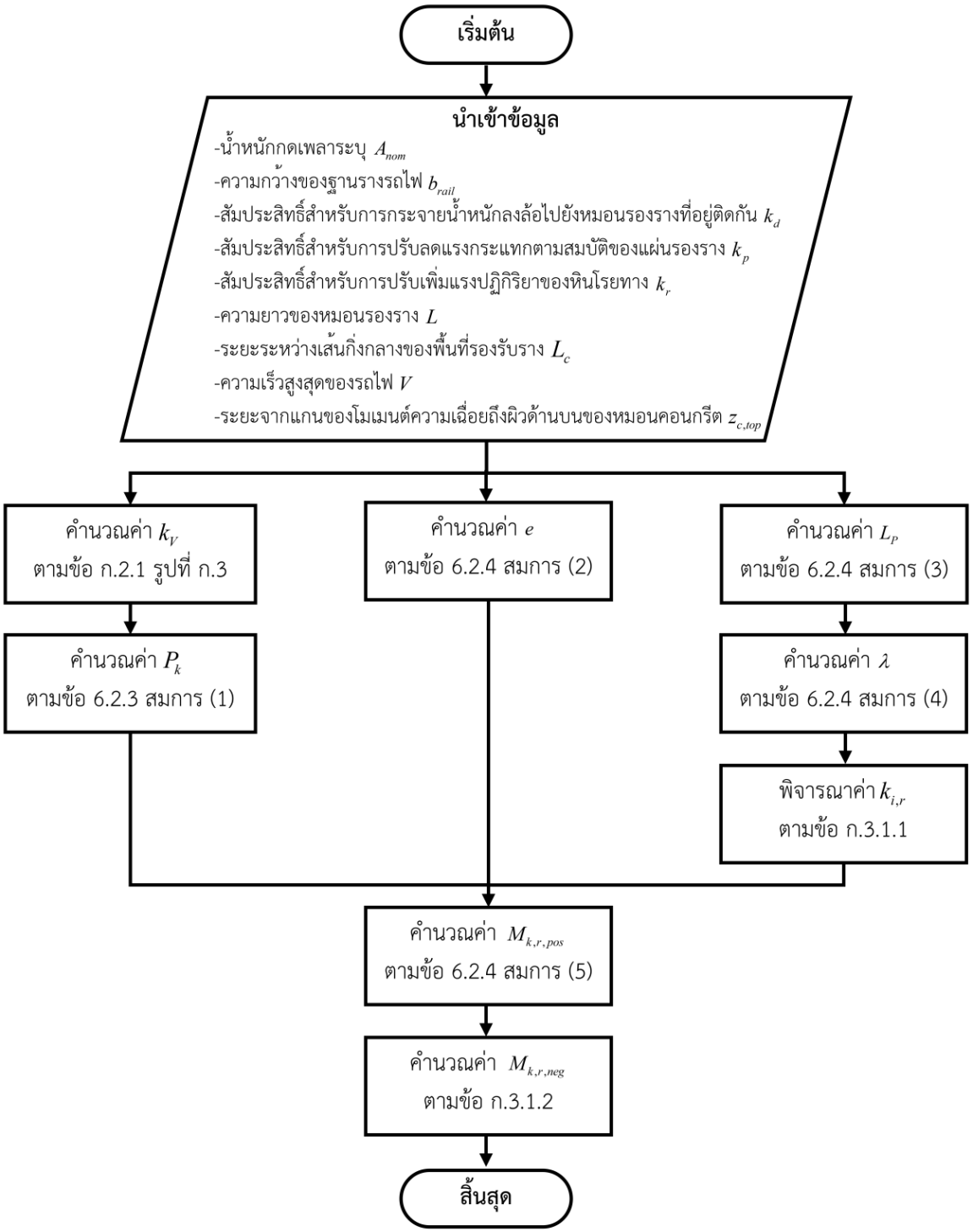
สัญลักษณ์และตัวห้อย	ความหมาย
F	น้ำหนักบรรทุก
Fb	น้ำหนักบรรทุกทดสอบที่กระทำต่อหมอนประแจคอนกรีต
Fc	น้ำหนักบรรทุกทดสอบที่กระทำบริเวณกึ่งกลางของหมอนคอนกรีต
Fr	น้ำหนักบรรทุกทดสอบที่กระทำบริเวณพื้นที่รองรับราง
$()_0$	ค่าอ้างอิงแรกเริ่ม
$()_{0.05}$ หรือ $()_{0.5}$	ขนาดกว้างของรอยร้าวคงค้างในคอนกรีตเท่ากับ 0.05 mm หรือ 0.50 mm
$()_B$	จุดที่ไม่สามารถเพิ่มค่าได้อีก
$()_n$	การทดสอบการรับโมเมนต์ดัดลบ
$()_r$	จุดที่เริ่มเกิดรอยร้าวแรก
$()_u$	น้ำหนักบรรทุกทดสอบต่ำสุด
M	โมเมนต์ดัด
M_k	โมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ
M_t	โมเมนต์ดัดทดสอบ
$()_b$	สำหรับหมอนประแจคอนกรีต

สัญลักษณ์และตัวห้อย	ความหมาย
$()_c$	ที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต
$()_{neg}$	โมเมนต์ดัดลบ
$()_{pos}$	โมเมนต์ดัดบวก
$()_r$	ที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีต

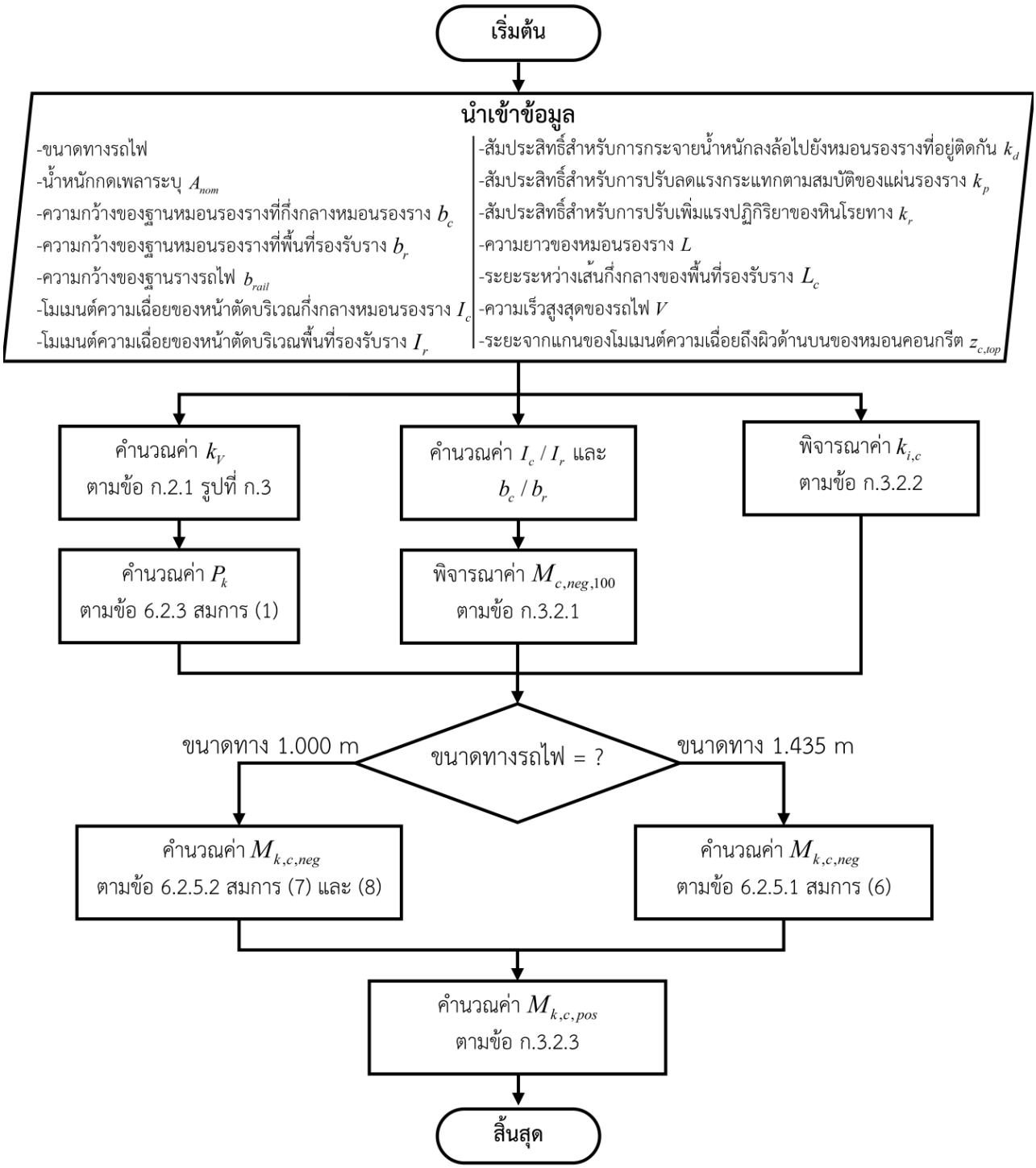
ตัวอย่างเช่น สัญลักษณ์ $M_{k,c,pos}$ ประกอบด้วย M_k ซึ่งหมายถึงโมเมนต์ดัดลักษณะเฉพาะ ตัวห้อย $()_c$ หมายถึงที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต และตัวห้อย $()_{pos}$ หมายถึงโมเมนต์ดัดบวก ดังนั้นสัญลักษณ์ $M_{k,c,pos}$ จึงหมายถึง โมเมนต์ดัดบวกลักษณะเฉพาะที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีต

ค.2 คำอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต

รูปที่ ค.1 ถึงรูปที่ ค.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการคำนวณค่า M_k สำหรับการออกแบบหมอนคอนกรีตและหมอนประแจคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับผู้ออกแบบ และเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในลำดับของการดำเนินงานทางเทคนิค ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานมาตรฐานฉบับนี้สามารถเข้าใจภาพรวมของกระบวนการออกแบบได้อย่างชัดเจนและเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

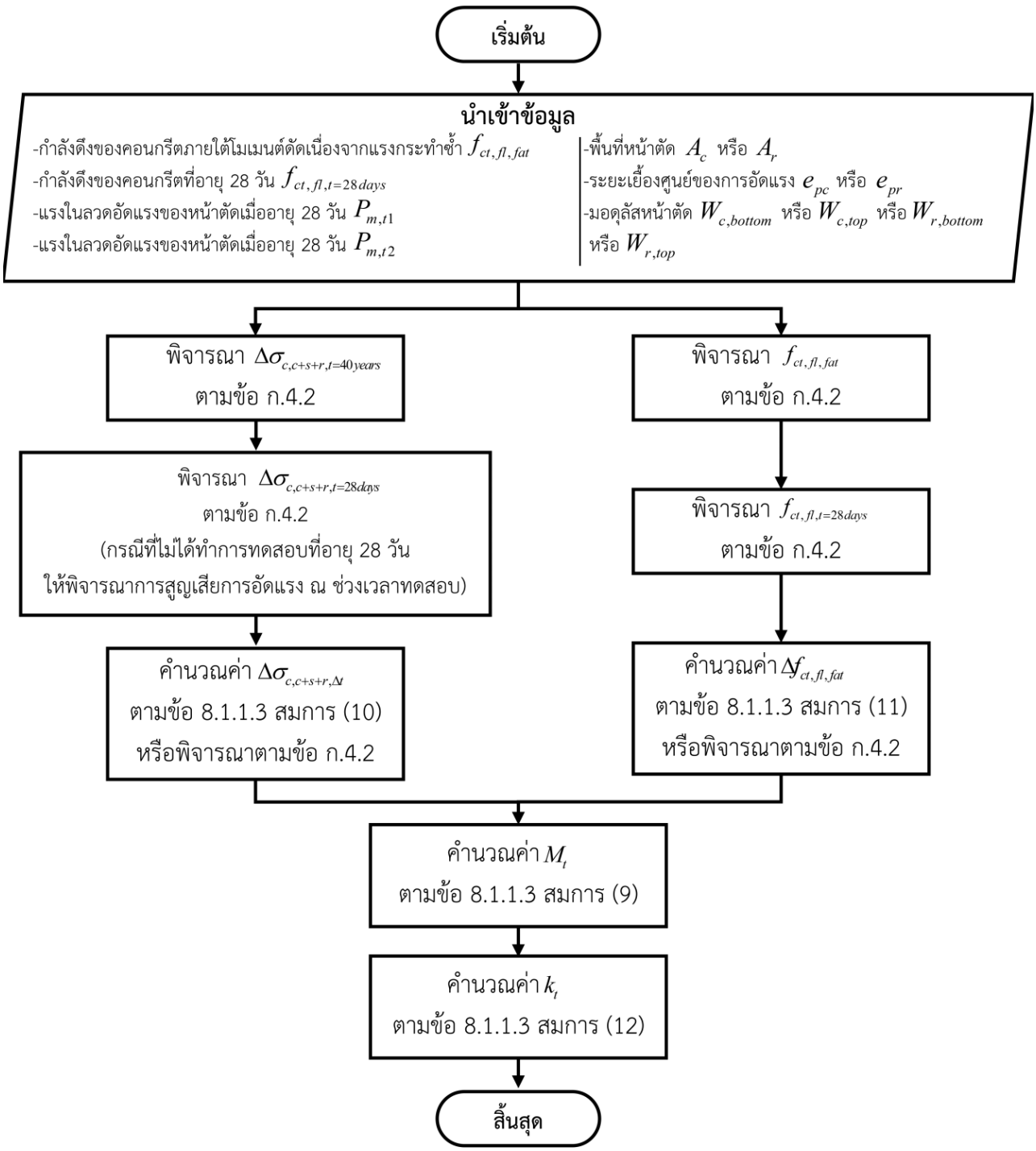


รูปที่ ค.1 แผนผังขั้นตอนการคำนวณค่า M_k ที่พื้นที่รองรับรางของหมอนคอนกรีตโดยวิธีอย่างง่าย (ข้อ ค.2)



รูปที่ ค.2 แผนผังขั้นตอนการคำนวณค่า M_k ที่กึ่งกลางหมอนคอนกรีตโดยวิธีอย่างง่าย

(ข้อ ค.2)



รูปที่ ค.3 แผนผังขั้นตอนการคำนวณค่า k_t

(ข้อ ค.2)

รายนามผู้เชี่ยวชาญ
โครงการพัฒนามาตรฐานชิ้นส่วนระบบรางของประเทศ : หมอนคอนกรีตและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง

รศ. ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโยธา**
รศ. ดร.ศักดิรัตน์ แก้วอุ่นเรือน University of Birmingham	**ผู้เชี่ยวชาญด้านระบบขนส่งทางราง**
รศ. ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง**
ผศ. ดร.ชูชัย สุจิวรกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านคอนกรีตอัดแรง**
รศ. ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิต**
ดร.สมพร เพียรสุขมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านโลหะการ**
ผศ. ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบ**
ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบ**
ผศ. ดร.อภินัติ อัชกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านโครงสร้าง**
ศ. ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคธรณี**
ผศ. ดร.ชาญชัย เตชะวัชราภัยกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านไฟฟ้า**
ผศ. ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม**
ดร.พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้ช่วยผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโยธา**
ดร.นครินทรา สิงหรัตน์ นักวิชาการอิสระ	**ผู้ช่วยผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบ**
นายชนาธิป บินซาอิส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้ช่วยผู้เชี่ยวชาญด้านระบบขนส่งทางราง**
นางสาวอัญชลี รอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	**ผู้ประสานงาน**

กระทรวงคมนาคม
สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)

แบบสอบถามแสดงความคิดเห็น

www.rtrda.or.th info@rtrda.or.th rtrda.thailand @RTRDA_Th
@rtrdathailand rtrda.thailand Rail Technology Research and Development Agency

สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)

www.rtrda.or.th info@rtrda.or.th rtrda.thailand @RTRDA_Th
@rtrdathailand rtrda.thailand Rail Technology Research and Development Agency