

วัสดุธรณีขั้นสูง

เพื่อการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างถนน

Advanced Geomaterials for Road Structural Analysis and Design



พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประวัติและผลงาน

รองศาสตราจารย์ ดร.พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รศ.ดร.พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รศ.ดร.พิรพงศ์ ได้มาเริ่มงานที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 หลังจากไปเป็น อาจารย์สอนอยู่ที่ Curtin University ประเทศออสเตรเลียกว่าสิบปี โดยตำแหน่งสุดท้ายด้านวิชาการก่อนย้ายมาประเทศไทย คือ Senior Lecturer

หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท ด้านวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ รศ.ดร.พิรพงศ์ ได้ไปศึกษาปริญญาเอกด้านวิศวกรรมโยธา ที่ Curtin University ประเทศออสเตรเลีย โดยเนื้อหางานวิจัยหลักที่ได้ทำต่อเนื่องมากกว่า 20 ปี คือ หัวข้อทางด้าน Transportation Geotechnics ซึ่งเกี่ยวข้องกับการนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) มาใช้กับงานโครงสร้างพื้นฐานด้านขนส่ง เช่น ถนน และ ระบบราง ณ ปัจจุบัน รศ.ดร.พิรพงศ์ มีผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในฐานข้อมูล Scopus จำนวนมากกว่า 90 ผลงาน

การศึกษา

พ.ศ. 2539	วศ.บ. (โยธา), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2542	วศ.ม. (วิศวกรรมปฐพี), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2550	Ph.D. (Civil Engineering), Curtin University of Technology, Australia

ประวัติการทำงานที่สำคัญ

พ.ศ. 2559 – ปัจจุบัน	รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
พ.ศ. 2558 – 2559	Adjunct Professor มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
พ.ศ. 2550 – 2559	Senior Lecture, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Perth, Australia

วัสดุขั้นสูง

เพื่อการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างถนน

Advanced Geomaterials for Road Structural Analysis and Design

พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วัสดุธรณีชั้นสูง

เพื่อการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างถนน

Advanced Geomaterials for Road Structural Analysis and Design

บรรณาธิการบริหาร: กรกฎ งานวงศ์พาณิชย์
ISBN (e-Book) : 978-616-398-636-8
ผู้แต่ง: พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม
เจ้าของและผู้จัดพิมพ์: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
สำนักงานบริหารงานวิจัย สำนักงานมหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์: 0 5394 3603-4
โทรสาร: 0 5394 3600
<https://cmupress.cmu.ac.th>
E-mail: cmupress.th@gmail.com

พิมพ์ครั้งแรก : ตุลาคม 2564
ราคา: 277 บาท

ออกแบบและจัดรูปเล่ม: สมสืบ คราฟท์

หนังสือเล่มนี้ผ่านการประเมินเพื่อตรวจสอบและรับรองการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการประเภทหนังสือหรือตำรา ซึ่งจัดพิมพ์โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เรียบร้อยแล้ว

©สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ห้ามลอกเลียนแบบ ทำซ้ำ ดัดแปลง ส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ รวมทั้งการจัดเก็บถ่ายทอดไม่ว่ารูปแบบหรือวิธีการใดๆ ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายภาพ การบันทึกหรือวิธีการอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

คำนิยม

ถนน คือหนทางสู่ความเจริญมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน วิทยาการในการออกแบบและสร้างถนนมีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้น การออกแบบถนนที่ดีนอกจากทำให้การคมนาคมเป็นไปอย่างสะดวกแล้ว ยังสามารถช่วยลดอุบัติเหตุได้อีกด้วย หนังสือเรื่อง “วัสดุธรณีชั้นสูง เพื่อการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างถนน” โดย รองศาสตราจารย์ ดร. พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เล่มนี้ เป็นหนังสือที่อัดแน่นไปด้วยเนื้อหาทางวิชาการ แทบทุกมิติของงานวิศวกรรมในการออกแบบถนน รวมถึงการสร้างถนนในปัจจุบัน สามารถใช้เป็นหนังสือเรียน และเป็นเอกสารอ้างอิงในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี

หนังสือเล่มนี้ได้เขียนขึ้นมาจากประสบการณ์การทำงาน การสอน และการทำวิจัย ของผู้แต่งอย่างแท้จริง ผู้แต่งได้นำเสนอเป็นรูปแบบหนังสือที่อ่านได้ง่าย มีรูปประกอบให้เข้าใจได้ มีการสรุปข้อมูลสำคัญจำนวนมากให้อยู่ในรูปตาราง มีการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญและจำเป็น มีการใช้ภาษาที่ถูกต้อง นอกจากนั้นหนังสือเล่มนี้ยังได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาแล้ว อันเป็นการช่วยยืนยันถึงความถูกต้องทางวิชาการของหนังสือ นับว่าเป็นหนังสือวิชาการที่มีคุณค่าอีกเล่มหนึ่งที่สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่รู้สึกยินดีที่ได้มีโอกาสเป็นผู้ดำเนินการพิมพ์และจัดจำหน่าย

กรกฎ งานวงศ์พาณิชย์

บรรณาธิการบริหารสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

คำนำ

ถนน ถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักของประเทศไทย ซึ่งในขณะนี้โครงข่ายถนนของประเทศไทยมีความยาวกว่า 6 แสนกิโลเมตร และมีมูลค่ารวมกว่า 3 ล้านล้านบาท ในปัจจุบันประเทศไทยต้องจัดสรรงบประมาณสำหรับการซ่อมบำรุงและก่อสร้างถนนต่อปีกว่า 1 แสนล้านบาท ด้วยมิติของความยาวถนนและงบประมาณทำให้ตระหนักถึงความสำคัญของถนนต่อการพัฒนาของประเทศไทยอย่างมากต่อการพัฒนาประเทศ

ทั้งนี้ ถนนเป็นโครงสร้างชนิดหนึ่งของผิวทาง (Pavement) ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ถ้าไม่นับชั้นผิวทาง (Surface) ชั้นโครงสร้างนอกเหนือจากนี้จะเป็น ดิน (Soil) ที่ประกอบด้วย ชั้นหินคลุก ชั้นดินลูกรัง และชั้นดินเดิม ซึ่งหากพิจารณาการวิเคราะห์และออกแบบถนนให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมที่ถูกต้องจะมีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากต้องเกี่ยวข้องกับน้ำหนักจราจร (ที่มีแรงกระทำแบบซ้ำซากและมีการเคลื่อนไหว) และสภาวะภูมิอากาศที่แปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล ทั้งในส่วนของน้ำและอุณหภูมิ แต่จากการดำเนินงานในอดีต ทั้งในส่วนของกาวิเคราะห์ ออกแบบ และก่อสร้างถนน ได้ใช้องค์ความรู้ที่อ้างอิงจากประสบการณ์ในอดีต หรือความรู้เชิงประจักษ์ (Empirical Knowledge) แต่ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และออกแบบถนนนั้น บางส่วนได้อยู่นอกเหนือเงื่อนไขประสบการณ์ในอดีตไปแล้ว เช่น ยานพาหนะที่มีน้ำหนักและความเร็วมากขึ้นกว่าในอดีต สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปกว่าในอดีต เช่น แนวโน้มของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากภาวะโลกร้อน จึงมีแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบถนนแนวทางใหม่ ที่เป็นแนวทางเชิงวิเคราะห์หรือเชิงกลไก (Analytical or Mechanical Approach) ที่มุ่งเน้นการใช้ องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมมาเป็นพื้นฐานในการก้าวข้ามตัวแปรและเงื่อนไขในอดีตได้ หนังสือเล่มนี้ จึงเป็นเสมือนบันไดขั้นแรกในการปูพื้นฐานสำหรับผู้อ่าน ในการก้าวข้ามองค์ความรู้เชิงประจักษ์สู่แนวทางเชิงวิเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบถนน

เพื่อให้บรรลุเจตจำนงของผู้เขียนในการที่จะปูพื้นฐานองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมด้านธรณีเทคนิคที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปสู่การออกแบบถนนยุคใหม่ที่สามารถนำเอาตัวแปรการวิเคราะห์และออกแบบที่มาจากพฤติกรรมวัสดุภายใต้แรงกระทำจากการจราจรและสภาวะแวดล้อม ตามแนวทางการออกแบบเชิงวิเคราะห์ เพื่อให้ครอบคลุมเนื้อหาในภาพกว้าง ผู้เขียนได้ใช้คำว่า “วัสดุธรณี (Geomaterials)” ในการอ้างถึงวัสดุสำหรับก่อสร้างถนน ที่มีความหมายมากไปกว่าดิน โดยจะหมายถึงวัสดุธรรมชาติจากเปลือกโลก ที่รวมเอา ดิน หิน หรือดินและหินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ โดยหนังสือเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 8 บท เนื้อหาโดยรวมจะประกอบด้วย วัสดุและพฤติกรรมของวัสดุภายใต้สภาวะแรงกระทำซ้ำซากและสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับน้ำและอุณหภูมิ ทฤษฎีและแนวทางการออกแบบถนนแบบต่าง ๆ รวมไปถึงวัสดุก่อสร้างถนนแห่งอนาคต ที่อยู่บนพื้นฐานการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development) ที่เป็นแนวทางการพัฒนาที่มุ่งรักษาทรัพยากรและสภาวะแวดล้อมต่อกิจกรรมที่มนุษย์สร้างขึ้น เพื่อก่อให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืน อันเป็นไปตามแนวทางการดำเนินงานตามกรอบของเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals, SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ ในปัจจุบัน

รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตามเจตนารมณ์ของผู้เขียน ซึ่งเริ่มขึ้นมาจากอาจารย์คนแรกที่ทำให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมการทางยุคใหม่ (Modern Pavement Engineering) แก่ผู้เขียนคือ Professor Dr. Hamid Nikraz ที่เป็นทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาในระดับปริญญาเอก เพื่อนร่วมงานและเป็นเสมือนพ่อในหลาย ๆ เหตุการณ์ ในช่วงที่กำลังพัฒนาองค์ความรู้ในด้านนี้อยู่ที่ประเทศออสเตรเลียและแม้กระทั่งในปัจจุบัน ทั้งนี้รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตชัย อนันตเศรษฐ์ อาจารย์คนแรกที่น่าผู้เขียนเข้าสู่โลกของงานวิจัยที่ถูกต้อง ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค อยู่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

หนังสือเล่มนี้จะสำเร็จไปได้ หากปราศจากความร่วมมือและสนับสนุนจาก เพื่อนและผู้ร่วมงานที่เกี่ยวข้องเป็นกัลยาณมิตรทั้งในทางตรงและทางอ้อม รวมไปถึงเหล่านักศึกษาทั้งในอดีตและปัจจุบันที่เปรียบเสมือนกองกำลังในการสร้างงานวิจัยและงานวิชาการด้านนี้อย่างต่อเนื่องมาเกือบ 20 ปี โดยเฉพาะ นางสาวจิตินันต์ พรหมรินทร์ ที่เป็นเบื้องหลังอันสำคัญในการช่วยเรียบเรียงเนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณกำลังใจจากภรรยาและครอบครัว ที่เปรียบเสมือนลมใต้ปีกตลอดเวลา ที่คอยพุงให้ผู้เขียนมีพลังในการเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ จนเสร็จลุล่วงสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

สารบัญ

คำนิยาม	I
คำนำ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญภาพ	XIX
สารบัญตาราง	XXVIII

บทที่ 1	บทนำ	1
---------	------	---

1.1	บทนำสู่การวิเคราะห์ชั้นทาง	2
1.1.1	หน้าที่ของชั้นทาง	2
1.1.1.1	ความหมายของชั้นทาง	2
1.1.1.2	หลักการทำงานของชั้นทาง	3
1.1.2	ความสำคัญของหลักธรณีเทคนิคในงานชั้นทาง	4
1.2	องค์ประกอบและชนิดของชั้นทาง	8
1.2.1	องค์ประกอบโครงสร้างชั้นทาง	8
1.2.1.1	ชั้นดินเดิม	9
1.2.1.2	ชั้นรองพื้นทาง	9
1.2.1.3	ชั้นพื้นทาง	10
1.2.1.4	ชั้นผิวทาง	11
1.2.1.5	ส่วนประกอบพื้นฐานต่าง ๆ ของชั้นทาง	11
1.2.2	ชนิดของชั้นทาง	12
1.2.2.1	ชนิดชั้นทางแบ่งตามประเภทยานพาหนะ	16
1.2.2.2	ชนิดชั้นทางแบ่งตามเงื่อนไขโครงการก่อสร้าง	18
1.2.2.3	ชนิดชั้นทางแบ่งตามวัสดุชั้นผิวทาง	18

สารบัญ

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของชั้นทางกับประเด็นทางธรณีเทคนิค	37
1.3.1 ประเด็นทางธรณีเทคนิคในงานชั้นทาง	37
1.3.2 ความเสียหายของชั้นทาง	41
1.3.2.1 การยุบตัวตามร่องล้อ	41
1.3.2.2 การแตกร้าวจากการล้า	42
1.3.2.3 การแตกร้าวแบบตัดกลับ	43
1.3.2.4 การแตกร้าวจากอุณหภูมิ	43
1.3.2.5 การเกิดหลุมบ่อ	43
1.3.2.6 การอัดทะลักของวัสดุมวลละเอียด	43
1.3.2.7 ความขรุขระของผิวทาง	44
1.3.2.8 การเกิดปรากฏการณ์ดินเหลว	44
1.3.2.9 ความเสียหายอื่น ๆ	44
1.3.3 การวิจัยเกี่ยวกับงานชั้นทาง	47
1.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของชั้นทาง	48
1.4.1 น้ำหนักจราจรและปริมาณจราจร	48
1.4.1.1 น้ำหนักเพลา	49
1.4.1.2 จำนวนน้ำหนักกระทำซ้ำ	50
1.4.1.3 พื้นที่ยางสัมผัสผิวทาง	51
1.4.1.4 ความเร็วยานพาหนะ	51
1.4.2 ความชื้นและอุณหภูมิ	52
1.4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ	53
1.4.2.2 การค้ำแข็งของน้ำ	54
1.4.2.3 ผลกระทบของน้ำ	54

สารบัญ

1.4.3	วัสดุงานชั้นทาง	55
1.4.3.1	มอดูลส์คืบตัว	55
1.4.3.2	วัสดุงานชั้นทาง	56
1.4.3.3	ชั้นดินเดิม	59
1.4.4	วิธีการออกแบบชั้นทาง	60
1.4.4.1	หลักการออกแบบชั้นทาง	60
1.4.4.2	ประเภทการออกแบบชั้นทาง	62
1.5	ข้อสรุปหลักกรณีเทคนิคในงานชั้นทาง	64

บทที่ 2 การวิเคราะห์หน่วยแรงในชั้นทาง 69

2.1	บทนำการวิเคราะห์หน่วยแรงในชั้นทาง	70
2.2	ทฤษฎีการวิเคราะห์ชั้นทางผิวทางยึดหยุ่น	71
2.2.1	บทนำการวิเคราะห์ชั้นทางผิวทางยึดหยุ่น	71
2.2.2	ลักษณะมวลวัสดุเนื้อเดียวกัน	74
2.2.2.1	การคำนวณโดยใช้แผนภูมิ	74
2.2.2.2	การคำนวณโดยใช้วิธีแกนสมมาตร	80
2.2.3	ลักษณะมวลวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น	82
2.2.3.1	วิธีการทำซ้ำ	83
2.2.3.2	วิธีการประมาณ	95
2.2.4	การวิเคราะห์ชั้นทางในระบบวัสดุสองชั้น	95
2.2.4.1	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามแนวตั้ง	87
2.2.4.2	การแอ่นตัวที่พื้นผิวตามแนวตั้ง	90
2.2.4.3	การแอ่นตัวที่ผิวสัมผัสตามแนวตั้ง	91

สารบัญ

2.2.4.4 ความเครียดตึงวิกฤติ	94
2.2.4.5 ผลกระทบจากแรงดันลมยางและน้ำหนักบรรทุก	102
2.2.5 การวิเคราะห์ชั้นทางในระบบวัสดุสามชั้น	104
2.2.5.1 การหาผลลัพธ์โดยใช้ตารางของโจนส์	105
2.2.5.2 การหาผลลัพธ์โดยใช้แผนภูมิของ Peattie	110
2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์ชั้นทางผิวทางชนิดแข็ง	112
2.3.1 ภาพรวมของการออกแบบชั้นทางชนิดแข็ง	112
2.3.1.1 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวแข็ง	113
2.3.1.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์ชั้นทางผิวแข็ง	114
2.3.2 หน่วยแรงเนื่องจากการม้วนตัวและบิดงอ	115
2.3.2.1 การดัดงอของแผ่นพื้นที่มีความยาวเป็นอนันต์	116
2.3.2.2 หน่วยแรงจากการม้วนตัวของแผ่นพื้นขนาดจำกัด	119
2.3.2.3 ความแตกต่างของอุณหภูมิ	122
2.3.2.4 หน่วยแรงผสม	123
2.3.3 หน่วยแรงและการแอ่นตัวเนื่องจากการรับน้ำหนัก	126
2.3.3.1 การหาคำตอบด้วยสมการรูปแบบปิด	126
2.3.3.2 การหาคำตอบด้วยแผนภูมิอิทธิพล	132
2.3.4 หน่วยแรงเนื่องจากแรงเสียดทาน	139
2.3.4.1 ผลกระทบของการเปลี่ยนปริมาตรของคอนกรีต	140
2.3.4.2 หน่วยแรงในเหล็ก	142
2.3.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ชั้นทาง	145

สารบัญ

บทที่ 3 น้ำหนักจรรजरและการวิเคราะห์ปริมาณจรรजर 151

3.1	น้ำหนักจรรजरและปริมาณจรรजर	152
3.1.1	ประเภทของการจรรजरบนทางหลวง	152
3.1.2	การวัดปริมาณน้ำหนักจรรजर	158
3.1.3	ขั้นตอนการประเมินปริมาณจรรजरสำหรับการออกแบบ	161
3.1.3.1	วิธีปริมาณจรรजरคงที่	161
3.1.3.2	วิธีจำนวนยานพาหนะคงที่	161
3.1.3.3	วิธีปริมาณจรรजरและจำนวนยานพาหนะแปรผัน	162
3.2	ตัวประกอบน้ำหนักล้อเดี่ยวเทียบเท่า	162
3.2.1	เกณฑ์หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เท่ากัน	163
3.2.2	เกณฑ์การแอ่นตัวในแนวดิ่งที่เท่ากัน	167
3.2.3	เกณฑ์ความเครียดดิ่งที่เท่ากัน	170
3.2.4	เกณฑ์ภายใต้แรงดันผิวสัมผัสที่เท่ากัน	171
3.2.5	เกณฑ์ภายใต้รัศมีผิวสัมผัสเทียบเท่า	172
3.3	ตัวประกอบน้ำหนักเพลลาเดี่ยวมาตรฐานเทียบเท่า	173
3.3.1	ตัวประกอบน้ำหนักเทียบเท่าของชั้นทางผิวยืดหยุ่น	174
3.3.1.1	ตัวประกอบน้ำหนักเทียบเท่าโดย AASHTO	174
3.3.1.2	การวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี	176
3.3.2	ตัวประกอบน้ำหนักเทียบเท่าของชั้นทางผิวแข็ง	181
3.3.2.1	ตัวประกอบน้ำหนักเทียบเท่าโดย AASHTO	181
3.3.2.2	การวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี	183
3.4	การวิเคราะห์ปริมาณจรรजर	185
3.4.1	ปริมาณจรรजरรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน	186
3.4.2	แฟกเตอร์ปริมาณรถบรรทุก	187
3.4.3	ปัจจัยการเติบโตของปริมาณจรรजर	190
3.4.4	แฟกเตอร์การกระจายปริมาณจรรजरต่อช่องทางจรรजर	193
3.4.5	การพิจารณาในการออกแบบอื่น ๆ	196

สารบัญ

บทที่ 4 อิทธิพลของอุณหภูมิจึงและความชื้น 201

4.1	บทนำ	202
4.1.1	อิทธิพลของอุณหภูมิในชั้นทาง	202
4.1.1.1	การตรวจวัดอุณหภูมิของชั้นทาง	204
4.1.2	พฤติกรรมของชั้นทางในพื้นที่ที่มีการค้ำแข็งของน้ำ	206
4.1.2.1	กลไกการค้ำแข็งของน้ำในชั้นทาง	206
4.1.3	อิทธิพลของปริมาณความชื้นในชั้นทาง	209
4.1.3.1	แหล่งที่มาของความชื้นในชั้นทาง	210
4.1.3.2	การตรวจวัดความชื้นในชั้นทาง	212
4.2	กลไกความไม่อึดตัวของวัสดุชั้นทางเบื้องต้น	217
4.2.1	องค์ประกอบของดินในสถานะไม่อึดตัว	217
4.2.2	แรงตึงผิว	219
4.2.3	แบบจำลองแรงแคปิลลารี	222
4.2.3.1	สมดุลที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและน้ำ	222
4.2.3.2	สมดุลของน้ำในท่อและความสูงของแรงแคปิลลารี	224
4.2.4	แรงดูดของดิน	227
4.2.4.1	การตรวจวัดแรงดูดของดินแบบเมทริก	228
4.2.4.2	เทคนิคการแปลงแกน	229
4.2.4.3	เส้นโค้งลักษณะความชื้นดิน	230
4.3	อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อสมรรถนะของชั้นทางและกำลังรับแรงแบกทาน	231
4.3.1	กลไกการเสื่อมสภาพและการเสียหายของวัสดุชั้นทางที่เกี่ยวข้องกับความชื้น	232

สารบัญ

4.3.2	การแปรผันตามฤดูกาลของโครงสร้างชั้นทางผิวทางบางชนิด ยึดหยุ่น	232
4.3.3	ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อวัสดุชนิดไม่เชื่อมแน่น และดินเดิม	234
4.3.3.1	การสำรวจและการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ	235
4.3.3.2	การสำรวจและการวัดค่าในสนาม	236
4.4	ระบบการระบายน้ำในชั้นทาง	239
4.4.1	การเคลื่อนที่ของน้ำในโครงสร้างชั้นทาง	240
4.4.2	วิธีการควบคุมน้ำในชั้นทาง	241
4.4.2.1	การป้องกันน้ำเข้าสู่ชั้นทาง	241
4.4.2.2	การจัดน้ำออกจากชั้นทาง	243
4.4.2.3	ส่วนของชั้นทางที่แข็งแรงขึ้น	247
4.4.3	วัสดุในการระบายน้ำ	247
4.4.3.1	มวลรวม	247
4.4.3.2	จีโอเท็กซ์ไทล์	247
4.4.3.3	ท่อระบายน้ำ	248
4.5	กรอบแนวคิดการออกแบบชั้นทางใหม่	248
4.5.1	ขั้นตอนการผสมผสานผลกระทบของความผันผวน ของอุณหภูมิในการออกแบบชั้นทาง	248
4.5.2	การใช้งานกรอบแนวคิดใหม่ในการออกแบบชั้นทาง	252

สารบัญ

บทที่ 5 ดินเดิมและวัสดุมวลรวม

261

5.1	บพนำดินเดิมและวัสดุมวลรวม	262
5.2	คุณลักษณะวัสดุชั้นดินเดิม	263
5.2.1	การสำรวจชั้นดินเดิม	263
5.2.1.1	การสำรวจชั้นดินเดิมสำหรับโครงการเส้นทางใหม่	267
5.2.1.2	การสำรวจชั้นดินเดิมสำหรับโครงการรื้อถอนสร้างใหม่	269
5.2.1.3	การสำรวจชั้นดินเดิมสำหรับโครงการซ่อมแซม ปรับปรุงชั้นทาง	270
5.2.1.4	วัตถุประสงค์ของโปรแกรมการสำรวจชั้นดิน	272
5.2.2	พฤติกรรมของดินและวัสดุชนิดเม็ดภายใต้ น้ำหนักกระทำซ้ำ	274
5.2.3	สภาวะการสมดุลหน่วยแรง	274
5.2.4	หน่วยแรงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของจราจร	281
5.3	คุณลักษณะวัสดุมวลรวม	296
5.3.1	มอดูลัสคืนตัว	298
5.3.1.1	รูปคลื่นของน้ำหนักกระทำซ้ำ	299
5.3.1.2	อุปกรณ์	301
5.3.1.3	ขั้นตอนการทดสอบ	303
5.3.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองต่อการคืนตัว	304
5.3.2.1	ผลกระทบของหน่วยแรง	305
5.3.2.2	ผลกระทบจากความหนาแน่น	307
5.3.2.3	ผลกระทบของขนาดกละ, ส่วนมวลละเอียด และมวลกละขนาดใหญ่สุด	308
5.3.2.4	ผลกระทบจากความชื้น	309
5.3.2.5	ผลกระทบจากประวัติหน่วยแรงและจำนวนรอบ การให้น้ำหนักกระทำ	311
5.3.2.6	ผลกระทบของประเภทมวลรวมและรูปร่าง ของอนุภาค	312

สารบัญ

5.3.2.7 ผลกระทบของระยะเวลา, ความถี่ และลำดับการให้น้ำหนักกระทำ	312
5.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองต่อความเครียดถาวร	313
5.3.3.1 ผลกระทบของหน่วยแรง	314
5.3.3.2 ผลของการปรับเปลี่ยนทิศทางหน่วยแรงหลัก	315
5.3.3.3 ผลกระทบของจำนวนรอบของการให้น้ำหนักกระทำ	316
5.3.3.4 ผลกระทบของปริมาณความชื้น	317
5.3.3.5 ผลของประวัติหน่วยแรง	318
5.3.3.6 ผลของความหนาแน่นวัสดุ	319
5.3.3.7 ผลกระทบของขนาดคละ, ส่วนมวลละเอียด และประเภทของมวลรวม	320
5.3.4 แบบจำลองในเชิงคำนวณสำหรับการตอบสนองของวัสดุชนิดเม็ด	321
5.3.4.1 แบบจำลองในเชิงคำนวณสำหรับการตอบสนองแบบคั่นตัว	321
5.3.4.2 แบบจำลองในเชิงคำนวณสำหรับการตอบสนองแบบพลาสติก	330

บทที่ 6 แนวทางการออกแบบชั้นทาง 351

6.1 บทนำสู่การออกแบบชั้นทาง	352
6.2. การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธี AI 1970	353
6.2.1 หลักการในการออกแบบ	353
6.2.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ	354
6.2.2.1 ช่วงอายุการออกแบบ	354
6.2.2.2 ยานพาหนะ น้ำหนักบรรทุก และปริมาณจราจร	355
6.2.2.3 ดินเดิม	355

สารบัญ

6.2.2.4 สภาพแวดล้อม	356
6.2.2.5 วัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างชั้นทาง	356
6.2.3 ผลลัพธ์ของการออกแบบ	356
6.3 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางของถนนก่อสร้างใหม่ด้วยวิธี AASHTO 1993	357
6.3.1 ปรัชญาการออกแบบ	358
6.3.1.1 ปรัชญาการออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางแอสฟัลต์	358
6.3.1.2 ปรัชญาการออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต	361
6.3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบ	362
6.3.2.1 ตัวแปรในการออกแบบ	364
6.3.2.2 เกณฑ์กำหนดด้านสภาพผิวทาง	374
6.3.2.3 คุณสมบัติวัสดุชั้นทาง	376
6.3.2.4 พารามิเตอร์ด้านคุณลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง	380
6.3.2.5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมเหล็กโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต	394
6.4 แนวคิดทางธรณีเทคนิคในการออกแบบชั้นทาง	397
6.4.1 วิศวกรรมธรณีเทคนิคกับงานทาง	399
6.4.2 ประเด็นในการออกแบบวิธีเชิงประจักษ์	401
6.5 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์	403
6.5.1 หลักการในการออกแบบ	404
6.5.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ	406
6.5.2.1 ช่วงอายุการออกแบบ	406
6.5.2.2 ยานพาหนะ น้ำหนักบรรทุก และปริมาณจราจร	406
6.5.2.3 ดินเดิม	406

สารบัญ

6.5.2.4	สภาพแวดล้อม	407
6.5.2.5	วัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างชั้นทาง	407
6.5.3	การออกแบบโครงสร้างชั้นทางสำหรับทางหลวงก่อสร้างใหม่	410
6.5.3.1	ขั้นตอนการออกแบบ	410
6.5.3.2	การเลือกใช้วัสดุโครงสร้างชั้นทางและคุณสมบัติวัสดุ	416
6.5.3.3	การกำหนดความหนาของชั้นโครงสร้างชั้นทาง	416
6.5.4	ผลลัพธ์ของการออกแบบ	416

บทที่ 7 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทาง 419

7.1	บทนำสู่การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทาง	420
7.2	เงื่อนไขพิเศษของดินเดิมในการออกแบบชั้นทาง	421
7.2.1	ประเภทของดินที่เป็นปัญหา	421
7.2.2	ดินที่บีบอัดตัวได้	425
7.2.3	ดินยุบตัวได้	426
7.2.4	ดินบวมตัว	428
7.2.4.1	ข้อบ่งชี้ของดินบวมตัว	428
7.2.4.2	การแก้ไขปัญหาดินบวมตัว	429
7.2.5	น้ำใต้ดิน	430
7.2.5.1	การแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดิน	430
7.2.6	ดินไวตัวต่อการค้างแข็ง	431

สารบัญ

7.3 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นดินเดิม	433
7.3.1 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงเสถียรภาพดิน	433
7.3.2 คุณลักษณะของดินที่ต้องการการปรับปรุงคุณภาพ	438
7.3.3 ชั้นวัสดุเม็ดที่มีความหนา	439
7.3.3.1 วัตถุประสงค์ของชั้นวัสดุเม็ดที่มีความหนา	439
7.3.3.2 คุณลักษณะของชั้นวัสดุเม็ดที่มีความหนา	440
7.3.3.3 การพิจารณาสำหรับการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง	441
7.3.4 จีโอเทกซ์ไทล์และจีโอกริด	442
7.3.5 การปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม	446
7.3.5.1 การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนขาว	448
7.3.5.2 การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยซีเมนต์	454
7.3.5.3 การปรับปรุงด้วยปูนขาว-เถ้าลอย และปูนขาว-ซีเมนต์-เถ้าลอย	456
7.3.5.4 การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยแอสฟัลต์	457
7.3.5.5 การปรับปรุงเสถียรภาพด้วยปูนขาว-ซีเมนต์และปูนขาว-แอสฟัลต์	460
7.3.6 การห่อหุ้มดิน	461
7.3.7 วัสดุถมชนิดมวลเบา	462
7.3.8 วิธีสร้างฐานรากในระดับลึก	464
7.4 การปรับปรุงคุณภาพวัสดุมวลรวม	470
7.4.1 ความสามารถในการสึกกร่อนของวัสดุพื้นทาง	471
7.4.2 วัสดุพื้นทางชนิดเชื่อมแน่น	472
7.4.3 วัสดุพื้นทางชนิดผ่านการปรับแต่งคุณภาพ	472
7.4.4 การเสริมแรงแก่พื้นทาง	472

สารบัญ

บทที่ 8 วัสดุชั้นทางแห้งอนาคตเพื่อความยั่งยืน 485

8.1	บทนำวัสดุชั้นทางอย่างยั่งยืน	486
8.2	จีโอพอลิเมอร์	487
8.2.1	การใช้งานจีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไป	487
8.2.2	สมบัติของจีโอพอลิเมอร์	488
8.2.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์	489
8.2.4	การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน	490
8.2.5	สารตั้งต้นวัสดุพอลิโซลาน	493
8.2.6	สารชะละลาย	495
8.2.7	ปัจจัยที่ส่งผลต่อจีโอพอลิเมอร์	496
8.3	จีโอพอลิเมอร์สำหรับงานชั้นทาง	497
8.3.1	การใช้จีโอพอลิเมอร์สำหรับงานชั้นทาง	498
8.3.2	การปรับปรุงสภาพด้วยซีเมนต์ในงานก่อสร้างถนน	501
8.3.3	ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง	503
8.3.3.1	ผลกระทบของส่วนมวลละเอียดและรูปร่างอนุภาคของวัสดุดิบ	506
8.3.3.2	ผลกระทบของกระบวนการผลิต	507
8.3.3.3	ผลของสารกระตุ้นอัลคาไลน์และระบบการบ่ม	508
8.3.3.4	ผลกระทบของแหล่งความร้อนทางเลือกที่มีต่อการบ่ม	510
8.3.3.5	ผลขององค์ประกอบทางเคมีและปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์	512
8.3.4	แนวคิดการใช้วัสดุที่ใช้จีโอพอลิเมอร์กำลังดำสำหรับ การก่อสร้างถนน	514
8.4	วัสดุหมุนเวียนในงานก่อสร้างชั้นทาง	516
8.4.1	การนำวัสดุขยะกลับมาใช้ใหม่	516
8.4.1.1	การใช้วัสดุเหลือทิ้งสำหรับงานก่อสร้างชั้นทางถนน	517

สารบัญ

8.4.2	วัสดุชั้นทางแอสฟัลต์หินฝุ่นเวียน	518
8.4.2.1	มวลรวมจากยางมะตอยหินฝุ่นเวียนเพื่อใช้งานใหม่	519
8.4.2.2	การใช้มวลรวมวัสดุชั้นทางแอสฟัลต์หินฝุ่นเวียนใน ชั้นพื้นทาง	520
8.4.2.3	วัสดุชั้นทางแอสฟัลต์หินฝุ่นเวียนเป็นมวลรวมใน ส่วนประกอบของคอนกรีต	522
8.4.3	มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต	526
8.4.3.1	คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคของมวลรวมจากการย่อย เศษคอนกรีต	527
8.4.3.2	สมบัติการเชื่อมประสานด้วยตัวเองของมวลรวมจาก การย่อยเศษคอนกรีตในงานถนน	529
รวมมาตรฐานงานทางในประเทศไทย		547
อภิธานศัพท์		563
อักษรย่อที่สำคัญ		593
ดัชนี		597

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1	การลดทอนหน่วยแรงตามความลึกจากการรับน้ำหนักจากรจร	5
ภาพที่ 1.2	คุณภาพวัสดุชั้นทางตามความลึกของระบบชั้นทางที่มีลักษณะการระบายน้ำในอุทมาคติ	6
ภาพที่ 1.3	องค์ประกอบโครงสร้างชั้นทางชนิดผิวแข็ง	7
ภาพที่ 1.4	ส่วนประกอบพื้นฐานของชั้นทางโดยทั่วไป	8
ภาพที่ 1.5	องค์ประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ของระบบชั้นทาง	12
ภาพที่ 1.6	ชั้นทางรองรางรถไฟโดยใช้แอสฟัลต์คอนกรีต	15
ภาพที่ 1.7	ส่วนประกอบพื้นฐานของชั้นทางทั่วไป	19
ภาพที่ 1.8	หน้าตัดทั่วไปของชั้นทางชนิดผิวทางยึดหยุ่นประเภทเต็มความลึก	20
ภาพที่ 1.9	รูปหน้าตัดชั้นทางชนิดผิวยึดหยุ่นโดยทั่วไป	23
ภาพที่ 1.10	รูปหน้าตัดชั้นทางชนิดผิวยึดหยุ่นชนิดใช้แอสฟัลต์เต็มความลึก	25
ภาพที่ 1.11	ภาพตัดขวางทั่วไปสำหรับชั้นทางผิวแข็ง	26
ภาพที่ 1.12	รูปแบบการอัดทะลักของระบบชั้นทางผิวแข็ง	28
ภาพที่ 1.13	การเกิดเลนส์น้ำแข็งจากการค้ำแข็งของน้ำ	29
ภาพที่ 1.14	ประเภทของแผ่นพื้นคอนกรีตประเภทต่างๆ ในชั้นทาง	31
ภาพที่ 1.15	แสดงภาพตัดขวางชั้นทางชนิดผิวผสมสองหน้าตัดที่แตกต่างกันที่มักถูกใช้	35
ภาพที่ 1.16	โครงสร้างชั้นทางชนิดผิวผสมที่แนะนำสำหรับชั้นทางคุณภาพระดับดีเยี่ยม	36
ภาพที่ 1.17	การยุบตัวตามร่องล้อ	45
ภาพที่ 1.18	ตัวอย่างความเสียหายของชั้นทางกับประเด็นทางธรณีเทคนิค	46
ภาพที่ 1.19	รูปแบบของเกียร์และเพลลาของเครื่องบินโบอิง 737 และรถบรรทุกกึ่งพ่วง	49
ภาพที่ 1.20	แนวคิดของการกระจายของหน่วยแรงในรูปแบบตัววีคว่ำ	49
ภาพที่ 1.21	รูปแบบของเกียร์และเพลลาของรถบรรทุกกึ่งพ่วงทั่วไป	50
ภาพที่ 1.22	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน	51
ภาพที่ 1.23	ความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบรับแรงกระทำซ้ำ	56
ภาพที่ 1.24	ภาพตัดขวางของชั้นทางประเภทต่าง ๆ	65

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	คุณลักษณะของวัสดุ	73
ภาพที่ 2.2	องค์ประกอบของหน่วยแรงภายใต้การให้แรงตามแนวแกนสมมาตร	75
ภาพที่ 2.3	หน่วยแรงกดทับตามแนวตั้งเนื่องจากการให้แรงในพื้นที่วงกลม	76
ภาพที่ 2.4	หน่วยแรงตามแนวรัศมีเนื่องจากการให้แรงในพื้นที่วงกลม	77
ภาพที่ 2.5	หน่วยแรงตามแนวผิวสัมผัสเนื่องจากการให้แรงในพื้นที่วงกลม	78
ภาพที่ 2.6	หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการให้แรงในพื้นที่วงกลม	78
ภาพที่ 2.7	การแอ่นตัวตามแนวตั้งเนื่องจากการให้แรงในพื้นที่วงกลม	79
ภาพที่ 2.8	ความแตกต่างระหว่างแผ่นพื้นที่มีลักษณะต่างๆ	82
ภาพที่ 2.9	การแบ่งหน้าตัดครึ่งพื้นที่ออกเป็นระบบวัสดุเจ็ดชั้น	83
ภาพที่ 2.10	ระบบวัสดุหลายชั้นภายใต้การรับแรงในพื้นที่วงกลม	87
ภาพที่ 2.11	การกระจายหน่วยแรงตามแนวตั้งในระบบวัสดุสองชั้น	88
ภาพที่ 2.12	หน่วยแรงในบริเวณผิวสัมผัสตามแนวตั้งในระบบวัสดุสองชั้น	89
ภาพที่ 2.13	การแอ่นตัวตามแนวตั้งที่พื้นผิวสำหรับระบบวัสดุสองชั้น	91
ภาพที่ 2.14	การแอ่นตัวตามแนวตั้งที่ผิวสัมผัสสำหรับระบบวัสดุสองชั้น	92
ภาพที่ 2.15	แฟกเตอร์ความเครียดสำหรับล้อเดี่ยว	96
ภาพที่ 2.16	แฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับล้อคู่	98
ภาพที่ 2.17	แฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับสองล้อคู่ (Dual-Tandem) ที่ระยะห่างคู่ล้อเท่ากับ 24 นิ้ว	100
ภาพที่ 2.18	แฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับสองล้อคู่ (Dual-Tandem) ที่ระยะห่างคู่ล้อเท่ากับ 48 นิ้ว	101
ภาพที่ 2.19	แฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับสองล้อคู่ (Dual-Tandem) ที่ระยะห่างคู่ล้อเท่ากับ 72 นิ้ว	102
ภาพที่ 2.20	ค่าหน่วยแรงในแนวตั้งตามความลึกระดับต่าง ๆ ตามทฤษฎีของ Boussinesq เปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและแรงดันลมยาง	103
ภาพที่ 2.21	ค่าหน่วยแรงในแนวตั้งตามความลึกระดับต่าง ๆ ตามทฤษฎีของ Boussinesq เปรียบเทียบระหว่างจำนวนล้อรถและแรงดันลมยาง	104
ภาพที่ 2.22	หน่วยแรงที่ผิวสัมผัสในระบบวัสดุสามชั้น	105
ภาพที่ 2.23	แผนภูมิในการหาแฟกเตอร์ความเครียดที่ด้านล่างของชั้นที่ 1	110

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.24	โหมตความเสียหายที่ได้รับการพิจารณาในการออกแบบชั้นทางพื้นคอนกรีต (PCC)	114
ภาพที่ 2.25	การบิดงอของแผ่นพื้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ	116
ภาพที่ 2.26	เกรเดียนต์อุณหภูมิบนแผ่นพื้นคอนกรีต	118
ภาพที่ 2.27	แผ่นพื้นขนาดจำกัด (Finite Slab)	120
ภาพที่ 2.28	แพกเตอร์หน่วยแรงปรับแก้สำหรับแผ่นพื้นขนาดจำกัด	121
ภาพที่ 2.29	การม้วนตัวและการบิดงอของแผ่นพื้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นตามลำดับ	125
ภาพที่ 2.30	แผ่นพื้นที่มีการให้แรงที่ตำแหน่งมุม	130
ภาพที่ 2.31	วิธีการแปลงพื้นที่ล้อยู่ในพื้นที่ยังกลม	132
ภาพที่ 2.32	การใช้งานแผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาค่าโมเมนต์	134
ภาพที่ 2.33	แผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาค่าการแอ่นตัวภายใต้การให้แรงภายใน	136
ภาพที่ 2.34	แผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาโมเมนต์ภายใต้การให้แรงภายใน	137
ภาพที่ 2.35	แผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาโมเมนต์ภายใต้การให้แรงที่ขอบ	138
ภาพที่ 2.36	แผนภูมิอิทธิพลสำหรับการหาค่าการแอ่นตัวภายใต้การให้แรงที่ขอบ	139
ภาพที่ 2.37	การวางตัวของรอยต่อและเหล็กยึดในชั้นทางคอนกรีต	140
ภาพที่ 2.38	แรงเสียดทาน	141
ภาพที่ 3.1	ขนาดและลักษณะของรถบรรทุกบางประเภท	154
ภาพที่ 3.2	ขนาดรถบรรทุกโดยทั่วไป	155
ภาพที่ 3.3	การแบ่งประเภทของรถบรรทุก	156
ภาพที่ 3.4	ปิโซเซนเซอร์ที่ใช้กันโดยทั่วไป, การติดตั้งบนชั้นทาง, ระบบเก็บข้อมูลในภาคสนาม, เอาต์พุตซอฟต์แวร์และตัวอย่างของการจำแนกประเภทของกลุ่มยานพาหนะ	160
ภาพที่ 3.5	ตัวอย่างรายงานการจำแนกประเภทยานพาหนะ	160
ภาพที่ 3.6	ค่า ESWL ภายใต้หน่วยแรงแนวตั้งเทียบเท่าในชั้นดินเดิม	165
ภาพที่ 3.7	ตำแหน่งของหน่วยแรงแนวตั้งสูงสุด หรือการแอ่นตัวสูงสุดในชั้นดินเดิม	166

สารบัญภาพ

ภาพที่ 3.8	แผนภูมิสำหรับการหาค่าน้ำหนักล้อเดียวเทียบเท่า	169
ภาพที่ 3.9	สัดส่วนของปริมาณรถบรรทุกในช่องทางจราจรที่ออกแบบของทางหลวงหลายเลน	195
ภาพที่ 4.1	โพรไฟล์ทริมเปิดทางอุณหภูมิจนของชั้นทางและความแปรปรวนในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม 2010 ซึ่งวัดได้จากสนามทดสอบถนนสาย 126 ในภาคใต้ของประเทศสวีเดน	203
ภาพที่ 4.2	ข้อมูลบันทึกการตรวจวัดอุณหภูมิโดยอุปกรณ์ Tjäl2004 ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2010 ถึงเมษายน 2011 จากสถานีตรวจวัดบนถนนหมายเลข 126 ในทางตอนใต้ของสวีเดน	205
ภาพที่ 4.3	กลไกการก่อตัวของเลนส์น้ำแข็งในโครงสร้างชั้นทางที่มีการค้ำแข็ง	208
ภาพที่ 4.4	ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในโครงสร้างชั้นทาง	210
ภาพที่ 4.5	แผนผังแนวคิดของโซนพื้นที่ต่าง ๆ ของปริมาณน้ำในโครงสร้างชั้นทาง	212
ภาพที่ 4.6	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดค่าด้วย TDR ในถนนทดสอบที่เป็นชั้นทางชนิดยึดหยุ่นที่มีผิวทางแบบบาง ในไอซ์แลนด์	214
ภาพที่ 4.7	หัววัดประจุไฟฟ้าและการติดตั้งแท่งตรวจวัดความชื้นในพื้นที่ทดสอบ ในทางตอนใต้ของสวีเดน	215
ภาพที่ 4.8	การวัดความชื้นเชิงปริมาตรที่ความลึกที่ระดับแตกต่างกันตามความลึกโครงสร้างชั้นทาง ตลอดระยะเวลา 1 ปี จากสถานีตรวจวัดบนถนนหมายเลข 126 ในทางตอนใต้ของสวีเดน	215
ภาพที่ 4.9	องค์ประกอบของดินไม่อิ่มตัวที่มีเฟสอากาศอย่างต่อเนื่อง	218
ภาพที่ 4.10	แรงดึงผิวที่ส่วนผิวสัมผัสของอากาศและน้ำ	219
ภาพที่ 4.11	แรงดึงผิวของเมมเบรนรูปโค้ง	221
ภาพที่ 4.12	แรงดูดในท่อแคปิลลารี	223
ภาพที่ 4.13	ท่อแคปิลลารีที่แสดงส่วนผิวสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำ ที่รัศมีความโค้งต่าง ๆ ของโค้งรูปวงเดือน	225
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีโพรงช่องว่าง, แรงดูดของดินแบบเมทริกและความสูงของแคปิลลารี	228

สารบัญภาพ

ภาพที่ 4.15	แรงกระทำบนผนังท่อแคปิลลารี	228
ภาพที่ 4.16	แบบจำลองการทำนายเส้นโค้ง SWCC ของทั้งวัสดุพฤติกรรมแบบพลาสติกและไม่เป็นพลาสติก	230
ภาพที่ 4.17	การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงโดยรวมของชั้นทางในพื้นที่เย็นจัดอย่างมีนัยสำคัญ	234
ภาพที่ 4.18	แบบจำลองมอดูลัสคืนตัวและปริมาณความชื้นที่เสนอไว้ใน MEPGD	237
ภาพที่ 4.19	ภาพตัดขวางโดยทั่วไป	242
ภาพที่ 4.20	ชั้นกรองระบายน้ำและท่อระบายน้ำตามยาวในชั้นทาง	243
ภาพที่ 4.21	ตำแหน่งของชั้นระบายน้ำในโครงสร้างชั้นทาง	245
ภาพที่ 4.22	ท่อระบายน้ำตามยาวสำหรับลระดับน้ำใต้ดิน	246
ภาพที่ 5.1	การสำรวจและการทดสอบทางธรณีเทคนิคสำหรับการออกแบบชั้นทาง	266
ภาพที่ 5.2	ความดันน้ำโพรงมวลดินในชั้นดินเดิม	275
ภาพที่ 5.3	การตรวจวัดความดันน้ำในโพรงดิน โดยวิธี RRL กรณีอยู่ภายใต้พื้นผิวทึบ	276
ภาพที่ 5.4	ประวัติของหน่วยแรงในดินในกรณีดินตัด	278
ภาพที่ 5.5	ผลกระทบของกระบวนการก่อสร้างต่อสภาพของหน่วยแรงในกรณีดิน	279
ภาพที่ 5.6	หลักการหน่วยแรงในดินที่น่าจะเป็นสำหรับการกรณีการก่อสร้างแบบดินถม	280
ภาพที่ 5.7	หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของล้อยานพาหนะเคลื่อนที่	281
ภาพที่ 5.8	อุปกรณ์การทดสอบสามแกนแบบให้แรงwiggleสำหรับดิน	283
ภาพที่ 5.9	การสะสมความเครียดพลาสติกในตัวอย่างดินเหนียวปนซิลต์ที่สร้างขึ้นใหม่ ที่หน่วยแรงประสิทธิผล 100 kPa ที่อัตราการอัดตัวแน่นกว่าปกติ	284
ภาพที่ 5.10	ระบบการทดสอบรับแรงสามแกนแบบให้น้ำหนักกระทำช้าอย่าง	285
ภาพที่ 5.11	หน่วยแรงเบี่ยงเบนเริ่มต้นที่เป็นฟังก์ชันของแรงดูดของดินสำหรับดินเหนียวสามตัวอย่าง	285

สารบัญภาพ

ภาพที่ 5.12	ความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นหลังจากรอบการให้แรงวัฏจักร 1,000 รอบ ต่อหน่วยแรงเบี่ยงเบน ในกรณีตัวอย่างดินเหนียวปนซิลต์ขึ้นรูปด้วยการบดอัด	286
ภาพที่ 5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสคืนตัวและหน่วยแรงเบี่ยงเบนแบบวัฏจักร หลังจากการให้แรงวัฏจักร 105 รอบ ในกรณีดินเหนียวปนซิลต์	288
ภาพที่ 5.14	ค่ามอดูลัสคืนตัวของดินเหนียวปนซิลต์ประกอบขึ้นรูปใหม่ ต่อฟังก์ชันของหน่วยแรง	288
ภาพที่ 5.15	ค่าที่ได้จากการคำนวณมอดูลัสคืนตัวตามความลึก	290
ภาพที่ 5.16	การเปรียบเทียบแบบจำลองและข้อมูลมอดูลัสคืนตัวของดินเหนียวลอนดอน	291
ภาพที่ 5.17	การประมาณการค่ามอดูลัสคืนตัวที่ตรวจวัดได้ กรณีดินเหนียว	291
ภาพที่ 5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสเฉือนและความเครียดเฉือน	292
ภาพที่ 5.19	เส้นแสดงระดับของมอดูลัสคืนตัว สำหรับดินเหนียวปนซิลต์ที่ประกอบขึ้นใหม่ และมีอัตราการอัดตัวแน่นกว่าปกติ	294
ภาพที่ 5.20	การเปรียบเทียบแบบจำลองมอดูลัสคืนตัวของ Loach กับข้อมูลจากแหล่งอื่น ๆ	295
ภาพที่ 5.21	หน่วยแรงข้างใต้จากการหมุนเคลื่อนที่ของล้อ	296
ภาพที่ 5.22	ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุชนิดเม็ดจากการให้รอบน้ำหนักระทำหนึ่งรอบ	297
ภาพที่ 5.23	ความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบรับแรงกระทำซ้ำ	299
ภาพที่ 5.24	จังหวะของหน่วยแรงในรูปของฟังก์ชันฮาเวอร์ไซน์หรือรูปสามเหลี่ยม	300
ภาพที่ 5.25	จังหวะของหน่วยแรงตามแนวตั้งในรูปแบบฟังก์ชันฮาเวอร์ไซน์หรือรูปสามเหลี่ยม	300
ภาพที่ 5.26	ระยะเวลาของจังหวะหน่วยแรงตามแนวตั้งในรูปแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเทียบเท่า	301
ภาพที่ 5.27	ชุดเซลล์เครื่องทดสอบรับแรงสามแกน	302
ภาพที่ 5.28	ตัวอย่างของผลการทดสอบรับแรงสามแกน	306

สารบัญภาพ

ภาพที่ 5.29	ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุชนิดเม็ดจากการให้รอบน้ำหนักกระทำหนึ่งรอบ	313
ภาพที่ 5.30	อิทธิพลของการระบายน้ำต่อการเกิดความเครียดถาวรในวัสดุชนิดเม็ด	318
ภาพที่ 5.31	ผลกระทบจากประวัติของหน่วยแรงที่มีต่อการเสียรูปถาวร	319
ภาพที่ 5.32	อิทธิพลของขนาดผลและการบดอัดที่มีผลต่อความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้น	321
ภาพที่ 5.33	อัตราส่วนความเครียดถาวรแบบเฉือนต่ออัตราส่วนหน่วยแรงสูงสุด	339
ภาพที่ 6.1	ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างชั้นทางตามคู่มือของ AI	354
ภาพที่ 6.2	ตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างชั้นทางชนิดแอสฟัลต์เต็มความลึกและแบบพื้นทางหินคลุกที่มีค่า $TA = 9.5$ นิ้ว	357
ภาพที่ 6.3	ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางแอสฟัลต์ตามคู่มือ AASHTO ปี 1993	360
ภาพที่ 6.4	ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีตตามคู่มือ AASHTO ปี 1993	363
ภาพที่ 6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการให้บริการและจำนวนเพลามาตรฐานสะสม	368
ภาพที่ 6.6	การกระจายตัวสำหรับความน่าจะเป็นของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการให้บริการและจำนวนเพลามาตรฐานสะสม	370
ภาพที่ 6.7	นิยามของความน่าเชื่อถือและการประเมินระดับความน่าเชื่อถือสำหรับการ	372
ภาพที่ 6.8	แนวโน้มของสมรรถนะการใช้งานของผิวทาง	376
ภาพที่ 6.9	กราฟประมาณค่า a_1 ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดเรียงตัวแบบแน่น (Dense-Graded)	382
ภาพที่ 6.10	กราฟประมาณค่า a_2 ของวัสดุชั้นพื้นทางมวลรวมแบบไม่เชื่อมแน่น	383
ภาพที่ 6.11	กราฟประมาณค่า a_3 ของวัสดุชั้นรองพื้นทางมวลรวมแบบไม่เชื่อมแน่น	385
ภาพที่ 6.12	กราฟประมาณค่า a_2 ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยซีเมนต์	386

สารบัญภาพ

ภาพที่ 6.13	กราฟประมาณค่า a_2 ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวัสดุประเภทปิทูเมน	387
ภาพที่ 6.14	กราฟประมาณค่า a_2 ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวัสดุประเภทปิทูเมน	388
ภาพที่ 6.15	ภาพตัดขวางของชั้นทางประเภทต่าง ๆ	398
ภาพที่ 6.16	คำนิยามของฐานรากชั้นทางโดยทั่วไปของถนน	399
ภาพที่ 6.17	ความเครียดตามแนวดิ่งที่วัดได้ในสนามในชั้นดินเดิม	400
ภาพที่ 6.18	ความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางตำแหน่งต่าง ๆ	403
ภาพที่ 6.19	ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์	405
ภาพที่ 6.20	ความเสียหายแบบการแตกร้าวจากการล้า	411
ภาพที่ 6.21	ความเสียหายจากการเกิดร่องยุบ	413
ภาพที่ 7.1	พฤติกรรมของดินยุบตัว	427
ภาพที่ 7.2	ส่วนประกอบของการยกตัวเนื่องจากการค้ำแข็ง	432
ภาพที่ 7.3	ผลของปริมาณปูนขาวต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินประเภท CH	452
ภาพที่ 8.1	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization)	491
ภาพที่ 8.2	กระบวนการควมแน่นของโครงประกอบแอลไบต์ (Albite) Na-poly (โซอะเลต-ไดโซลออกโซ)	492
ภาพที่ 8.3	โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์พวกสายโซ่โพลิโซอะเลต	493
ภาพที่ 8.4	การรีไซเคิลชั้นทางในสนามในประเทศไทย	500
ภาพที่ 8.5	การแตกร้าวแบบบล็อกละและแบบตามขวาง ตามลำดับ เนื่องจากการแห้งหดตัวในชั้นพื้นทาง ที่ปรับปรุงสภาพด้วยซีเมนต์ในประเทศไทย	501
ภาพที่ 8.6	ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตจีโอพอลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิแวดล้อม	504
ภาพที่ 8.7	กระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์วิธีต่าง ๆ	508
ภาพที่ 8.8	ประเภทและความเข้มข้นของสารกระตุ้นประเภทอัลคาไลน์ที่มีผลต่อกำลัง	509

สารบัญภาพ

ภาพที่ 8.9	การพัฒนาความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	511
ภาพที่ 8.10	แนวคิดของจีโอพอลิเมอร์กำลังต่ำสำหรับการก่อสร้างถนน	514
ภาพที่ 8.11	แสดงภาพตัดขวางของชั้นทางประเภทต่าง ๆ โดยทั่วไป	521
ภาพที่ 8.12	โซนรอยต่อที่ผิวสัมผัส (ITZ) SEM	525
ภาพที่ 8.13	มอดูลัสในวัสดุชั้นทางทดสอบที่วัดได้	531

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	อิทธิพลทางธรณีเทคนิคที่มีผลต่อความเสียหายที่สำคัญของชั้นทางชนิดผิวทางแบบยึดหยุ่น (FHWA, 2006)	39
ตารางที่ 1.2	อิทธิพลทางธรณีเทคนิคที่มีผลต่อความเสียหายที่สำคัญของชั้นทางชนิดผิวทางแข็งเกร็ง	40
ตารางที่ 1.3	อิทธิพลทางธรณีเทคนิคที่มีผลต่อความเสียหายที่สำคัญของชั้นทางในการซ่อมแซมผิว	40
ตารางที่ 2.1	แฟกเตอร์ของหน่วยแรงสำหรับระบบวัสดุสามชั้น	108
ตารางที่ 2.2	หน่วยแรงที่ยอมให้ตามชนิดของเหล็กและที่เกรดต่าง ๆ	143
ตารางที่ 2.3	น้ำหนักและขนาดของเหล็กเส้นเสริมกำลัง	144
ตารางที่ 2.4	น้ำหนักและขนาดของตะแกรงลวดเหล็กเชื่อม	144
ตารางที่ 3.1	การจำแนกประเภทยานพาหนะ	157
ตารางที่ 3.2	ตัวประกอบน้ำหนักเพลาทียบเท่า	177
ตารางที่ 3.3	การวิเคราะห์อัตราส่วนความเสียหายสำหรับการแตกร้าวจากการล้าโดยโปรแกรม KENLAYER	180
ตารางที่ 3.4	การวิเคราะห์อัตราส่วนความเสียหายสำหรับการเสียรูปถาวรโดยโปรแกรม KENLAYER	180
ตารางที่ 3.5	ตัวประกอบน้ำหนักเพลาทียบเท่าสำหรับชั้นทางชนิดผิวทางแข็ง $D = 9$ นิ้ว และ $P_t = 2.5$	182
ตารางที่ 3.6	การคำนวณตัวประกอบน้ำหนักเพลาทียบเท่าจากโปรแกรม KENSLABS	184
ตารางที่ 3.7	การกระจายปริมาณรถบรรทุกบนทางหลวงระดับต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา	188
ตารางที่ 3.8	แฟกเตอร์การกระจายปริมาณรถบรรทุกบนทางหลวงระดับต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา	189
ตารางที่ 3.9	การคำนวณแฟกเตอร์ปริมาณรถบรรทุกสำหรับรถบรรทุกขนาดห้าเพลารขึ้นไป	191

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.10	ปัจจัยการเติบโตของปริมาณจราจร	192
ตารางที่ 3.11	ปัจจัยการเติบโตของปริมาณจราจรโดยรวม	193
ตารางที่ 3.12	การกระจายปริมาณรถบรรทุกทุกสำหรับช่องทางจราจรในทางหลวงหลายช่องทาง	194
ตารางที่ 3.13	ร้อยละของปริมาณรถบรรทุกทั้งหมดในช่องทางจราจรออกแบบ	195
ตารางที่ 3.14	แฟกเตอร์การกระจายช่องทางจราจร	196
ตารางที่ 3.15	จำนวนรอบการให้แรงซ้ำสำหรับการเคลื่อนผ่านหนึ่งครั้งของชุดหลายเพลลา	197
ตารางที่ 4.1	ค่าแรงดึงผิวสำหรับผิวน้ำอุ้มตัวที่อุณหภูมิ	220
ตารางที่ 4.2	ความลาดชันตามขวางของชั้นทาง, ไหล่ทาง และคูน้ำ	243
ตารางที่ 5.1	แผนผังกระบวนการในการดำเนินการสำรวจและการทดสอบทางธรณีเทคนิค	267
ตารางที่ 6.1	ช่วงอายุการออกแบบสายทางที่แนะนำ	364
ตารางที่ 6.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Standard Normal Deviate (Z_R) กับระดับความน่าเชื่อถือ	373
ตารางที่ 6.3	ระดับความน่าเชื่อถือที่แนะนำ สำหรับสายทางรูปแบบต่าง ๆ	373
ตารางที่ 6.4	ค่า $PSI_{Terminal}$ และร้อยละการยอมรับได้ของผู้ใช้งานสายทาง	376
ตารางที่ 6.5	สมการประมาณค่ามอดุลัสคืนตัวจากค่า %CBR	377
ตารางที่ 6.6	ค่าสถานะหน่วยแรงโดยประมาณของชั้นพื้นทางแบบไม่เชื่อมแน่น	384
ตารางที่ 6.7	ค่าสถานะหน่วยแรงโดยประมาณของชั้นรองพื้นทางแบบไม่เชื่อมแน่น	385
ตารางที่ 6.8	ค่าทั่วไปของตัวแปร k_1 และ k_2 สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางแบบไม่เชื่อมแน่น ($E = k_1 \cdot \theta^{k_2}$) (หน่วยเป็น psi)	387
ตารางที่ 6.9	สัมประสิทธิ์ของชั้นวัสดุโดยทั่วไป สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ	389
ตารางที่ 6.10	เกณฑ์การพิจารณาประสิทธิภาพการระบายน้ำ	390

สารบัญตาราง

ตารางที่ 6.11	ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการระบายน้ำ (Drainage Coefficient, m_i) ที่แนะนำสำหรับโครงสร้างผิวทางแอสฟัลต์ที่ชั้นพื้นทาง และรองพื้นทางแบบไม่ปรับปรุงคุณภาพ	390
ตารางที่ 6.12	ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการระบายน้ำ (Drainage Coefficient, C_d) ที่แนะนำโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต	391
ตารางที่ 6.13	ค่าการสูญหายของรากฐาน (LS) ที่แนะนำสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ	391
ตารางที่ 6.14	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทแรง (J) แนะนำสำหรับโครงสร้างชั้นทางรูปแบบต่าง ๆ	392
ตารางที่ 6.15	ค่า Friction Factor ที่แนะนำโดย AASHTO	395
ตารางที่ 6.16	ค่าการหดตัวของคอนกรีตโดยประมาณ (เทียบกับ ITS)	396
ตารางที่ 6.17	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของคอนกรีต จากมวลรวมประเภทต่าง ๆ	396
ตารางที่ 6.18	ค่ามอดูลัสที่แนะนำ สำหรับวัสดุคัดเลือกและวัสดุดินเดิม	407
ตารางที่ 6.19	ค่ามอดูลัสสำหรับวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่แนะนำโดย	408
ตารางที่ 6.20	ช่วงของค่ามอดูลัสที่แนะนำ สำหรับวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย	409
ตารางที่ 6.21	ช่วงของค่ามอดูลัสที่แนะนำ สำหรับวัสดุงานทางแบบไม่เชื่อมแน่น (MPa) (ค่าในวงเล็บเป็นค่าที่คาดหวัง)	410
ตารางที่ 6.22	ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองความเสียหาย Subgrade Rutting จากหน่วยงานต่าง ๆ	414
ตารางที่ 7.1	วิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของดินในการก่อสร้างชั้นทาง	434
ตารางที่ 7.2	การใช้จีโอซินเทติกส์ในงานด้านคมนาคม	443
ตารางที่ 7.3	เงื่อนไขของดินเดิมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพโดยใช้จีโอซินเทติกส์	445
ตารางที่ 7.4	คำแนะนำสำหรับการเลือกวิธีการปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม	447
ตารางที่ 7.5	ศักยภาพในการบวมตัวของดิน	448
ตารางที่ 7.6	ตัวอย่างผลกระทบจากการใช้ปูนขาวปรับสภาพในดินประเภทต่าง ๆ	450

สารบัญตาราง

ตารางที่ 7.7	ขนาดมวลรวมคละที่แนะนำสำหรับวัสดุดินเดิมในการปรับปรุงด้วย	459
ตารางที่ 7.8	ขนาดมวลรวมคละที่แนะนำสำหรับวัสดุพื้นทางและรองพื้นทาง ในการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์	459
ตารางที่ 7.9	ความหนาแน่นและต้นทุนโดยประมาณสำหรับวัสดุถมชนิดมวล เบาต่าง ๆ	463
ตารางที่ 7.10	หมวดหมู่ในการปรับปรุงพื้นดิน, ฟังก์ชัน, วิธีการ และการใช้งาน	466
ตารางที่ 7.11	ต้นทุนการปรับปรุงพื้นดินเชิงเปรียบเทียบ (หน่วย SI)	469
ตารางที่ 7.12	ข้อแนะนำคุณสมบัติของแอสฟัลต์สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพ วัสดุพื้นทางและรองพื้นทาง	474
ตารางที่ 7.13	ข้อแนะนำคุณสมบัติของซีเมนต์สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพ วัสดุพื้นทางและรองพื้นทาง	478
ตารางที่ 7.14	ภาพรวมเชิงคุณภาพเกี่ยวกับศักยภาพในการเสริมกำลังสำหรับ ถนนลาดยาง	478
ตารางที่ 8.1	ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลานสำหรับงาน คอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 618	494
ตารางที่ 8.2	การจำแนกวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ในสหรัฐอเมริกา	502
ตารางที่ 8.3	ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มภายใต้ อุณหภูมิโดยรอบ	505
ตารางที่ 8.4	การที่แทนมวลรวม RAP ในส่วนประกอบคอนกรีตและผลของ กำลังวัสดุที่ระยะการบ่ม 28 วัน	523



1

ບຸກຄົນ



บทที่ 1

1.1 บทนำสู่การวิเคราะห์ชั้นทาง

1.1.1 หน้าที่ของชั้นทาง

1.1.1.1 ความหมายของชั้นทาง

ชั้นทาง (Pavement) จัดเป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ที่สำคัญและเป็นส่วนหนึ่งของการดำรงชีวิตประจำวัน ชั้นทางนั้นมีหลายประเภทและอาจถูกจำแนกเป็นถนน, ทางวิ่งและพื้นของสนามบิน และพื้นที่จัดเก็บสินค้าตามท่าเรือ เป็นต้น ชั้นทางยังจัดเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาที่มีความสำคัญทั้งในด้านการใช้ชีวิตประจำวัน การคมนาคมขนส่งสินค้า และการป้องกันประเทศ โดยการคมนาคมขนส่งทางบกจัดเป็นประเภทการคมนาคมที่นิยมกันอย่างแพร่หลายที่สุดในโลก และระยะทางของชั้นทางในส่วนของถนนทั้งหมดในประเทศนั้น ๆ ยังมักถูกนำมาใช้จัดระดับการพัฒนาของประเทศอีกด้วย ดังนั้นการก่อสร้างถนนจึงเป็นอุตสาหกรรมหลักในประเทศที่กำลังพัฒนาในการสร้างเครือข่ายถนนสำหรับการพัฒนาประเทศ และในขณะเดียวกันเมื่อโครงสร้างพื้นฐานถูกสร้างครบสมบูรณ์ในประเทศที่พัฒนาแล้ว การก่อสร้างถนนยังจะเป็นอุตสาหกรรมสำคัญในประเทศที่พัฒนาแล้วเช่นกัน ในการเสริมสร้างและบำรุงเครือข่ายถนนให้มีความสอดคล้องกับการพัฒนาประเทศ

ทั้งนี้เช่นเดียวกับโครงสร้างทางวิศวกรรมประเภทอื่น ๆ ชั้นทางถูกคาดการณ์ให้มีลักษณะที่แข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานตลอดอายุการใช้งาน สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้มีพื้นผิวทางที่ราบเรียบตลอดเส้นทางสำหรับรองรับการจราจรภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ของสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ด้วยการทำเช่นนี้เพื่อให้มั่นใจในประสิทธิภาพการใช้งานของชั้นทางได้ ชั้นทางจะต้องได้รับการออกแบบ, การก่อสร้าง, การบำรุงรักษา และการจัดการอย่างเหมาะสม

ชั้นทางสามารถจำแนกอย่างกว้าง ๆ ได้เป็นชั้นทางชนิดผิวทางยึดหยุ่น (Asphalt Concrete Pavement หรือ Flexible Pavement) และชั้นทางชนิดผิวทางคอนกรีตหรือผิวทางแข็ง (Concrete Pavement หรือ Rigid Pavement) โดยโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีของ ชั้นทางชนิดยึดหยุ่นจะมีความหลากหลายของส่วนประกอบของชั้นทางมากกว่าในชั้นทางชนิดผิวทางคอนกรีต โดยทั่วไปจะมียอดประกอบจากชั้นด้านล่างสุดขึ้นไปตามลำดับ ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นดินเดิม (Subgrade), ชั้นรองพื้นทาง (Subbase), ชั้นพื้นทาง (Base), ชั้นรองผิวทาง (Binder Course) และผิวทาง (Wearing Course)

ชั้นทางเป็นโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา หน้าที่สำคัญของชั้นทางคือการสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะ เช่น รถบรรทุกหรือเครื่องบิน โดยสามารถรองรับให้การจราจรของยานพาหนะเป็นไปได้อย่างปลอดภัยและเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมากที่สุด โดยไม่เกิดการเสียรูปที่มากเกินไป ซึ่งโครงสร้างของชั้นทางในแต่ละชั้นมีหน้าที่และวัตถุประสงค์ในการถ่ายและกระจายน้ำหนักของยานพาหนะสู่ชั้นต่างได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหาย หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักดังกล่าวที่บริเวณชั้นล่างหรือชั้นดินเดิมของชั้นทางจะยังอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้เกิดการพังทลายจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ

1.1.1.2 หลักการทำงานของชั้นทาง

หลักการทำงานของชั้นทางสำหรับชนิดผิวทางยึดหยุ่นคือการกระจายน้ำหนักจราจร โดยมีลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินเดิมในระดับที่จะไม่เกิดการพังทลายและเสียรูปอย่างถาวร แต่ถ้าหากในกรณีดินเดิมไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแม้แต่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในระดับต่ำ ในกรณีนี้จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงดิน และนอกจากนี้ถ้ายังมีความจำเป็นในการปรับปรุงดินในกรณีที่ดินมีความไวต่อความชื้น (Moisture Sensitivity) สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) เช่น ปูนขาวและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นต้น ดังรายละเอียดแสดงในบทที่ 7

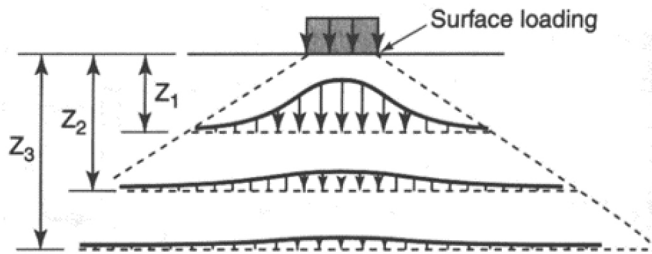
โดยปกติผิวทางต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบชั้นทาง โดยการคำนึงถึงอิทธิพลของน้ำซึ่งอาจมาจากฝนหรือหิมะที่จัดเป็นน้ำผิวดิน และจากความชื้นในดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งน้ำจัดเป็นอิทธิพลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของชั้นทางอย่างมาก (รายละเอียดแสดงในบทที่ 4) ดังนั้น การระบายน้ำที่เพียงพอสำหรับทั้งน้ำที่ผิวทางและน้ำใต้ดินถือเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานในการออกแบบชั้นทางที่เหมาะสม เนื่องจากน้ำที่ค้างบนชั้นผิวทางอาจทำให้เกิดการลื่นไถลและเกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ดังนั้นจึงจะต้องทำให้มั่นใจได้ว่าน้ำบนผิวทางจะถูกเร่งระบายออกไปอย่างรวดเร็วและอย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้องไม่มีการรั่วซึมลงสู่โครงสร้างชั้นทางข้างใต้ทำให้เกิดการกักเก็บความชื้นไว้ในชั้นทาง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของชั้นทางจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นวัสดุของโครงสร้างชั้นทางควรจะมีการออกแบบให้ทนทานต่อการกระทำของน้ำ มิฉะนั้นมวลรวมอาจจะถูกชะล้างออกไปเนื่องจากแรงดันที่เกิดจากการรับน้ำหนักจราจรที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ หรือแรงดันจากการค้ำแข็ง (Frost Action) ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่การที่จะหลีกเลี่ยงการไหลซึมของน้ำในชั้นทางและเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องเลือกวัสดุชั้นทางให้เหมาะสมสำหรับการต้านทานการพังปัดอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้น ซึ่งในบางกรณีอาจจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว

1.1.2 ความสำคัญของหลักกรณีเทคนิคในงานชั้นทาง

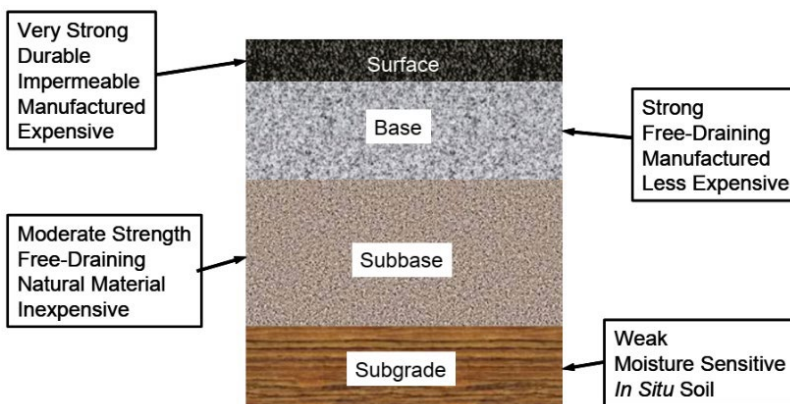
ดังที่กล่าวมาข้างต้น ชั้นทางเป็นโครงสร้างที่ออกแบบมาเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อให้โครงสร้างแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับปริมาณการใช้งาน, คุณภาพการขับขี่จากพื้นผิวทางที่ราบเรียบเพียงพอ และความปลอดภัยจากพื้นผิวที่ทนทานต่อการสึกหรอ นอกจากนี้โครงสร้างต้องมีความทนทานเพียงพอเพื่อไม่ให้ชั้นทางเสียหายทั้งในรูปแบบการเสียรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) หรือแตกร้าว (Cracking) หรือการพังเสียหายก่อนกำหนด (Premature Damage) จากน้ำหนักจราจร และอันเนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม (เช่น ผลกระทบของน้ำ, การเกิดออกซิเดชัน, อุณหภูมิ) (ดังรายละเอียดแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.2)

ชั้นวัสดุไม่เชื่อมแน่น (Unbound Layer) ที่ส่วนมากจะถูกใช้เป็นวัสดุในชั้นพื้นทาง (Base Course) และรองพื้นทาง (Subbase Course) ในโครงสร้างทางนั้นถือว่าเป็นส่วนสำคัญของความสามารถในเชิงโครงสร้างโดยรวมของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผิวทางชนิดยืดหยุ่น (โดยทั่วไปจะมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอิทธิพลของการรับน้ำหนัก) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบชั้นทางโดยน้ำหนักการจราจรจะอยู่ที่ตำแหน่งชั้นบนสุดและลดหลั่นลงมาเรื่อย ๆ ตามระดับความลึก ดังนั้น วัสดุที่มีคุณภาพสูงกว่าโดยทั่วไปที่มีค่าราคาสูงกว่า จะถูกใช้ในส่วนประกอบชั้นบนที่มีหน่วยแรงกระทำสูงกว่าในชั้นอื่นทั้งหมด และในทางกลับกันวัสดุที่คุณภาพต่ำกว่า อาจจะเป็นวัสดุราคาถูกกว่าซึ่งจะถูกนำไปใช้สำหรับชั้นที่สึกลงไป ดังรูปที่ 1.2 โดยการเลือกใช้วัสดุอย่างเหมาะสมนั้นนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างแล้ว ยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการใช้วัสดุที่มีในท้องถิ่นอีกด้วย อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีนี้ยังต้องการการพิจารณามากขึ้นในการออกแบบ แม้สำหรับชั้นที่มีคุณภาพต่ำกว่าเช่นในชั้นดินเดิม ในที่นี้เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการให้บริการชั้นทางตลอดอายุการใช้งาน และประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีในระยะยาวของชั้นในระดับสึกลงไป เนื่องจากชั้นด้านบนสามารถจัดการหรือซ่อมแซมได้ง่ายกว่า โดยหลีกเลี่ยงการสร้างใหม่ทั้งหมดที่มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในชั้นฐานรากของโครงสร้างชั้นทางที่เป็นชั้นดินเดิม



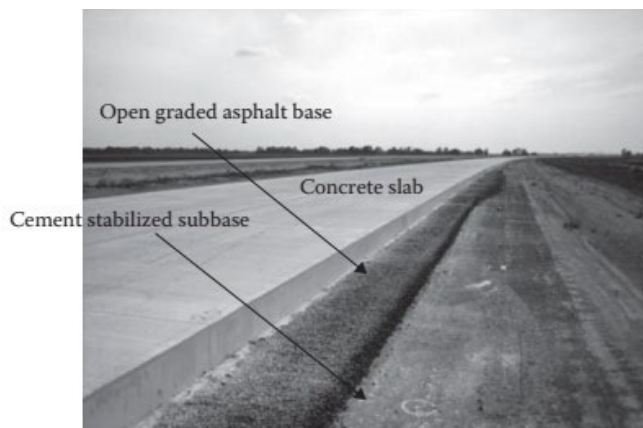
รูปที่ 1.1 การลดทอนหน่วยแรงตามความลึกจากการรับน้ำหนักจราจร (FHWA, 2006)

ชั้นทางชนิดผิวทางยืดหยุ่นหรือผิวทางแอสฟัลต์มีหลักแนวคิดในเชิงประยุกต์โดยทั่วไป โดยถูกจัดเป็นโครงสร้างแบบชั้น ๆ ด้วยมีการใช้วัสดุที่มีคุณภาพที่ดีกว่าในชั้นด้านบน ซึ่งจะสามารถช่วยกระจายน้ำหนักในลักษณะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นล่างสุด (ชั้นดินเดิม) ให้มีขนาดน้อยเพียงพอที่จะไม่ให้เกิดการเสียรูปวิกฤติ (Critical Deformation) ที่ชั้นนี้ โดยชั้นล่างสุดจะเป็นชั้นดินเดิมหรืออาจมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุบางอย่าง เช่น วัสดุเสริมกำลังดิน หรือถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่ม (ซีเมนต์ หรือปูนขาว) โดยที่ชนิดของวัสดุและความหนาของชั้นต่าง ๆ จะต้องสามารถทนต่ออิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นในระดับต่าง ๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลและความแตกต่างของภูมิประเทศ ชั้นรองพื้นทางนอกเหนือจากการทำหน้าที่รองรับน้ำหนักโครงสร้างด้านบนแล้ว ยังอาจใช้เป็นชั้นฐานสำหรับการสร้างชั้นพื้นทางและป้องกันไม่ให้วัสดุมวลละเอียดจากชั้นดินเดิมปนเปื้อนสู่ชั้นพื้นทางได้ และหากชั้นดินเดิมเป็นของวัสดุที่ไวต่อการค้ำแข็งของน้ำ ชั้นรองพื้นทางนั้นอาจถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่ไม่ไวต่อการค้ำแข็ง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นจากการค้ำแข็งได้



รูปที่ 1.2 คุณภาพวัสดุชั้นทางตามความลึกของระบบชั้นทางที่มีลักษณะการระบายน้ำในอุดมคติ (FHWA, 2006)

ชั้นทางชนิดผิวแข็งหรือผิวทางคอนกรีต ซึ่งเกิดการแอ่นตัว (Deflection) ภายใต้การรับน้ำหนักจราจรที่น้อยกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นทางชนิดผิวทางยืดหยุ่น ทำให้มีลักษณะและพฤติกรรมแตกต่างจากชั้นทางชนิดผิวยืดหยุ่นเมื่อมีแรงน้ำหนักจราจรมากระทำ โดยชั้นผิวปกคลุมโครงสร้างซึ่งมีการสัมผัสกับการจราจรเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตที่โดยส่วนใหญ่มีความหนาตั้งแต่ 10-30 เซนติเมตร ทั้งนี้ความหนาจะขึ้นอยู่กับปริมาณจราจร ดังนั้น จึงเป็นเรื่องปกติที่ชั้นผิวทางที่หนาขึ้นจะสามารถรองรับน้ำหนักจราจรที่หนักกว่าและมีปริมาณจราจรที่มากกว่าได้ เนื่องจากแผ่นพื้นคอนกรีตมีความแข็งแรงที่สูงกว่าตามคุณลักษณะของมอดูลัสยืดหยุ่น โดยลักษณะการกระจายแรงมักจะกระจายทั่วทั้งชั้นทางเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ สิ่งนี้จะช่วยลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง โดยที่ชั้นทางผิวคอนกรีตอาจจะมีหรือไม่มีชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางก็ได้ โดยสามารถวางแผ่นพื้นคอนกรีตเหนือชั้นดินเดิมได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 แต่อย่างไรก็ตามชั้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงมักจะต้องประกอบด้วยชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง นอกจากนี้ชั้นทางผิวคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติการให้แรงเสียดทานที่ดี, การระบายน้ำที่เหมาะสม, ความนุ่มนวลในการขับขี่, การควบคุมเสียงรบกวน และการป้องกันการรั่วซึมของน้ำเข้าสู่ชั้นดินข้างใต้



รูปที่ 1.3 องค์ประกอบโครงสร้างชั้นทางชนิดผิวแข็ง (จาก Rajib and Tahar, 2013)

จากความต้องการในการขนส่งสินค้าและบริการที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณการจราจรยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน และต้นทุนของวัสดุและค่าการก่อสร้างยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ วิธีเดียวที่จะสามารถรักษาประสิทธิภาพของชั้นทางเพื่อสอดคล้องกับการบริการและความปลอดภัย คือ การเรียนรู้และประยุกต์ใช้หลักการด้านวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพ, การนำแนวคิดและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่ได้รับการพิสูจน์แล้วมาใช้ และการให้ความสนใจในการทำงานวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อหาวัสดุและวิธีการที่ดีขึ้นในการพัฒนาต่อไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญของหลักกรณีเทคนิคสำหรับชั้นทางได้ดังนี้

1. ระบบการระบายน้ำจัดเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเป็นการระบายน้ำออกจากชั้นทาง
2. วัสดุที่ใช้จะต้องได้รับการประเมินและคัดเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถทนต่อผลกระทบของน้ำหนัการจราจรและสิ่งแวดล้อมได้
3. ส่วนผสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นทางต้องได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถทนต่อผลกระทบของน้ำหนัการจราจรและสิ่งแวดล้อมได้
4. โครงสร้างชั้นทางควรได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้มีความหนาเพียงพอที่จะต้านทานการเสียรูปที่มากเกินไปภายใต้สภาพการจราจรและสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างกัน
5. ชั้นทางจะต้องถูกสร้างอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้คุณภาพการใช้งานที่พึงประสงค์