



รายงานฉบับที่ วพ. 319

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

REPORT NO. RD. 319

BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทย
และพฤติกรรมรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง

โดย

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์

รศ.ดร.ศุภาวุฒิ มาลัยกฤษณะชลิ

รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์

รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล

ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย

ผศ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว

ผศ.ดร.ทนงศักดิ์ อิ่มใจ

นายณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว

นายวิทยา ศรีสมบูรณ์

นายทรงธรรม ประวัติโยธิน

และ

นายนรเทพ พึ่งลัดดา

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทย
และพฤติกรรมรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง

โดย

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์
รศ.ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี
รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ
ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล
ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย
ผศ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว
ผศ.ดร.ทงศ์ศักดิ์ อิ่มใจ
นายณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว
นายวิทยา ศรีสมบูรณ์
นายทรงธรรม ประวัติโยธิน

และ

นายนรเทพ พุ่งลัดดา

รายงานฉบับที่ วพ. 319
สำนักวิจัยและพัฒนาทาง
กรมทางหลวง

กรกฎาคม 2566

ISSN 0125-8044

รายงานนี้เป็นแนวความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

คำนำ

รายงานการศึกษานี้เสนอการตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน กรมทางหลวง โดยการประยุกต์ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม วิเคราะห์ค่าการตอบสนองพฤติกรรมการรับน้ำหนักและอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยที่มีผลต่อโครงสร้างถนน การทำนายสมรรถนะอายุบริการภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย

รายงานการศึกษานี้สามารถนำไปต่อยอดและขยายผลด้านพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน กลไกความเสียหายตามสภาพข้อเท็จจริง อำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยที่มีผลต่อโครงสร้างถนนของประเทศไทยและแบบจำลองสมรรถนะและอายุการให้บริการทางหลวง สำหรับการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะโครงสร้างถนนให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัย สอดคล้องกับสภาพการใช้งานและบริบทของประเทศไทย


(นายสรารัฐ ทรงศิริไธ)

อธิบดีกรมทางหลวง

สารบัญ

หน้า

คำนำ.....	i
สารบัญ	ii
สารบัญรูป.....	vi
สารบัญตาราง	xxxii
1. บทนำ.....	1-1
1.1 ความเป็นมา.....	1-1
1.2 วัตถุประสงค์	1-2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1-2
2. ขอบเขตของการศึกษา.....	2-1
2.1 งานทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	2-1
2.2 งานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด.....	2-1
2.3 งานติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสาย สัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	2-11
2.4 งานติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม.....	2-12
2.5 งานติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring).....	2-13
2.6 งานพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model).....	2-14
3. การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	3-1
3.1 การทบทวนวรรณกรรมการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน.....	3-1
3.2 การประเมินอิทธิพลจากวัสดุพื้นทาง (Base) ต่อความชื้นในชั้นถม (Subgrade).....	3-17
3.3 การสอบเทียบผลการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างทางด้วยแบบจำลอง Finite element โดย Sargand and Abdalla (2006).....	3-21
3.4 พฤติกรรมการตอบสนองของชั้นทางแอสฟัลต์ Asphalt Pavement ณ มลรัฐนิวยอร์ก โดย Sargand, Khoury and Morrison (2012).....	3-27
3.5 อิทธิพลจากอุณหภูมิต่อการตอบสนองของชั้นทางแอสฟัลต์ Asphalt Pavement โดย Xiong, Zhang and Wang (2017)	3-29
3.6 การวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง.....	3-32
3.7 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Material).....	3-35

3.8 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นชั้นๆ (Layered Systems).....	3-37
3.9 การวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยวิธี Finite Element.....	3-41
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรม การตอบสนองของโครงสร้างถนนกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง	3-42
3.11 แนวทางการออกแบบชั้นโครงสร้างถนนลาดยางในปัจจุบัน.....	3-46
3.12 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุก	3-47
3.13 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักกลุ่มเพลตาต่างๆ.....	3-51
3.14 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง	3-52
4. การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด	4-1
4.1 แนวทางการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน.....	4-1
4.2 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบ น้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-3
4.3 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบ น้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-9
4.4 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบ น้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....	4-15
4.5 การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก	4-21
4.6 การจัดทำแบบแปลนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน.....	4-25
4.7 การจัดทำแผนผังงานวางระบบและขั้นตอนการติดตั้ง	4-29
5. การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัดและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม.....	5-1
5.1 การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง	5-1
5.2 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนคอนกรีต อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม	5-9
5.3 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม	5-38
5.4 ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-41
5.5 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	5-42
5.6 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี.....	5-73
5.7 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-78
5.8 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	5-80
5.9 ผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	5-124
5.10 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	5-125

6. ระบบสารสนเทศฐานข้อมูลผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน.....	6-1
6.1 หน้าเข้าสู่ระบบ	6-1
6.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)	6-1
6.3 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content).....	6-7
6.4 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเค้น (Stress).....	6-10
6.5 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) และ ความเครียด (Strain)	6-14
6.6 การส่งออกข้อมูล (Export Data) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)	6-18
6.7 การส่งออกข้อมูล (Export Data) อุณหภูมิ (Temperature) และ ความชื้น (Moisture Content).....	6-19
6.8 รายงานสรุป (Report)	6-19
6.9 แผนที่ (Map)	6-20
6.10 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password).....	6-22
6.11 ระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management)	6-22
7. การทดสอบรถบรรทุกไทยในสภาพควบคุมน้ำหนักลงเพลลา.....	7-1
7.1 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี.....	7-5
7.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักรถบรรทุกทุกแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)...7-28	7-28
7.3 ปัจจัยสภาพแวดล้อม- ความชื้นและอุณหภูมิ	7-35
7.4 สรุป	7-40
8. การวิเคราะห์ค่าการตอบสนองตามทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดและแบบจำลองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	8-1
8.1 กรณศึกษาเบื้องต้น	8-1
8.2 สมมติฐานและคุณสมบัติวัสดุ	8-2
8.3 การเปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้น้ำหนักบรรทุกจริง	8-3
8.4 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์.....	8-12
9. การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกไทย.....	9-1
9.1 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน.....	9-1
9.2 การคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF).....	9-4
9.3 ผลการคำนวณ Load Equivalency Factor (LEF).....	9-6

10. การพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง	10-1
10.1 ลักษณะกราฟความเค้นและความเครียดจากการทดสอบบั้งรถบรรทุกผ่านแปลงตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท	10-1
10.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและตัวแปรต่างๆจากการทดสอบบั้งรถบรรทุกผ่านแปลง ตรวจวัดถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท	10-5
10.3 ความชื้นและอุณหภูมิ	10-21
10.4 ความชื้นและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน	10-29
10.5 ความเร็วและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของถนน	10-31
10.6 แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	10-32
10.7 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม.....	10-44
10.8 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง Simplified Model และ Mechanistic (Analytical) Model.....	10-47
11. บทสรุป.....	11-1
12. ผลผลิต ผลลัพธ์ และผลกระทบของการศึกษา.....	12-1
13. เอกสารอ้างอิง	13-6

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section A).....	2-3
รูปที่ 2.2 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section B).....	2-4
รูปที่ 2.3 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section C).....	2-5
รูปที่ 2.4 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section D).....	2-6
รูปที่ 2.5 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section A)	2-7
รูปที่ 2.6 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section B)	2-8
รูปที่ 2.7 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section C)	2-9
รูปที่ 2.8 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section D).....	2-10
รูปที่ 3.1 แรงดันน้ำในช่องว่างของวัสดุชั้นทาง	3-2
รูปที่ 3.2 หน่วยแรงแนวดิ่งในสนามในชั้น Subgrade	3-3
รูปที่ 3.3 ผลการตรวจวัดความเค้นและความเครียดของวัสดุงานทาง	3-4
รูปที่ 3.4 อิทธิพลจากน้ำ การระบายน้ำและชนิดของวัสดุ ต่อการเสียรูปถาวรของวัสดุงานทาง.....	3-4
รูปที่ 3.5 สภาวะของหน่วยแรงภายใต้ชั้นทาง และการเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	3-5
รูปที่ 3.6 ลักษณะ Resilient vertical strain ตามความลึก สำหรับผิวทาง Asphalt Z	3-6
รูปที่ 3.7 การเสียรูปถาวร (Pernanent deformation) ในชั้นวัสดุสร้างทางแต่ละชั้นที่พัฒนาขึ้นตามเวลา.....	3-6
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างชั้นทาง	3-8
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการติดตั้ง Asphalt Strain Gauge	3-8
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการกลบ Asphalt Strain Gauge.....	3-9
รูปที่ 3.11 รายการอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมกรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนของรัฐโอไฮโอ	3-10
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมกรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนลาดยางของรัฐโอไฮโอ. .	3-11
รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมกรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนคอนกรีตของรัฐโอไฮโอ.	3-12
รูปที่ 3.14 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมกรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนคอนกรีตบนทางหลวง I-490 ของรัฐนิวยอร์ก	3-13

รูปที่ 3.15 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนคอนกรีตบนทางหลวง RT9A ของรัฐนิวยอร์ก.....	3-14
รูปที่ 3.16 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนคอนกรีตเดิมที่บดให้แตกแล้วปูผิวลาดยางปิดทับ บนทางหลวง I-86 ของรัฐนิวยอร์ก.....	3-15
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ของอุปกรณ์หมายเลข DYN4 จากการทดสอบ FWD	3-15
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ของอุปกรณ์หมายเลข DYN3 จากการทดสอบ FWD	3-16
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของรัฐนิวยอร์ก.....	3-16
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสนามบินในรัฐนิวยอร์ก	3-17
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างค่าความชื้นในชั้นวัสดุ Asphalt Treated Base (ATB) ตามความลึกจากการตรวจวัดในช่วง 6 ปี ของรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา	3-19
รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในชั้นวัสดุ Base ชนิดต่างๆ ตามเวลาและความลึก จากการตรวจวัดในช่วง 6 ปี ของรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา	3-20
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัด Strain และแบบจำลอง FE	3-23
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดการแอ่นตัว และแบบจำลอง FE	3-24
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดแรงดันดิน และแบบจำลอง FE	3-24
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง FE	3-25
รูปที่ 3.27 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ deflection และ strain ด้วยแบบจำลอง FE กับผลการตรวจวัด พิจารณาผลจากอุณหภูมิ.....	3-26
รูปที่ 3.28 หน้าตัดแปลงทดสอบชั้นทางแอสฟัลต์ในการศึกษาของ Sargand, Khoury and Morrison (2012) ..	3-27
รูปที่ 3.29 การตอบสนองของค่า Strain ในผิวทางแอสฟัลต์ (ตำแหน่งผิวล่างสุดของชั้นแอสฟัลต์ DYN4) จากน้ำหนักกระทำ 14,000 lb ในการทดสอบ FWD ปีค.ศ. 2006.....	3-28
รูปที่ 3.30 ค่าการแอ่นตัวมากที่สุด (Maximum deflection) จากการทดสอบ FWD ปีค.ศ. 2011.....	3-29
รูปที่ 3.31 แบบจำลองในการศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์โดย Xiong และคณะ 2017 ..	3-30
รูปที่ 3.32 การตอบสนองค่า Strain ซึ่งได้จากแบบจำลอง FEM ที่ความลึก 50 มม. ภายใต้สภาวะอากาศแบบต่างๆ.....	3-31
รูปที่ 3.33 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material..	3-32

รูปที่ 3.34 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material.....	3-34
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)....	3-36
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954).....	3-36
รูปที่ 3.37 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นแนวสัมผัสวงกลมที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)	3-36
รูปที่ 3.38 กราฟแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)....	3-37
รูปที่ 3.39 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบชั้นทาง 3 ชั้น.....	3-37
รูปที่ 3.40 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดยวิธี Finite element.....	3-41
รูปที่ 3.41 ผลการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดของโครงสร้างทางโดยวิธี Finite element โดยโปรแกรม SIGMA/W.....	3-42
รูปที่ 3.42 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade ต่อการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล .	3-43
รูปที่ 3.43 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง.....	3-43
รูปที่ 3.44 ตัวอย่างโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model).....	3-44
รูปที่ 3.45 ประเภทของโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model).....	3-44
รูปที่ 3.46 รายการข้อมูลสำหรับใช้ในการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model).....	3-45
รูปที่ 3.47 ตัวอย่างการปรับแก้โมเดล (Model Updating) เมื่อมีข้อมูลเพิ่มขึ้น	3-45
รูปที่ 3.48 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาชั้นโครงสร้างลาดยางด้วยวิธี Analytical Method	3-46
รูปที่ 3.49 ผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ยอมให้.....	3-48
รูปที่ 3.50 ตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสม	3-49
รูปที่ 3.51 การเปรียบเทียบค่า Rutting จากข้อมูลที่ตรวจวัดจริงในสนามกับแบบจำลองการคาดการณ์ ประสิทธิภาพทางหลวง	3-49
รูปที่ 3.52 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆบนถนนสาย DK46 ประเทศโปแลนด์ สำหรับ a) flexible pavements และ b) semi-rigid pavements.....	3-51
รูปที่ 3.53 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่วิเคราะห์ได้กับค่าของ AASHTO	3-52
รูปที่ 3.54 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง	3-53
รูปที่ 3.55 ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของถนน.....	3-53
รูปที่ 4.1 ภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัด.....	4-3
รูปที่ 4.2 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-4

รูปที่ 4.3 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-4
รูปที่ 4.4 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-5
รูปที่ 4.5 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM นครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-5
รูปที่ 4.6 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนคอนกรีต.....	4-7
รูปที่ 4.7 ข้อมูลรายละเอียดทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคม 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน).....	4-8
รูปที่ 4.8 ข้อมูลผิวทางของทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคม 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน)	4-8
รูปที่ 4.9 ข้อมูลโครงสร้างทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคม 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน).....	4-9
รูปที่ 4.10 แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง สถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-10
รูปที่ 4.11 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-10
รูปที่ 4.12 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-11
รูปที่ 4.13 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางหลังบริเวณเครื่องชั่ง WIM โพธาราม (ขาเข้า).....	4-11
รูปที่ 4.14 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง	4-13
รูปที่ 4.15 ข้อมูลรายละเอียดทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควมคม 0302 (คลองอีจาง - หลุมดิน)...4-14	
รูปที่ 4.16 ข้อมูลผิวทางของทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควมคม 0302 (คลองอีจาง - หลุมดิน).....	4-14
รูปที่ 4.17 ข้อมูลโครงสร้างทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควมคม 0302 (คลองอีจาง - หลุมดิน)	4-15
รูปที่ 4.18 ข้อมูลรายละเอียดตอนควมคมสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)	4-16
รูปที่ 4.19 ข้อมูลผิวทางสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....	4-17
รูปที่ 4.20 ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)	4-17
รูปที่ 4.21 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....	4-18
รูปที่ 4.22 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....	4-18
รูปที่ 4.23 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)	4-19
รูปที่ 4.24 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM สรรพยา (ขาเข้า)	4-19
รูปที่ 4.25 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง	4-20
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560).....	4-22
รูปที่ 4.27 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560).....	4-22

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560)	4-23
รูปที่ 4.29 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560).....	4-23
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)	4-24
รูปที่ 4.31 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)	4-24
รูปที่ 4.32 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-26
รูปที่ 4.33 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-27
รูปที่ 4.34 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า).....	4-28
รูปที่ 4.35 สัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน	4-29
รูปที่ 4.36 แบบแปลนของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า).....	4-30
รูปที่ 4.37 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-31
รูปที่ 4.38 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-32
รูปที่ 4.39 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-33
รูปที่ 4.40 รูปตัด D ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-34
รูปที่ 4.41 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น RC Surface บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-35
รูปที่ 4.42 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น Subgrade บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)	4-36
รูปที่ 4.43 แบบแปลนของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-37
รูปที่ 4.44 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-38
รูปที่ 4.45 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-39
รูปที่ 4.46 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)	4-40

รูปที่ 4.47 รูปตัด D ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)...	4-41
รูปที่ 4.48 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น AC Surface บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-42
รูปที่ 4.49 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Middle Base บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-43
รูปที่ 4.50 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Base บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-44
รูปที่ 4.51 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Subgrade บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า).....	4-45
รูปที่ 4.52 แบบแปลนภาพรวมการติดตั้งแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-46
รูปที่ 4.53 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-47
รูปที่ 4.54 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-48
รูปที่ 4.55 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-49
รูปที่ 4.56 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระหว่างกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า).....	4-50
รูปที่ 4.57 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้นผิวทาง AC บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-51
รูปที่ 4.58 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับกึ่งกลางชั้น Base บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า).....	4-52
รูปที่ 4.59 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้น Base บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า)	4-53
รูปที่ 4.60 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Subgrade บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักระบาย (ขาเข้า).....	4-54
รูปที่ 4.61 แบบขยายอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม.....	4-55
รูปที่ 4.62 แผนผังงานวางระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า	4-56
รูปที่ 5.1 วางแผนการบริหารจราจรร่วมกับ สก.นครชัยศรี	5-10
รูปที่ 5.2 การจราจรติดขัดในช่วงโมงเร่งด่วน	5-10

รูปที่ 5.3 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด).....	5-11
รูปที่ 5.4 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด) สำหรับ แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-11
รูปที่ 5.5 การปิดการจราจร 2 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-12
รูปที่ 5.6 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน.....	5-12
รูปที่ 5.7 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-12
รูปที่ 5.8 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งแบบถาวร)	5-13
รูปที่ 5.9 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต...	5-14
รูปที่ 5.10 งานเจาะสกัดรื้อผิวทางคอนกรีต บริเวณช่องจราจรที่ 1	5-14
รูปที่ 5.11 งานเจาะสกัดรื้อผิวทางคอนกรีต บริเวณช่องจราจรที่ 2	5-15
รูปที่ 5.12 งานขุดย้ายผิวทางคอนกรีตออกไปทิ้ง	5-15
รูปที่ 5.13 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (1).....	5-15
รูปที่ 5.14 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (2).....	5-16
รูปที่ 5.15 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (3).....	5-16
รูปที่ 5.16 งานปรับระดับชั้น Subgrade เดิม	5-17
รูปที่ 5.17 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade เดิม	5-17
รูปที่ 5.18 งานบดอัดชั้น Subgrade เดิม.....	5-17
รูปที่ 5.19 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Density Test) ในชั้น Subgrade ...	5-18
รูปที่ 5.20 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gauge ในชั้น Subgrade.....	5-18
รูปที่ 5.21 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น subgrade	5-19
รูปที่ 5.22 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade	5-20
รูปที่ 5.23 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade	5-21
รูปที่ 5.24 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade	5-22
รูปที่ 5.25 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade.....	5-23
รูปที่ 5.26 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade.....	5-24
รูปที่ 5.27 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade.....	5-24
รูปที่ 5.28 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE	5-24

รูปที่ 5.29 งานเดินสายสัญญาณจากท่อ PE เข้าสู่ท่อหลัก (Main Pipe) และตู้ควบคุม (Control Panel)	5-25
รูปที่ 5.30 การฝังกลบชั้น Subbase ด้วยวัสดุ Sand Cushion สำหรับรองพื้นถนนคอนกรีต	5-25
รูปที่ 5.31 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น RC Surface	5-26
รูปที่ 5.32 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น RC Surface	5-27
รูปที่ 5.33 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น RC Surface	5-28
รูปที่ 5.34 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น RC Surface	5-29
รูปที่ 5.35 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น RC Surface	5-30
รูปที่ 5.36 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น RC Surface	5-31
รูปที่ 5.37 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น RC Surface	5-31
รูปที่ 5.38 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น RC Surface ลงท่อ PE	5-31
รูปที่ 5.39 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ขนาด 25 มม.	5-32
รูปที่ 5.40 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ด้านละ 25 ซม.	5-32
รูปที่ 5.41 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ระยะห่างที่ 30 ซม.	5-32
รูปที่ 5.42 การหุ้มปลายข้างหนึ่งของเหล็กเดือย (Dowel Bar) ด้วยแผ่นพลาสติก	5-33
รูปที่ 5.43 ติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bar) ขนาด 16 มม. ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ด้านละ 25 ซม.	5-33
รูปที่ 5.44 ติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ระยะห่างที่ 60 ซม.	5-33
รูปที่ 5.45 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด	5-34
รูปที่ 5.46 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต	5-34
รูปที่ 5.47 เทคอนกรีตกำลังอัดสูง (High Strength Concrete) สำหรับผิวทางคอนกรีต	5-34
รูปที่ 5.48 การใช้เครื่องสั่นคอนกรีต (Concrete Vibrator) เพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตแน่น	5-35
รูปที่ 5.49 การติดตั้งเหล็กเสริมกันแตก (Wire Mesh)	5-35
รูปที่ 5.50 เทปาดระดับผิวคอนกรีตให้เสมอรระดับผิวถนนคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ	5-35
รูปที่ 5.51 ทาน้ำยาบ่มคอนกรีตบนผิวคอนกรีต	5-35
รูปที่ 5.52 ปิดทับผิวคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อบ่มคอนกรีตจนได้กำลังรับแรงอัด	5-36
รูปที่ 5.53 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-36
รูปที่ 5.54 ติดตั้งท่อ PVC ในหลุมเจาะ จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-36
รูปที่ 5.55 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-37

รูปที่ 5.56 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-37
รูปที่ 5.57 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger แปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-38
รูปที่ 5.58 ตู้ควบคุมแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-38
รูปที่ 5.59 ระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-39
รูปที่ 5.60 ระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-39
รูปที่ 5.61 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-39
รูปที่ 5.62 อุปกรณ์ UPS แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	5-40
รูปที่ 5.63 การติดตั้งกล่องวงจรปิด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-40
รูปที่ 5.64 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-41
รูปที่ 5.65 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงราชบุรี หมวดทางหลวงโพธาราม และตำรวจทางหลวง	5-43
รูปที่ 5.66 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-44
รูปที่ 5.67 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-44
รูปที่ 5.68 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน	5-45
รูปที่ 5.69 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-45
รูปที่ 5.70 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง..	5-46
รูปที่ 5.71 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1.....	5-47
รูปที่ 5.72 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade	5-47
รูปที่ 5.73 งานบดอัดชั้น Subgrade.....	5-48
รูปที่ 5.74 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade.....	5-48
รูปที่ 5.75 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade ...	5-49
รูปที่ 5.76 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gauge ในชั้น Subgrade.....	5-49
รูปที่ 5.77 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subgrade.....	5-51
รูปที่ 5.78 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade	5-52
รูปที่ 5.79 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade.....	5-53
รูปที่ 5.80 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade	5-54
รูปที่ 5.81 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE	5-55
รูปที่ 5.82 การฝังกลบชั้น Subbase, Selected Material และ Subbase.....	5-56

รูปที่ 5.83 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Base	5-57
รูปที่ 5.84 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Base.....	5-58
รูปที่ 5.85 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Base.....	5-59
รูปที่ 5.86 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Base ลงท่อ PE	5-60
รูปที่ 5.87 การฝังกลบชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase	5-61
รูปที่ 5.88 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Middlebase.....	5-62
รูปที่ 5.89 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Middlebase	5-63
รูปที่ 5.90 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Middlebase ลงท่อ PE.....	5-64
รูปที่ 5.91 การฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface.....	5-65
รูปที่ 5.92 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น AC Surface	5-66
รูปที่ 5.93 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น AC Surface	5-67
รูปที่ 5.94 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น AC Surface ลงท่อ PE	5-68
รูปที่ 5.95 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น AC Surface ลงท่อ PE.....	5-68
รูปที่ 5.96 ชั้น Prime Coat.....	5-69
รูปที่ 5.97 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course.....	5-69
รูปที่ 5.98 ชั้น Tack Coat.....	5-70
รูปที่ 5.99 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course.....	5-70
รูปที่ 5.100 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-71
รูปที่ 5.101 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะจำนวน 2 จุดแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-71
รูปที่ 5.102 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-72
รูปที่ 5.103 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง	5-73
รูปที่ 5.104 ตู้ควบคุมและบ่อพักสายสัญญาณแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-74
รูปที่ 5.105 ระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-75
รูปที่ 5.106 ระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-76

รูปที่ 5.107 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-76
รูปที่ 5.108 อุปกรณ์ UPS แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-77
รูปที่ 5.109 การติดตั้งกล่องวงจรปิดแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-77
รูปที่ 5.110 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-78
รูปที่ 5.111 กล่องวงจรปิด (CCTV) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-79
รูปที่ 5.112 หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-79
รูปที่ 5.113 ฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-80
รูปที่ 5.114 ประชุมร่วมกับแนวทางหลวงชัณนาท.....	5-81
รูปที่ 5.115 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้ง	5-82
รูปที่ 5.116 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-82
รูปที่ 5.117 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-83
รูปที่ 5.118 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน	5-83
รูปที่ 5.119 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-84
รูปที่ 5.120 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร	5-85
รูปที่ 5.121 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-85
รูปที่ 5.122 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1.....	5-86
รูปที่ 5.123 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade.....	5-86
รูปที่ 5.124 งานบดอัดชั้น Subgrade.....	5-87
รูปที่ 5.125 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade	5-87
รูปที่ 5.126 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Density Test) ในชั้น Subgrade.....	5-88
รูปที่ 5.127 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade.....	5-88
รูปที่ 5.128 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade.....	5-89
รูปที่ 5.129 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับชั้น Subgrade.....	5-90
รูปที่ 5.130 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับชั้น Subgrade.....	5-91
รูปที่ 5.131 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับชั้น Subgrade	5-92
รูปที่ 5.132 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 22 ตัว ในระดับชั้น Subgrade ลงท่อ PE.....	5-93

รูปที่ 5.133 การฝังกลบและบดอัดชั้น Subbase จนถึงระดับใต้ชั้น Base.....	5-94
รูปที่ 5.134 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้น Base	5-95
รูปที่ 5.135 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับใต้ชั้น Base	5-96
รูปที่ 5.136 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับใต้ชั้น Base	5-97
รูปที่ 5.137 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับใต้ชั้น Base ลงท่อ PE.....	5-98
รูปที่ 5.138 การฝังกลบและบดอัดชั้น Base จนถึงระดับกึ่งกลางชั้น Base	5-99
รูปที่ 5.139 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้น Base.....	5-100
รูปที่ 5.140 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base.....	5-101
รูปที่ 5.141 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base.....	5-101
รูปที่ 5.142 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในระดับกึ่งกลางชั้น Base	5-102
รูปที่ 5.143 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในระดับกึ่งกลางชั้น Base ลงท่อ PE.....	5-103
รูปที่ 5.144 การฝังกลบและบดอัดจากระดับกึ่งกลางชั้น Base จนถึงระดับใต้ชั้นผิวทาง AC	5-104
รูปที่ 5.145 ชั้น Prime Coat	5-104
รูปที่ 5.146 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC	5-106
รูปที่ 5.147 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC.....	5-107
รูปที่ 5.148 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับใต้ชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE	5-108
รูปที่ 5.149 ชั้น Asphalt Concrete Bound Base	5-109
รูปที่ 5.150 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC	5-110
รูปที่ 5.151 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC	5-111
รูปที่ 5.152 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC ..	5-111
รูปที่ 5.153 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC ลงท่อ PE.....	5-112
รูปที่ 5.154 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course	5-113
รูปที่ 5.155 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course.....	5-113
รูปที่ 5.156 แนวเส้นบนผิวทาง AC เพื่อระบุตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ	5-114

รูปที่ 5.157 ชุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 1 จุด	5-115
รูปที่ 5.158 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะและติดตั้งเสาเหล็กกั้นบริเวณ จำนวน 1 จุด	5-115
รูปที่ 5.159 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger).....	5-116
รูปที่ 5.160 ตัวอย่างไฟล์ข้อมูลจาก Data Logger.....	5-117
รูปที่ 5.161 การทดสอบเครื่องมือตรวจวัดฯ ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	5-118
รูปที่ 5.162 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well)	5-118
รูปที่ 5.163 การทดสอบความเร็วในการอ่านและบันทึก 100 Hz ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger).....	5-119
รูปที่ 5.164 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ชั้น Subgrade	5-120
รูปที่ 5.165 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับใต้ชั้น Base.....	5-120
รูปที่ 5.166 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ระดับกึ่งกลางชั้น Base ...	5-121
รูปที่ 5.167 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ชั้น Subgrade	5-121
รูปที่ 5.168 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับใต้ชั้น Base	5-122
รูปที่ 5.169 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้น Base	5-122
รูปที่ 5.170 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับ ผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับใต้ชั้นผิวทาง AC	5-123
รูปที่ 5.171 ข้อมูล 100 Hz จากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับ ผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ระดับกึ่งกลางชั้นผิวทาง AC.....	5-123
รูปที่ 5.172 ติดตั้งรั้วตาข่ายพร้อมโครงหลังคาเมทัลชีทและตู้ควบคุม.....	5-125
รูปที่ 5.173 บ่อพักสายสัญญาณ	5-126
รูปที่ 5.174 ภาพรวมในตู้ควบคุม.....	5-127
รูปที่ 5.175 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)	5-128
รูปที่ 5.176 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV).....	5-129
รูปที่ 5.177 ภาพบันทึกจากกล้องวงจรปิด (CCTV)	5-129
รูปที่ 5.178 การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	5-130

รูปที่ 5.179 การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการ	5-131
รูปที่ 5.180 อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC).....	5-131
รูปที่ 5.181 อุปกรณ์ UPS สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง.....	5-132
รูปที่ 6.1 หน้าเข้าสู่ระบบ	6-1
รูปที่ 6.2 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain	6-2
รูปที่ 6.3 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain.....	6-2
รูปที่ 6.4 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Stress-Strain	6-2
รูปที่ 6.5 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต).....	6-3
รูปที่ 6.6 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง)	6-3
รูปที่ 6.7 การแสดงกราฟ Stress-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง).....	6-4
รูปที่ 6.8 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG4C แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต).....	6-4
รูปที่ 6.9 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG4C แปลงโพธาราม(ลาดยาง)	6-5
รูปที่ 6.10 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG1L ของแปลงสรรพยา(ลาดยาง)	6-5
รูปที่ 6.11 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต).....	6-5
รูปที่ 6.12 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง).....	6-6
รูปที่ 6.13 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)	6-6
รูปที่ 6.14 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต)	6-6
รูปที่ 6.15 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงโพธาราม(ลาดยาง).....	6-7
รูปที่ 6.16 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมด แปลงสรรพยา(ลาดยาง)	6-7
รูปที่ 6.17 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture	6-8
รูปที่ 6.18 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture	6-8
รูปที่ 6.19 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Temperature-Moisture.....	6-8
รูปที่ 6.20 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต)	6-9
รูปที่ 6.21 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงโพธาราม (ลาดยาง)	6-9
รูปที่ 6.22 การแสดงกราฟ Temperature-Moisture แปลงสรรพยา (ลาดยาง)	6-9
รูปที่ 6.23 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture ของ M_SG3L.....	6-10
รูปที่ 6.24 การซ่อนข้อมูล Temperature-Moisture	6-10

รูปที่ 6.25 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress.	6-11
รูปที่ 6.26 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress....	6-11
รูปที่ 6.27 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress.....	6-12
รูปที่ 6.28 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Stress ตามที่ผู้ใช้งานเลือก	6-12
รูปที่ 6.29 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงนครชัยศรี(คอนกรีต).....	6-13
รูปที่ 6.30 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงโพธาราม(ลาดยาง).....	6-13
รูปที่ 6.31 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress แปลงสรรพยา(ลาดยาง)	6-13
รูปที่ 6.32 การซ่อนข้อมูล Stress ของ P_SG3L ของกราฟ Traffic and Axle Load Data.....	6-14
รูปที่ 6.33 การซ่อนข้อมูล Stress ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Stress.....	6-14
รูปที่ 6.34 การเลือกแปลงนครชัยศรี (คอนกรีต) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain .	6-15
รูปที่ 6.35 การเลือกแปลงโพธาราม (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain	6-15
รูปที่ 6.36 การเลือกแปลงสรรพยา (ลาดยาง) เพื่อแสดงข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain	6-16
รูปที่ 6.37 ช่วงของข้อมูล Traffic and Axle Load Data-Strain ตามที่ผู้ใช้งานเลือก.....	6-16
รูปที่ 6.38 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงนครชัยศรี (คอนกรีต).....	6-17
รูปที่ 6.39 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงโพธาราม(ลาดยาง).....	6-17
รูปที่ 6.40 การแสดงกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain แปลงสรรพยา(ลาดยาง).....	6-17
รูปที่ 6.41 การซ่อนข้อมูล Strain ของ S_SG4C_Y ของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain.....	6-18
รูปที่ 6.42 การซ่อนข้อมูล Strain ทั้งหมดของกราฟ Traffic and Axle Load Data-Strain.....	6-18
รูปที่ 6.43 การ Export ข้อมูล Stress-Strain.....	6-19
รูปที่ 6.44 การ Export ข้อมูล Temperature-Moisture.....	6-19
รูปที่ 6.45 รายงานสรุป (Report).....	6-20
รูปที่ 6.46 แผนที่ (Map).....	6-20
รูปที่ 6.47 แผนที่แบบ Google Street	6-21
รูปที่ 6.48 แผนที่แบบ Google Satellite	6-21
รูปที่ 6.49 แผนที่แบบ Google Hybrid.....	6-21
รูปที่ 6.50 ระบบรักษาความปลอดภัยโดยรหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password).....	6-22
รูปที่ 6.51 User Management.....	6-23

รูปที่ 6.52 เพิ่มผู้ใช้งาน	6-23
รูปที่ 6.53 กดปุ่มบันทึกเพื่อเพิ่มผู้ใช้งาน	6-23
รูปที่ 6.54 รายชื่อผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น	6-24
รูปที่ 6.55 การแก้ไขผู้ใช้งาน	6-24
รูปที่ 6.56 ข้อมูลผู้ใช้งานถูกลบ.....	6-24
รูปที่ 7.1 การทดสอบรถบรรทุก 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน ในวันที่ 23 ม.ค. 2561	7-2
รูปที่ 7.2 การทดสอบรถบรรทุก 6 เพลา 22 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 50.5 ตัน ในวันที่ 24 ม.ค. 2561.....	7-3
รูปที่ 7.3 การทดสอบรถบรรทุก 6 ล้อ และรถบรรทุก 6 เพลา 22 ล้อ ในวันที่ 5, 6 และ 17 กรกฎาคม 2561....	7-5
รูปที่ 7.4 รถบรรทุกซึ่งใช้ในการทดสอบรถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน	7-6
รูปที่ 7.5 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง	7-7
รูปที่ 7.12 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (ต่อ).....	7-8
รูปที่ 7.6 การเปลี่ยนแปลงความเค้น (Induced stress) ที่ Subgrade (SG) และ Subbase (SB) ซึ่งเกิดจาก น้ำหนักกระทำหยุดนี้ (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลาหน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และ ตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนี้	7-9
รูปที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงความเครียด (Induced strain) ที่ Subgrade (SG) Subbase (SB) และ Asphaltic concrete (AC) surface ซึ่งเกิดจากน้ำหนักกระทำหยุดนี้ (ตำแหน่ง 2 คือเพลาหลัง และตำแหน่ง 4 คือเพลา หน้า ตำแหน่ง L คือล้อซ้าย และตำแหน่ง C คือกลางช่องจราจร) สำหรับกรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 5.5 ตัน หยุดนี้.....	7-10
รูปที่ 7.8 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณี น้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง.....	7-11
รูปที่ 7.9 ค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง สำหรับชั้น Subbase และ Subgrade กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง	7-12
รูปที่ 7.10 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subgrade ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับ การจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง	7-13
รูปที่ 7.11 ค่าความเครียด (Strain) ที่ Subbase ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับ การจราจร (Normal-Y) กรณีน้ำหนักกระทำเพลาหลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 ก.ม.ต่อชั่วโมง	7-14

รูปที่ 7.12 ค่าความเครียด (Strain) ที่บริเวณล้อซ้าย (Left wheel) และกึ่งกลาง ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) สำหรับชั้น Asphaltic Concrete กรณีน้ำหนักกระทำเพลาลัง 11 ตัน ความเร็ว 40 กม.ต่อชั่วโมง.....	7-15
รูปที่ 7.13 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้าย ที่ความเร็ว 20 km/hr	7-16
รูปที่ 7.14 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ที่ความเร็ว 20 km/hr	7-17
รูปที่ 7.15 ค่าความเค้นใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ที่ความเร็ว 20 km/hr.....	7-17
รูปที่ 7.16 ค่าความเค้นใน ชั้น Subbase ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ที่ความเร็ว 20 km/hr	7-18
รูปที่ 7.17 ค่าความเครียดใน ชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr	7-19
รูปที่ 7.18 ค่าความเครียดใน ชั้น Subbase ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr	7-20
รูปที่ 7.19 ค่าความเครียดใน ชั้น AC ใต้ล้อซ้ายกึ่งกลาง และล้อขวา ในทิศทางจราจร (Longitudinal- X) และทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y) ที่ความเร็ว 20 km/hr.....	7-21
รูปที่ 7.20 ค่าความเค้น เหนือชั้น Subgrade และ Subbase บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร	7-22
รูปที่ 7.21 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Subbase	7-23
รูปที่ 7.22 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา ชั้น Subgrade.....	7-24
รูปที่ 7.23 ค่าความเครียด บริเวณ ล้อซ้ายและกึ่งกลาง ชั้น Subgrade และ Subbase	7-25
รูปที่ 7.24 ค่าความเครียด ชั้น Asphaltic concrete (AC) surface บริเวณ ล้อซ้าย ในทิศการจราจร (Longitudinal-X) ทิศตั้งฉากกับการจราจร (Normal-Y).....	7-26
รูปที่ 7.25 ค่าความเค้น ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ.....	7-27
รูปที่ 7.26 ค่าความเครียด ชั้น Subgrade และ Subbase ที่ความเร็วรถต่างๆ.....	7-27
รูปที่ 7.27 ค่าความเครียด ชั้น AC ที่ความเร็วรถต่างๆ.....	7-28
รูปที่ 7.28 ภาพตัดและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ สำหรับแปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)	7-29
รูปที่ 7.29 ค่าความเค้น ใต้ล้อซ้าย ในชั้น Subgrade แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) รถ 2 เพลา 6 ล้อ รดวิ่งด้วยความเร็ว 50 km/hr.....	7-30
รูปที่ 7.30 ค่าความเค้น ในชั้น Subgrade และได้ชั้นคอนกรีต ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) รถ 2 เพลา 6 ล้อ	7-31
รูปที่ 7.31 ค่าความเค้นกับความลึก ในกรณีรถหยุดนิ่ง น้ำหนักเพลาลัง 9.7 ตัน ทั้งกรณีถนนลาดยางและถนนคอนกรีต	7-32

รูปที่ 7.32 น้ำหนักเพลลาและค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นในชั้น Subgrade ใต้ล้อซ้าย กรณีถนนลาดยาง และถนนคอนกรีต	7-33
รูปที่ 7.33 ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเค้นที่ชั้น Subgrade หรือ Normalised stress กับความลึก เปรียบเทียบกรณีถนนคอนกรีตและถนนลาดยางซึ่ง	7-33
รูปที่ 7.34 ความเค้นใต้ล้อซ้ายและล้อขวาชั้น Subgrade และชั้น concrete กรณีถนนคอนกรีต.....	7-34
รูปที่ 7.35 ความเครียดชั้น Subgrade และชั้น concrete กรณีถนนคอนกรีต	7-35
รูปที่ 7.36 ผลสอบเทียบความชื้นวัดโดยอุปกรณ์ TDR และค่าจากการอบด้วยเตาอบและ Nuclear density....	7-35
รูปที่ 7.37 ความชื้นในชั้น Base และ Subgrade ถนนลาดยาง (โพธาราม)	7-36
รูปที่ 7.38 ความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี).....	7-37
รูปที่ 7.39 ตัวอย่างความชื้นในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี) เทียบกับปริมาณน้ำฝน.....	7-38
รูปที่ 7.40 อุณหภูมิในชั้น Base และ Subgrade ถนนลาดยาง (โพธาราม).....	7-39
รูปที่ 7.41 อุณหภูมิในชั้น Sand cushion และ Subgrade ถนนคอนกรีต (นครชัยศรี).....	7-39
รูปที่ 8.1 ลักษณะการกระจายแรงรูปวงกลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้	8-2
รูปที่ 8.2 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อเดียว น้ำหนักเพลลา 4 ตัน	8-4
รูปที่ 8.3 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อเดียว น้ำหนักเพลลา 4 ตัน	8-5
รูปที่ 8.4 การกระจายความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อเดียว น้ำหนักเพลลา 4 ตัน	8-5
รูปที่ 8.5 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 11 ตัน	8-6
รูปที่ 8.6 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 11 ตัน	8-6
รูปที่ 8.7 การกระจายความเครียดในแนวนอนกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาเดี่ยวล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 11 ตัน	8-7
รูปที่ 8.8 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 10 ตัน.....	8-7
รูปที่ 8.9 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลลาคู่ล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 10 ตัน	8-8

รูปที่ 8.10 การกระจายความเครียดในแนวนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 10 ตัน	8-8
รูปที่ 8.11 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 8.5 ตัน	8-9
รูปที่ 8.12 การกระจายความเครียดในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 8.5 ตัน	8-9
รูปที่ 8.13 การกระจายความเครียดในแนวนานกับทิศทางจราจรเนื่องจากแรงกระทำบนเพลาสามล้อคู่ น้ำหนักเพลลา 8.5 ตัน	8-10
รูปที่ 8.14 ตำแหน่งกดทับของล้อรถบรรทุกบน Strain Gage ดังนี้ A) กึ่งกลางระหว่างล้อคู่ B) ใต้ล้อด้านใน C) ใต้ล้อด้านนอก.....	8-11
รูปที่ 8.15 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน.....	8-11
รูปที่ 8.16 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งฉากกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน.....	8-11
รูปที่ 8.17 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 4 ตัน	8-12
รูปที่ 8.18 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนานกับทิศทางจราจร กรณีพิกัดน้ำหนักบรรทุก 11 ตัน.....	8-12
รูปที่ 8.19 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น (Patch Test) สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้การทดสอบ FWD.....	8-13
รูปที่ 8.20 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเพลลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว และเพลลาเดี่ยว-ล้อคู่	8-13
รูปที่ 8.21 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้ น้ำหนักบรรทุกเพลลาคู่-ล้อคู่.....	8-14
รูปที่ 8.22 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางภายใต้ น้ำหนักบรรทุกสามเพลลา-ล้อคู่.....	8-14
รูปที่ 8.23 ขอบเขตและเงื่อนไขสภาพการยึดรั้งสำหรับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ	8-15
รูปที่ 8.24 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายผลของค่าการเสียรูปแบบถาวรของแบบจำลองกับผลการทดสอบ (Ramsamooj และคณะ 1997)	8-18
รูปที่ 8.25 การทดสอบ FWD.....	8-19
รูปที่ 8.26 ระยะห่างระหว่างเพลลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลลาเดี่ยว-ล้อเดี่ยว (แรงดันลมยาง 0.83 MPa) และเพลลาเดี่ยว-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.83 MPa).....	8-20
รูปที่ 8.27 ระยะห่างระหว่างเพลลาและระยะห่างระหว่างล้อสำหรับเพลลาคู่-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa) และสามเพลลา-ล้อคู่ (แรงดันลมยาง 0.90 MPa)	8-20

รูปที่ 8.28 ค่าหน่วยแรง S22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น.....	8-22
รูปที่ 8.29 ค่าหน่วยแรง S11 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น.....	8-23
รูปที่ 8.30 ค่าความเครียด E22 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น	8-23
รูปที่ 8.31 ค่าการยุบตัว U2 ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น	8-23
รูปที่ 8.32 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวตั้งตามระดับความลึก.....	8-24
รูปที่ 8.33 กราฟแสดงหน่วยแรงในแนวราบตามระดับความลึก	8-24
รูปที่ 8.34 กราฟแสดงความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก	8-25
รูปที่ 8.35 กราฟแสดงความเครียดแนวราบตามระดับความลึก.....	8-25
รูปที่ 8.36 ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเบื้องต้น และ LEA เทียบกับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบ FWD	8-26
รูปที่ 8.37 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว..	8-26
รูปที่ 8.38 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว...	8-27
รูปที่ 8.39 ความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว	8-27
รูปที่ 8.40 ความเค้นแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อเดี่ยว.....	8-28
รูปที่ 8.41 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อคู่.....	8-28
รูปที่ 8.42 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาดียว-ล้อคู่	8-29
รูปที่ 8.43 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีเพลาคู่-ล้อคู่	8-29
รูปที่ 8.44 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่.....	8-30
รูปที่ 8.45 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่.....	8-30
รูปที่ 8.46 ความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่.....	8-31
รูปที่ 8.47 ความเค้นแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีเพลาคู่-ล้อคู่.....	8-31
รูปที่ 8.48 ตำแหน่งล้อที่ใช้วิเคราะห์ กรณีสามเพลาล้อคู่.....	8-32
รูปที่ 8.49 ความเครียดแนวราบในแนวตั้งฉากทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่.....	8-32
รูปที่ 8.50 ความเครียดแนวราบในแนวขนานทิศทางจราจรตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่.....	8-33
รูปที่ 8.51 ความเครียดแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่.....	8-33
รูปที่ 8.52 ความเค้นในแนวตั้งตามระดับความลึก กรณีสามเพลาล้อคู่.....	8-34
รูปที่ 9.1 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เพลาดียว-ยางคู่	9-2

รูปที่ 9.2 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน เฟลาคู่-ยางคู่.....	9-3
รูปที่ 9.3 น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน สามเฟลา-ยางคู่.....	9-3
รูปที่ 9.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) เสนอโดย AASHTO (1986).....	9-7
รูปที่ 9.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach).....	9-8
รูปที่ 9.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวนอนทิศทางจราจร (Mechanistic Approach).....	9-8
รูปที่ 9.7 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach).....	9-9
รูปที่ 9.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เนื้อ Subgrade ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร (Mechanistic Approach).....	9-10
รูปที่ 9.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการตรวจวัดค่า Strain เนื้อ Subgrade ในแนวนอนทิศทางจราจร (Mechanistic Approach).....	9-10
รูปที่ 9.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่า LEF โดยวิธีการตรวจวัด (Mechanistic Approach) กับค่า LEF โดยวิธีเชิงประจักษ์ (Empirical Approach).....	9-11
รูปที่ 9.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวตั้งฉากทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)	9-12
รูปที่ 9.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain ได้ผิวทาง AC ในแนวนอนทิศทางจราจร ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)	9-12
รูปที่ 9.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF กรณียางคู่ (Dual-Wheel) กับน้ำหนักกลุ่มเฟลา (Axle Group Load) โดยวิธีการวิเคราะห์ค่า Strain เนื้อ Subgrade ตามทฤษฎี Elastic Layer Theory (Theoretical Approach) และกฎยกกำลังสี่ (Fourth Power Law)	9-13
รูปที่ 9.14 ตัวอย่างการคำนวณค่า LEF สำหรับรถบรรทุกสลิปล้อพิกัดน้ำหนักรวมต่างๆ.....	9-15

รูปที่ 10.1 ความเค้น กรณีรถหยุดนิ่งรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Top Subgrade (60 cm) แถวที่ 1	10-1
รูปที่ 10.2 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle Base (30 cm) แถวที่ 1	10-2
รูปที่ 10.3 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% แบบหยุดนิ่ง เลาหน้า น้ำหนัก 3.94 ตัน อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Middle AC (10 cm) แถวที่ 1	10-2
รูปที่ 10.4 ความเค้น กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Pressure Cell ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 2	10-3
รูปที่ 10.5 ความเครียด กรณี รถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Strain Gage ชั้น Bottom Base (40 cm) แถวที่ 1	10-4
รูปที่ 10.6 ความเครียด กรณีรถ 6 ล้อ พิกัดบรรทุก 100% ความเร็ว 60 กม./ชม. อุปกรณ์ Asphalt Strain Gage ชั้น Bottom AC (20 cm) แถวที่ 1	10-4
รูปที่ 10.7 ค่าความเค้น บริเวณ ล้อซ้ายและล้อขวา เหนือชั้น Subgrade และ Base แปลงสรพยา	10-5
รูปที่ 10.8 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Bottom) ได้ ล้อซ้าย ล้อ ขวา และกึ่งกลาง แปลงสรพยา	10-6
รูปที่ 10.9 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Subgrade และชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และได้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรพยา	10-7
รูปที่ 10.10 ค่าความเค้น บริเวณชั้น Base ที่ความลึก 30 cm (Middle) และ ชั้น Base ที่ความลึก 40 cm (Base) ได้ ล้อซ้าย ล้อขวา และกึ่งกลาง แปลงสรพยา	10-8
รูปที่ 10.11 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 1 และ แถว ที่ 3 ทิศทางตั้งฉากกับถนน Strain Y (Normal-to-lane axis)	10-8
รูปที่ 10.12 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา บริเวณแถวที่ 2 ทิศทาง ขนานกับถนน Strain X (Parallel-to-lane axis)	10-9
รูปที่ 10.13 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Base ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา	10-10
รูปที่ 10.14 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณด้านล่างชั้น AC (Bottom) ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา	10-11
รูปที่ 10.15 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณกึ่งกลาง AC (Bottom) ได้ ล้อซ้าย และล้อขวา	10-12
รูปที่ 10.16 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 0 % น้ำหนัก เพลลา 4.1 ตัน	10-13
รูปที่ 10.17 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักบรรทุก 100% น้ำหนักเพลลา 4 ตัน และ 11 ตัน	10-13

รูปที่ 10.18 ค่าความเครียด (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่ความเร็วต่างๆ กรณีน้ำหนักรบรรทุก 100% น้ำหนักเพลา 4 ตัน และ 11 ตัน	10-14
รูปที่ 10.19 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบแปลงทดสอบ 3 แปลง AC (with selected mat)-โพธาราม, Concrete- นครชัยศรี และ AC (without selected mat)- สรรพยา	10-15
รูปที่ 10.20 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ เปรียบเทียบกรณีรถบรรทุก 6 ล้อ และรถกึ่งพ่วงแปลงทดสอบ AC (without selected mat)-สรรพยา.....	10-16
รูปที่ 10.21 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-middle ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ	10-17
รูปที่ 10.22 ค่าความเค้น (Stress) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้ายและกึ่งกลางช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ	10-18
รูปที่ 10.23 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น Subgrade และ Base-bottom ใต้ล้อซ้าย ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ	10-19
รูปที่ 10.24 ค่าความเครียด (Strain) บริเวณชั้น AC ใต้ล้อซ้ายและล้อขวา ในทิศทาง Y-Axis ตั้งฉากช่องจราจร และ X-Axis ขนานช่องจราจร ที่น้ำหนักเพลาต่างๆ กรณีรถบรรทุก 6 ล้อ	10-20
รูปที่ 10.25 ค่าความอัตราส่วนความเค้นเปรียบเทียบกับความเค้นที่เนื้อชั้น Subgrade เทียบตามความลึก แปลงสรรพยา (ผิวทาง AC ไม่มีชั้นวัสดุคัดเลือก) แปลงโพธาราม (ผิวทาง AC มีวัสดุคัดเลือก) และแปลงนครชัยศรี (ผิวทางคอนกรีต)	10-21
รูปที่ 10.26 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี).....	10-22
รูปที่ 10.27 ความชื้นในชั้น Subgrade และใต้ชั้น RC แปลงถนนคอนกรีต (นครชัยศรี)	10-23
รูปที่ 10.28 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม).....	10-24
รูปที่ 10.29 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (โพธาราม)	10-25
รูปที่ 10.30 อุณหภูมิในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา).....	10-26
รูปที่ 10.31 ความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base แปลงถนน AC (สรรพยา)	10-27
รูปที่ 10.32 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม)	10-28
รูปที่ 10.33 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (โพธาราม).....	10-28
รูปที่ 10.34 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา)	10-29
รูปที่ 10.35 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใต้ชั้นโครงสร้างทางในระหว่างวัน (สรรพยา).....	10-29

รูปที่ 10.36 อัตราส่วน ESAL/Strain และความชื้นในชั้น Subgrade และกึ่งกลางชั้น Base ที่ช่วงเวลาต่างๆ แปลงถนน AC (โพธาราม).....	10-30
รูปที่ 10.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับ Strain แนวราบ ในชั้น AC ของ ถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท	10-31
รูปที่ 10.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับระยะเวลาของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-32
รูปที่ 10.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ได้ผิวทาง AC, Base และ เหนือชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-33
รูปที่ 10.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-33
รูปที่ 10.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-34
รูปที่ 10.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-34
รูปที่ 10.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น Base ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-35
รูปที่ 10.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-35
รูปที่ 10.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวราบ กับ ESALs ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-36
รูปที่ 10.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวตั้ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-36
รูปที่ 10.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Strain แนวตั้ง กับ ESALs ในชั้น Subgrade ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-37
รูปที่ 10.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nf กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-38
รูปที่ 10.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nf กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-38
รูปที่ 10.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Df กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-39
รูปที่ 10.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Df กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-39
รูปที่ 10.52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-40

รูปที่ 10.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-41
รูปที่ 10.54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-41
รูปที่ 10.55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dr กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท.....	10-42
รูปที่ 10.56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESALs /Induced Average Strain กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-43
รูปที่ 10.57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Rut Depth กับ ESALs ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี... 10-	44
รูปที่ 10.58 ค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ใต้ผิวทางคอนกรีต อ. นครชัยศรี จ. นครปฐม	10-45
รูปที่ 10.59 จำนวนเที่ยวของน้ำหนักรถทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้า (Nf) อ. นคร ชัยศรี จ. นครปฐม.....	10-46
รูปที่ 10.60 ค่าความเสียหายสะสมเนื่องจากความล้าของถนนคอนกรีตอ. นครชัยศรี จ. นครปฐม.....	10-47
รูปที่ 10.61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพ ธาราม จ.ราชบุรี.....	10-48
รูปที่ 10.62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพ ยา จ. ชัยนาท.....	10-48
รูปที่ 10.63 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ.ราชบุรี	10-49
รูปที่ 10.64 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ. โพธาราม จ.ราชบุรี.....	10-49
รูปที่ 10.65 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ. ราชบุรี.....	10-50
รูปที่ 10.66 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (FWD) กับ Strain ในชั้น AC ของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท	10-50
รูปที่ 10.67 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Deflection (FWD) ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ. สรรพยา จ. ชัยนาท.....	10-51
รูปที่ 10.68 กราฟแนวโน้มสัดส่วนของ Strain ในชั้น AC ที่เปลี่ยนแปลงไปของถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ. ชัยนาท	10-51
รูปที่ 11.1 ภาพรวมการดำเนินการศึกษา.....	11-1
รูปที่ 11.2 อำนาจการทำลายของน้ำหนักรถกลุ่มเพลารถบรรทุกทุกประเทศไทยกรณีล้อคู่	11-4

รูปที่ 11.3 อำนาจการทำลายของน้ำหนักรถกลุ่มเพลารถบรรทุกทุกประเทศไทยกรณีล้อเดี่ยว	11-4
รูปที่ 11.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการคำนวณทางทฤษฎี.....	11-5
รูปที่ 11.5 ความเครียดใต้ผิวทางของรถบรรทุกทุกหกล้อที่มีความเร็ว 20 กม./ชม. และ 60 กม./ชม.....	11-6
รูปที่ 11.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับความเครียดใต้ผิวทาง	11-6
รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถบรรทุกกับอำนาจการทำลาย.....	11-7
รูปที่ 11.8 อำนาจการทำลายของรถบรรทุกสิบล้อเกินพิกัดน้ำหนัก.....	11-8
รูปที่ 11.9 ค่าเสื่อมของทางหลวงเนื่องจากรถบรรทุกแต่ละประเภทเกินพิกัดน้ำหนัก	11-9
รูปที่ 11.10 ค่าเสื่อมของทางหลวงต่อการขนส่งสินค้าน้ำหนัก 1 ตันโดยรถบรรทุกแต่ละประเภท	11-9
รูปที่ 11.11 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง	11-10
รูปที่ 11.12 แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต.....	11-11
รูปที่ 12.1 สรุปผลผลิต (Output) ผลลัพธ์ (Outcome) และผลกระทบ (Impact) ของการศึกษา.....	12-5

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 จำนวนเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต	2-12
ตารางที่ 2.2 จำนวนอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม	2-13
ตารางที่ 3.1 แปลงทดสอบรูปแบบต่างๆในการศึกษาโดย Ohio Department of Transport.....	3-18
ตารางที่ 3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง Finite element ด้วยวิธีต่างๆ กับผลการตรวจวัดในสนาม.....	3-22
ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ของวัสดุซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite element	3-23
ตารางที่ 3.4 ค่าอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆ จากการตรวจวัด สำหรับใช้สมมุติในการวิเคราะห์ด้วย แบบจำลอง Finite element	3-30
ตารางที่ 3.5 ค่าความลึกร่องล้อ (Rutting depth) ที่ชั้นผิวทาง ชั้นระบายน้ำและชั้น Asphalt Concrete Base course จากการทำนายโดย FEM ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	3-31
ตารางที่ 3.6 Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)	3-39
ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติวัสดุประเภท Unbound Granular Base และ Cemented Base.....	3-47
ตารางที่ 4.1 สถิติการเข้าขังน้ำหนักสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) ปี 2555 – 2559.....	4-6
ตารางที่ 4.2 สถิติการเข้าขังน้ำหนักสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) ปี 2555 – 2559	4-12
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสถิติการเข้าขังน้ำหนักสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560.....	4-16
ตารางที่ 5.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตจำนวน 1 แปลง.....	5-2
ตารางที่ 5.2 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจำนวน 2 แปลง	5-5
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต	5-42
ตารางที่ 7.1 กรณีการทดสอบทั้งหมดโดยใช้รถ 2 เพลา 6 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 15 ตัน	7-4
ตารางที่ 7.2 กรณีการทดสอบทั้งหมดโดยใช้รถกึ่งพ่วง 6 เพลา 22 ล้อ พิกัดน้ำหนักบรรทุก 50.5 ตัน	7-4
ตารางที่ 7.3 รายละเอียดการทดสอบในสนาม	7-5
ตารางที่ 8.1 รายละเอียดการทดสอบในสนาม	8-1
ตารางที่ 8.2 คุณสมบัติวัสดุชั้นทางสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี	8-2
ตารางที่ 8.3 ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์	8-21
ตารางที่ 8.4 ค่าตัวแปรสำหรับใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ	8-21
ตารางที่ 9.1 น้ำหนักลงเพลายกให้สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่ยานพาหนะสามารถเดินบนทางหลวง	9-2

ตารางที่ 9.2 Load Equivalency Factor (LEF) สำหรับถนนลาดยาง	9-5
ตารางที่ 9.3 น้ำหนักเพลามาตรฐาน	9-6
ตารางที่ 9.4 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางเดี่ยว ตามน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load)	9-14
ตารางที่ 9.5 ผลการคำนวณค่า LEF กรณียางคู่ ตามน้ำหนักกลุ่มเพลา (Axle Group Load).....	9-14
ตารางที่ 10.1 เกณฑ์การบำรุงรักษาถนนลาดยางตามระดับความรุนแรงของร่องล้อ	10-44

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การออกแบบก่อสร้างและบูรณะโครงสร้างถนนของกรมทางหลวงอ้างอิงตาม Asphalt Institute (AI) และ Portland Cement Association (PCA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีพื้นฐานการวิเคราะห์ออกแบบจากข้อมูลการวิจัยถนนทดลอง อาทิ AASHTO Road Test, WASHO Road Test และ British Road Test เป็นต้น แต่เนื่องจากวัสดุ การจราจร การก่อสร้าง สภาพแวดล้อม และสภาพภูมิอากาศของถนนทดลองแตกต่างจากประเทศไทย สมมติฐานและเงื่อนไขการวิเคราะห์ออกแบบ พฤติกรรมรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน (Pavement Response) เช่น ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จึงไม่สอดคล้องหรือไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย ตลอดจนการเพิ่มขึ้นของปริมาณจราจรและน้ำหนักของรถบรรทุกส่งผลให้โครงสร้างถนนของกรมทางหลวงเกิดความเสียหายก่อนกำหนดอายุการออกแบบ

ปัจจุบันกรมทางหลวงยังขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ (Empirical Data) ด้านพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน อันเกิดจากแรงกระทำของน้ำหนักบรรทุกทุกประเภทต่างๆและปัจจัยภายนอกภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย รวมถึงข้อมูลด้านสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance) ดังนั้นการศึกษาดูงานด้านการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง จึงมีความสำคัญต่องานวิจัยและพัฒนาโครงสร้างถนนของประเทศไทยและเป็นครั้งแรกของวงการวิศวกรรมงานทางในระดับภูมิภาคอาเซียน งานวิจัยนี้ประกอบด้วย (1) การติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามเพื่อติดตามตรวจวัดความเค้น ความเครียด อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นจริง (2) การวิเคราะห์ค่าการตอบสนองตามทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดและแบบจำลองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (3) การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชั้นทางภาคสนามด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer และการทดสอบรถบรรทุกไทยในสภาวะควบคุมน้ำหนักลงเพลตามประกาศพิกัดน้ำหนักบรรทุกทุกซึ่งแบ่งตามชนิดของกลุ่มเพล ได้แก่ เพลเดี่ยว-ยางเดี่ยว เพลเดี่ยว-ยางคู่ เพลคู่-ยางคู่ และสามเพล-ยางคู่ (4) การคำนวณอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทย และ (5) การพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องสองปี งบประมาณกรมทางหลวง ประจำปี 2560-2561 ดำเนินการโดยสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีเป้าหมายสำคัญ 3 ประการคือ ประการแรกเพื่อดำเนินการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนของทางหลวงสายหลัก จำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง ประการที่สองเพื่อดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม เก็บบันทึกและประเมินผลข้อมูลการตอบสนองของแปลงตรวจวัดจำนวนสามแปลง และประการสุดท้ายเพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือ และนำไปใช้ออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวงได้จริงอย่างเป็นรูปธรรม

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษาดูงานวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพื่อติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนของทางหลวงสายหลัก
- 2) เพื่อตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม เก็บบันทึก และประมวลผลข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการใช้งานจริง
- 3) เพื่อวิเคราะห์ค่าการตอบสนองพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักและอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยที่มีต่อโครงสร้างถนนสำหรับการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะทางหลวง
- 4) เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน (Pavement Model) และกลไกความเสียหายตามสภาพข้อเท็จจริง อันเกิดจากแรงกระทำของน้ำหนักรถบรรทุก และปัจจัยแวดล้อมของประเทศไทย
- 2) แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) ตามสภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย
- 3) อำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยที่มีต่อโครงสร้างถนนของประเทศไทย
- 4) แนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงสำหรับการออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษา และบูรณะโครงสร้างถนนของประเทศไทย

2. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาตรวจวัดอำนาจการทำลายของรถบรรทุกไทยและพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนกรมทางหลวง มีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

2.1 งานทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยดำเนินการทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 1) ศึกษา รวบรวม และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน พร้อมตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในโครงสร้างชั้นทาง
- 2) รวบรวมข้อมูลรายละเอียดคุณสมบัติและข้อกำหนดทางเทคนิคต่างๆของเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน รวมถึงผลงานการติดตั้งหรือการใช้งานที่ผ่านมา (Job Reference)
- 3) ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง พร้อมแนวทางการประยุกต์ใช้งานจากหน่วยงานในต่างประเทศ

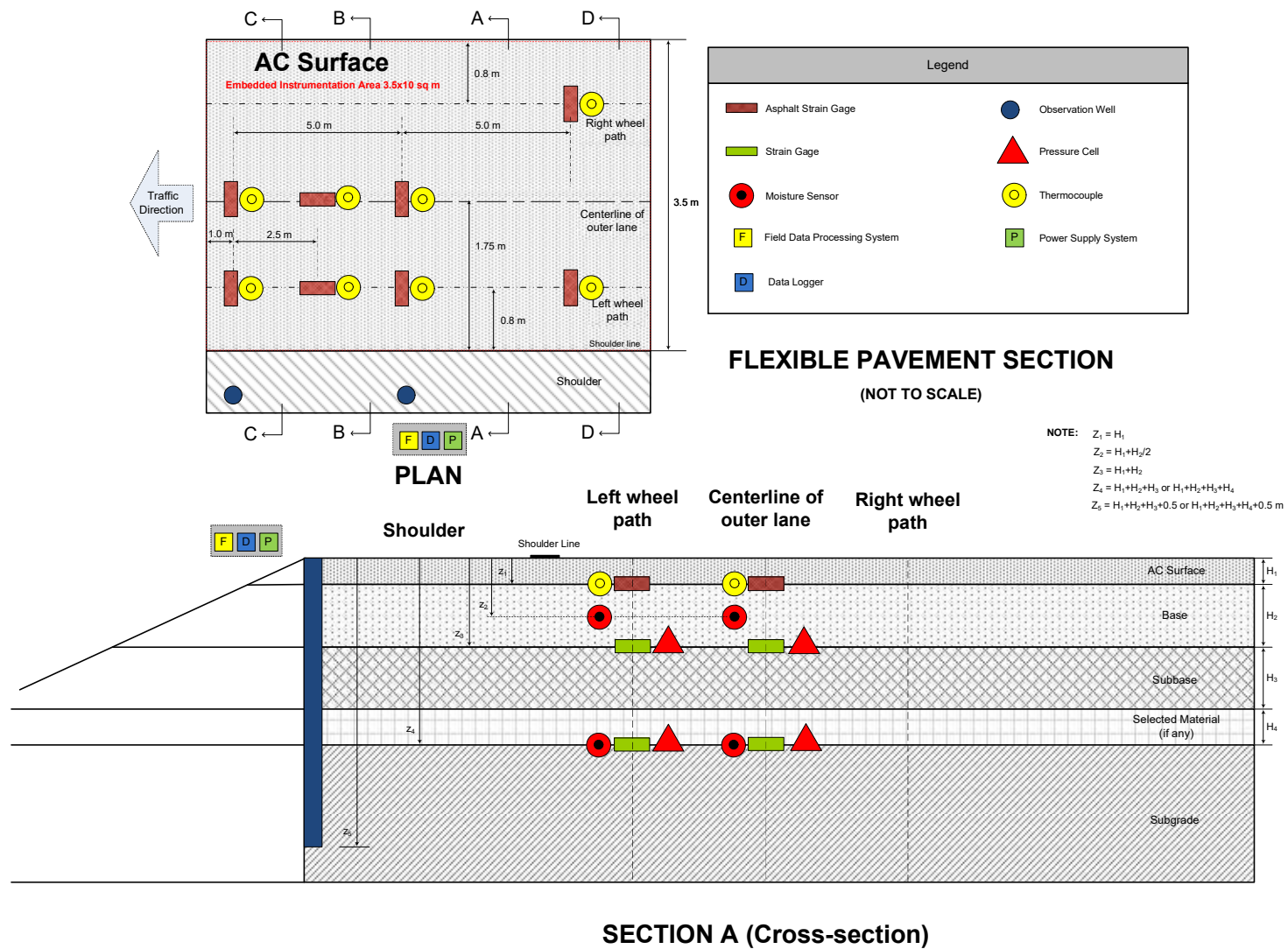
2.2 งานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด

คณะผู้วิจัยดำเนินการสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด เพื่อทำการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จำนวน 2 แปลง บนทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควบคุมหมายเลข 0302 (คลองอีจาง - หลุมดิน) บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 88+770 ต.ดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี และบนทางหลวงหมายเลข 32 บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 121+250 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ชัยนาท (ขาเข้า) ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท ซึ่งเป็นพื้นที่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงชัยนาท และแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต จำนวน 1 แปลง บนทางหลวงหมายเลข 4 กม.41+940 (ขาเข้า) บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนัก นครชัยศรี (ขาเข้า) ต.ท่าตำหนัก อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม รายละเอียดการดำเนินงานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัดฯ มีดังต่อไปนี้

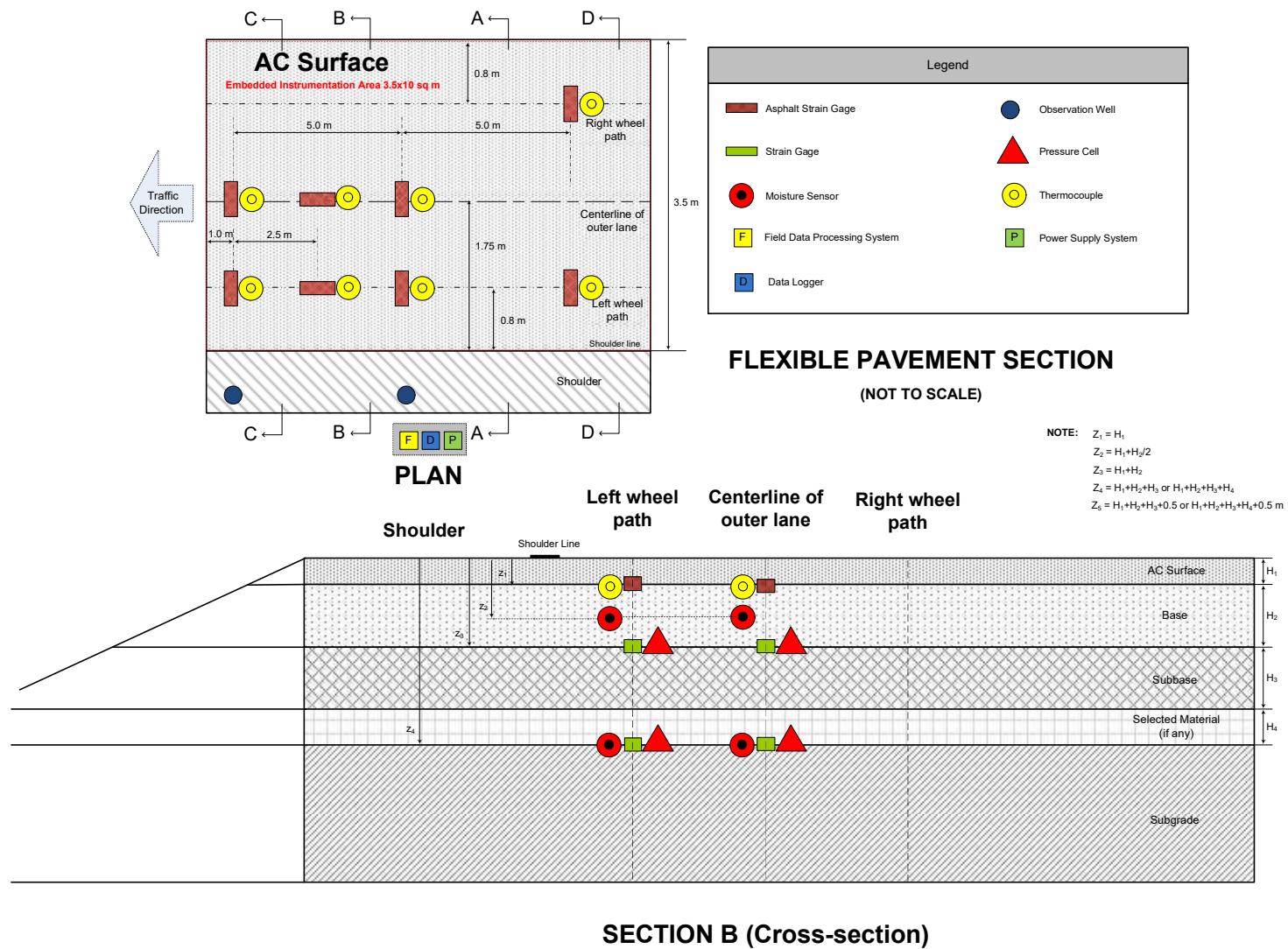
- 1) รวบรวมข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต และสำรวจสภาพผิวทางของแปลงตรวจวัดฯ พร้อมจัดทำรายงานผลการรวบรวมข้อมูล
- 2) รวบรวมข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ย้อนหลังอย่างน้อย 1 ปีของแปลงตรวจวัดฯโดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลสถานีตรวจสอบน้ำหนักในบริเวณใกล้เคียงหรือจากฐานข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง พร้อมจัดทำรายงานผลการรวบรวมข้อมูล
- 3) จัดทำรายการ แบบแปลนแสดงรายละเอียด ข้อกำหนดและคุณสมบัติต่างๆของแปลงตรวจวัดฯ ตำแหน่งการติดตั้งและขั้นตอนแสดงกระบวนการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝัง (Embedded Instrumentation System) ในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยแต่ละแปลงต้อง

ประกอบด้วยรายการเครื่องมือตรวจวัดฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.4 สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง และรูปที่ 2.5 ถึงรูปที่ 2.8 สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตพร้อมตำแหน่งและรูปแบบการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ

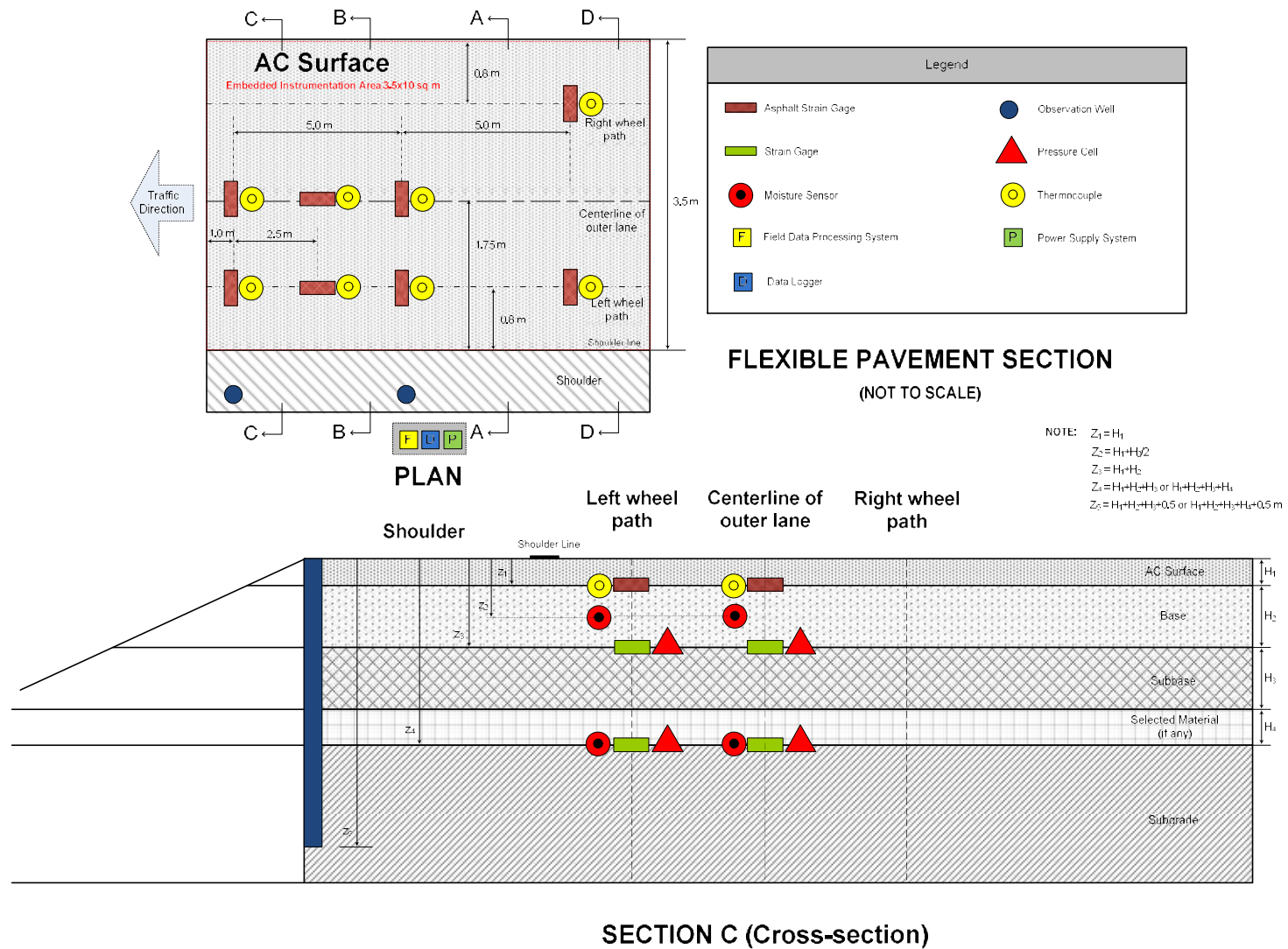
- 4) จัดทำแผนและรายละเอียดขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูลการจราจร ชนิดของยานพาหนะ และน้ำหนักลงเพลลาที่ได้จากสถานีตรวจสอบน้ำหนักที่ติดตั้งระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ ตลอดจนวิธีการเชื่อมโยงข้อมูลดังกล่าวกับผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนนที่ได้จากระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
- 5) จัดทำแผนผังงานวางระบบพร้อมขั้นตอนการติดตั้งและรายละเอียดข้อกำหนดต่างๆ ได้แก่ (1) ระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) (2) ระบบสายสัญญาณสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ กับระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม และ (3) ระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System)



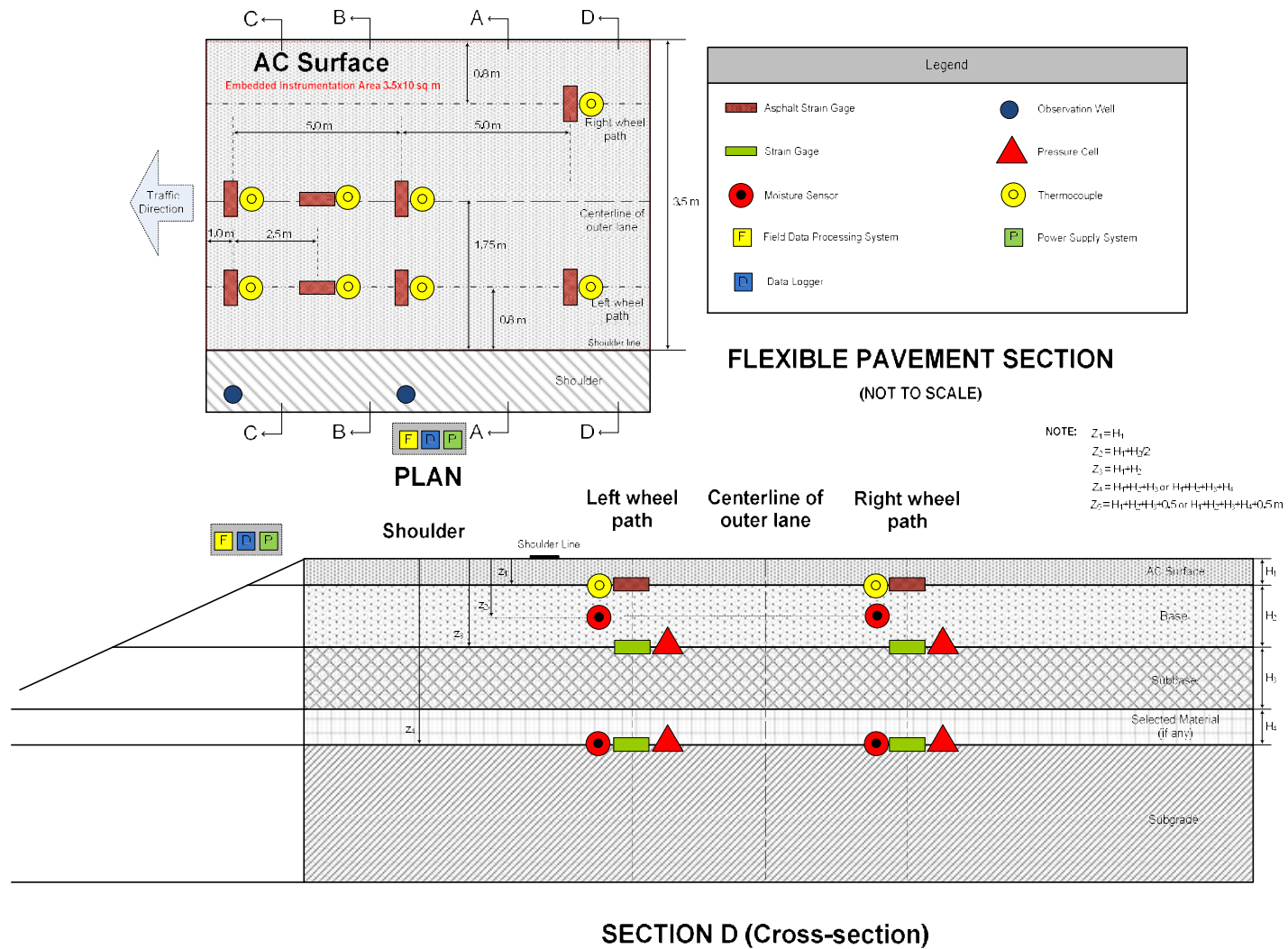
รูปที่ 2.1 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section A)



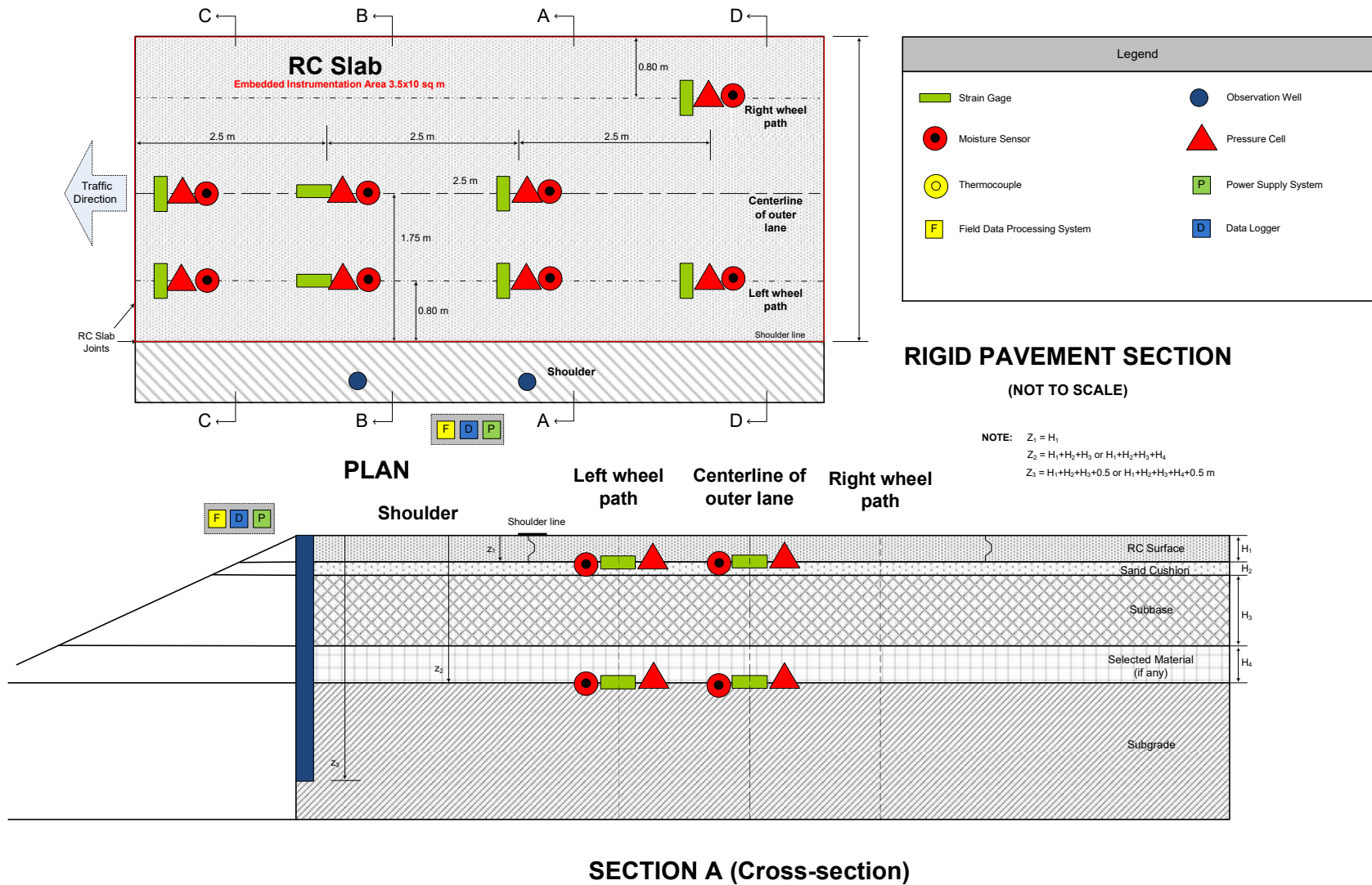
รูปที่ 2.2 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section B)



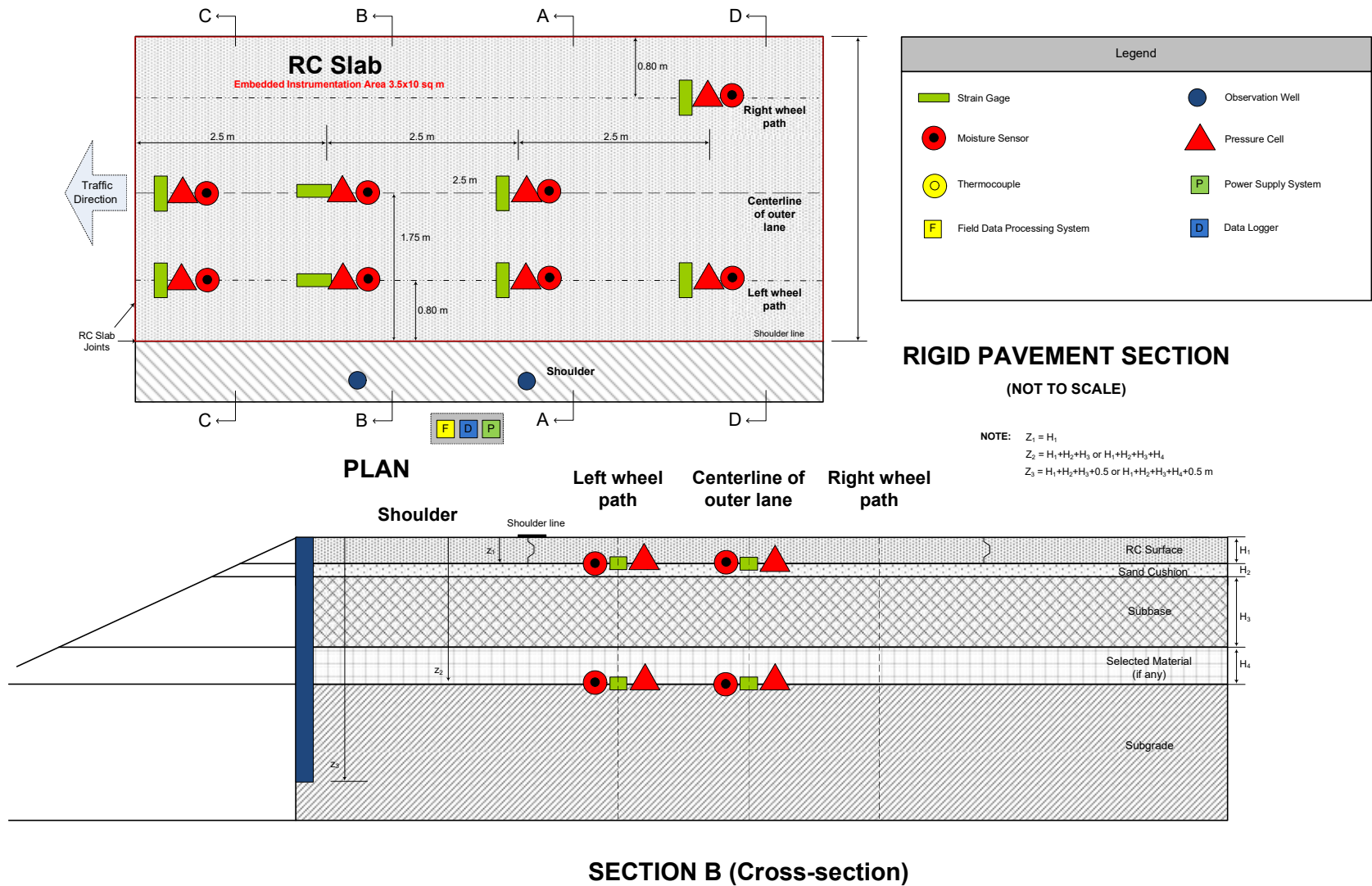
รูปที่ 2.3 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section C)



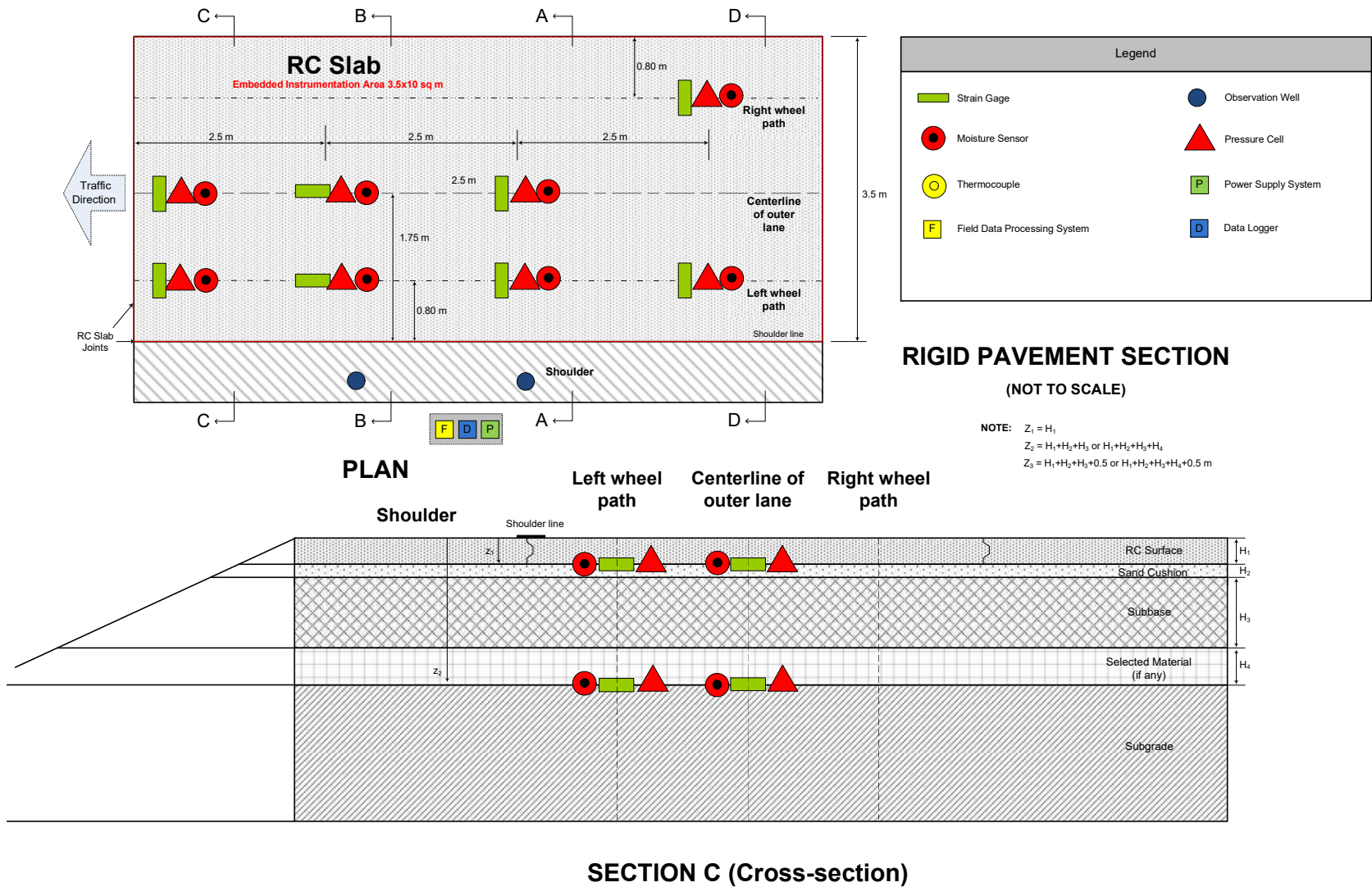
รูปที่ 2.4 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง (Section D)



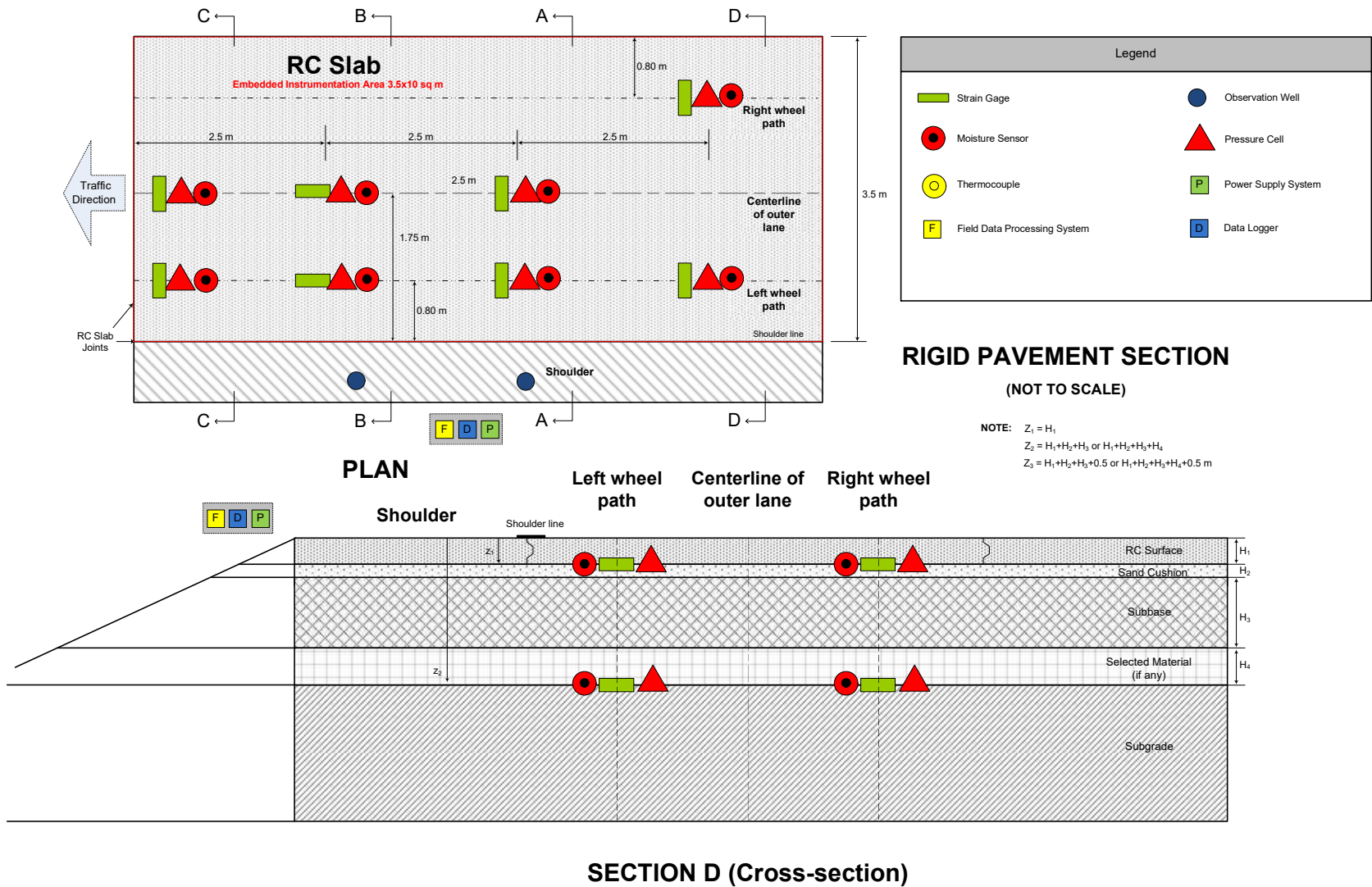
รูปที่ 2.5 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section A)



รูปที่ 2.6 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section B)



รูปที่ 2.7 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section C)



รูปที่ 2.8 รายการเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต (Section D)

2.3 งานติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

คณะผู้วิจัยดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต เพื่อตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ ขอบเขตการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- 1) งานขุดรื้อผิวทางและชั้นโครงสร้างทางเพื่อฝังระบบเครื่องมือตรวจวัดฯในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ในข้อ 2.2
- 2) งานติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน (Embedded Instrumentation System) ระบบสายสัญญาณ (Cabling) และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ในข้อ 2.2 ได้แก่
 - ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนดังแสดงในตารางที่ 2.1
 - ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับเชื่อมโยงและเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ
- 3) งานทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล
- 4) งานปูผิวทางและชั้นโครงสร้างทางของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ในข้อ 2.2 ให้กลับคืนสู่สภาพเดิม พร้อมตีเส้นจราจรตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยโครงสร้างถนนภายหลังการซ่อมคืนสภาพเดิมแล้วเสร็จต้องเป็นไปตามรูปแบบเดิม วัสดุที่ใช้ต้องได้คุณภาพตามมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวง
- 5) งานติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต

ตารางที่ 2.1 จำนวนเครื่องมือตรวจวัดสำหรับแปลงโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต

ลำดับ	รายการ	แปลงตรวจวัด โครงสร้าง ถนนลาดยาง (ชุด)	แปลงตรวจวัด โครงสร้างถนน คอนกรีต (ชุด)	รวม (ชุด)
1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage)	16	-	16
2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage)	32	16	48
3	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell)	32	16	48
4	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well)	3	2	5
5	อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)	16	-	16
6	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor)	32	16	48
7	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)	2	1	3

2.4 งานติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

คณะผู้วิจัยดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ตามตารางที่ 2.2 ขอบเขตการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - ติดตั้งหน่วยประมวลผลข้อมูล (Data Processing Unit) สำหรับเชื่อมโยงและประมวลผลข้อมูลจาก Data Logger
 - ติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) สำหรับถ่ายภาพเหตุการณ์ในสนาม
 - ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) เพื่อจัดการและบันทึกภาพจากกล้องวงจรปิด (CCTV)
 - ติดตั้งฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บและสำรองข้อมูลผลการตรวจวัดในสนาม
 - ติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม (Outdoor Cabinet)
- 2) ติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System) ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC)
 - อุปกรณ์ UPS สำหรับสำรองไฟฟ้า
- 3) เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเครือข่ายสื่อสาร เพื่อสนับสนุนการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดฯ และอุปกรณ์ที่ติดตั้งในแปลงตรวจวัดฯ
 - 4) ทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

ตารางที่ 2.2 จำนวนอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

ลำดับ	รายการ	แปลงโครงสร้าง ถนนลาดยาง (ชุด)	แปลงโครงสร้าง ถนนคอนกรีต (ชุด)	รวม (ชุด)
1	ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)	2	1	3
2	ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)	2	1	3

2.5 งานติดตามและประเมินผลสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring)

คณะผู้วิจัยดำเนินการดำเนินการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับติดตามสมรรถนะทางหลวง (Highway Performance Monitoring) เพื่อรองรับการบูรณาการข้อมูลจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง และถนนคอนกรีต โดยฐานข้อมูลฯ สามารถรองรับการสืบค้นและนำเสนอข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายสำหรับผู้บริหาร เจ้าหน้าที่ นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการติดตามตรวจสอบผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) ได้แก่ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) โดยฐานข้อมูลฯ จะต้องรองรับการดำเนินงานอย่างน้อยดังต่อไปนี้

- 1) การจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) จากเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน จำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง
- 2) การรวบรวมและจัดเก็บข้อมูลการจราจรและน้ำหนักลงเพลลา (Traffic and Axle Load Data) จากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ราชบุรี (ขาเข้า) ต.ดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี สถานีตรวจสอบน้ำหนัก นครชัยศรี (ขาเข้า) ต.ท่าตำหนัก อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม และสถานีตรวจสอบน้ำหนัก ชัยนาท (ขาเข้า) ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท
- 3) การสืบค้นข้อมูลตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานหนด เช่น การสืบค้นข้อมูลตามช่วงเวลา การสืบค้นข้อมูลตามประเภทรถ การสืบค้นข้อมูลตามช่วงของค่าน้ำหนักลงเพลลา หรือการสืบค้นข้อมูลตามช่วงของผลการตรวจวัดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ (Temperature) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เป็นต้น

- 4) การส่งออกข้อมูล (Export Data) ผลการตรวจวัดฯ และข้อมูลการจราจรและน้ำหนัก ลงเพลานี้ในรูปแบบไฟล์ MS Excel ได้เป็นอย่างดี
- 5) การนำเสนอข้อมูลผลการตรวจวัดฯ และน้ำหนักลงเพลานี้ในรูปแบบแผนภูมิหรือกราฟ
- 6) การสร้างรายงาน (Report) สรุปสถิติผลการตรวจวัดฯ และน้ำหนักลงเพลานี้ อาทิ ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าเฉลี่ย (Mean) ตามรายวัน รายเดือน และรายปี โดยจะต้องสามารถบันทึกรายงานในรูปแบบไฟล์ PDF (Acrobat) ได้เป็นอย่างดี
- 7) มีแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) แสดงตำแหน่งของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนทั้งสามแปลง
- 8) มีระบบรักษาความปลอดภัยโดยใช้รหัสผู้ใช้ (User) และรหัสผ่าน (Password) เพื่อจำกัดสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล โดยต้องให้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนรหัสผ่านได้ด้วยตนเอง
- 9) มีระบบบริหารบัญชีผู้ใช้งาน (User Account Management) สำหรับสร้าง สืบค้น แก้ไข และลบบัญชีผู้ใช้งาน

2.6 งานพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model)

คณะผู้วิจัยดำเนินการดำเนินการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองแสดงพฤติกรรมโครงสร้างถนน (Pavement Model) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต ในข้อ 2.2 รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยแบบจำลองสามารถทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง (Highway Performance Model) ภายใต้สภาพการใช้งาน เงื่อนไขและบริบทของประเทศไทย ดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน เช่น ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) กับผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากทฤษฎีหรือโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง จำนวนอย่างน้อย 3 วิธี อาทิ ODEMARK METHOD, ELASTIC LAYER THEORY, FINITE-ELEMENT METHOD เป็นต้น โดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุชั้นทางตามรูปแบบโครงสร้างถนนของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางในข้อ 2.2
- 2) วิเคราะห์ค่าอัตราการทำลาย (Load Equivalency Factor, LEF) ของรถบรรทุกตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางในข้อ 2.2 เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี อาทิ กฎยกกำลังสี่ วิธี AASHTO เป็นต้น
- 3) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักกลุ่มเพลานี้ที่ได้ในข้อ 2
- 4) พัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนน จำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง ทั้งนี้แบบจำลองประกอบด้วย
 - 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ

3. การทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยดำเนินการศึกษา ทบทวน และรวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดพฤติกรรม การรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน พร้อมตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในโครงสร้างชั้นทาง รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุก แบบจำลองสำหรับทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง พร้อมแนวทางการประยุกต์ใช้งานจริงจากหน่วยงานของต่างประเทศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

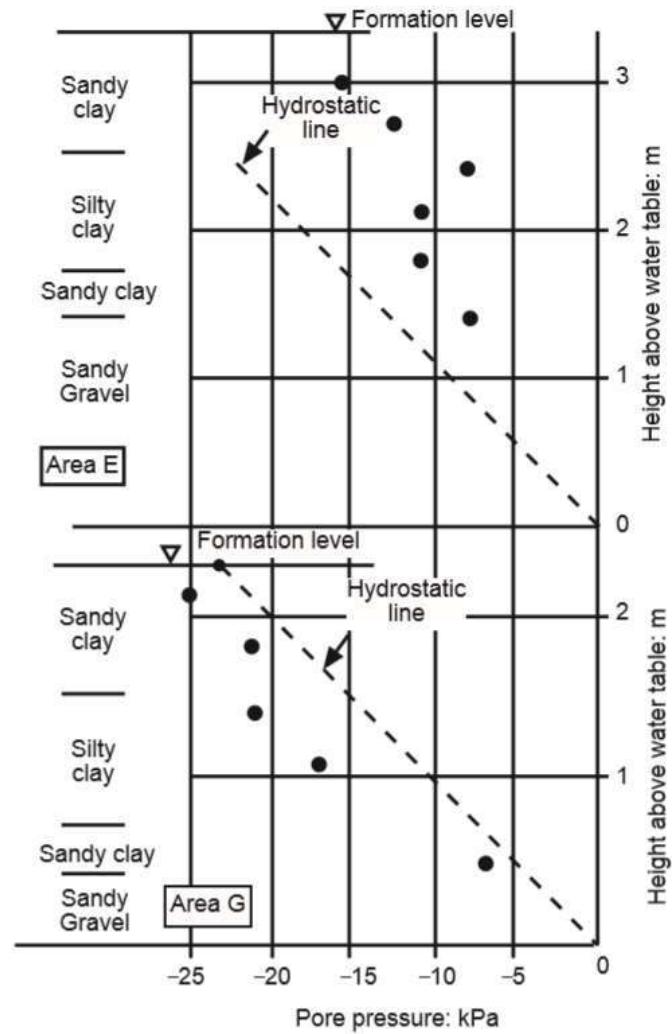
3.1 การทบทวนวรรณกรรมการตรวจวัดพฤติกรรม การรับน้ำหนักของโครงสร้างถนน

การศึกษาพฤติกรรม การรับน้ำหนักของโครงสร้างทางโดยการตรวจวัดในสนามได้มีการดำเนินการโดยหน่วยงานด้านทางหลวงในต่างประเทศกว่า 30 ปี อาทิ Army Corps of Engineers ในประเทศสหรัฐอเมริกา และ Transport Research Laboratory ในประเทศสหราชอาณาจักร (Rollings and Pittman 1992, Brown 1996, Goulias et al. 2011) พฤติกรรม การรับน้ำหนักที่ตรวจวัดได้มีการนำมาใช้ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์และออกแบบ ในด้านต่างๆ ได้แก่ load-induced stresses, load transfer, temperature-induced stresses, และ bonding for rigid overlays โดยได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เช่น แบบจำลอง Westergaard และ Finite element การศึกษาพฤติกรรม การรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนในสนามเหล่านี้นำไปสู่ข้อแนะนำการออกแบบที่ทันสมัยขึ้นเช่น การออกแบบด้วยวิธี Mechanistic-empirical (Guide for mechanistic-empirical pavement design of new and rehabilitated pavement structures, 2004)

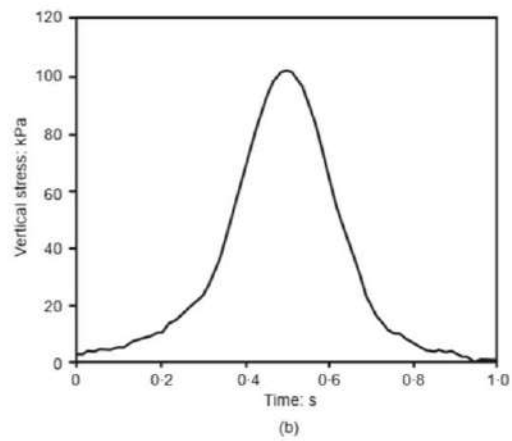
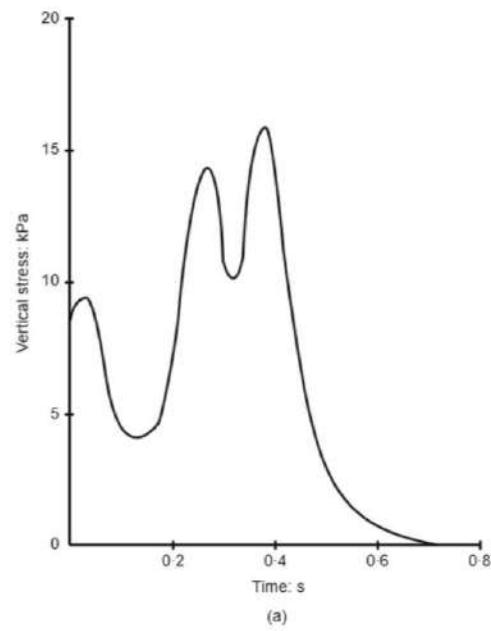
พฤติกรรม การรับน้ำหนักที่สำคัญของวัสดุงานทางจากผลการตรวจวัดในสนามในอดีตสามารถสรุปได้ดังนี้ (Brown, 1996)

- 1) วัสดุในโครงสร้างทางและดินถมโดยทั่วไปจะอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน และอยู่ใต้ผิวทางชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติป้องกันน้ำ (Sealed surface) อย่างไรก็ตามผิวทางอาจไม่สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำอย่างสมบูรณ์แบบ วัสดุโครงสร้างทางจึงอาจอยู่ในสภาวะอิ่มน้ำหรือไม่อิ่มน้ำก็ได้ ขึ้นกับฤดูกาลและสภาวะระบายน้ำของวัสดุ โดยทั่วไป เมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำ ค่าหน่วยแรงของน้ำในดินจะอยู่ในสภาวะแรงตึง (Tension) หรือแรงดูด (Suction) หรือแรงดันน้ำมีค่าติดลบ ดังแสดงใน รูปที่ 3.1
- 2) ในระหว่างการใช้งานถนน วัสดุชั้นทางจะถูกแรงกระทำหลายๆ ครั้ง ในระดับหน่วยแรงที่ต่ำกว่ากำลังเฉือน ดังแสดงใน รูปที่ 3.2a
- 3) ในระหว่างการก่อสร้าง วัสดุชั้นทางจะรับน้ำหนักกระทำมากกว่า เนื่องจากน้ำหนักของเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง แต่จำนวนครั้งของแรงกระทำน้อยกว่าในสภาวะการใช้งาน ดังแสดงใน รูปที่ 3.2b
- 4) ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักเพียงหนึ่งครั้ง วัสดุชั้นทางจะตอบสนองในลักษณะยืดหยุ่น (Resilient) ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 แต่อาจมีการสะสมความเค้นในลักษณะพลาสติกหรือหนืด (Irrecoverable

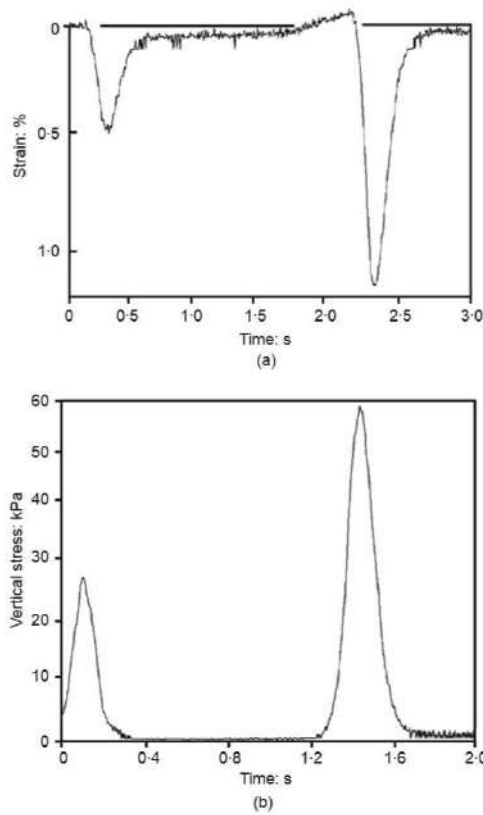
plastic and viscous strain) ได้เมื่อมีแรงกระทำซ้ำๆ (Repeated loading) โดยการเสียรูปจะขึ้นกับชนิดวัสดุและระดับความชื้นดังแสดงใน รูปที่ 3.4



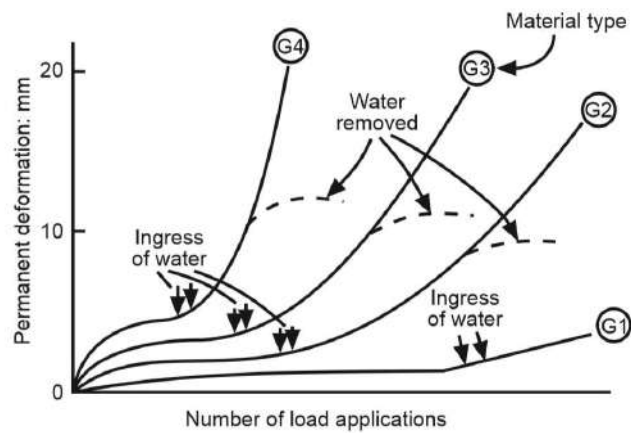
รูปที่ 3.1 แรงดันน้ำในช่องว่างของวัสดุชั้นทาง
(ที่มา : Brown, 1996)



รูปที่ 3.2 หน่วยแรงแนวตั้งในสนามในชั้น Subgrade
(ที่มา : Brown, 1996)



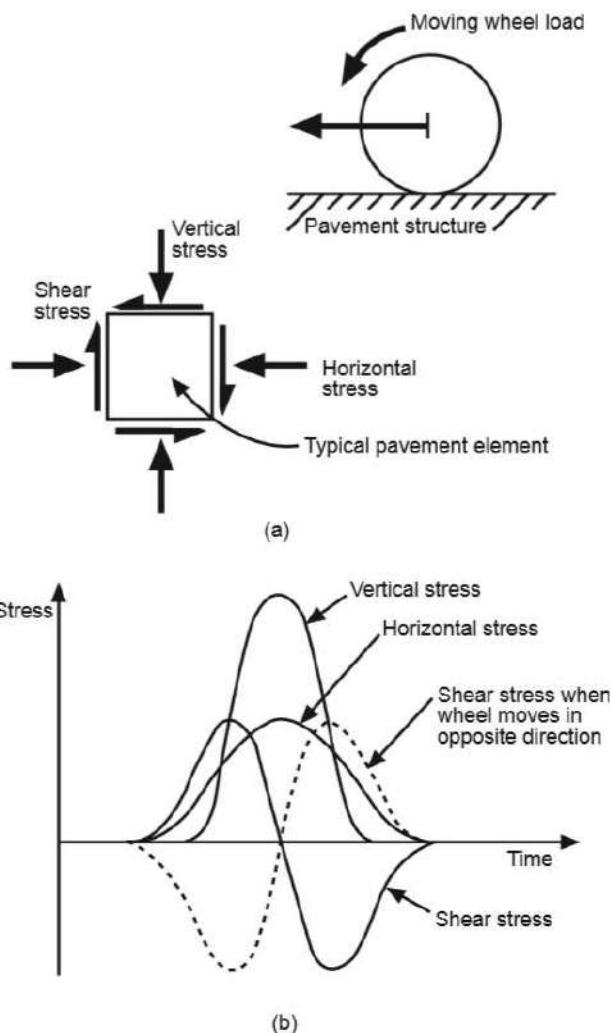
รูปที่ 3.3 ผลการตรวจวัดความเค้นและความเครียดของวัสดุงานทาง
(ที่มา : Brown, 1996)



รูปที่ 3.4 อิทธิพลจากน้ำ การระบายน้ำและชนิดของวัสดุ ต่อการเสียรูปถาวรของวัสดุงานทาง
(ที่มา : Brown, 1996)

Brown (1996) ได้อธิบายลักษณะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ขึ้นทางดังแสดงใน รูปที่ 3.5 เห็นได้ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวของล้อรถ (Longitudinal Plane) มีลักษณะการเพิ่มขึ้นคล้ายชีพจร (Pulse) โดยหน่วยแรงในแนวดิ่งและแนวราบเพิ่มขึ้นพร้อมกันและมีการเพิ่มขึ้นสองครั้งของหน่วยแรงเฉือนในทิศทางตรงกันข้าม

ซึ่งลักษณะของ Stress Pulse นี้ ได้มีการศึกษาโดย Barksdale (1971), Loulizi et al. (2002) พบว่าแสดงได้โดยสมการ Haversine หรือ Normalized Bellshape

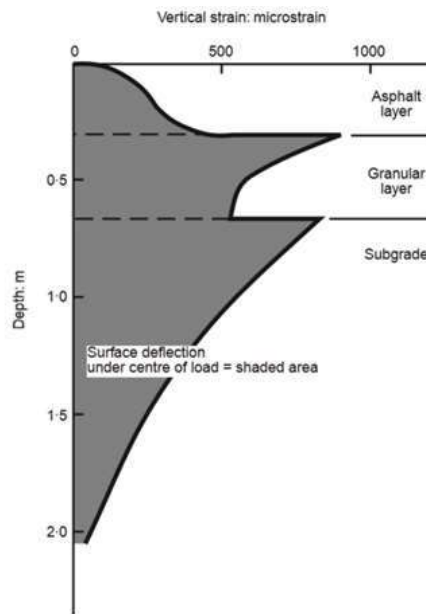


รูปที่ 3.5 สถานะของหน่วยแรงภายในชั้นทาง และการเปลี่ยนแปลงตามเวลา
(ที่มา : Brown, 1996)

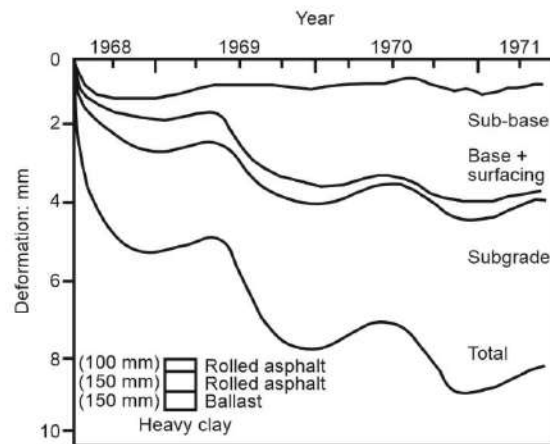
โดยทั่วไปแล้วการเสียรูปที่เกิดขึ้นที่ผิวทางในลักษณะการยุบตัวของร่องล้อ (Rutting) เกิดเนื่องจากการสะสมของความเครียดถาวรในแนวดิ่ง (Vertical Permanent Strains) ตามแนวล้อดังแสดงใน รูปที่ 3.6 ซึ่งเกิดจากความเครียดในแต่ละชั้นวัสดุรวมกันจนเกิดร่องล้อขึ้นบนผิวทางดังแสดงใน รูปที่ 3.7 แสดงการเสียรูปสะสมที่เกิดขึ้นแตกต่างกันในแต่ละชั้น อย่างไรก็ตามการเสียรูปที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ในบางกรณีอาจเกิดขึ้นมากในชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ในบางกรณีอาจเกิดขึ้นมากในชั้นวัสดุถม (Subgrade) โดยเฉพาะกรณีที่วัสดุมีคุณภาพต่ำ และระบายน้ำได้ไม่ดี

จากลักษณะการกระจายตัวค่าความเครียด (Strain) ในแต่ละชั้น ดังแสดงใน รูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าความเครียดมีการเปลี่ยนแปลงแบบกระทันหันในบริเวณรอยต่อของวัสดุซึ่งมีสมบัติต่างกัน ดังนั้นในการติดตั้งอุปกรณ์จึงควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเครียด (Strain Gauge) ที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุสองชั้น

แต่แนะนำให้ติดตั้งเหนือรอยต่อขึ้นไปอย่างน้อย 1 ซม. ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่รัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา โดย Sargand et al. (2012) ซึ่งเป็นวิธีที่ทางคณะผู้วิจัยได้เสนอในการศึกษาในครั้งนี้และจะได้อธิบายต่อไป



รูปที่ 3.6 ลักษณะ Resilient vertical strain ตามความลึก สำหรับผิวทาง Asphalt Z
(ที่มา : Brown et al., 1987)



รูปที่ 3.7 การเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) ในชั้นวัสดุสร้างทางแต่ละชั้นที่พัฒนาขึ้นตามเวลา
(ที่มา : Brown, 1996)

การตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างถนนมีอยู่มากมายในอดีต อาทิ Barksdale (1971), Tabatabaee et al. (1992), Rada et al. (1994), Maadani et al. (2015), Leandri et al. (2013), Yin (2013), Brown et al. (2012), Elseifi et al. (2012), Uzarowski et al. (2012), Goulias et al. (2011),

Leiva-Villacorta & Timm (2011), Timm & Priest (2007), Chen et al. (1999), Chen et al. (1996), Okamoto et al. (1995), Čygas et al., (2014), Al-Qadi et al. (2004), Zhao et al. (2014), Loulizi et al. (2002) ซึ่งเป็นการสร้างองค์ความรู้และนำไปสู่การพัฒนาการออกแบบผิวทางได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้กล่าวมาแล้ว

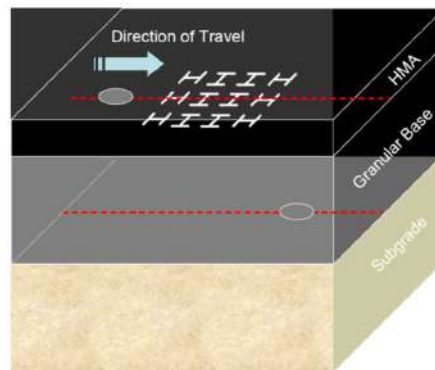
ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยี Smart Sensors มาใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมของวัสดุสร้างทาง อาทิ Alavi et al. (2016), Bao et al. (2016) ได้ใช้เซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กทริก ซึ่งได้พลังงานจากการสั่นสะเทือนจากการจราจรเอง (Piezoelectric Self-powered Sensing Technology) เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถใช้เป็นระบบตรวจวัดคุณภาพทางได้อย่างดี (Heath Monitoring of Pavement)

การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete AC) โดยการตรวจวัดพฤติกรรม โดย Islam & Tarefder (2013), Bayat et al., (2012) พบว่าอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อผิวทาง AC มีสองด้านด้วยกัน (1) วัสดุผิวทางมีการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อให้เกิดความเครียด (Strains) และ (2) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าโมดูลัสของวัสดุ AC เปลี่ยนแปลงไปด้วย พฤติกรรมตอบสนองด้านความเค้นและความเครียดจึงเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน การศึกษาโดย Islam & Tarefder (2013) พบว่าค่าหน่วยแรงในแนวตั้ง (Vertical Stress) และความเครียดในแนวราบ (Horizontal Strain) ที่ด้านล่างของชั้น แอสฟัลต์คอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.41 ถึง 1.88 เท่าในช่วงบ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเช้าสำหรับสภาพภูมิอากาศรัฐ New Mexico ประเทศสหรัฐอเมริกา

สำหรับอิทธิพลจากระดับความชื้นต่อวัสดุสร้างทาง ได้มีการศึกษาโดยการตรวจวัดในสนาม อาทิ Diefenderfer et al. (2000) โดยทั่วไปจะศึกษาโดยอุปกรณ์ Time Domain Reflectometry, TDR ซึ่งเป็นการวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้านไดอิเล็กทริกของวัสดุ (Dielectric Property) ซึ่งพบว่าความชื้นจะมีผลต่อวัสดุชั้น Subgrade โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่วัสดุมีขนาดเม็ดละเอียดเป็นปริมาณมาก การศึกษาพื้นฐานด้านความชื้นต่อพฤติกรรมวัสดุสร้างทางเหล่านี้ได้นำไปสู่การออกแบบโดยพิจารณาความชื้นและแรงดูด อาทิ Vanapalli & Han (2014), Barrett & Timm (2005)

ในปี 2004 National Center for Asphalt Technology (NCAT) Auburn University ได้ทำการก่อสร้างแปลงทดสอบ NCAT Test Track ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อทำการตรวจสอบแบบจำลองชั้นทาง 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองและประสิทธิภาพของชั้นทาง 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบพลศาสตร์ต่อการเสื่อมสภาพของชั้นทาง และ 4) เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้น Polymer Modification ต่อประสิทธิภาพชั้นทาง ดังนั้นจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้ง Pressure Cell, Strain Gauge, Temperature Sensors และ Moisture Sensors ลงไปในชั้นโครงสร้างทาง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.8 โดยในรายงาน Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track (Tim et al. 2004) ซึ่งเป็นรายงานที่กล่าวถึงการติดตั้งเครื่องมือต่างๆ ในการศึกษาได้ระบุถึงเหตุผลในการคัดเลือกเครื่องมือรุ่นต่างๆ อันประกอบไปด้วย ความสามารถของเครื่องมือ ระยะเวลาในการจัดส่ง ความน่าเชื่อถือ และความต่อเนื่องจากการศึกษาก่อนหน้า โดยได้กล่าวถึงความถี่ในการจัดเก็บข้อมูลว่าค่าความชื้นและอุณหภูมินั้นสามารถจัดเก็บได้ด้วยความเร็วต่ำ (ในรายงานของ NCAT นี้เก็บข้อมูลที่ความถี่ประมาณ 1 ครั้ง/นาติ) ส่วนความเค้นและความเครียดนั้นแนะนำให้จัดเก็บด้วยความเร็วสูง (ในรายงานของ NCAT นี้เก็บข้อมูลที่ความถี่ได้สูงถึง 250,000 Hz) โดยในรายงานได้สรุป นอกจากนี้ยังได้ระบุถึง

ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือต่างๆ เช่น การติดตั้ง Asphalt Strain Gauges ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 โดยจะเน้นไปในสิ่งที่ควรระมัดระวัง เช่น การจัดวางเครื่องมือ การบดอัด เป็นต้น อย่างไรก็ตามแม้จะดำเนินการด้วยความระมัดระวังแล้วก็ตาม แต่พบว่าอัตราการอยู่รอดของ Strain Gauge นั้นมีค่าประมาณ 65% เท่านั้น ส่วนอัตราการอยู่รอดของ Pressure Cell นั้นอยู่ที่ 100% ดังนั้นจึงนับว่าจำเป็นที่เครื่องมือทั้งหมดจะต้องถูกตรวจสอบสภาพความพร้อมในการใช้งานทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง เพื่อให้สามารถทราบได้ว่าเครื่องมือที่อยู่ในสมบูรณ์พร้อมใช้งานหรือไม่ โดยรายงานนี้ยังได้เสนอข้อแนะนำว่าการจัดเก็บและส่งข้อมูลแบบไร้สายนั้นจะทำให้การเก็บข้อมูลนั้นมีความสะดวกเป็นอย่างมาก และคาดว่าพัฒนาการของเทคโนโลยีจะช่วยให้อัตราการอยู่รอดของเครื่องมือสูงขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างชั้นทางได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างชั้นทาง
(ที่มา : Timm et al., 2004)



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการติดตั้ง Asphalt Strain Gauge
(ที่มา : Timm et al., 2004)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการกลบ Asphalt Strain Gauge

(ที่มา : Timm et al., 2004)

ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยกรมการขนส่งแห่งรัฐโอไฮโอ (Ohio Department of Transportation) ร่วมกับหน่วยงานกลางในการบริหารทางหลวง (Federal Highway Administration) ได้เริ่มศึกษาวิจัยในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนทดสอบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1994 โดยมีรายการอุปกรณ์ตรวจวัดดังแสดงใน รูปที่ 3.11 และมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บนถนนคอนกรีตและถนนลาดยางดังแสดงใน รูปที่ 3.12 และ รูปที่ 3.13

ในปี ค.ศ. 2002 กรมทางหลวงแห่งรัฐโอไฮโอ (Ohio Department of Transportation) ร่วมกับกรมทางหลวงแห่งรัฐนิวยอร์ก (New York Department of Transportation) และการทางหลวงแห่งชาติ (Federal Highway Administration) ได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีตและถนนลาดยางที่ใช้งานจริงในรัฐนิวยอร์กในดังแสดงใน รูปที่ 3.14 ถึง รูปที่ 3.19

ในการติดตั้งแปลงตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างถนนคอนกรีตบนทางหลวงหมายเลข I490 ในมลรัฐ New York เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของถนนที่ใช้ Dowel Bar และ Tie Bar ที่มีขนาดและระยะห่างที่แตกต่างกันและเพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่อการตอบสนองของโครงสร้างถนน โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างถนนบนทางหลวงหมายเลข I490 ฝั่งตะวันตก ประกอบด้วยอุปกรณ์ Linear Variable Displacement Transducer (LVDT), Thermocouple และ Vibrating Wire เพื่อตรวจวัดค่าความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ในโครงสร้างถนนและใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ซึ่งมีความถี่ 80 Hz ในการบันทึกข้อมูลผลการตรวจวัด คณะผู้วิจัยในต่างประเทศได้ทำการสุ่มเก็บข้อมูลเป็นรายเดือนเป็นระยะเวลา 3 ปีตั้งแต่ปี 2002 ถึง 2004 นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยในต่างประเทศยังใช้อุปกรณ์ Dipstick ในการสำรวจความเรียบและการโก่งตัวของผิวทางและทำการทดสอบ FWD เพื่อตรวจสอบค่า Deflection และ Load Transfer ควบคู่ไปด้วย โดยคณะผู้วิจัยในต่างประเทศยังได้กล่าวอีกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain) ได้ชำรุดเสียหายทั้งหมดหลังจากใช้งานได้ประมาณ 3-4 ปี

ในการติดตั้งแปลงตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างถนนลาดยางบนทางหลวงหมายเลข I86 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองระหว่างผิวทางลาดยางแบบปกติ (AC Pavement) กับผิวทางลาดยางแบบคงทนถาวร (Perpetual AC Pavement) โดยแต่ละสถานีตรวจวัดจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่

3.16 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ LVDT, Pressure Cell, Strain Gage และ Thermocouple รูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) จากการทดสอบ FWD โดยอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) หมายเลข DYN4 ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางลาดยางและวางในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางจราจร ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) หมายเลข DYN3 ติดตั้งใต้ชั้นผิวทางลาดยางและวางในทิศทางขนานกับทิศทางจราจร คณะผู้วิจัยในต่างประเทศได้ทำการซุ่มจับเก็บข้อมูลเป็นรายเดือนตั้งแต่ปี 2007 ถึง 2011 โดยอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ในชั้นผิวทางลาดยางได้ชำรุดเสียหายอันเนื่องจากความล้า (Fatigue) หลังจากใช้งานได้ประมาณ 2 ปี นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบและจัดเก็บข้อมูลรอยแตกของผิวทางรวมถึงได้ทำการทดสอบ FWD อย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ระบบการตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักจริงยังนำมาใช้ในการติดตามตรวจสอบความแข็งแรงของสนามบินดังตัวอย่างใน รูปที่ 3.20

Category	Parameter Monitored	Sensor To Be Used
Response Parameters	Strain (AC Sections)	Dynatest Past-II AC
	Strain (PCC Sections)	Dynatest Past-II PCC TML KM-100B TML PMR-60 Carlson A-8
	Deflection	Schaevitz GPD 121-500 DC-LVDT
	Pressure	Geokon Model 3500 Pressure Cell
Seasonal Parameters	Base/Subbase Temperature	MRC Thermistor Probes
	Pavement Temperature	MRC Thermistor Probes
	Volumetric Water Content	TDR Probes
	Frost Depth	CRREL Resistivity Probes

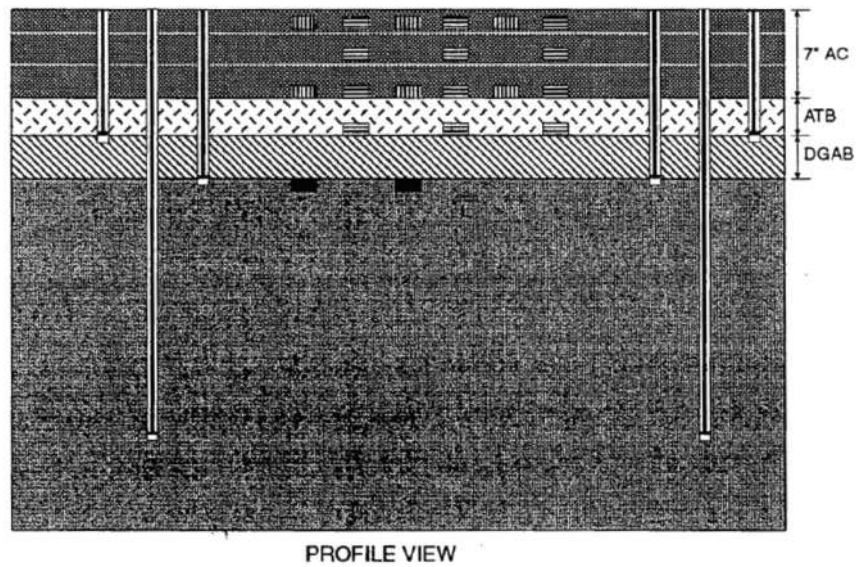
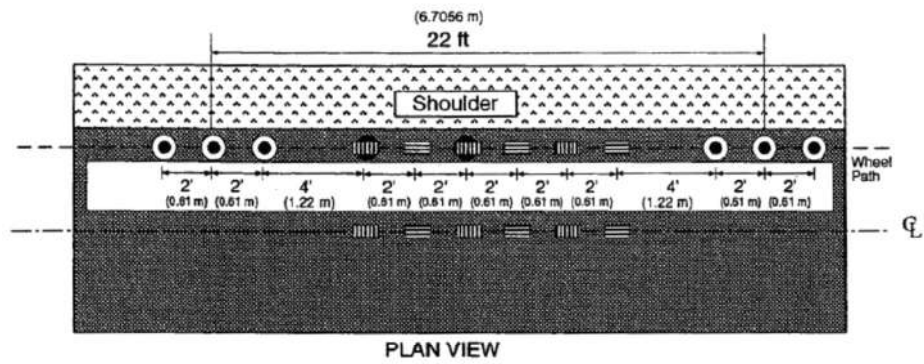
Seasonal Parameter Instrumentation

- ⏏ Resistivity Probes
Figure 2.3
- FHWA TDR Probes
- ⏏ Thermistor Probes
Figure 2.2
- ⏏ Surface Temperature Probe

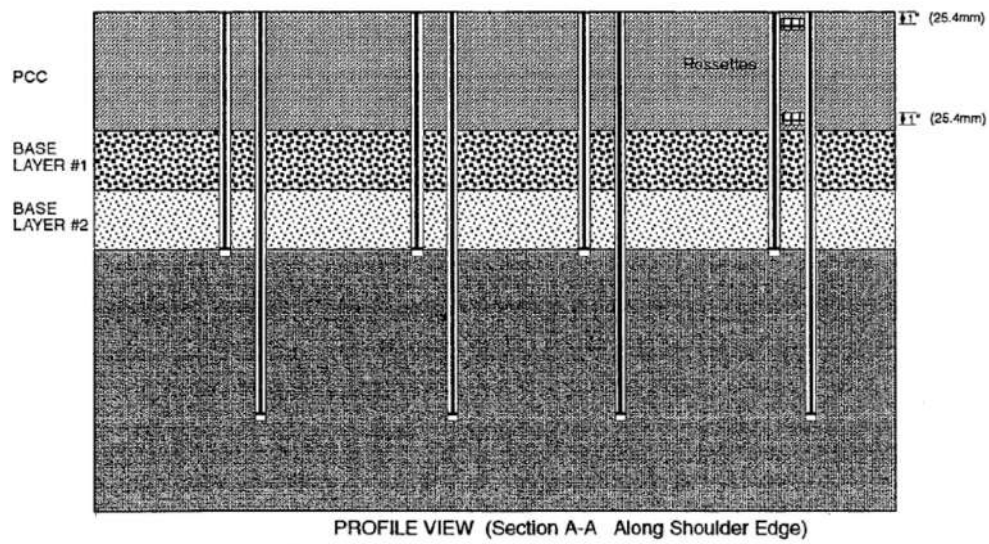
Structural Response Instrumentation

- ODOT KM-100B GAGE
- ODOT DYNATEST GAGE
- SHRP DYNATEST GAGE
- ODOT CARLSON A-8 GAGE
- SHRP LVDT
- ODOT LVDT
- ODOT PRESSURE CELL
- SHRP PRESSURE CELL
- ⏏ ODOT ROSSETTES PMR-60

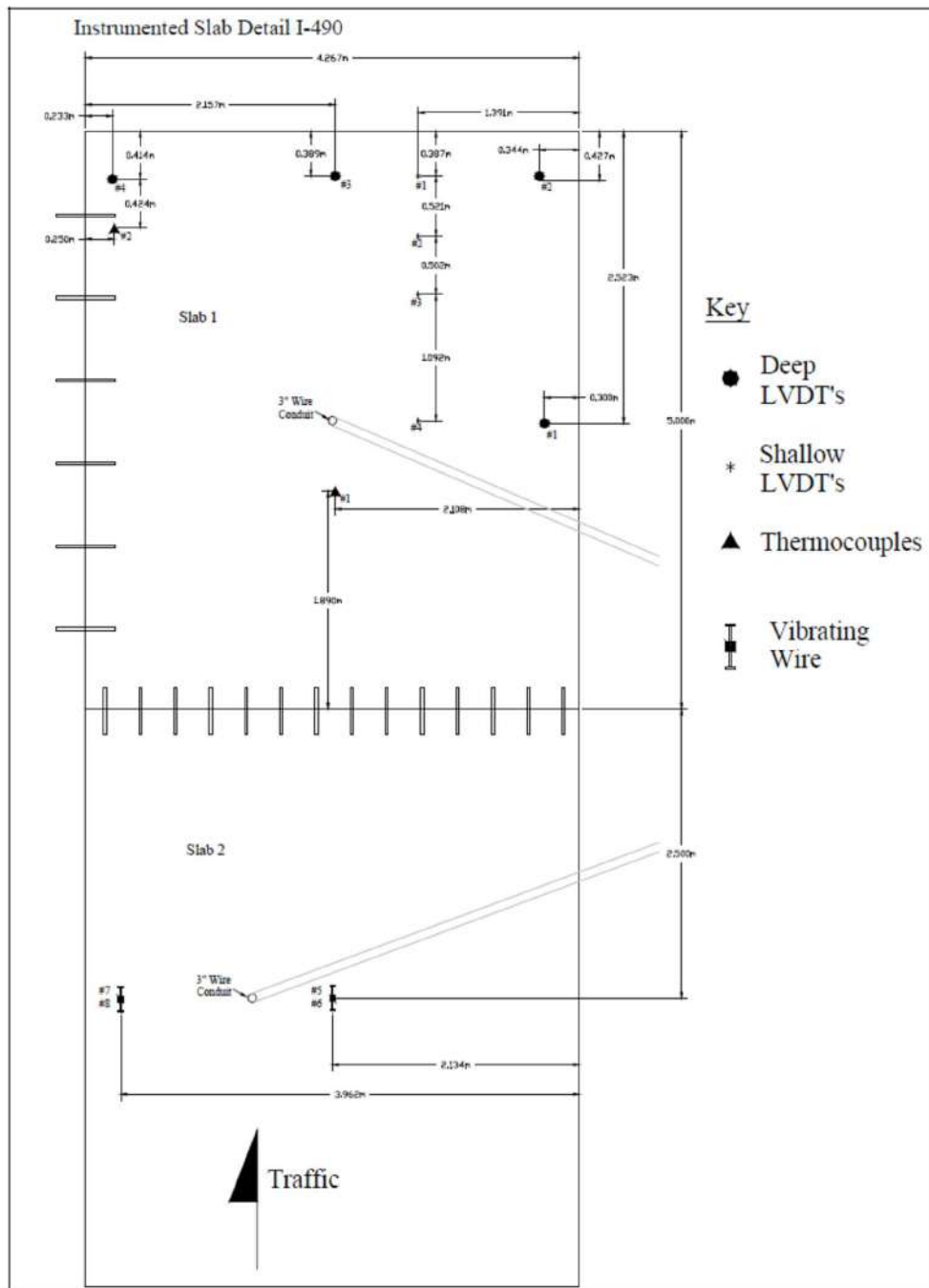
รูปที่ 3.11 รายการอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนของรัฐโอไฮโอ
(ที่มา : Sargand, 1994)



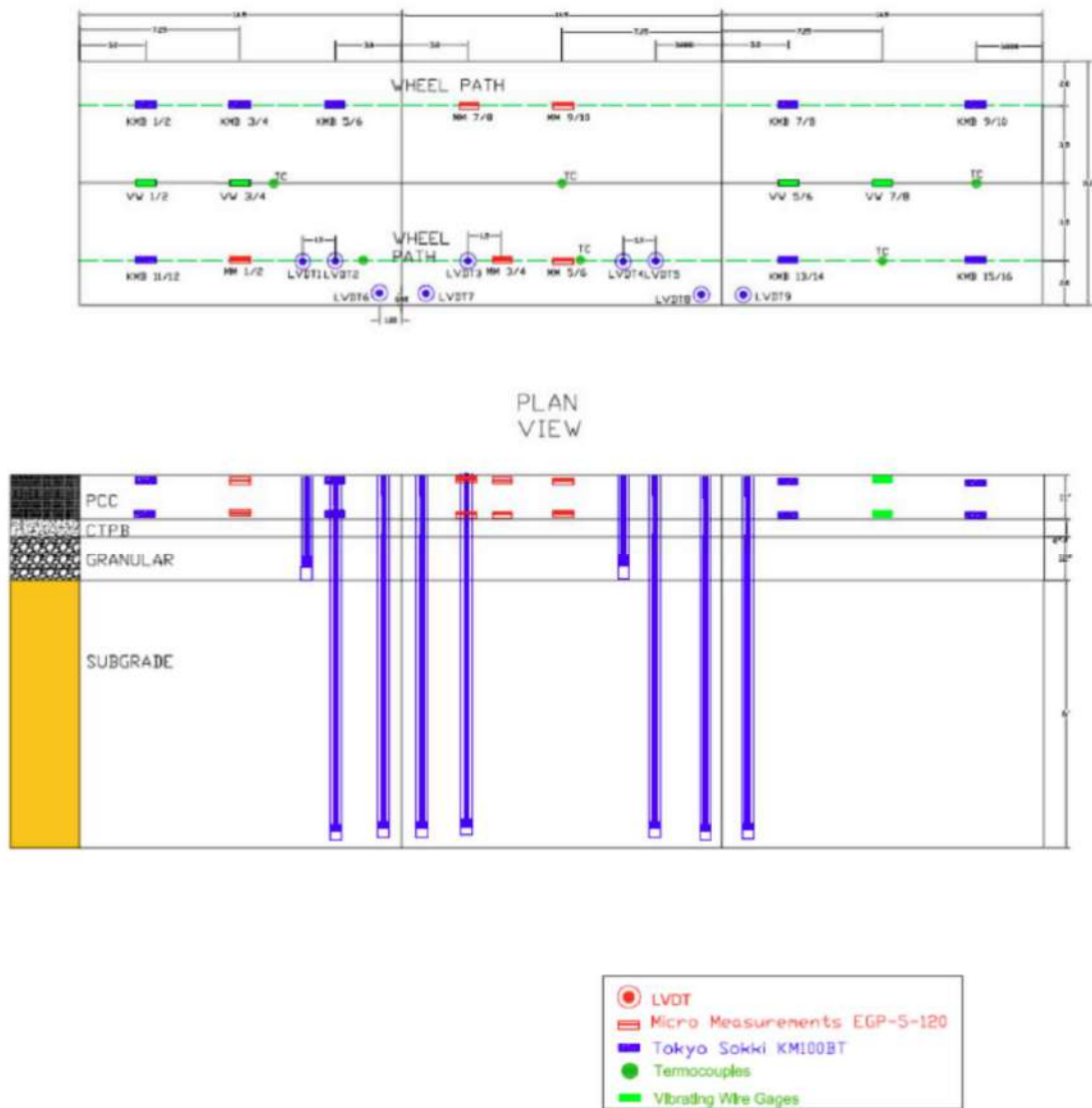
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของ
โครงสร้างถนนลาดยางของรัฐโอไฮโอ
(ที่มา : Sargand, 1994)



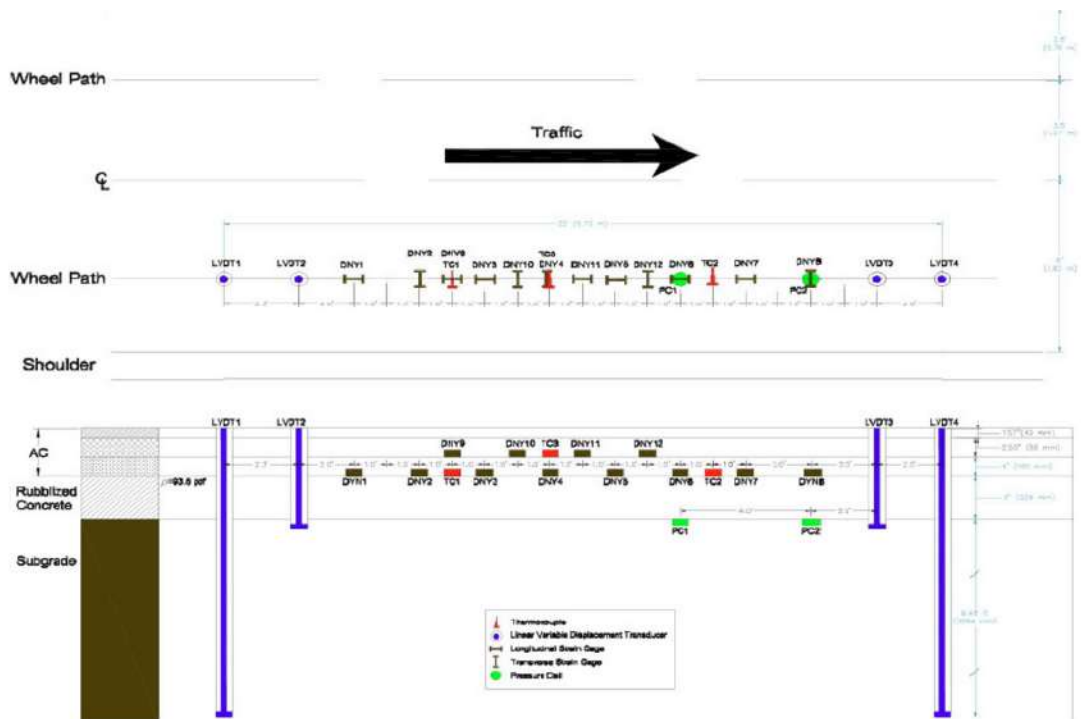
3-12



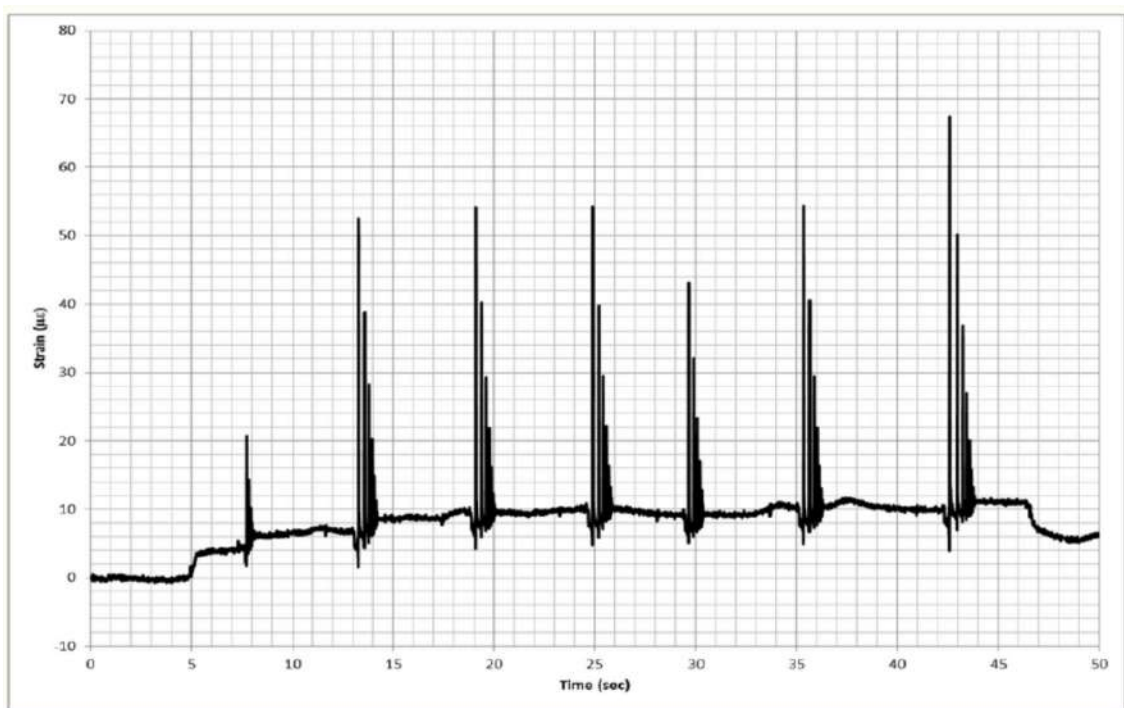
รูปที่ 3.14 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีต
บนทางหลวง I-490 ของรัฐนิวยอร์ก
(ที่มา : Sargand et al., 2012)



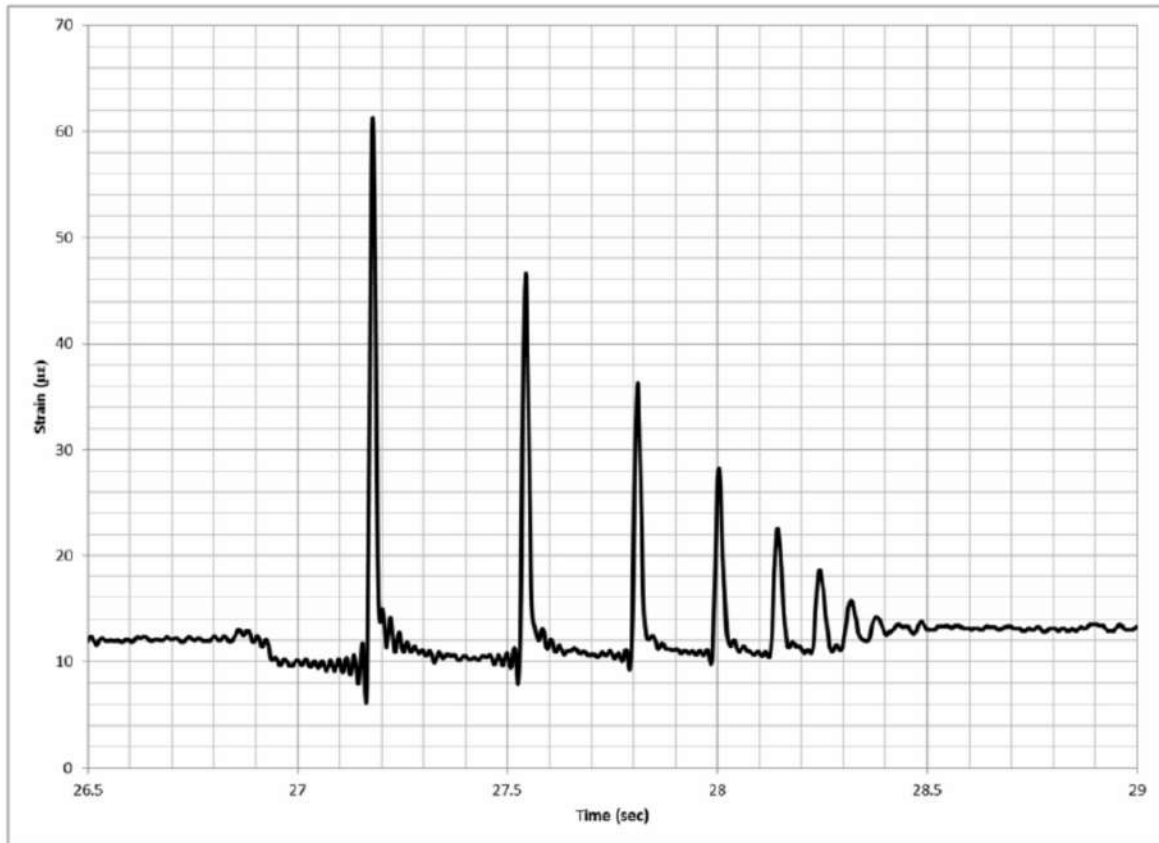
รูปที่ 3.15 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีต
บนทางหลวง RT9A ของรัฐนิวยอร์ก
(ที่มา : Sargand et al., 2012)



รูปที่ 3.16 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างถนนคอนกรีตเดิม
ที่บดให้แตกแล้วปูผิวลาดยางปิดทับ บนทางหลวง I-86 ของรัฐนิวยอร์ก
(ที่มา : Sargand et al., 2012)



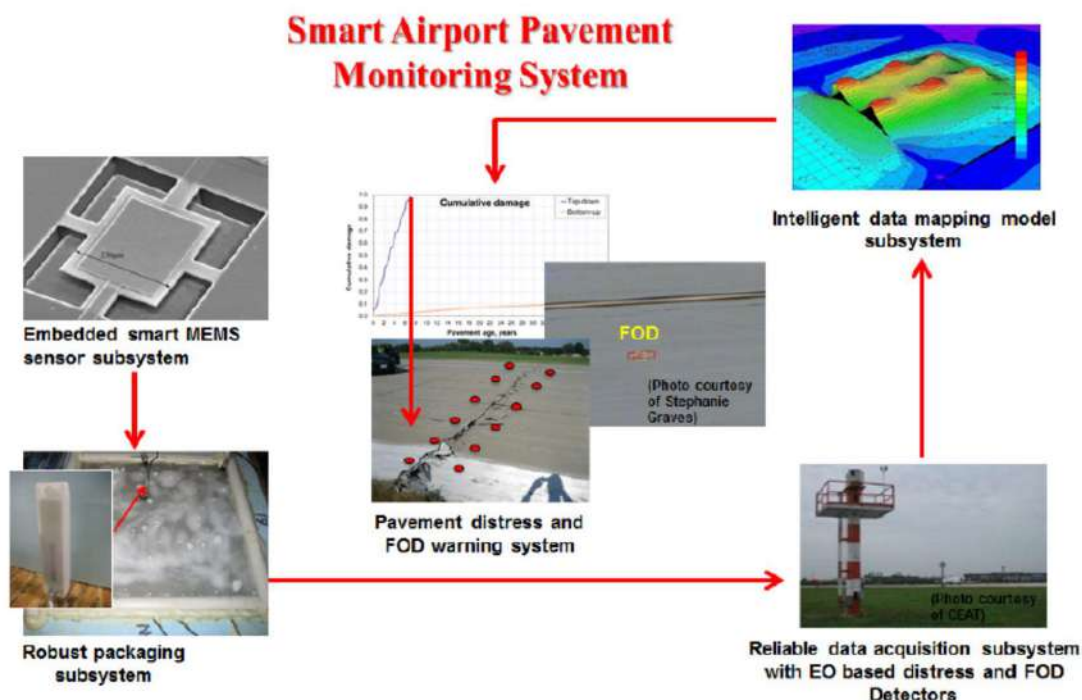
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ของอุปกรณ์หมายเลข DYN4 จากการ
ทดสอบ FWD



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียด (Strain) ของอุปกรณ์หมายเลข DYN3 จากการทดสอบ FWD



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของรัฐนิวยอร์ก (ที่มา : Sargand et al., 2012)



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมและการตอบสนองของ
โครงสร้างสนามบินในรัฐนิวยอร์ก

(ที่มา : Yang et al., 2014)

3.2 การประเมินอิทธิพลจากวัสดุพื้นทาง (Base) ต่อความชื้นในชั้นถม (Subgrade)

ในการศึกษาโดย Sargand et al., (2006) ได้ติดตามค่าความชื้นใต้วัสดุพื้นทางชนิดต่างๆ ได้แก่ Granular Aggregate Base (GB) Lean Concrete Base (LCB) Permeable Asphalt Treated Base (PATB) และ Asphalt Treated Base (ATB) ทั้งสำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์ (Asphalt Concrete, AC) และ แบบคอนกรีต (Jointed Concrete Pavement, JCP) ในแปลงทดลองรูปแบบต่างๆ 17 รูปแบบ ดังสรุปในตารางที่ 3.1 โดยติดตามตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ TDR เป็นระยะเวลากว่า 6 ปี ดังแสดงตัวอย่างผลในรูปที่ 3.21 จากผลการตรวจวัดดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ค่าความชื้นสูงสุด มีค่าใกล้เคียงกันในทุกความลึก
- การเปลี่ยนแปลงความชื้นบริเวณใกล้ผิวชั้น Subgrade มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ความลึก 200-300 มม. จากผิวชั้น Subgrade
- ที่ความลึก 2 เมตร ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าที่ใกล้ผิว Subgrade

และพบว่าความแปรปรวนของความชื้นในชั้น Subgrade ขึ้นกับปัจจัยต่างๆดังนี้

- ชนิดของวัสดุ ค่าความชื้นที่สภาวะอิ่มตัว ค่าความชื้นน้ำ ขนาดคละ
- สภาพสิ่งแวดล้อม
- ลักษณะทางภูมิประเทศ
- ค่าความชื้นน้ำของวัสดุ Base

○ สภาพของวัสดุผิวทาง (Pavement Condition)

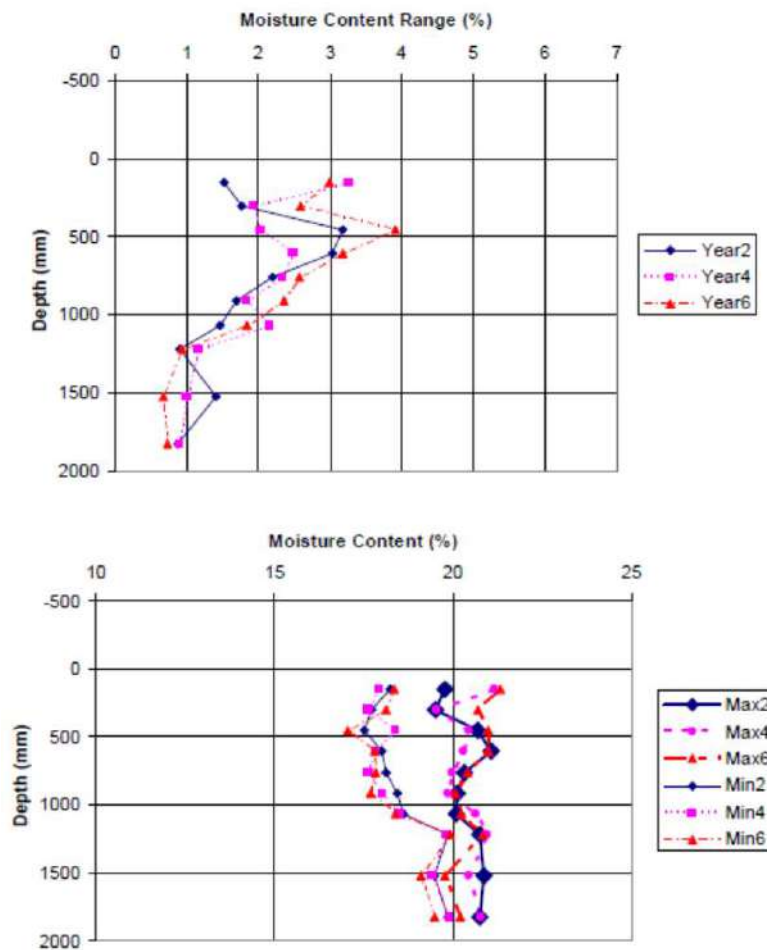
และยังพบว่าเนื่องจากปกติแล้ว วัสดุ Subgrade อาจมีลักษณะเปลี่ยนแปลงได้ทั้งในแนวนราบและแนวตั้ง และเนื่องจากค่าความชื้นในสภาวะอิ่มน้ำ (Saturated Moisture Content) ก็ขึ้นกับชนิดของวัสดุ ดังนั้น ค่าความชื้นที่วัดได้อาจจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของวัสดุมากกว่าปริมาณของน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงตามปัจจัยภายนอก ในการศึกษาครั้งนี้มีสมมุติฐานที่ว่าหากชนิดของวัสดุชั้น Base จะส่งผลกระทบต่อค่าความชื้นในชั้น Subgrade ค่าความชื้นในชั้น Subgrade น่าจะมีความแตกต่าง โดยหากค่าความชื้นในชั้น Subgrade มีค่ามากแสดงถึงสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ หากค่าความชื้นในชั้น Subgrade มีค่าน้อยแสดงว่าชั้น Subgrade ได้รับการป้องกันอย่างดีพอ

ทั้งนี้จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นประเภท TDR จะขึ้นกับชนิดวัสดุอย่างมาก ดังนั้นจึงควรจะต้องติดตั้งเซนเซอร์ TDR ในบริเวณกึ่งกลางของชั้นวัสดุ เพื่อให้ค่าที่ได้เป็นตัวแทนของชั้นวัสดุนั้นๆ และไม่แนะนำให้ติดตั้งที่รอยต่อของวัสดุสองชนิด เนื่องจากจะทำให้การแปลผลทำได้ยากลำบากขึ้นมาก ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้กำหนดเป็นแนวทางในการติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาครั้งนี้แล้ว ดังจะได้อธิบายต่อไป

ตารางที่ 3.1 แปลงทดสอบรูปแบบต่างๆในการศึกษาโดย Ohio Department of Transport

(ที่มา : Sargand and Wu, 2006)

Site	Surface	Base	Subgrade	Location	Remark
370201	8" (20 cm) JCP	6" (15 cm) GB	A-6	NC	
370205	8" (20 cm) JCP	6" (15 cm) LCB	A-6	NC	
370208	11" (28 cm) JCP	6" (15 cm) LCB	A-6	NC	
370212	11" (28 cm) JCP	4" (10 cm) PATB / 4" (10 cm) GB	A-6	NC	
390101	7" (18 cm) AC	8" (20 cm) GB		OH	Pavement Failed
390102	4" (10 cm) AC	12" (30 cm) GB		OH	Pavement Failed
390104	7" (10 cm) AC	12" (30 cm) ATB		OH	
390108	7" (18 cm) AC	4" (10 cm) ATB / 4" (10 cm) GB		OH	
390110	7" (18 cm) AC	4" (10 cm) ATB / 4" (10 cm) PATB	A-4	OH	Pavement Failed
390112	4" (10 cm) AC	12" (30 cm) ATB / 4" (10 cm) PATB		OH	
390201	8" (20 cm) JCP	6" (15 cm) GB		OH	
390202	8" (20 cm) JCP	6" (15 cm) GB	A-6	OH	
390204	11" (28 cm) JCP	6" (15 cm) GB		OH	
390205	8" (20 cm) JCP	6" (15 cm) LCB	A-6	OH	
390208	11" (28 cm) JCP	6" (15 cm) LCB		OH	
390211	11" (28 cm) JCP	4" (10 cm) PATB / 4" (10 cm) GB	A-6	OH	
390212	11" (28 cm) JCP	4" (10 cm) PATB / 4" (10 cm) GB		OH	

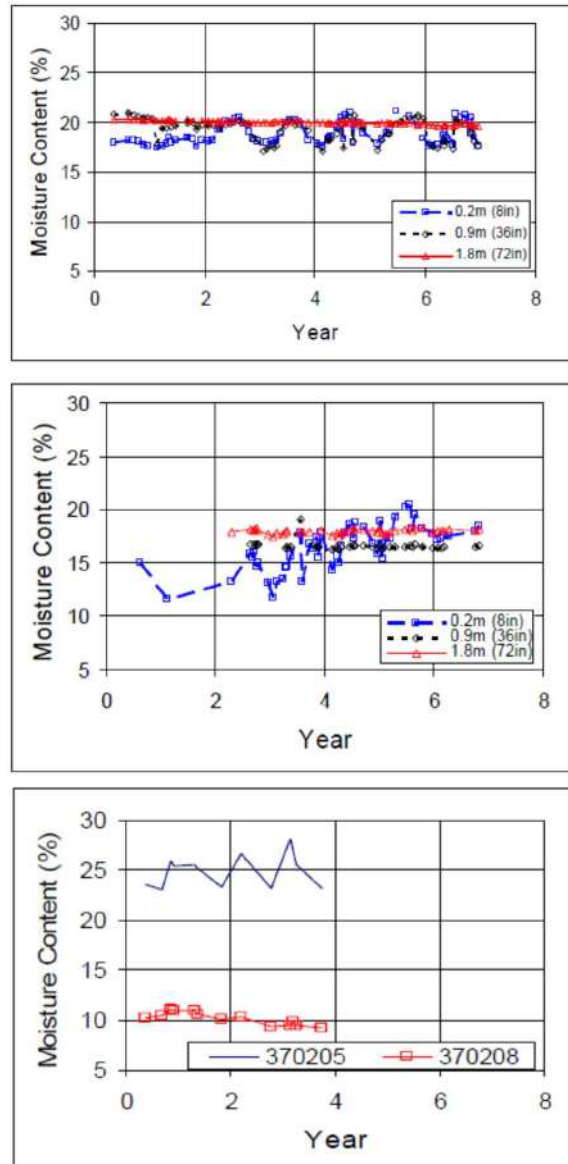


รูปที่ 3.21 ตัวอย่างค่าความชื้นในชั้นวัสดุ Asphalt Treated Base (ATB) ตามความลึกจากการตรวจวัดในช่วง 6 ปี ของรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา

(ที่มา : Sargand et al., 2006)

จากผลการวัดความชื้นในชั้น Subgrade โดย Sargand et al. (2006) ในช่วงระยะเวลากว่า 6 ปี โดยเปรียบเทียบชนิดวัสดุผิวทางแบบต่าง สรุปได้ดังนี้

- การแปรปรวนของความชื้นในชั้น Subgrade ได้ผิวทาง GB, ATB และ PATB มีความใกล้เคียงกัน บ่งชี้ว่าไม่มีอิทธิพลจากชนิดของชั้น Base ทั้งสามชนิดต่อความชื้นใน Subgrade ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ความชื้นในชั้น Subgrade ได้ผิวทาง Lean Concrete Base (LCB) มีความแปรปรวนอย่างมากในแต่ละพื้นที่ที่ตรวจวัด ซึ่งคาดว่าเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์ TDR และเกิดจากรอยแตกร้าวของชั้น LCB เนื่องจากการหดตัว (Contraction crack) การตรวจสอบในสนามพบว่า ผิวสัมผัสระหว่าง concrete slab และ LCB สามารถเป็นช่องทางให้น้ำไหลซึมผ่านได้ หากข้อสังเกตนี้เป็นจริง แสดงว่าประสิทธิภาพของ LCB อาจไม่เหมาะสมได้
- อย่างไรก็ดี Sargand et al. (2006) ได้กล่าวว่าผลการศึกษานี้ยังไม่อาจสรุปได้ว่าชนิดของวัสดุ Base มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความชื้นในชั้น Subgrade แต่ได้แนะนำไว้ว่าหากรักษาสภาพผิวทางที่ดีจะสามารถลดอิทธิพลด้านลบจากรอยร้าวในชั้น LCB ต่อการเพิ่มความชื้นในชั้น Subgrade ได้



รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในชั้นวัสดุ Base ชนิดต่างๆ

(Granular Aggregate Base (GB) Lean concrete Base (LCB) Permeable Asphalt Treated Base (PATB) และ Asphalt Treated Base (ATB) ตามเวลาและความลึก จากการตรวจวัดในช่วง 6 ปี
ของรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา

(ที่มา : Sargand et al., 2006)

3.3 การสอบเทียบผลการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างทางด้วยแบบจำลอง Finite element โดย Sargand and Abdalla (2006)

การศึกษานี้เป็นการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง Finite Element ที่โปรแกรมด้วยกันได้แก่ ISLAB2000, JSLAB, EVREFE, and OU3D สำหรับผิวทางคอนกรีต (Rigid pavement) จากข้อมูลการตรวจวัดโดย Ohio SHRP Test Road โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองต่ออิทธิพลด้านต่างๆ ได้แก่ การบ่ม และการเพิ่มขึ้นลงของอุณหภูมิ และแรงกระทำแบบพลวัตและสภาพแวดล้อมต่างๆ การศึกษานี้ยังใช้ในการออกแบบระยะที่เหมาะสมของรอยต่อแผ่นคอนกรีต (Optimization of Concrete Slab Joint Spacing) เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิและการจราจร โดยใช้แบบจำลองที่สอบเทียบขึ้นนี้ในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาความล้าในวัสดุชั้นทาง (Rigid Pavement Fatigue Model)

ในการศึกษานี้ได้ระบุแนวทางการสอบเทียบแบบจำลอง Finite Element ไว้สามแนวทางด้วยกันได้แก่

- 1) เปรียบเทียบแบบจำลอง Finite Element กับการตรวจวัดในสนามภายใต้สภาวะรับน้ำหนักที่เหมือนกัน
- 2) เปรียบเทียบแบบจำลอง Finite Element กับวิธี Closed Form Solutions
- 3) เปรียบเทียบแบบจำลอง Finite Element กับแบบจำลอง Finite Element อื่นซึ่งได้รับการสอบเทียบมาแล้ว

ซึ่งได้มีการสรุปการสอบเทียบไว้ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

จากผลการศึกษาโดย Sargand and Abdalla (2006) สามารถสรุปได้ดังนี้

- แบบจำลอง Finite Element สามารถประมาณค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวัดพฤติกรรมค่าความเครียด (Strain) ค่าแรงดัน และค่าการแอ่นตัว ในสนาม ดังแสดงใน รูปที่ 3.23 ถึง รูปที่ 3.25
- ค่าความเค้นดรีเวอร์ซัล (Stress Reversals) ระหว่างเพลารากและเพลาสองมีค่าสูงเท่ากับค่าความเครียดสูงสุดภายใต้เพลาราก (Peak Stress Under the Truck Axles) ดังนั้นจึงแนะนำให้พิจารณา ความเค้นดรีเวอร์ซัล (Stress Reversals) ในการออกแบบชั้นทาง เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดความเค้นดึง (Tension Stress) ที่ด้านบนของแผ่นคอนกรีต
- ค่าการแอ่นตัวที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Finite Element มีค่าสอดคล้องกับผลการตรวจวัดสำหรับโปรแกรม ISLAB2000, JSLAB, และ EVERFE ค่าการแอ่นตัวขึ้นกับค่า Subgrade Modulus อย่างมาก และพบพฤติกรรมการสั่นไหวของแผ่นคอนกรีต ในโปรแกรม ISLAB2000 และ JSLAB.21 โดยเฉพาะเมื่อกำหนดให้ Modulus of Subgrade Reaction มีค่ามากขึ้น
- โปรแกรม EVERFE ไม่สามารถใช้ทำนายค่าแรงดันในแนวตั้ง (Vertical Pressure) ได้ ในขณะที่โปรแกรมอื่นๆสามารถทำนายแนวโน้มพฤติกรรมได้
- โปรแกรม ISLAB2000 และ JSLAB ใช้วิธี Finite Element แบบ 2 มิติ ความแตกต่างจากแนวโน้มที่วัดได้ในสนามสามารถแก้ไขได้โดยการปรับแบบจำลองชั้น Base และระยะห่างของ Dowel Bar
- จากทุกโปรแกรมที่ได้ใช้ โปรแกรม OU3D ให้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลตรวจวัดมากที่สุด

- จากผลการตรวจวัด พบว่า หากเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีต จะทำให้ค่าความเค้นและการแอ่นตัวมีค่าลดลง และการเลือกใช้พื้นทางคอนกรีต (Lean Concrete Base (LCB) แทนพื้นทางวัสดุมวลรวมบดอัดแน่น (Dense-graded Aggregate Base (DGAB) จะช่วยลดความเค้นรีเวอร์ซัล (Stress Reversal) และความหนาของชั้นพื้นทางมีหนาขึ้นก็ยังช่วยลดความเค้น (Stress) ได้อีก
- ในการศึกษาได้มีการเปรียบเทียบโปรแกรม FE แต่ละโปรแกรมในแง่การใส่ค่าข้อมูล Input การแสดงผล Output และความเร็วในการทำงาน สำหรับการใส่ข้อมูล Input พบว่าโปรแกรม ISLAB2000, JSLAB, and EVERFE จะต้องการการใส่ค่า Subgrade Modulus of Reaction, k ซึ่งจะต้องระมัดระวังในการเลือกใช้ ซึ่งอาจส่งผลให้ได้ค่าการแอ่นตัวที่ไม่ใกล้เคียงความจริงได้ และพบว่าโปรแกรม OU3D ใช้งานได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถแก้ปัญหาหน้าหนักบรรทุกหลายกรณีได้ สำหรับกรณีนี้หน้าหนักกระทำแบบ static พบว่าโปรแกรม ISLAB2000 มีประสิทธิภาพมากที่สุด
- ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ FE กับผลการตรวจวัด พบว่าควรเปรียบเทียบเฉพาะแนวโน้มของค่าที่ได้ทั่วไป และไม่ควรเปรียบเทียบค่าโดยสมบูรณ์ (Absolute Value) เนื่องจากค่าที่ได้จะขึ้นกับค่า input Parameter ที่เลือกใช้ สำหรับ ค่าคงที่ของวัสดุได้เลือกใช้จากฐานข้อมูลซึ่งได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงใน ตารางที่ 3.3 ยกเว้นค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) โดยทั่วไปพบว่าการทำนายโดยโปรแกรม FE ให้แนวโน้มของค่าความเครียด Strain, การแอ่นตัว และ แรงดัน (Earth Pressure) ที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดที่ด้านบนของชั้น Subgrade อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาผลจากการโค้งตัวของแผ่นคอนกรีต (Curling) และการ Pumping ขึ้นผิวทางในการวิเคราะห์นี้กำหนดเป็น Flat Slab

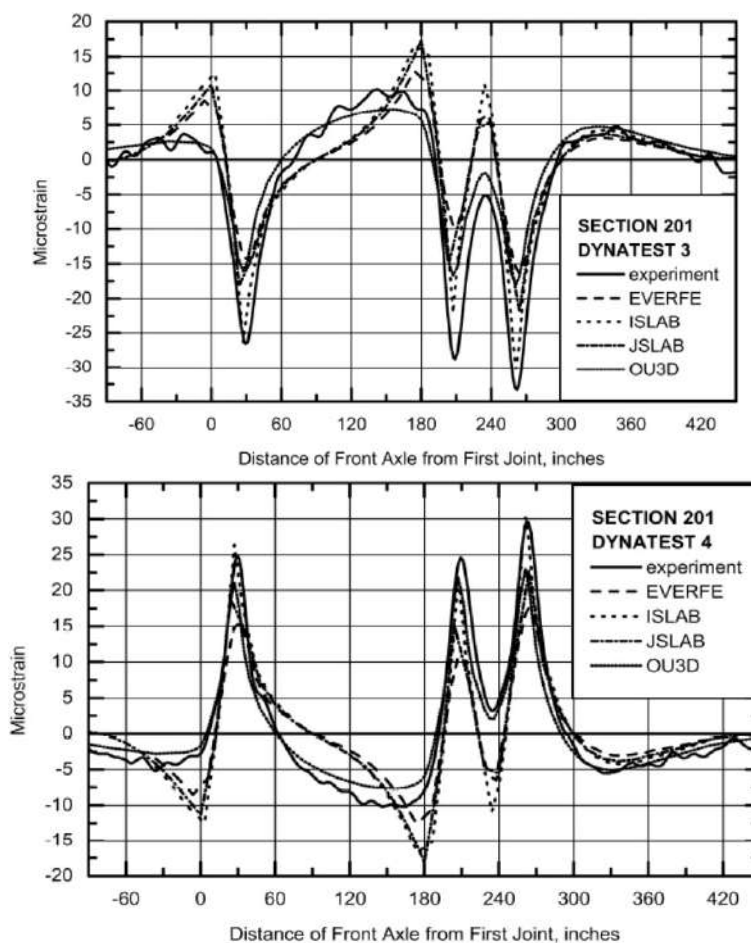
ตารางที่ 3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง Finite element ด้วยวิธีต่างๆ กับผลการตรวจวัดในสนาม

(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)

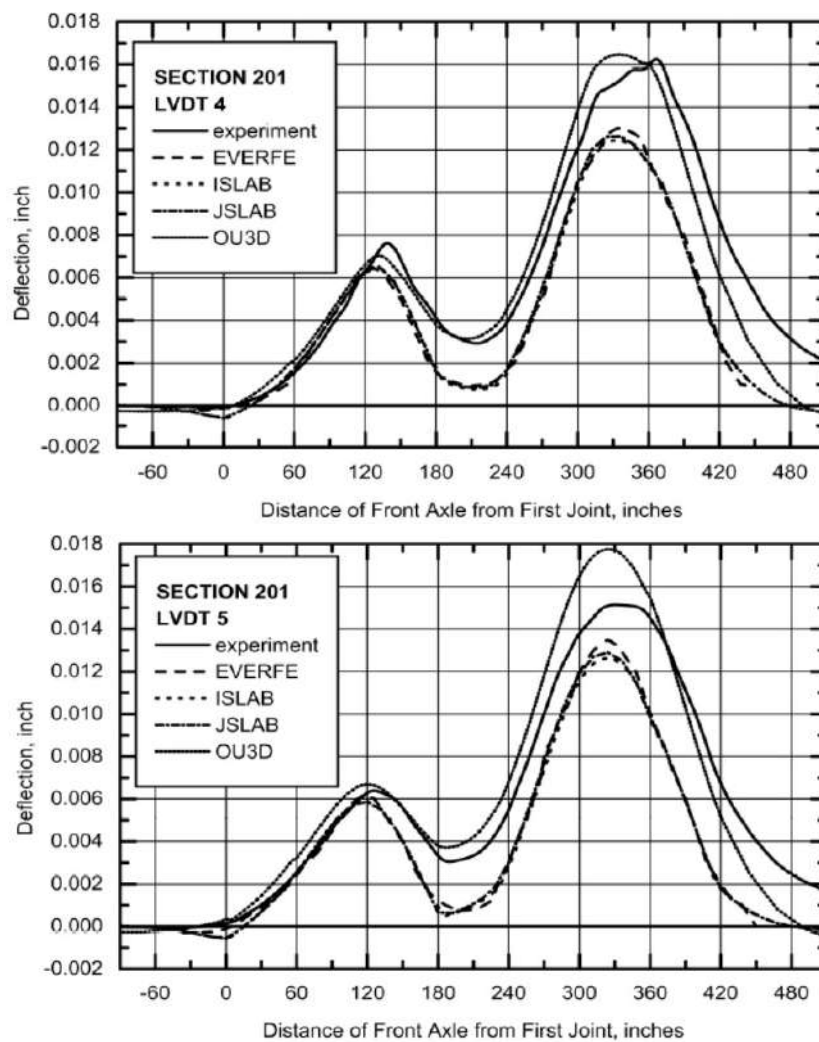
Author	Year	Verification Method
Huang et al.	1973	Westergaard, Pickett and Ray, and AASHO Road Test
Tabatabaie et al.	1978	Westergaard, Pickett and Ray, and AASHO Road Test
Ioannides et al.	1988	Theoretical solutions (ILLI-SLAB)
Nasim et al.	1991	Instrumented rigid pavement sections of US-50 near Carlyle, Illinois
Chatti	1992	Theoretical solutions
Lee et al.	1994	AASHO Road Test and Arlington Road Test
Zaghloul et al.	1994	Westergaard solution and field results
Darter et al.	1995	AASHO, PCA, and Arlington Road Test
Tia et al.	1995	Florida Test Pavement
Masad et al.	1996	KENSLAB, ILLI-SLAB, JSLAB, and Bradbury analytical solution (Bradbury, 1938)
Kennedy et al.	1997	Measurements from Ohio Test Road
Hammons	1998	Data from the FAA's instrumented pavement at Denver International Airport (DIA)
Lee et al.	1998	Instrumented PCC runway in DIA
Davids et al.	1998	Laboratory-scale JPCCP models performed by Hammons (1997)
Sargand et al.	1998	Measurements from Ohio Test Road
Lee et al.	1999	Test sections of Taiwan's second northern highway
Shoukry	2000	Ohio Test Road results
Shoukry et al.	2003	Measurements from Robert Byrd Highway (Rt. 33), West Virginia
Khazanovich et al.	2003	AASHO Road Test, PLITA, and ABAQUS

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ของวัสดุซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Finite element
(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)

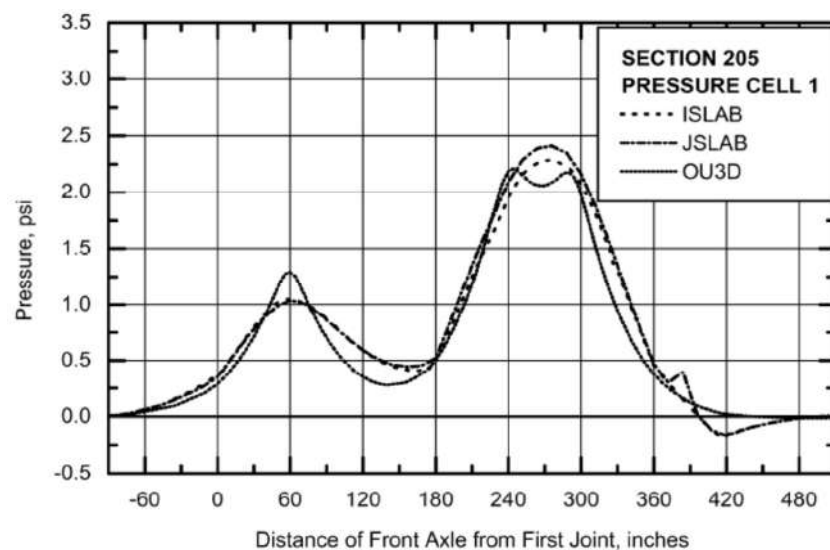
Section Number	layer	Thickness (cm)	E (MPa)	k (Pa/m)	v	Density (kg/m ³)
390201	PCC	21.1	3.59E+04		0.29	2.28E+03
	DGAB	15.2	1.09E+02		0.35	2.04E+03
	Subgrade		6.23E+01	5.43E+07	0.4	
390205	PCC	20.6	3.03E+04		0.2	2.28E+03
	LCB	16.0	1.72E+04		0.2	2.32E+03
	Subgrade		6.43E+01	2.58E+07	0.4	
390208	PCC	28.4	3.72E+04		0.32	2.22E+03
	LCB	17.3	1.72E+04		0.2	2.32E+03
	Subgrade		1.12E+02	4.04E+07	0.4	
390212	PCC	27.2	3.65E+04		0.21	2.30E+03
	PATB	10.2	4.07E+03		0.2	2.24E+03
	DGAB	10.2	1.09E+02		0.35	1.99E+03
	Subgrade		1.41E+02	8.14E+07	0.4	
Properties of Steel Dowel Bars						
Length = 45 cm		Dia. = 3.8 cm		E= 2.00E+05 MPa		v = 0.3



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัด Strain และแบบจำลอง FE
(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)



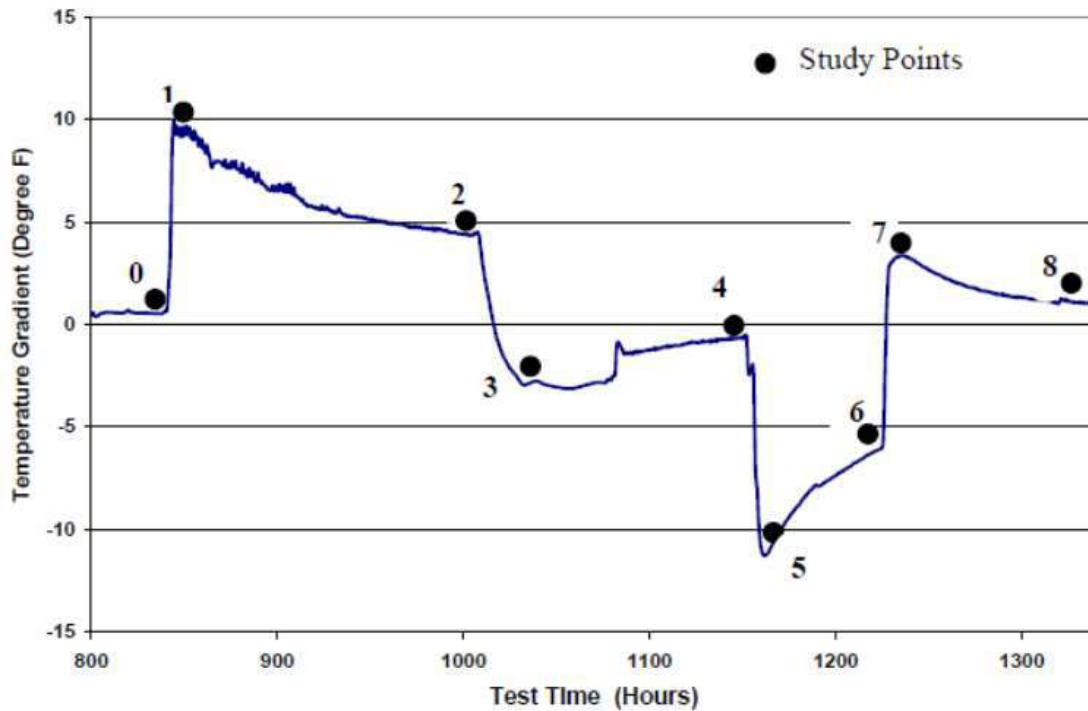
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดการแอ่นตัว และแบบจำลอง FE (ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดแรงดันดิน และแบบจำลอง FE

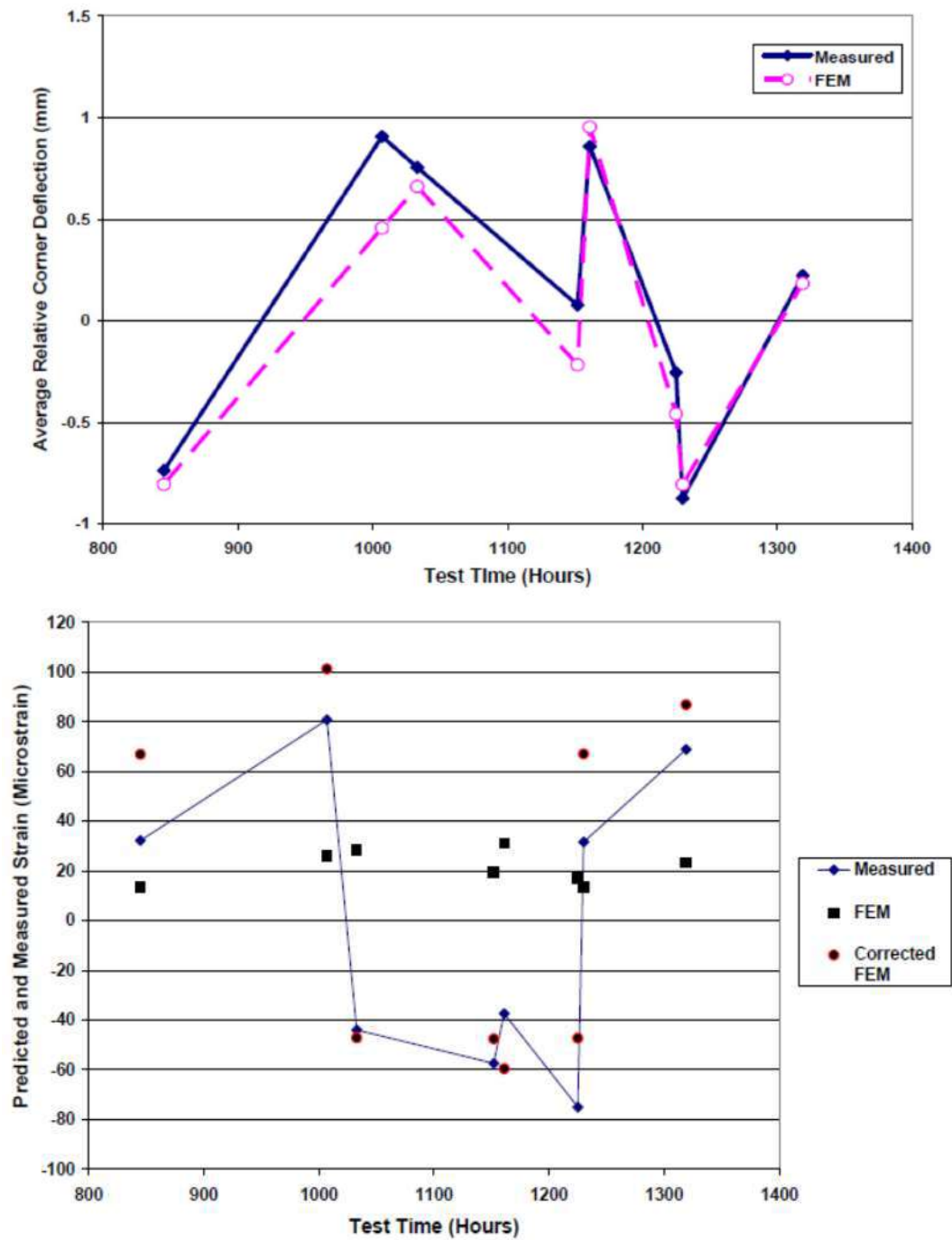
(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)

จากผลการตรวจวัดอุณหภูมิและค่าการแอ่นตัวและความเครียด ในการทดลองดังแสดงใน รูปที่ 3.26 และ รูปที่ 3.27 พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite Element ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์และผลการตรวจวัดอาจอธิบายได้จากค่าโมดูลัสที่เลือกใช้สำหรับชั้น Base และ Subgrade ซึ่งเป็นค่าที่ประมาณขึ้นและอาจเกิดจากการสูญเสียความชื้น ซึ่งไม่ได้พิจารณาในการวิเคราะห์ และพบว่า การตอบสนองของรอยต่อ ต่อการแปรปรวนของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการวิเคราะห์ ความเครียด ไม่สามารถจำลองได้อย่างถูกต้องโดยโปรแกรม ISLAB2000.



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างผลการตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง FE

(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)

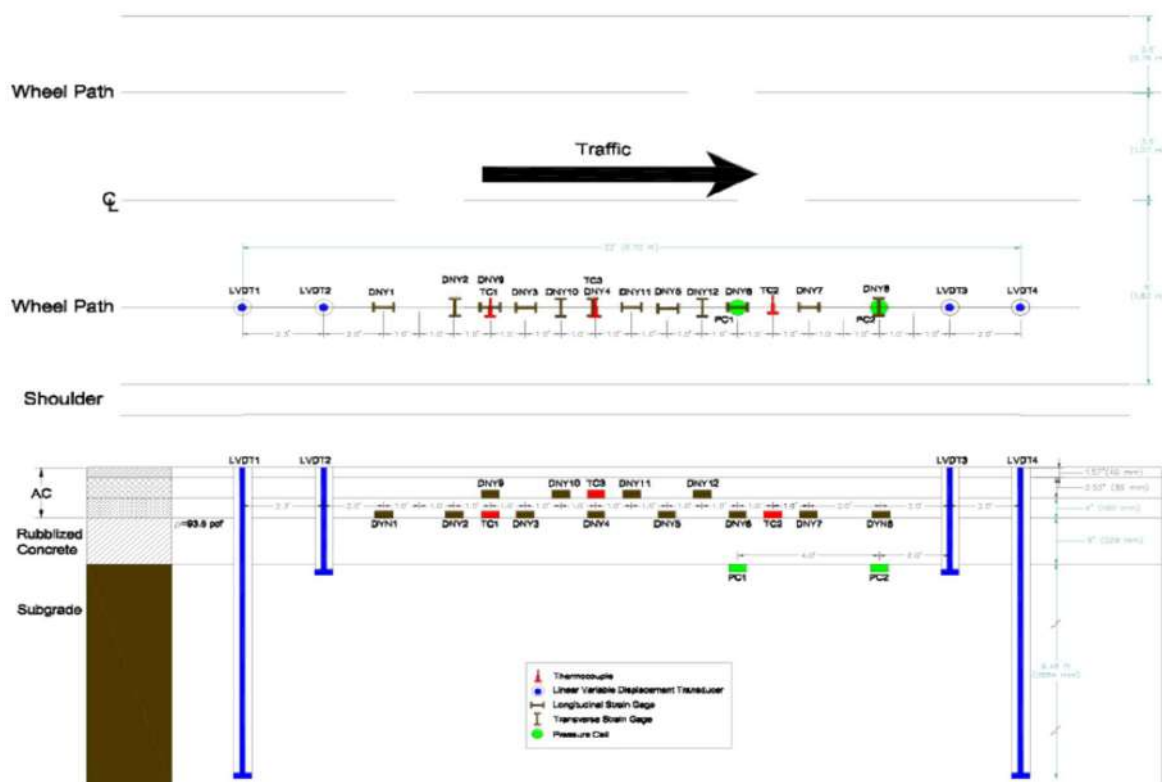


รูปที่ 3.27 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ Deflection และ Strain ด้วยแบบจำลอง FE
กับผลการตรวจวัด พิจารณาผลจากอุณหภูมิ
(ที่มา : Sargand and Abdalla, 2006)

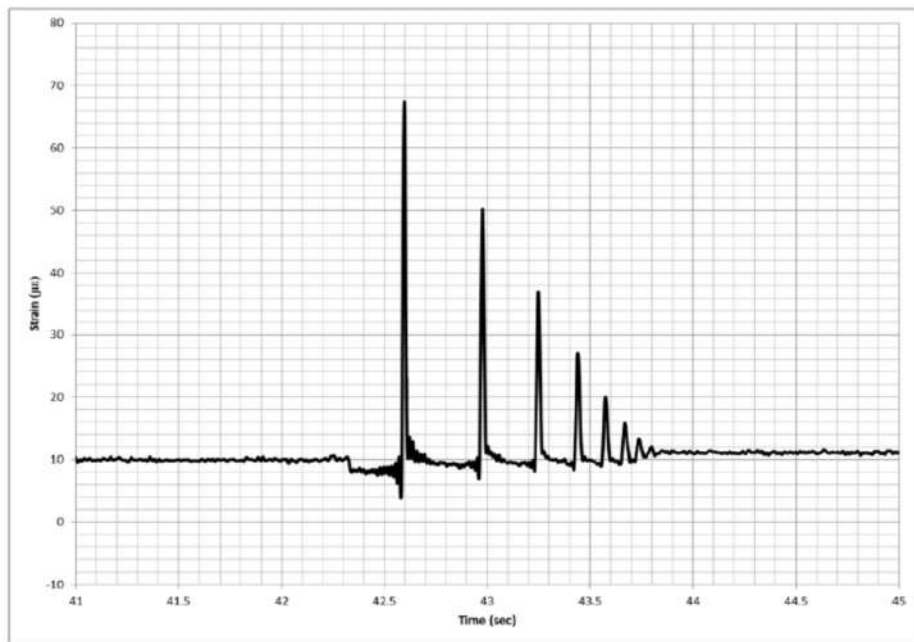
3.4 พฤติกรรมการตอบสนองของชั้นทางแอสฟัลต์ Asphalt Pavement ณ มลรัฐนิวยอร์ก โดย Sargand, Khoury and Morrison (2012)

เป็นการศึกษาการตอบสนองของแปลงทดสอบในทางหลวงระหว่างรัฐหมายเลข 86 ในมลรัฐนิวยอร์ก โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆดังแสดงใน รูปที่ 3.28 ลักษณะชั้นทางเป็นผิวทางแอสฟัลต์หนา 205 มม. ปูบนชั้น Rubblized Concrete ตัวอย่างผลการตรวจวัดดังแสดงใน รูปที่ 3.29 ถึง รูปที่ 3.30 อย่างไรก็ตามพบว่า Strain Gage ซึ่งติดตั้งที่ใกล้ผิวทางหยุดทำงานภายในช่วง 2 เดือนแรกเนื่องจากการพิบัติแบบล้า (Fatigue failure) การตอบสนองค่า Strain ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ซึ่งแสดงเป็นผลระหว่างการทดสอบ Falling Weight Deflection (FWD) ในช่วงก่อนเปิดใช้ถนน ในช่วงปี คศ. 2007 ผลการตรวจวัดค่า Deflection ดังแสดงใน รูปที่ 3.30 ได้จากการตรวจวัดในช่วงปี ค.ศ. 2011 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่วัดในช่วงก่อนหน้า และการสำรวจซึ่งไม่พบร่องรอยความเสียหายลักษณะร่องล้อใดๆ

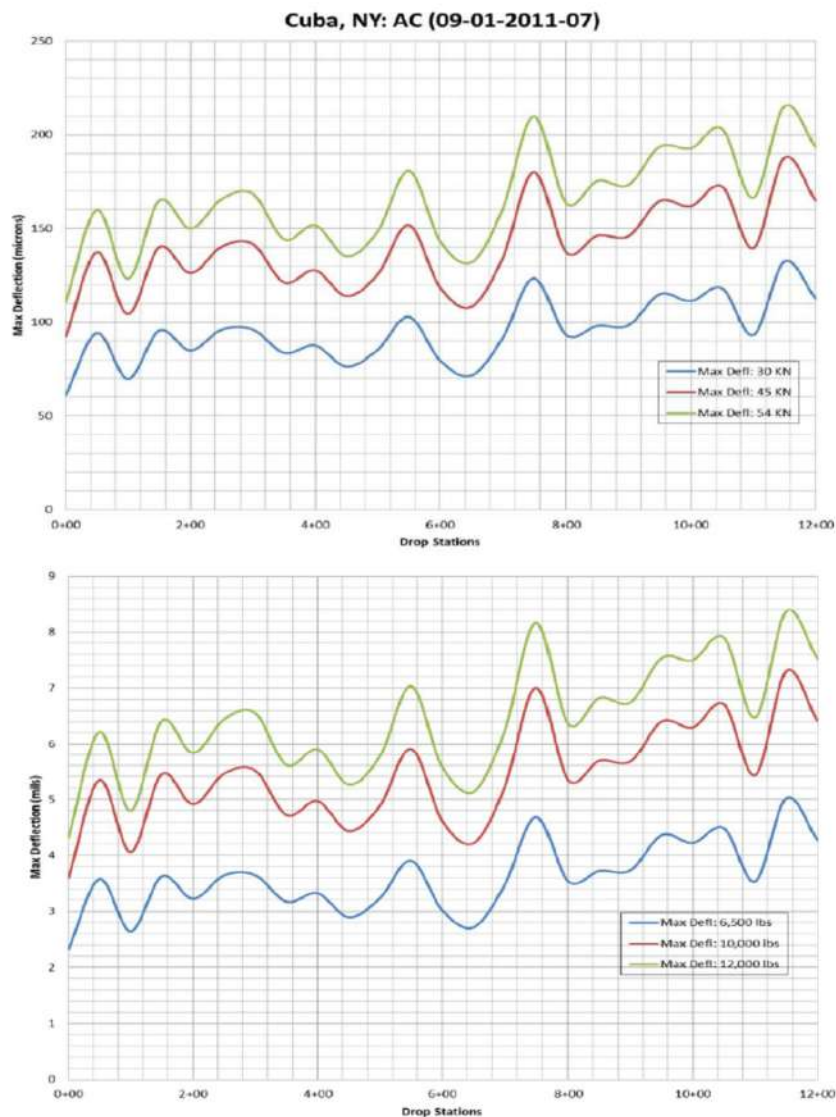
ผลการตรวจวัดค่า Strain พบว่าค่า Strain สูงสุดที่พบด้านล่างสุดของชั้นแอสฟัลต์มีค่าประมาณ 100 microstrain เมื่อถูกน้ำหนักกระทำประมาณ 71 kN ซึ่งถือว่าเป็นน้ำหนักที่มากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่คาดว่าจะเกิดจากรถบรรทุก ทั้งนี้อุณหภูมิที่ตรวจวัดในแปลงทดสอบนี้มีค่าประมาณ 29 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.28 หน้าตัดแปลงทดสอบชั้นทางแอสฟัลต์ในการศึกษาของ Sargand, Khoury and Morrison (2012)
(ที่มา : Sargand, Khoury and Morrison, 2012)



รูปที่ 3.29 การตอบสนองของค่า Strain ในผิวทางแอสฟัลต์ (ตำแหน่งผิวล่างสุดของชั้นแอสฟัลต์ DYN4)
 จากน้ำหนักกระทำ 14,000 lb ในการทดสอบ FWD ปีค.ศ. 2006
 (ที่มา : Sargand, Khoury and Morrison, 2012)



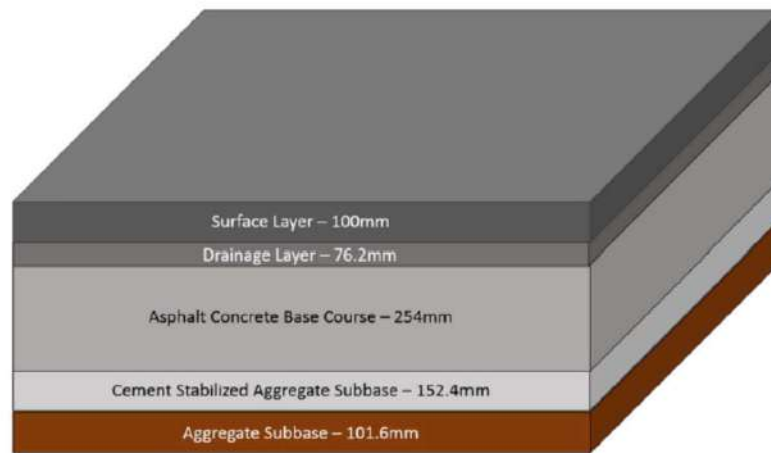
รูปที่ 3.30 ค่าการแอ่นตัวมากที่สุด (Maximum deflection) จากการทดสอบ FWD ปีค.ศ. 2011
(ที่มา : Sargand, Khoury and Morrison, 2012)

3.5 อิทธิพลจากอุณหภูมิต่อการตอบสนองของชั้นทางแอสฟัลต์ Asphalt Pavement โดย Xiong, Zhang and Wang (2017)

ในการศึกษา Xiong, Zhang and Wang (2017) ได้ใช้โปรแกรม Finite Element ในการทำนายอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบ Viscoelastic และมีชั้นระบายน้ำด้านล่างดังแสดงใน รูปที่ 3.31 ในการศึกษาได้กำหนดสภาพภูมิอากาศจากข้อมูลการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตัวอย่างผลการตอบสนองของค่า Strain ที่สภาวะอุณหภูมิต่างดังแสดงใน รูปที่ 3.32

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ใช้แนวทางประเมินความสึกกร่อนด้วยวิธี Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-EPDG) Rut-depth Transfer Function สรุปผลได้ดังแสดงใน ตารางที่ 3.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ผลอย่างยิ่งต่อการเกิดการเสียหายแบบร่องล้อ ยกตัวอย่างการแอ่นตัวของผิวทางที่

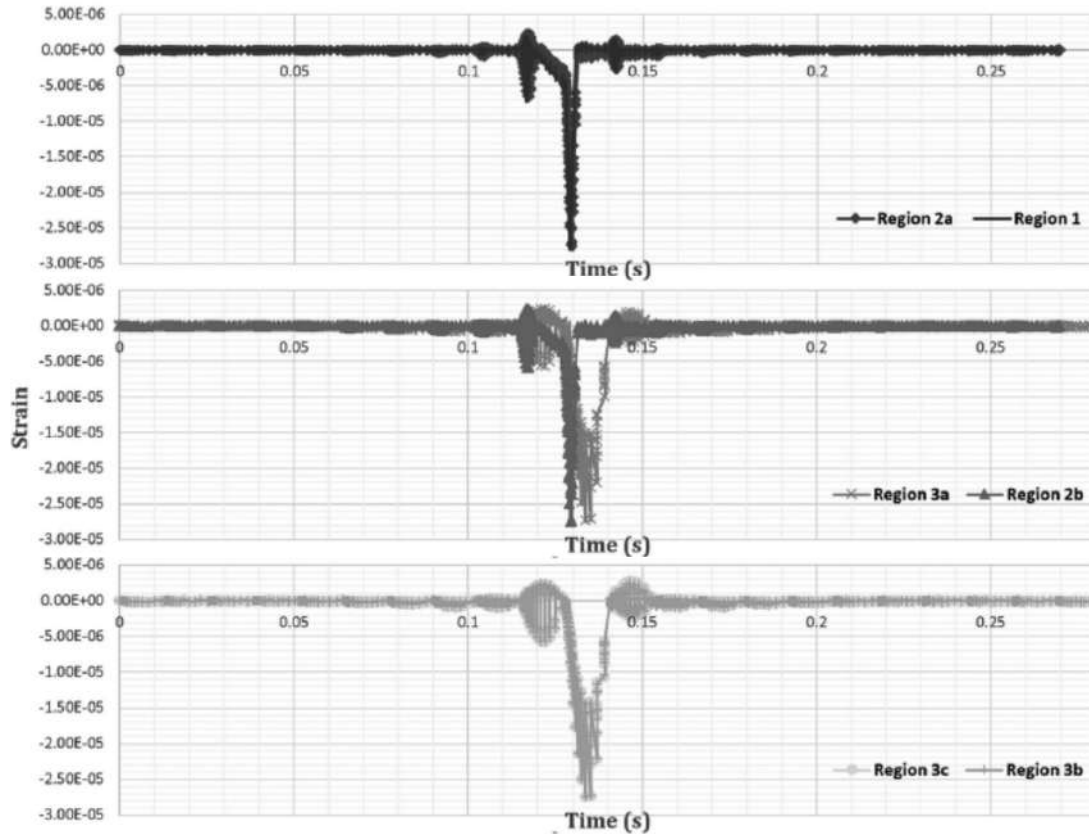
ภูมิอากาศแบบรัฐ North Carolina หรือ Region 1 (มีอุณหภูมิสูงกว่า) ซึ่งมีค่าประมาณ 20 เท่าของผิวทางที่ประเทศแคนาดา (Region 3C) แม้ว่าจะมีวัสดุและลักษณะโครงสร้างเหมือนกัน



รูปที่ 3.31 แบบจำลองในการศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์โดย Xiong และคณะ 2017

ตารางที่ 3.4 ค่าอุณหภูมิที่ความลึกต่างๆ จากการตรวจวัด สำหรับใช้สมมติในการวิเคราะห์ด้วย
แบบจำลอง Finite element
(ที่มา : Xiong และคณะ 2017)

Location	Surface layer (50mm deep) (°C)	Drainage layer (138.1 mm deep) (°C)	Identifier
Durham (August, noon)	57	53	Region 1
Wilkes (August, noon)	44	39	Region 2a
Wilkes (August, evening)	23	20	Region 2b
New Brunswick (March, noon)	8	4	Region 3a
New Brunswick (January, noon)	0	-4	Region 3b
New Brunswick (January, night)	-7	-5	Region 3c



รูปที่ 3.32 การตอบสนองค่า Strain ซึ่งได้จากแบบจำลอง FEM ที่ความลึก 50 มม.

ภายใต้สภาวะอากาศแบบต่างๆ

(ที่มา Xiong และคณะ 2017)

ตารางที่ 3.5 ค่าความลึกร่องล้อ (Rutting depth) ที่ชั้นผิวทาง ชั้นระบายน้ำและชั้น Asphalt Concrete Base Course จากการทำนายโดย FEM ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

(ที่มา : Xiong และคณะ 2017)

Regions	Surface layer (mm × N ^{0.4791})	Drainage layer (mm × N ^{0.4791})	Base (mm × N ^{0.4791})	Total (mm × N ^{0.4791})
Region 1	9.19×10^{-3}	6.99×10^{-4}	2.37×10^{-6}	9.89×10^{-3}
Region 2A	6.73×10^{-3}	4.72×10^{-4}	1.54×10^{-6}	7.21×10^{-3}
Region 2B	3.51×10^{-3}	2.21×10^{-4}	6.89×10^{-7}	3.73×10^{-3}
Region 3A	1.70×10^{-3}	9.08×10^{-5}	2.55×10^{-7}	1.79×10^{-3}
Region 3B	9.58×10^{-4}	4.39×10^{-5}	1.21×10^{-7}	1.00×10^{-3}
Region 3C	4.40×10^{-4}	3.89×10^{-5}	1.07×10^{-7}	4.79×10^{-4}

3.6 การวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง

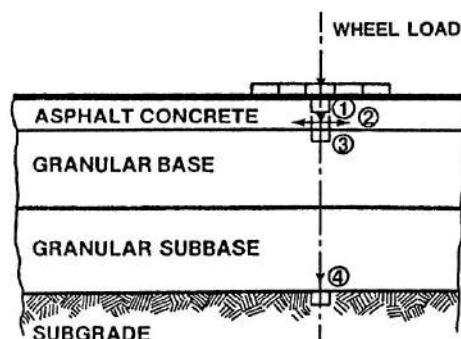
ถนนลาดยางประกอบด้วยวัสดุชั้นทางหลายชั้น วัสดุแต่ละชั้นมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ต่างกัน วางทับกันเป็นชั้นๆอย่างเป็นระบบ (Multi-layer System) เมื่อมีน้ำหนักกระทำจะเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในชั้นทาง ดังนี้

- 1) Vertical Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดในแนวตั้ง ส่งผลให้ชั้นวัสดุมีความแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ในชั้นทาง
- 2) Shear Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน ส่งผลให้ชั้นวัสดุสูญเสียเสถียรภาพความมั่นคง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าสูงมาก เช่น กรณีของรถบรรทุกหนักเกินพิกัด
- 3) Horizontal (Radial) Stress/Strain คือ ความเค้น/ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวของชั้นทางภายใต้ น้ำหนักกระทำ มักเกิดขึ้นใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต หรือวัสดุประเภท Bound Material ส่งผลให้ชั้นทางดังกล่าว เกิดรอยแตกจากล่างขึ้นบน

ทั้งนี้ ค่า Stress/Strain สูงสุด หรือ Critical Stress/Strain มักเป็น Vertical และ Horizontal Stress/Strain เท่านั้น ส่วน Critical Shear Stress/Strain จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่โครงสร้างชั้นทางต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูงเกินพิกัด หรือในกรณีที่โครงสร้างชั้นทางเกิดความเสียหายมาก่อน ดังนั้นการออกแบบโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะค่า Critical Vertical และ Horizontal Stress/Strain เท่านั้น นอกจากนี้ ค่า Critical Strain ของวัสดุชั้นทางมักมีความแปรปรวนน้อยกว่าค่า Critical Stress ดังนั้นการวิเคราะห์หน่วยแรงในถนนลาดยาง จึงนิยมใช้ค่า Critical Strain เป็นเกณฑ์กำหนดรูปแบบการวิบัติของวัสดุชั้นทาง

3.6.1 Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material พบว่า Critical Strain จะเกิด ณ ตำแหน่งหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.33 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

หมายเลข 1 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นค่าวิกฤตก็ต่อเมื่อมีรถบรรทุกหนักสูงเกินพิกัดหรือมีปริมาณการจราจรสูงมาก โดย Vertical Compressive Strain บนผิวทาง ส่งผลให้ผิวทางมีความแน่นขึ้นและเกิดการยุบตัวถาวรเป็นแนวร่องล้อ แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบไม่ถือว่า Vertical Compressive Strain บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นค่า Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 2 เป็น Horizontal (Radial) Tensile Strain ที่เกิดใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากชั้นทางแอสฟัลต์ภายใต้หน้าหนักกระทำ ซึ่งคล้ายกับการแอ่นตัวของคาน น้ำหนักที่กระทำเข้าไปมาหลายรอบทำให้ Horizontal Tensile Strain สะสมใต้ผิวทางเพิ่มขึ้นเกินกว่า Limiting Horizontal Tensile Strain ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต รอยแตกจะเริ่มเกิดขึ้นใต้ผิวทาง แล้วจึงแผ่ขยายขึ้นไปปรากฏบนผิวทาง ค่า Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง เพราะการเกิดรอยแตกจะทำให้หน้าสามารถซึมผ่านตามแนวรอยแตกของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างชั้นทางด้านล่าง ทำให้โครงสร้างชั้นทางอ่อนแอและเกิดการวิบัติในที่สุด ดังนั้นการเกิดรอยแตกใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจาก Horizontal Tensile Strain ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการวิบัติของโครงสร้างชั้นทาง รอยแตกที่เกิดในลักษณะดังกล่าวนี้ เรียกว่า รอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack)

หมายเลข 3 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นพื้นทาง (Unbound Granular Base) เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างพื้นทางโดยทั่วไปมักมีความแข็งแรงและได้ผ่านขั้นตอนการก่อสร้างมาอย่างดีแล้ว นอกจากนี้ในการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยาง จะเลือกใช้วัสดุตามมาตรฐานและข้อกำหนดงานก่อสร้างเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่พิจารณา Vertical Compressive Strain ในชั้นพื้นทางเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 4 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นฐานราก ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางเกิดการยุบตัวถาวร เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ต่ำที่สุดของโครงสร้างถนนลาดยาง ดังนั้น Vertical Compressive Strain ที่เกิดขึ้นในดินคันทางนี้จึงมีค่ามากที่สุด และเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง ในกรณีงานก่อสร้างบนชั้นดินอ่อน (Soft Foundation) ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำมาก อาจต้องใช้วัสดุอื่นมาทดแทน หรือทำการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินอ่อน เพื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นฐานราก และลดค่า Vertical Compressive Strain

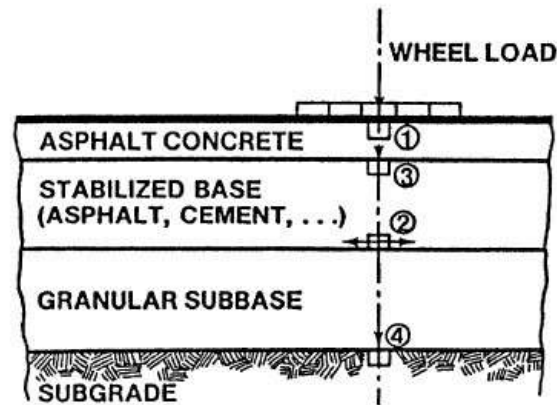
ดังนั้นสำหรับโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material ค่า Critical Strain ที่ทำให้โครงสร้างถนนลาดยางวิบัติได้ คือ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (ตำแหน่งหมายเลข 2) ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack) และ Vertical Compressive Strain บนชั้นฐานราก (ตำแหน่งหมายเลข 4) ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ของโครงสร้างถนนลาดยาง

3.6.2 Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material

เมื่อมีน้ำหนักรถบรรทุกต่อโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material พบว่า Critical Strain จะเกิด ณ ตำแหน่งหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่นเดียวกับกรณีของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material และไม่ถือว่าเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 2 เป็น Horizontal Tensile Strain ที่เกิดใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ (Stabilized Base) หากเปรียบเทียบรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 จะเห็นได้ชัดว่าตำแหน่งหมายเลข 2 เปลี่ยนจากใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพแทน เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ



รูปที่ 3.34 ตำแหน่งของ Critical Strain ในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material

- 1) พื้นทางปรับปรุงคุณภาพมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงทำให้ Horizontal Tensile Strain ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง และไม่มีโอกาสสะสมจนถึง Limiting Horizontal Tensile Strain
- 2) เนื่องจากพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ มีความสามารถในการรับแรงดึง (Tension) น้อยกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงทำให้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพแตกได้ง่ายกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ดังนั้น Horizontal Tensile Strain ที่เกิดใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ จึงเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง นอกจากนี้ Horizontal Tensile Strain ในพื้นทางปรับปรุงคุณภาพยังมีสาเหตุเกิดจากการหดตัวของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ได้เช่นกัน

หมายเลข 3 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนพื้นทางปรับปรุงคุณภาพ แต่เนื่องจากพื้นทางปรับปรุงคุณภาพมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จึงไม่ถือเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง

หมายเลข 4 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นฐานราก ถือว่าเป็น Critical Strain ที่กำหนดการวิบัติของถนนลาดยาง เช่นเดียวกับในกรณีของโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Unbound Material

ดังนั้นสำหรับโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็น Bound Material ค่า Critical Strain ที่ทำให้โครงสร้างถนนลาดยางวิบัติได้ คือ Horizontal Tensile Strain ใต้พื้นทางปรับปรุงคุณภาพ (ตำแหน่งหมายเลข 2) ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกในชั้นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ แล้วแผ่ขยายไปปรากฏบนผิวทาง และ Vertical

Compressive Strain บนชั้นฐานราก (ตำแหน่งหมายเลข 4) ซึ่งทำให้เกิดการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ของโครงสร้างถนนลาดยาง

3.7 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Material)

การวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงกระทำบนชั้นทางแบบยืดหยุ่น เริ่มต้นมาจากทฤษฎีของ Boussinesq ในปี ค.ศ. 1885 โดยมีสมมติฐานว่าวัสดุมีลักษณะเป็น Elastic Homogeneous Half-space ซึ่งนับเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดที่โดยค่าความเค้น (Stresses) ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งและแนวราบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ในขณะที่ค่าความเครียด (Strains) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 และค่าการแอ่นตัว (Deflection) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)q}{E} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)q}{2E} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1-\nu)z}{(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{3qa^2}{2E(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

โดยที่

σ_z = ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง

σ_r = ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวนอน = σ_t

ε_z = ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง

ε_r = ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวนอน

Δ = ค่าการแอ่นตัว

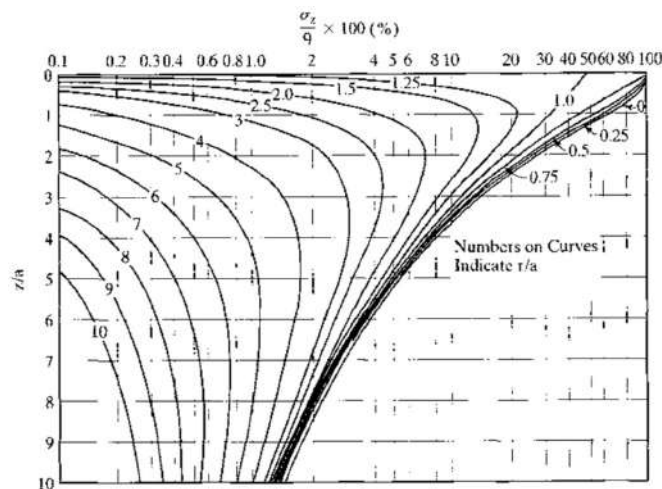
q = แรงต่อหน่วยพื้นที่

z = ความลึก

a = รัศมีของแรงกระทำแบบวงกลม

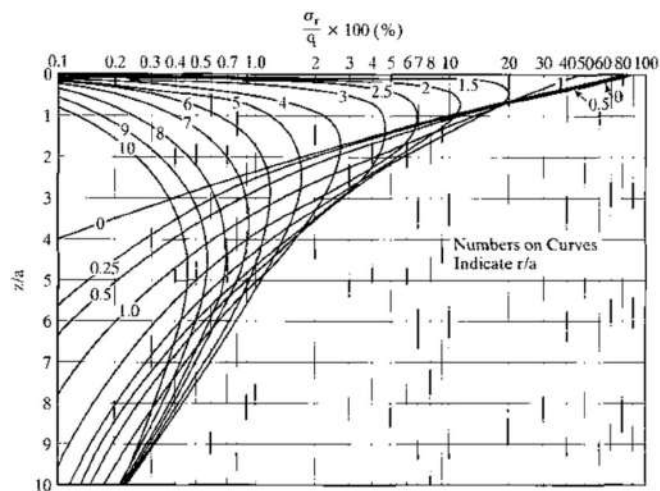
ν = อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนากราฟช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดย Foster and Ahlvin ในปี ค.ศ. 1954 ทำให้การวิเคราะห์หาค่าความเค้นเนื่องจากแรงกระทำสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยตัวอย่างกราฟสำหรับวิเคราะห์หาค่าความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 3.35 ถึงรูปที่ 3.38



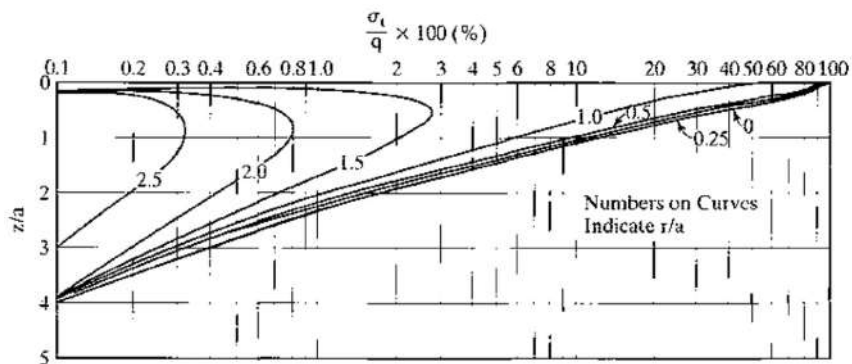
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)

(ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)



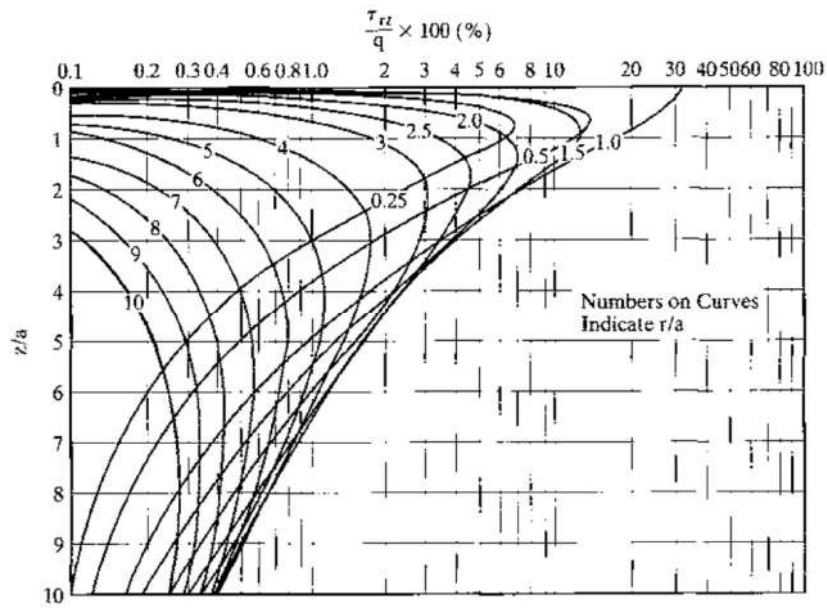
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)

(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)



รูปที่ 3.37 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นแนวสัมผัสวงกลมที่ระดับความลึกต่างๆโดย Foster and Ahlvin (1954)

(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)

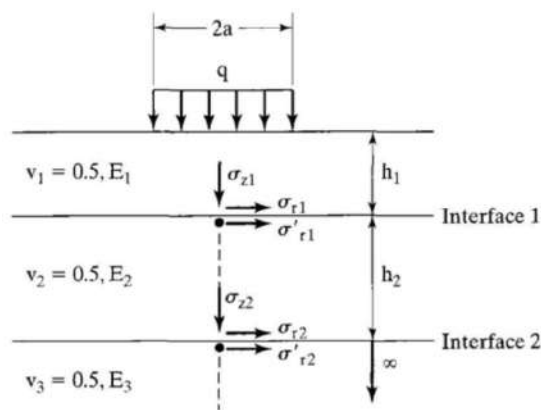


รูปที่ 3.38 กราฟแสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกต่างๆ โดย Foster and Ahlvin (1954)

(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)

3.8 การวิเคราะห์โดยพิจารณาวัสดุเป็นชั้นๆ (Layered Systems)

โดยทั่วไปวัสดุชั้นทางนั้นมีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยที่มีวัสดุที่มีคุณสมบัติดีกว่าวางตัวอยู่ด้านบน ซึ่งมีความแตกต่างจากทฤษฎีของ Boussinesq ที่มองเป็นเนื้อเดียว Burmister จึงได้พัฒนาการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาชั้นดินเป็นชั้นๆ (ทั้งโครงสร้างทาง 2 ชั้น หรือ 3 ชั้น) ขึ้น โดยรูปที่ 3.39 แสดงให้เห็นถึงการความเค้นที่เกิดขึ้นช่วงรอยต่อระหว่างชั้นทาง และความเค้นเหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.39 ลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบชั้นทาง 3 ชั้น

(ที่มา : ภาพจากหนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004)

$$\sigma_{z1} - \sigma'_{r1} = \frac{\sigma_{z1} - \sigma_{r1}}{k_1} \quad (6)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma'_{r2} = \frac{\sigma_{z2} - \sigma_{r2}}{k_2} \quad (7)$$

$$\sigma_{z1} = q(ZZ1) \quad (8)$$

$$\sigma_{z2} = q(ZZ2) \quad (9)$$

$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = q(ZZ1 - RR1) \quad (10)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q(ZZ2 - RR2) \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{E_2}{E_3} \quad (13)$$

$$A = \frac{a}{h_2} \quad (14)$$

$$H = \frac{h_1}{h_2} \quad (15)$$

โดยที่

σ_{z1} = ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุ 1 และวัสดุ 2

σ_{z2} = ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุ 2 และวัสดุ 3

σ_{r1} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบล่างของวัสดุ 1

σ'_{r1} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบบนของวัสดุ 2

σ_{r2} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบล่างของวัสดุ 2

σ'_{r2} = ความเค้นในแนวนอนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบบนของวัสดุ 3

q = แรงต่อหน่วยพื้นที่

ZZ1, ZZ2, RR1, RR2 = Stress factors ที่สามารถหาได้จากตารางที่ 3.6 เมื่อรู้ค่า k_1 , k_2 , A และ H

E_1 = Elastic Modulus ของวัสดุ 1

E_2 = Elastic Modulus ของวัสดุ 2

E_3 = Elastic Modulus ของวัสดุ 3

a = รัศมีของแรงกระทำแบบวงกลม

h_1 = ความหนาของวัสดุ 1

h_2 = ความหนาของวัสดุ 1

ตารางที่ 3.6 Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)

ที่มา : หนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004

H	k ₂	A	k ₁ = 2				k ₁ = 20				k ₁ = 200			
			ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)
0.125	2	0.1	0.42950	0.00896	0.70622	0.01716	0.14529	0.00810	1.81178	0.01542	0.03481	0.00549	3.02259	0.00969
		0.2	0.78424	0.03493	0.97956	0.06647	0.38799	0.03170	3.76886	0.06003	0.11491	0.02167	8.02452	0.03812
		0.4	0.98044	0.12667	0.70970	0.23531	0.78651	0.11650	5.16717	0.21640	0.33218	0.08229	17.64175	0.14286
		0.8	0.99434	0.36932	0.22319	0.63003	1.02218	0.34941	3.43631	0.60493	0.72695	0.27307	27.27701	0.45208
		1.6	0.99364	0.72113	-0.19982	0.97707	0.99060	0.69014	1.15211	0.97146	1.00203	0.63916	23.38638	0.90861
		3.2	0.99922	0.96148	-0.28916	0.84030	0.99893	0.93487	-0.06894	0.88358	1.00828	0.92560	11.87014	0.91469
	20	0.1	0.43022	0.00228	0.69332	0.03467	0.14447	0.00182	1.80664	0.02985	0.03336	0.00128	3.17763	0.01980
		0.2	0.78414	0.00899	0.92086	0.13541	0.38469	0.00716	3.74573	0.11697	0.10928	0.00509	8.66097	0.07827
		0.4	0.97493	0.03392	0.46583	0.49523	0.77394	0.02710	5.05489	0.43263	0.31094	0.01972	20.12259	0.29887
		0.8	0.97806	0.11350	-0.66535	1.49612	0.98610	0.09061	2.92533	1.33736	0.65934	0.07045	36.29943	1.01694
		1.6	0.96921	0.31263	-2.82859	3.28512	0.93712	0.24528	-1.27093	2.99215	0.87931	0.20963	49.40857	2.64313
		3.2	0.98591	0.68433	-5.27906	5.05952	0.96330	0.55490	-7.35384	5.06489	0.93309	0.49938	57.84369	4.89895
0.25	2	0.1	0.15524	0.00710	0.28362	0.01353	0.04381	0.00530	0.63215	0.00962	0.00909	0.00259	0.96553	0.00407
		0.2	0.42809	0.02783	0.70225	0.05278	0.14282	0.02091	1.83766	0.03781	0.03269	0.01027	3.10763	0.01611
		0.4	0.77939	0.10306	0.96634	0.19178	0.37882	0.07933	3.86779	0.14159	0.10684	0.04000	8.37852	0.06221
		0.8	0.96703	0.31771	0.66885	0.55211	0.75904	0.26278	5.50796	0.44710	0.30477	0.14513	18.95534	0.21860
		1.6	0.98156	0.66753	0.17331	0.95080	0.98743	0.61673	4.24281	0.90115	0.66786	0.42940	31.18909	0.58553
		3.2	0.99840	0.93798	-0.05691	0.89390	1.00064	0.91258	1.97494	0.93254	0.98447	0.84545	28.98500	0.89191
	20	0.1	0.15436	0.00179	0.25780	0.02728	0.04236	0.00123	0.65003	0.01930	0.00776	0.00065	1.08738	0.00861
		0.2	0.42462	0.00706	0.67115	0.10710	0.13708	0.00488	1.90693	0.07623	0.02741	0.00257	3.59448	0.03421
		0.4	0.76647	0.02697	0.84462	0.39919	0.35716	0.01888	4.13976	0.29072	0.08634	0.01014	10.30923	0.13365
		0.8	0.92757	0.09285	0.21951	1.26565	0.68947	0.06741	6.48948	0.98565	0.23137	0.03844	26.41442	0.49135
		1.6	0.91393	0.26454	-1.22411	2.94860	0.85490	0.20115	6.95639	2.55231	0.46835	0.13148	57.46409	1.53833
		3.2	0.95243	0.60754	-3.04320	4.89878	0.90325	0.48647	6.05854	4.76234	0.71083	0.37342	99.29034	3.60964
0.5	2	0.1	0.04330	0.00465	0.08250	0.00878	0.01122	0.00259	0.17997	0.00440	0.00215	0.00094	0.26620	0.00128
		0.2	0.15325	0.01836	0.28318	0.03454	0.04172	0.01028	0.64779	0.01744	0.00826	0.00373	0.98772	0.00509
		0.4	0.42077	0.06974	0.70119	0.12954	0.13480	0.03998	1.89817	0.06722	0.02946	0.01474	3.19580	0.01996
		0.8	0.75683	0.23256	0.96681	0.41187	0.35175	0.14419	4.09592	0.23476	0.09508	0.05622	8.71973	0.07434
		1.6	0.93447	0.56298	0.70726	0.85930	0.70221	0.42106	6.22002	0.62046	0.27135	0.19358	20.15765	0.23838
		3.2	0.98801	0.88655	0.33878	0.96353	0.97420	0.82256	5.41828	0.93831	0.62399	0.52912	34.25229	0.54931
	20	0.1	0.04193	0.00117	0.08044	0.01778	0.00990	0.00063	0.19872	0.00911	0.00149	0.00023	0.31847	0.00257
		0.2	0.14808	0.00464	0.27574	0.07027	0.03648	0.00251	0.72264	0.03620	0.00564	0.00094	1.19598	0.01025
		0.4	0.40086	0.01799	0.67174	0.26817	0.11448	0.00988	2.19520	0.14116	0.01911	0.00372	1.02732	0.04047
		0.8	0.69098	0.06476	0.86191	0.91168	0.27934	0.03731	5.24726	0.51585	0.05574	0.01453	12.00885	0.15452
		1.6	0.79338	0.19803	0.39588	2.38377	0.50790	0.12654	10.30212	1.59341	0.13946	0.05399	32.77028	0.53836
		3.2	0.85940	0.49238	-0.41078	4.47022	0.70903	0.35807	16.38520	3.69109	0.30247	0.18091	77.62943	1.56409

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) Stress Factor สำหรับการคำนวณแบบโครงสร้างชั้นทาง 3 ชั้น โดย Jones (1962)

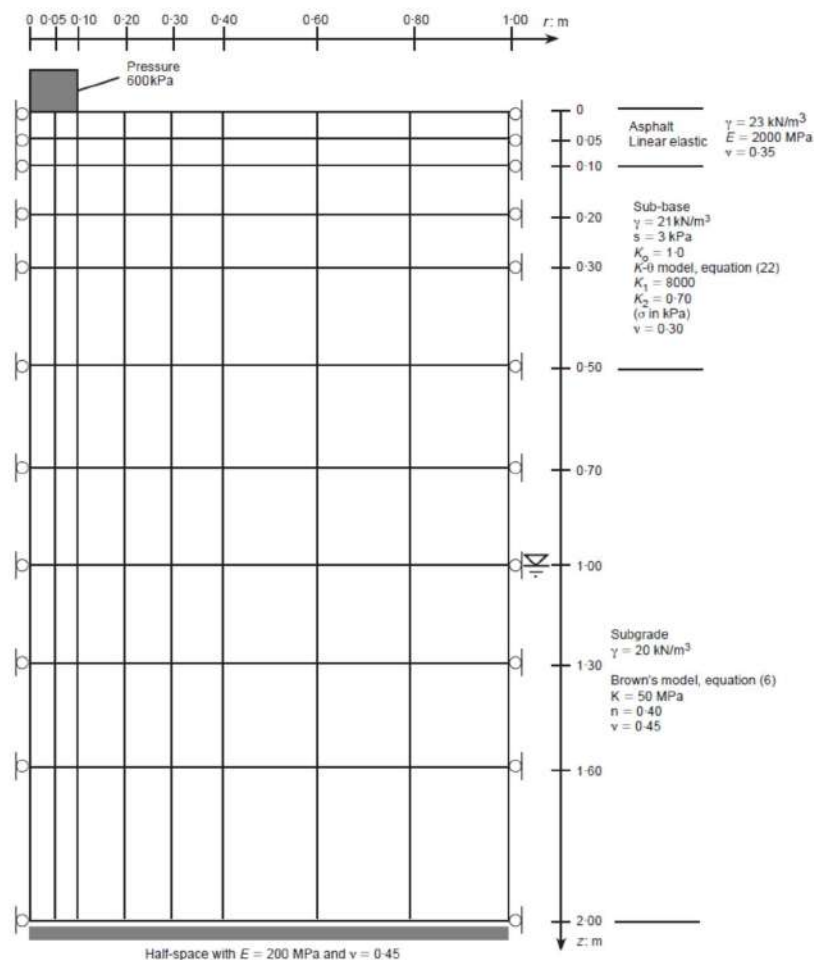
ที่มา : หนังสือ Pavement Analysis and Design by Huang, 2004

1	2	0.1	0.01083	0.00241	0.02179	0.00453	0.00263	0.00100	0.04751	0.00160	0.00049	0.00029	0.06883	0.00035
		0.2	0.04176	0.00958	0.08337	0.01797	0.01029	0.00347	0.18481	0.00637	0.00195	0.00116	0.26966	0.00138
		0.4	0.14665	0.03724	0.28491	0.06934	0.03810	0.01565	0.66727	0.02498	0.00746	0.00460	1.00131	0.00545
		0.8	0.39942	0.13401	0.71341	0.24250	0.12173	0.05938	1.97428	0.09268	0.02647	0.01797	3.24971	0.02092
		1.6	0.71032	0.38690	1.02680	0.63631	0.31575	0.20098	4.37407	0.29253	0.08556	0.06671	8.92442	0.07335
		3.2	0.92112	0.75805	0.90482	0.97509	0.66041	0.53398	6.97695	0.65446	0.25186	0.22047	20.83387	0.21288
20	2	0.1	0.00963	0.00061	0.02249	0.00920	0.00193	0.00024	0.05737	0.00322	0.00027	0.00007	0.08469	0.00062
		0.2	0.03697	0.00241	0.08618	0.03654	0.00751	0.00098	0.22418	0.01283	0.00104	0.00028	0.33312	0.00248
		0.4	0.12805	0.00950	0.29640	0.14241	0.02713	0.00387	0.82430	0.05063	0.00384	0.00110	1.25495	0.00985
		0.8	0.33263	0.03578	0.76292	0.51815	0.08027	0.01507	2.59672	0.19267	0.01236	0.00436	4.26100	0.03825
		1.6	0.52721	0.12007	1.25168	1.56503	0.17961	0.05549	6.77014	0.66326	0.03379	0.01683	12.91809	0.13989
		3.2	0.65530	0.33669	1.70723	3.51128	0.34355	0.18344	15.23252	1.88634	0.08859	0.06167	36.04291	0.45544
2	2	0.1	0.00250	0.00100	0.00555	0.00188	0.00059	0.00033	0.01219	0.00051	0.00011	0.00008	0.01737	0.00009
		0.2	0.00991	0.00397	0.02199	0.00750	0.00235	0.00130	0.04843	0.00203	0.00045	0.00033	0.06913	0.00036
		0.4	0.03832	0.01569	0.08465	0.02950	0.00922	0.00518	0.18857	0.00803	0.00179	0.00131	0.27103	0.00142
		0.8	0.13516	0.05974	0.29365	0.11080	0.03412	0.02023	0.68382	0.03093	0.00685	0.00520	1.00808	0.00553
		1.6	0.36644	0.20145	0.75087	0.35515	0.10918	0.07444	2.04134	0.10864	0.02441	0.02003	3.27590	0.02043
		3.2	0.67384	0.51156	1.17294	0.77434	0.29183	0.23852	4.60426	0.30709	0.08061	0.07248	9.02195	0.06638
20	2	0.1	0.00181	0.00025	0.00652	0.00378	0.00033	0.00008	0.01568	0.00094	0.00005	0.00002	0.02160	0.00014
		0.2	0.00716	0.00099	0.02586	0.01507	0.00130	0.00031	0.06236	0.00374	0.00018	0.00007	0.08604	0.00058
		0.4	0.02746	0.00394	0.10017	0.05958	0.00503	0.00123	0.24425	0.01486	0.00071	0.00030	0.33866	0.00229
		0.8	0.09396	0.01535	0.35641	0.22795	0.01782	0.00485	0.90594	0.05789	0.00261	0.00119	1.27835	0.00901
		1.6	0.23065	0.05599	1.00785	0.78347	0.05012	0.01862	2.91994	0.21190	0.00819	0.00467	4.35311	0.03390
		3.2	0.37001	0.17843	2.16033	2.13215	0.11331	0.06728	7.95104	0.67732	0.02341	0.01784	13.26873	0.11666
4	2	0.1	0.00057	0.00034	0.00147	0.00065	0.00013	0.00010	0.00312	0.00015	0.00003	0.00002	0.00437	0.00002
		0.2	0.00228	0.00137	0.00587	0.00260	0.00054	0.00039	0.01245	0.00029	0.00011	0.00009	0.01746	0.00009
		0.4	0.00905	0.00544	0.02324	0.01032	0.00214	0.00154	0.04944	0.00235	0.00042	0.00036	0.06947	0.00036
		0.8	0.03500	0.02135	0.08957	0.04031	0.00837	0.00610	0.19247	0.00924	0.00168	0.00142	0.27221	0.00144
		1.6	0.12354	0.07972	0.31215	0.14735	0.03109	0.02358	0.69749	0.03488	0.00646	0.00560	1.01140	0.00553
		3.2	0.34121	0.25441	0.81908	0.43632	0.10140	0.08444	2.09049	0.11553	0.02332	0.02126	3.28913	0.01951
20	2	0.1	0.00030	0.00008	0.00201	0.00128	0.00005	0.00002	0.00413	0.00025	0.00001	0.00000	0.00545	0.00003
		0.2	0.00119	0.00034	0.00803	0.00510	0.00021	0.00009	0.01651	0.00099	0.00003	0.00002	0.02178	0.00014
		0.4	0.00469	0.00134	0.03191	0.02032	0.00083	0.00035	0.06569	0.00396	0.00013	0.00008	0.08673	0.00054
		0.8	0.01790	0.00532	0.12427	0.07991	0.00321	0.00138	0.25739	0.01565	0.00050	0.00031	0.34131	0.00215
		1.6	0.06045	0.02049	0.45100	0.29991	0.01130	0.00542	0.95622	0.05993	0.00186	0.00124	1.28773	0.00833
		3.2	0.14979	0.07294	1.36427	0.97701	0.03258	0.02061	3.10980	0.20906	0.00612	0.00483	4.38974	0.03010

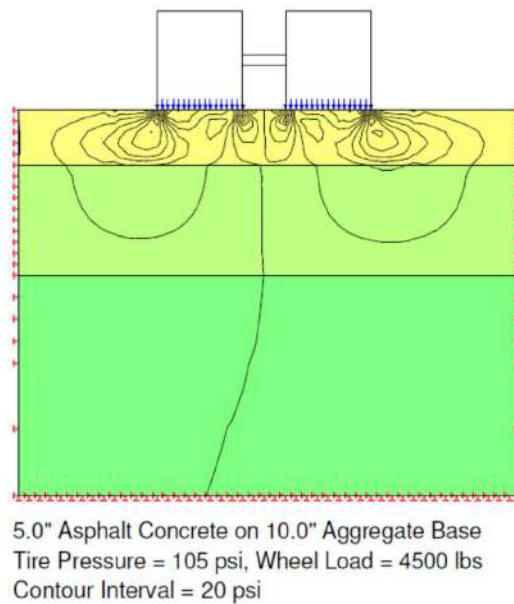
3.9 การวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยวิธี Finite Element

การวิเคราะห์ความเค้นความเครียด (Stress-strain analysis) สำหรับโครงสร้างทางสามารถใช้วิธี Finite element ซึ่งจะให้ผลละเอียดถูกต้องมากกว่าวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิมเช่นวิธี Burmister หรือ Westergaard ซึ่งใช้สมมติฐาน Elasticity โดยวิธี Finite element สามารถกำหนดให้วัสดุมีค่าโมดูลัสแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) หรือมีค่าแปรผันไปตามอิทธิพลต่างๆ เช่น ความชื้น แรงกด หรืออุณหภูมิได้ รูปที่ 3.40 แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างชั้นทางโดยวิธี Finite element โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Axi-symmetric และสมมติฐาน Elastic half-space ด้วยโปรแกรม FENLAP (d’Almeida, 1993, Brown, 1996)

รูปที่ 3.41 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดด้วยโปรแกรม SIGMA/W โดย Holmquist, (1998) ลักษณะหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม เพื่อยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองได้ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาอื่นๆ เช่น Saevarsdottir & Erlingsson (2016) ซึ่งใช้แบบจำลอง Finite element รูปแบบสามมิติ อาทิ โปรแกรม Plaxis-3D ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.40 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างทางโดยวิธี Finite element
(ที่มา : Brown, 1996)



รูปที่ 3.41 ผลการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดของโครงสร้างทาง
โดยวิธี Finite Element โดยโปรแกรมSIGMA/W
(ที่มา : Holmquist, 1998)

3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างถนนกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างถนน (Pavement Response) เช่น ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) หรือค่าโมดูลัส (Modulus) มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาและ/หรือปริมาณจราจรสะสม และ/หรือปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการใช้งานของแปลงตรวจวัด โดยรูปที่ 3.42 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลต่อค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade จากรายงานของ Monitoring and Modeling Subgrade Soil Moisture for Pavement Design and Rehabilitation in Idaho Phase III: Data Collection and Analysis โดย Salem (2005) นอกจากนี้พบว่า กรมทางหลวงได้เคยทำการศึกษาความแข็งแรงและอัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางโดยใช้ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่เกิดขึ้น(สมการที่ 16) จากการทดสอบด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ในทางหลวงที่มีลักษณะโครงสร้างชั้นทางแตกต่างกันจำนวน 5 สายทาง (อัครพัฒน์ และ ธนกฤต, พ.ศ. 2555) โดยผลศึกษาสามารถนำมา ใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพงานก่อสร้างและบำรุงทางหลวงได้ อนึ่งตัวอย่างผลการทดสอบจากงานศึกษาดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.43

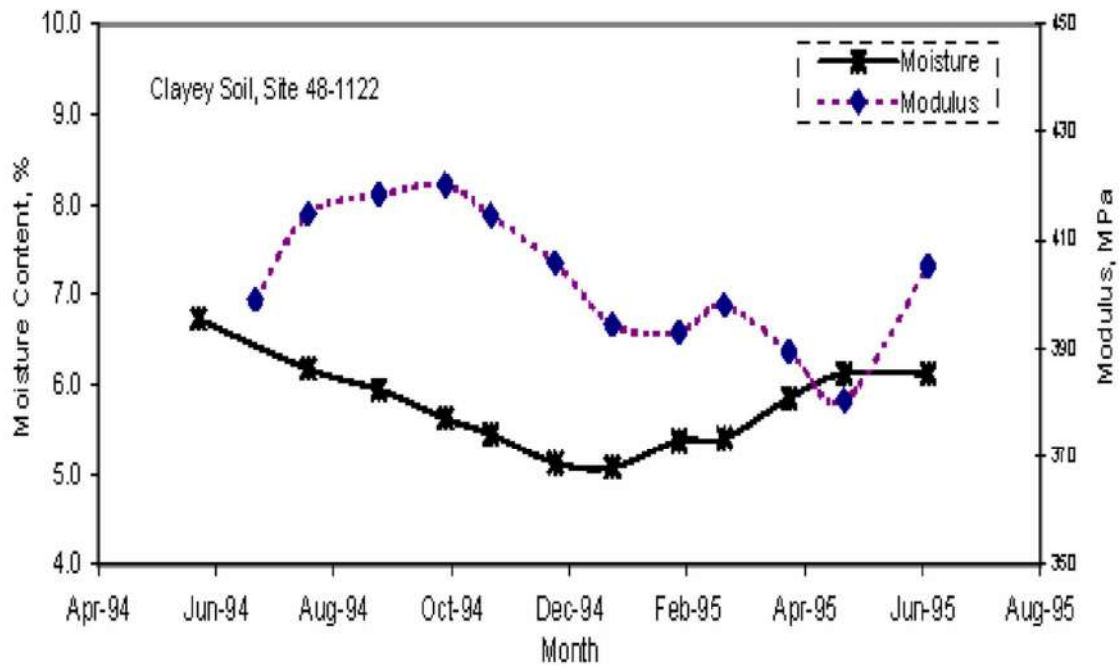
$$\overline{\delta_0} = \alpha t + \beta \quad (16)$$

โดยที่

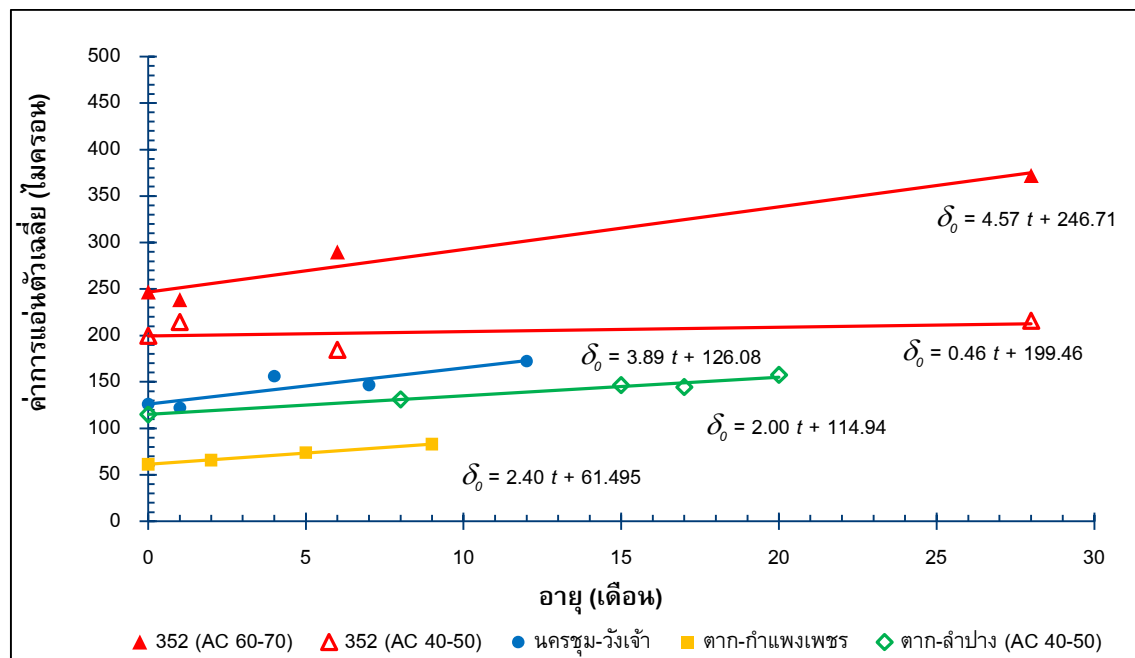
$\overline{\delta_0}$ = ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ (ไมครอน)

t = อายุการใช้งาน (เดือน)

α และ β = ค่าคงที่ได้จากการทดสอบ (ค่าคงที่ α เป็นตัวชี้วัดอัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง และค่าคงที่ β เป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางหรือค่าการแอ่นตัวเริ่มต้น)

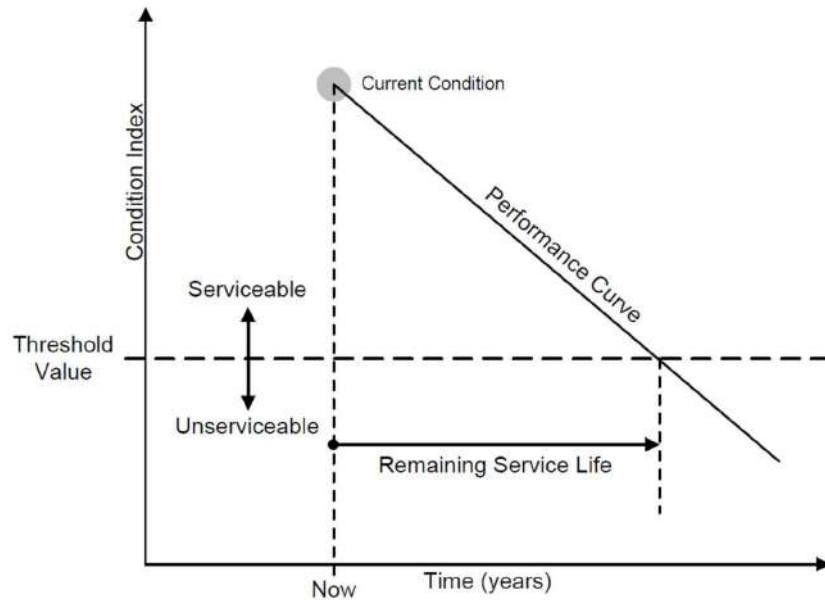


รูปที่ 3.42 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและปริมาณความชื้นในชั้น subgrade ต่อการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล (ที่มา : Bayomy & Salem, 2005)



รูปที่ 3.43 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง (ที่มา : อัครพัฒน์ และ ธนฤต, พ.ศ. 2555)

แนวทางการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model) เพื่อใช้ในการคาดการณ์สภาพถนน (Condition Index) ที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งานดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.44 ถึง รูปที่ 3.46 และเมื่อมีการเก็บรวบรวมข้อมูลมากขึ้นจะมีแนวทางในการปรับแก้โมเดล (Model Updating) ให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.47



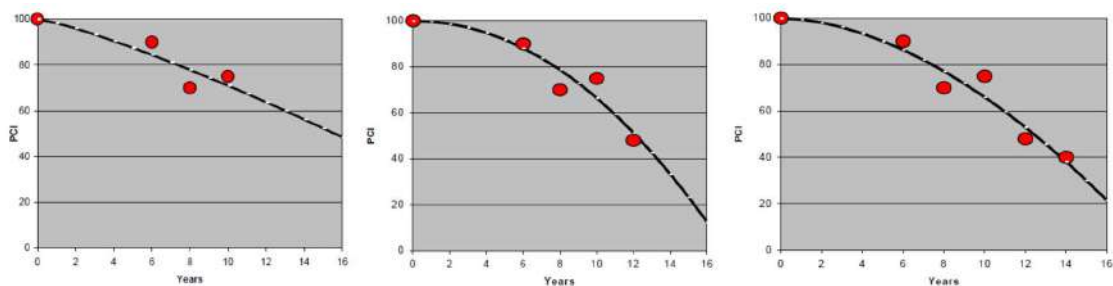
รูปที่ 3.44 ตัวอย่างโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา : NHI, 1998)

Types of Performance Models							
	Deterministic				Probabilistic		
	Primary Response	Structural	Functional	Damage	Survivor Curves	Transition Process Models	
	Deflection Stress Strain	Distress Pavement Condition	PSI Safety	Load Equiv.		Markov	Semi- Markov
National Level				✓	✓	✓	✓
State or District Level		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Project Level	✓	✓	✓	✓			

รูปที่ 3.45 ประเภทของโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา : NHI 1998)

Data Requirements	Deterministic	Probabilistic (Markovian)
Inventory Data		
Pavement Structure	Required	Required
Joint Features	Useful	Useful
Drainage Characteristics	Useful	Useful
Age	Required	Required
Prior Condition/Traffic	Required	Required
Environmental/Climatic	Useful	Useful
Material Properties	Useful	Useful
Monitoring Data		
Distress	Required	Required
Traffic	Required (may be in traffic categories rather than exact counts)	Required (may be in traffic categories rather than exact counts)
Deflection	Useful, if available	Useful, if available
Profile	Useful, if available	Useful, if available
Maintenance History	Useful, if available	Not required
Condition Index	Required	Required

รูปที่ 3.46 รายการข้อมูลสำหรับการพัฒนาโมเดลสมรรถนะถนน (Performance Model)
(ที่มา NHI 1998)

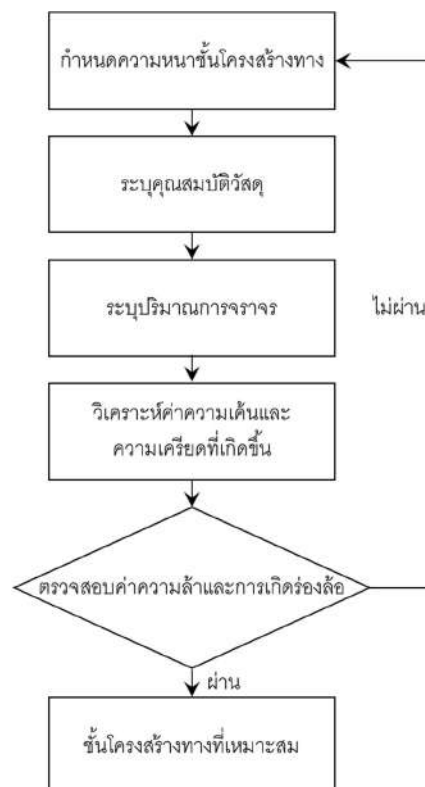


รูปที่ 3.47 ตัวอย่างการปรับแก้โมเดล (Model Updating) เมื่อมีข้อมูลเพิ่มขึ้น
(ที่มา : NHI 1998)

3.11 แนวทางการออกแบบชั้นโครงสร้างถนนลาดยางในปัจจุบัน

การออกแบบชั้นโครงสร้างทางถนนลาดยางในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่วิธี Empirical Method และวิธี Analytical Method โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากคือวิธี Empirical Method โดย Asphalt Institute (1970) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้โดยง่าย สะดวก อาศัยค่าคุณสมบัติคุณสมบัติของวัสดุเช่นค่า CBR เป็นเกณฑ์ในการกำหนดความหนาชั้นทาง อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวอาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ออกแบบถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ได้เนื่องจากจะทำให้ค่าที่ออกแบบไว้มีความคลาดเคลื่อนเช่นโครงสร้างทางเกิดความเสียหายผิดไปจากอายุการใช้งานที่คาดไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธี Analytical Method ในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางแทน

การออกแบบโดยวิธี Analytical Method นั้น จะทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นโครงสร้างทางต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักกระทำของล้อรถ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบการเกิดความล้าและการเกิดร่องล้อในชั้นโครงสร้างทางที่มีลักษณะโครงสร้างหลายชั้น (Multi-layered System) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างทางโดยวิธี Analytical Method ดังแสดงในรูปที่ 3.48 ปัจจัยสำคัญในการออกแบบด้วยวิธีนี้คือ ค่าคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างชั้นทางต่างๆที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ค่าโมดูลัสของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปผู้วิเคราะห์มักจะใช้ค่าแนะนำเชิงประสบการณ์จากต่างประเทศดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.7 เป็นต้น อย่างไรก็ตามค่าคุณสมบัติวัสดุนั้นมักจะแปรเปลี่ยนไปขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นเป็นสำคัญ ซึ่งอาจจะส่งผลให้ค่าคุณสมบัติแนะนำที่นำมาใช้นั้นมีความแตกต่างจากค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในประเทศไทย



รูปที่ 3.48 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาชั้นโครงสร้างลาดยางด้วยวิธี Analytical Method

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติวัสดุประเภท Unbound Granular Base และ Cemented Base

(ที่มา : NAASRA 1987)

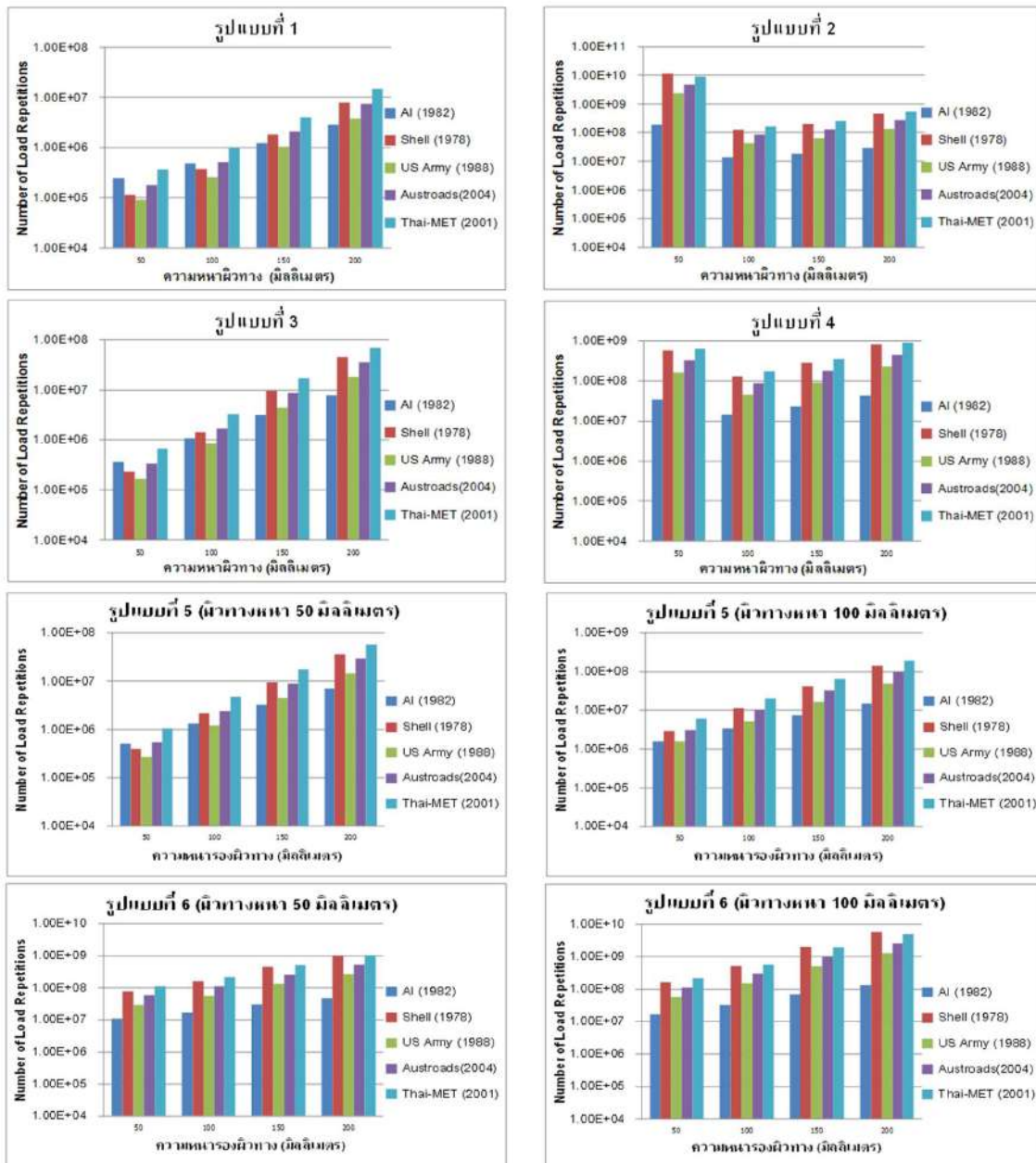
MATERIAL CATEGORY	UNBOUND GRANULAR						CEMENTED MATERIAL		
	High Quality Crushed Rock		Base Quality Gravel		Sub-base Gravel		Crushed Rock 2-3% cement	Base Quality Natural Gravel 4-5% Cement	Sub-base Quality Natural Gravel 4-5% Cement
PROPERTY	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material	Over Granular Material	Over Stiff Cemented Material			
Range of Modulus (Vertical MPa)	150 - 550	200 - 700	150 - 500	200 - 500	150 - 400	150 - 450	3000 - 8000	3000 - 7000	1500 - 3000
Typical Modulus (Vertical MPa)	500 ² 350	500 ² 350	400 ² 300	400 ² 300	300 ² 250	300 ² 250	5000	5000	2000
Degree of Anisotropy ³	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Range of Poisson's Ratio (Vertical, horizontal and cross)	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.25 - 0.4	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
Typical Value of Poisson's Ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2	0.2	0.2
f [See CIRCLY Manual]	Given by formula $f = \frac{\text{Vertical Modulus}}{1 + \text{Poisson's Ratio}}$						not required		
Vertical Modulus under asphalt Surfacing	Refer to Table 6.7						same as above		

1. Although figures are only quoted for cement, other cementing agents such as lime, lime flyash, cement flyash and granulated slag may be used. The stiffness of such materials should be determined by testing.
2. where material is compacted using Modified compaction, other value for Standard Compaction.
3. Degree of Anisotropy = $\frac{\text{Vertical Modulus}}{\text{Horizontal Modulus}}$

3.12 การวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุก

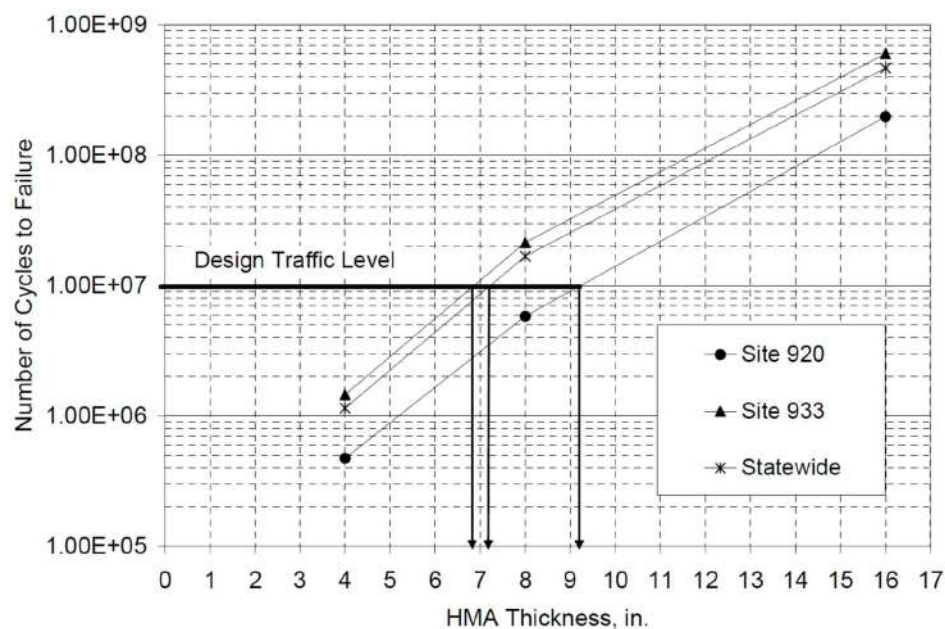
ในอดีตการทำนายอายุบริการทางหลวงนั้นอาศัยมักจะดำเนินการตามคู่มือการออกแบบชั้นทางของ AASHTO (1993) ซึ่งเป็นวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) จากการทดสอบบนถนนที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสภาพการใช้งานปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก เช่น จำนวนและน้ำหนักรถบรรทุกที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้การทำนายอายุบริการดังกล่าวอาจจะเกิดการคลาดเคลื่อนได้ ส่งผลให้ทางหลวงเกิดความเสียหายได้รวดเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ได้ นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ล้วนแต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของทางหลวงด้วยเช่นกัน จึงได้มีการนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงจากในสนาม เช่น อุณหภูมิรวมทั้งค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งค่าความเครียดหรือค่าการแอ่นตัวมาปรับปรุงตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น (Rilett and Hutchinson 1988)

ชนกฤตและคณะ (2554) ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเครียดวิกฤตที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถนนลาดยางทั้งหมด 6 รูปแบบ โดยการวิเคราะห์นั้นใช้โปรแกรม Layer Elastic เพื่อประเมินหาความเครียดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์หาจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำของโครงสร้างทางลาดยางแต่ละรูปแบบได้ดังแสดงในรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.49 ผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐานที่ยอมให้
(ที่มา : ธนกุลฤกษ์และคณะ 2554)

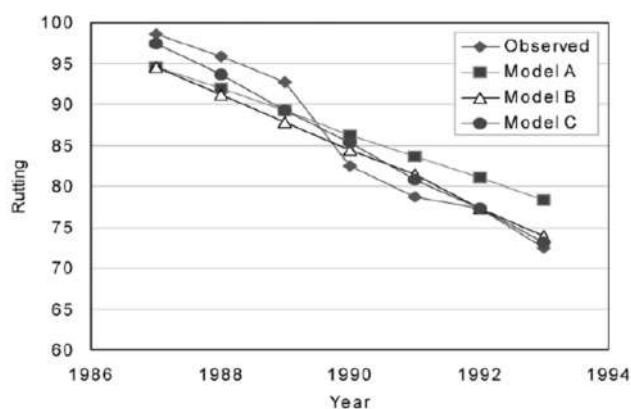
Turochy et al. (2005) ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงค่า Truck Factor ของเมือง Auburn มลรัฐ Alabama โดยอาศัยข้อมูลทางสถิติจากสถานีตรวจวัดน้ำหนักแบบ Weight In Motion (WIM) และใช้วิธีการออกแบบ Mechanistic-Empirical สำหรับนำมาใช้ในออกแบบความหนาชั้นทางให้เพียงพอต่อการรองรับจำนวนเที่ยวของน้ำหนักกระทำที่จะเกิดขึ้น โดยตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสมแสดงไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.50



รูปที่ 3.50 ตัวอย่างการหาความหนาชั้นทางที่เหมาะสม

(ที่มา : Turochy et al., 2005)

Kim and Kim (2006) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของทางหลวงลาดยางที่มณฑล Georgia โดยอาศัยฐานข้อมูลประสิทธิภาพทางหลวงที่ได้จัดเก็บไว้ก่อนหน้านี้ด้วยวิธี Pavement Condition Evaluation System (PACES) ร่วมกับแบบจำลองการวิเคราะห์ Regression Analysis โดยผลของการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงแนวโน้มความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระยะเวลาดังๆ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.51 ทำให้สามารถประมาณช่วงเวลาการซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.51 การเปรียบเทียบค่า Rutting จากข้อมูลที่ตรวจวัดจริงในสนามกับแบบจำลองการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางหลวง

(ที่มา : Kim and Kim, 2006)

เนื่องด้วยค่าอัตราการทำลาย Load Equivalent Factor (LEF) ที่มักนำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นค่าที่กำหนดไว้ในคู่มือการออกแบบชั้นทางของ AASHTO ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993 (AASHTO, 1993) ซึ่งทำให้ค่าที่ใช้นั้นอาจจะไม่ตรงตามสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน ซึ่งถ้าหากค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกจริงมีค่าสูงกว่าที่ทำนายไว้จะทำให้ถนนเกิดความเสียหายได้รวดเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ หรือในอีกแง่หนึ่งถ้าหากค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกจริงมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายไว้ จะทำให้เกิดการสูญเสียงบประมาณที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อทางหลวงสายอื่นได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจะดำเนินการวิเคราะห์ค่าอัตราการทำลายของรถบรรทุกตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อัตราการทำลายจากทฤษฎี เช่น กฎยกกำลังสี่ (สมการที่ 17 และ 18) วิธี AASHTO (สมการที่ 19 – 25) เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2016 Rys et al. ได้ดำเนินการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณจากวิธีต่างๆทั้งวิธีสมการกำลังสี่, AASHTO 1993, French LCPC และ GUT (Gdansk University of Technology) Method โดยใช้ข้อมูลยานพาหนะประเภทต่างๆทั้งรถบรรทุก (C) รถบรรทุกพ่วง (C+P) รวมถึงรถโดยสารสาธารณะ (A) จากสถานีตรวจวัดประเภท Weight In Motion (WIM) บนชั้นทางทั้งแบบ Flexible และ Semi-Rigid ดังแสดงในรูปที่ 3.52 ซึ่งพบว่าสำหรับถนนประเภท Flexible นั้นทั้งสามวิธีแรกที่กล่าวถึงให้ค่า LEF ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนวิธี GUT Method ซึ่งเป็นวิธีคำนวณแบบ Mechanistic-Empirical นั้นค่า LEF จะขึ้นกับ Fatigue Criteria ซึ่งค่า LEF ที่คำนวณได้จาก Asphalt Fatigue มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจาก subgrade deformation ขณะที่ข้อมูลจากถนนประเภท semi-rigid นั้นพบว่าค่า LEF จากสมการยกกำลัง 12 นั้นมีค่ามากกว่าสมการกำลังสี่ประมาณ 1.5 เท่า และพบว่าค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธี LCPC มีค่าแตกต่างค่อนข้างมากจากค่าที่คำนวณด้วยวิธี GUT ของประเทศโปแลนด์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่ประเทศฝรั่งเศสกำหนดน้ำหนักเพลามาตรฐาน (130 kN) ที่สูงกว่าประเทศโปแลนด์ (100 หรือ 115 kN)

$$LEF = \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_{18}} \right)^4 \quad (17)$$

$$LEF = \left(\frac{L_x}{L_s} \right)^4 \quad (18)$$

เมื่อ ϵ_x = Tensile Strain ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ชั้น Asphalt เนื่องจาก x-axle load

ϵ_{18} = Tensile Strain ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ชั้น Asphalt เนื่องจาก 18-kip axle load

L_x = แรงกระทำต่อ single axle ในหน่วย kip

L_s = 18 kips สำหรับ single axle

$$\text{สำหรับถนนลาดยาง: } \log \left(\frac{w_{tx}}{w_{t18}} \right) = 4.79 \log(18+1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (19)$$

$$G_t = \log \left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad (20)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (21)$$

$$\text{สำหรับถนนคอนกรีต: } \log\left(\frac{w_x}{w_{18}}\right) = 4.62 \log(18+1) - 4.62 \log(L_x + L_2) + 3.28 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (22)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.5 - p_t}{4.5 - 1.5}\right) \quad (23)$$

$$\beta_x = 1.00 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.46} L_2^{3.52}} \quad (24)$$

$$LEF(AASHTO) = \frac{w_{18}}{w_x} \quad (25)$$

เมื่อ w_x = จำนวนแรงกระทำโดย x-axle

w_{18} = จำนวนแรงกระทำโดย 18-kip single-axle

L_x = แรงกระทำที่เกิดขึ้น (kip)

L_2 = Axle Code (1 สำหรับ Single Axle, 2 สำหรับ Tandem Axles และ 3 สำหรับ Tridem Axles)

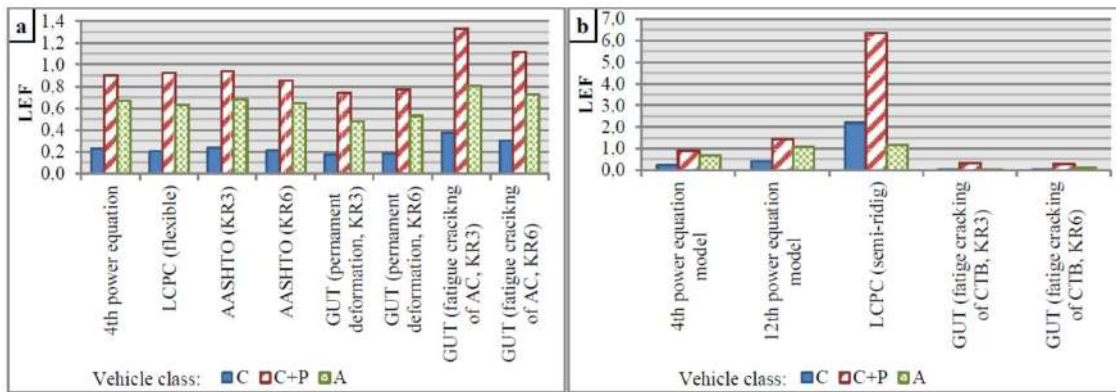
SN = Structure Number

p_t = Terminal Serviceability

G_t = ฟังก์ชันของ p_t

β_{18} = ค่า β_x เมื่อ $L_x = 18$ และ $L_2 = 1$

D = ความหนาพื้นคอนกรีต (นิ้ว)



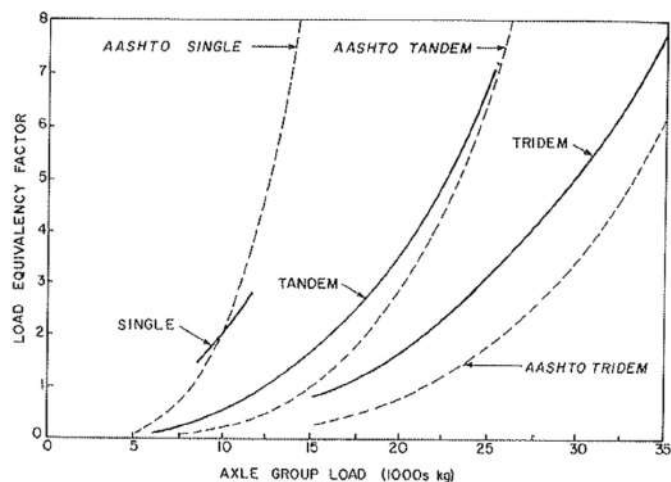
รูปที่ 3.52 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีต่างๆบนถนนสาย DK46 ประเทศโปแลนด์
สำหรับ a) flexible pavements และ b) semi-rigid pavements

(ที่มา : Rys et al., 2016)

3.13 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักกลุ่มเพลาดังๆ

เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าค่า LEF ที่นำมาใช้นั้นอาจจะไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้ทางหลวงในปัจจุบัน เช่นการศึกษาของ Rilett and Hutchinson (1988) ที่พบว่าค่า LEF

ที่วัดได้จากการแอ่นตัวของถนนในประเทศ Canada ดังแสดงในรูปที่ 3.53 นั้นมีค่าสูงกว่าค่า LEF ที่คำนวณได้จากวิธีของ AASHTO อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจะดำเนินการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LEF ของรถบรรทุกกับน้ำหนักกลุ่มเพลตต่างๆที่ได้ในข้อ 3.12 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของรถบรรทุกในประเทศไทย ซึ่งจะทำให้การออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

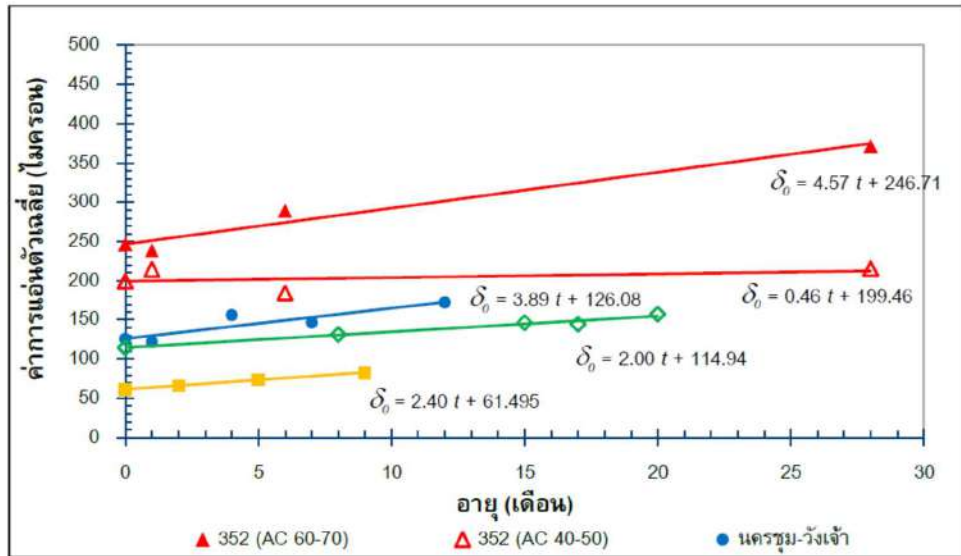


รูปที่ 3.53 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่วิเคราะห์ได้กับค่าของ AASHTO

(ที่มา : Rilett and Hutchinson, 1988)

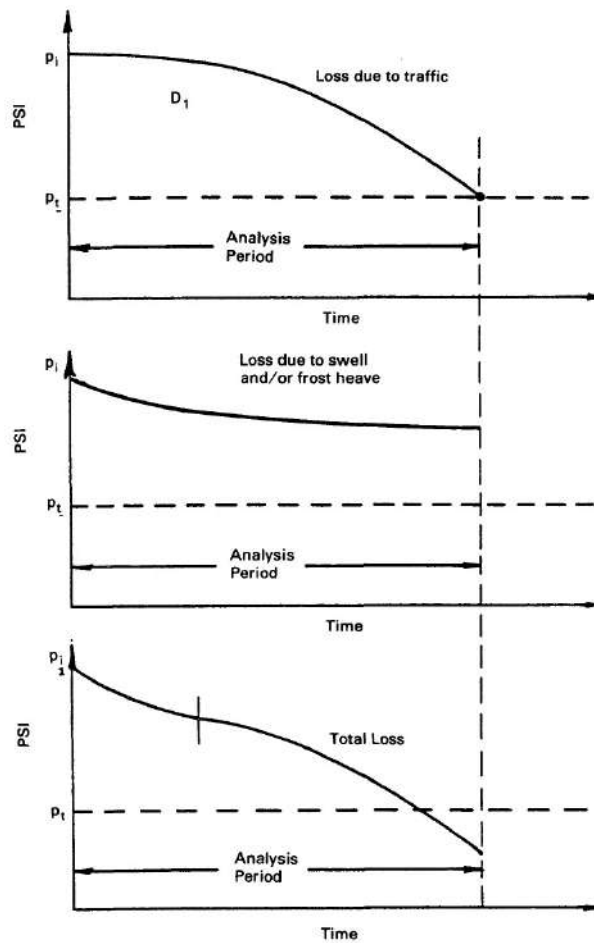
3.14 การพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวง

คณะผู้วิจัยจะดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองทำนายสมรรถนะและอายุบริการทางหลวงตามสภาพการใช้งานจริงของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จจำนวน 2 แปลง ในระยะที่หนึ่ง และที่ติดตั้งเพิ่มเติมจำนวน 1 แปลง รวมจำนวนทั้งสิ้น 3 แปลง โดยคณะผู้วิจัยจะนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพฤติกรรมในสนามมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อคาดการณ์สภาพถนนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออายุใช้งานมากขึ้น ทั้งนี้แบบจำลองจะประกอบไปด้วย 1) Simplified Model สำหรับงานปฏิบัติการ และ 2) Mechanistic (Analytical) Model สำหรับงานวิจัยวิชาการ โดยตัวอย่างการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางหลวงแสดงไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.54 และ รูปที่ 3.55



รูปที่ 3.54 อัตราการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางภายหลังการก่อสร้างหรือบูรณะทางหลวง

(ที่มา: อัครพัฒน์ และ ชนภฤต, พ.ศ. 2555)



รูปที่ 3.55 ตัวอย่างแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของถนน

(ที่มา : AASHTO, 1998)

4. การสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด

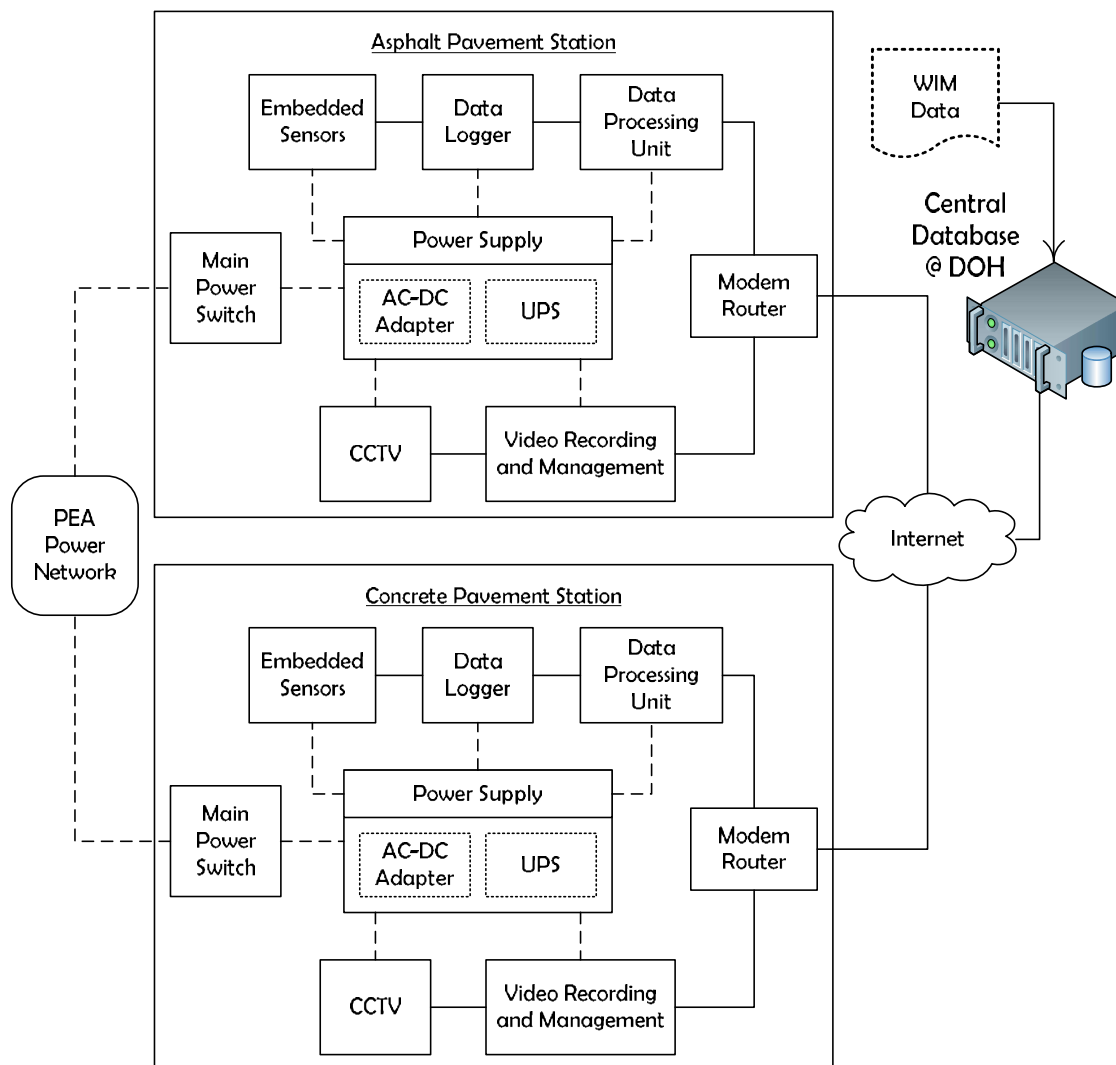
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัด จำนวน 3 แปลง เพื่อทำการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต จำนวน 1 แปลง และแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง จำนวน 2 แปลง รายละเอียดการดำเนินงานสำรวจและจัดทำแบบแปลนแปลงตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

4.1 แนวทางการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต โดยมีภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัดดังรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- 1) การติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์ (Outdoor Cabinet)
 - ก่อสร้างพื้นคอนกรีต รื้อ และโครงหลังคาสำหรับตู้จัดเก็บอุปกรณ์
 - ติดตั้งตู้จัดเก็บอุปกรณ์แบบป้องกันความชื้นและระบายความร้อน
- 2) การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า
 - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากโครงข่ายระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมายังแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
 - ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระบบไฟฟ้าสำหรับแปลงตรวจวัดฯ
- 3) การเชื่อมโยงระบบเครือข่าย
 - เชื่อมต่อระบบเครือข่ายความเร็วสูงจาก Internet Service Provider (ISP) มายังแปลงตรวจวัดฯ
 - ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่ายในแปลงตรวจวัดฯ
- 4) การติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)
 - ติดตั้งชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ
 - เชื่อมโยงอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟกับอุปกรณ์ควบคุมระบบไฟฟ้า
- 5) การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน (Embedded Sensors)
 - ขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างทาง
 - ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
 - ติดตั้งและเชื่อมต่อสายไฟฟ้าและสายสัญญาณกับเครื่องมือตรวจวัดฯ
 - ฝังกลบ บดอัด และซ่อมแซมทางหลวงให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
 - ติดตั้งป้ายและบริหารการจราจรในระหว่างการก่อสร้าง

- 6) การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
 - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
 - เชื่อมต่อสายสัญญาณจากเครื่องมือตรวจวัดฯ กับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger)
 - ทดสอบการเชื่อมต่อข้อมูลและปรับเทียบ (Calibration) เครื่องมือตรวจวัดฯ
- 7) การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)
 - ติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม
 - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม
 - ตั้งค่า (Configuration) หน่วยประมวลผลภาคสนาม
- 8) การติดตั้งฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บผลการตรวจวัดในภาคสนาม
 - ออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัดฯ บนหน่วยประมวลผลภาคสนาม
 - เชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมายังหน่วยประมวลผลภาคสนาม
- 9) การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV)
 - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเดินสายสัญญาณสำหรับกล้องวงจรปิด
 - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) กล้องวงจรปิด
- 10) การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management)
 - เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและเดินสายสัญญาณสำหรับอุปกรณ์บันทึกภาพ
 - ติดตั้งและตั้งค่า (Configuration) อุปกรณ์บันทึกภาพ
 - เชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ
 - เชื่อมต่อระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ
- 11) การติดตั้งระบบติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง
 - ออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากแปลงตรวจวัดถนนลาดยางและถนนคอนกรีต
 - เชื่อมโยงข้อมูลจากหน่วยประมวลผลภาคสนามมายังฐานข้อมูลกลาง
 - พัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) สำหรับสืบค้นและแสดงผลข้อมูลในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวง
- 12) การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก
 - ศึกษาแนวทางในการนำข้อมูลจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุม น้ำหนักและยานพาหนะ เพื่อนำเข้า (Data Import) ฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับใช้ในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวงร่วมกับข้อมูลผลการตรวจวัดจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต



รูปที่ 4.1 ภาพรวมการติดตั้งและเชื่อมโยงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูลจากระบบเครื่องมือตรวจวัด

4.2 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณ สถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจพื้นที่ติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตบนทางหลวงหมายเลข 4 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า) ต.ท่าตำหนัก อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม โดยคณะผู้วิจัยได้ กำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตในบริเวณหลักกิโลเมตรที่ 41+940 บนทางหลวง หมายเลข 4 ตอนควบคุมหมายเลข 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน) ซึ่งอยู่ในบริเวณฟักดลองจิจุดที่ 13.7797582 องศาและละติจูดที่ 100.175865 องศา ในพื้นที่ความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 โดยตำแหน่งตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตจะอยู่ใน ช่องจราจรที่ 2 จากด้านซ้ายมือก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า) ประมาณ 550 เมตร และ อยู่ก่อนถึงเครื่องชั่งน้ำหนักบรรทุกทุกขณะเคลื่อนที่ (WIM) ประมาณ 10 เมตร



รูปที่ 4.2 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหน้าห้กนกรชัยศรี (ขาเข้า)



รูปที่ 4.3 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหน้าห้กนกรชัยศรี (ขาเข้า)



รูปที่ 4.4 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)



รูปที่ 4.5 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM นครชัยศรี (ขาเข้า)

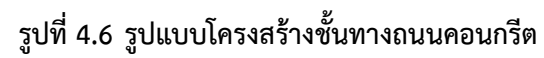
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจและรวบรวมข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต สภาพผิวทาง ข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

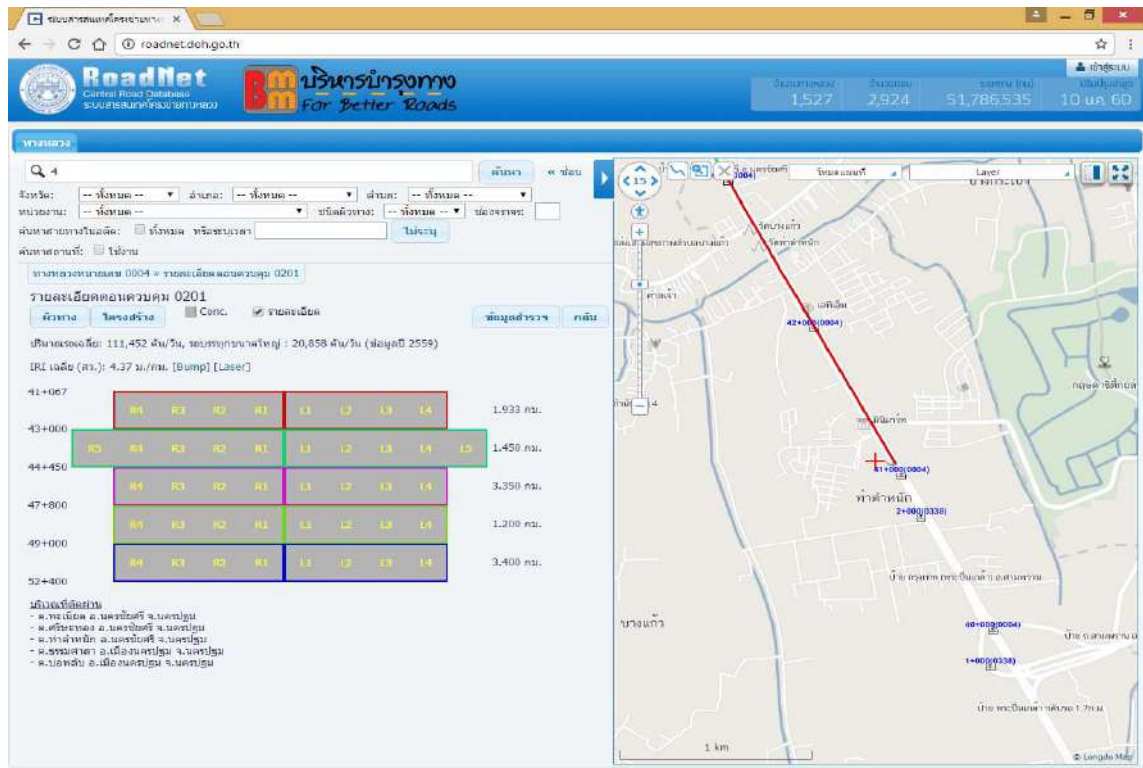
- ลักษณะทางภูมิศาสตร์เป็นพื้นที่ราบเรียบ เป็นช่วงทางตรง อยู่ในบริเวณชุมชนเมือง โดยช่องจราจรซ้ายสุดมักจะถูกกีดขวางโดยรถบรรทุกและรถยนต์ที่จอดอยู่ ทำให้รถบรรทุกต้องใช้ช่องจราจรที่ 2 จากด้านซ้ายในการสัญจร
- รูปแบบโครงสร้างชั้นทางตามมาตรฐานทางชั้นพิเศษ ผิวทางคอนกรีตความหนา 25 เซนติเมตร วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80% ความหนา 10 เซนติเมตร และชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม (Soil Aggregate Subbase) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 25% ความหนา 15 เซนติเมตร
- เป็นทางหลัก 8 ช่องจราจร ผิวทางกว้าง 3.5 เมตร/ช่องจราจร ไหล่ทางด้านซ้ายกว้าง 2.5 เมตร เกาะกลางถนนกว้าง 5 เมตร และความลาดเอียงของผิวทาง (Cross Slope) 2.5%
- จากข้อมูลการสำรวจสภาพผิวทางของสำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง ปี 2558 พบว่าค่าดัชนีความขรุขระสากลของผิวทางเฉลี่ย (IRI) ของตอนควบคุมหมายเลข 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน) บนทางหลวงหมายเลข 4 เท่ากับ 4.37 มิลลิเมตร/เมตร
- จากข้อมูลการสำรวจปริมาณจราจรปี 2559 ของสำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง พบว่าปริมาณรถเฉลี่ยเท่ากับ 111,452 คัน/วัน และปริมาณรถบรรทุกขนาดใหญ่เท่ากับ 20,858 คัน/วัน (ข้อมูลปี 2559)
- จากข้อมูลสถิติย้อนหลัง 5 ปีของสำนักงานควบคุมน้ำหนักรถยานพาหนะ กรมทางหลวง พบว่าจำนวนรถบรรทุกเข้าช่วงน้ำหนักรถของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) เฉลี่ยปีละ 1,144,140 คัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สถิติการเข้าช่วงน้ำหนักสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) ปี 2555 – 2559

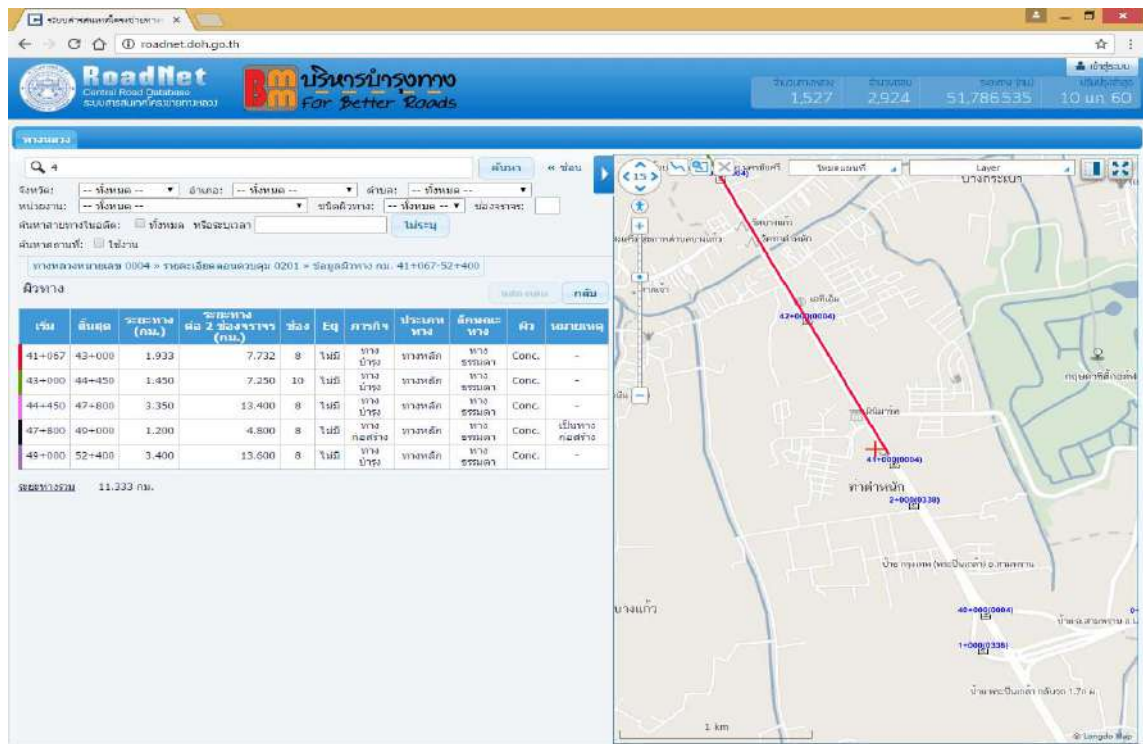
ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักรถยานพาหนะ กรมทางหลวง

ปี	จำนวนรถบรรทุกเข้าช่วงน้ำหนัก (คัน/ปี)
2555	1,313,860
2556	1,220,508
2557	1,170,058
2558	1,001,905
2559	1,014,368
รวม 5 ปี	5,720,699
เฉลี่ย	1,144,140

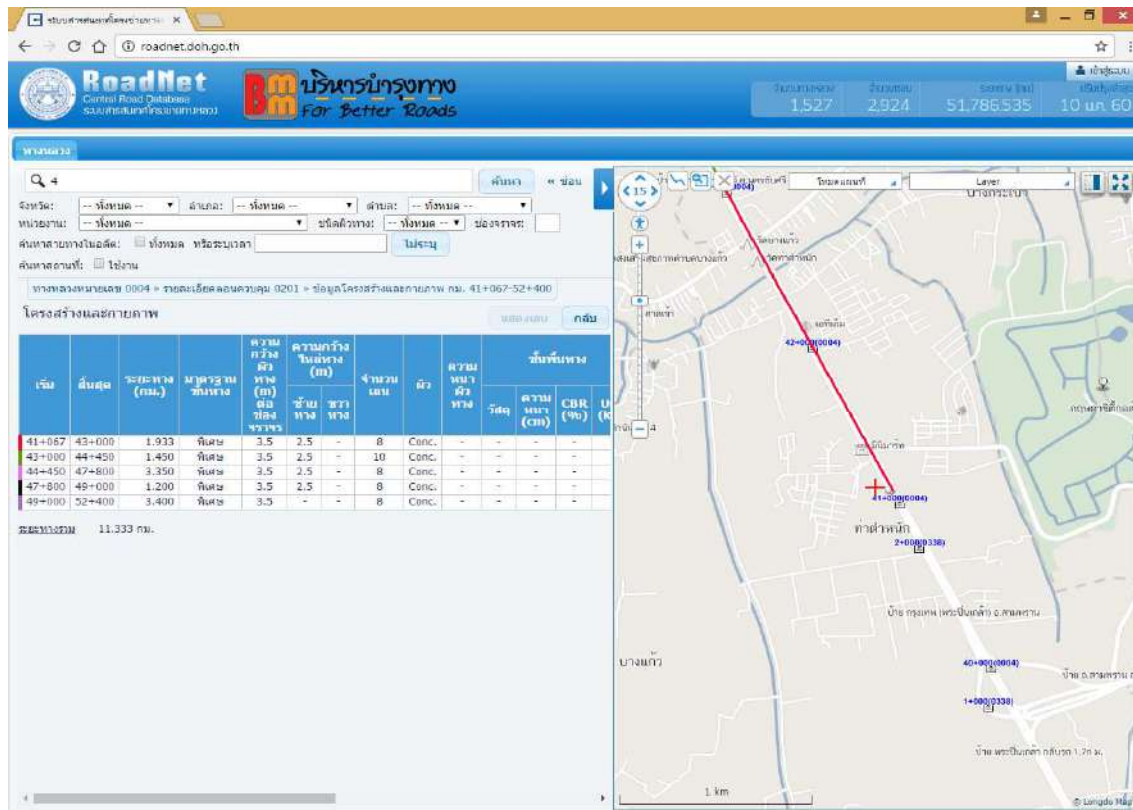




รูปที่ 4.7 ข้อมูลรายละเอียดทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคุม 0201 (นครศรีธรรมราช - พระประโทน)
ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริการบำรุงทาง



รูปที่ 4.8 ข้อมูลผิวทางของทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคุม 0201 (นครศรีธรรมราช - พระประโทน)
ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริการบำรุงทาง



รูปที่ 4.9 ข้อมูลโครงสร้างทางหลวงหมายเลข 4 ตอนควมคุม 0201 (นครชัยศรี – พระประโทน)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริการบำรุงทาง

4.3 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณ สถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจพื้นที่และกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางบนทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควบคุมหมายเลข 0302 (คลองอี่จาง - หลุมดิน) บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 88+770 ต.ดอนทราย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี บริเวณพิกัดละติจูดที่ 99.851005 องศา และลองจิจูดที่ 13.637825 องศา โดยตำแหน่งการติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจะอยู่ในช่องจราจรซ้ายสุด ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) ประมาณ 400 เมตร และอยู่หลังจากผ่านเครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ (WIM) ประมาณ 40 เมตร ในพื้นที่รับผิดชอบของแขวงทางหลวงราชบุรี ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13



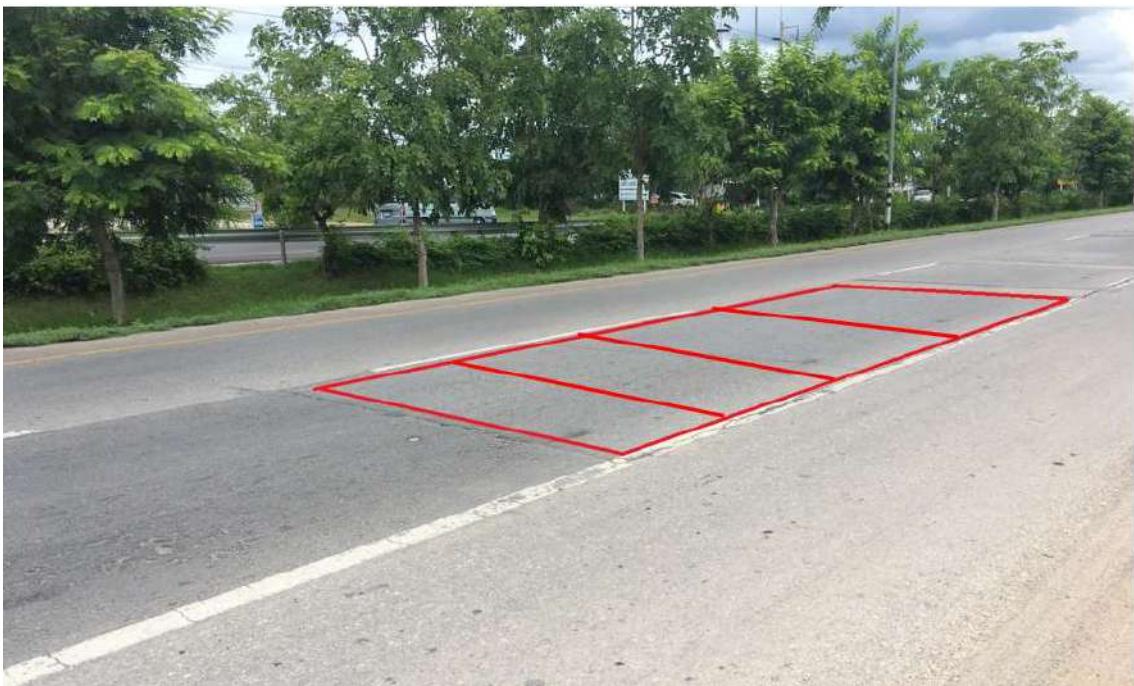
รูปที่ 4.10 แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง สถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)



รูปที่ 4.11 บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)



รูปที่ 4.12 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)



รูปที่ 4.13 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางหลังบริเวณเครื่องชั่ง WIM โพธาราม (ขาเข้า)

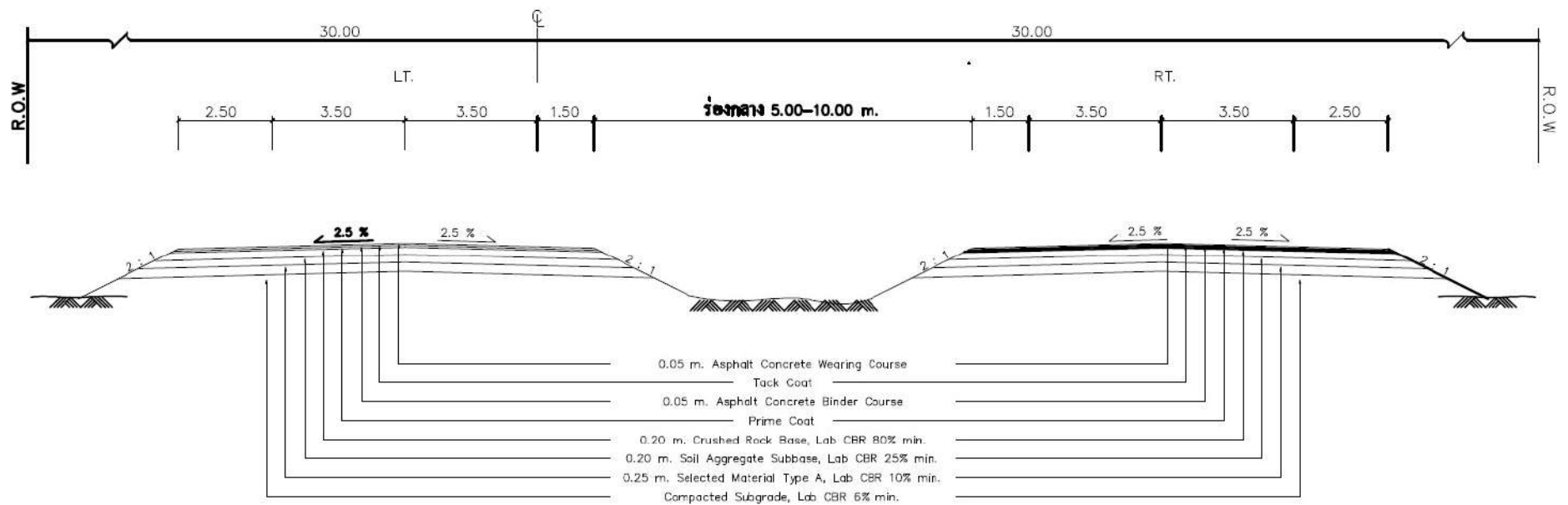
ปรึกษาได้ดำเนินการสำรวจและรวบรวมข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต สภาพผิวทาง ข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ลักษณะทางภูมิศาสตร์เป็นพื้นที่ราบเรียบ เป็นช่วงทางตรง อยู่ใกล้แหล่งชุมชน มีไหล่ทางด้านซ้ายและขวา รถบรรทุกส่วนใหญ่ใช้ช่องจราจรที่ 1 ในการสัญจร
- รูปแบบโครงสร้างชั้นทางตามมาตรฐานทางชั้น 1 ผิวทางประกอบด้วย แอสฟัลต์คอนกรีต ผิวหน้า (Asphalt Concrete Wearing Course) ความหนา 5 เซนติเมตร แทคโคท (Tack Coat) แอสฟัลต์คอนกรีตเกลี่ยแต่งและบดทับบนชั้นรองผิวทาง (Asphalt Concrete Binding Course) ความหนา 5 เซนติเมตร และไพรม์โคท (Prime Coat) วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Base) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80% ความหนา 30 เซนติเมตร ชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม (Soil Aggregate Subbase) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 25% ความหนา 30 เซนติเมตร ชั้นวัสดุคัดเลือก ก (Selected Material A) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 10% ความหนา 30 เซนติเมตร และชั้นวัสดุคั่นทางบดอัดแน่น (Compacted Subgrade) ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 6%
- เป็นทางหลัก 4 ช่องจราจร ผิวทางกว้าง 3.5 เมตร/ช่องจราจร ไหล่ทางด้านซ้ายกว้าง 2.5 เมตร ไหล่ทางด้านขวากว้าง 2.5 และความลาดเอียงของผิวทาง (Cross Slope) 2.5%
- จากข้อมูลการสำรวจสภาพผิวทางของสำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง ปี 2557 พบว่าค่าดัชนีความขรุขระสากลของผิวทางเฉลี่ย (IRI) ของตอนควบคุมหมายเลข 0302 (คลองอี่จาง - หลุมดิน) บนทางหลวงหมายเลข 4 เท่ากับ 5.04 มิลลิเมตร/เมตร
- จากข้อมูลการสำรวจปริมาณจราจรปี 2559 ของสำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง พบว่าปริมาณรถเฉลี่ยเท่ากับ 94,757 คัน/วัน และปริมาณรถบรรทุกขนาดใหญ่เท่ากับ 29,733 คัน/วัน (ข้อมูลปี 2559)
- จากข้อมูลสถิติย้อนหลัง 5 ปีของสำนักงานควบคุมน้ำหนักรถยานพาหนะ กรมทางหลวง พบว่าจำนวนรถบรรทุกเข้าชั่งน้ำหนักของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) เฉลี่ยปีละ 306,382 คัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.2

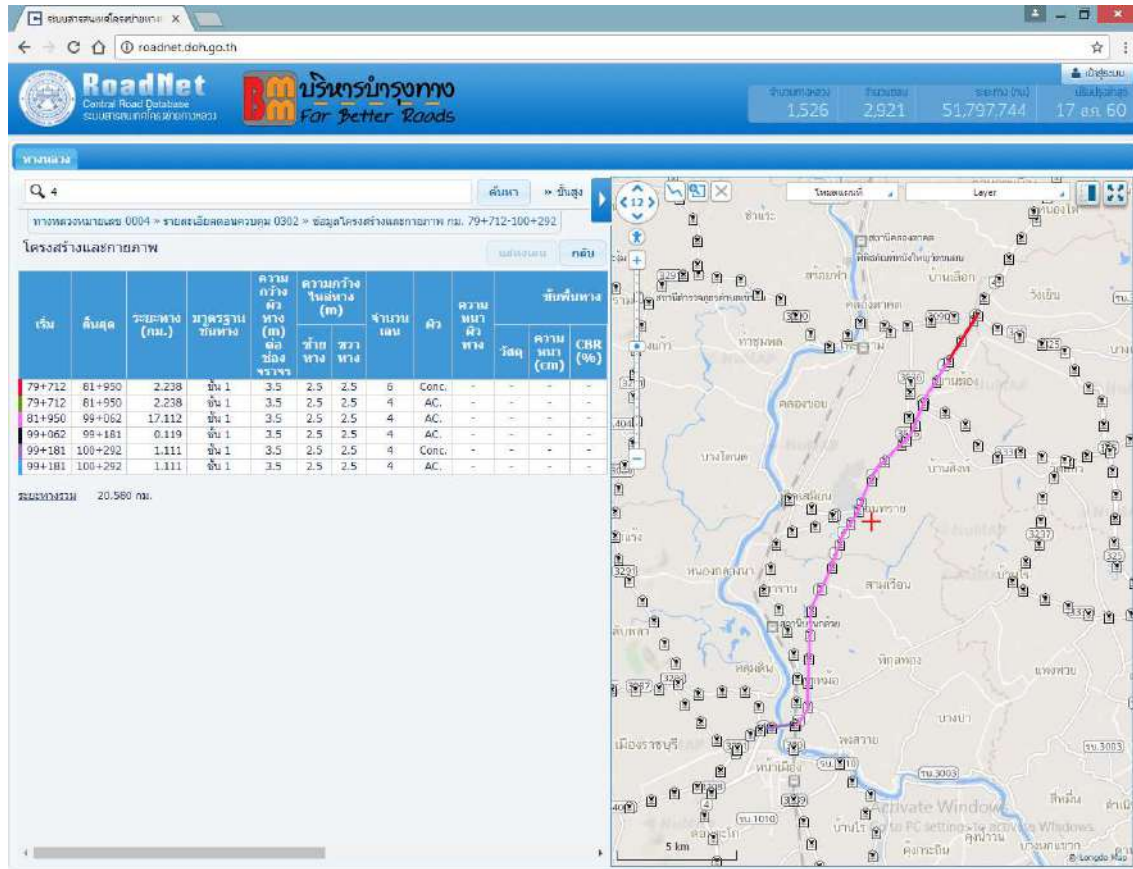
ตารางที่ 4.2 สถิติการเข้าชั่งน้ำหนักสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) ปี 2555 – 2559

ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักรถยานพาหนะ กรมทางหลวง

ปี	จำนวนรถบรรทุกเข้าชั่งน้ำหนัก (คัน/ปี)
2555	265,811
2556	345,494
2557	339,995
2558	327,003
2559	253,605
รวม 5 ปี	1,531,908
เฉลี่ย	306,382



รูปที่ 4.14 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง



รูปที่ 4.17 ข้อมูลโครงสร้างทางหลวงหมายเลข 4 (ขาเข้า) ตอนควบคุม 0302 (คลองอี่จาง - หลุมดิน)
ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริการบำรุงทาง

4.4 การสำรวจและกำหนดตำแหน่งติดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณ สถานีตรวจสอบน้ำหนักบรรทุก (ขาเข้า)

ข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ลักษณะทางเรขาคณิต สภาพผิวทาง ข้อมูลประวัติสายทาง (Road Inventory) และข้อมูลปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวัน (Truck Traffic Volume) ย้อนหลังอย่างน้อย 1 ปี โดยอ้างอิงจากฐานข้อมูลสถานีตรวจสอบน้ำหนักในบริเวณใกล้เคียงหรือจากฐานข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องของแปลงตรวจวัดฯ มีดังต่อไปนี้

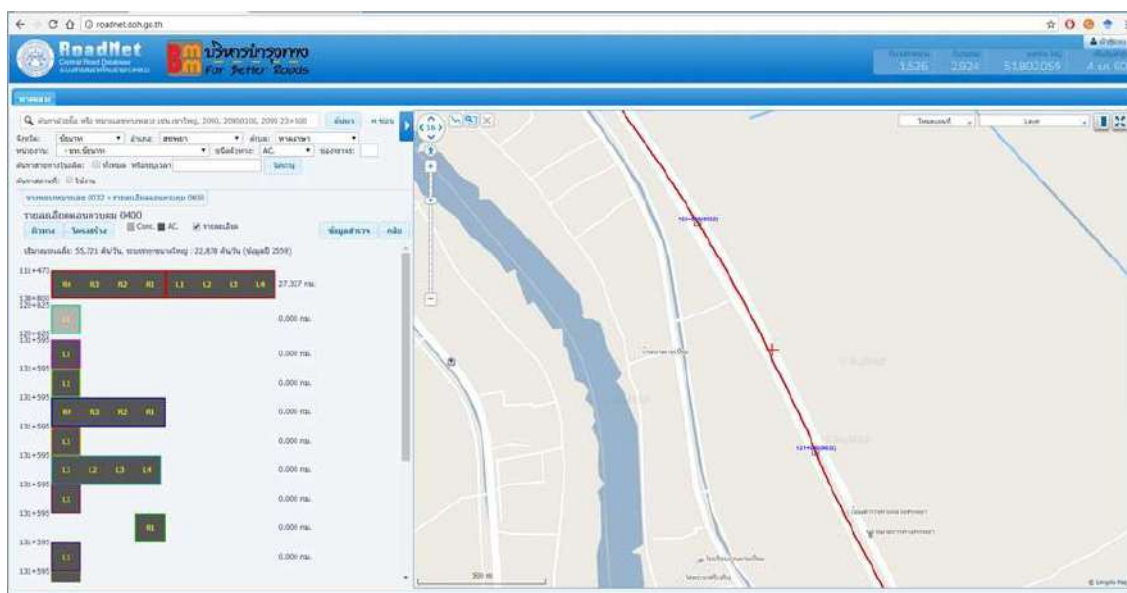
- สถานีตรวจสอบน้ำหนักบรรทุก (ขาเข้า)
 - ทางหลวงหมายเลข 32 ก.ม. 120+250
 - ตอน 0400 ต.หาดอาษา อ.สรรพยา จ.ชัยนาท
 - พิกัด: 15.1474864, 100.254791
 - ชนิดผิวทาง: AC, มาตรฐานชั้นทาง : พิเศษ, จำนวนช่องจราจร : 8
 - อุปกรณ์สถานี: เครื่องชั่ง Static, WIM, ระบบคัดแยกอัตโนมัติ
 - ปริมาณรถเฉลี่ย: 55,721 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สป. ตอน 0400 ปี 2559)

- รถบรรทุกขนาดใหญ่: 22,878 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สป. ตอน 0400 ปี 2559)
- จำนวนรถบรรทุกเข้าซังน้ำหนักร: 516,300 คัน/วัน (ข้อมูลจาก สคน. ปี 2559)
- ระยะทางจากกรุงเทพฯ: 175 กม.
- ข้อมูลสถิติการเข้าซังน้ำหนักรยานพาหนะสถานีตรวจสอบสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560 ดังแสดงในตารางที่ 4.3
- ข้อมูลรายละเอียดตอนควบคุมแสดงในรูปที่ 4.18
- ข้อมูลผิวทางแสดงในรูปที่ 4.19
- ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพแสดงในรูปที่ 4.20
- ตำแหน่งจุดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงใน รูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.24
- รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางแสดงใน รูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสถิติการเข้าซังน้ำหนักรยานพาหนะ สถานีตรวจสอบน้ำหนักรสรรพยา (ขาเข้า) ประจำปี 2555 – 2560

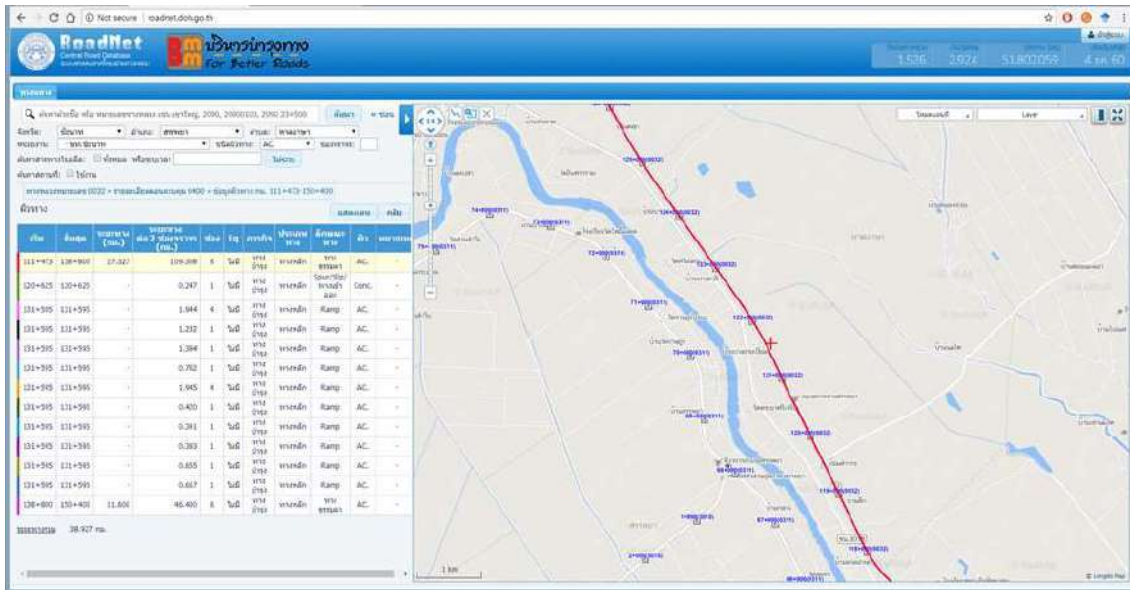
ปี 2555		ปี 2556		ปี 2557		ปี 2558		ปี 2559		ปี 2560		รวม		%
เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	เข้าซัง	เกิน	
601,030	135	706,542	109	744,039	94	503,476	55	516,300	40	635,283	30	3,706,670	463	0.0125

ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักรยานพาหนะ กรมทางหลวง



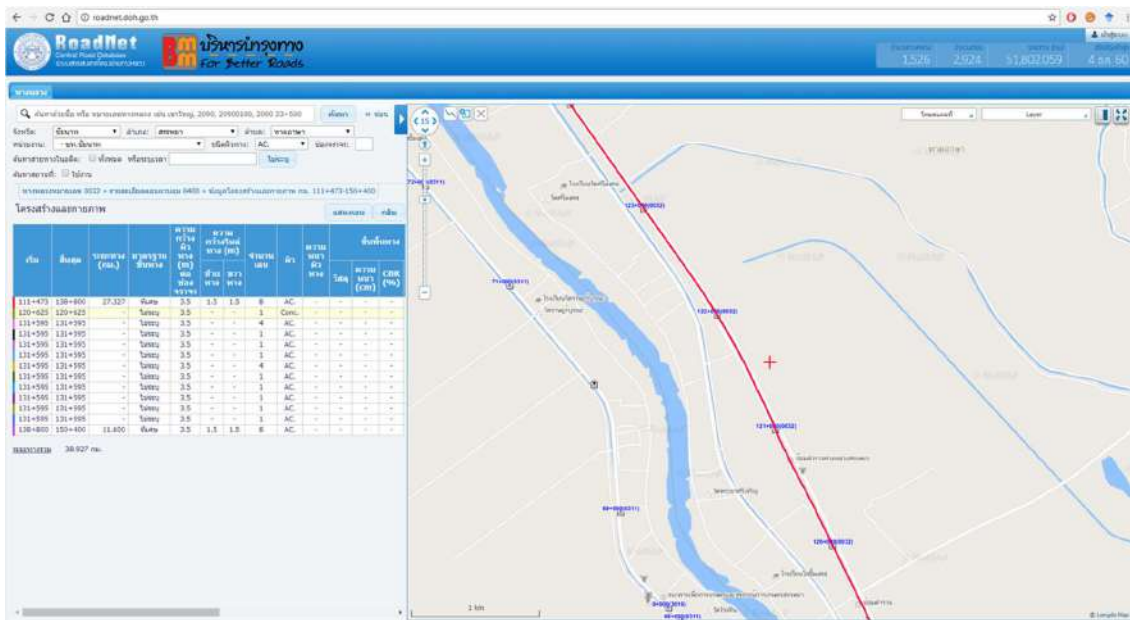
รูปที่ 4.18 ข้อมูลรายละเอียดตอนควบคุมสถานีตรวจสอบน้ำหนักรสรรพยา (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 4.19 ข้อมูลผิวทางสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 4.20 ข้อมูลโครงสร้างและกายภาพสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

ที่มา : ระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง (Roadnet) ของสำนักบริหารบำรุงทาง



รูปที่ 4.21 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



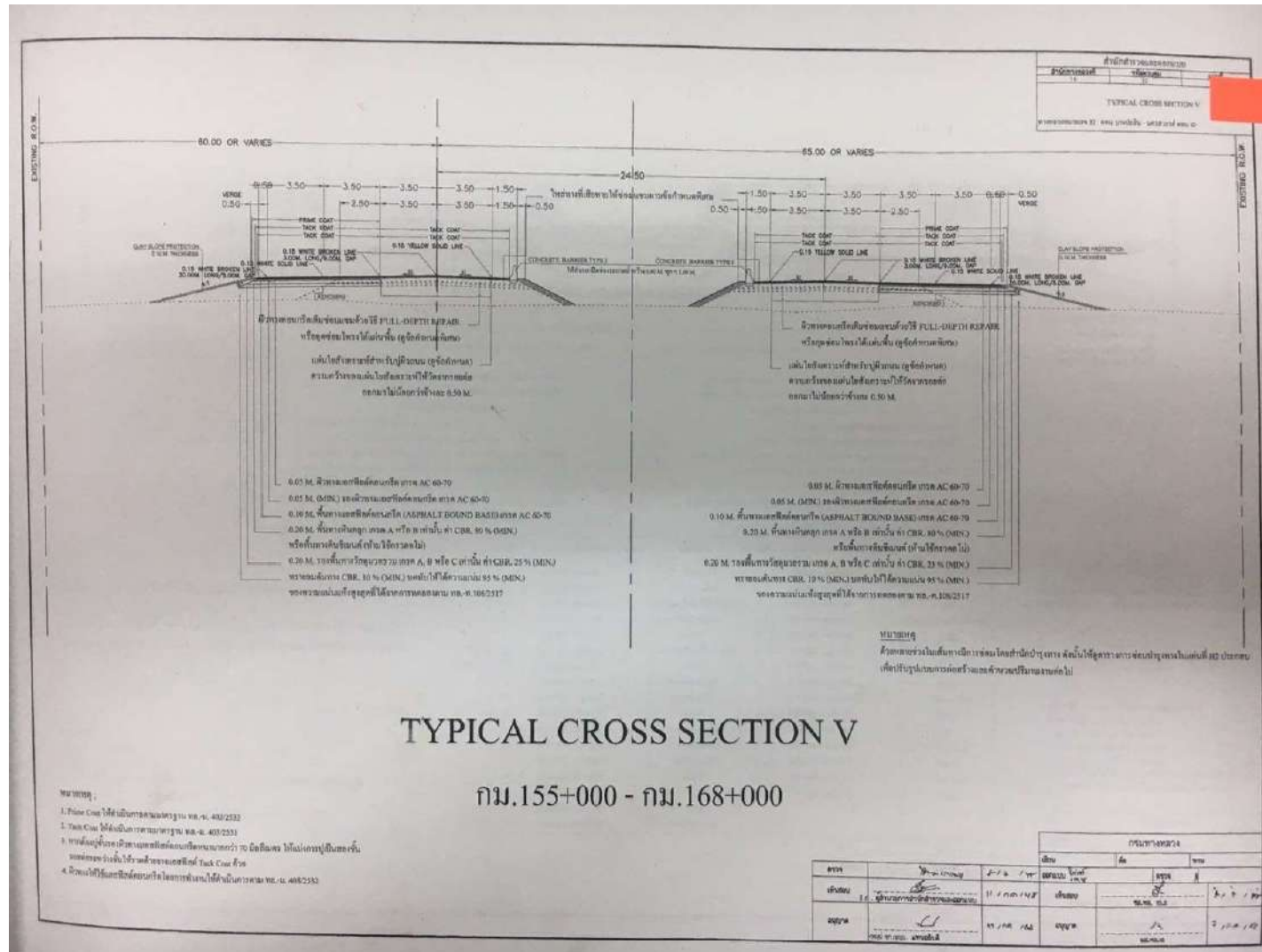
รูปที่ 4.22 บริเวณด้านหน้าสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



รูปที่ 4.23 บริเวณเครื่องชั่ง WIM ก่อนถึงสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



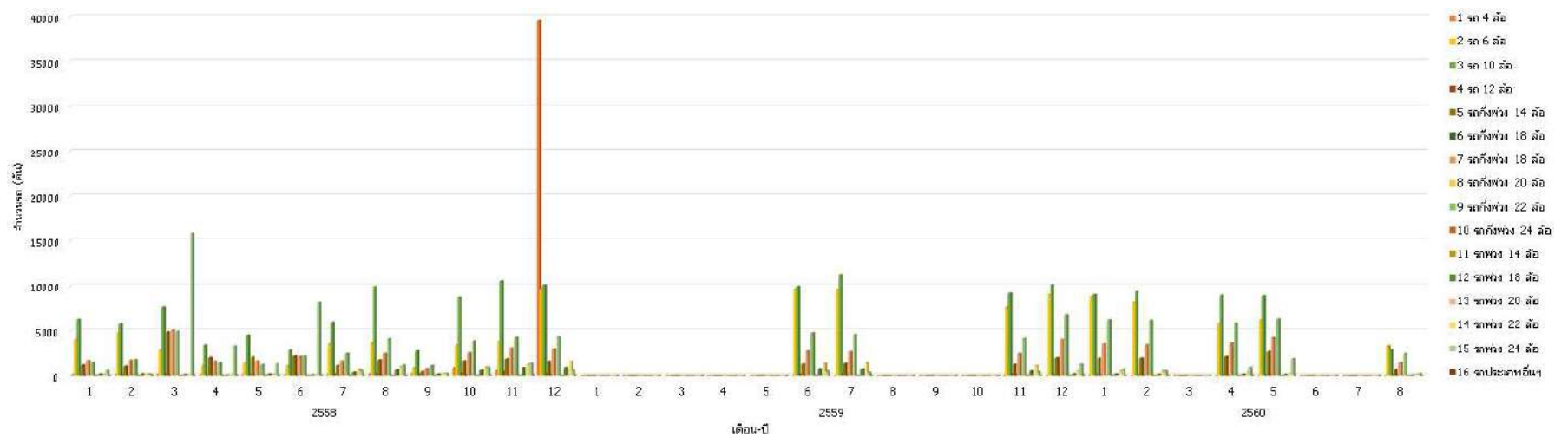
รูปที่ 4.24 บริเวณแปลงโครงสร้างถนนลาดยางก่อนถึงบริเวณเครื่องชั่ง WIM สรรพยา (ขาเข้า)



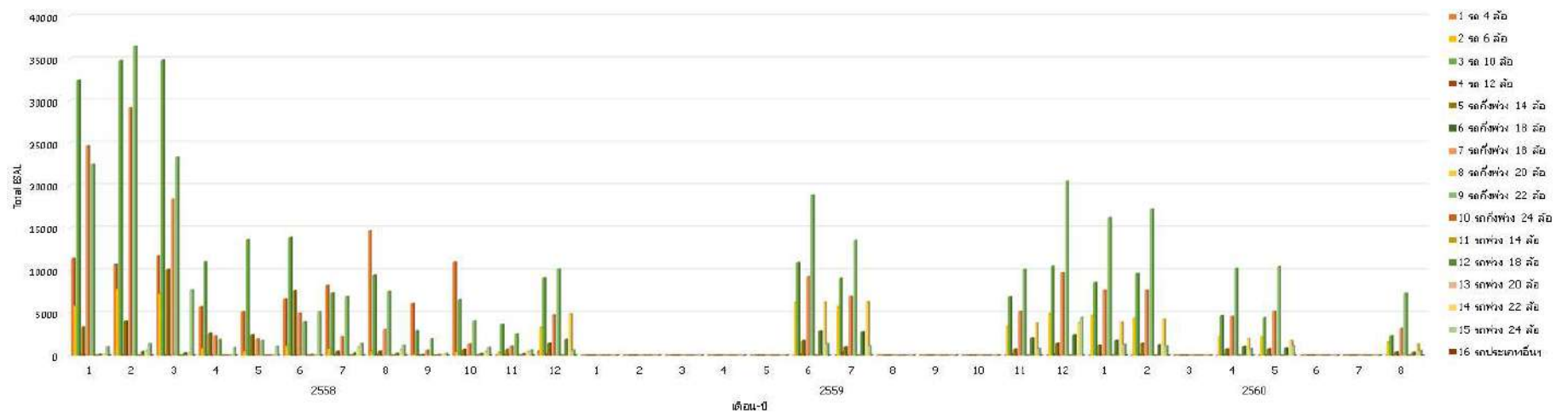
รูปที่ 4.25 รูปแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง

4.5 การบูรณาการข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก

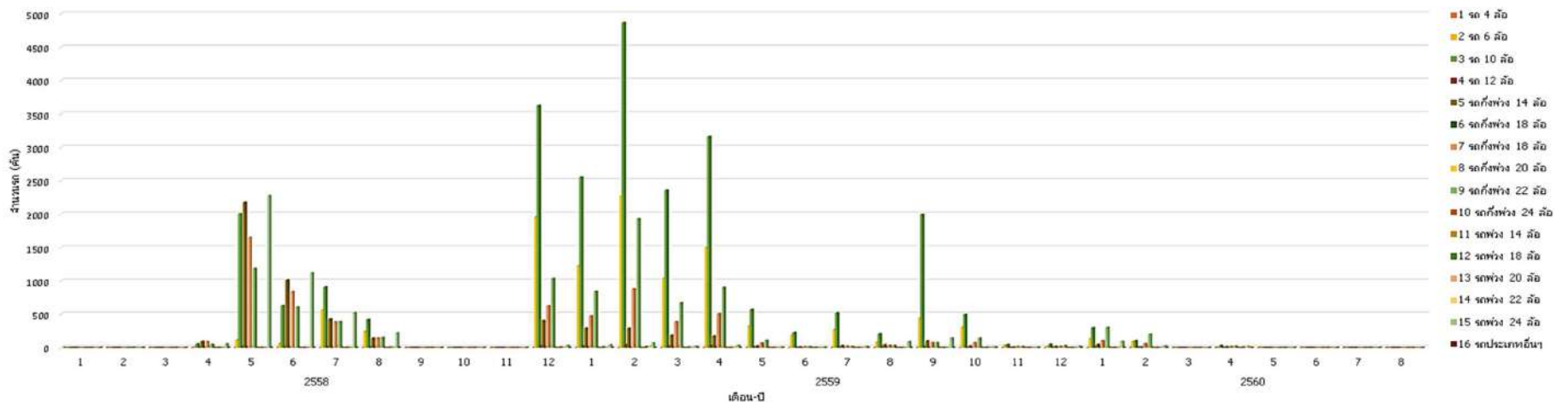
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการใช้ข้อมูลจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสำนักงานควบคุมน้ำหนักและยานพาหนะ เพื่อนำเข้า (Data Import) ฐานข้อมูลกลาง (Central Database) สำหรับใช้ในการติดตามและประเมินสมรรถนะทางหลวงร่วมกับข้อมูลผลการตรวจวัดจากแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต โดยข้อมูลที่ได้จากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางและถนนคอนกรีต และข้อมูลในรูปแบบกราฟแสดงในรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.31



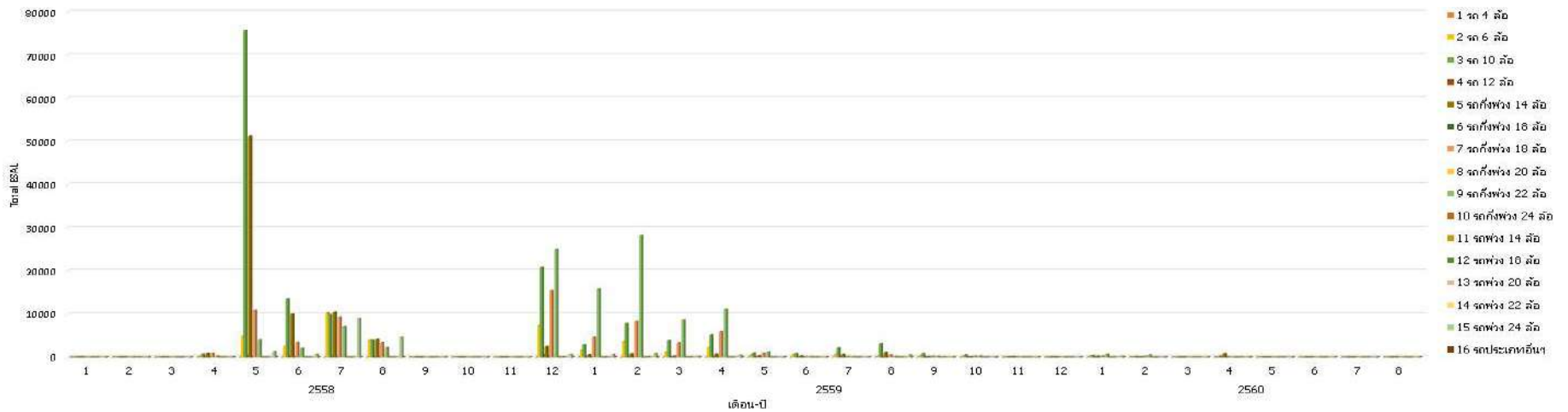
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560)



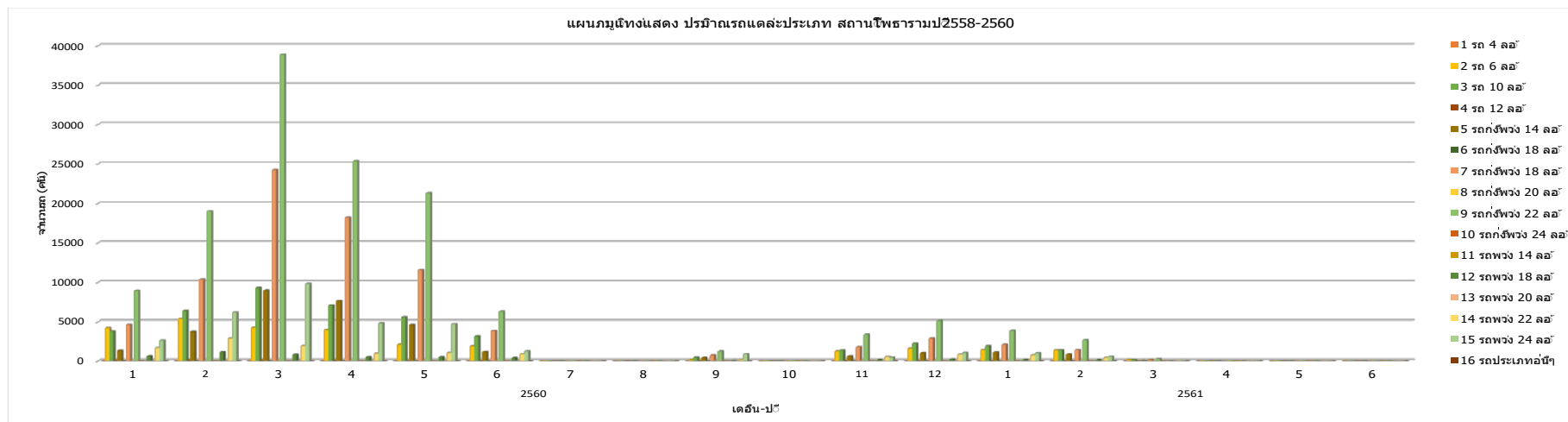
รูปที่ 4.27 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560)



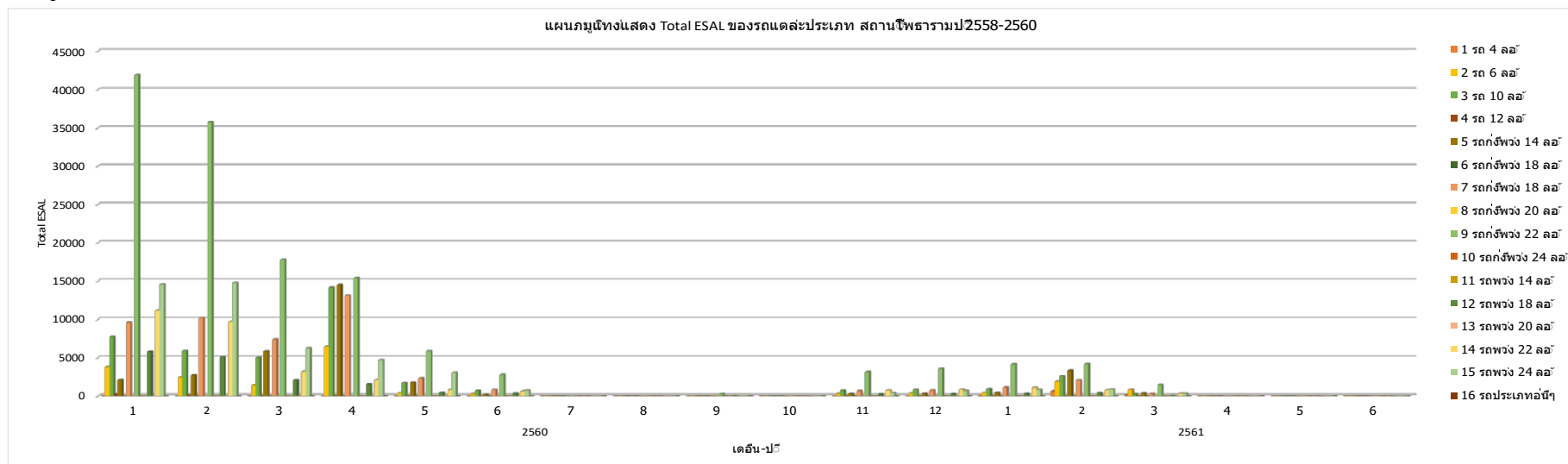
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560)



รูปที่ 4.29 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า) (ปี 2558 – 2560)



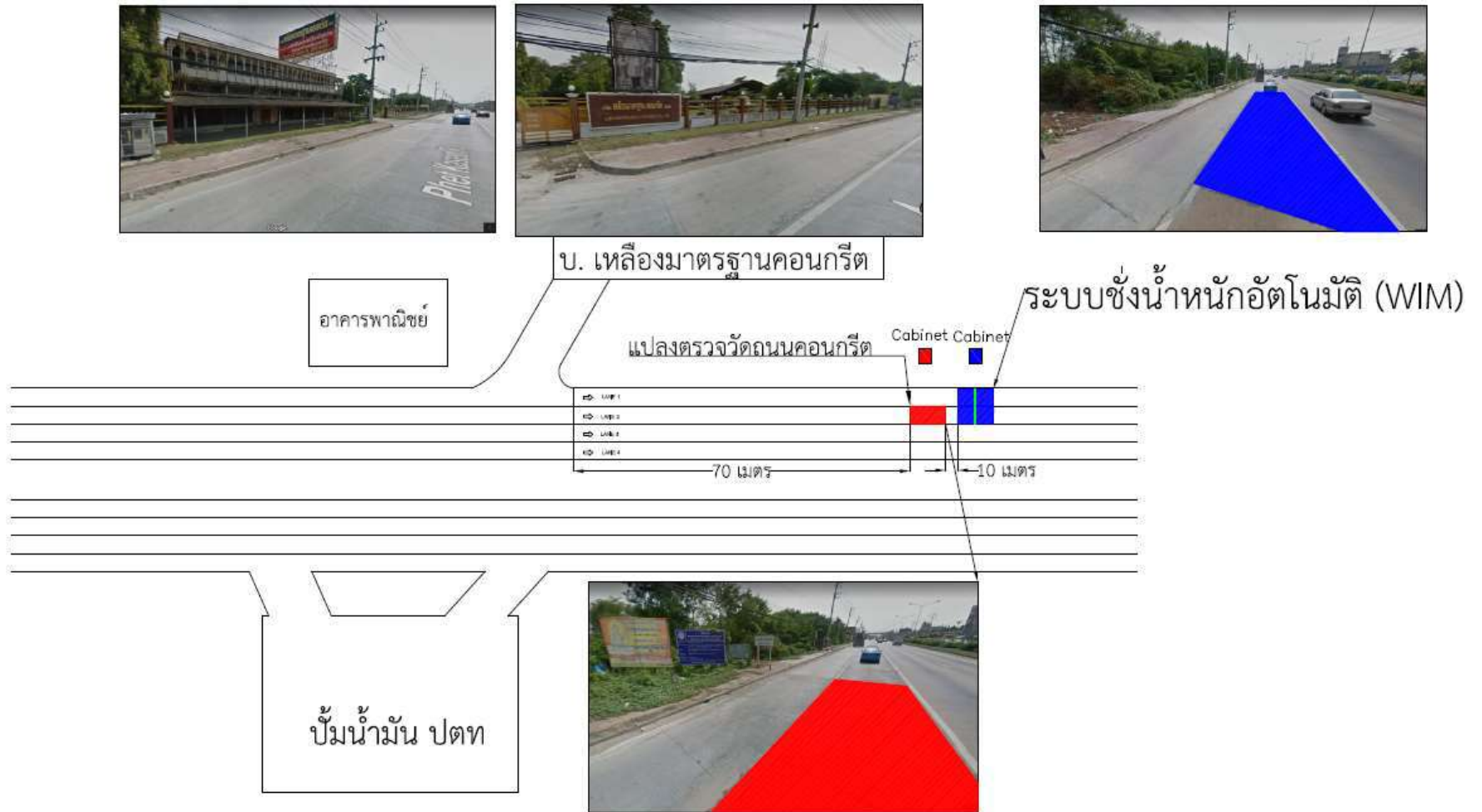
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงปริมาณของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)



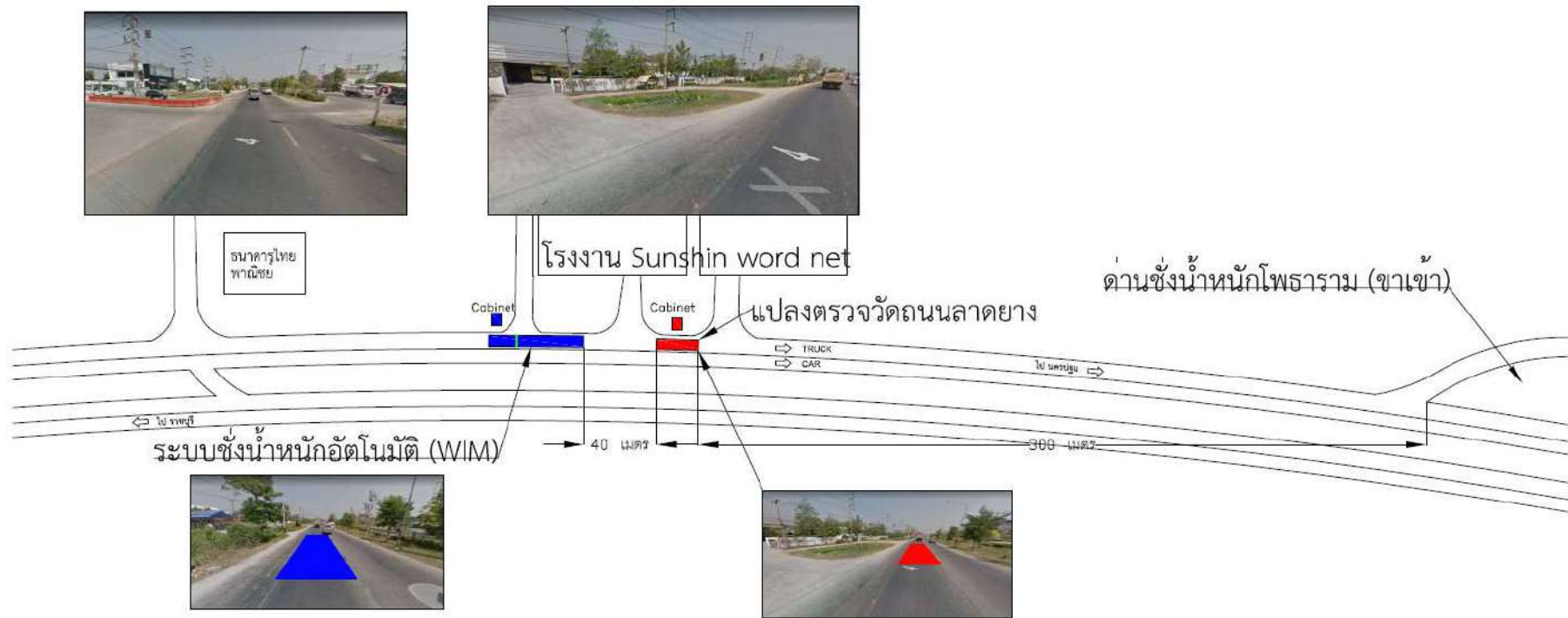
รูปที่ 4.31 กราฟแสดง Total ESAL ของรถแต่ละประเภทจากระบบ Weigh-In-Motion (WIM) ของสถานีตรวจสอบน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า) (ปี 2560 – 2561)

4.6 การจัดทำแบบแปลนการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน

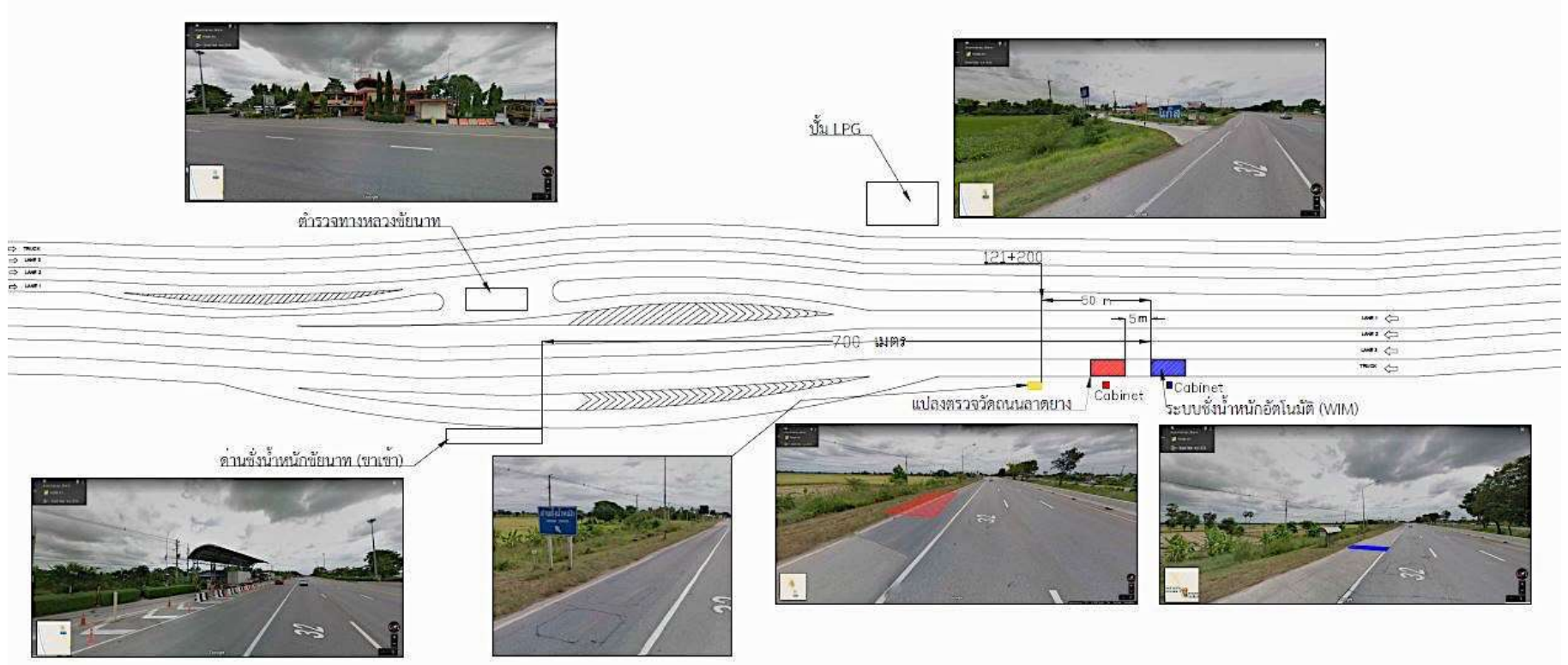
คณะผู้วิจัยได้จัดทำแบบแปลนแสดงรายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนคอนกรีตบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า) ดังแสดงในรูปที่ 4.32 โครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาธารม (ขาเข้า) ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และโครงสร้างถนนลาดยางบริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักบรรทุก (ขาเข้า) ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.32 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)



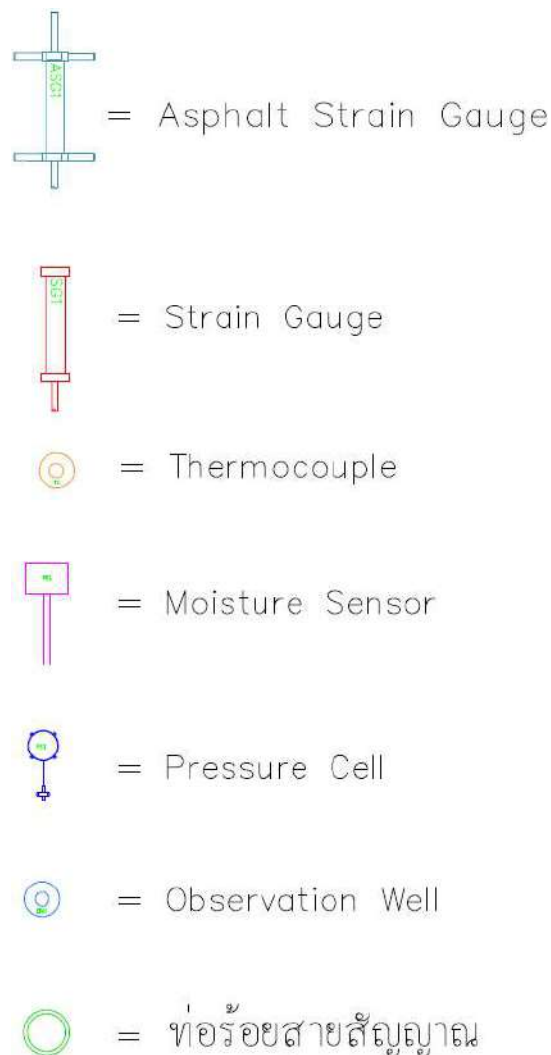
รูปที่ 4.33 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)



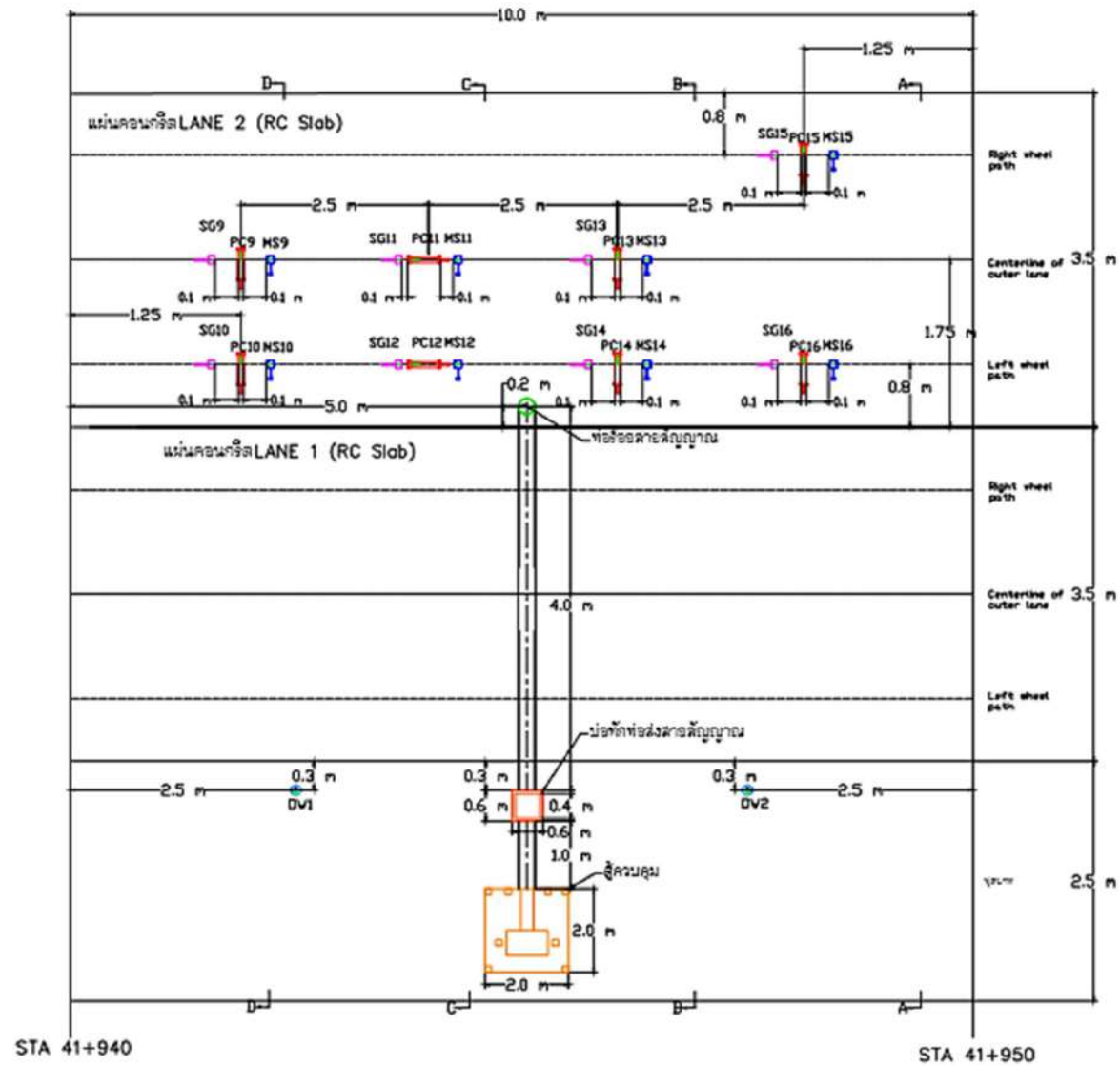
รูปที่ 4.34 แบบแปลนตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักบรรทุก (ขาเข้า)

4.7 การจัดทำแผนผังงานวางระบบและขั้นตอนการติดตั้ง

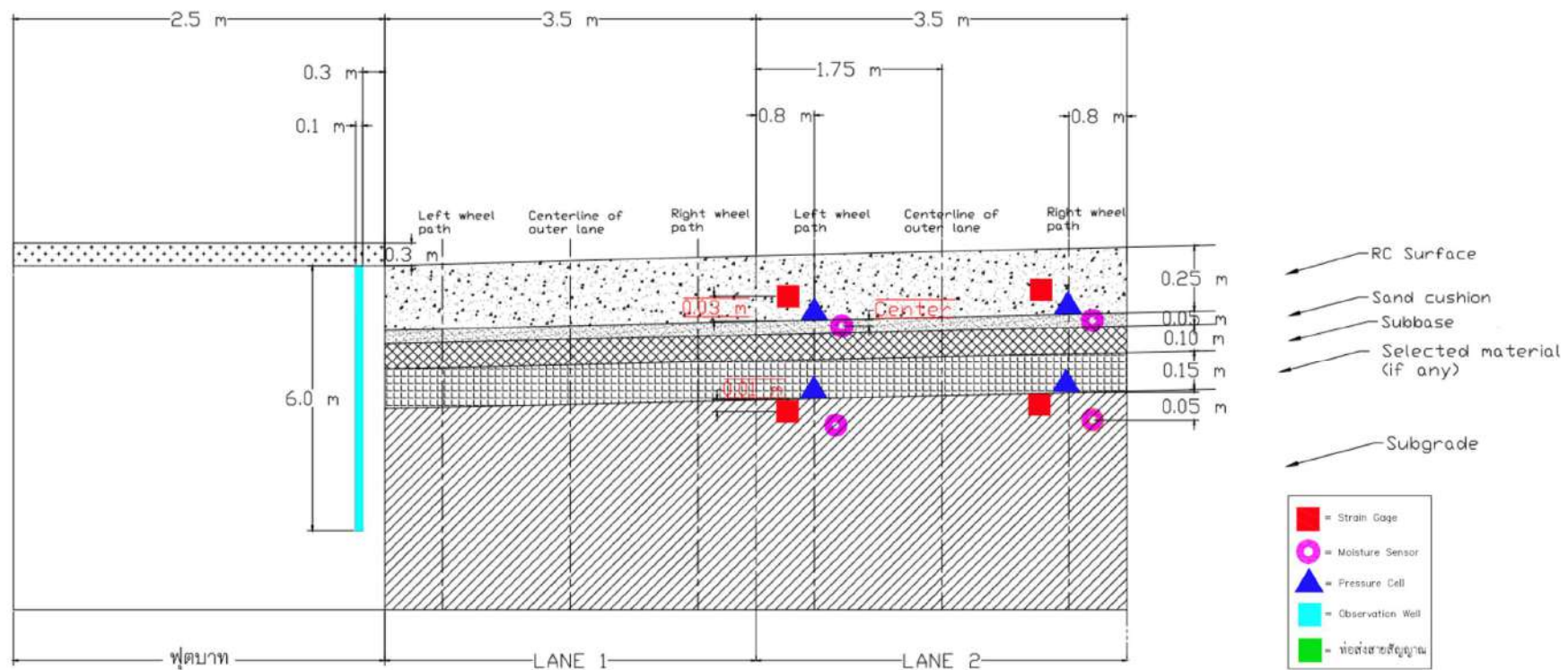
คณะผู้วิจัยได้จัดทำแผนผังงานวางระบบระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System) และระบบสายสัญญาณสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบเครื่องมือตรวจวัดฯ โดยสัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนแสดงในรูปที่ 4.35 กับระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามสำหรับในแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตและถนนลาดยางดังแสดงในรูปที่ 4.36 ถึงรูปที่ 4.60 โดยอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลภาคสนามจะติดตั้งอยู่ภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม (Outdoor Cabinet) ดังแสดงในรูปที่ 4.61 และระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า (Power Supply System) แสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.62



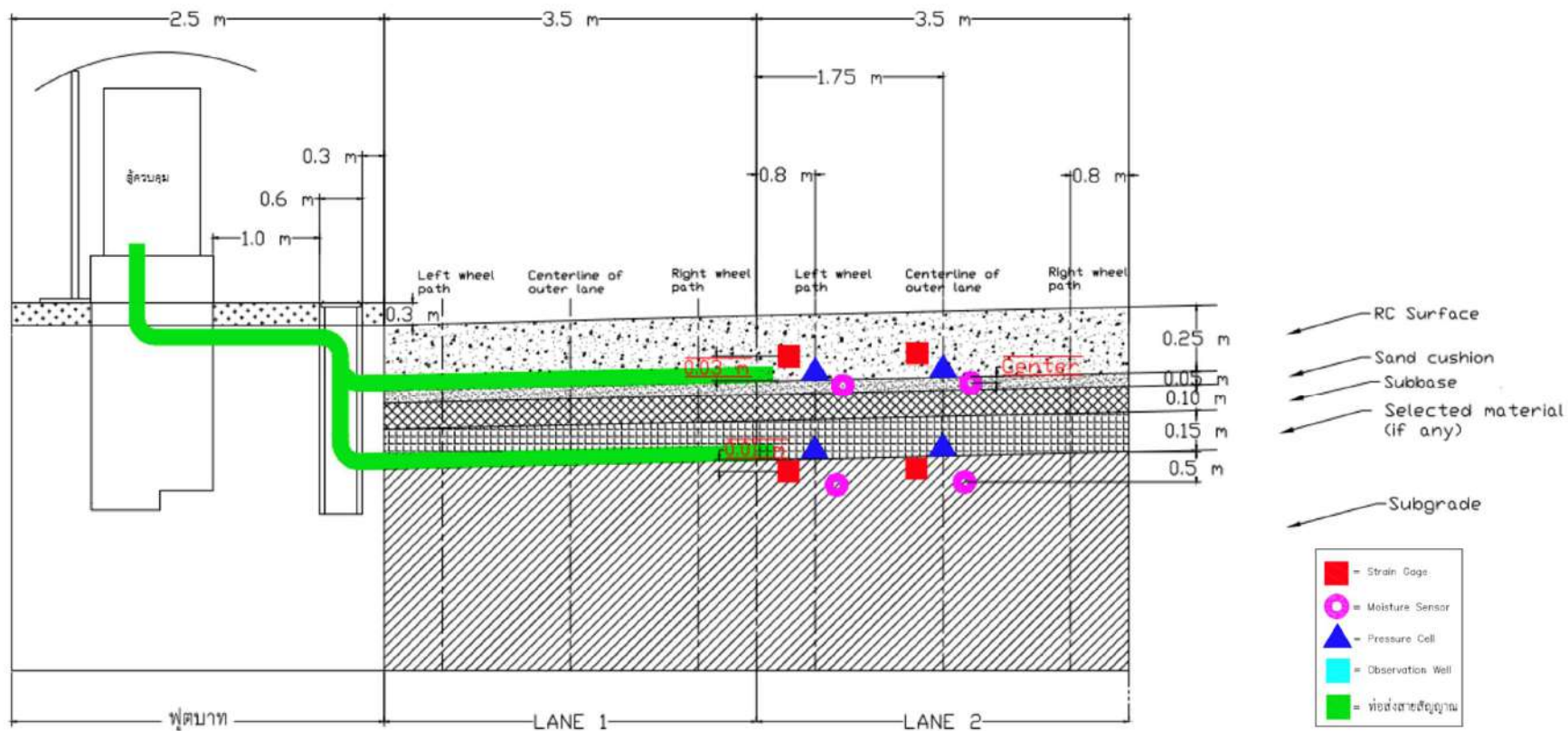
รูปที่ 4.35 สัญลักษณ์เครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน



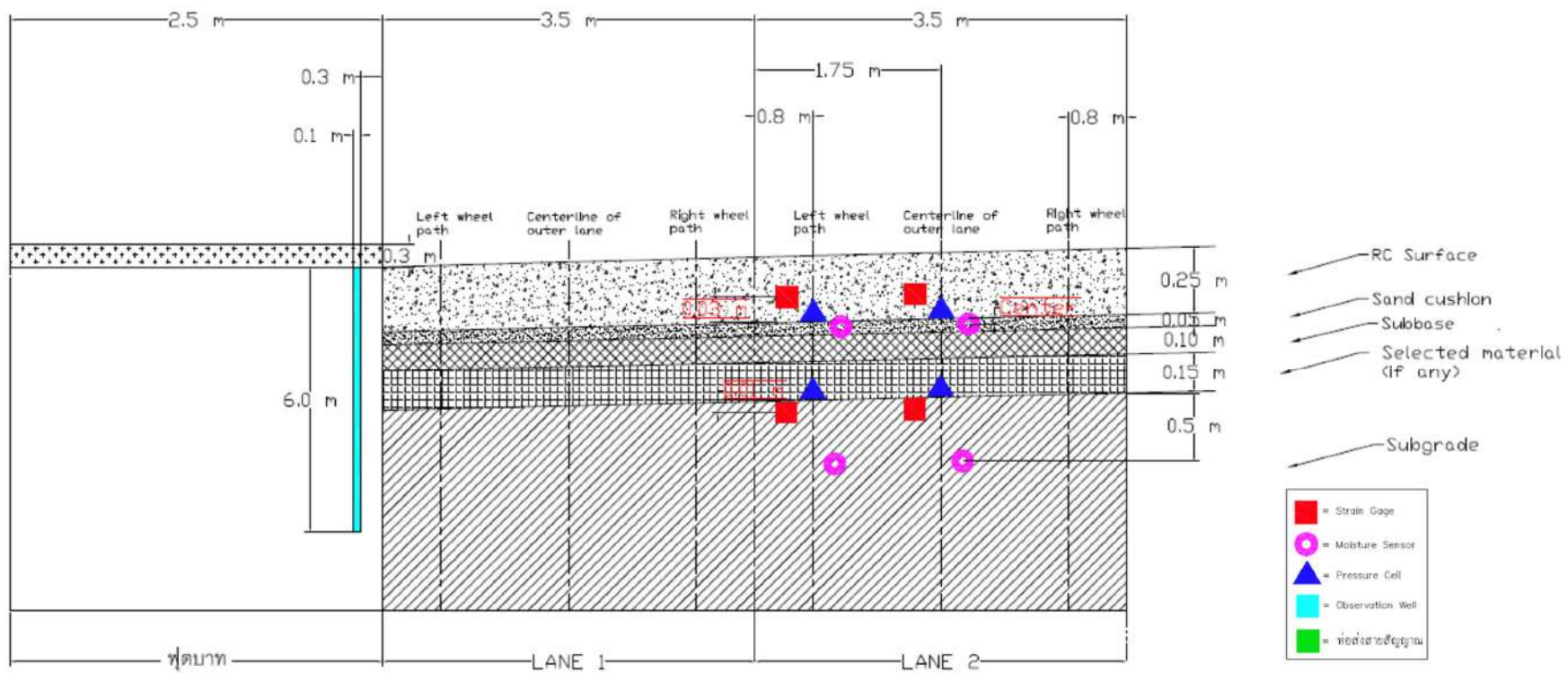
รูปที่ 4.36 แบบแปลนของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



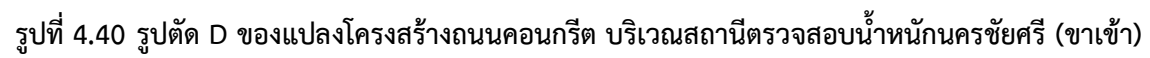
รูปที่ 4.37 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักนครชัยศรี (ขาเข้า)

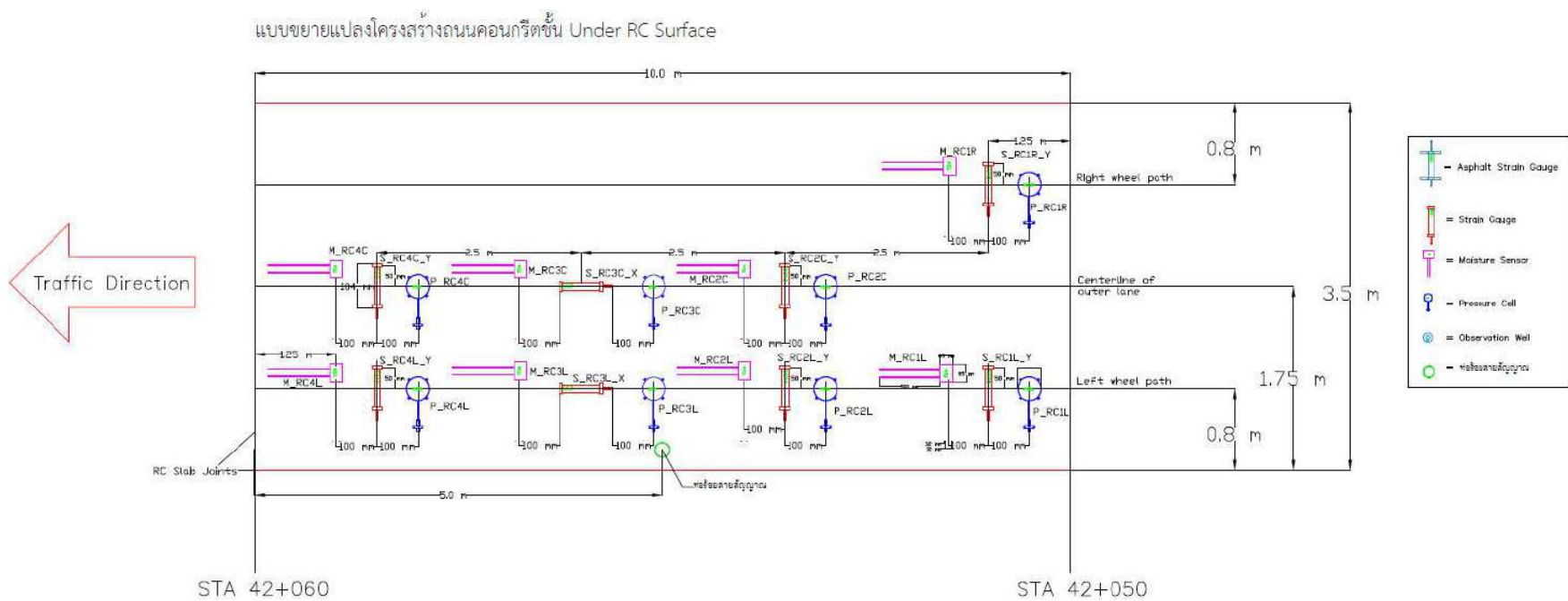


รูปที่ 4.38 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

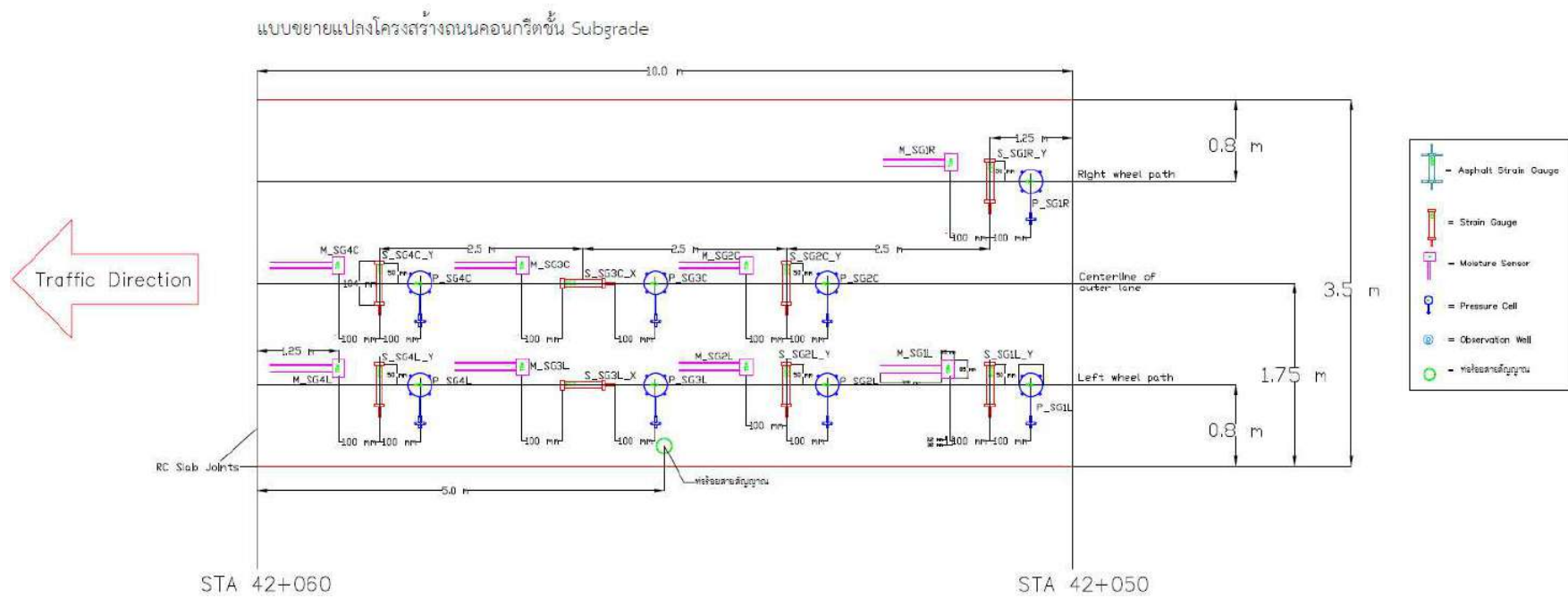


รูปที่ 4.39 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

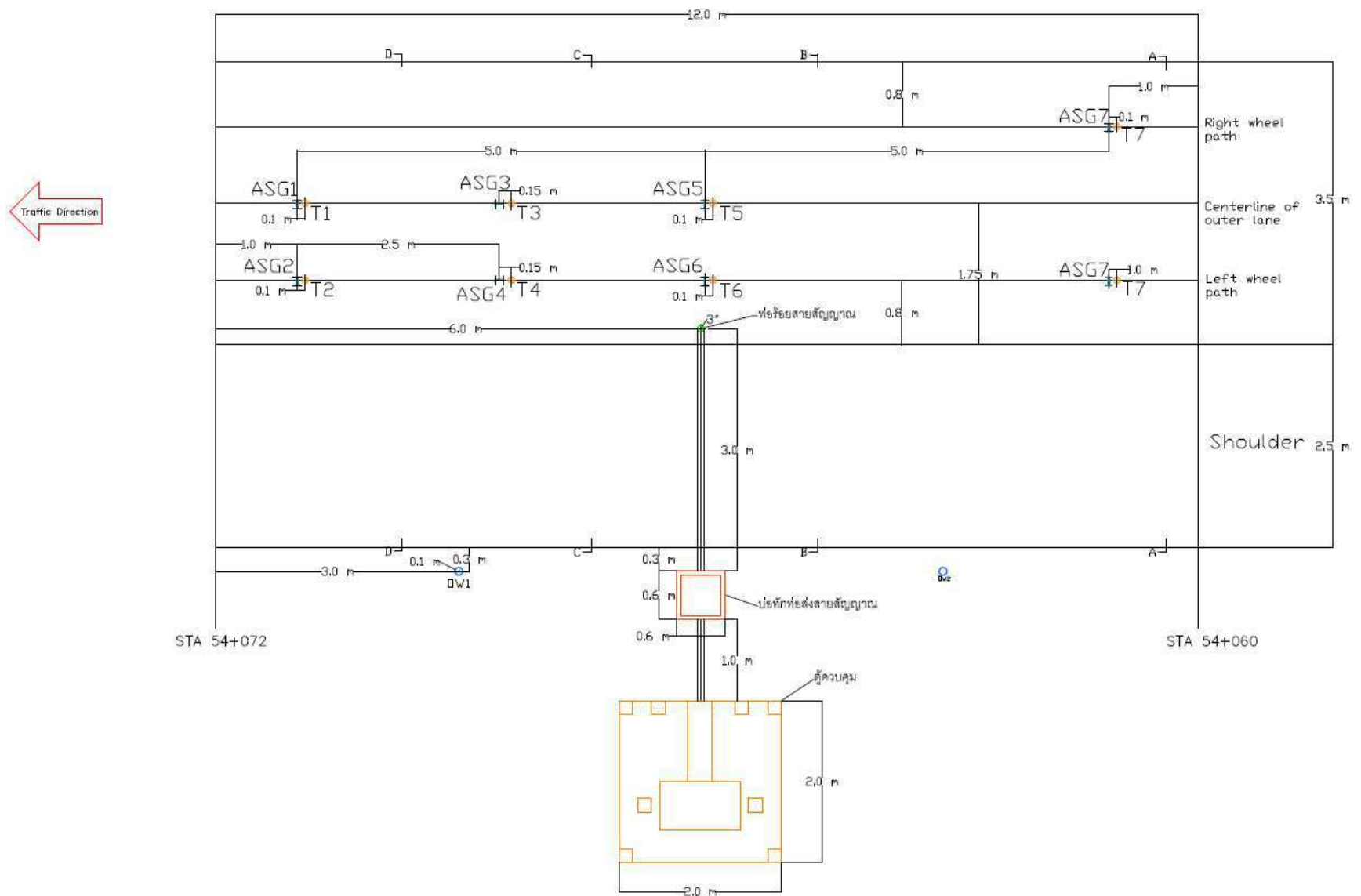




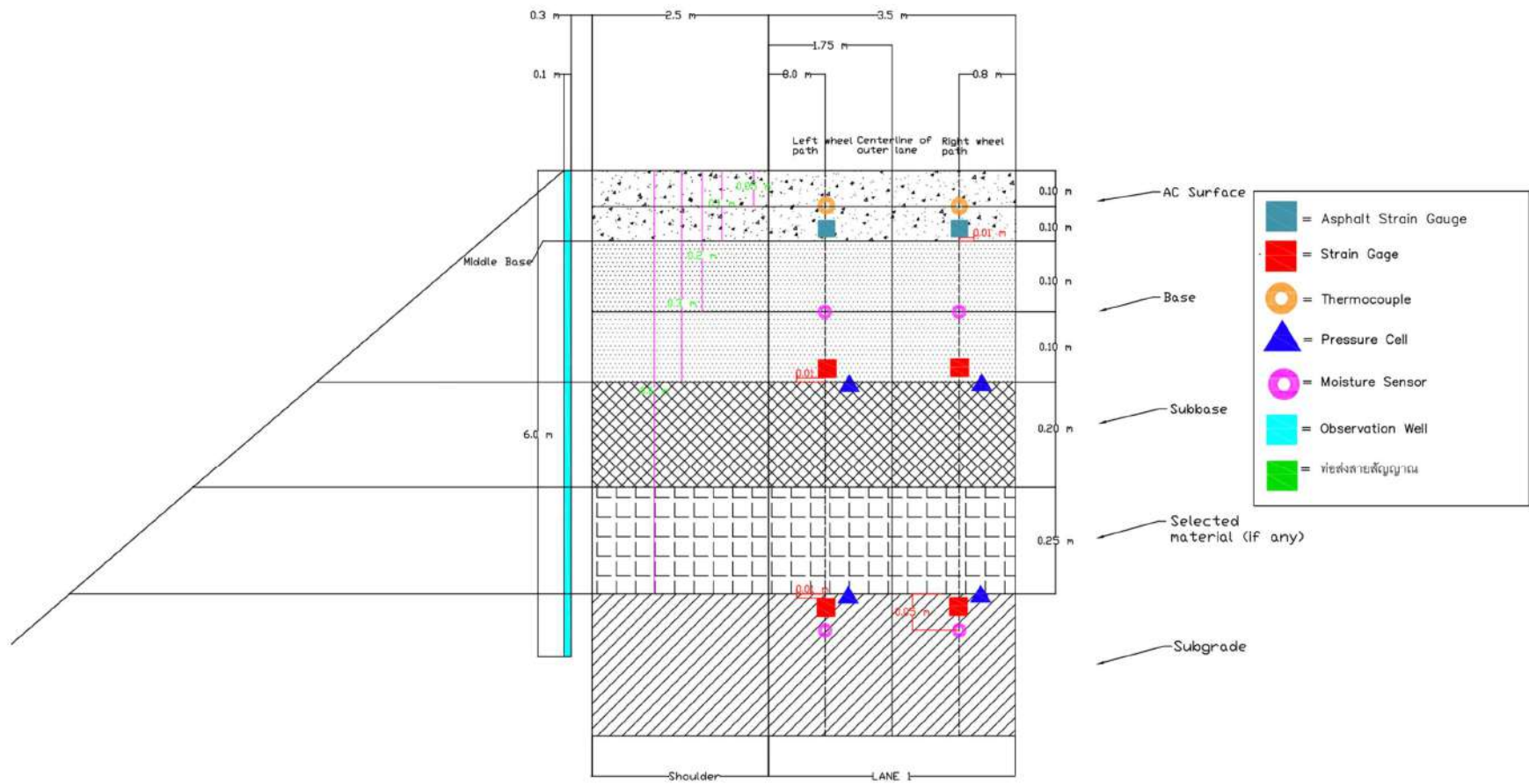
รูปที่ 4.41 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น RC Surface บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



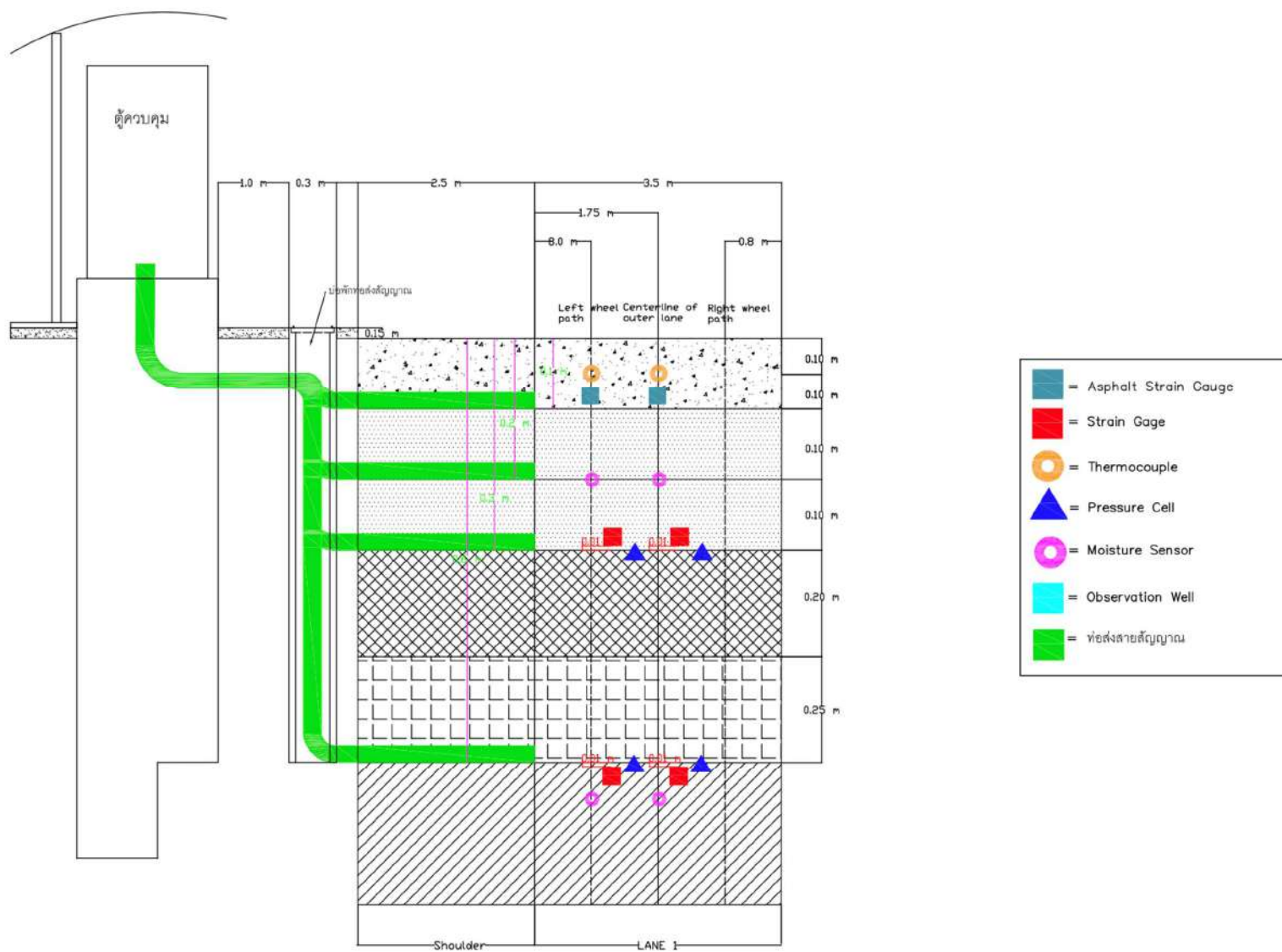
รูปที่ 4.42 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น Subgrade บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



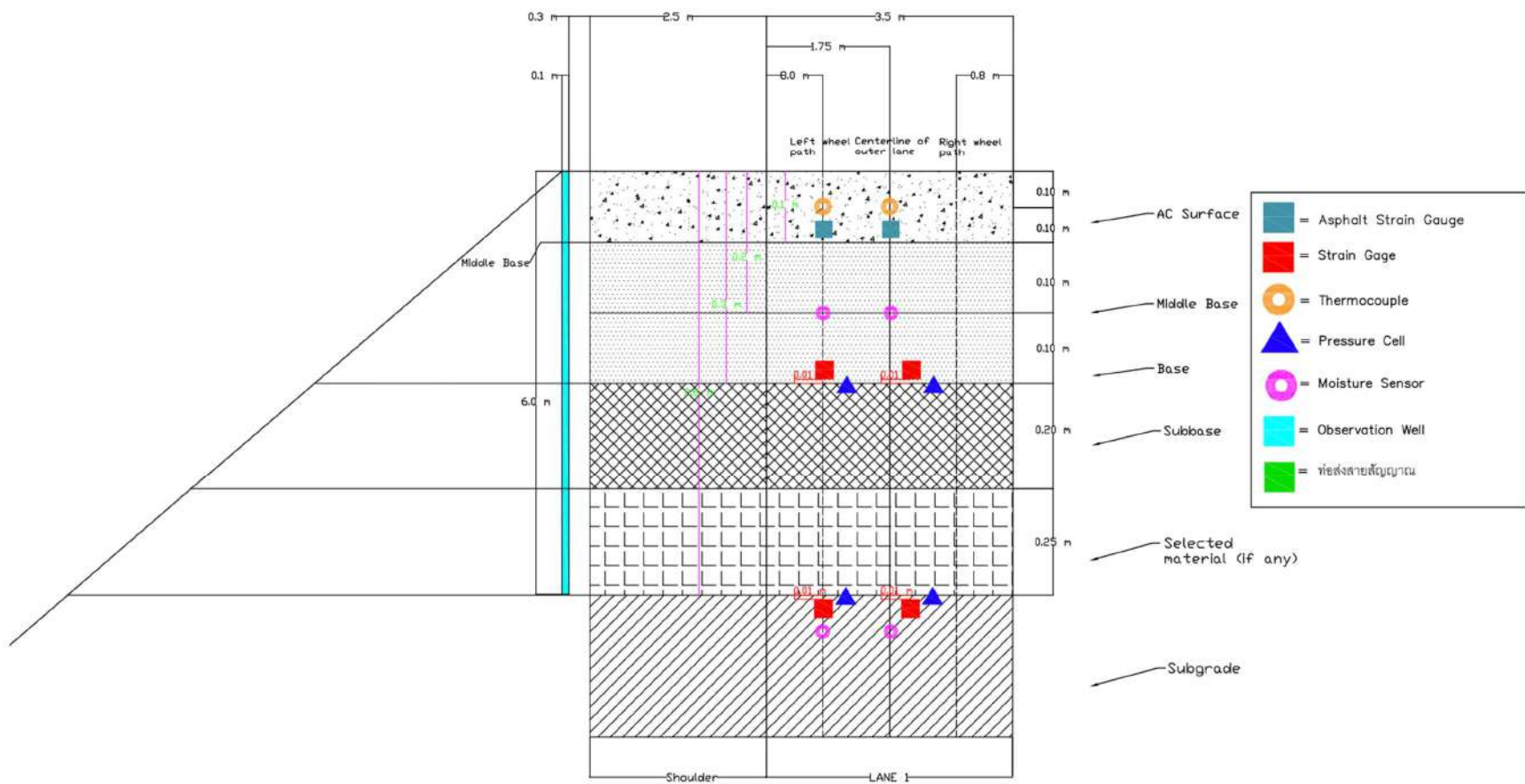
รูปที่ 4.43 แบบแปลนของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



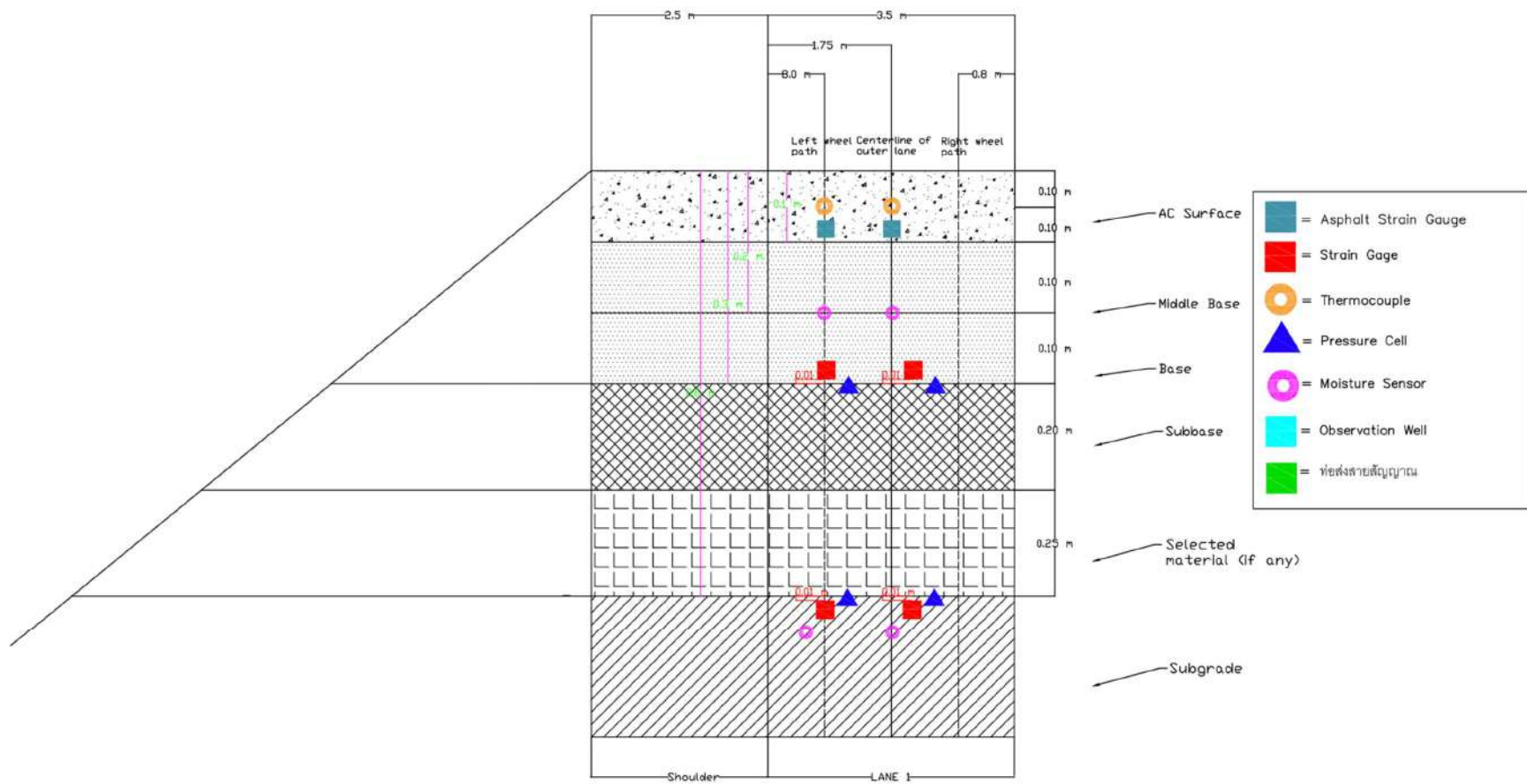
รูปที่ 4.44 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



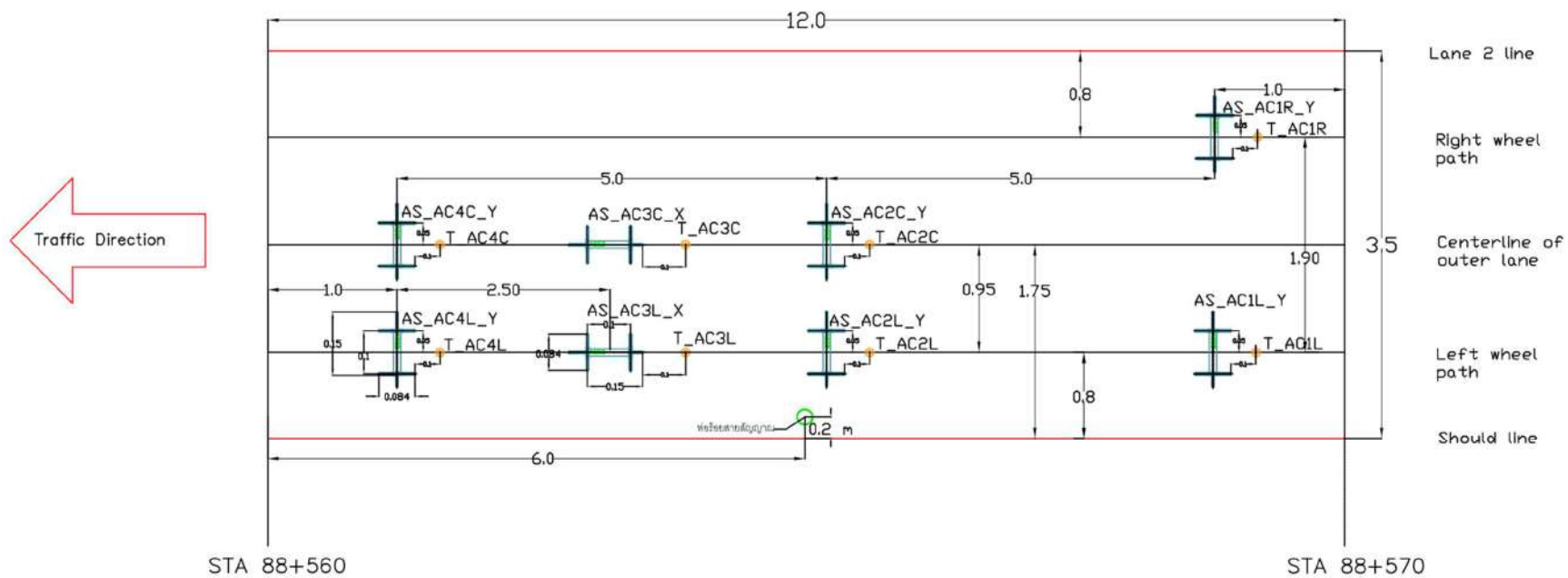
รูปที่ 4.45 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธาราม (ขาเข้า)



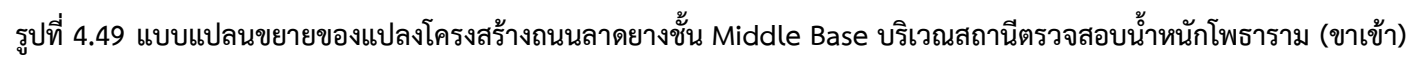
รูปที่ 4.46 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

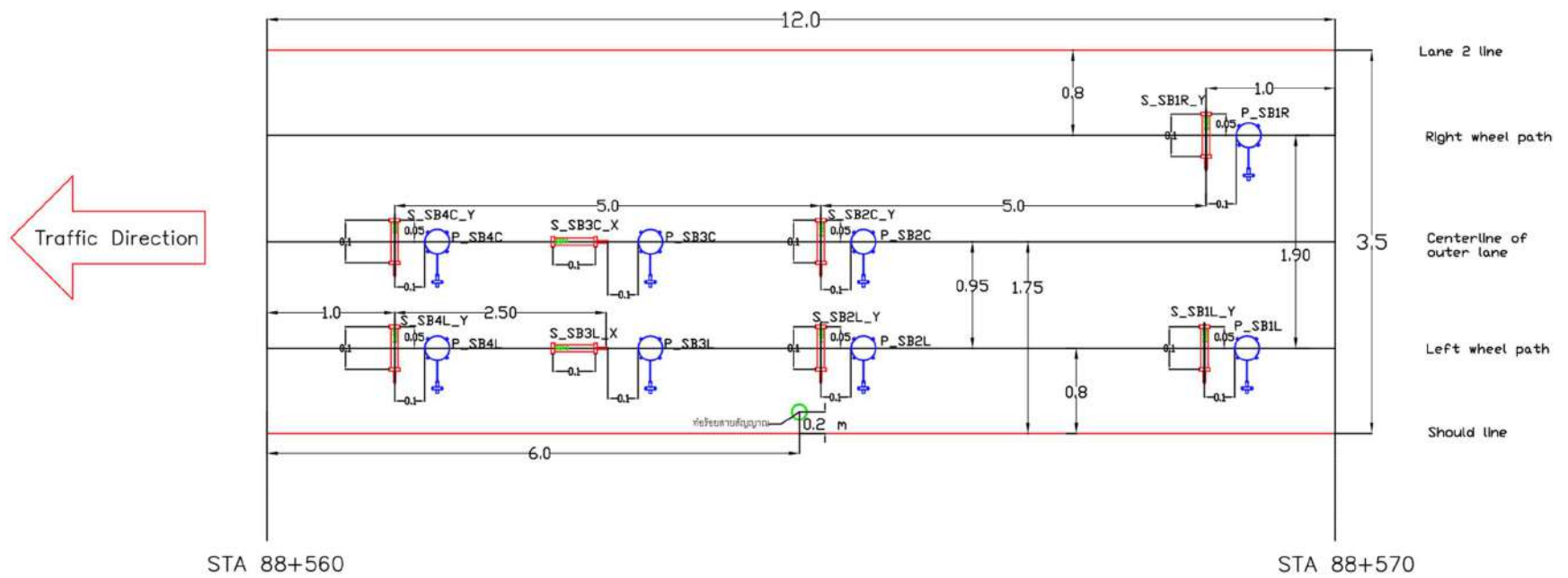


รูปที่ 4.47 รูปตัด D ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)

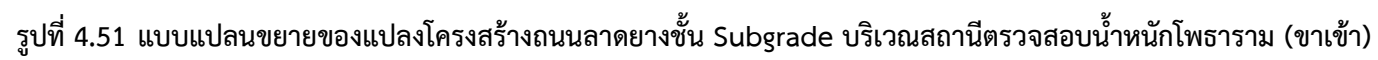


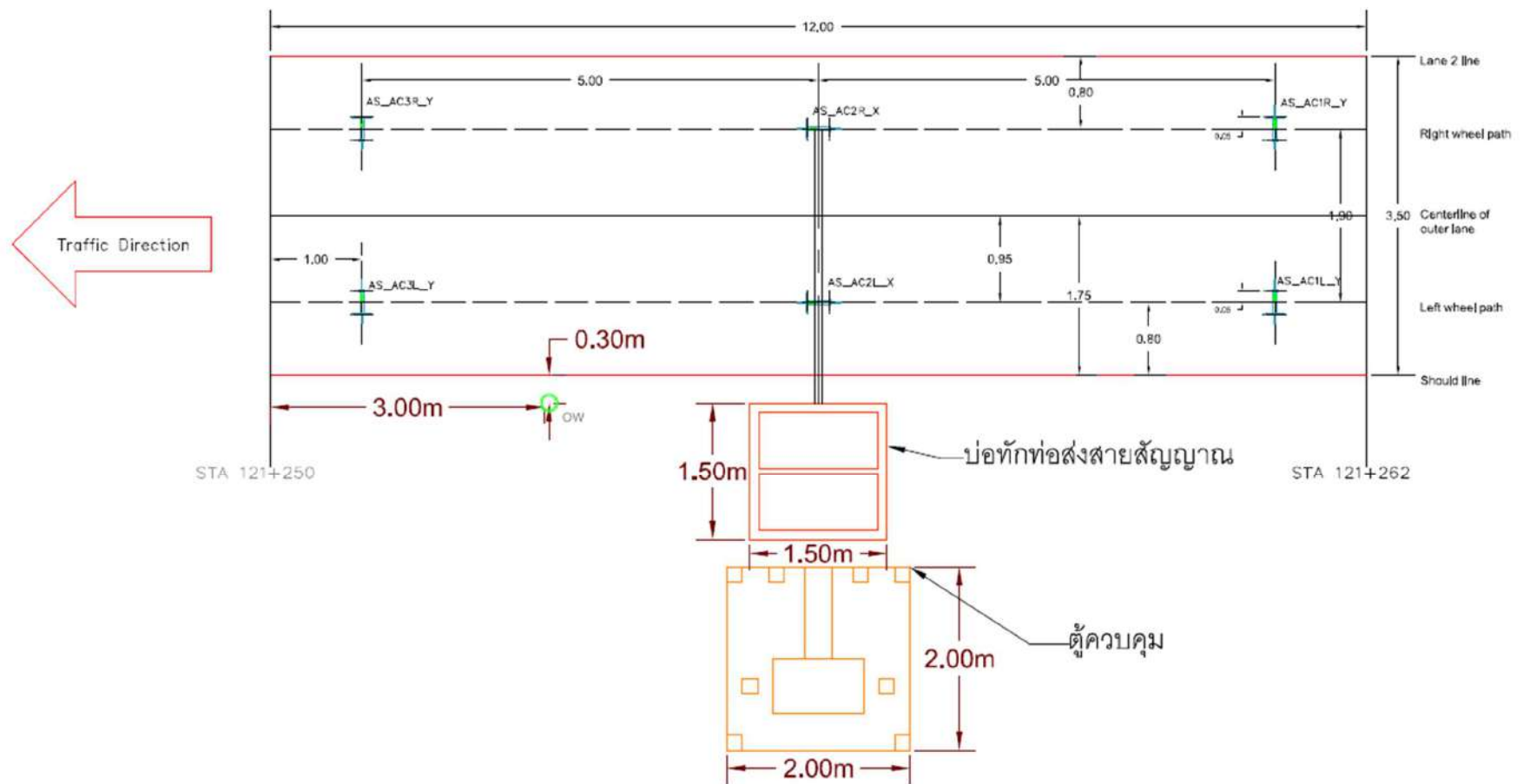
รูปที่ 4.48 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น AC Surface บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุก (ขาเข้า)



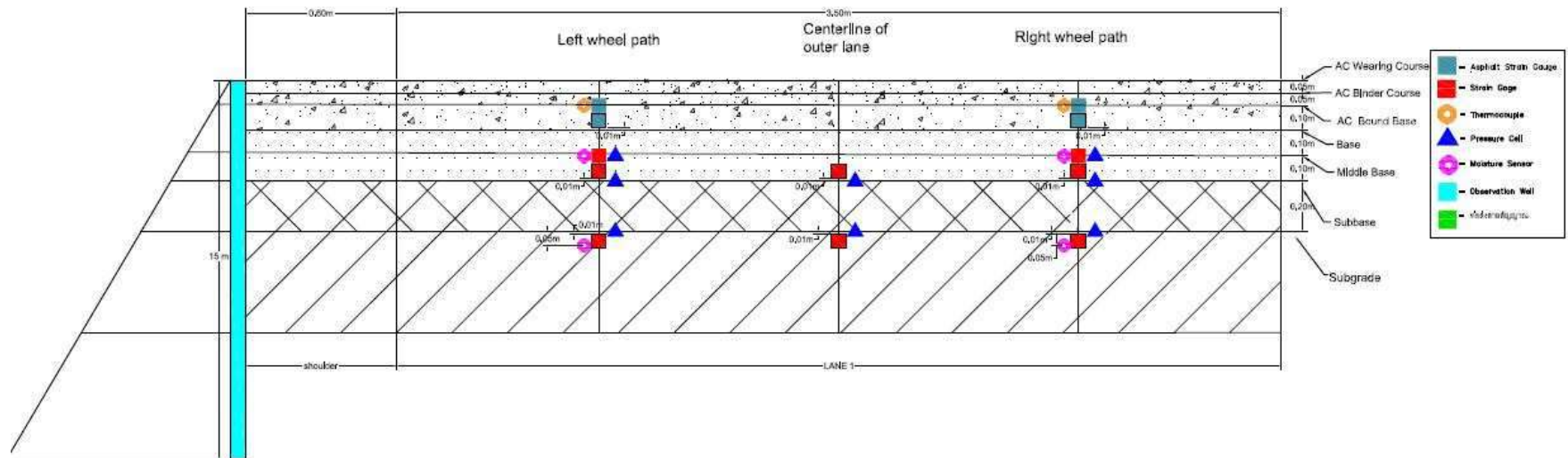


รูปที่ 4.50 แบบแปลนขยายของแปลงโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Base บริเวณสถานีตรวจสอบน้ำหนักโพธากรม (ขาเข้า)

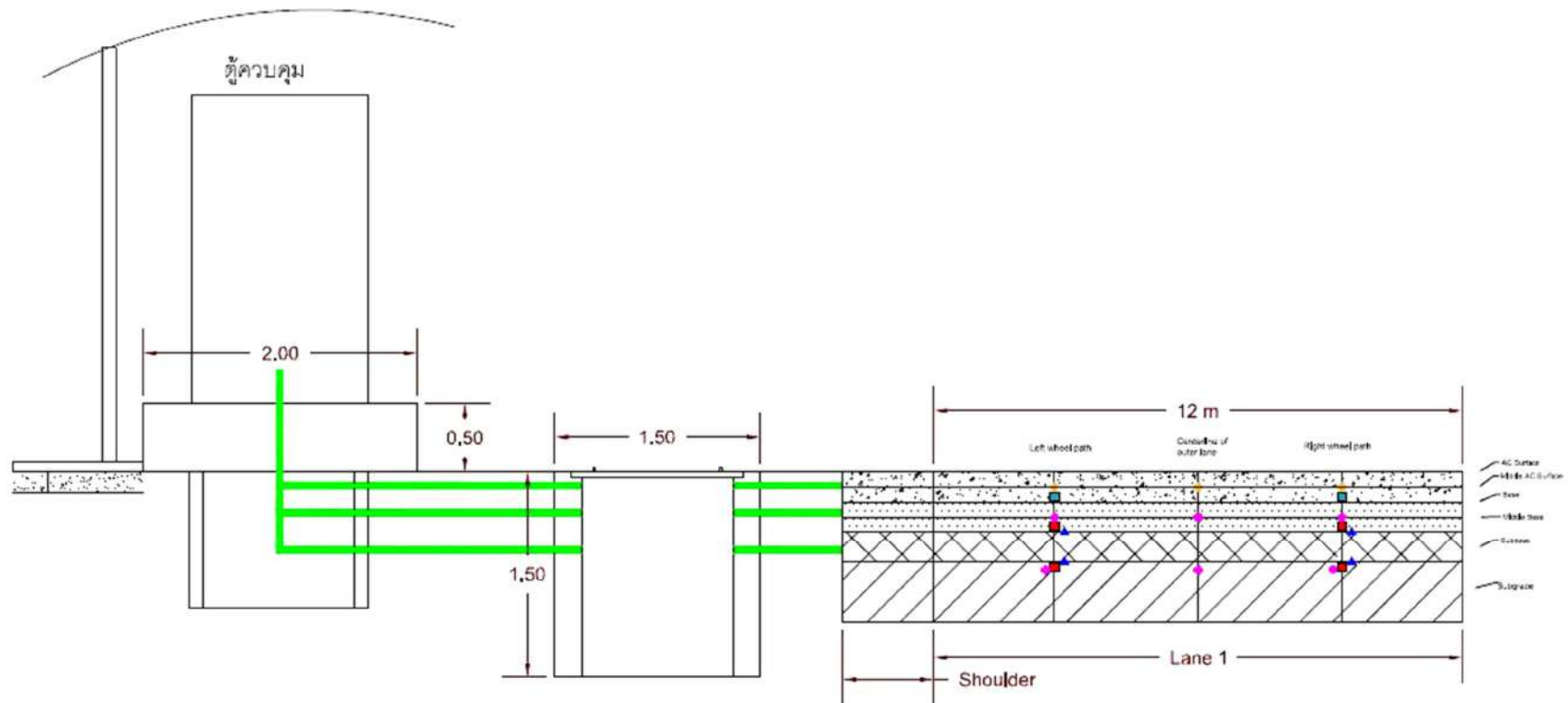




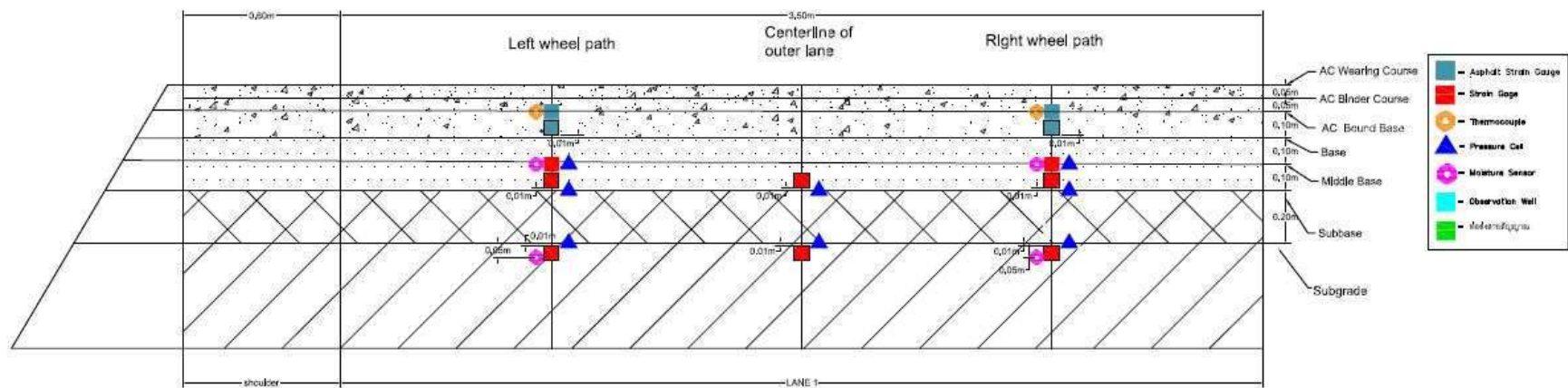
รูปที่ 4.52 แบบแปลนภาพรวมการติดตั้งแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



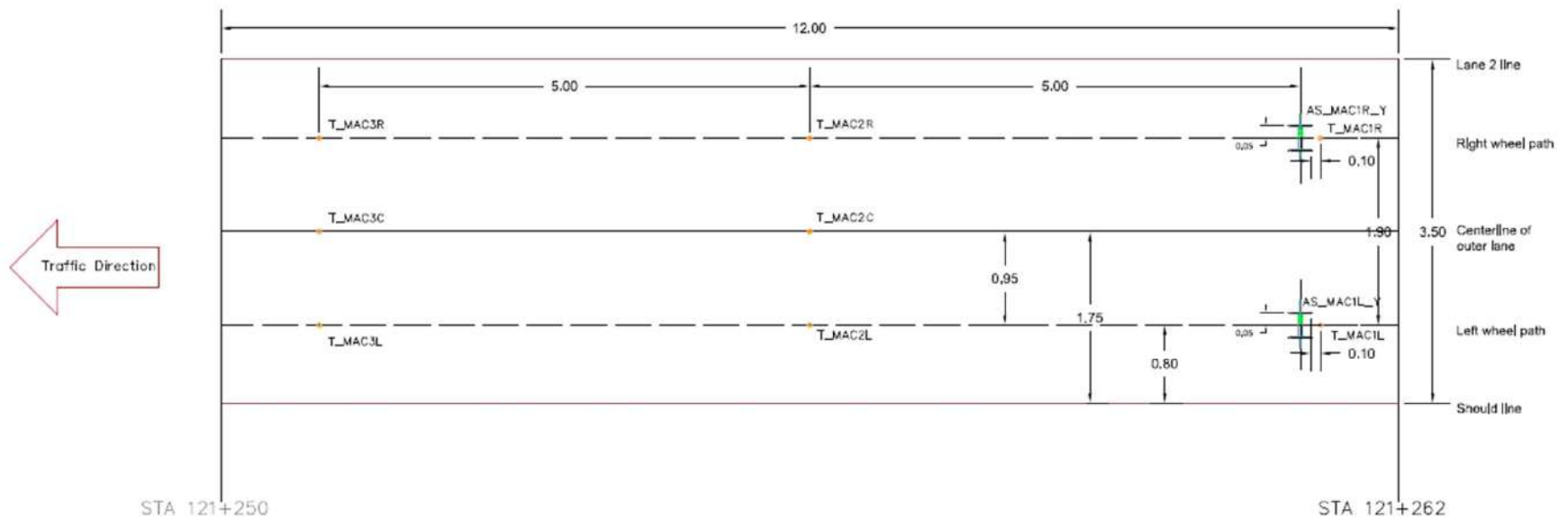
รูปที่ 4.53 รูปตัด A ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)



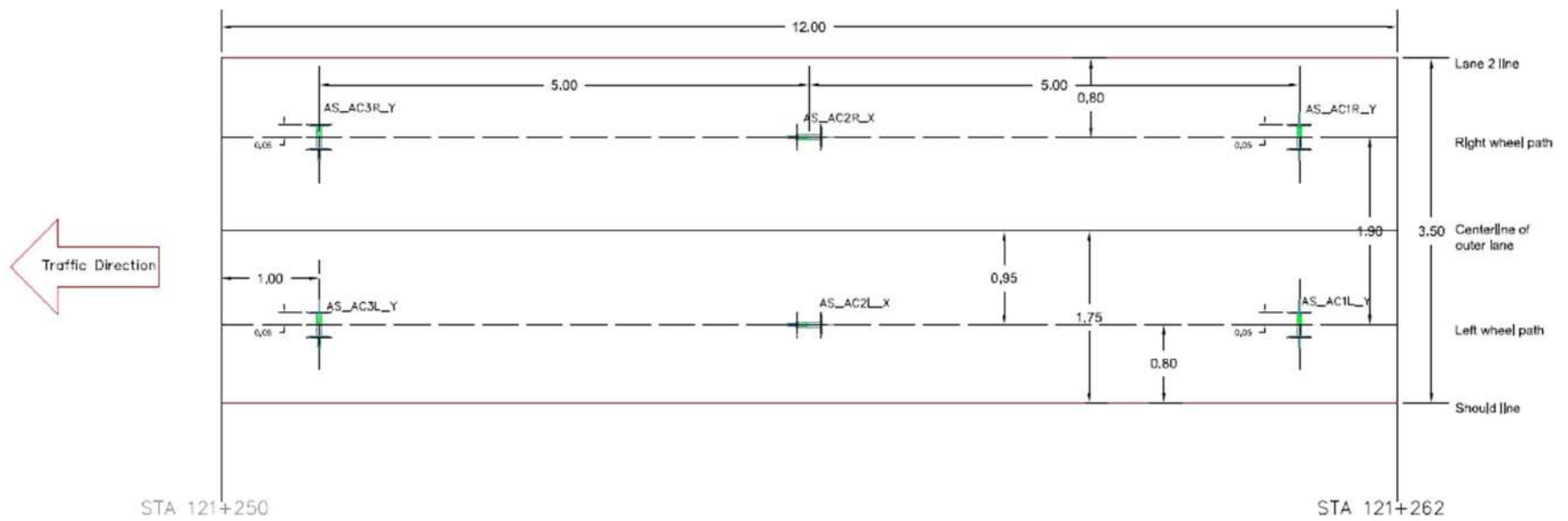
รูปที่ 4.54 รูปตัด B ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำนักสรรพยา (ขาเข้า)



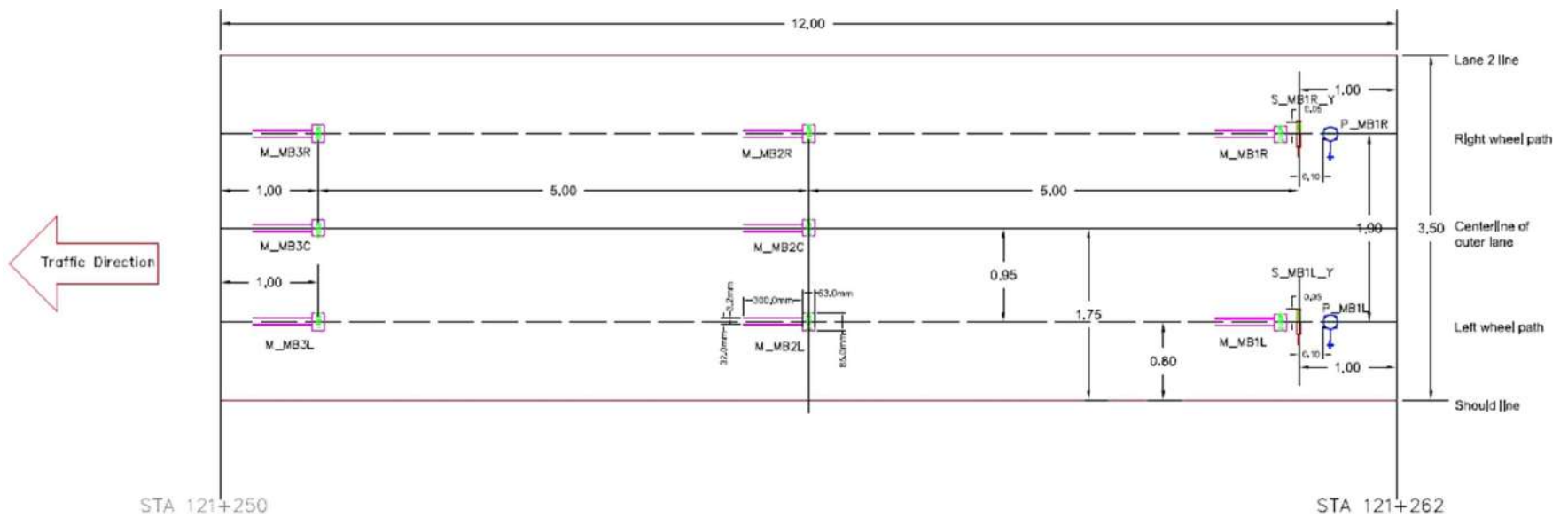
รูปที่ 4.55 รูปตัด C ของแปลงโครงสร้างถนนลาดยาง บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักสรรพยา (ขาเข้า)



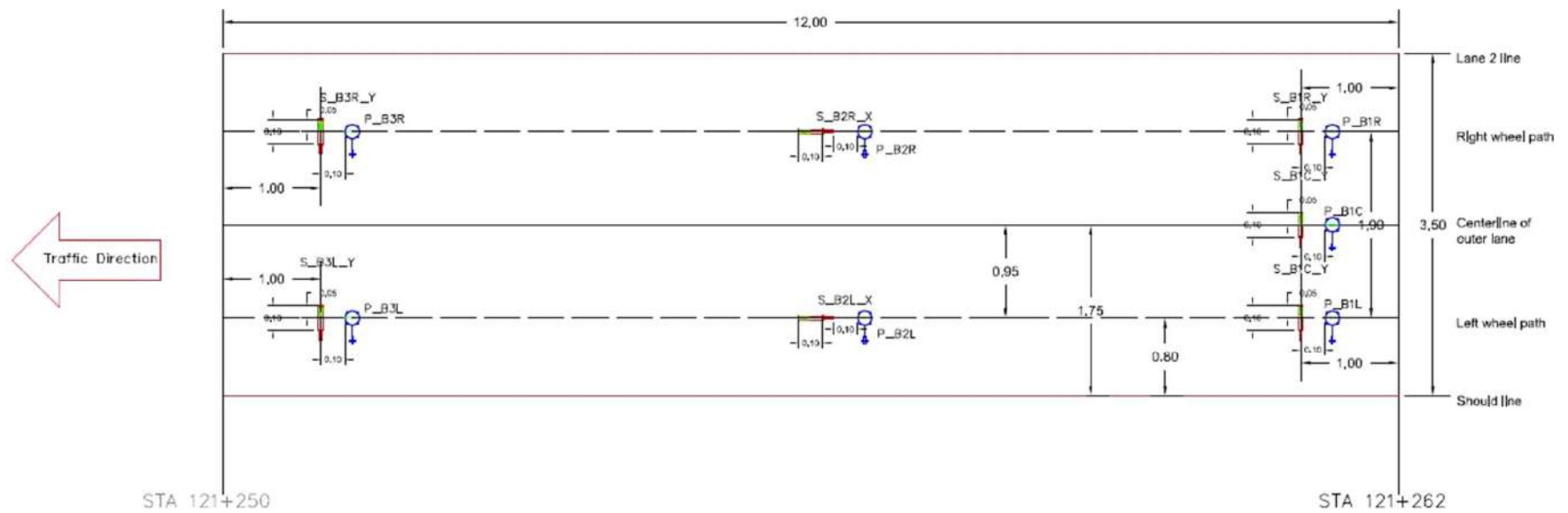
รูปที่ 4.56 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระหว่างกิ่งกลางชั้นผิวทาง AC บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)



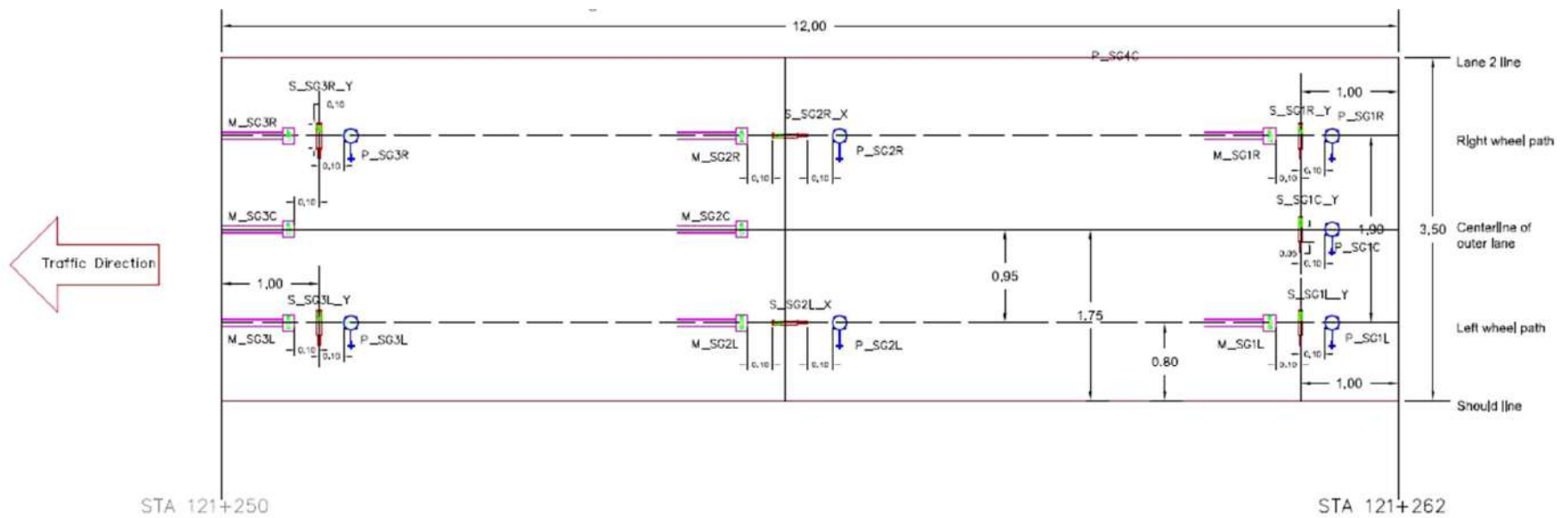
รูปที่ 4.57 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับได้ชั้นผิวทาง AC บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)



รูปที่ 4.58 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับกึ่งกลางชั้น Base บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)

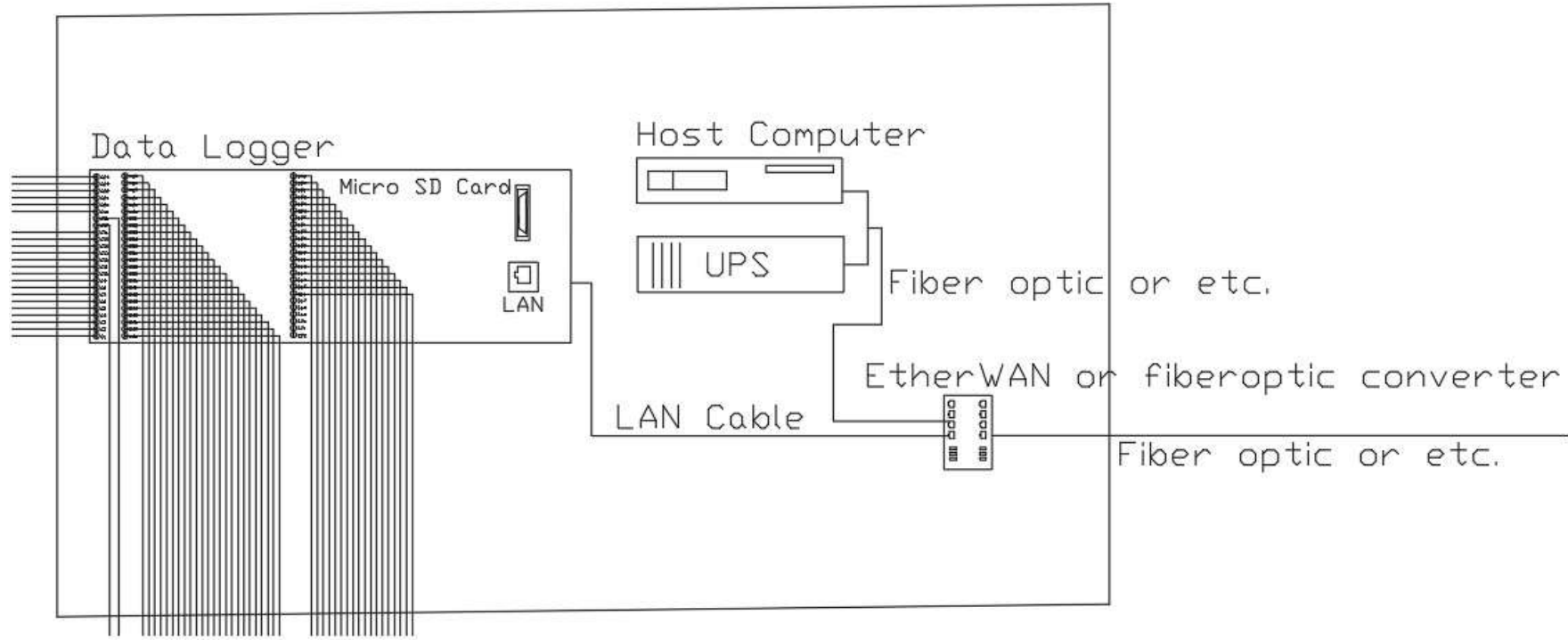


รูปที่ 4.59 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางระดับใต้ชั้น Base บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)

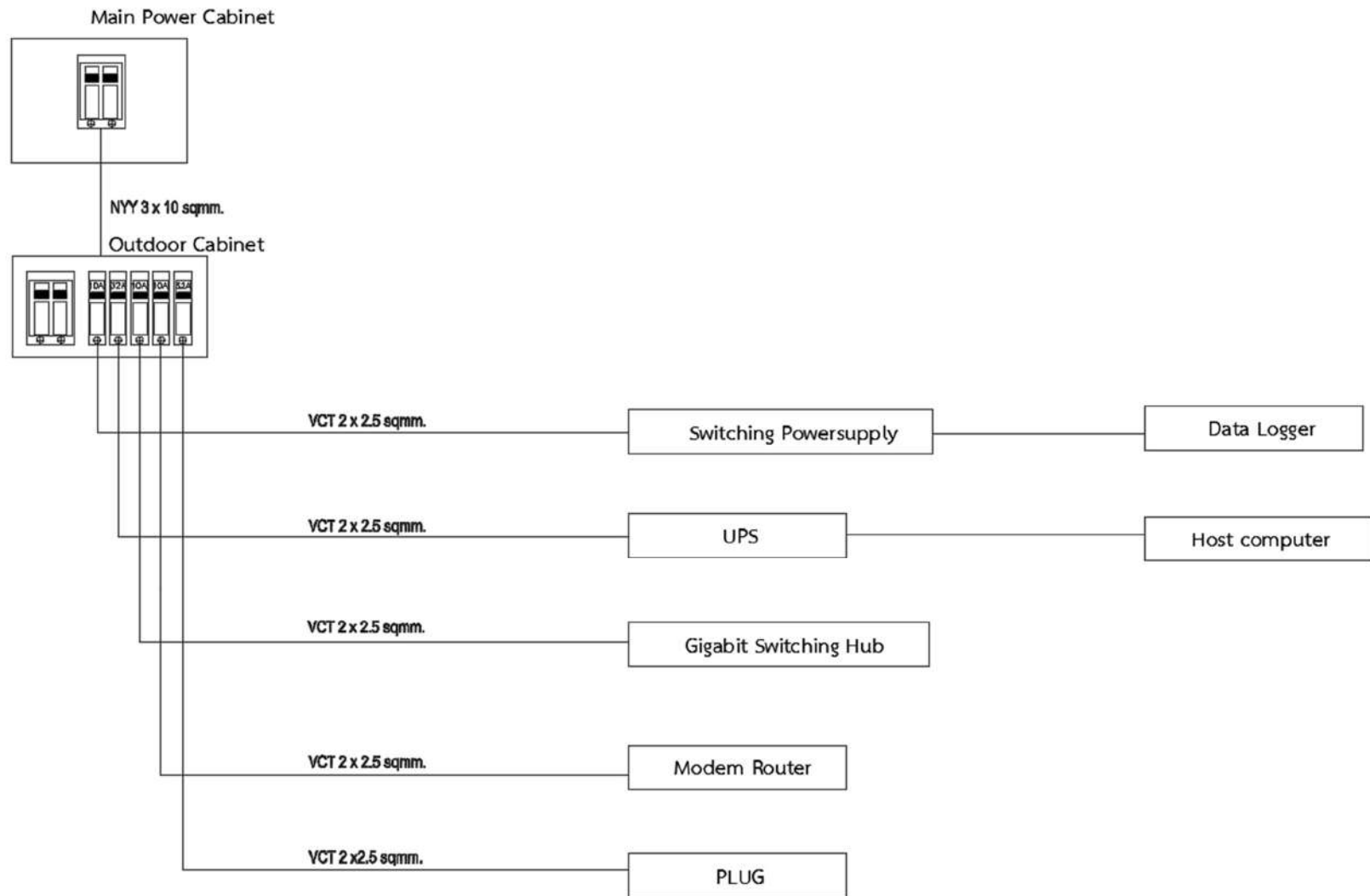


รูปที่ 4.60 แบบแปลนโครงสร้างถนนลาดยางชั้น Subgrade บริเวณสถานีควบคุมน้ำหนักรรพยา (ขาเข้า)

outdoor cabinet



รูปที่ 4.61 แบบขยายอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามภายในตู้จัดเก็บอุปกรณ์ภาคสนาม



รูปที่ 4.62 แผนผังงานวางระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบสำรองไฟฟ้า

5. การติดตั้งและทดสอบเครื่องมือตรวจวัดและระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนาม

คณะผู้วิจัย ได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง โดยมีแนวทางการดำเนินงานดังต่อไปนี้

5.1 การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะดำเนินการติดตั้ง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดหาและติดตั้งระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณ และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล โดยในตารางที่ 5.1 แสดงรายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตและในตารางที่ 5.2 แสดงรายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ตารางที่ 5.1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตจำนวน 1 แปลง

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
1	ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังใน โครงสร้างถนนคอนกรีต	-	-
1.1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100B ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ได้ 2.5 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ไม่น้อยกว่า 1,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 3 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
1.2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) แบบ / รุ่น : 3500-1 ยี่ห้อ / ประเทศ : Geokon / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ได้ 600 กิโลปาสกาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ไม่น้อยกว่า 200 กิโลปาสกาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
1.3	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) แบบ / รุ่น : M101 ยี่ห้อ / ประเทศ : Solinst / Canada จำนวน : 2 ชุด	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ 30 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ ไม่มากกว่า 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ไม่น้อยกว่า 15 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
		4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
1.4	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) แบบ / รุ่น : CS650 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หรือดีกว่า 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
1.5	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แบบ / รุ่น : CR6 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 1 ชุด	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ 70 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 และแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -40° ถึง +70 องศาเซลเซียส 6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก ไม่น้อยกว่า 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล ไม่น้อยกว่า 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ไม่น้อยกว่า 66 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 หรือแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส หรือดีกว่า 6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2	ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)	-	-
2.1	หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แบบ / รุ่น : NIFE300P2 ยี่ห้อ : Nexcom	1. สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 55 องศาเซลเซียส 2. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 3. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel® Core™ i5-6500TE มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.3 GHz	5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส 6. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 7. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐาน ไม่น้อยกว่า 2.0 GHz

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
	จำนวน : 1 ชุด	4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาด 8 GB 5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวม 500 GB 6. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI	8. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาดไม่น้อยกว่า 8 GB 9. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวมไม่น้อยกว่า 250 GB 10. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI เป็นอย่างน้อย
2.2	กล้องวงจรปิด (CCTV) แบบ / รุ่น : DS-2CD2010F-I(W) ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night และมีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาด 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera หรือ IP Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night มีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาดไม่เล็กกว่า 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) สำหรับกรณีที่แสงน้อย 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264
2.3	อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) แบบ / รุ่น : DS-7604NI-E1/4P ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 1 ชุด	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 และ H.264+ 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10/100/1000 Mbps 4. มี Hard disk แบบ SATA ขนาดความจุรวมขนาด 2 TB	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 หรือดีกว่า 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10M/100M/1000M หรือ 10/100 Mbps 4. มี Hard disk แบบ SATA หรือดีกว่า ขนาดความจุรวมไม่น้อยกว่า 2 TB
3.	ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)	-	-
3.1	อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แบบ / รุ่น : Adapter 12V 6A จำนวน : 1 ชุด	1. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าในช่วง 100-240VAC 2. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 3. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์	11. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Full-range Voltage Input) ในช่วง 100-240VAC 12. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 13. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์
3.2	อุปกรณ์ UPS แบบ / รุ่น : PS3000RT3-230 ยี่ห้อ : Liebert® PSI จำนวน : 1 ชุด	1. มีค่ากำลังไฟฟ้า 3000 VA (2,700 Watts) 2. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection)	14. มีค่ากำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 3000 VA (2,100 Watts) 15. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection)

ตารางที่ 5.2 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางจำนวน 2 แปลง

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
1	ระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังใน โครงสร้างถนนลาดยาง		
2.1	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับ ผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100HAS ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ 180 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2.5 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่ง ออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การ สนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ไม่น้อยกว่า 1,200 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 180 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 3 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออก โดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การ สนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2.2	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียด (Strain Gage) แบบ / รุ่น : KM-100B ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 32 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ได้ 5,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ได้ 2.5 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่ง ออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้ การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดค่าความเครียด ไม่น้อยกว่า 1,000 Microstrain 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 3 mV/V 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออก โดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การ สนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2.3	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) แบบ / รุ่น : 3500-1 ยี่ห้อ / ประเทศ : Geokon / U.S.A จำนวน : 32 ชุด	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ได้ 600 กิโลปาสกาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่ง ออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้ การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure) ไม่น้อยกว่า 200 กิโล ปาสกาล 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส 3. มีค่าความละเอียดของผลลัพธ์ ไม่มากกว่า 2 mV/V 4. ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น 5. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออก โดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การ สนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
2.4	อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) แบบ / รุ่น : M101 ยี่ห้อ / ประเทศ : Solinst / Canada จำนวน : 3 ชุด	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ 30 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม Stainless Steel 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. มีความละเอียดของเส้นบอกระดับน้ำ ไม่มากกว่า 1 มิลลิเมตร 2. สามารถตรวจวัดระดับน้ำได้ไม่น้อยกว่า 15 เมตร 3. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและไม่เกิดสนิม เช่น โลหะสแตนเลส เป็นต้น 4. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2.5	อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) แบบ / รุ่น : Type K ยี่ห้อ / ประเทศ : TML / Japan จำนวน : 16 ชุด	1. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส 2. มีฉนวนป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ในช่วง 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส หรือดีกว่า 2. มีฉนวนป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2.6	อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) แบบ / รุ่น : CS650 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 32 ชุด	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้ 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	1. สามารถวัดค่าความชื้น ระหว่าง 5 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หรือดีกว่า 2. สามารถทนต่ออุณหภูมิ ไม่น้อยกว่า 70 องศาเซลเซียส 3. มีหนังสือแสดงผลการสอบเทียบหรือหนังสือรับรองอุปกรณ์ซึ่งออกโดยผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2.7	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แบบ / รุ่น : CR6 ยี่ห้อ / ประเทศ : Campbell / U.S.A จำนวน : 2 ชุด	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ 70 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 และแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -40° ถึง +70 องศาเซลเซียส	1. มีความเร็วในการอ่านค่าสัญญาณและบันทึก ไม่น้อยกว่า 100 Hz 2. มีหน่วยความจำสำหรับจัดเก็บข้อมูล ไม่น้อยกว่า 16 GB 3. สามารถรองรับช่องสัญญาณได้ไม่น้อยกว่า 66 ช่องสัญญาณ 4. มีช่องสำหรับถ่ายโอนข้อมูลแบบ RS-232 หรือแบบ Ethernet 5. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส หรือดีกว่า

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
		6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้	6. มีโปรแกรมควบคุมการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดโดยมีลิขสิทธิ์จากผู้ผลิต 7. มีหนังสือรับรองจากผู้ผลิตหรือจากตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทยที่จะให้การสนับสนุนด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้
2	ชุดอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนาม (Field Data Processing System)	-	-
2.1	หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แบบ / รุ่น : NIFE300P2 ยี่ห้อ : Nexcom จำนวน : 2 ชุด	1. สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 55 องศาเซลเซียส 2. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 3. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel® Core™ i5-6500TE มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.3 GHz 4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาด 8 GB 5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวม 500 GB 6. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI	1. สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส 2. มีระบบ Shock Protection และ Vibration Protection 3. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานไม่น้อยกว่า 2.0 GHz 4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR4 ขนาดไม่น้อยกว่า 8 GB 5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard Disk) ความจุรวมไม่น้อยกว่า 250 GB 6. มีพอร์ต RS232, USB 3.0 และ HDMI เป็นอย่างน้อย
2.2	กล้องวงจรปิด (CCTV) แบบ / รุ่น : DS-2CD2010F-I(W) ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 2 ชุด	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night และมีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาด 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264	1. เป็นกล้องวงจรปิดแบบ Network Camera หรือ IP Camera 2. เป็นกล้องชนิด Day & Night มีชุดเซ็นเซอร์รับภาพขนาดไม่เล็กกว่า 1/3 นิ้ว 3. มีระบบ Wide Dynamic Range (WDR) สำหรับกรณีที่มีแสงน้อย 4. รองรับเทคโนโลยีบีบอัดภาพแบบ H.264
2.3	อุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) แบบ / รุ่น : DS-7604NI-E1/4P ยี่ห้อ : Hikvision จำนวน : 2 ชุด	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 และ H.264+ 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10/100/1000 Mbps 4. มี Hard disk แบบ SATA ขนาดความจุรวมขนาด 2 TB	1. เป็นเครื่องบันทึกภาพที่สามารถทำงานร่วมกับกล้อง Network Camera หรือ IP Camera 2. รองรับการบันทึกภาพแบบ H.264 หรือดีกว่า 3. สามารถเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RJ45 10M/100M/1000M หรือ 10/100 Mbps

รายการ	รายละเอียด	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้ง	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องมือและอุปกรณ์ตามข้อกำหนด (TOR)
			4. มี Hard disk แบบ SATA หรือดีกว่า ขนาดความจุรวมไม่น้อยกว่า 2 TB
3.	ชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply System)	-	-
3.1	อุปกรณ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แบบ / รุ่น : Adapter 12V 6A จำนวน : 2 ชุด	1. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าในช่วง 100-240VAC 2. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 3. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์	7. รองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Full-range Voltage Input) ในช่วง 100-240VAC 8. มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) 12 โวลต์ 9. มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) 6 แอมป์
3.2	อุปกรณ์ UPS แบบ / รุ่น : PS3000RT3-230 ยี่ห้อ : Liebert® PSI จำนวน : 2 ชุด	1. มีค่ากำลังไฟฟ้า 3000 VA (2,700 Watts) 2. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection) ขนาด 220J	10. มีค่ากำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 3000 VA (2,100 Watts) 11. มีระบบป้องกันไฟกระชาก (Surge Protection)

5.2 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนคอนกรีต อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม

คณะวิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต เพื่อตรวจวัดพฤติกรรมติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

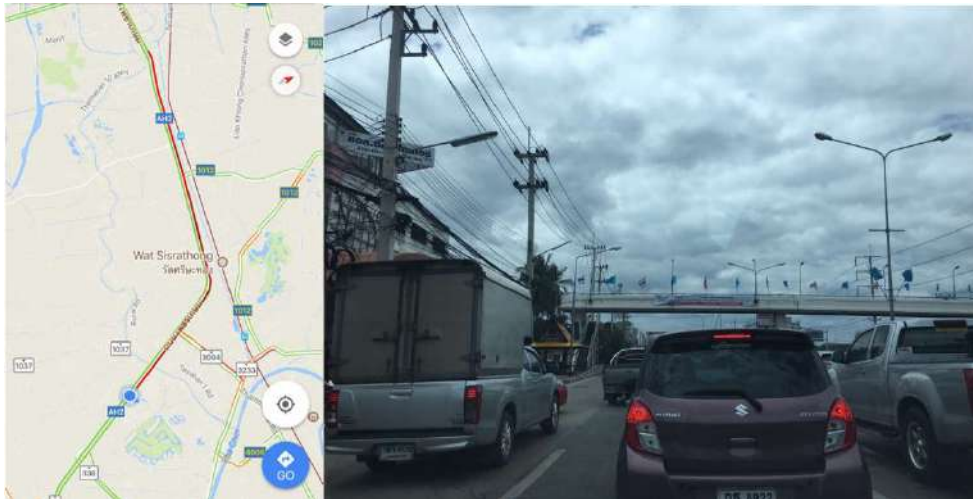
ได้ดำเนินการติดต่อประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อขออนุญาตเข้าทำงานในพื้นที่ รวมทั้งนำเสนอแผนบริหารการจราจรระหว่างการทำงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) แขวงทางหลวงนครปฐม คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทำหนังสือขออนุญาตเข้าพื้นที่และเข้าไปนำเสนอภาพรวมของการศึกษา แผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจราจร และรับข้อเสนอแนะจากผู้อำนวยการแขวงทางหลวงนครปฐมในฐานะเจ้าของพื้นที่ โดยแขวงทางหลวงนครปฐมได้เน้นย้ำเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ให้ดำเนินการติดตั้งแผงกั้นจราจร เป็นระยะทางประมาณ 200 เมตร ครอบคลุมพื้นที่แปลงทดสอบ ติดตั้งไฟเตือนและป้ายเบี่ยงการจราจร จัดหาคนเพื่ออำนวยความสะดวกบริเวณจุดเริ่มปิดช่องจราจร รวมถึงติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการล่วงหน้า 1 เดือนก่อนเข้าดำเนินการ เพื่อให้ผู้ใช้เส้นทางได้รับทราบข้อมูลล่วงหน้าที่จะปิดหรือเบี่ยงการจราจร ทั้งนี้ท่านได้มอบหมายให้เจ้าหน้าที่ในสังกัดของแขวงฯ มาช่วยวางแผน กำกับและแก้ปัญหาการจราจรที่บริเวณแปลงทดสอบด้วย
- 2) สถานีตำรวจภูธรนครชัยศรี คณะผู้วิจัยได้เข้าไปนำเสนอภาพรวมของการศึกษา แผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจราจร และรับข้อเสนอแนะจากผู้กำกับสถานีตำรวจภูธรนครชัยศรี ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยทางสถานีตำรวจภูธรนครชัยศรีได้จัดเวรตำรวจจราจรมาช่วยสนับสนุนการบริหารจราจร อำนวยความสะดวกในช่วงเร่งด่วน ทั้งเช้าและเย็น ช่วงการติดตั้งและรื้อแผงกั้นจราจร การติดตั้งป้ายบอกทางเลี้ยว และจัดประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อโซเชียลและ จส.100 เป็นต้น



รูปที่ 5.1 วางแผนการบริหารจราจรร่วมกับ สก.นครชัยศรี

อย่างไรก็ตามระหว่างการเดินทาง มีการปิดช่องจำนวน 2 ช่องซ้ายสุด (ช่องจราจร ที่ 3 และ 4) ทำให้มีรถติดสะสมในช่วงโมงเร่งด่วนเป็นระยะทางประมาณ 10 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.2 อีกทั้งทางตำรวจจราจรขอความร่วมมือให้คืนช่องจราจร เพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายรถ เนื่องจากมีบุคคลสำคัญสัญจรผ่าน ทำให้ต้องหยุดทำงานเป็นระยะๆ



รูปที่ 5.2 การจราจรติดขัดในช่วงโมงเร่งด่วน

5.2.2 การติดตั้งป้ายและอุปกรณ์การบริหารจราจร

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต โดยมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- สีป้ายเป็นสีน้ำเงิน มีตัวอักษรและตัวเลขสีขาว แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรือปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 5.3 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด)



รูปที่ 5.4 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด)
 สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปิดการจราจรจำนวน 2 ช่องทางซ้ายสุดจากไหล่ทางโดยใช้แผงกั้นจราจรชนิดบรรจุน้ำได้ (Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืนดังแสดงในรูปที่ 5.6 นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งป้ายจราจรอำนวยความสะดวกความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้ทางดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.5 การปิดการจราจร 2 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



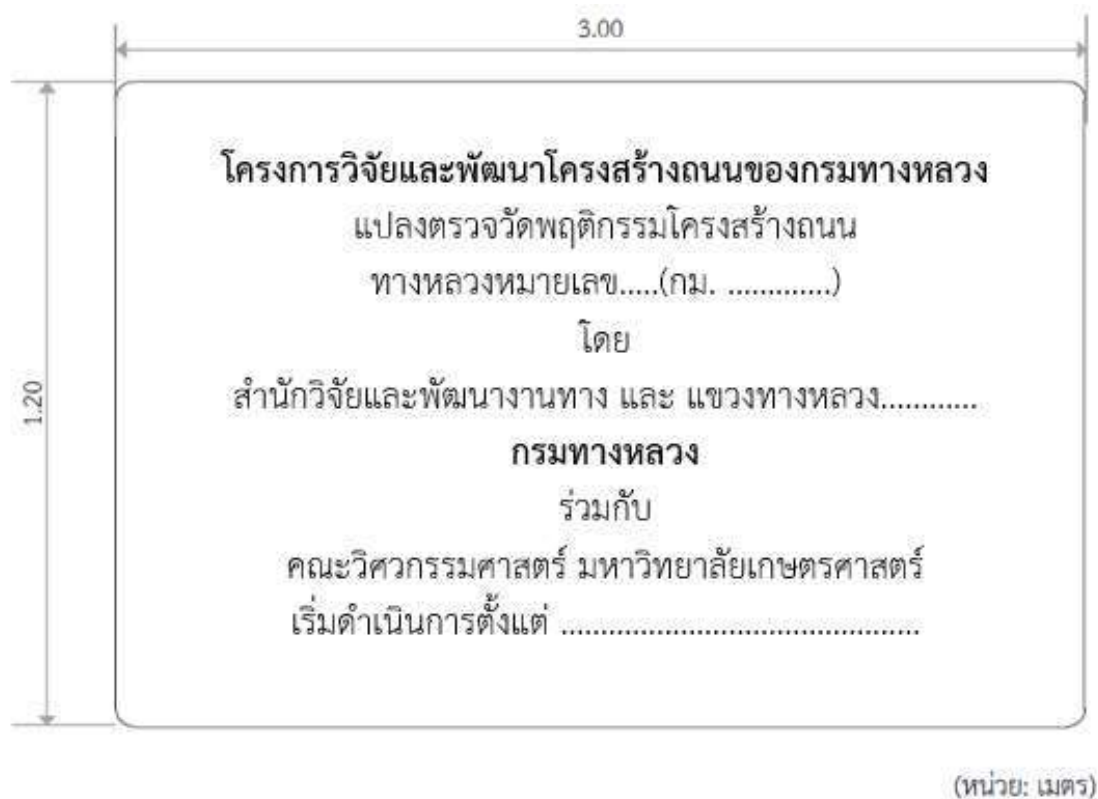
รูปที่ 5.6 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน



รูปที่ 5.7 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตแล้วเสร็จ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร โดยมีลักษณะและรูปแบบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- ใช้สีป้ายเป็นสีขาว มีตัวอักษรและตัวเลขสีดำ แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรืออาจพิจารณาปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 5.8 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการ (ติดตั้งแบบถาวร)



รูปที่ 5.9 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

5.2.3 การขุดรื้อผิวทาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการขุดรื้อ ฝังกลบ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ขุดเจาะรื้อผิวทางคอนกรีตและวัสดุชั้นทางออกจนถึงชั้น Subgrade ขนาด 0.30×3.50 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 1 และขนาด 3.50×10.00 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 2 นับจากไหล่ทาง ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยให้ตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิม จากนั้นทำความสะอาดกันหลุมพร้อมทั้งนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ถึง รูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 งานเจาะสกัดรื้อผิวทางคอนกรีต บริเวณช่องจราจรที่ 1



รูปที่ 5.11 งานเจาะสกัดรื้อผิวทางคอนกรีต บริเวณช่องจราจรที่ 2



รูปที่ 5.12 งานขุดย้ายผิวทางคอนกรีตออกไปทิ้ง

- 2) งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade เดิมและขนย้ายวัสดุที่ขุดไปทิ้ง พร้อมดังแสดงในรูปที่ 5.13 ถึง รูปที่ 5.15



รูปที่ 5.13 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (1)



รูปที่ 5.14 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (2)



รูปที่ 5.15 งานขุดรื้อชั้น Sand Cushion, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade (3)

5.2.4 การบดอัดและปรับระดับชั้น subgrade

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับระดับชั้น Subgrade เดิมด้วยวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐานกรมทางหลวงให้เรียบได้ระดับ พร้อมทั้งบดอัดให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) พร้อมทั้งได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุไปทดสอบคุณสมบัติและทดสอบความแน่นภายหลังการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง รูปที่ 5.20



รูปที่ 5.16 งานปรับระดับชั้น Subgrade เดิม



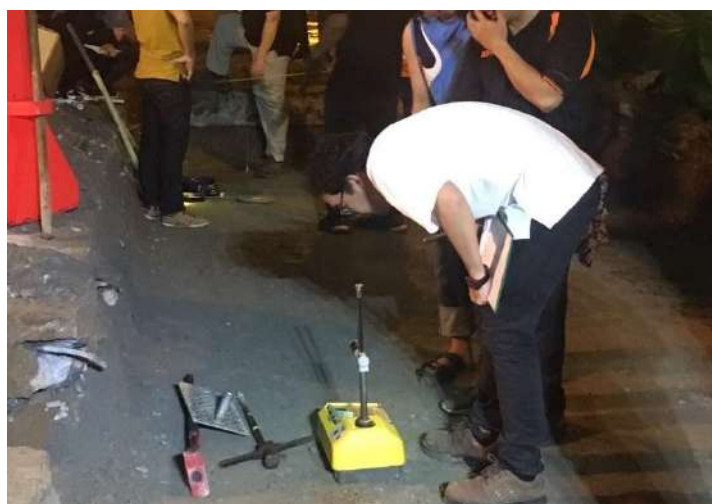
รูปที่ 5.17 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade เดิม



รูปที่ 5.18 งานบดอัดชั้น Subgrade เดิม



รูปที่ 5.19 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade

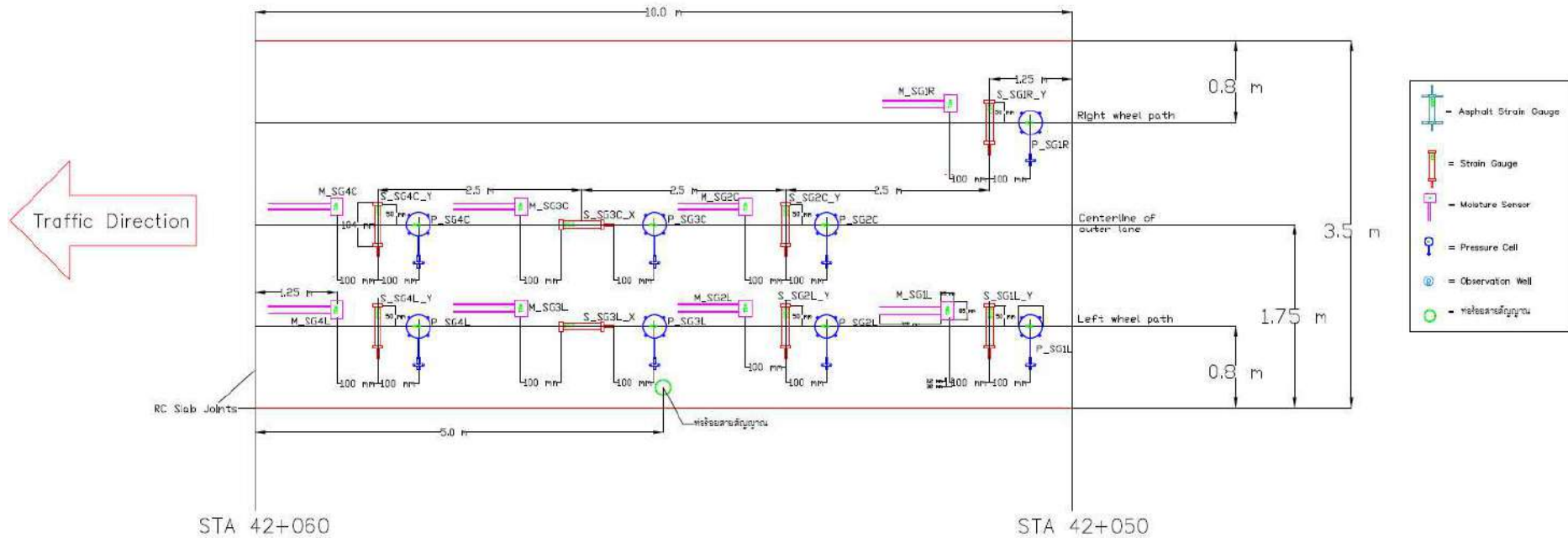


รูปที่ 5.20 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gauge ในชั้น Subgrade

5.2.5 การติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น subgrade

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Subgrade จำนวน 24 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.21 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.22 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยภายหลังการติดตั้งคณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบการส่งสัญญาณข้อมูลของอุปกรณ์ก่อนการกลบและบดอัดของ อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ดังแสดงใน รูปที่ 5.25 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ดังแสดงใน รูปที่ 5.26 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 5.27 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ถึง รูปที่ 5.29 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย

แบบขยายแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น Subgrade



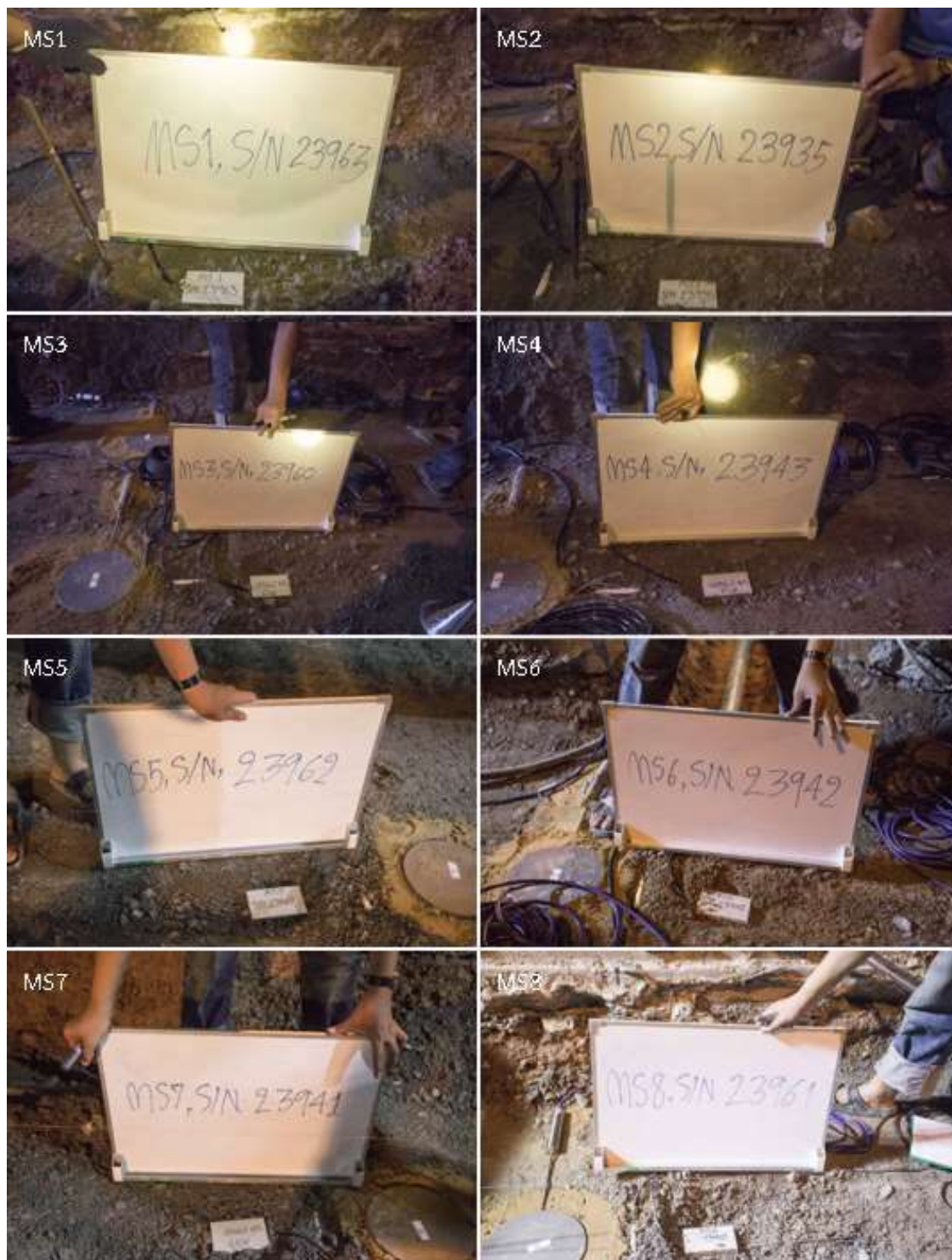
รูปที่ 5.21 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น subgrade



รูปที่ 5.22 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade



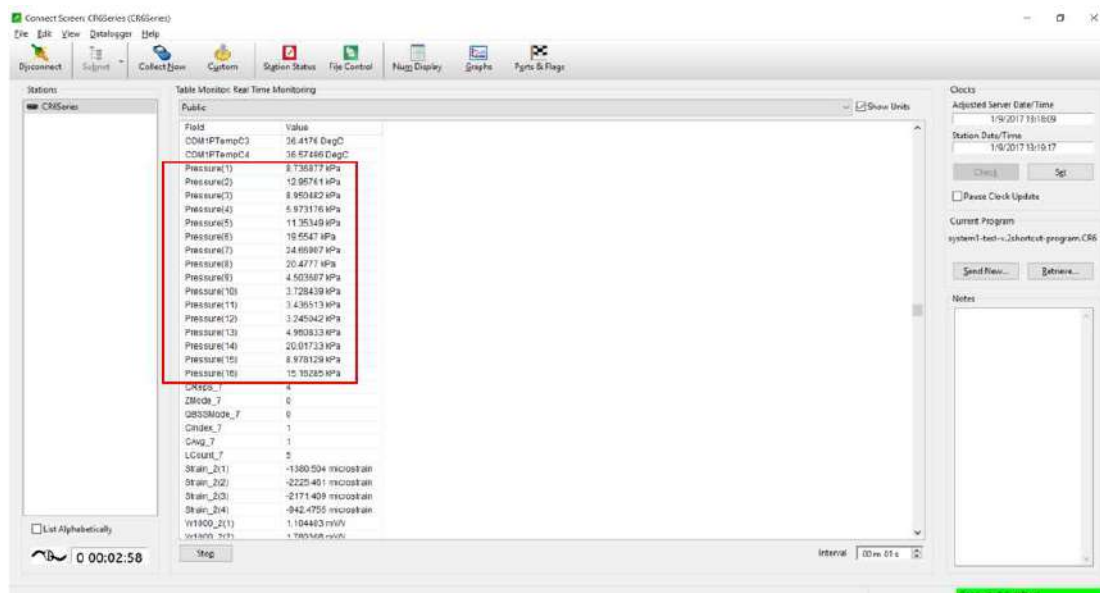
รูปที่ 5.23 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade



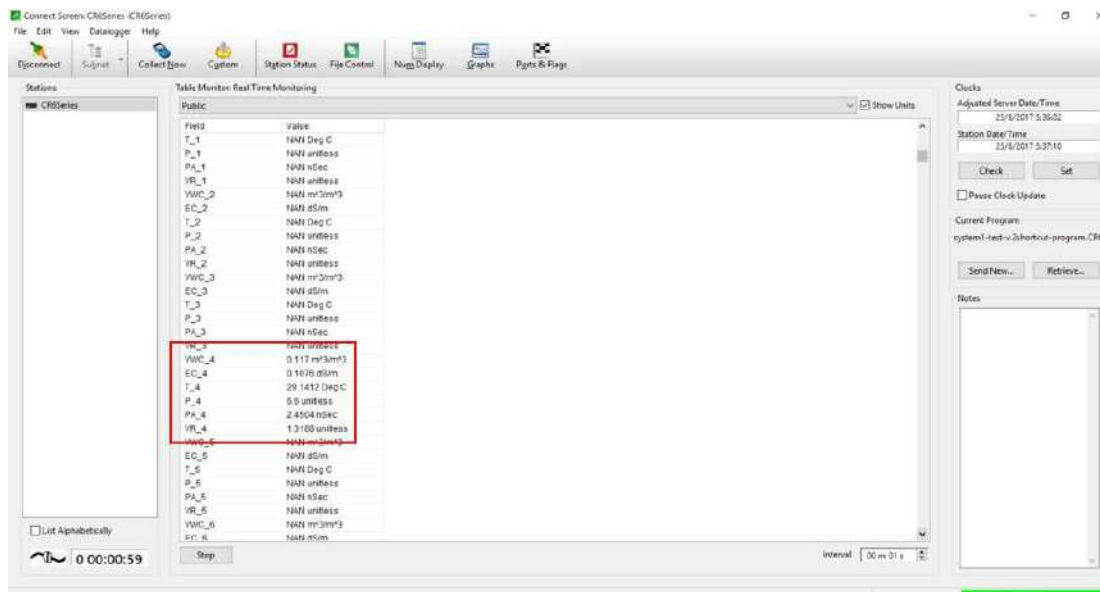
รูปที่ 5.24 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.25 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.26 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.27 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.28 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE



รูปที่ 5.29 งานเดินสายสัญญาณจากท่อ PE เข้าสู่ท่อหลัก (Main Pipe) และตู้ควบคุม (Control Panel)

5.2.6 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัด

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subgrade ถึงชั้น Under RC Surface พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.30

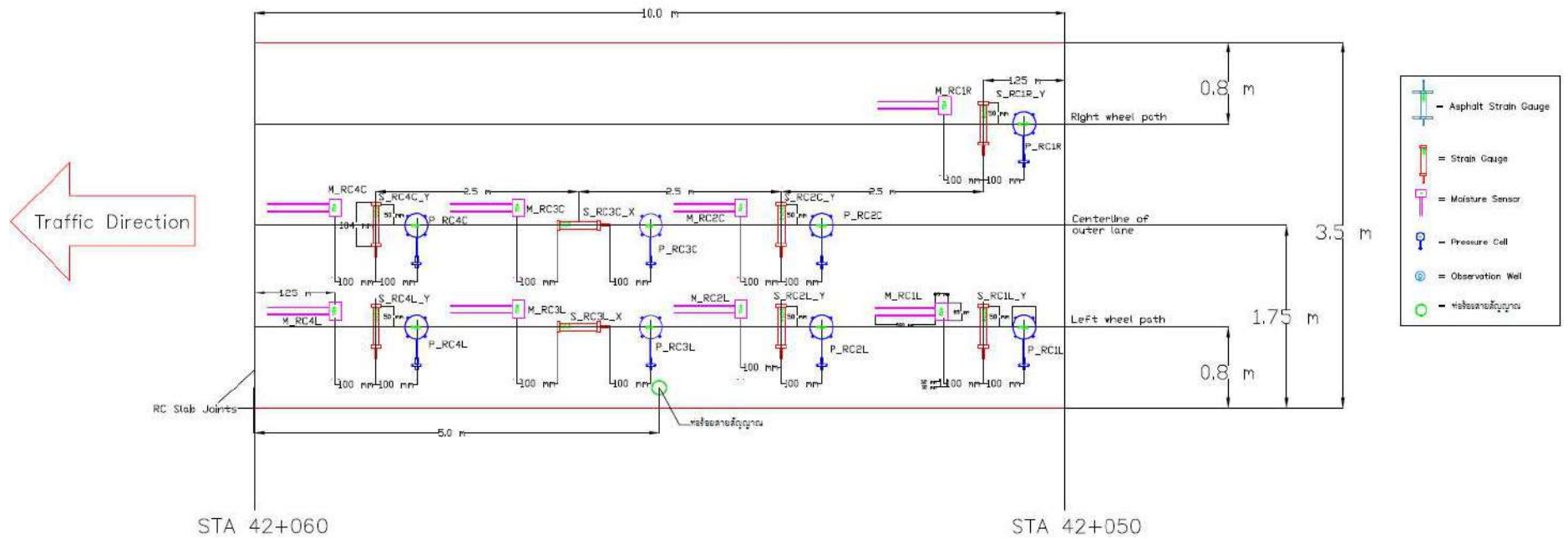


รูปที่ 5.30 การฝังกลบชั้น Subbase ด้วยวัสดุ Sand Cushion สำหรับรองพื้นถนนคอนกรีต

5.2.7 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณใต้ชั้น Under RC Surface

- 1) งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Under RC Surface จำนวน 24 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.31 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.32 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.33 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.34 โดยภายหลังการติดตั้ง คณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบการส่งสัญญาณข้อมูลของอุปกรณ์ก่อนการกลบและบดอัดของ อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ดังแสดงในรูปที่ 5.35 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ดังแสดงใน รูปที่ 5.36 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 5.37 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.38 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย

แบบขยายแปลงโครงสร้างถนนคอนกรีตชั้น Under RC Surface



รูปที่ 5.31 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น RC Surface



รูปที่ 5.32 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น RC Surface



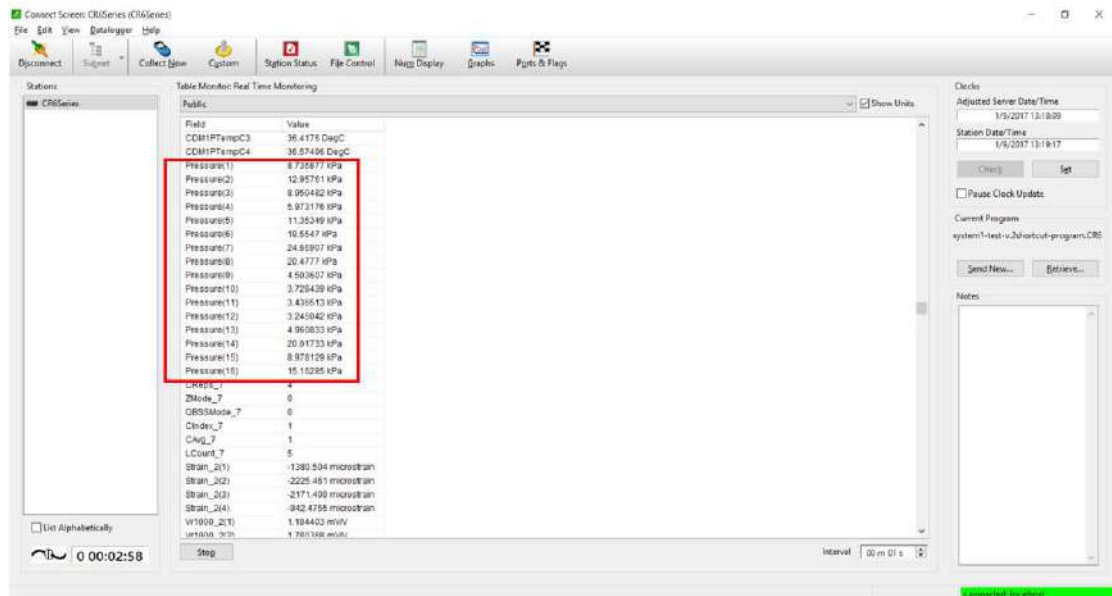
รูปที่ 5.33 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น RC Surface



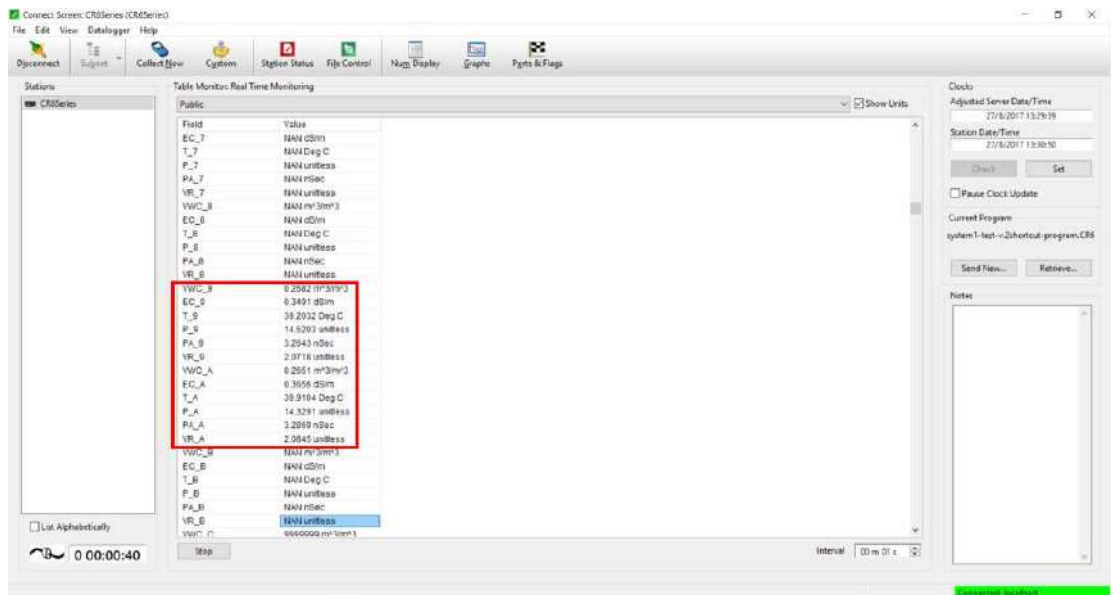
รูปที่ 5.34 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น RC Surface



รูปที่ 5.35 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น RC Surface



รูปที่ 5.36 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น RC Surface



รูปที่ 5.37 งานทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น RC Surface



รูปที่ 5.38 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น RC Surface ลงท่อ PE

5.2.8 การก่อสร้างชั้นผิวทางคอนกรีต

- 1) ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ใช้สำหรับการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อตามขวาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวง เหล็กเดือย (Dowel Bar) เป็นเหล็กเส้นกลม ขึ้นมาตรฐาน SR24 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ด้านละ 25 เซนติเมตร ระยะห่างที่ 30 เซนติเมตร และมีการหล่อหรือหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกที่ปลายข้างหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.39 ถึง รูปที่ 5.42



รูปที่ 5.39 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ขนาด 25 มม.



รูปที่ 5.40 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ด้านละ 25 ซม.



รูปที่ 5.41 ติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ระยะห่างที่ 30 ซม.



รูปที่ 5.42 การหุ้มปลายข้างหนึ่งของเหล็กเดือย (Dowel Bar) ด้วยแผ่นพลาสติก

- 2) ติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bar) ใช้เพื่อป้องกันการแยกตัวของแผ่นคอนกรีตบริเวณรอยต่อตามยาว ตามมาตรฐานกรมทางหลวง เหล็กยึดเป็นเหล็กข้ออ้อย ชั้นมาตรฐาน SD40 เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ฝังในรอยต่อตามยาวของถนน ด้านละ 25 เซนติเมตร ระยะห่างที่ 60 เซนติเมตร ที่กึ่งกลางความหนาของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5.43 ถึง รูปที่ 5.44



รูปที่ 5.43 ติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bar) ขนาด 16 มม. ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ด้านละ 25 ซม.



รูปที่ 5.44 ติดตั้งเหล็กยึด (Tie Bar) ฝังในรอยต่อตามขวางของถนน ระยะห่างที่ 60 ซม.

- 3) เทคอนกรีตกำลังอัดสูง (High Strength Concrete) กำลังอัด 320 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ทรงกระบอก) โดยคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดดังแสดงใน รูปที่ 5.45 นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump) ของคอนกรีต

ก่อนเทดังแสดงในรูปที่ 5.46 และควบคุมคุณภาพการเทคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงใน รูปที่ 5.47 ถึง รูปที่ 5.52



รูปที่ 5.45 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 5.46 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต



รูปที่ 5.47 เทคอนกรีตกำลังอัดสูง (High Strength Concrete) สำหรับผิวทางคอนกรีต



รูปที่ 5.48 การใช้เครื่องสั่นคอนกรีต (Concrete Vibrator) เพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตแน่น



รูปที่ 5.49 การติดตั้งเหล็กเสริมกันแตก (Wire Mesh)



รูปที่ 5.50 เทปาดระดับผิวคอนกรีตให้เสมอรระดับผิวถนนคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ



รูปที่ 5.51 ทาน้ำยาบ่มคอนกรีตบนผิวคอนกรีต



รูปที่ 5.52 ปิดทับผิวคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อบ่มคอนกรีตจนได้กำลังรับแรงอัด

5.2.9 การติดตั้ง Observation well

คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) จำนวน 2 จุด สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5.53 ถึง รูปที่ 5.55



รูปที่ 5.53 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.54 ติดตั้งท่อ PVC ในหลุมเจาะ จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.55 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

5.2.10 การติดตั้ง Data Logger

การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ติดตั้งภายใน Cabinet เพื่อป้องกันความชื้น ความร้อน และสภาพแวดล้อมที่จะให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดความเสียหายขณะการใช้งานในภาคสนามได้ มีอัตราความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงสุด 100 Hz ดังแสดงในรูปที่ 5.56



รูปที่ 5.56 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

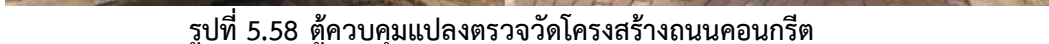
การติดตั้ง data logger จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับ UPS สำหรับในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้อง ไฟฟ้าตก หรือเกิดการกระชาก ระยะเวลาการ backup ก็จะขึ้นอยู่กับขนาดของ UPS เมื่อไฟฟ้าติระบบก็จะทำการชาร์ตไปเก็บไว้แบตเตอรี่ ในส่วนของข้อมูล data logger จะมี CF card สำหรับเก็บข้อมูล ในกรณีที่ไฟฟ้าดับข้อมูลที่ค้างอยู่ระหว่างการบันทึกจะถูกเก็บไว้ใน CF Card เมื่อไฟฟ้าติระบบของ data logger จะกลับมาทำงานเป็นปกติ

เมื่อระบบขัดข้องระหว่างการใช้งานให้ทำการ on/off การจ่ายกระแสไฟฟ้า 12Vdc ให้กับ data logger อีกวิธีหนึ่งในกรณีที่ on/off แล้วระบบยังไม่สามารถทำงานได้ ให้ทำการลงระบบปฏิบัติการใหม่

ประมาณการระยะเวลาที่ Data Logger สามารถจัดข้อมูลผลการตรวจวัดทั้งหมด สำหรับแปลงลาดยางและแปลงคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่าความถี่ในการเก็บข้อมูล เช่น หากบันทึกค่าทุก 15 นาที จะมีระยะเวลาประมาณ 270 วัน (memory 16 GB) โดยผู้ใช้สามารถ Save ข้อมูลผลการตรวจวัดจาก Data logger ออกมาได้โดยใช้ Memory Card



๑.๑๕๕๕๕๕ ๖ ๑.๑๕๕๕๕๕



5.3.2 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินขออนุญาตเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าจากแนวสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้ให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งเครื่องสำรองไฟและอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากภาคสนามมายังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลผลข้อมูลและแสดงผลการตรวจวัดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.59 ถึง รูปที่ 5.62



รูปที่ 5.59 ระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.60 ระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.61 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต



รูปที่ 5.62 อุปกรณ์ UPS แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

5.3.3 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 5.63



รูปที่ 5.63 การติดตั้งกล้องวงจรปิด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

5.3.4 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 5.64



รูปที่ 5.64 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

5.4 ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการถมบดอัดชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Material) และชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ของแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีตที่แหล่งวัสดุ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยในระหว่างก่อสร้างคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบวัสดุถมบดอัดที่แปลงโครงสร้างถนนคอนกรีต (Control Test) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) วัสดุประเภทลูกรัง (มาตรฐาน ทล.-ม. 205/2532)
 - การทดสอบ CBR (มาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517) $\geq 80\%$
 - การทดสอบ Compaction $\geq 95\%$ ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
 - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) $\leq 35\%$
 - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) $\leq 11\%$
 - การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง (มาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 = 25 - 45% และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 = 5 - 20%
- ชั้นวัสดุคัดเลือก ก (Selected Material A) วัสดุประเภทลูกรัง (มาตรฐาน ทล.-ม. 208/2532)
 - การทดสอบ CBR (มาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517) $\geq 25\%$
 - การทดสอบ Compaction $\geq 95\%$ ของ Compaction สูงสุด (มาตรฐาน ทล.-ท. 108/2517)
 - การทดสอบ Liquid Limit (มาตรฐาน ทล.-ท. 102/2515) $\leq 40\%$
 - การทดสอบ Plastic Index (มาตรฐาน ทล.-ท. 103/2515) $\leq 20\%$
 - การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง (มาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 $\leq 80\%$ และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 $\leq 30\%$

ผลการทดสอบวัสดุถมบดอัดที่แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง (Control Test) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวัสดุก่อสร้างสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต

วัสดุชั้นทาง	เอกสารอ้างอิง	ข้อกำหนด	ผลการทดสอบ
Subbase	ภาคผนวก ฉ	CBR $\geq$ 80%	CBR 66.5%, Compaction 95 % (CBR 84% @0.2")
Selected Material A	ภาคผนวก ฉ	CBR $\geq$ 25%	CBR 66.5%, Compaction 95%

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สำหรับเพช้นผิวทางคอนกรีตแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนคอนกรีต ซึ่งใช้คอนกรีตกำลังอัดสูง (High Strength Concrete) กำลังอัด 320 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างรูปทรงกระบอก) เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบเท่ากับ 405, 465 และ 469 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างรูปลูกบาศก์) ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกเท่ากับ 337.37, 387.35 และ 390.68 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างรูปทรงกระบอก) (ค่ากำลังอัดรูปทรงกระบอก เท่ากับ 0.833 เท่าของค่ากำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์) หรือได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกเฉลี่ย เท่ากับ 371.80 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร

5.5 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยาง อ.โพธาราม จ. ราชบุรี

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนนลาดยางระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเพื่อตรวจวัดพฤติกรรม ติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.5.1 การประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทำหนังสือขออนุญาตเข้าพื้นที่ และเข้าไปนำเสนอภาพรวมของการศึกษาแผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจราจร และรับข้อเสนอแนะจากแขวงทางหลวงราชบุรีในฐานะเจ้าของพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.65 โดยแขวงทางหลวงราชบุรีได้เน้นย้ำเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ให้ดำเนินการติดตั้งแผงกั้นจราจร ครอบคลุมพื้นที่ที่แปลงทดสอบ ติดตั้งไฟเตือนและป้ายเบี่ยงการจราจร จัดหาคนเพื่ออำนวยความสะดวกบริเวณจุดเริ่มปิดช่องจราจร รวมถึงติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการล่วงหน้าก่อนเข้าดำเนินการ เพื่อให้ผู้ใช้เส้นทางได้รับทราบข้อมูลช่วงเวลาที่ปิดหรือเบี่ยงการจราจร ทั้งนี้ท่านได้มอบหมายให้หมวดการทางโพธาราม และตำรวจทางหลวงในพื้นที่ มาช่วยวางแผน กำกับและแก้ปัญหาการจราจรที่บริเวณแปลงทดสอบด้วย



รูปที่ 5.65 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงราชบุรี หมวดทางหลวงโพธาราม และตำรวจทางหลวง

5.5.2 การติดตั้งป้ายและอุปกรณ์การบริหารจราจร

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5.66 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- สีป้ายเป็นสีน้ำเงิน มีตัวอักษรและตัวเลขสีขาว แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรือปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 5.66 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปิดการจราจรจำนวน 2 ช่องทางซ้ายสุดจากไหล่ทางโดยใช้แผงกั้นจราจรชนิดบรรจุน้ำได้ (Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 5.67 โดยติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืนดังแสดงในรูปที่ 5.68 นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งป้ายจราจรอำนวยความสะดวกความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งานทางดังแสดงในรูปที่ 5.69



รูปที่ 5.67 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.68 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน



รูปที่ 5.69 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางแล้วเสร็จ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้ง ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร โดยมีลักษณะและรูปแบบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.70 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง

- ใช้ป้ายเป็นสีขาว มีตัวอักษรและตัวเลขสีดำ แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรืออาจพิจารณาปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 5.70 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.5.3 การขุดรื้อผิวทาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการขุดรื้อ ฝั่งกลับ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) งานขุดเจาะรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางจนถึงชั้น subgrade ขนาด 3.50 x 12.00 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 1 นับจากไหล่ทาง ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยให้ตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิม จากนั้นทำความสะอาดกันหลุมพร้อมทั้งนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก ดังแสดงในรูปที่ 5.71



รูปที่ 5.71 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1

- 2) งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางประกอบด้วยชั้น Base, Subbase, Selected Material จนถึงชั้น Subgrade ดังแสดงในรูปที่ 5.72



รูปที่ 5.72 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade

5.5.4 การบดอัดชั้น Subgrade

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับระดับชั้น Subgrade เดิมให้เรียบได้ระดับ พร้อมทั้งบดอัดให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) พร้อมทั้งได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุไปทดสอบคุณสมบัติและทดสอบความแน่นภายหลังการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 5.73 ถึงรูปที่ 5.74



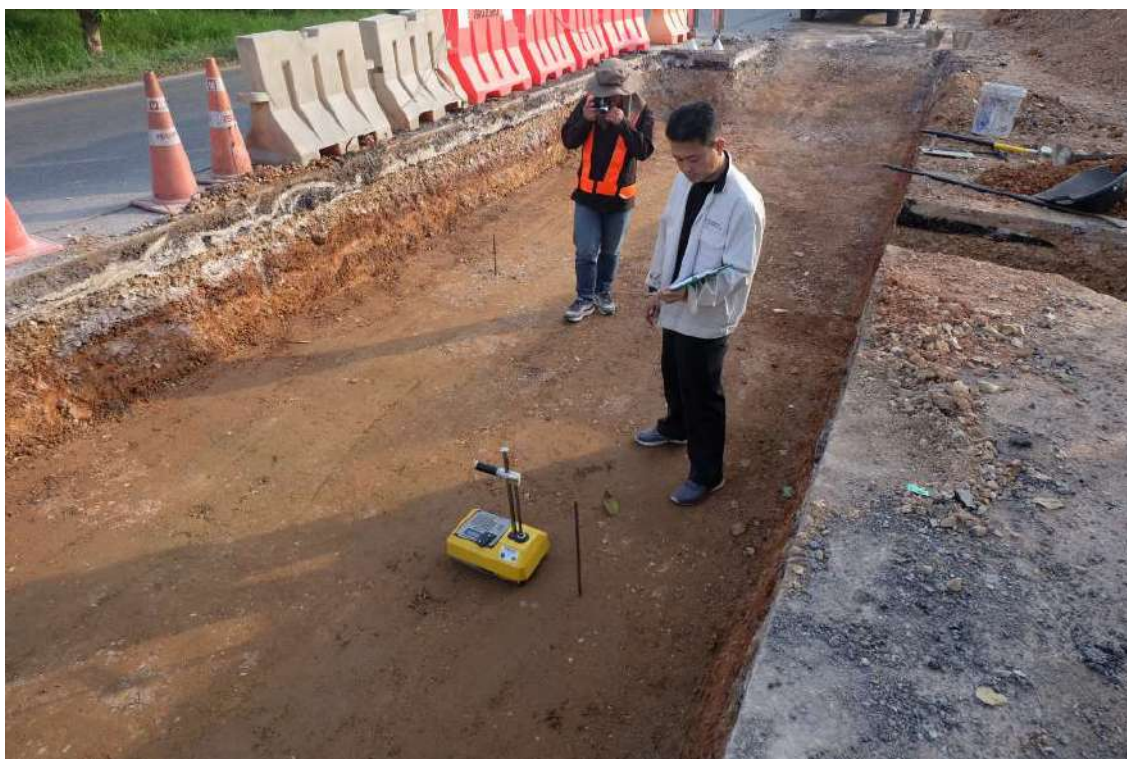
รูปที่ 5.73 งานบดอัดชั้น Subgrade



รูปที่ 5.74 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade



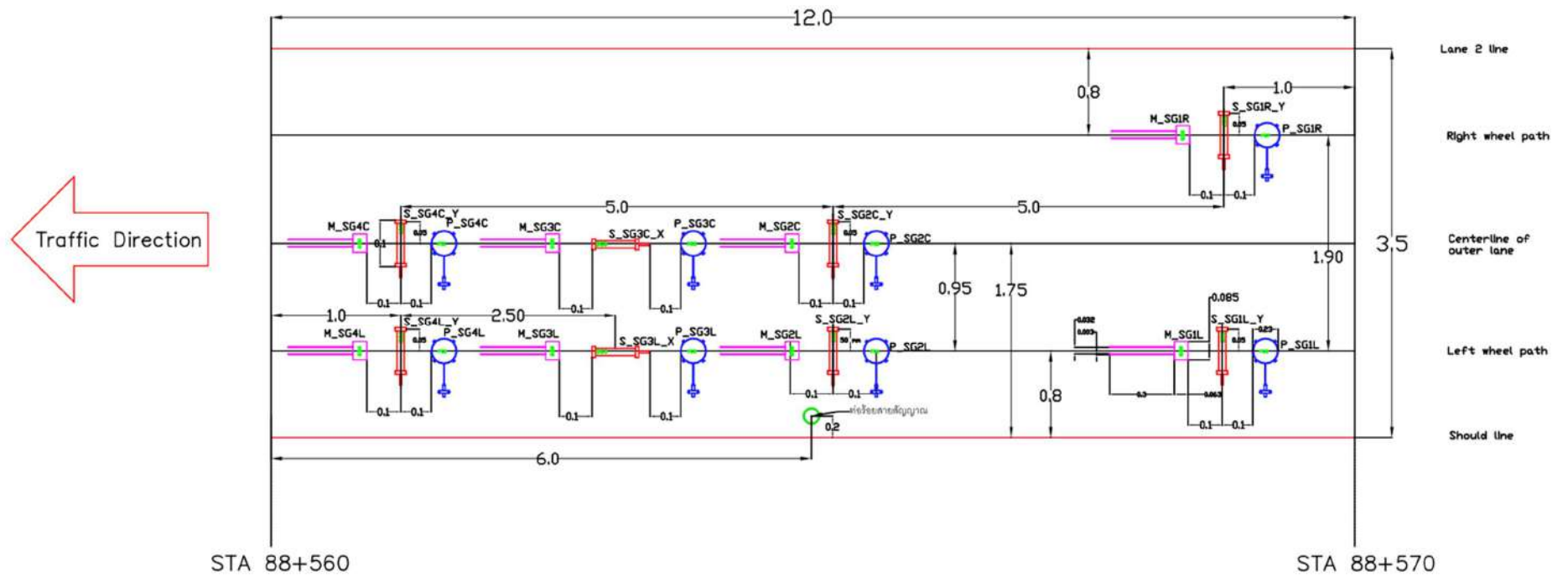
รูปที่ 5.75 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Density Test) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.76 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gauge ในชั้น Subgrade

5.5.5 การติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subgrade

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Subgrade จำนวน 24 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.77 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.78 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.79 และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.80 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.81 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



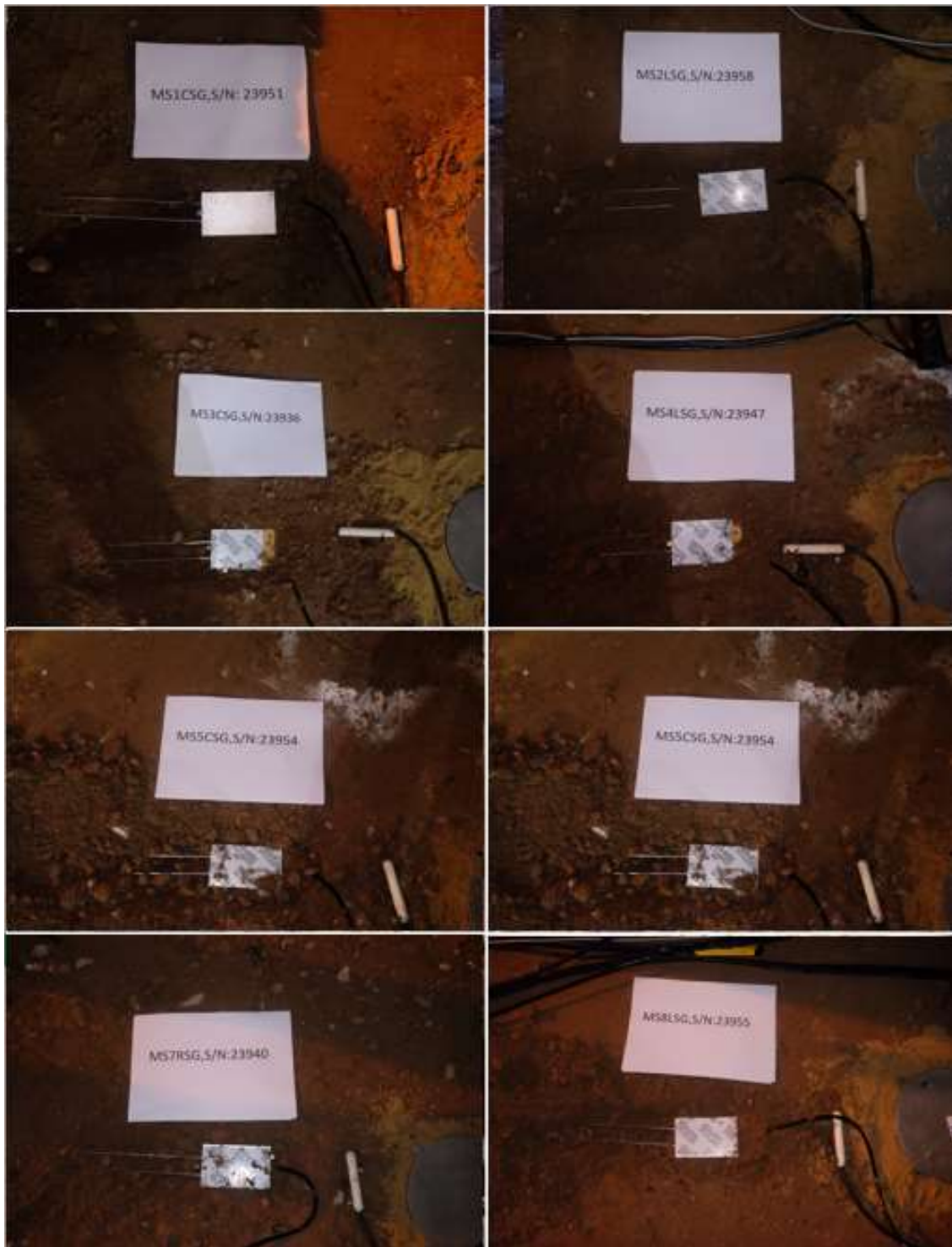
รูปที่ 5.77 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Subgrade



รูปที่ 5.78 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.79 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.80 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.81 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวน 24 ตัว ในชั้น Subgrade ลงท่อ PE

5.5.6 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Subgrade, Selected Material และ Subbase

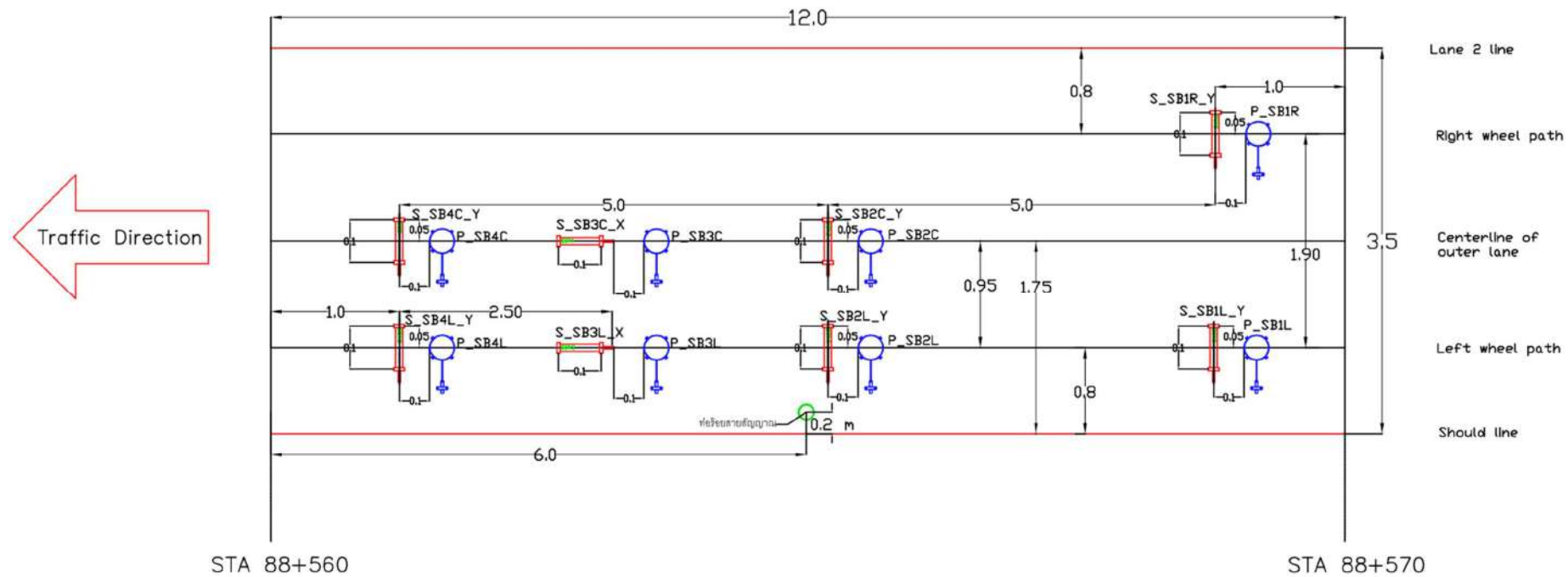
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Subgrade, Selected Material และ Subbase พร้อมบดอัดด้วย เครื่องมือบดทับแบบสั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.82



รูปที่ 5.82 การฝังกลบชั้น Subbase, Selected Material และ Subbase

5.5.7 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น Base

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Base จำนวน 16 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.83 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.84 และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.85 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.86 ซึ่งการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.83 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Base



รูปที่ 5.84 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) ในชั้น Base



รูปที่ 5.85 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) ในชั้น Base



รูปที่ 5.86 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Base ลงท่อ PE

5.5.8 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Base จนถึงชั้น Middlebase

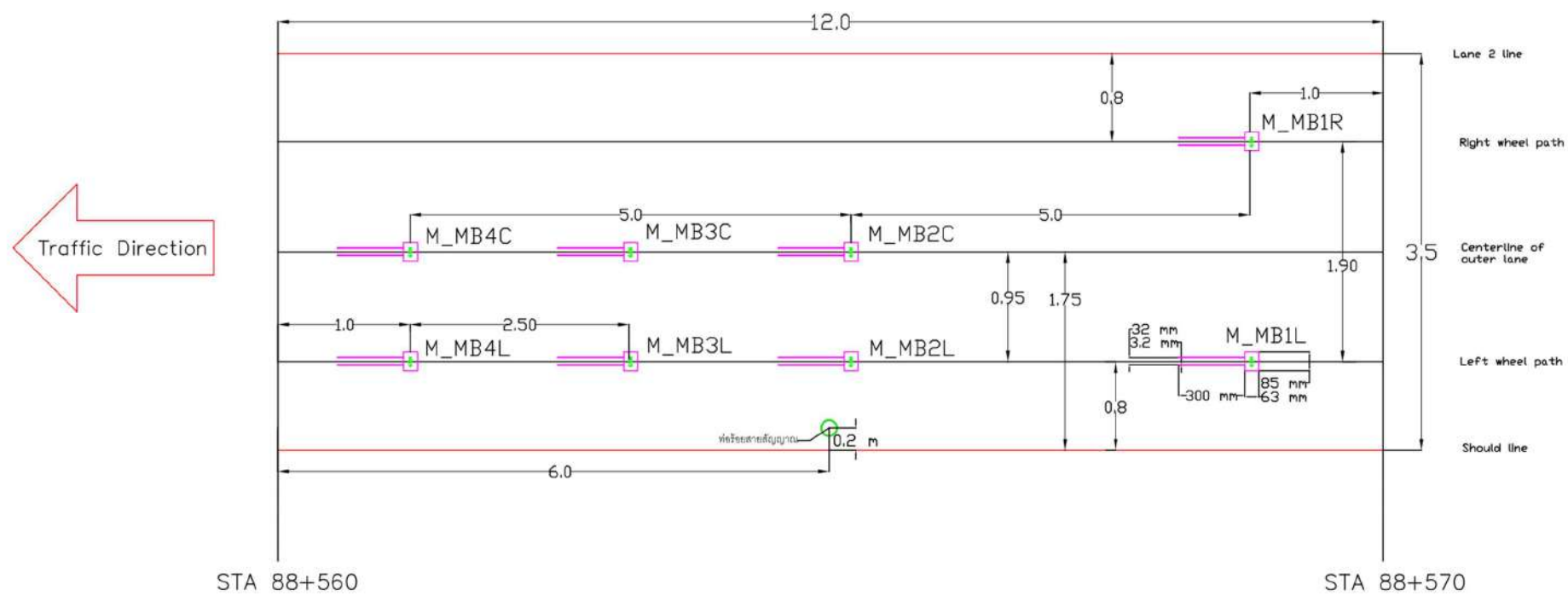
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Base จนถึงชั้น Middlebase พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบ สั่นสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.87



รูปที่ 5.87 การฝังกลบชั้น Subbase จนถึงชั้น Middlebase

5.5.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น Middlebase

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น Middlebase จำนวน 8 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.88 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.89 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.90 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.88 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณชั้น Middlebase



รูปที่ 5.89 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) ในชั้น Middlebase



รูปที่ 5.90 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด ในชั้น Middlebase ลงท่อ PE

5.5.1 การฝังกลบอุปกรณ์และบดอัดชั้น Middlebase จนถึงชั้น AC Surface

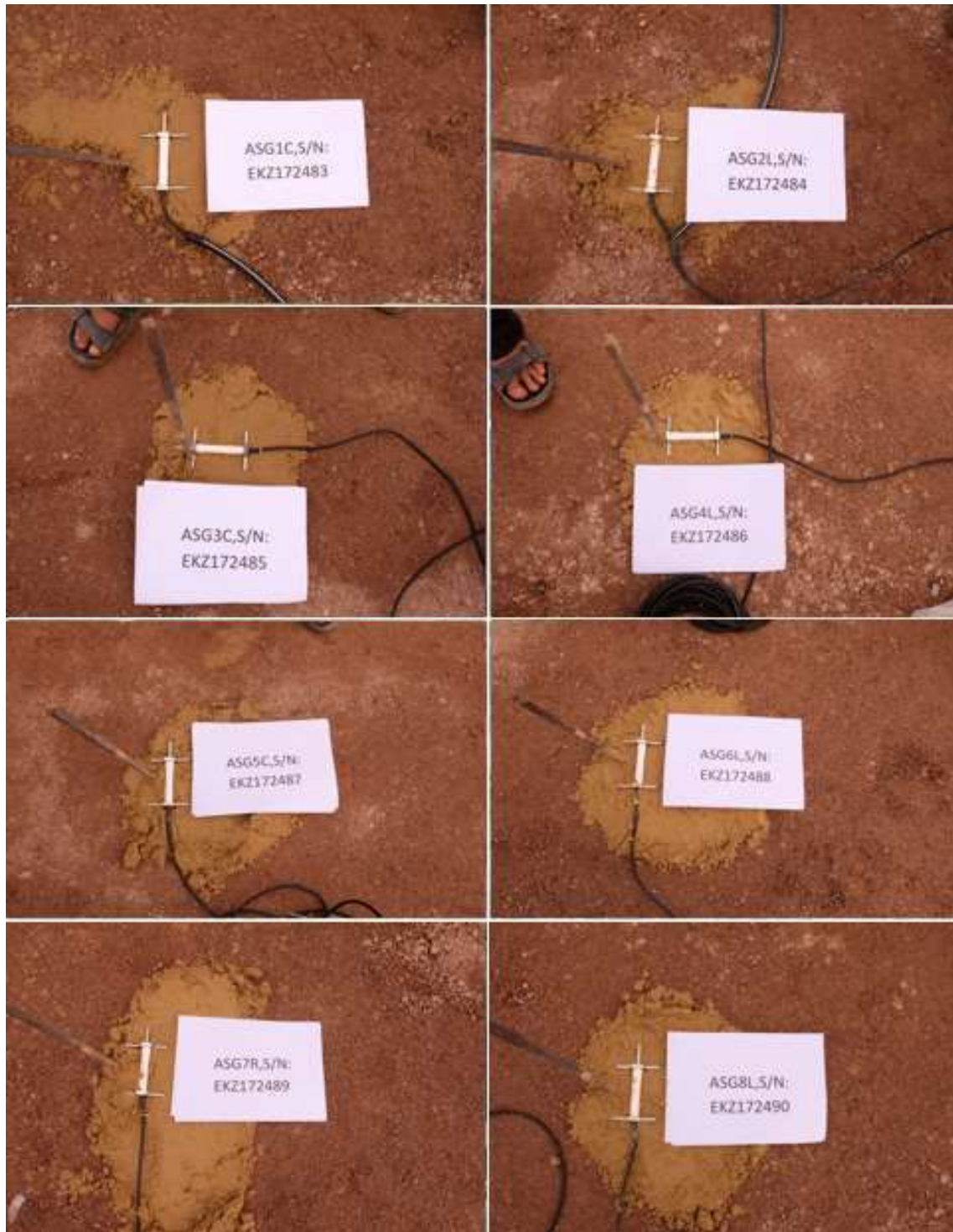
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น AC Surface พร้อมบดอัดด้วยเครื่องมือบดทับแบบสันสะเทือนขนาดเล็ก (Small Vibratory Compactor) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 5.91



รูปที่ 5.91 การฝังกลบชั้น Middlebase จนถึงชั้น Under AC Surface

5.5.2 การติดตั้งอุปกรณ์และเดินสายสัญญาณชั้น AC Surface

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชั้น AC Surface จำนวน 16 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.92 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) จำนวน 8 ตัว และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.93 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.94 ถึง รูปที่ 5.95 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.92 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage)
ในชั้น AC Surface



รูปที่ 5.93 งานติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น AC Surface



รูปที่ 5.94 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดสำหรับผิวทางลาดยาง (Asphalt Strain Gage) ในชั้น AC Surface ลงท่อ PE



รูปที่ 5.95 งานเดินสายสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ (Thermocouple) ในชั้น AC Surface ลงท่อ PE

5.5.3 การก่อสร้างชั้นผิวทางลาดยาง

ปรึกษาได้ดำเนินการก่อสร้างชั้นผิวทางลาดยางซึ่งประกอบชั้น prime coat, ชั้น asphalt concrete binder course, ชั้น tack coat และ ชั้น asphalt concrete wearing course ดังแสดงในรูปที่ 5.96 ถึง รูปที่ 5.99



รูปที่ 5.96 ชั้น Prime Coat



รูปที่ 5.97 ชั้น Asphalt Concrete Binder Course



รูปที่ 5.98 ชั้น Tack Coat



รูปที่ 5.99 ชั้น Asphalt Concrete Wearing Course

5.5.4 การติดตั้ง Observation Well

คณะผู้วิจัยได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ (Observation Well) จำนวน 2 จุด สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง ดังแสดงในรูปที่ 5.100 ถึงรูปที่ 5.101



รูปที่ 5.100 ขุดหลุมเจาะ ลึกขนาด 15 เมตร จำนวน 2 จุด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.101 เทพื้นคอนกรีตบริเวณรอบหลุมเจาะจำนวน 2 จุดแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.5.5 การติดตั้ง Data Logger

การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) ติดตั้งภายใน Cabinet เพื่อป้องกันความชื้น ความร้อน และสภาพแวดล้อมที่จะให้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลเกิดความเสียหายขณะการใช้งานในภาคสนามได้ มีอัตราความถี่ในการเก็บข้อมูลสูงสุด 100 Hz ดังแสดงในรูปที่ 5.102



รูปที่ 5.102 การติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data Logger) แปลงโครงสร้างถนนลาดยาง

การติดตั้ง data logger จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับ UPS สำหรับในกรณีที่ไฟฟ้าขัดข้อง ไฟฟ้าตก หรือเกิดการกระชาก ระยะเวลาการ backup ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของ UPS เมื่อไฟฟ้าติดระบบก็จะทำการชาร์ตไปเก็บไว้แบตเตอรี่ ในส่วนของข้อมูล data logger จะมี CF card สำหรับเก็บข้อมูล ในกรณีที่ไฟฟ้าดับข้อมูลที่ค้างอยู่ระหว่างการบันทึกจะถูกเก็บไว้ใน CF Card เมื่อไฟฟ้าติดระบบของ data logger จะกลับมาทำงานเป็นปกติ

เมื่อระบบขัดข้องระหว่างการใช้งานให้ทำการ on/off การจ่ายกระแสไฟฟ้า 12Vdc ให้กับ data logger อีกวิธีหนึ่งในกรณีที่ on/off แล้วระบบยังไม่สามารถทำงานได้ ให้ทำการลงระบบปฏิบัติการใหม่

ประมาณการระยะเวลาที่ Data Logger สามารถจัดข้อมูลผลการตรวจวัดทั้งหมด สำหรับแปลงลาดยางและแปลงคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่าความถี่ในการเก็บข้อมูล เช่น หากบันทึกค่าทุก 15 นาที จะมีระยะเวลาประมาณ 270 วัน (memory 16 GB) โดยผู้ใช้สามารถ Save ข้อมูลผลการตรวจวัดจาก Data logger ออกมาได้โดยใช้ Memory Card

วิธีการในการเชื่อมโยงข้อมูลจาก Data Logger ไปยัง Computer อีกเครื่องหนึ่งจะเชื่อมต่อผ่าน RS232 หรือระบบ internet (เพิ่ม modem) แล้วแสดงผลผ่าน software (LoggerNet) ของ Campbell โดยโปรแกรม LoggerNet จะสามารถดูข้อมูล บันทึกข้อมูล หรือตั้งค่าให้ CR6 ส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติกลับมาที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆได้ ไฟล์ที่บันทึกมาจะเป็นตามไปตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.103



รูปที่ 5.104 ตู้ควบคุมและบ่อกักสายสัญญาณแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.6.2 การเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าและเครือข่าย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการขออนุญาตเพื่อเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าจากแนวสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้ให้อุปกรณ์ต่างๆ ติดตั้งเครื่องสำรองไฟและอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากภาคสนามมายังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลผลข้อมูลและแสดงผลการตรวจวัดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.105 ถึง รูปที่ 5.108



รูปที่ 5.105 ระบบไฟฟ้าแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.106 ระบบเครือข่ายความเร็วสูงจากผู้ให้บริการแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.107 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.108 อุปกรณ์ UPS แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.6.3 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 5.109



รูปที่ 5.109 การติดตั้งกล้องวงจรปิดแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.6.4 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 5.110



รูปที่ 5.110 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนามแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.7 การติดตั้งระบบประมวลผลข้อมูลภาคสนามโครงสร้างถนนลาดยาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลภาคสนามและชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานในการติดตั้งดังนี้

5.7.1 การติดตั้งกล้องวงจรปิด (CCTV) และอุปกรณ์บันทึกภาพ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและตั้งค่ากล้องวงจรปิด (CCTV) ที่รองรับ Digital WDR พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและสายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องวงจรปิดและระบบเครือข่ายเข้ากับอุปกรณ์บันทึกภาพ (Video Recording and Management) ดังแสดงในรูปที่ 5.111



รูปที่ 5.111 กล้องวงจรปิด (CCTV) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.7.2 การติดตั้งหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit)

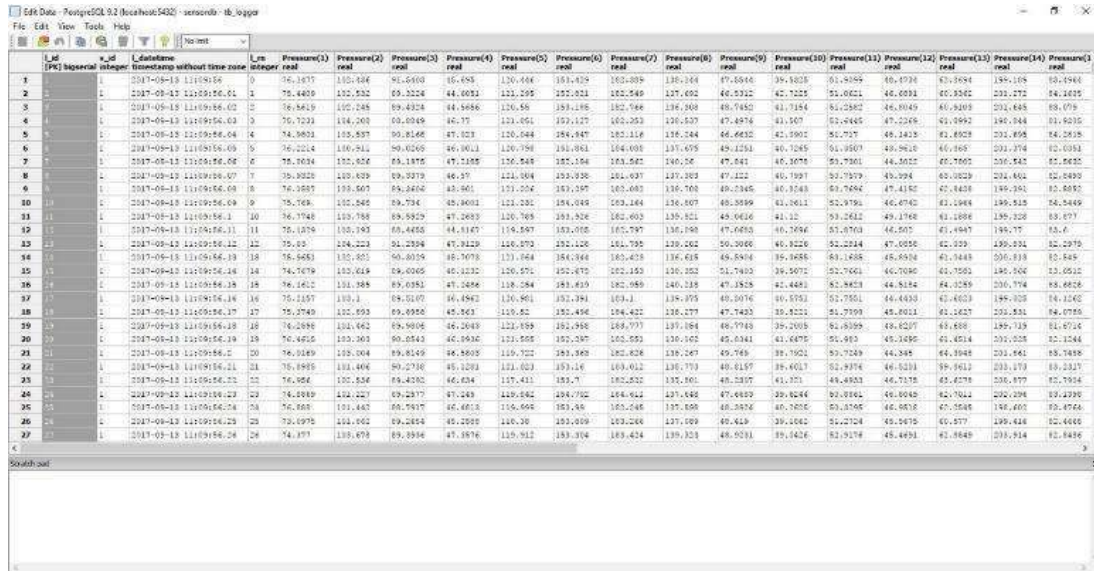
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและเดินสายสัญญาณหน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) พร้อมดำเนินการตั้งค่าและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบเครือข่ายเข้ากับหน่วยประมวลผลภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 5.112



รูปที่ 5.112 หน่วยประมวลผลภาคสนาม (Data Processing Unit) แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.7.3 การจัดทำฐานข้อมูลจัดเก็บผลการตรวจวัดในภาคสนาม

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัด และเชื่อมโยงข้อมูลผลการตรวจวัดจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมาด้วยหน่วยประมวลผลภาคสนามดังแสดงในรูปที่ 5.113



id	id sensor	L_datetime	L_sensor	L_temperature	Pressure(1)	Pressure(2)	Pressure(3)	Pressure(4)	Pressure(5)	Pressure(6)	Pressure(7)	Pressure(8)	Pressure(9)	Pressure(10)	Pressure(11)	Pressure(12)	Pressure(13)	Pressure(14)	Pressure(15)
1	1	2017-09-13 11:09:54	1	74.1875	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
2	1	2017-09-13 11:09:56.01	1	75.4409	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
3	1	2017-09-13 11:09:58.02	1	76.8419	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
4	1	2017-09-13 11:09:59.03	1	76.7233	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
5	1	2017-09-13 11:09:59.04	1	74.3802	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
6	1	2017-09-13 11:09:59.05	1	74.2214	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
7	1	2017-09-13 11:09:59.06	1	75.1034	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
8	1	2017-09-13 11:09:59.07	1	75.9025	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
9	1	2017-09-13 11:09:59.08	1	76.2687	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
10	1	2017-09-13 11:09:59.09	1	75.769	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
11	1	2017-09-13 11:09:59.1	1	76.7748	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
12	1	2017-09-13 11:09:59.11	1	75.1878	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
13	1	2017-09-13 11:09:59.12	1	75.19	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
14	1	2017-09-13 11:09:59.13	1	75.5455	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
15	1	2017-09-13 11:09:59.14	1	74.7679	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
16	1	2017-09-13 11:09:59.15	1	75.1412	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
17	1	2017-09-13 11:09:59.16	1	75.1157	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
18	1	2017-09-13 11:09:59.17	1	75.2740	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
19	1	2017-09-13 11:09:59.18	1	76.2898	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
20	1	2017-09-13 11:09:59.19	1	76.4052	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
21	1	2017-09-13 11:09:59.2	1	74.8189	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
22	1	2017-09-13 11:09:59.21	1	75.8985	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
23	1	2017-09-13 11:09:59.22	1	76.8084	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
24	1	2017-09-13 11:09:59.23	1	74.8989	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
25	1	2017-09-13 11:09:59.24	1	76.888	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
26	1	2017-09-13 11:09:59.25	1	75.1975	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532
27	1	2017-09-13 11:09:59.26	1	74.377	102.532	99.5408	99.5408	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532	102.532

รูปที่ 5.113 ฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผลการตรวจวัด แปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.8 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังโครงสร้างถนนลาดยาง อ.สรรพยา จ.ชัยนาท

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบเครื่องมือตรวจวัดแบบฝังในโครงสร้างถนน ระบบสายสัญญาณและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยางเพื่อตรวจวัดผลกระทบติดตาม และเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองของโครงสร้างถนนภายใต้สภาพการจราจรและน้ำหนักของยานพาหนะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.8.1 การประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทำหนังสือขออนุญาตเข้าพื้นที่ถึงผู้อำนวยการแขวงทางหลวงชัยนาทและเข้าไปนำเสนอภาพรวมของการศึกษา แผนการติดตั้งอุปกรณ์ การบริหารจัดการ และรับข้อเสนอแนะจากแขวงทางหลวงชัยนาทในฐานะเจ้าของพื้นที่ โดยแขวงทางหลวงชัยนาทได้เน้นย้ำเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ให้ดำเนินการติดตั้งแผงกั้นจราจร ครอบคลุมพื้นที่แปลงทดสอบ ติดตั้งไฟเตือนและป้ายเบี่ยงการจราจร จัดหาคนเพื่ออำนวยความสะดวกจราจรบริเวณจุดเริ่มปิดช่องจราจร รวมถึงติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการล่วงหน้าก่อนเข้าดำเนินการ เพื่อให้ผู้ใช้เส้นทางได้รับทราบข้อมูลล่วงหน้าที่จะปิดหรือเบี่ยงการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 5.114



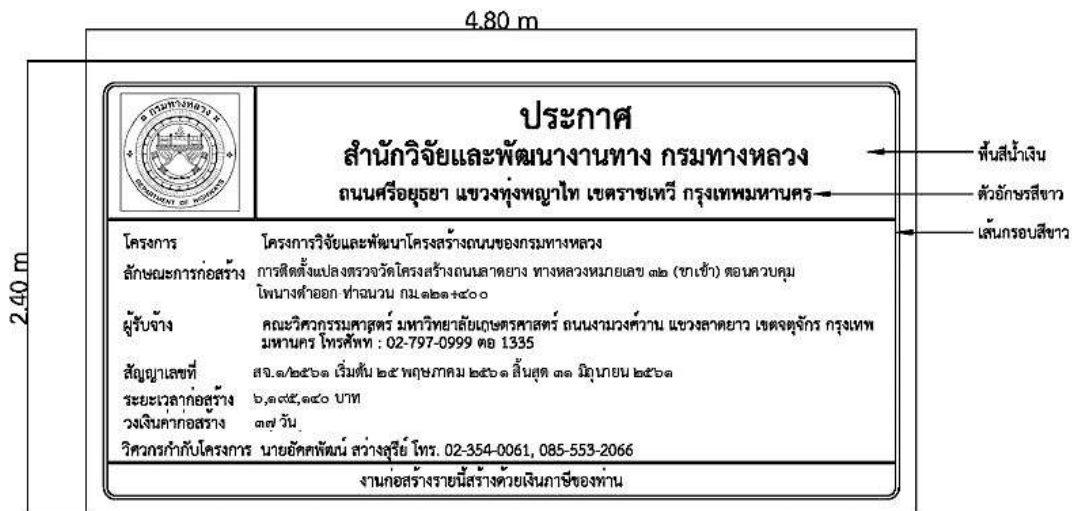
รูปที่ 5.114 ประชุมร่วมกับแขวงทางหลวงชัยนาท

5.8.2 การติดตั้งป้ายและอุปกรณ์การบริหารจราจร

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างกิจกรรมการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีลักษณะและรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5.115 และรูปที่ 5.116 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บำรุงและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- สีป้ายเป็นสีน้ำเงิน มีตัวอักษรและตัวเลขสีขาว แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรือปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม

แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างการจัดตั้งแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



รูปที่ 5.115 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้ง



รูปที่ 5.116 ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการระหว่างติดตั้งสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปิดการจราจรจำนวน 1 ช่องทางซ้ายสุดจากไหล่ทางโดยใช้แผงกั้นจราจรชนิดคอนกรีต (Concrete Barrier) ดังแสดงในรูปที่ 5.117 โดยติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลา กลางคืนดังแสดงในรูปที่ 5.118 นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งป้ายจราจรอำนวยความสะดวกสำหรับผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 5.119



รูปที่ 5.117 การปิดการจราจร 1 ช่องทางซ้ายสุดสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง



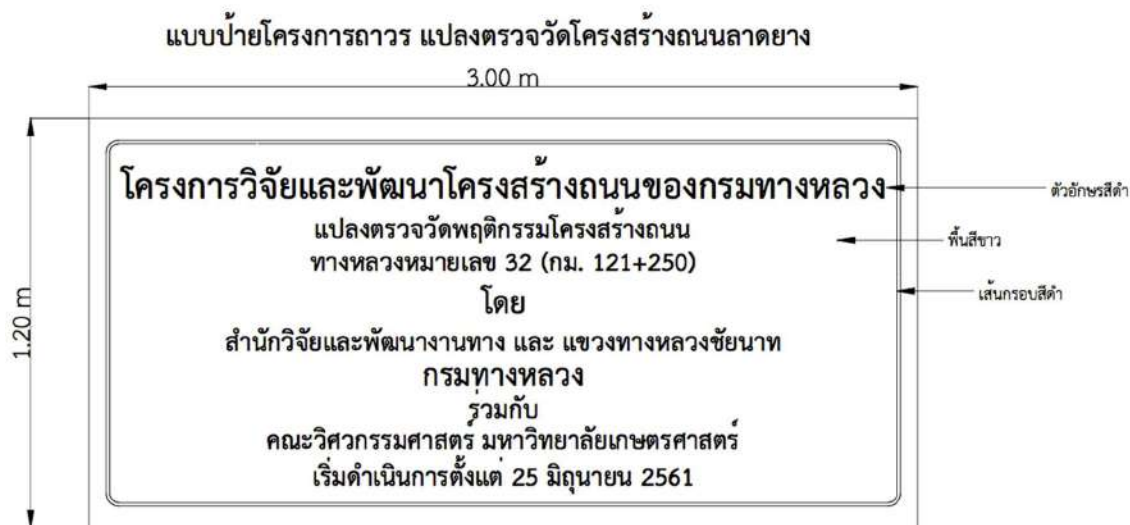
รูปที่ 5.118 การติดตั้งไฟแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจรในเวลากลางคืน



รูปที่ 5.119 การติดตั้งป้ายจราจรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแปลงโครงสร้างถนนลาดยางแล้วเสร็จ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้ง ป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร โดยมีลักษณะและรูปแบบเป็นดังแสดงรูปที่ 5.120 และรูปที่ 5.121 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- แผ่นวัสดุที่ใช้ทำป้ายเป็นไปตามมาตรฐานป้ายจราจรในงานก่อสร้าง บูรณะและบำรุงรักษาทางหลวงของกรมทางหลวง
- ใช้สีป้ายเป็นสีขาว มีตัวอักษรและตัวเลขสีดำ แผ่นวัสดุสะท้อนแสงที่ใช้ในการผลิตป้ายเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.
- แบบของตัวอักษรและตัวเลข และการจัดระยะห่างระหว่างตัวอักษร ให้ใช้ตามหนังสือมาตรฐานตัวอักษรและตัวเลขสำหรับป้ายจราจรของกรมทางหลวง หรืออาจพิจารณาปรับเปลี่ยนขนาดตัวอักษรตามความเหมาะสม



รูปที่ 5.120 แบบป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวร



รูปที่ 5.121 การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์โครงการแบบถาวรสำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง

5.8.3 การขุดรื้อผิวทาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการขุดรื้อ ฝังกลบ และบดอัดแต่ละชั้นทาง สำหรับแปลงตรวจวัดโครงสร้างถนนลาดยาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3) งานขุดเจาะรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางจนถึงชั้น subgrade ขนาด 3.50×12.00 ม. บริเวณช่องจราจรที่ 1 นับจากไหล่ทาง ตัดแต่งขอบผิวทางและหลุมให้เรียบโดยให้ตั้งฉากกับผิวทางและชั้นทางเดิม จากนั้นทำความสะอาดกันหลุมพร้อมทั้งนำเศษวัสดุที่หลุดร่วนออก ดังแสดงในรูปที่ 5.122



รูปที่ 5.122 งานขุดรื้อผิวทางและโครงสร้างชั้นทางช่องจราจรที่ 1

- 4) งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางประกอบด้วยชั้น Base และ Subbase จนถึงชั้น Subgrade ดังแสดงในรูปที่ 5.123



รูปที่ 5.123 งานขุดรื้อโครงสร้างชั้นทางจนถึงชั้น Subgrade

5.8.4 การบดอัดชั้น Subgrade

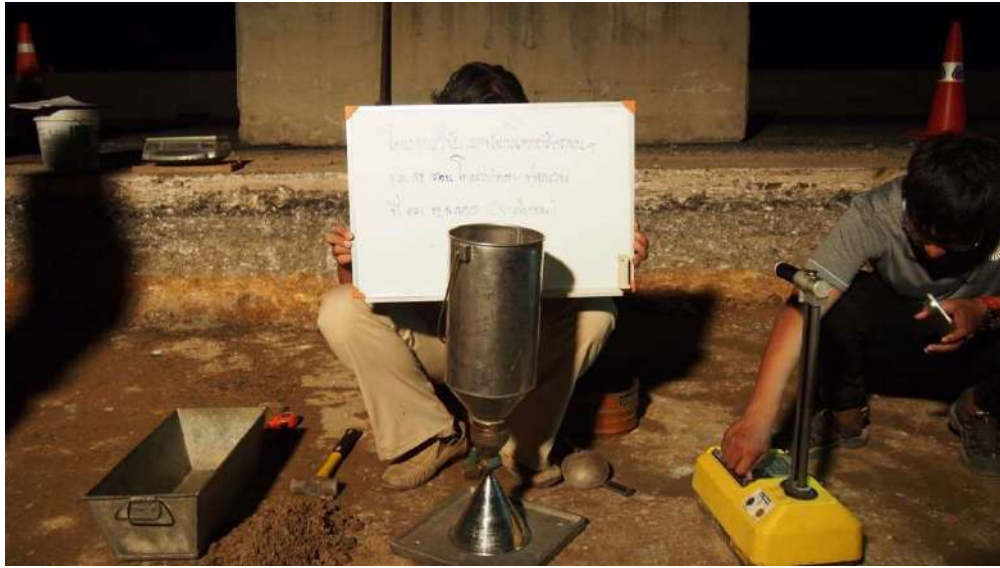
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับระดับชั้น Subgrade เดิมให้เรียบได้ระดับ พร้อมทั้งบดอัดให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับแบบสันสะเทือนขนาดน้ำหนัก 10 ตัน พร้อมทั้งได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างวัสดุไปทดสอบคุณสมบัติและทดสอบความแน่นภายหลังการบดอัด ดังแสดงในรูปที่ 5.124 ถึง รูปที่ 5.127



รูปที่ 5.124 งานบดอัดชั้น Subgrade



รูปที่ 5.125 งานตรวจสอบระดับชั้น Subgrade



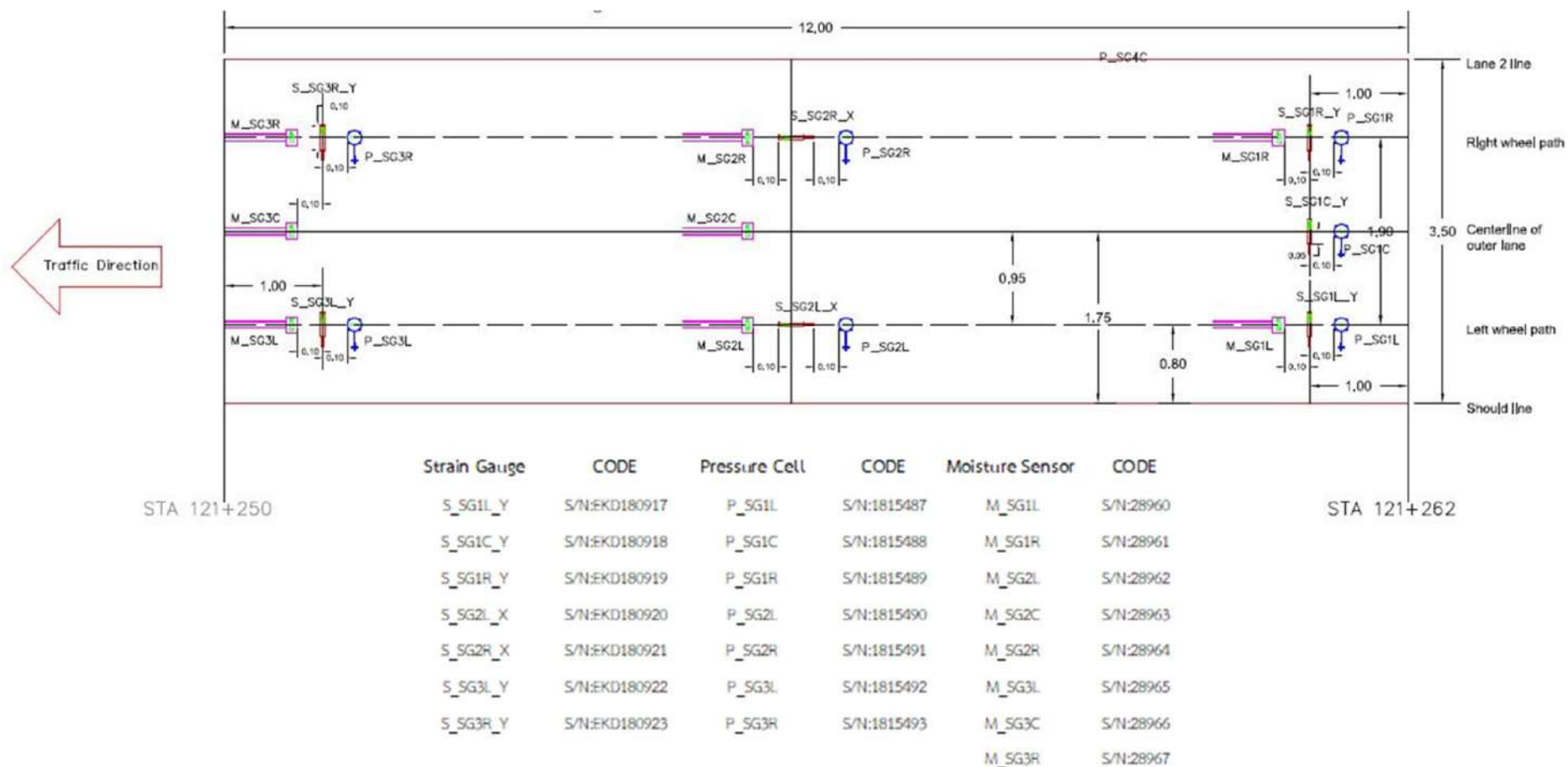
รูปที่ 5.126 การทดสอบความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (Field Desity Test) ในชั้น Subgrade



รูปที่ 5.127 การตรวจสอบค่าการบดอัดด้วยเครื่อง Nuclear Density Gage ในชั้น Subgrade

5.8.5 การติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในระดับชั้น Subgrade จำนวน 22 ตัว โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 5.128 ประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gage) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.129 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดัน (Pressure Cell) จำนวน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.130 และ อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น (Moisture Sensor) จำนวน 8 ตัว ดังแสดงรูปที่ 5.131 นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้เดินสายสัญญาณลงท่อ PE ดังแสดงในรูปที่ 5.132 ซึ่งมีการทำทะเบียนอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้เลขรหัส (Serial Number) กำกับไว้ที่ตัวอุปกรณ์และสายสัญญาณด้วย



รูปที่ 5.128 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และสายสัญญาณในระดับชั้น Subgrade