

# การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer กับ Light Weight Deflectometer Correlation between deflections from the Falling Weight Deflectometer and those from the Light Weight Deflectometer

ธีรภัทร์ ศิริรัตนฉัตร<sup>1\*</sup> ดนัยณัฐ ถาวร<sup>2</sup> สุรนันทน์ เยื่อรงค์<sup>3</sup> อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์<sup>4</sup> และ อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช<sup>5</sup>

<sup>1</sup> วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

<sup>2,3</sup> วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักแผนงาน กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

<sup>4</sup> วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

<sup>5</sup> ผู้อำนวยการ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: teerapat.geotechnical@gmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) กับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้ศึกษาได้ทำการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของโครงสร้างถนนลาดยางประเภทต่างๆ ในตำแหน่งจุดทดสอบใกล้เคียงกัน จากแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง บนทางหลวง 12 สายทางทั่วประเทศ ซึ่งตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักรถบรรทุก แปลงทดสอบมีความยาวประมาณ 250 เมตร ทำการทดสอบทุกระยะ 25 เมตร จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จากเครื่องมือ FWD และเครื่องมือ LWD มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD (มีค่าระหว่าง 35 ถึง 732 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ย 231 ไมครอน) สูงกว่าค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD (มีค่าระหว่าง 2 ถึง 104 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ย 24 ไมครอน) ประมาณ 10 เท่า ในขณะที่ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการคำนวณโดย Elastic Solution ต่างกันประมาณ 6 เท่า ความแตกต่างเกิดจากหน่วยแรงกระทำของเครื่องมือทั้งสองชนิดต่างกัน

คำสำคัญ: ค่าการแอ่นตัว, เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer, เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

## Abstract

The objective of this paper is to investigate the correlation between deflections from the Falling Weight Deflectometer (FWD) and those from the Light Weight Deflectometer (LWD) performed on the asphalt surface of different flexible pavements. In this study, twenty test sections were selected along twelve major highways. Each 250-m long section was located near the

weight control station. The deflection measurements were taken at every 25 m along the test section. The results showed that the correlation between deflections from the FWD and those from the LWD exhibited a linear. In addition, the FWD deflections (ranging from 35 to 732 microns with an average of 231 microns) were approximately 10 times the LWD deflections (ranging from 2 to 104 microns with an average of 24 microns), while those calculated by the elastic solution were approximately 6 times. Such difference was caused by the difference in their applied stresses.

Keywords: Deflection, Falling Weight Deflectometer, Light Weight Deflectometer

## 1. คำนำ

การประเมินสมรรถนะทางหลวงเพื่อจัดทำแผนซ่อมบำรุงและบูรณะปรับปรุงโครงสร้างถนน ข้อมูลสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนถือเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญของสมรรถนะทางหลวง ซึ่งประกอบด้วย ค่าการแอ่นตัว ค่ากำลังรับน้ำหนัก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer หรือ FWD เป็นเครื่องมือทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน โดยหลายหน่วยงานและองค์กรด้านงานทางทั่วโลก ค่าการแอ่นตัวที่ตรวจวัดได้จะนำไปคำนวณย้อนกลับ (Back-calculation) เพื่อวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของชั้นโครงสร้างทางสำหรับประเมินความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างถนน หน่วยงานหลักด้านการคมนาคมทางถนน ในประเทศไทย ได้แก่ กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ได้นำเครื่องมือ FWD มาใช้ในการตรวจสอบและประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนเช่นกัน

ปัจจุบัน นอกจากเครื่องมือ FWD แล้ว กรมทางหลวงยังได้ทดลองนำเครื่องมือ Light Weight Deflectometer หรือ LWD มาใช้ตรวจวัดค่าการแอ่นตัวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน ในปีพ.ศ 2560 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง ได้ดำเนินการสำรวจ ประเมิน และติดตามสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนบนทางหลวงสายหลัก จำนวนทั้งสิ้น 12 สายทางทั่วประเทศ โดยคัดเลือกพื้นที่ทดสอบ รวมจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง เพื่อทำการตรวจวัดค่าความแอ่นตัวของโครงสร้างถนน ด้วยเครื่องมือ FWD ผลิตโดยบริษัท Dynatest รุ่น 8000 และเครื่องมือ LWD ผลิตโดยบริษัท Sweco รุ่น PRIMA 100 ภายใต้สภาวะแวดล้อม อาทิ รูปแบบโครงสร้างชั้นทาง ปริมาณจราจร สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ เป็นต้น และจุดทดสอบเดียวกัน พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองชนิด

เนื่องจากเครื่องมือ LWD มีจุดเด่นในแง่ของความสะดวกสบายในการขนย้ายทดสอบ น้ำหนักเบา การใช้งานไม่ยุ่งยาก และทราบผลทดสอบทันที ดังนั้นจึงอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้กับหน่วยงานด้านการคมนาคมทางถนน แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือ LWD เป็นอุปกรณ์ทดสอบใหม่สำหรับประเทศไทย และยังไม่มียุติผลงานศึกษาวิจัยในประเทศ ดังนั้น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD โดยความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษานี้ จะเป็นแนวทางการใช้เครื่องมือตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนให้กับกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไป

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer

เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ซึ่งได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับในวงการวิศวกรรมงานทางระดับสากลว่ามีความน่าเชื่อถือ ถูกต้อง รวดเร็ว และเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) กรมทางหลวงได้นำเครื่องมือ FWD มาใช้ประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและวิเคราะห์ความหนาของการเสริมผิวทาง (Overlay) เพื่อกำหนดวิธีการบูรณะ ปรับปรุง และซ่อมบำรุงทางหลวงที่เหมาะสมเป็นระยะเวลากว่า 20 ปี

ปัจจุบัน สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง มีเครื่องมือ FWD รุ่น 8000 จำนวน 1 ชุด ผลิตโดยบริษัท DYNATEST ประเทศเดนมาร์ก แสดงดังรูปที่ 1 ส่วนของรถพ่วงเป็นส่วนที่ให้แรงกระทำบนถนน โดยอาศัยการตกกระแทกของตุ้มน้ำหนัก ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจากการตกกระแทกจะถ่ายลงสู่แผ่นงานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ผ่านลูกยางชนิดพิเศษเพื่อให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นได้แผ่นงานโลหะมีการแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ แผ่นถ่วงน้ำหนักดังกล่าวสามารถใช้ได้กับพื้นที่ลาดเอียงได้ถึง 6 องศา น้ำหนักกระทำสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามระดับความสูงของการยกตุ้มน้ำหนักแล้วปล่อยตกลงมา มีช่วงขนาดน้ำหนักตั้งแต่ 7 กิโลนิวตัน ถึง 120 กิโลนิวตัน มีช่วงระยะเวลาของน้ำหนักกระทำประมาณ 25 ถึง 30

มิลลิวินาที จากผลการศึกษาในประเทศเดนมาร์กพบว่า ความเค้น ความเครียด และลักษณะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบด้วย FWD มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะแรงกระทำเนื่องจากยานพาหนะแล่นผ่าน [1]

เครื่องมือ FWD ประกอบด้วย (1) อุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัว (Geophone) จำนวน 9 ตัว ติดตั้งบนคันที่สามารถยกขึ้นลงได้ มีความยาวประมาณ 3,000 มิลลิเมตร โดยค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่สามารถวัดได้ประมาณ 2 มิลลิเมตร อุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวสามารถติดตั้งไว้กับคันดังกล่าว ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งมีช่วงการใช้งานประมาณ 2,250 มิลลิเมตร และ (2) อุปกรณ์ Load Transducer ชนิด Strain Gauge Type ใช้ตรวจวัดขนาดน้ำหนักที่กระทำบนแผ่นงานโลหะข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแล้วเสร็จจะถูกเก็บบันทึกไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลต่อไป [2]



รูปที่ 1 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

### 2.2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) แสดงดังรูปที่ 2 เป็นอุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาค่าการแอ่นตัวของชั้นทางแบบพกพาได้ โดยใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียว ประกอบด้วยตุ้มน้ำหนักตั้งแต่ 5 กิโลกรัม ถึง 15 กิโลกรัม แกนนำร่อง (Guide Rod) ความยาวประมาณ 90 เซนติเมตร อุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Load Cell) อุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัว (Geophone หรือ Accelerometer) แผ่นงานโลหะ (Load Plate) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 มิลลิเมตร ถึง 300 มิลลิเมตร และชุดรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สาย (Bluetooth) อุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูลแบบพกพานาติดตัวได้ (Personal Digital Assistant, PDA) สำหรับรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless Data Collection) ซึ่งขอบเขตอิทธิพล (Zone of Influence) หรือความลึกประสิทธิผล (Effective Depth) ของเครื่องมือ LWD เฉลี่ยในช่วง 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นงานโลหะ ในกรณีทดสอบบนชั้นวัสดุชนิดเดียวกัน (Homogenous Layer) ทั้งนี้รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ มาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องสรุปไว้ในรายงานขั้นสุดท้ายของโครงการศึกษาใช้

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง [3]

ปัจจุบัน สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวงมีเครื่องมือ LWD จำนวน 2 ชุด ผลิตโดยบริษัท Sweco รุ่น PRIMA 100 ข้อดีของเครื่องมือ LWD คือ มีน้ำหนักเบา ทดสอบได้รวดเร็ว ทราบผลได้ทันที ไม่ทำลายชั้นวัสดุ และเพิ่มจำนวนจุดทดสอบ ช่วยให้การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทางครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้าง อีกทั้งยังช่วยประหยัดทรัพยากรได้มากกว่าการทดสอบ FWD



รูปที่ 2 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD)

### 2.3 การคำนวณค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างทางโดย Elastic Solution

ค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างทางสามารถคำนวณได้โดย Elastic Solution (ES) มีสมมติฐานว่า ค่าการแอ่นตัว (Deflection,  $d$ ) ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทาง ตรวจวัดได้จากการทดสอบ FWD และ LWD แปรผกผันกับค่าโมดูลัสของชั้นโครงสร้างทาง (Pavement Modulus,  $E_p$ ) ดังสมการที่ (1)

$$E_{p,ES} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d_0} \quad (1)$$

เมื่อ  $E_{p,ES}$  คือ โมดูลัสของชั้นโครงสร้างทางคำนวณโดย Elastic Solution  $\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซองส์ (Poisson's Ratio)  $\sigma_0$  คือ หน่วยแรงกระทำ  $a$  คือ รัศมีของแผ่นจานโลหะ และ  $d_0$  คือค่าการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งแรงกระทำหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร

จากสมการที่ (1) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ LWD และ FWD ได้ดังสมการที่ (2) เมื่อกำหนดให้ค่าโมดูลัสของ

ชั้นโครงสร้างทางและอัตราส่วนของปัวซองส์จากเครื่องมือทั้งสองชนิดเท่ากัน

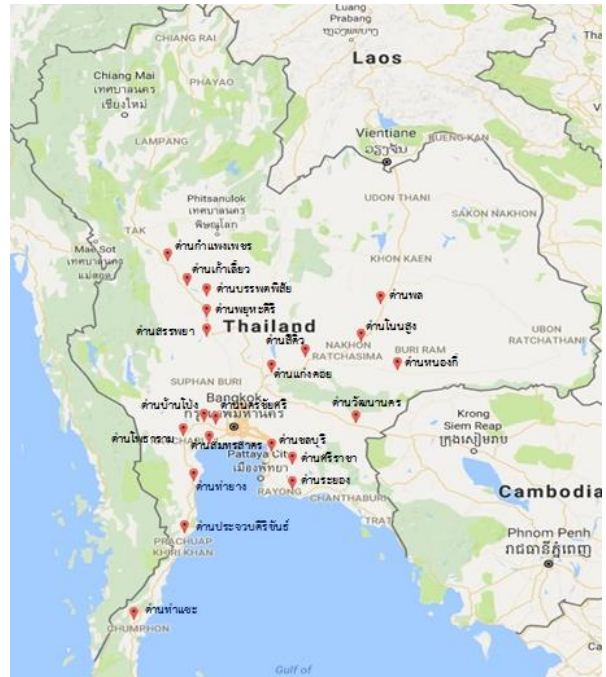
$$d_{0,FWD} = \frac{\sigma_{0,FWD} a_{FWD} d_{0,LWD}}{\sigma_{0,LWD} a_{LWD}} \quad (2)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (2) ได้แก่ หน่วยแรงกระทำ ( $\sigma_0$ ) สำหรับ FWD และ LWD มีค่าเท่ากับ 754 กิโลปาสคาล และ 181 กิโลปาสคาล ตามลำดับ รัศมีของแผ่นจานโลหะ ( $a$ ) สำหรับ FWD และ LWD มีค่าเท่ากับ 150 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะได้ว่าค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ FWD มากกว่าค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ LWD ประมาณ 6.25 เท่า

$$d_{0,FWD} = 6.25 d_{0,LWD} \quad (3)$$

### 3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้ศึกษาได้คัดเลือกพื้นที่ศึกษา จำนวนทั้งสิ้น 20 แปลงทดสอบบนทางหลวงสายหลัก 12 สายทางทั่วประเทศ สรุปไว้ในตารางที่ 1 และรูปที่ 3 โดยแบ่งแปลงทดสอบทั้งหมดออกเป็น 4 ประเภทตามรูปแบบและชนิดของวัสดุชั้นโครงสร้างทาง รายละเอียดมีดังต่อไปนี้



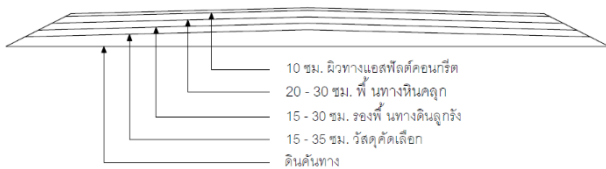
รูปที่ 3 ตำแหน่งของแปลงทดสอบบนทางหลวงสายหลัก

ตารางที่ 1 รายละเอียดแปลงทดสอบที่ตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักรถบรรทุก

| ภาค          | ทล. | ตอน | ทิศทาง | กม. - กม.         | สถานีซึ่งน้ำหนัก |
|--------------|-----|-----|--------|-------------------|------------------|
| กลาง         | 32  | 400 | ขาเข้า | 119+800 - 120+050 | สรรพยา           |
|              | 4   | 302 | ขาเข้า | 88+570 - 88+745   | โพธาราม          |
|              | 35  | 301 | ขาเข้า | 54+000 - 54+250   | สมุทรสาคร        |
| ตะวันออก     | 3   | 104 | ขาเข้า | 54+250 - 54+500   | ชลบุรี           |
|              | 331 | 103 | ขาเข้า | 47+050 - 47+300   | ศรีราชา          |
|              | 36  | 201 | ขาออก  | 28+575 - 28+825   | ระยอง            |
|              | 33  | 701 | ขาเข้า | 267+000 - 267+250 | วัฒนานคร         |
| เหนือตอนล่าง | 1   | 801 | ขาเข้า | 308+300 - 308+550 | พยุหะคีรี        |
|              | 1   | 804 | ขาเข้า | 379+950 - 380+200 | บรรพตพิสัย       |
|              | 117 | 100 | ขาเข้า | 24+750 - 25+000   | แก่งเลี้ยว       |
|              | 1   | 902 | ขาเข้า | 440+750 - 441+000 | กำแพงเพชร        |
| อีสาน        | 2   | 102 | ขาเข้า | 17+750 - 18+000   | แก่งคอย          |
|              | 2   | 202 | ขาเข้า | 94+950 - 95+200   | สีคิ้ว           |
|              | 2   | 402 | ขาออก  | 268+100 - 268+350 | พล               |
|              | 2   | 301 | ขาออก  | 168+750 - 169+000 | โนนสูง           |
|              | 24  | 302 | ขาเข้า | 98+750 - 99+000   | หนองกี่          |
| ใต้          | 323 | 100 | ขาเข้า | 4+900 - 5+150     | บ้านโป่ง         |
|              | 4   | 502 | ขาออก  | 170+750 - 171+000 | ท่ายาง           |
|              | 4   | 603 | ขาเข้า | 304+750 - 305+000 | ประจวบคีรีขันธ์  |
|              | 4   | 703 | ขาออก  | 473+500 - 473+750 | ท่าแซะ           |

### 3.1 แปลงทดสอบประเภทที่ 1

แปลงทดสอบประเภทที่ 1 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุก และรองพื้นทางดินลูกรัง (รูปที่ 4) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 1 ตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักสรรพยา สถานีซึ่งน้ำหนักโพธาราม สถานีซึ่งน้ำหนักชลบุรี สถานีซึ่งน้ำหนักศรีราชา สถานีซึ่งน้ำหนักระยอง สถานีซึ่งน้ำหนักวัฒนานคร สถานีซึ่งน้ำหนักพล สถานีซึ่งน้ำหนักบ้านโป่ง สถานีซึ่งน้ำหนักท่ายาง และสถานีซึ่งน้ำหนักประจวบคีรีขันธ์



รูปที่ 4 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 1

### 3.2 แปลงทดสอบประเภทที่ 2

แปลงทดสอบประเภทที่ 2 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และรองพื้นทางดินลูกรัง (รูปที่ 5) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 2 ตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักพยุหะคีรี สถานีซึ่งน้ำหนักบรรพตพิสัย สถานีซึ่งน้ำหนักแก่งเลี้ยว และสถานีซึ่งน้ำหนักหนองกี่



รูปที่ 5 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 2

### 3.3 แปลงทดสอบประเภทที่ 3

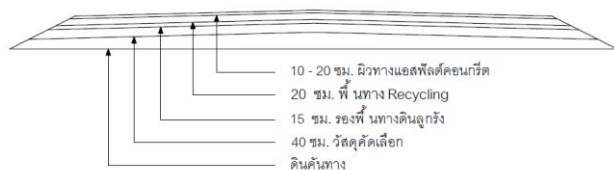
แปลงทดสอบประเภทที่ 3 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 ปูทับพื้นทางคอนกรีตเสริมเหล็ก (Joint Reinforced Concrete Pavement, JRPC) (รูปที่ 6) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 3 ตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักแก่งคอย สถานีซึ่งน้ำหนักสีคิ้ว และสถานีซึ่งน้ำหนักโนนสูง



รูปที่ 6 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 3

### 3.4 แปลงทดสอบประเภทที่ 4

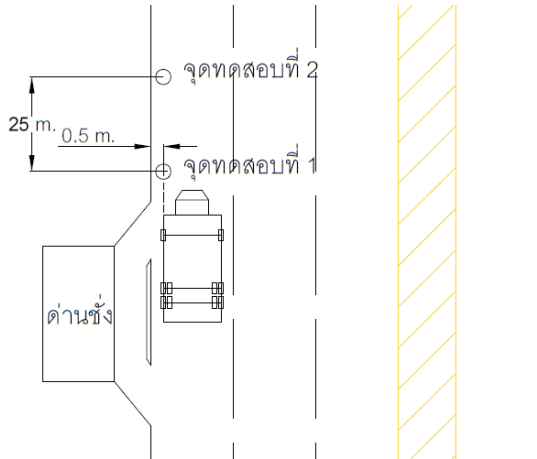
แปลงทดสอบประเภทที่ 4 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC 60-70 และพื้นทาง Pavement Recycling (รูปที่ 7) โดยแปลงทดสอบประเภทที่ 4 ตั้งอยู่ใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักสมุทรสาคร และสถานีซึ่งน้ำหนักกำแพงเพชร



รูปที่ 7 รูปตัดโครงสร้างชั้นทาง แปลงทดสอบประเภทที่ 4

ในการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน คณะผู้ศึกษาได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) ในบริเวณใกล้สถานีซึ่งน้ำหนักบรรพตพิสัยที่กล่าวไปแล้ว จำนวน 20 แปลงทดสอบ โดยการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวจะดำเนินการทดสอบทุกๆ ระยะ 25 เมตร เป็นระยะทางทั้งสิ้น 250 เมตรต่อแปลงทดสอบ ในช่องจราจรซ้ายสุดซึ่งเป็นช่องจราจรของบรรพตพิสัย (รูปที่ 8) ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการอ่านค่าอุณหภูมิของผิวทางตรวจวัดที่ระดับความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบปล่อยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือ FWD เพื่อตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น เมื่อรถลากเครื่องมือ FWD ไปยังตำแหน่งถัดไป จึงทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ LWD โดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักจำนวน 6 ครั้ง

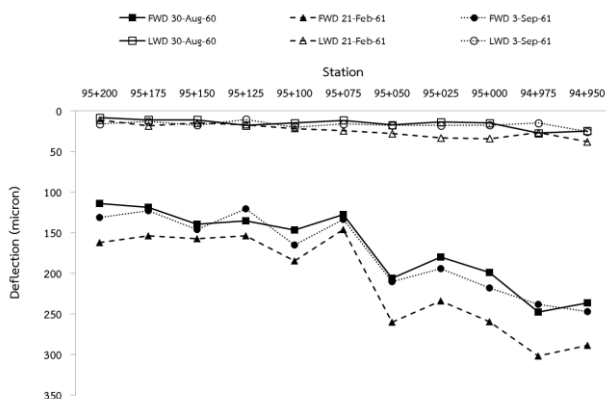
และใช้ค่าเฉลี่ยที่ทดสอบได้ 3 ครั้งสุดท้ายเป็นค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง  
ถนน ณ ตำแหน่งทดสอบใดๆ



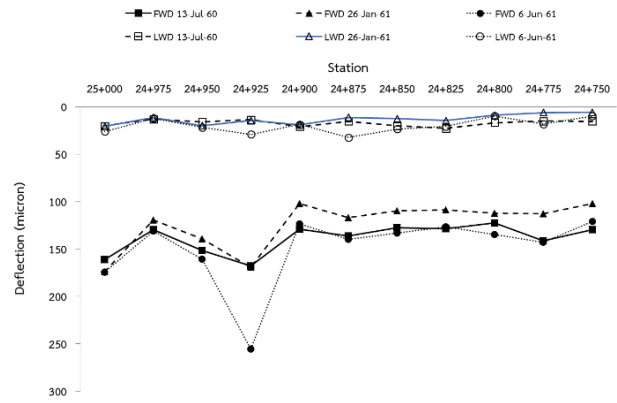
รูปที่ 8 รูปแบบการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบ

#### 4. ผลการดำเนินงานวิจัย

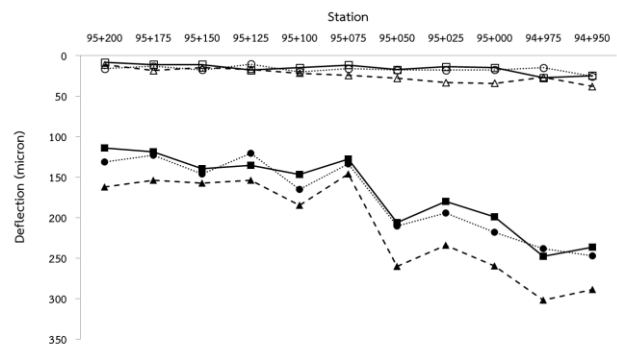
รูปที่ 9 – 12 เป็นกราฟแสดงค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วย  
เครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบสถานีซึ่งนำหน้าบ้านไป  
สถานีซึ่งนำหน้าแก้วเลียว สถานีซึ่งนำหน้ากสิคิ้ว และสถานีซึ่งนำหน้า  
กำแพงเพชร ซึ่งเป็นตัวแทนผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบ  
ประเภทที่ 1 – 4 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่าการแอ่นตัวที่วัดได้  
จากเครื่องมือ FWD และ LWD มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน แต่มีค่าไม่  
เท่ากัน เนื่องจากขนาดหน่วยแรงกระทำของเครื่องมือทดสอบทั้งสองชนิด  
ต่างกัน



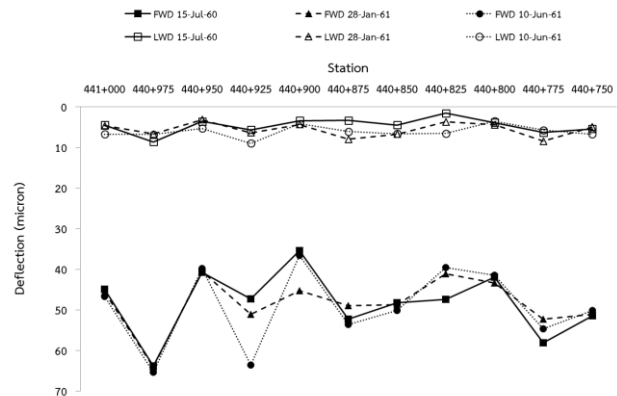
รูปที่ 9 ค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบสถานีบ้านโป่ง กม.4+900 - กม.5+150



รูปที่ 10 ค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบสถานีแก้วเลียว  
กม.24+750 - กม.25+000



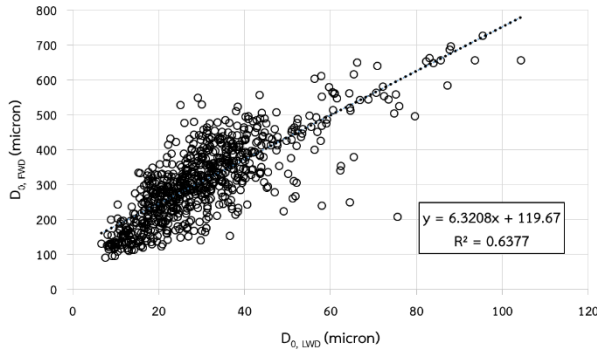
รูปที่ 11 ค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบสถานีสีคิ้ว กม.94+950 - กม.95+200



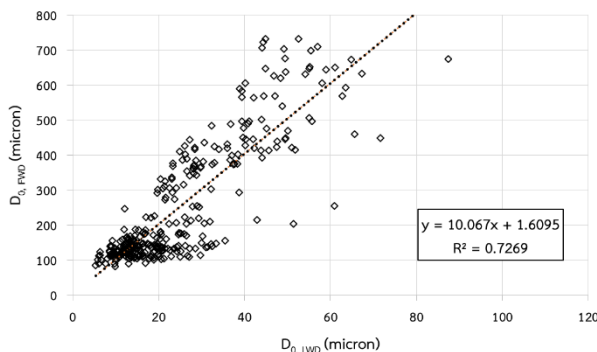
รูปที่ 12 ค่าการแอ่นตัวของแปลงทดสอบสถานีกำแพงเพชร  
กม.440+750 - กม.441+000

เมื่อนำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ  
LWD ของแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กัน  
พบว่า แนวโน้มความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) มีการกระจาย  
ตัวของข้อมูลน้อย (ค่า R<sup>2</sup> ประมาณ 0.6-0.7) ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับ  
งานทดสอบภาคสนาม โดยรูปที่ 13 – 17 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  
ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD กับ  
ค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD บนแปลงทดสอบ

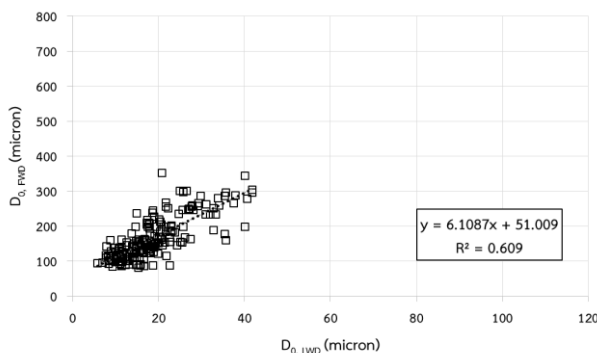
ประเภทที่ 1 แปลงทดสอบประเภทที่ 2 แปลงทดสอบประเภทที่ 3 และแปลงทดสอบประเภทที่ 4 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแปลงทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 แปลง มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กันพบว่า ค่า  $R^2$  ประมาณ 0.74 (รูปที่ 18)



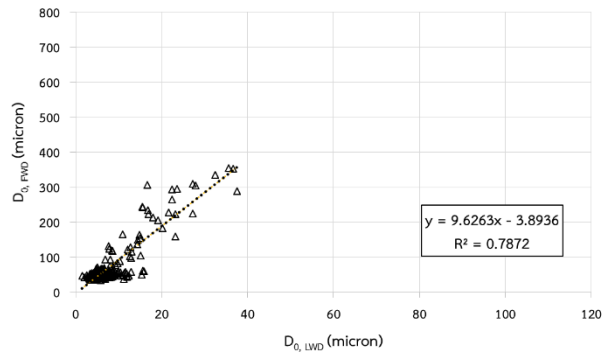
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบประเภทที่ 1



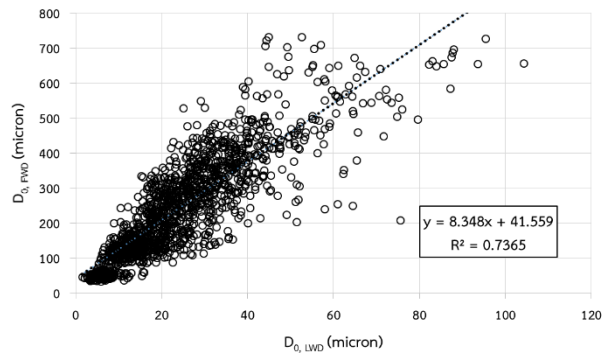
รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบประเภทที่ 2



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบประเภทที่ 3



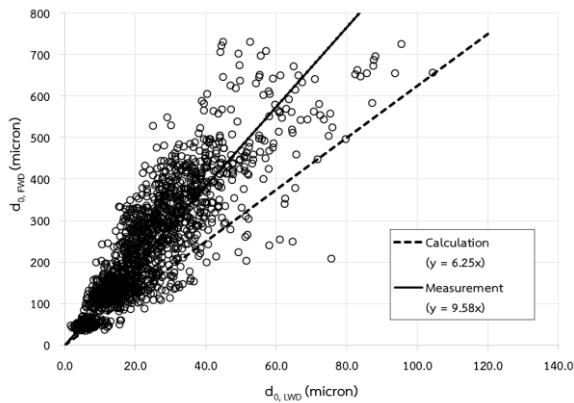
รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD บนแปลงทดสอบประเภทที่ 4



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD ของแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท

จากผลการทดสอบค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือทั้งสองชนิด บนแปลงทดสอบทั้ง 4 ประเภท (รูปที่ 17) เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 18 พบว่าเครื่องมือ FWD ให้ผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวประมาณ 9.58 เท่าของเครื่องมือ LWD ( $d_{0,FWD} / d_{0,LWD} \sim 10$ ) ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบด้วยเครื่องมือทั้งสองชนิด คำนวณโดย Elastic Solution พบว่าค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ FWD มากกว่าค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ LWD ประมาณ 6.25 เท่า ซึ่งต่ำกว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบจริงประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ ในการคำนวณความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวระหว่างเครื่องมือ FWD และ LWD โดย Elastic Solution ตามสมการที่ (2) คณะผู้ศึกษาได้ใช้หน่วยแรงกระทำ ( $\sigma_0$ ) เป็นค่าเฉลี่ยของเครื่องมือแต่ละชนิด ซึ่งหน่วยแรงกระทำจากเครื่องมือ FWD และ LWD มีค่าเท่ากับ 754 kPa และ 181 kPa ตามลำดับ ซึ่งวิเคราะห์ทางสถิติได้จากข้อมูลผลการทดสอบ สรุปไว้ในตารางที่ 2 อนึ่ง สำหรับความสัมพันธ์ของค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือทั้งสองชนิดดังรูปที่ 17 คณะผู้ศึกษาได้ใช้หน่วยแรงกระทำที่นำมาคำนวณค่าการแอ่นตัวเป็นหน่วยแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริง ณ จุดทดสอบ



รูปที่ 18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าการอ่อนตัวจากการทดสอบด้วย  
เครื่องมือ FWD และ LWD ระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการคำนวณโดย  
Elastic Solution

ตารางที่ 2 หน่วยแรงกระทำจากเครื่องมือ FWD และ LWD (หน่วย: kPa)

|     | Min. | Avg. | Max. | n       | SD    |
|-----|------|------|------|---------|-------|
| FWD | 595  | 754  | 763  | 1676.00 | 17.06 |
| LWD | 125  | 181  | 201  | 1545.00 | 4.44  |

(หมายเหตุ: Min = ค่าต่ำสุด, Avg = ค่าเฉลี่ย, Max = ค่าสูงสุด, n = จำนวน  
ข้อมูล, SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

## 5. บทสรุป

ค่าการอ่อนตัวของโครงสร้างถนนจากการทดสอบ FWD และ LWD มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) และมีการกระจายตัวของข้อมูลน้อย ค่า  $R^2$  ประมาณ 0.74 โดยค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD มากกว่าค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD จากการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือทั้งสองชนิดพบว่า ค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD มากกว่าค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ประมาณ 9.6 เท่า ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการอ่อนตัวที่ได้จากการคำนวณโดย Elastic Solution แสดงให้เห็นว่า ค่าการอ่อนตัวจากเครื่องมือ FWD มากกว่าค่าการอ่อนตัวจากเครื่องมือ LWD ประมาณ 6.3 เท่า เนื่องจากหน่วยแรงกระทำของเครื่องมือทั้งสองชนิดต่างกัน

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการศึกษานี้จะเป็นแนวทางให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อาทิ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท เป็นต้น พิจารณาเลือกใช้เครื่องมือ FWD และ LWD ในการตรวจวัดค่าการอ่อนตัวของโครงสร้างถนนของโครงข่ายทางหลวงทั่วประเทศต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ และธนภฤต เผือกทอง (2555). การศึกษาประเมินความแข็งแรงและอายุการใช้งานของถนนลาดยางภายหลังก่อสร้าง. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, หน้า 1-17.

- [2] ดนัยณัฐ ถาวร, ชีรภัทร์ ศิริรัตฉัตร, สุรนนท์ เยื้องยงค์, และอัครพัฒน์ สว่างสุริย์ (2561). การศึกษาแนวทางประเมินสมรรถนะทางหลวงด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 23*, จังหวัดนครนายก, 18-20 กรกฎาคม 2561.
- [3] กรมทางหลวง (2560). รายงานฉบับสุดท้าย โครงการศึกษาใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการควบคุมคุณภาพวัสดุสร้างทาง. สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง.