



ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนสำหรับการประเมินสมรรถนะทางหลวง

STRUCTURAL STRENGTH INDEX FOR HIGHWAY PERFORMANCE EVALUATION

อรรถพล หายทุกข์¹, ฤทธิศักดิ์ พ้อบาล^{2*} และอัคคพัฒน์ สว่างสุริย์³

¹วิศวกรโยธาปฏิบัติกร, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง

²วิศวกรโยธาชำนาญการ, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง

³วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง

*Corresponding author, E-mail: harutus.doh@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง โดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) บนทางหลวงสายหลักของประเทศไทย ประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแอ่นตัว หรือ Normalized Deflection ($d_o/d_{o, doh}$) กับตัวแปรการออกแบบความหนาโครงสร้างถนน ได้แก่ T_r , SN และ h_e ตามวิธีของ Asphalt Institute (AI), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) และ Odemark's Method of Equivalent Thickness (MET) ตามลำดับ (2) การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วน โมดูลัสหรือ Modulus Ratio (MR) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Wimsatt และวิธีการคำนวณย้อนกลับ ด้วยโปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) และ (3) การวิเคราะห์ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหรือ Structural Capacity Index (SCI) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde และ AASHTO ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การวิเคราะห์อัตราส่วนการแอ่นตัวจำเป็นต้องทราบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ($d_{o, doh}$) ในการคำนวณทุกครั้ง โดยโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement) ส่วนใหญ่มีแนวโน้มแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) การวิเคราะห์ค่า MR และค่า SCI ให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ในมิติด้านวิศวกรรมงานทางและมิติด้านการบริหารบำรุงทาง ทั้งค่า MR และ ค่า SCI ที่สูงแสดงถึงโครงสร้างถนนที่มีความแข็งแรงและปลอดภัย

คำสำคัญ: Falling Weight Deflectometer; ค่าการแอ่นตัว; ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น; ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน; สมรรถนะทางหลวง

ABSTRACT

This paper presents the analysis and evaluation of the structural performance of highway pavements using the Falling Weight Deflectometer (FWD) on major highways in Thailand. The study includes: (1) the relationship between the normalized deflection ($d_o/d_{o, doh}$) and pavement structural design parameters e.g. T_r , SN, and h_e according to Asphalt Institute (AI), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), and Odemark's Method of Equivalent Thickness (MET), respectively, (2) the comparison between the modulus ratio (MR) obtained from the empirical approach by Wimsatt and that obtained from the Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD), and (3) the comparison between the structural capacity index (SCI) obtained from the empirical approach by Rohde and that obtained from AASHTO. Results suggested that the normalized deflection required the

Attaphon Huytook¹, Harutus Phoban^{2*} and Auckpath Sawangsuriya³

¹ Civil Engineer, Practitioner Level, Bureau of Road Research and Development, Department of Highways, Thailand.

² Civil Engineer, Professional Level, Bureau of Road Research and Development, Department of Highways, Thailand.

³ Civil Engineer, Expert Level, Bureau of Road Research and Development, Department of Highways, Thailand.

maximum deflection ($d_{o, DOI}$) obtained from typical Department of Highways' pavement structure. Conventional pavements were generally weaker than semi-rigid pavements. Both MR and SCI exhibited similar trends with respect to road engineering and maintenance management aspects. Higher MR and SCI values indicated stronger and safer pavements.

KEYWORDS: Falling Weight Deflectometer; Deflection; Elastic Modulus; Structural Capacity Index; Pavement Performance

1. บทนำ

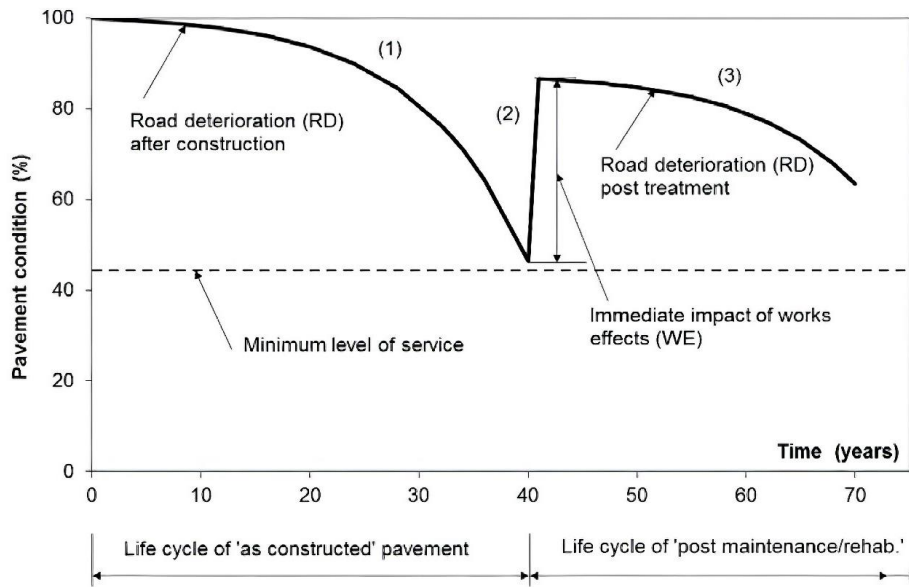
การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของโครงสร้างถนนมีความสำคัญทั้งด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา ข้อมูลสมรรถนะทางหลวงที่ทันสมัยและเป็นปัจจุบัน ช่วยให้การวางแผนบำรุงรักษาโครงสร้างถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความคุ้มค่า เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ที่เป็นเครื่องมือทดสอบสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในปัจจุบัน ที่ได้รับการยอมรับทั้งในประเทศและต่างประเทศ และยังเป็นวิธีการทดสอบตามมาตรฐานสากล โดยการทดสอบ FWD จะทำการปล่อยตุ้มน้ำหนักที่สามารถปรับระดับความสูงตกกระทบบนผิวของโครงสร้างถนน เพื่อจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน เนื่องจากรถบรรทุกทุกแล่นผ่าน กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ได้นำเครื่องมือ FWD มาใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนน เป็นเวลานานกว่า 30 ปี แต่อย่างไรก็ตาม แม้การออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางของประเทศไทยมีหลายวิธี อาทิ วิธี Asphalt Institute (AI) ซึ่งเป็นวิธีเชิงประสบการณ์ที่นิยมใช้ในการออกแบบ เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบไม่ยุ่งยาก ตัวแปรการออกแบบไม่ซับซ้อน แต่วิธีดังกล่าวอาจไม่สะท้อนถึงสภาพการใช้งานจริงและข้อเท็จจริงของสภาพโครงสร้างถนนในประเทศไทย

คณะผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดในการนำเครื่องมือ FWD ไปใช้พัฒนาแนวทางการออกแบบ ตรวจสอบ และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนน โดยข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD สามารถนำไปคำนวณค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว (Normalized Deflection) ค่าอัตราส่วน โมดูลัส Modulus Ratio (MR) และดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Capacity Index, SCI) ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์และประเมินสมรรถนะทางหลวง สำหรับงานบูรณะปรับปรุงและบำรุงรักษาโครงสร้างถนนในอนาคตได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน

การวางแผนบูรณะปรับปรุงและบำรุงรักษาทางหลวงมีผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพของโครงสร้างถนน ตามรายงานการศึกษาของ ARRB สมรรถนะของโครงสร้างถนน [1] แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา ดังนี้ ช่วงแรกเป็นการเสื่อมสภาพภายหลังการก่อสร้าง ช่วงที่สองเป็นการซ่อมบำรุงปกติ และช่วงสุดท้ายเป็นการเสื่อมสภาพของโครงสร้างถนนตามสภาพการใช้งาน ซึ่งมีลักษณะการเสื่อมสภาพคล้ายกับช่วงแรก แต่มีอัตราการเสื่อมสูงกว่า ดังรูปที่ 1 ซึ่งการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนมีความสำคัญต่อการสำรวจสภาพถนน การสำรวจสภาพถนนอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยทำนายการเสื่อมสภาพของถนนได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้นและสามารถกำหนดวิธีการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสมต่อไป

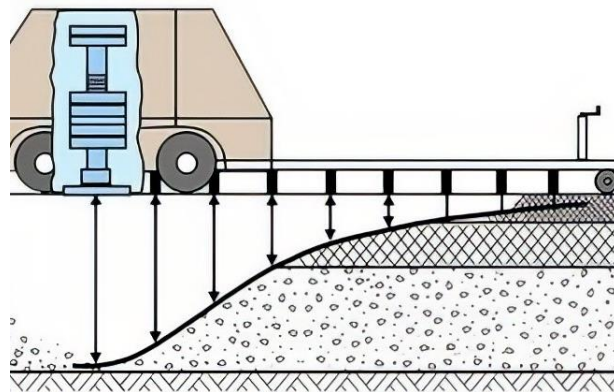


รูปที่ 1 สมรรถนะของโครงสร้างถนน [1]

2.2 เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

เครื่องมือ FWD เป็นเครื่องมือใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนน FWD มีหลักการทำงานดังนี้ การปล่อยตุ้มน้ำหนักลงบนผิวทางและส่งแรงกระแทกลงไปยังโครงสร้างถนน ผ่านแผ่นถ่าน้ำหนักรูปวงกลมและระบบลูกยางพิเศษ เพื่อให้ น้ำหนักที่เกิดขึ้นได้แผ่ถ่าน้ำหนักสามารถแผ่กระจายได้อย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจะวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นและคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าโมดูลัสของวัสดุในแต่ละชั้น ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนน อายุการใช้งานที่เหลือของถนน และยังสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบการเสริมผิวทางของโครงสร้างถนน (Pavement Overlay) ได้

การทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD จะดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4694-96 [2] ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดขั้นตอนการทดสอบและวิธีการคำนวณค่าที่ต้องใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนน เครื่องมือ FWD จึงเป็นเครื่องมือสำคัญ ต้องมีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือ เพื่อใช้ประโยชน์ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนอย่างมีประสิทธิภาพ

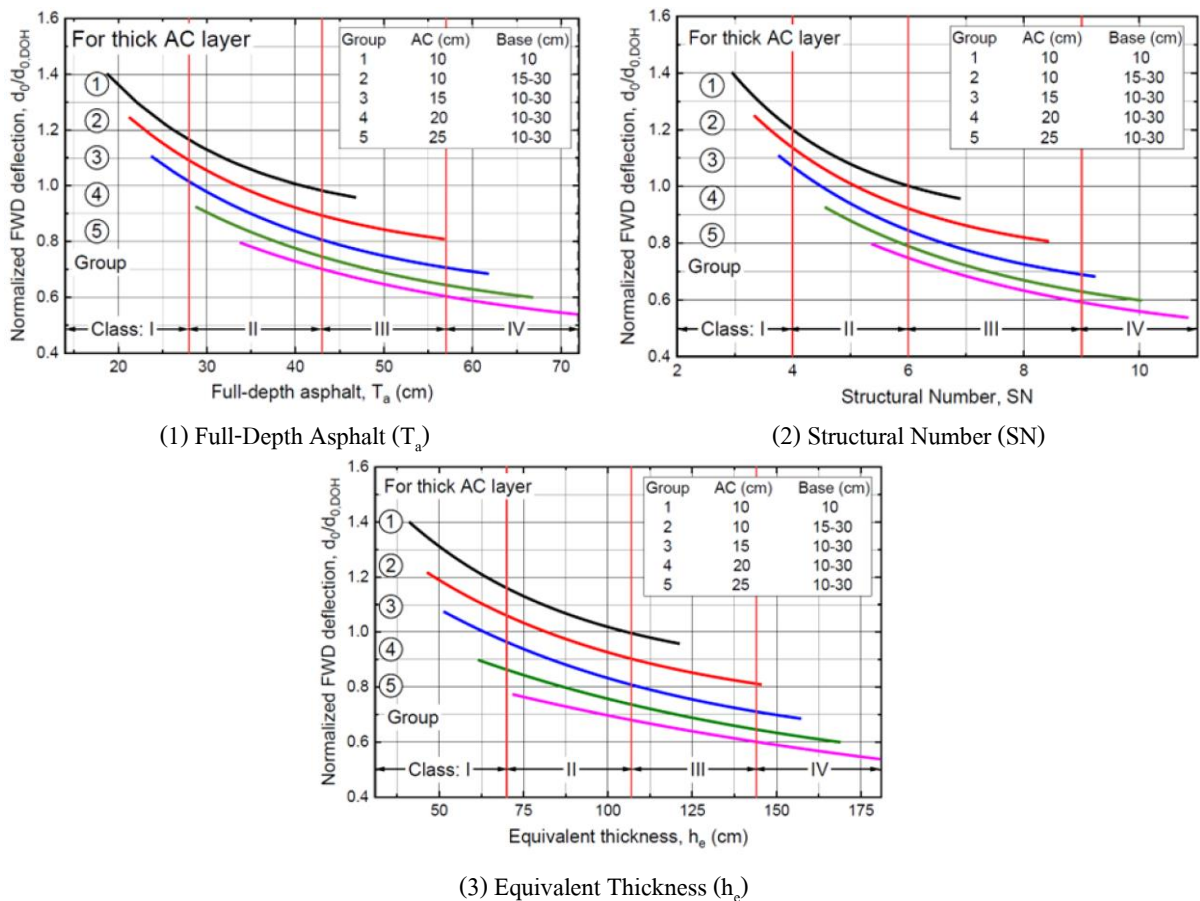


รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องมือ FWD ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4694-96 [2]

2.3 การวิเคราะห์ความหนาของถนนลาดยาง

การออกแบบความหนาของโครงสร้างถนนลาดยางมีหลายวิธี ได้แก่ Full-Depth Asphalt (T_a) ตามวิธีการออกแบบของ AI [3], Structural Number (SN) ตามวิธีการออกแบบของ AASHTO [4] และ Equivalent Thickness (h_e) ตามวิธีการออกแบบของ Odemark's Transformation [5] เพื่อนำมาคำนวณความหนาของโครงสร้างถนน

อัคคัพฒน์ และคณะ [6] คำนวณความหนาของโครงสร้างถนนลาดยาง ด้วยวิธีการออกแบบ ดังต่อไปนี้ (1) Full-Depth Asphalt (T_a) โดย AI [3] (2) Structural Number (SN) โดย AASHTO [4] และ (3) Equivalent Thickness (h_e) โดย Odemark's Transformation [5] โดยจัดกลุ่มรูปแบบโครงสร้างถนนลาดยางออกเป็น 4 ชั้น (Class) พร้อมกราฟการออกแบบ (Design Curve) โครงสร้างถนนลาดยางตามวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธีดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นกราฟการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง [6]

2.4 การประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

AASHTO [4] ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางเชิงประจักษ์ (Empirical Design Method) ดังนี้

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN_{req} + 1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN_{req} + 1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (1)$$

เมื่อ

- W_{18} = จำนวนเที่ยวของเพลาคือขุมมาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, *ESAL*) ในระยะเวลาออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น AASHTO กำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 20 ปี กรมทางหลวงกำหนดระยะเวลาออกแบบไว้ที่ 15 ปี เป็นต้น
- = $ADT \times T \times T_F \times G \times Y \times D \times L \times 365$
- ADT = ปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวัน
- T = เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก
- T_F = แฟกเตอร์รถบรรทุกมาตรฐาน (กำหนดให้มีความเท่ากับ 1.0)
- G = แฟกเตอร์การเติบโตของปริมาณจราจร $\frac{(1+r)^Y - 1}{r}$
- Y = อายุการออกแบบ
- D = แฟกเตอร์ทิศทางจราจร (ดูตารางที่ 1)
- L = แฟกเตอร์ช่องจราจรในแต่ละทิศทาง (กำหนดให้มีความค่า 0.9)
- r = อัตราการเติบโตของปริมาณจราจรเฉลี่ยรายปี
- Z_R = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Normal Deviation) กำหนดโดยระดับความเชื่อมั่น (Reliability) เช่น ถ้าระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 85 จะใช้ค่า $Z_R = -1.037$
- S_o = ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ปริมาณจราจรและ ทำนายการเสื่อมสภาพโครงสร้างถนน (Standard Error) สำหรับโครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่น [7] ให้ค่าแนะนำที่ 0.4 - 0.5
- ΔPSI = ความสูญเสียระดับการให้บริการ (Design Serviceability Loss) คำนวณได้จากค่า PSI เริ่มเปิดใช้งาน (โดยทั่วไปเท่ากับ 4.2 สำหรับชั้นทางแบบยึดหยุ่น) ถึงค่า PSI สิ้นสุดอายุใช้งาน (ประมาณ 2.7)
- SN = ความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Number)
- M_R = โมดูลัสยึดหยุ่นของดินเดิม (หน่วย psi) อาจประมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ $M_R = 1500 CBR(\%)$

ตารางที่ 1 แฟกเตอร์ทิศทางจราจร [3]

Number of Traffic Lanes (Two Directions)	Percentage of Trucks in Design Lane
2	50
4	45 (35-48)
6 or more	40 (25-48)

2.4.1 ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน Structural Condition Index (*SCI*) เป็นดัชนีชี้วัดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการจราจรตามสมการดังนี้

$$SCI = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} \quad (2)$$

เมื่อ

- SCI = ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index)
 SN_{eff} = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน (Effective Structural Number)
 SN_{req} = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ต้องการ (Required Structural Number) ตามปริมาณจราจร ESALs ภายใต้อายุการใช้งานที่กำหนดไว้ เช่น 15 ปี หรือ 20 ปี เป็นต้น

ในการประเมินค่า SN_{eff} ของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบันนิยมใช้เครื่องมือ FWD ซึ่งให้ค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ตำแหน่งต่าง ๆ นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการประเมินค่า SN_{eff} จากผลการทดสอบ FWD ยกตัวอย่างเช่น วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย AASHTO [4] วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย Rohde [8] เป็นต้น

วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย AASHTO [4] เป็นดังนี้

$$SN_{eff} = 0.0045 * D * E_p^{0.333} \quad (3)$$

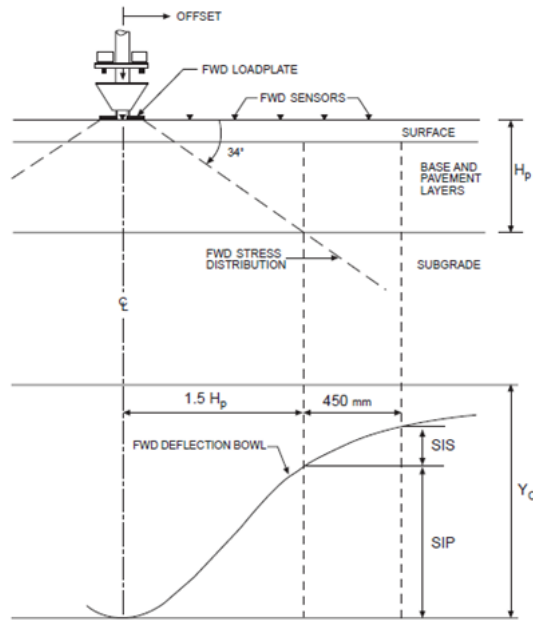
$$d_o = 1.5 * P * a * \left(\frac{1}{E_{SG} * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^3 * \frac{E_p}{E_{SG}}}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right)}{E_p} \right) \quad (4)$$

$$E_{SG} = 0.24 * P / (d_7 * 72) \quad (5)$$

เมื่อ

- E_p = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทั้งหมดเหนือดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
 E_{SG} = ค่าโมดูลัสของดินเดิม Subgrade หน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
 D = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น นิ้ว
 A = รัศมีของแผ่นจานโลหะทดสอบ FWD หน่วยเป็น นิ้ว
 d_o, d_7 = ค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 1 (ตำแหน่งที่น้ำหนักตกกระทบบน) และค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 7 (ห่างจาก Sensor ตัวที่ 1 เป็นระยะทาง 72 นิ้ว) ตามลำดับ หน่วยเป็น นิ้ว
 P = น้ำหนักตกกระทบบน (Applied Load) หน่วยเป็น ปอนด์

ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (Deflection, d_o) ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD ได้จากผลรวมของค่าการแอ่นตัวในดินเดิม (Subgrade) ในขณะที่ Rohde [8] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน โดยแนะนำว่าค่าการแอ่นตัวในโครงสร้างถนนสามารถประมาณได้จากผลต่างระหว่างค่าการแอ่นตัวสูงสุด (d_o) กับค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ $1.5H_p$ ($d_{1.5Hp}$) ซึ่งเป็นค่าตัวแทนการแอ่นตัวของดินเดิม



รูปที่ 4 ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ FWD บนโครงสร้างถนน

วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย Rohde [8] ดังนี้

$$SN_{eff} = k_1 SIP^{k_2} H_p^{k_3} \quad (6)$$

$$SIP = d_o - d_{1.5H_p} \quad (7)$$

เมื่อ

k_1, k_2, k_3 = ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Regression Coefficient) ของแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งมีค่าแสดงในตารางที่ 2

SIP = ค่าดัชนีการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน หน่วยเป็น ไมโครเมตร

d_o = ค่าการแอ่นตัวสูงสุดภายใต้น้ำหนักตกกระแทกมาตรฐาน (9,000 ปอนด์) หน่วยเป็น ไมโครเมตร

$d_{1.5H_p}$ = ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งห่างจากน้ำหนักตกกระแทกมาตรฐานเป็นระยะ 1.5 เท่าของ H_p หน่วยเป็น ไมโครเมตร

H_p = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ตารางที่ 2 ค่า Regression Coefficient สำหรับคำนวณค่า SN_{eff} ตามวิธีของ Rohde [8]

ประเภทของตัวทาง	ฉาบผิว	แอสฟัลต์คอนกรีต
k_1	0.1165	0.4728
k_2	-0.3248	-0.4810
k_3	0.8241	0.7581
R^2	0.984	0.957
จำนวนข้อมูล	1,944	5,832

2.4.2 ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)

การคำนวณค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$MR = \frac{E_p}{E_{design}} \quad (8)$$

เมื่อ

- MR = ค่าอัตราส่วน โมดูลัส
- E_p = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Pavement Modulus)
- E_{design} = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (Design Modulus)
- = $(E_{AC}H_{AC} + E_{BS}H_{BS} + E_{SB}H_{SB} + E_{SL}H_{SL}) / H_{Total}$
- H_{AC} = ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)
- H_{BS} = ความหนาของพื้นทาง (Base)
- H_{SB} = ความหนาของรองพื้นทาง (Subbase)
- H_{SL} = ความหนาของวัสดุคัดเลือก (Selected Material)
- H_{Total} = ความหนารวมของโครงสร้างถนน = $H_{AC} + H_{BS} + H_{SB} + H_{SL}$

ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชั้นทางที่ใช้ออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางของกรมทางหลวง

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	Elastic Modulus (MPa)
PMA	4,500
AC 60/70	2,500
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	850
พื้นทางหินคลุก	350
รองพื้นทาง	150
วัสดุคัดเลือก	100
ดินคั่นทาง	10 x CBR

Wimsatt [9] ได้เสนอสมการที่ (9) สำหรับวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus, $E_{p,Eq}$) กับค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus, E_{SG}) โดย ค่าโมดูลัสของดินเดิม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$\frac{E_{p,Eq}}{E_{SG}} = 331.37\left(\frac{d_{1800}}{d_0}\right)^{\frac{5}{2}} - 158.63\left(\frac{d_{1800}}{d_0}\right)^2 + 100.05\left(\frac{d_{1800}}{d_0}\right)^{\frac{3}{2}} + 18.39\left(\frac{d_{1800}}{d_0}\right) + 0.53\left(\frac{d_{1800}}{d_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$E_{SG} = \frac{0.24P}{d_{1800} \times 1800} \quad (10)$$

$$E_{p,Eq} = \frac{E_{p,Eq}}{E_{SG}} \times E_{SG} \quad (11)$$

เมื่อ

- $E_{P,Eq}$ = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (MPa)
- E_{SG} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเดิม (MPa)
- P = น้ำหนักตกระแทกจากการทดสอบ FWD (สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 kN)
- d_o = ค่าการแอ่นตัวสูงสุดหรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร
- d_{1800} = ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร

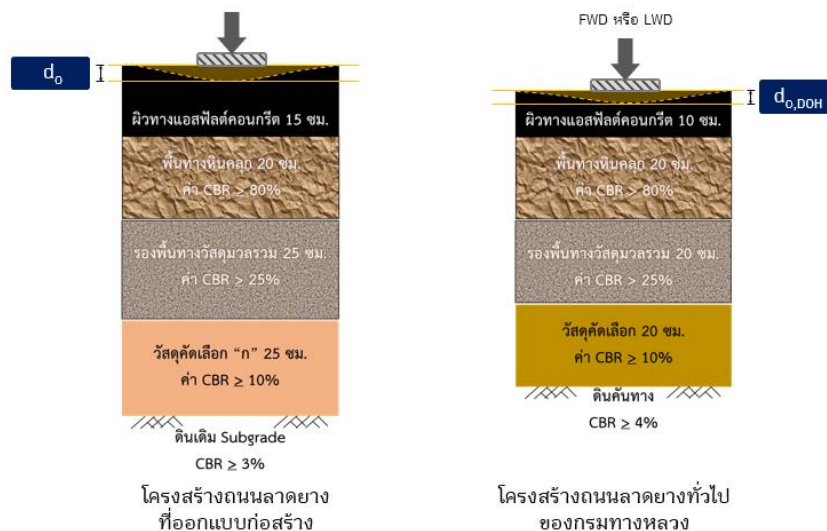
สำหรับการคำนวณค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Backcalculation) ในการศึกษาี้ คณะผู้ศึกษาเลือกใช้โปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD)

2.4.3 อัตราส่วนการแอ่นตัวของถนนลาดยาง Normalized Deflection ($d_o/d_{o,DOH}$)

Sawangsurriya et al. (2023) [10] นำเสนออัตราส่วนการแอ่นตัว (Normalized Deflection) โดยการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยาง (d_o) กับค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ($d_{o,DOH}$) ดังนี้

$$\frac{d_o}{d_{o,DOH}} = \frac{\text{maximum surface deflection } (d_o)}{\text{maximum surface deflection determined from typical DOH pavement section } (d_{o,DOH})} \quad (12)$$

ค่า d_o เป็นค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางตามรูปแบบก่อสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 5 (ด้านซ้าย) และ ค่า $d_{o,DOH}$ เป็นค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ซึ่งประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร พื้นทางหินคลุกหนา 200 มิลลิเมตร รองพื้นทางวัสดุมวลรวมหนา 200 มิลลิเมตร และวัสดุคัดเลือกหนา 200 มิลลิเมตร [11] ดังรูปที่ 5 (ด้านขวา)



รูปที่ 5 โครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้ออกแบบก่อสร้างและโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ FWD

การศึกษาครั้งนี้ใช้หน่วยแรงกระทำเสมือนน้ำหนักถบรรทุกจริง โดยการปล่อยน้ำหนักตกกระแทกขนาด 50 kN ลงบนแผ่นจานโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ผ่านลูกยางชนิดพิเศษเพื่อให้น้ำหนักที่เกิดขึ้นใต้แผ่นจานโลหะมีการแผ่กระจายสม่ำเสมอ เครื่องมือ FWD ประกอบด้วย มาตรวัดการแอ่นตัว (Geophone) จำนวน 9 ตัว ที่ติดตั้งบนคันที่สามารถยกขึ้นลงได้ ทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1,200, 1,500 และ 1,800 มิลลิเมตร ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะ โดยเก็บข้อมูลเป็นจุด ระยะห่างต่อจุดที่ 100 เมตร ในช่องจราจรทางซ้ายหรือช่องจราจรที่รถบรรทุกหนักใช้เดินทาง ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บบันทึกไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผล

3.2 การรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็น โดยเฉพาะค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนและค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ความหนาของโครงสร้างถนนแต่ละชั้น (Layer Thickness) ปริมาณจราจรรายวัน (Average Daily Traffic) เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนัก (Percent of Heavy Truck) และอัตราการเติบโตของปริมาณจราจร (Growth Rate) เป็นต้น

3.3 พื้นที่ศึกษาและขั้นตอนการทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD

คณะผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาในพื้นที่รับผิดชอบของกรมทางหลวงจำนวนทั้งสิ้น 10 สายทาง 13 ตอนควบคุมดังนี้ (1) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 102 หนองรี – หนองปรือ แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.25+000 – กม.31+000 (LT และ RT) (2) ทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 หนองปรือ - คลองเจด แขวงทางหลวงชลบุรีที่ 1 กม.32+000 - กม.62+000 (LT และ RT) (3) ทางหลวงหมายเลข 32 ตอนควบคุม 202 อ่างทอง - ไชโย แขวงทางหลวงอ่างทอง กม.49+087 - กม.66+800 (LT และ RT) (4) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนควบคุม 702 ร่องแซง - หนองแก แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.460+595 - กม.492+269 (LT) (5) ทางหลวงหมายเลข 201 ตอนควบคุม 304 โนนหัน - ผานกเค้า แขวงทางหลวงขอนแก่นที่ 2 (ชุมแพ) กม.234+052 - กม.266+500 (LT) (6) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนควบคุม 603 น้ำคุด - หัวขามะควา แขวงทางหลวงเพชรบูรณ์ที่ 1 กม.363+959 - กม.374+000 (LT) (7) ทางหลวงหมายเลข 117 ตอนควบคุม 202 เนินสว่าง - หนองนา แขวงทางหลวงพิจิตร กม.70+000 - กม.90+000 (LT) (8) ทางหลวงหมายเลข 115 ตอนควบคุม 301 บึงบัว – คลองโนน แขวงทางหลวงพิจิตร กม.56+215 - กม.80+000 (LT) (9) ทางหลวงหมายเลข 221 ตอนควบคุม 101 ศรีสะเกษ – ภูเงิน แขวงทางหลวงศรีสะเกษที่ 2 กม.0+462+000 - กม.47+000 (LT) (10) ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนควบคุม 602 อุครธานี – น้ำสวยแขวงทางอุครธานีที่ 1 กม.457+306 – กม.486+306 (LT) (11) ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนควบคุม 300วังสำราญ – วังสะพุง แขวงทางหลวงเลยที่ 1 กม.94+048 - กม.118+908 (LT และ RT) (12) ทางหลวงหมายเลข 12 ตอนควบคุม 401 บ้านกร่าง – พิชณุโลก แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ 1 กม.194+769 - กม.225+119 (LT) และ (13) ทางหลวงหมายเลข 126 ตอนควบคุม 103 ถนนวงแหวนรอบเมืองพิษณุโลกด้านทิศใต้ แขวงทางหลวงพิษณุโลกที่ กม.30+203 – กม.46+906 (LT) เพื่อหาการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน ในการทดสอบเริ่มจากการวัดอุณหภูมิของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้มาตรวัดอุณหภูมิติดตัวอยู่กับเครื่องมือ FWD ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร รอกะทั่งอุณหภูมิที่ทำการวัดคงที่ค่าอุณหภูมิที่ได้จะถูกบันทึกโดยคอมพิวเตอร์ และทำการเจาะสำรวจความหนาของโครงสร้างชั้นทางโดย Borescope



รูปที่ 6 การวัดอุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตและการเจาะสำรวจชั้นทางเบื้องต้น

3.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนการแอ่นตัวกับความหนาของโครงสร้างถนน

คณะผู้ศึกษาได้จัดประเภทตามลักษณะของโครงสร้างชั้นทาง ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป (Conventional Pavement) ประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทาง รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือกและดินเดิม และ (2) โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) ประกอบไปด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พื้นทางผสมซีเมนต์ รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือกและดินเดิม โดยลักษณะของโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัวมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป แต่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีความแข็งแรงสูงกว่าโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป

3.5 การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน

3.5.1 ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (SN_{req})

จากข้อมูลที่ได้ คณะผู้ศึกษาใช้ สมการที่ (1) ในการคำนวณหาค่า SN_{req} และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

W_{18}	จำนวนเที่ยวของเพลาเดี่ยวมาตรฐาน ใช้ระยะเวลาออกแบบที่ 10 ปี
Z_R	ความเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 85 ใช้ค่า $Z_R = -1.037$
S_o	ความคลาดเคลื่อนใช้ที่ 0.5
ΔPSI	ความสูญเสียระดับการให้บริการใช้ที่ 1.5
M_R	ใช้ความสัมพันธ์ $M_R = 1500CBR$ (%)

3.5.2 ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน (SN_{eff})

คณะผู้ศึกษาได้ใช้วิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย AASHTO [4] ดังสมการที่ (3) และวิธีประเมินค่า SN_{eff} ที่เสนอโดย Rohde [8] ดังสมการที่ (6) ถึง (7) มาใช้ในการวิเคราะห์ค่า SN_{eff} เพื่อวิเคราะห์ ค่า SCI ดังสมการที่ (2)

3.5.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนที่ใช้ในการออกแบบ (E_{design})

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ความหนาของโครงสร้างถนนและค่าโมดูลัสของวัสดุตามรูปตัด โครงสร้างชั้นทาง (Cross-Section) ของสายทางศึกษา เพื่อนำความหนาและชนิดของวัสดุมาใช้ประกอบการคำนวณหาค่า E_{design} ดังที่ปรากฏในสมการที่ (8)

3.5.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ

คณะผู้ศึกษาได้ใช้ค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ FWD ณ ตำแหน่งของแรงกระทำ หรือที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (d_0) แทนดัชนีความแข็งแรงของ โครงสร้างถนน ในขณะที่ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ Offset เท่ากับ 1,800 มิลลิเมตร (d_{1800}) แทนดัชนีความแข็งแรงของดินเดิม (Subgrade) ค่าโมดูลัสของดินเดิม (Subgrade Modulus, E_{SG}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) ส่วนค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน (Pavement Modulus, $E_{P, Eq}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (11)

คณะผู้ศึกษาได้คำนวณ ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ ด้วยวิธีการ Backcalculation โดยใช้โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design)

3.5.5 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยาง (d_o)

จากข้อมูลจากการทดสอบ คณะผู้ศึกษาได้ใช้ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งของแรงกระทำที่ระยะ Offset เท่ากับ 0 มิลลิเมตร เป็นค่าของ d_o

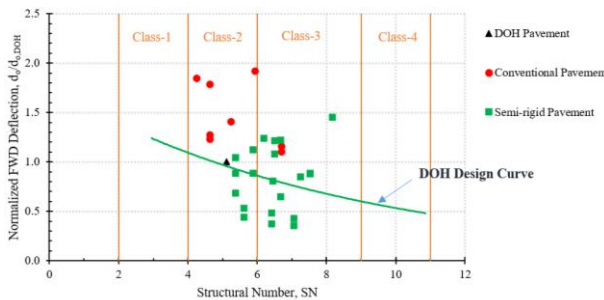
3.5.6 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างถนนลาดยางทั่วไปของกรมทางหลวง ($d_{o, DOH}$)

จากข้อมูลจากการทดสอบค่าการแอ่นตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งของแรงกระทำที่ระยะ Offset 0 มิลลิเมตร ของสายทางที่มีโครงสร้างถนนประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 100 มิลลิเมตร พื้นทางหินคลุกหนา 200 มิลลิเมตร รองพื้นทางวัสดุมวลรวมหนา 200 มิลลิเมตร และวัสดุคัดเลือกหนา 200 มิลลิเมตร เป็นตัวแทนของค่า $d_{o, DOH}$ จากการเก็บข้อมูลดังกล่าว ค่า $d_{o, DOH}$ มีค่าอยู่ที่ 251.26 ไมโครเมตร

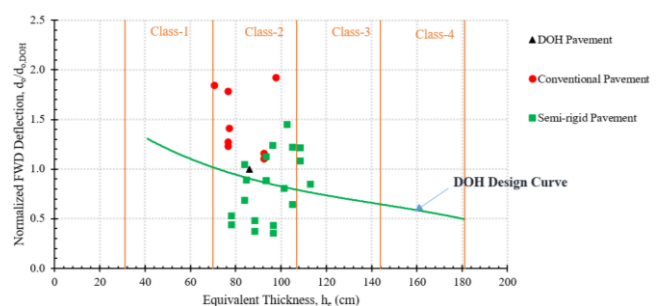
4. ผลการศึกษา

4.1 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการแอ่นตัว $d_o/d_{o, DOH}$ ของโครงสร้างถนนที่ได้จากเครื่องมือ FWD กับวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี

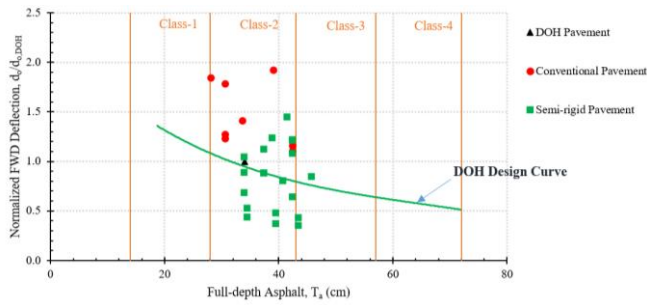
จากข้อมูลภาคสนาม ดังรูปที่ 7 ข้อมูลส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างถนนลาดยางชั้น 2 (Class II) และ ชั้น 3 (Class III) โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปส่วนใหญ่มีค่า $d_o/d_{o, DOH}$ อยู่เหนือเส้น DOH Design Curve ซึ่งได้จากการคำนวณตามทฤษฎี แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไปมีแนวโน้มอ่อนแอกว่าโครงสร้างถนนลาดยางที่ออกแบบตามทฤษฎี ในขณะที่โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกรงตัวมีค่า $d_o/d_{o, DOH}$ ค่อนข้างกระจายตัวตามเส้น DOH Design Curve แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกรงตัวมีแนวโน้มความแข็งแรงเป็นไปตามโครงสร้างถนนลาดยางที่ออกแบบตามทฤษฎี รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างค่า $d_o/d_{o, DOH}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD บนทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 และ ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนควบคุม 300



(1) ค่า $d_o/d_{o, DOH}$ กับ Structural Number (SN)



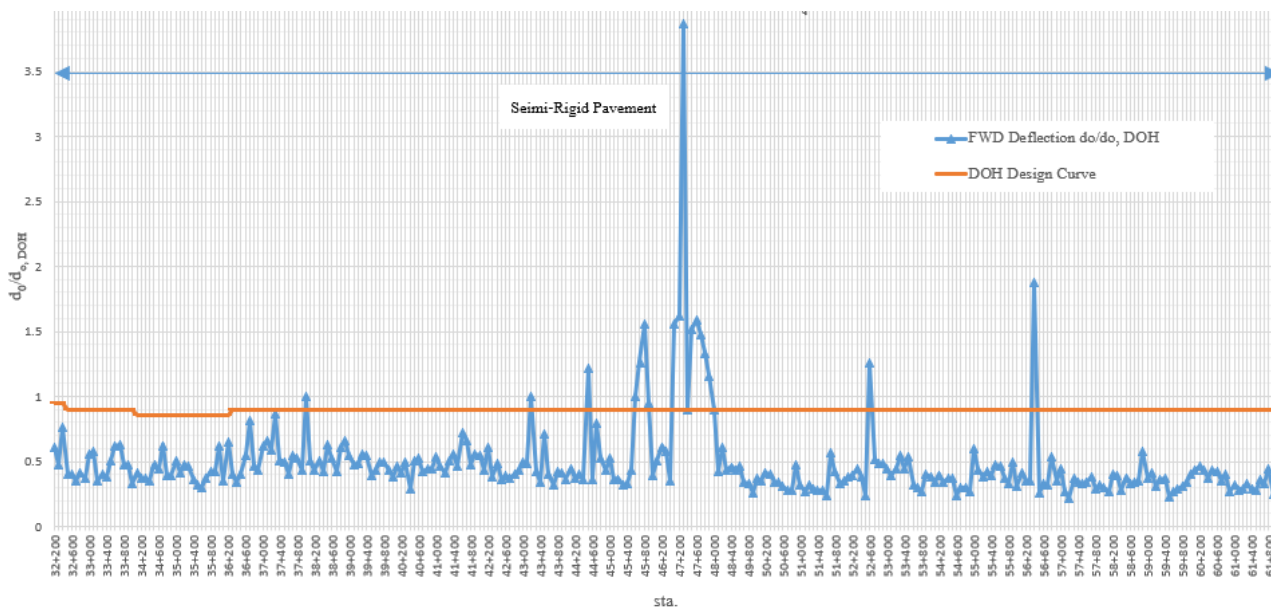
(2) ค่า $d_o/d_{o, DOH}$ กับ Equivalent Thickness (h_e)



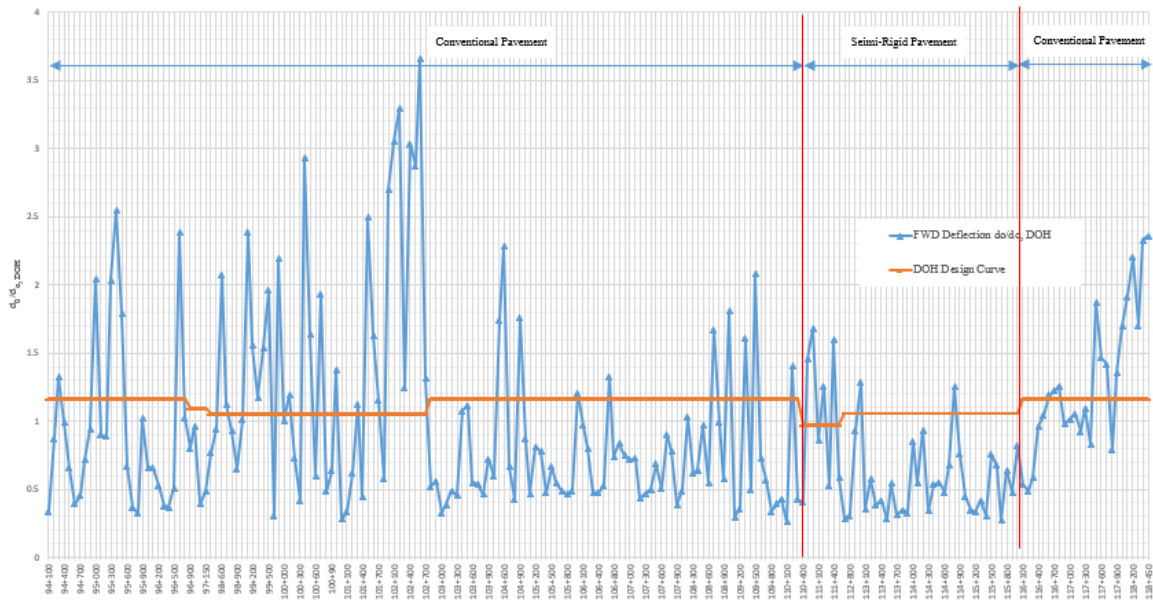
(3) ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ กับ Full-Depth Asphalt (T_a)

รูปที่ 7 ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ กับค่าจากวิธีการออกแบบทั้ง 3 วิธี

อนึ่ง ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือ FWD เครื่องเดียวกันตลอดการศึกษา โดยไม่ได้พิจารณาตัวแปรด้านมิติเวลาและสมมติค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของดินเดิม เท่ากับ 40 MPa (CBR = 4%) ดังนั้นหากมีการเก็บข้อมูลสายทางหลวงเพิ่มขึ้น จำนวนจุดทดสอบมากขึ้น ผลการวิเคราะห์จึงอาจเปลี่ยนแปลงได้



(1) ทางหลวงหมายเลข 344-ตอนควบคุม 103 กม.32+000 กม.62+000 (LT)

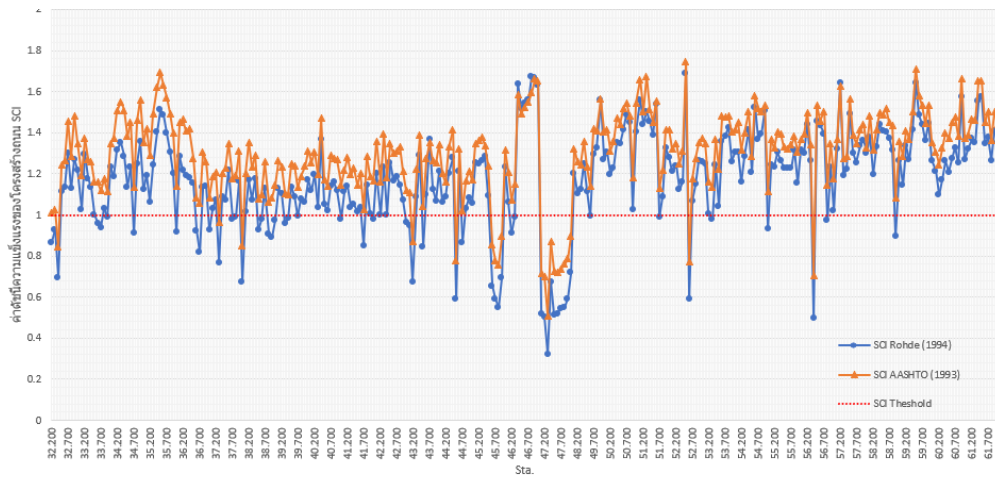


(2) ทางหลวงหมายเลข 210 ตอนควบคุม 300 กม.94+048 - กม.118+908 (RT)

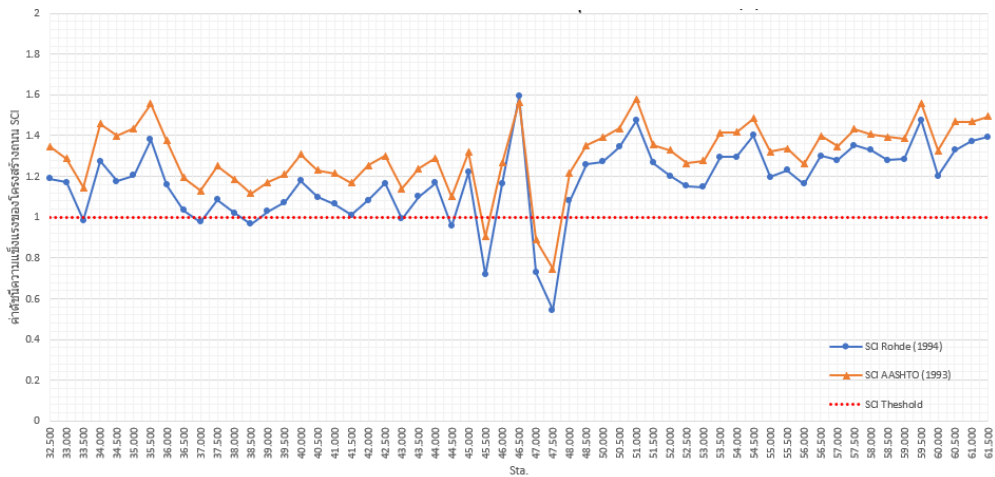
รูปที่ 8 ค่า $d/d_{0,DOH}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูล FWD บนสายทาง

4.2 ค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน (Structural Condition Index, *SCI*)

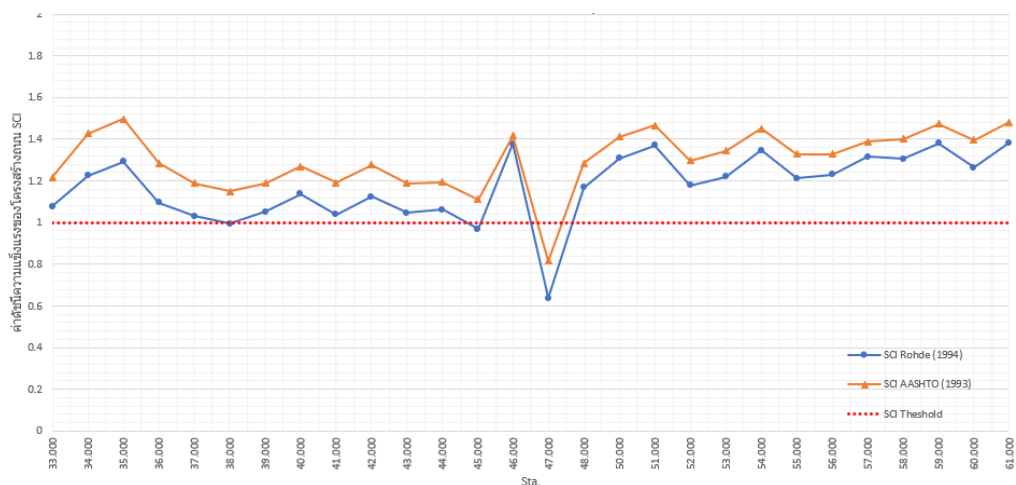
คณะผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบ FWD มาวิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนนรูปที่ 9 อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่า *SCI* คำนวณ โดยทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้เส้นประแสดงเกณฑ์ค่า *SCI* ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 1.0 (*SCI* Threshold) ค่า *SCI* ที่ต่ำกว่า 1.0 แสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ณ ปัจจุบัน ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ออกแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวยังเกิดขึ้นบนสายทางอื่นเช่นกัน ค่า *SCI* ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีของ Rohde [8] มีค่าที่ต่ำกว่าโดยวิธีของ AASHTO [4] เนื่องจากวิธีของ Rohde [8] มีการคำนวณ SN_{eff} ที่แตกต่างจากวิธีของ AASHTO [4] โดย AASHTO [4] ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง E_p มาคำนวณในสมการโดยตรง ซึ่งอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่า *SCI* ที่คำนวณด้วยวิธีของ Rohde [8] มีค่าที่ต่ำกว่า จากผลการวิเคราะห์ค่า *SCI* ของทั้งสองวิธี วิธีของ Rohde [8] น่าจะเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมในเชิงงานซ่อมบำรุง เนื่องจากค่า *SCI* ที่คำนวณได้ต่ำกว่าวิธีของ AASHTO ซึ่งค่า *SCI* ยิ่งต่ำเท่าไร ยิ่งต้องซ่อมบำรุงให้เร็วขึ้นเท่านั้น และยังพบว่า การเฉลี่ยค่า *SCI* ทุกระยะ 500 และ 1,000 เมตร ดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ ในสายทางที่มีปริมาณข้อมูลมาก ให้ผลสรุปไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 ค่า SCI ของโครงสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 กม.32+000 กม.62+000 (LT) เก็บทุกระยะ 100 เมตร



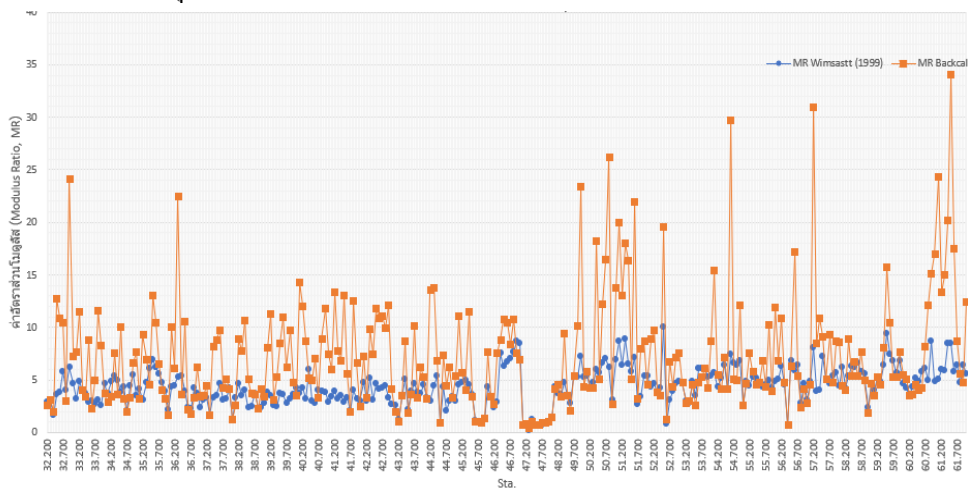
รูปที่ 10 ค่า SCI ของโครงสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 กม.32+000 กม.62+000 (LT) LT เฉลี่ยที่ระยะ 500 เมตร



รูปที่ 11 ค่า SCI ของโครงสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 กม.32+000 กม.62+000 (LT) เฉลี่ยที่ระยะ 1,000 เมตร

4.3 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)

คณะผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR) โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ FWD เพื่อวิเคราะห์ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนน จากผลการศึกษาดังตัวอย่างรูปที่ 12 พบว่าค่า MR ของทางหลวงหมายเลข 344 ที่ได้จากการคำนวณตามวิธี Backcalculation ก่อนข้างแปรปรวนมากกว่าการคำนวณตามวิธีของ Wimsatt [9] ซึ่งอาจเกิดจากวิธี Backcalculation นำเอาข้อมูลค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์ทุกตัวมาคำนวณ ซึ่งค่าการแอ่นตัวจากเซ็นเซอร์แต่ละตัวที่ระยะห่างจากจุดปล่อยค้อนน้ำหนักร่างที่แตกต่างกัน ให้ค่าความแปรปรวนมากน้อยไม่เท่ากัน ในขณะที่วิธีของ Wimsatt [9] ใช้ข้อมูลค่าการแอ่นตัวของเซ็นเซอร์เฉพาะตำแหน่ง d_o และ d_{1800} เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มค่า MR ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีทิศทางไปในทางเดียวกัน แนวโน้มความสัมพันธ์ดังกล่าวยังพบได้ในจุดทดสอบของสายทางอื่นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 12 ค่า MR ของโครงสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 344 ตอนควบคุม 103 กม.32+000 กม.62+000 (LT)

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

1. จากการวิเคราะห์ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ ของแต่ละสายทาง พบว่าค่า $d_o/d_{o,DOH}$ มีความสัมพันธ์กับค่า SCI ในลักษณะที่แปรผกผัน ทั้งนี้ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ ที่จัดอยู่ในประเภทโครงสร้างชั้นทางแบบทั่วไป ส่วนใหญ่มีแนวโน้มสูงกว่าโครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแครงตัว และมีแนวโน้มชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นกราฟการออกแบบ DOH Design Curve

2. จากผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนหรือค่า SCI ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde [8] และ AASHTO [4] พบว่าค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนแปรผกผันกับการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน ทั้งนี้ทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่า SCI ที่ได้จากวิธีของ AASHTO [4] มีค่ามากกว่าวิธีของ Rohde [8] เนื่องจาก AASHTO [4] ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง E_p มาคำนวณ ในสมการ โดยตรง และพบว่าค่าดัชนีชี้วัดความแข็งแรงแปรผกผันกับการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนมีความสำคัญในการตัดสินใจด้านการบูรณะปรับปรุงและบำรุงรักษาโครงสร้างถนน ความแตกต่างของค่า SCI ระหว่างวิธีการคำนวณสะท้อนให้เห็นวิธีการคำนวณและข้อจำกัดของแต่ละวิธี ค่า SCI จากการคำนวณด้วยวิธีของ Rohde [8] อาจเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับงานซ่อมบำรุงเนื่องจากให้ค่าต่ำกว่าวิธีของ AASHTO [4]

3. จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนโมดูลัสของโครงสร้างถนน (MR) ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Wimsatt [9] และวิธี Backcalculation ด้วยโปรแกรม ELMOD พบว่าค่า MR แปรผกผันกับการแอ่นตัวของโครงสร้างถนน ทั้งนี้ทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่า MR ที่ได้จากวิธีของ Wimsatt [9] มีความแปรปรวนน้อยกว่าวิธี Backcalculation

4. ผลการเปรียบเทียบ $d_o/d_{o,DOH}$, SCI , และ MR พบว่า ในเชิงวิศวกรรมงานทางและเชิงบริหารบำรุงทาง ค่า $d_o/d_{o,DOH}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนได้ ค่าที่ต่ำแสดงว่าโครงสร้างถนนมีความแข็งแรงปลอดภัยสูง ค่า SCI เป็นดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนน ค่า SCI ที่สูงแสดงถึงโครงสร้างถนนที่มีความแข็งแรงปลอดภัยสูง ค่า MR มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่า SCI ซึ่งแสดงว่าการพิจารณาวิธีการบูรณะปรับปรุงและบำรุงรักษา โครงสร้างถนน ควรพิจารณาค่า MR ประกอบด้วยเพื่อเพิ่มความมั่นใจด้านการวางแผนเชิงบริหารบำรุงทาง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ $d_o/d_{o,DOH}$ ที่สูงกว่าค่า DOH Design Curve แสดงถึงความสำคัญของการพิจารณาเลือกรูปแบบโครงสร้างถนนที่เหมาะสม สามารถเพิ่มความแข็งแรงปลอดภัยของโครงสร้างถนนได้ ในส่วนของค่า SCI ตามวิธีของ AASHTO [4] ให้ค่าสูงกว่าวิธีของ Rohde [8] ดังนั้น การตรวจวัดค่า SCI โดยวิธีของ Rohde [8] น่าจะเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมในเชิงบริหารบำรุงทาง เนื่องจากค่า SCI ยิ่งต่ำเท่าไร ยิ่งจำเป็นที่ต้องซ่อมบำรุงเร็วขึ้นเท่านั้น ส่วนค่า MR ยังไม่ชัดเจนในประเด็นดังกล่าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำเสนอผลการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างถนน โดยใช้ค่าอัตราส่วนการแอ่นตัว ($d_o/d_{o,DOH}$) ค่าดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างถนน และค่าอัตราส่วนโมดูลัสเป็นทางเลือกในการพัฒนาคำชี้วัดด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนน และเพื่อเพิ่มทางเลือกในการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะด้านความแข็งแรงของโครงสร้างทางหลวง

ในการศึกษานี้ คณะผู้ศึกษาพิจารณาใช้เครื่องมือ FWD เพียงเครื่องเดียว ไม่ได้พิจารณาตัวแปรด้านเวลา และเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากสายทางที่สำรวจในการศึกษานี้มีจำนวนเพียง 10 สายทาง 13 ตอนควบคุมเท่านั้น การเพิ่มจำนวนสายทาง จำนวนจุดทดสอบ และการเก็บข้อมูล ณ ช่วงเวลาต่างๆอาจมีผลต่อการวิเคราะห์ได้

นอกจากนี้ การศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นและจำเป็นต้องขยายผลการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาเกณฑ์การประเมินคุณภาพของโครงสร้างถนนอย่างละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนสำหรับงานบูรณะปรับปรุงและบำรุงรักษาทาง เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างถนนในอนาคต

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin T. and Choummanivong L. *Predicting the Performance of Australia's Arterial and Sealed Local Roads*. 2018, ARR 390, ARRB Group, Vermont South, Vic.
- [2] ASTM International. D4694 – 09: 2015. *Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device*, ASTM International. West Conshohocken, PA., 2015.

- [3] Asphalt Institute. AI MS-1: 1970. *Thickness Design-Full-Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets*. Washington, D.C., 1970.
- [4] AASHTO. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C., 1993.
- [5] Ulitz, P. Pavement Analysis. In *Developments in Civil Engineering*. 1987, 19
- [6] อัครพัฒน์ สว่างสุริย์, ชันวิน สวัสดิ์สานต์ และ ปรมิณ จิตต์อารีกุล. วพ.318 โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง, 2566.
- [7] คณัญฐ์ ถาวร, ชีรภัทร์ ศิริรัตนัตร์, สุรนนท์ เข้อยงศ์ และ อัครพัฒน์ สว่างสุริย์. การศึกษาแนวทางประเมินสมรรถนะทางหลวงด้วยเครื่องมือ FWD และ LWD. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23*, โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, นครนายก, วันที่ 18 - 20 กรกฎาคม 2561.
- [8] Rohde, G.T. Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. *Transportation Research Record 1448*, 1994, pp. 61-68.
- [9] Wimsatt, A.J. Direct Analysis Methods for Falling Weight Deflectometer Deflection Data. *Transportation, Research Record 1655*, 1999, pp. 135-144.
- [10] Sawangsuriya, A., Svasdisant, T. and Jitareekul, P. Deflection-Based Approach for Flexible Pavement Design in Thailand. *Infrastructures*, 2023, 8(7): 116. DOI: 10.3390/infrastructures8070116
- [11] กรมทางหลวง. *คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง*. กรุงเทพมหานคร: สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง, 2550.