

การประเมินโมดูลัสของชั้นทางจาก Light Weight Deflectometer ที่มีจีโอโฟนเพิ่มเติมในแนวรัศมี Pavement modulus determination by Light Weight Deflectometer with optional radial geophones

ฐิติพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล^{1,*} ธีรวัฒน์ ชิมเล่มกิม² และ วิรุวัตร บุญญะสู³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 6370077321@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมคุณภาพการบดอัดของโครงสร้างชั้นทาง ในอดีตที่ผ่านมา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะได้รับการทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่เจาะเก็บจากโครงสร้างชั้นทางในสนาม ความเสียหายจากการเจาะเก็บตัวอย่างนี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การทดสอบด้วยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน อุปกรณ์ LWD ในการศึกษาครั้งนี้จะมีเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) เพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ติดตั้งในแนวรัศมีจากจุดทดสอบ ซึ่งทำให้สามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวได้ดีขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบบนโครงสร้างชั้นทางด้วยเครื่องมือ LWD และเปรียบเทียบผลกับการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน (Microtremor) และเครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (DPL) จากผลการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor แต่มีการแกว่งตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องมือ DPL ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการนำเครื่องมือ LWD ที่มีเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นไปใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทางในประเทศไทย

คำสำคัญ: Light Weight Deflectometer, การตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว, เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา, เซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น

Abstract

The elastic modulus is an important parameter for the design and quality control of pavement structures. In the past, the elastic modulus was determined from cored samples from the fields. Damage to pavement structures may be avoided by using nondestructive tests such as the Light Weight Deflectometer (LWD) which recently gained more attention. A basic LWD apparatus consists of one load cell and one accelerometer, but its performance can be enhanced by adding

more sensors in the radial direction from the center of the load plate. The additional sensors are useful because more constraint conditions can be introduced during inversion process, especially when involving non-homogeneous pavement structures. In this study, an LWD equipped with two additional sensors, the Microtremor method and the Dynamic Probing Light (DPL) are used to determine the modulus of pavement structures. The LWD predictions agree well with the Microtremor results while more scattered relationships are observed when comparing with the Dynamic Probing Light (DPL) results. Nonetheless, the study results demonstrate that the LWD with radial sensors is a viable option for the quality control of pavement construction in Thailand.

Keywords: Light Weight Deflectometer, Microtremor, Dynamic Probing Light, Radial sensors

1. ที่มาของการศึกษา

การก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางจำเป็นต้องมีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการบดอัดให้ดี ข้อมูลพื้นฐานหนึ่งที่ต้องมีการออกแบบซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของวัสดุ ซึ่งมีอิทธิพลในการกระจายหน่วยแรง (Stress) จากผิวบนไปยังผิวล่าง โดยค่านี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความหนาที่เหมาะสมของชั้นวัสดุโครงสร้างทาง เพราะวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงหมายความว่ามีความสามารถในการกระจายความเค้นได้ดี ทั้งนี้ถ้าออกแบบความหนาเกินไปจะทำให้เปลืองงบประมาณโดยไม่จำเป็น ในทางกลับกันถ้าออกแบบความหนาไม่เพียงพอจะทำให้ถนนชำรุดก่อนเวลาที่คาดการณ์ไว้ ในอดีตที่ผ่านมามักใช้วิธีเชิงประสบการณ์ ข้อมูลความแข็งแรงจะถูกประเมินโดยการขุดเจาะและเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ผลกระทบคือไม่สามารถทำนายอายุการใช้งานของถนนได้เนื่องจากไม่ได้ใช้หลักทางกลศาสตร์ของวัสดุตามคำนวณ ในปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและคำนวณมีการพัฒนามากขึ้น การ

นำค่าทางกลศาสตร์ของวัสดุเช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น มาออกแบบ ส่งผลให้การออกแบบมีความน่าเชื่อถือ สามารถทำนายอายุการใช้งานของถนนได้ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากการเจาะเก็บตัวอย่างดังกล่าวจึงมีการพัฒนาวิธีการทดสอบอื่นๆ มาใช้แทน เช่น การทดสอบ Plate load test (PLT) ซึ่งทำโดยการกดผิวโครงสร้างทางด้วยแม่แรงแล้วประเมินโมดูลัสต้านทาน (Modulus of subgrade reaction, K30) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการทรุดตัวของแผ่นเหล็ก เนื่องจากการทดสอบ PLT มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงและใช้เวลาทดสอบนาน ต่อมาจึงมีการพัฒนาเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งสร้างแรงกระทำบนผิวโครงสร้างชั้นทางจากการกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักแทนการใช้แม่แรง เนื่องจากอุปกรณ์ FWD มีขนาดใหญ่จึงเหมาะกับการทดสอบบนถนนหรือพื้นที่ที่สามารถลากจูงอุปกรณ์เข้าไปได้ทดสอบได้ สำหรับพื้นที่ที่ไม่สะดวกต่อการนำอุปกรณ์ขนาดใหญ่เข้าไปได้ทดสอบนั้นอาจจะทดสอบได้จากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งมีหลักการทำนองเดียวกันกับ FWD แต่มีความสามารถในการสร้างแรงกระทำน้อยกว่า

เนื่องจากอุปกรณ์ LWD แบบมาตรฐานมีขนาดเล็กและประมวลผลจากแรงและการทรุดตัวของแผ่นฐานเท่านั้น การวิเคราะห์จึงทำได้ภายใต้สมมติฐานที่ไม่ซับซ้อน เช่น ชั้นดินที่รองรับแผ่นฐานจะต้องเป็นวัสดุเนื้อเดียว ภายหลังจึงได้มีการนำเซนเซอร์วัดการเคลื่อนตัวมาติดตั้งเพิ่มเติมในแนวนอนเพื่อนำค่าตรวจวัดที่ได้ไปใช้เป็นเงื่อนไขควบคุมสำหรับการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างชั้นทางที่ซับซ้อนขึ้น แต่อุปกรณ์ในลักษณะดังกล่าวยังมีการศึกษาไม่มากนักในประเทศไทย ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ LWD ที่มีการติดตั้งมาตรวจวัดเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทางในประเทศไทย

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบหาโมดูลัสของชั้นดินในสนามด้วยอุปกรณ์ LWD แล้วทำการประเมินความแม่นยำโดยเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการอื่นอีกสองวิธีได้แก่ การตรวจวัดจากคลื่นผิวดินขนาดเล็ก และการทดสอบด้วยเครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบหนึ่ง (Nondestructive Testing) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง ประกอบด้วยตุ้มน้ำหนักตั้งแต่ 10 ถึง 20 กิโลกรัม แกนนำร่อง (Guide Rod) มีความยาวประมาณ 90 เซนติเมตร แผ่นจานโลหะ (Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร สปริงกระจายแรง เซนเซอร์ตรวจวัดแรง (Load Cell) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) โดยหลังจากที่ตุ้มน้ำหนักตกกระทบบนสปริงแล้วการตอบสนองของวัสดุจะถูกบันทึกด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งใต้แผ่นจานโลหะ เพื่อนำไปประเมินโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของชั้นทางโดยรวม [1]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยการติดตั้งจีโอโฟน (Geophone) เพิ่มเติมในแนวนอนจากจุดศูนย์กลางแผ่นจานโลหะของเครื่องมือ LWD แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประเมินความแข็งแรงในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบชั้นทางที่มีค่าความแข็งแรงต่างกันในแต่ละชั้น [2]

2.2 เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor)

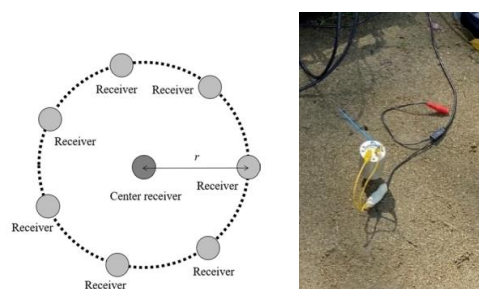
เทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation) คือการประเมินโครงสร้างชั้นดินจากข้อมูลความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นตามธรรมชาติในแนวดิ่งที่ผิวดินดังแสดงในรูปที่ 2 โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินประกอบไปด้วยโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh ซึ่งการตรวจวัดจะต้องทำการตรวจวัดหลายตำแหน่งพร้อมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดคือความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสและความถี่ [3] ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs profile) ได้

2.3 เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light)

เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (DPL) เป็นการทดสอบหาความต้านทานของชั้นดินด้วยการตอกหยั่งแบบเบาตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยการตอกแท่งตอกลงไปในดินด้วยการปล่อยตุ้มน้ำหนักแบบอิสระดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งการตอกจะต้องตอกให้จมถึงระยะ 10 เซนติเมตร (N_{10}) และจุดบันทึก โดยหลักการจะคล้ายกับการทดสอบ SPT แต่มีน้ำหนักเบาและสะดวกในการขนย้าย [4]



รูปที่ 1 เครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น



รูปที่ 2 การตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่ผิว



รูปที่ 3 เครื่องมือการตอกหยั่งแบบเบา

3. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

โครงสร้างทางที่มีลักษณะเป็นระบบชั้นทาง (Layered System) โดยทั่วไปจะมีวัสดุที่คุณภาพดีและแข็งแรงกว่าอยู่ด้านบน ซึ่งการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางสามารถประเมินได้จากค่าการทรุดตัวที่ผิวในแนวตั้ง (Vertical Surface Deflection) ตามทฤษฎีอีลาสติคดังต่อไปนี้

3.1 ทฤษฎีอีลาสติค (Theory of Elasticity)

การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สำหรับโครงสร้างชั้นทางสามารถคำนวณและวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอีลาสติค โดยระบบชั้นทางประกอบไปด้วยวัสดุชั้นบนมีความหนา h และวัสดุชั้นล่างเป็นแบบกึ่งอนันต์ (Half-space) สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (1) [5]

$$w_0 = \frac{qa}{E_2} \cdot F_0 \quad (1)$$

$$F_0 = \frac{1.5}{(E_1/E_2)} \int_0^\infty J_0\left(m \frac{r}{h}\right) J_1\left(m \frac{a}{h}\right) V_0 dm \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{1 + 4Nme^{-2m} - N^2e^{-4m}}{1 - 2N(1 + 2m^2)e^{-2m} + N^2e^{-4m}} \quad (3)$$

$$N = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \quad (4)$$

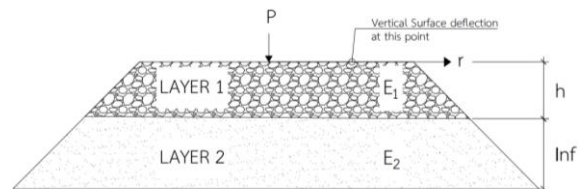
โดย w_0 คือค่าการทรุดตัวที่ผิวในแนวตั้ง (mm), q คือหน่วยแรงที่ผิวสัมผัสใต้แผ่นงานโลหะ (kPa), a คือรัศมีของแผ่นงานโลหะ (m), E_1, E_2 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุชั้นบนและล่างตามลำดับ (MPa), r คือระยะห่างเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (mm), F_0 คือ Deflection Factor, h คือความหนาของวัสดุชั้นแรก (mm) และ J_0, J_1 คือฟังก์ชันเบสเซลลำดับที่ศูนย์และหนึ่งตามลำดับ

3.2 การคำนวณหาค่าโมดูลัสของระบบโครงสร้างทางโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ขั้นตอนแรกจะต้องสมมติค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละโครงสร้างชั้นทาง โดยสมมติว่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุทุกชั้นเท่ากันแล้วนำการทรุดตัวที่ได้จากเซนเซอร์ที่ระยะต่างๆจากจุดทดสอบเครื่องมือ LWD มาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎี หากพบว่าค่าการทรุดตัวมีค่าไม่สอดคล้องกันต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใหม่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบมากที่สุดจึงจะถือว่าได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกต้องของแต่ละชั้น [6]

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

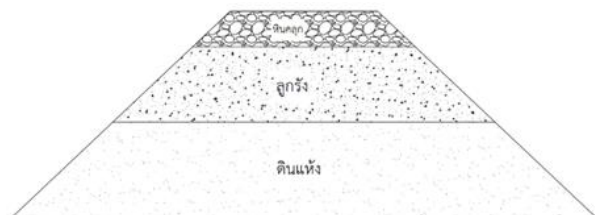
การศึกษานี้จะทำการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างระบบชั้นทางด้วยเครื่องมือ LWD โดยจะมีเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) เพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ระยะห่าง 30 ซม. และ 60 ซม. ในแนวรัศมีจากจุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 และสอบเทียบผลรวมกับเครื่องมือ Microtremor และเครื่องมือ DPL ตามมาตรฐาน บริเวณใกล้เคียงกันเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง



รูปที่ 4 โครงสร้างระบบ 2 ชั้นทาง

4.1 ลักษณะของพื้นที่ทำการทดสอบ

การศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษาและเก็บข้อมูลบริเวณการก่อสร้างชั้นทางจำนวน 2 แปลงทดสอบ ประกอบด้วยแปลงทดสอบ BH1 และ BH2 ซึ่งอยู่บริเวณในโครงการเดียวกัน ดังแสดงหน้าตัดแบบแปลนแปลงทดสอบในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบแปลนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 6 ลักษณะบริเวณพื้นที่ทดสอบ

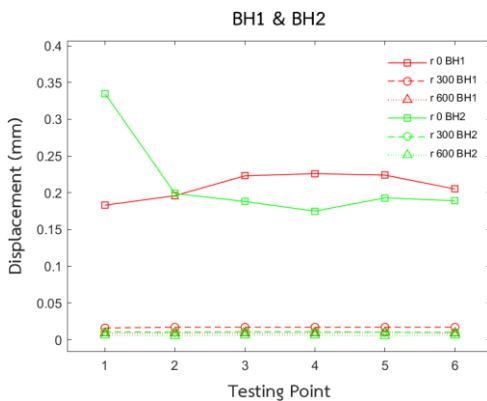
5. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากข้อมูลผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจำนวน 2 แปลง ทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ LWD จะแสดงไว้ในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงถึงค่าการทรุดตัวที่ผิวจากการทดสอบของแปลงทดสอบ BH1 และ BH2 โดยที่ค่าการทรุดตัวที่สามารถนำไปคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางต่อไป สรุปลงในตารางที่ 1

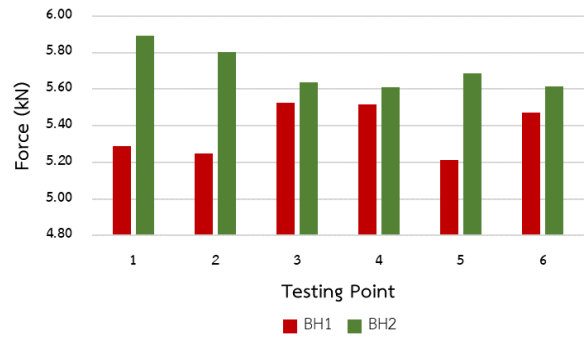
การประเมินความแข็งแรงของระบบชั้นทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ LWD ในการศึกษาจะนำไปสอบเทียบรวมกับการทดสอบอื่นๆ ประกอบด้วย เครื่องมือ DPL และเครื่องมือ Microtremor ดังสรุปลงในตารางที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ

5.1 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ LWD

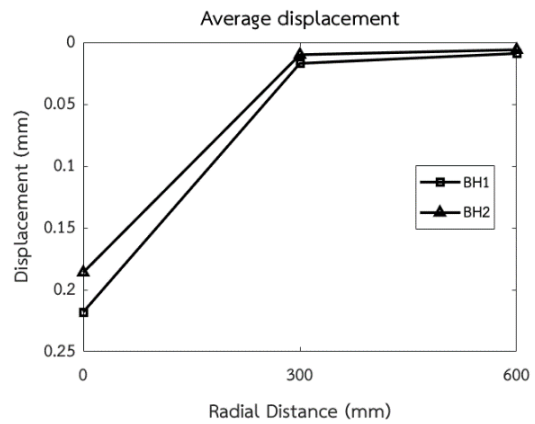
ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามจะสรุปลงไว้ในรูปที่ 7 และ 8 แสดงค่าการทรุดตัวที่ผิวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นในแนวนอนที่มีจากจุดทดสอบที่ระยะ 30 ซม. และ 60 ซม. โดยเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบปล่อยค้อนน้ำหนักและใช้ค่าเฉลี่ยของจุดทดสอบทั้ง 6 จุด เป็นค่าการทรุดตัวที่ผิวของโครงสร้างชั้นทาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 7 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบ BH1 และ BH2



รูปที่ 8 แรงกระทำจากเครื่องมือ LWD ของการทดสอบ



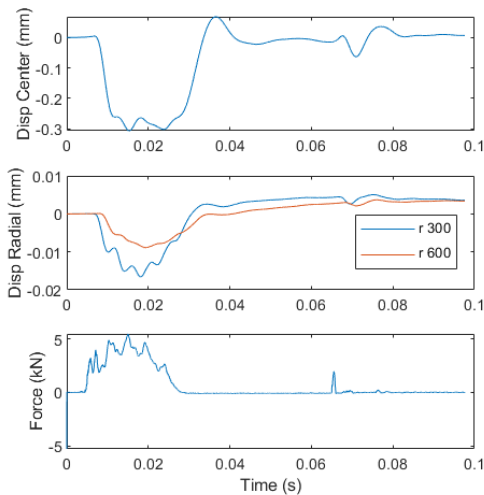
รูปที่ 9 แอ่งการแอ่นตัวที่ระยะเซนเซอร์ต่างๆ

จากผลการทดสอบค่าการทรุดตัวจากเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นเพิ่มเติมในแนวนอนมีจำนวน 2 ตัว ที่ระยะห่างจากจุดทดสอบ 300 มิลลิเมตร และ 600 มิลลิเมตร บนแปลงทดสอบทั้ง 2 ลักษณะ (รูปที่ 6) พบว่าค่าการทรุดตัวเฉลี่ยตำแหน่งที่มากที่สุดจะอยู่บริเวณใต้จุดน้ำหนักกระทำ โดยจะแสดงรูปแอ่งการแอ่นตัว (Deflection bowl) ดังรูปที่ 9 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์และประเมินโมดูลัสของระบบ 2 ชั้นทาง จากข้อมูลการทรุดตัวที่ได้สามารถคำนวณย้อนกลับโดยทฤษฎีอีลาสติกร่วมกับหลักการ Optimization จะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการประเมินด้วยเครื่องมือ LWD ของแปลงทดสอบ BH1 และ BH2 จะสรุปลงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง ที่ได้จากเครื่องมือ LWD

แปลงทดสอบ	จุดทดสอบ	วัสดุ	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ความหนา h (mm)
BH1	1	ดินลูกรัง	207.5	138.5	188
	2	ดินลูกรัง	230.8	84	184
	3	ดินลูกรัง	151.7	126.8	179
	4	ดินลูกรัง	207.5	138.5	187
	5	ดินลูกรัง	205	88	202
	6	ดินลูกรัง	129	104	150
BH2	1	หินคลุก	124	61	276
	2	หินคลุก	180	133	161
	3	หินคลุก	178.3	94.4	239
	4	หินคลุก	257	196	269
	5	หินคลุก	219.7	173.8	167
	6	หินคลุก	263.1	118.7	220

** E_1 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก, E_2 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง



รูปที่ 10 ผลการทดสอบสองที่ได้จากเครื่องมือ LWD

5.2 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Dynamic Probing Light

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL ตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 จะถูกบันทึกเป็นจำนวนครั้งของการตอกต่อ 10 ซม. โดยจะทำการทดสอบบริเวณพื้นที่ข้างเคียงกับการทดสอบอื่นๆ จำนวน 1 จุดในแต่ละแปลงทดสอบถึงระดับความลึกประมาณ 1 เมตร ซึ่งผลการทดสอบประกอบด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สามารถคำนวณได้จากค่า N_{60} และค่าความหนาของชั้นทาง สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการตอก ซึ่งจะอนุมานได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป ดังสรุปไว้ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบ BH1

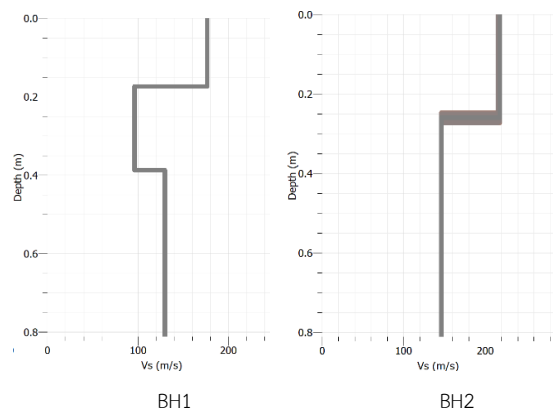
Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/10cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft) [7]	$E_{s,Sand} = 1.5N_{60}$ (MPa) [8]
100	18	26	39
200	11	16	24
300	11	16	24
400	20	29	43
500	20	29	43
600	17	24	36
700	13	19	28
800	11	16	24
900	10	14	21
1000	4	6	9

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบ BH2

Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/10cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft) [7]	$E = 1.2(N_{60} + 6)$ (MPa) [9]
100	23	33	47
200	23	33	47
300	15	21	33
400	15	21	33
500	15	21	33
600	9	13	23
700	8	11	21
800	5	7	16
900	4	6	14

5.3 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor

จากข้อมูลคลื่นตามธรรมชาติที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง ในการศึกษานี้จะติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดความเร็วคลื่น (Geophone) เป็นวงกลมจำนวน 3 ตัว ที่รัศมี 1 เมตร โดยผลการทดสอบจะสรุปไว้ดังรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเนื่องกับความลึก



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเนื่องกับความลึก

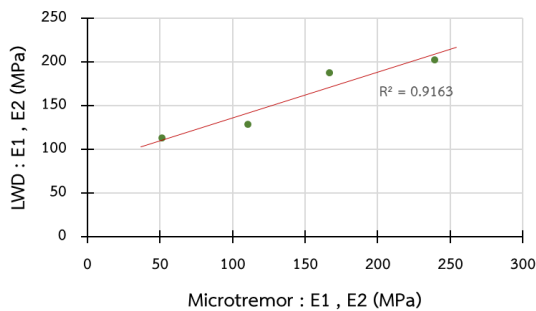
ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor

แปลงทดสอบ	ความหนา (m)	V _{s1} (m/s)	V _{s2} (m/s)	G _{max1} (MPa)	G _{max2} (MPa)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)
BH1	0.165	177	98.5	62.6	19.4	167	52
BH2	0.260	212	144	89.9	41.5	239	110

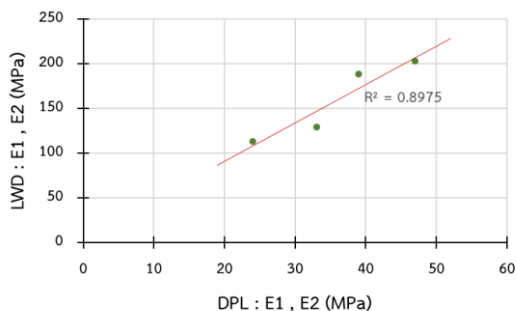
** E₁ คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก, E₂ คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง

5.4 การเปรียบเทียบผลการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง

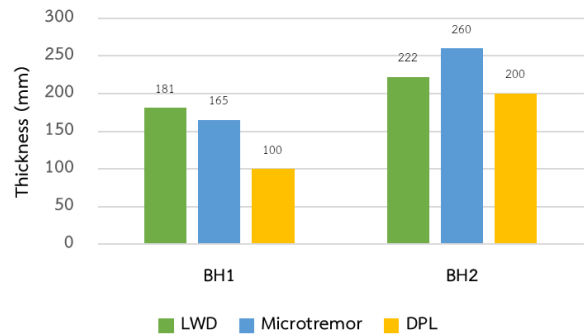
จากผลการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ LWD และประเมินความแม่นยำร่วมกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor และ DPL บนแปลงทดสอบทั้ง 2 ลักษณะ ได้แก่ BH1 และ BH2 ซึ่งตัวแปรที่ได้จากการประเมินประกอบด้วย โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก (E₁) โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง (E₂) และความหนาของชั้นทางชั้นแรก (h) โดยที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD จะเป็นค่าเฉลี่ยทั้ง 6 จุดในแต่ละแปลงทดสอบ สำหรับเครื่องมือมาตรฐานที่นำมาประเมินความแม่นยำ ได้แก่ เครื่องมือ Microtremor และ DPL จะทำการทดสอบจำนวน 1 จุด ของแต่ละแปลงทดสอบ ดังนั้นจากผลการศึกษาจะเห็นว่าผลการประเมินที่ได้จากเครื่องมือ LWD มีแนวโน้มไปในทิศทางที่เหมือนกันและมีความสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor แต่มีการแกว่งตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องมือ DPL ดังรูปที่ 12 13 และ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD และ Microtremor



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD และ DPL



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบความหนาชั้นทางที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD Microtremor และ DPL

6. บทสรุป

การศึกษาในครั้งนี้ได้พัฒนาเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นเพิ่มเติม เพื่อประเมินโมดูลัสของระบบ 2 ชั้นทาง จากการคำนวณและวิเคราะห์ตามทฤษฎีออสติก และสอบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ Microtremor และ DPL ตามมาตรฐาน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้นโครงสร้างทางที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor โดยมีการกระจายตัวของข้อมูล R₂ 0.92 แต่มีการแกว่งตัวมากขึ้นเมื่อสอบเทียบกับเครื่องมือ DPL R₂ 0.90 นอกจากนี้ผลการประเมินความหนาของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD ซึ่งอนุมานได้ว่ามีความแม่นยำและสอดคล้องกันกับการทดสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐานอื่น โดยจะเห็นว่าข้อมูลบางส่วนที่กระจายตัวออกจากเส้นแนวโน้ม เนื่องจากข้อมูลที่สนใจอยู่ในช่วงความถี่ระดับต้นทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากหลายๆปัจจัย เช่น ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น อย่างไรก็ตามบทความนี้ได้นำเสนอเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นเพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ในแนวรัศมีที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตร จากจุดทดสอบ พร้อมกับวิธีการวิเคราะห์และประเมินผลโดยวิธีการคำนวณย้อนกลับร่วมกับหลักการ Optimization ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์และศักยภาพที่ดีของเครื่องมือ LWD ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้ประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทางในประเทศไทยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fleming, P. R., Frost, M. W., & Lambert, J. P. (2007). Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness. *Transportation Research Record*, 2004(1), 80-87.
- [2] Akbariyeh, N. (2015). A new technique for the estimation of the elastic moduli of pavement layers from light weight deflectometer data. The University of Texas at Arlington.
- [3] Poovarodom, N., & Plalinyot, N. (2013). Site characterization in the Greater Bangkok area by microtremor

- observations. *Journal of earthquake engineering*, 17(2), 209-226.
- [4] Butcher, A. P., McElmeel, K., & Powell, J. J. M. (1996). Dynamic probing and its use in clay soils. In Proceedings of the international conference on Advances in site investigation practice, (Craig C.(eds)). Thomas Telford, London (pp. 383-395).
- [5] Huang, Y. H. (1969). Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory. *Highway Research Record*, (291).
- [6] Fwa, T. F., & Rani, T. S. (2005). Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. *Transportation research record*, 1905(1), 117-127.
- [7] Jarushi, F. H., Hamuda, S. S., & Aldawi, M. Correlation between the Standard Penetration Test and the Dynamic Cone Penetration Test for Sandy Soil.
- [8] Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design* (No. EPRI-EL-6800). Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group.
- [9] Bowles, J.E. (1988). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.316-317.