

การประเมินโมดูลัสของชั้นทางจาก Light Weight Deflectometer ที่มีเซนเซอร์เพิ่มเติมในแนวรัศมี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pavement modulus determination by Light Weight Deflectometer with optional radial
sensors



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

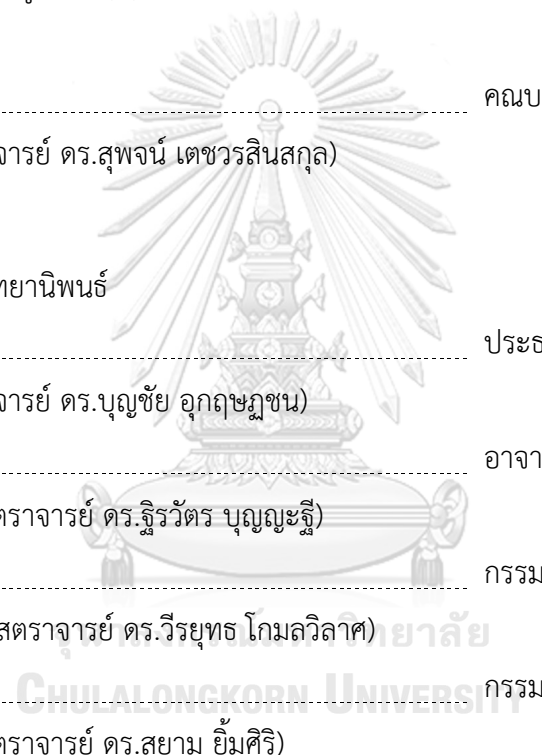
Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินโมดูลัสของชั้นทางจาก Light Weight Deflectometer ที่มีเซนเซอร์เพิ่มเติมในแนวรัศมี
โดย	นายฐิติพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)	กรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)	



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฐิติพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล : การประเมินโมดูลัสของชั้นทางจาก Light Weight Deflectometer ที่มีเซนเซอร์เพิ่มเติมในแนวนรัศมี. (Pavement modulus determination by Light Weight Deflectometer with optional radial sensors)
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิรวัตร์ บุญญะฐิติ

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370077321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

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

Thitipat Rungpattanachaikul : Pavement modulus determination by Light
Weight Deflectometer with optional radial sensors. Advisor: Assoc. Prof.
TIRAWAT BOONYATEE, Ph.D.

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.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตถ์ บุญญะฐิฐี ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความอนุเคราะห์และเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้



ฐิทธิพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 โครงสร้างชั้นทางแบบผิวยืดหยุ่น (Flexible Pavement).....	6
2.1.1 ชั้นผิวทาง (Surface Layer).....	7
2.1.2 ชั้นพื้นทาง (Base Course).....	7
2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course)	8
2.1.4 ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Materials).....	8
2.1.5 ชั้นดินเดิมหรือดินคันทาง (Subgrade)	8
2.2 โครงสร้างชั้นทางแบบผิวแข็ง (Rigid Pavement).....	8
2.3 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer	9

2.3.1	หลักการของเครื่องมือ Light Weight Deflectometer	12
2.3.2	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer	13
2.4	เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ที่มีจีโอโฟนในแนวรัศมี.....	14
2.4.1	เครื่องมือ Prima 100 LWD	15
2.5	การตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation).....	16
2.6	เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light).....	16
2.7	การวิเคราะห์ผลตอบสนองของผิวทางและโครงสร้างทางภายใต้น้ำหนักบรรทุก	17
2.7.1	หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง.....	17
2.7.2	ทฤษฎีของ Boussinesq.....	19
2.7.3	ระบบ 2 ชั้นทาง (Two - Layer Systems).....	21
2.8	หลักการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation).....	25
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
2.9.1	เครื่องมือ Light Weight Deflectometer	27
2.9.2	เครื่องมือ Dynamic Probing Light.....	32
2.9.3	การทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือน	34
บทที่ 3	วิธีการศึกษาและแผนการดำเนินงาน	36
3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	36
3.1.1	เครื่องมือ Light Weight Deflectometer	36
3.1.2	เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light)	39
3.1.3	เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor)	41
3.2	ลักษณะของพื้นที่ที่ทำการทดสอบ.....	41
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	44
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	45

4.1 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ LWD	45
4.2 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Dynamic Probing Light	57
4.3 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor.....	62
4.4 ผลการเปรียบเทียบการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทาง	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 การเปรียบเทียบการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง	73
5.2 การนำไปใช้และข้อจำกัดของการศึกษา.....	76
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามของเครื่องมือ Light Weight Deflectometer แต่ละแปลงทดสอบ.....	82
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามของเครื่องมือ Dynamic Probing Light แต่ละแปลงทดสอบ.....	88
ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องมือ LWD ประเภทต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2 เครื่องมือ LWD ชนิดต่างๆ ในอดีต.....	27
ตารางที่ 3 แสดงสมการเชิงประสพการณ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL และ SPT (ชนกฤต โรจนชัยศรี ,2553)	32
ตารางที่ 4 รายละเอียดของเครื่องมือ Dynamic Probing ประเภทต่างๆ (EN ISO 22476-2, 2013)	33
ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{60} และ E_s (Bowles, 1988).....	34
ตารางที่ 6 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือ LWD	38
ตารางที่ 7 ข้อมูลของเครื่องมือ Dynamic Probing Light	39
ตารางที่ 8 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง ที่ได้จากเครื่องมือ LWD	53
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 1	60
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 2	60
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 3	61
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 6	61
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor	64
ตารางที่ 14 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง	68

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 การบดอัดวัสดุโครงสร้างทาง	2
รูปที่ 2 การทดสอบ Plate load test (New Zealand Geotechnical Society)	2
รูปที่ 3 การทดสอบดัมพ์น้ำหนักกระแทก (อัคคัพฒน์ สว่างสุรีย์ และคณะ, 2563)	3
รูปที่ 4 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (a) รายละเอียดของเครื่องมือ (Roksana, 2019)	4
รูปที่ 5 การกระจายน้ำหนักบรรทุกของผิวทางแบบยึดหยุ่น (After Huang, 1993).....	7
รูปที่ 6 กระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ชั้นคันทาง (ที่มา : https://pavementinteractive.org)	9
รูปที่ 7 เครื่องมือ LWD แบบมาตรฐาน.....	10
รูปที่ 8 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ในอดีต	11
รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของเครื่องมือ LWD (Mooney & Miller, 2009)	13
รูปที่ 10 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นจำนวน 2 ตัว (Senseny & Mooney, 2010).....	15
รูปที่ 11 เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor).....	16
รูปที่ 12 เครื่องมือการตอกหยั่งแบบเบา.....	17
รูปที่ 13 ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง (Planning and Design of Airports, 2010).....	18
รูปที่ 14 น้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลมบนวัสดุแบบ Semi-Infinite Half Space (Huang, 1993).....	20
รูปที่ 15 ระบบสองชั้นทาง (Huang, 1969).....	21
รูปที่ 16 ความแตกต่างระหว่างแผ่นจานโลหะแบบยึดหยุ่นและแบบแข็ง (Huang, 1969).....	22
รูปที่ 17 ระบบชั้นทางเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบวงกลม (Huang, 1969)	22

รูปที่ 18 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Fwa & Rani, 2005; Pierce & Mahoney, 1996)	25
รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงใต้แผ่นงานโลหะกับการทรุดตัว (Fleming et al., 2009).....	28
รูปที่ 20 เครื่องมือ LWD แบบมาตรฐาน	29
รูปที่ 21 หน้าตัดการทดสอบ (a) หน้าตัดทรายแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกัน TB1 (b) ทรายแข็งปานกลาง อยู่เหนือดินเหนียวอ่อน (TB2).....	30
รูปที่ 22 (a) แอ่งการแอ่นตัวที่ระยะต่างๆของ TB1-1 (b) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ระยะต่างๆของ TB1-1	31
รูปที่ 23 แอ่งการแอ่นตัวและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะต่างๆของ TB2-1 สำหรับตุ้มน้ำหนัก 10 kg	31
รูปที่ 24 เครื่องมือ LWD ที่มีจีไอโฟนในแนวรัศมี.....	37
รูปที่ 25 รายละเอียดเครื่องมือ LWD.....	37
รูปที่ 26 เครื่องมือ Dynamic Probing Light	40
รูปที่ 27 รายละเอียดของเครื่องมือ Dynamic Probing Light.....	40
รูปที่ 28 (a) วิธีการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Okada, 2006) (b) เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว	41
รูปที่ 29 แบบแปลนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	42
รูปที่ 30 ตัวอย่างวัสดุแบบเชื่อมแน่น	42
รูปที่ 31 ตัวอย่างวัสดุแบบไม่เชื่อมแน่น	43
รูปที่ 32 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 1.....	46
รูปที่ 33 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 2.....	46
รูปที่ 34 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 1.....	47
รูปที่ 35 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 2.....	47
รูปที่ 36 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 3.....	48

รูปที่ 37 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 1.....	48
รูปที่ 38 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 2.....	49
รูปที่ 39 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 3.....	49
รูปที่ 40 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 5 ตำแหน่ง 1	50
รูปที่ 41 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 5 ตำแหน่ง 2	50
รูปที่ 42 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 6 ตำแหน่งที่ 1.....	51
รูปที่ 43 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 6 ตำแหน่งที่ 2.....	51
รูปที่ 44 แรงกระทำจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD.....	52
รูปที่ 45 แอ่งการแอ่นตัวที่ระยะจีโอโฟนต่างๆ ในแนวรัศมี	52
รูปที่ 46 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 1.....	54
รูปที่ 47 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 2.....	54
รูปที่ 48 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 3.....	55
รูปที่ 49 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 4.....	55
รูปที่ 50 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 5.....	56
รูปที่ 51 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 6.....	56
รูปที่ 52 ผลการตอบสนองที่ได้จากเครื่องมือ LWD ที่มีจีโอโฟนเพิ่มเติมในแนวรัศมี	57
รูปที่ 53 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 1	58
รูปที่ 54 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 2	58
รูปที่ 55 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 3	59
รูปที่ 56 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 6	59
รูปที่ 57 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 1	62
รูปที่ 58 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 2.....	62
รูปที่ 59 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 3.....	63

รูปที่ 60 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 4	63
รูปที่ 61 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 5	64
รูปที่ 62 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 6	64
รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 1	65
รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 2	66
รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 3	66
รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 4	67
รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 5	67
รูปที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 6	68
รูปที่ 69 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากการทดสอบด้วย เครื่องมือ LWD และ Microtremor	69
รูปที่ 70 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากผลการทดสอบด้วย เครื่องมือ LWD และ DPL.....	69
รูปที่ 71 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นแรก (E_1) ของวัสดุโครงสร้างทางแบบไม่เชื่อม แน่น	70
รูปที่ 72 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นสอง (E_2) ของวัสดุโครงสร้างทางแบบไม่เชื่อม แน่น	70
รูปที่ 73 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นแรกของ (E_1) โครงสร้างทางแบบเชื่อมแน่น..	71
รูปที่ 74 แผนภูมิแท่งการเปรียบเทียบความหนาชั้นทางที่ได้กับเครื่องมือมาตรฐาน	71

บทที่ 1

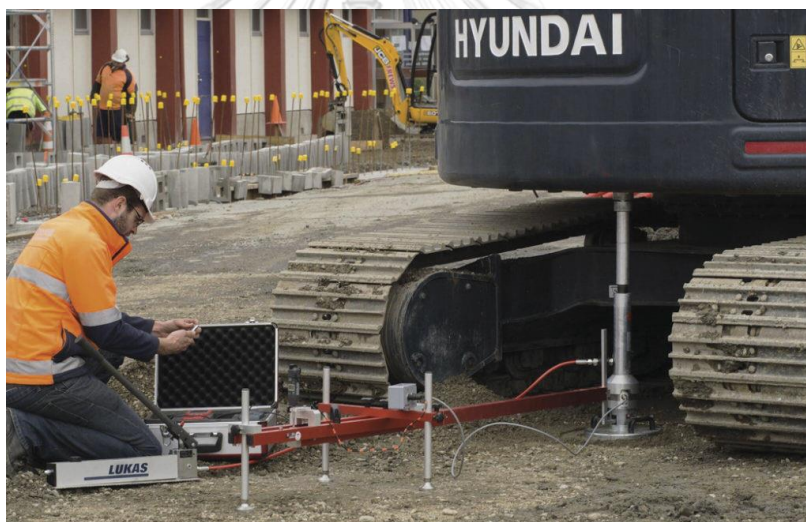
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

การก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางจำเป็นต้องมีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการบดอัดให้ดี ข้อมูลพื้นฐานหนึ่งที่สำคัญต่อการออกแบบซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของวัสดุ ซึ่งมีอิทธิพลในการกระจายหน่วยแรง (Stress) จากผิวบนไปยังผิวล่าง โดยค่านี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความหนาที่เหมาะสมของชั้นวัสดุโครงสร้างทาง เพราะวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงหมายความว่ามีความสามารถในการกระจายความเค้นได้ดี ทั้งนี้ถ้าออกแบบความหนามากเกินไปจะทำให้เปลืองงบประมาณโดยไม่จำเป็นในทางกลับกันถ้าออกแบบความหนาไม่เพียงพอจะทำให้ถนนชำรุดก่อนเวลาที่คาดการณ์ไว้ ในอดีตที่ผ่านมามักใช้วิธีเชิงประสบการณ์ ข้อมูลความแข็งแรงจะถูกประเมินโดยการขุดเจาะและเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ผลกระทบคือไม่สามารถทำนายอายุการใช้งานของถนนได้เนื่องจากไม่ได้ใช้หลักทางกลศาสตร์ของวัสดุมาคำนวณ ในปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและคำนวณมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น การนำค่าทางกลศาสตร์ของวัสดุเช่น 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 มีขนาดใหญ่จึงเหมาะกับการทดสอบบนถนนหรือ พื้นที่ที่สามารถลากจูงอุปกรณ์เข้าไปทดสอบได้ สำหรับพื้นที่ที่ไม่สะดวกต่อการนำอุปกรณ์ขนาดใหญ่เข้าไปทดสอบนั้นอาจจะทดสอบได้จากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งมีหลักการทำนองเดียวกันกับ FWD แต่มีความสามารถในการสร้างแรงกระทำน้อยกว่า



รูปที่ 1 การบดอัดวัสดุโครงสร้างทาง



รูปที่ 2 การทดสอบ Plate load test (New Zealand Geotechnical Society)



รูปที่ 3 การทดสอบต้อมน้ำหนักกระแทก (อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ และคณะ, 2563)

เนื่องจากอุปกรณ์ LWD แบบมาตรฐานมีขนาดเล็กและประมวลผลจากแรงและการทรุดตัวของแผ่นฐานเท่านั้น การวิเคราะห์จึงทำได้ภายใต้สมมติฐานที่ไม่ซับซ้อน เช่น ชั้นดินที่รองรับแผ่นฐานจะต้องเป็นวัสดุเนื้อเดียว ภายหลังจึงได้มีการนำเซนเซอร์วัดการเคลื่อนตัวมาติดตั้งเพิ่มเติมในแนวรัศมีเพื่อนำค่าตรวจวัดที่ได้ไปใช้เป็นเงื่อนไขควบคุมสำหรับการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างชั้นทางที่ซับซ้อนขึ้น แต่อุปกรณ์ในลักษณะดังกล่าวยังมีการศึกษาไม่มากนักในประเทศไทย ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ LWD ที่มีการติดตั้งมาตรวัดเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทางในประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการนำเครื่องมือ LWD ที่มีเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นไปใช้สำหรับการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทางในประเทศไทย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. การศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะระบบ 2 ชั้นทาง

2. โดยวัสดุชั้นแรกจะต้องมีความหนาไม่เกิน 45 เซนติเมตร เนื่องจากข้อจำกัดด้านพลังงานของเครื่องมือ



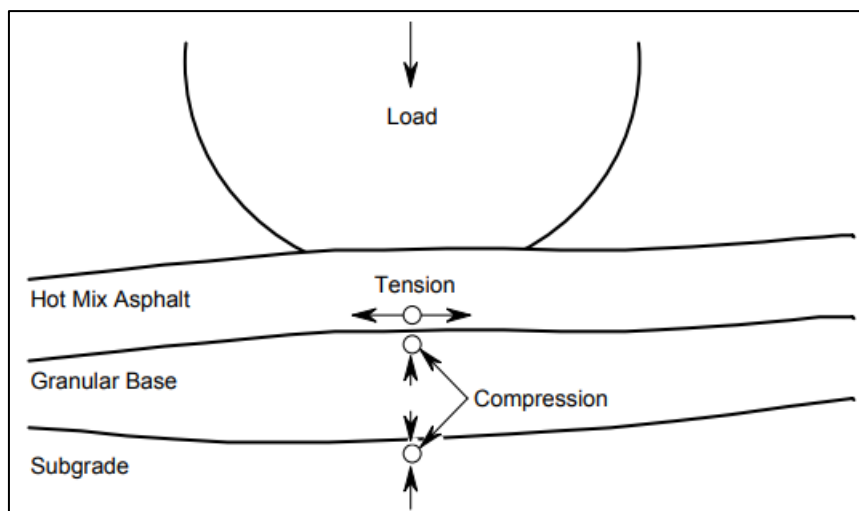
บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ได้ทำการประเมินค่าโมดูลัสของระบบชั้นทางจากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer ที่มีเซนเซอร์เพิ่มเติมในแนวรัศมี สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายถูกพัฒนาโดย The U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (WES) ในปี ค.ศ. 1950 (Grau & Alexander, 1994) ซึ่งการทดสอบแบบไม่ทำลายในลักษณะนี้ได้รับความนิยมมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาและมีการศึกษาจำนวนมากขึ้น บทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออ้างถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้ เนื่องจากอุปกรณ์ LWD แบบมาตรฐาน ประมวลผลจากแรงและการทรุดตัวที่ผิวของแผ่นฐานเท่านั้น การวิเคราะห์จึงทำได้ภายใต้สมมติฐานที่ไม่ซับซ้อน เช่น วัสดุที่รองรับแผ่นฐานจะต้องเป็นวัสดุเนื้อเดียว จึงไม่ได้โมดูลัสที่แท้จริงของโครงสร้างชั้นทาง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ LWD ติดตั้งจีโอโฟนเพิ่มเติมในแนวรัศมี เพื่อให้สามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สำหรับวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันให้ดีขึ้น

2.1 โครงสร้างชั้นทางแบบผิวยืดหยุ่น (Flexible Pavement)

ปัจจุบันถนนทางหลวงผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) มีจำนวนมากในประเทศไทย ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของโครงสร้างถนนลาดยางและมีลักษณะเป็นระบบชั้นทางที่มีวัสดุต่างชนิดทับซ้อนกันเป็นชั้นๆ (Layered system) โดยมีองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ชั้นผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต (Surface Layer) ชั้นพื้นทาง (Base Course) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Layer) และชั้นวัสดุถมคันทาง (Subgrade) ดังแสดงในรูปที่ 5 โครงสร้างถนนลาดยางออกแบบให้มีชั้นผิวทางจราจรซึ่งมีหน่วยแรงที่มีความเข้มสูงมีหน้าที่ในการรับน้ำหนักบรรทุกโดยตรงจากยานพาหนะแล้วกระจายหน่วยแรงในแนวตั้งลดลงสู่ชั้นโครงสร้างข้างล่างต่อไป ดังนั้นจึงต้องจัดสรรให้วัสดุที่มีคุณภาพที่ดีที่สุดในชั้นผิวทาง (Huang, 2002)



รูปที่ 5 การกระจายน้ำหนักบรรทุกของผิวทางแบบยึดหยุ่น (After Huang, 1993)

2.1.1 ชั้นผิวทาง (Surface Layer)

ชั้นผิวทางเป็นชั้นที่มีพื้นผิวสัมผัสกับน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะโดยตรงประกอบไปด้วยวัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดในความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งปกติมักจะใช้เป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) มีคุณลักษณะหลายประการดังนี้

- มีลักษณะเฉพาะ เช่น มีความเสียดทาน เรียบ และระบายน้ำได้ เป็นต้น
 - สามารถป้องกันน้ำเพื่อไม่ให้น้ำไหลซึมเข้าไปสู่ชั้นพื้นทาง (Base) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นดินเดิม (Subgrade)
 - มีความทนทานภายใต้การจราจรและป้องกันการลื่นไถล
- นอกจากนี้ชั้นผิวทางยังสามารถแบ่งออกเป็นชั้นย่อยดังนี้

- (1) Wearing Course คือชั้นที่อยู่บนสุดมีผิวสัมผัสกับยานพาหนะซึ่งวัสดุชั้นนี้สามารถถูกทำให้หลุดออกได้ง่ายเนื่องจากการจราจร ด้วยเหตุผลนี้ทำให้มีการบูรณะซ่อมแซมบ่อยที่สุด

2.1.2 ชั้นพื้นทาง (Base Course)

ชั้นที่มีวัสดุอยู่ด้านล่างชั้นผิวทาง โดยมีหน้าที่ในการรับน้ำหนักจากชั้นผิวทางช่วยกระจายน้ำหนักและระบายน้ำใต้ผิวดิน ซึ่งชั้นนี้จะประกอบไปด้วยวัสดุที่แข็งแรง เช่น หินคลุก กรวด โดยวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างต้องมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80 % Modified Proctor ตามการออกแบบ AASHTO และการบดอัดต้องมี Density และ Stability สูงตามที่ออกแบบ

2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course)

ชั้นที่มีวัสดุอยู่ใต้ชั้นพื้นทางซึ่งมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักจากชั้นพื้นทางลงสู่ชั้นถัดไป ปรับปรุงการระบายน้ำ และป้องกันความชื้นจากใต้ผิวดินเดิม เป็นต้น โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้สำหรับชั้นนี้ จะมีคุณภาพด้อยและถูกกว่าชั้นพื้นทางในประเทศไทยจะใช้ลูกรัง หรือ ทราย ในกรณีที่ดินเดิม แข็งแรงมากสามารถไม่มีชั้นรองพื้นทางได้ แต่ในทางกลับกันหากดินเดิมอ่อนหรือมีคุณภาพไม่ดีก็ควรมีชั้นรองพื้นทางเพื่อช่วยกระจายน้ำหนัก

2.1.4 ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Materials)

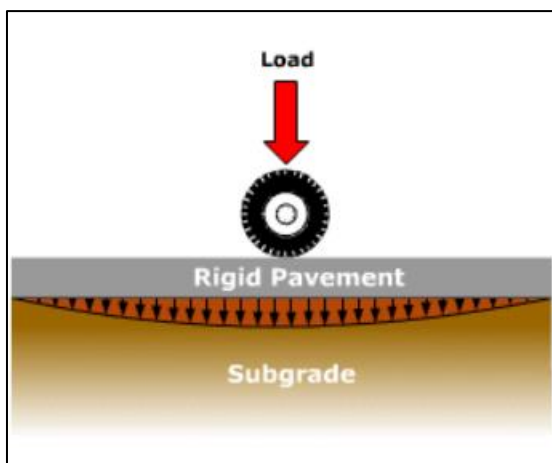
เป็นชั้นทางเลือกขึ้นอยู่กับการออกแบบโดยชั้นนี้มีหน้าที่ยกระดับถนนให้สูงขึ้นเพื่อให้พื้นระดับน้ำท่วมและลดหน่วยแรงในดินคันทาง เท่านั้น ซึ่งวัสดุที่นำมาก่อสร้างจะใช้วัสดุท้องถิ่นที่หาได้ง่ายตามพื้นที่หน้างานและมีราคาถูก แต่ต้องมีคุณสมบัติที่ดีกว่าดินเดิม

2.1.5 ชั้นดินเดิมหรือดินคันทาง (Subgrade)

เป็นชั้นดินเดิมหรือดินตามธรรมชาติโดยมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้าง ถนนทั้งหมด ซึ่งความหนาของชั้นโครงสร้างทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นดินเดิม การเริ่มดำเนินการก่อสร้างจะต้องมีการถากถางและถอนตอวัชพืชออกให้หมด (Clearing and Grubbing) แล้วรื้อไถชั้นดินลงอีกประมาณ 15 – 20 เซนติเมตร และทำการบดอัดให้แน่น

2.2 โครงสร้างชั้นทางแบบผิวแข็ง (Rigid Pavement)

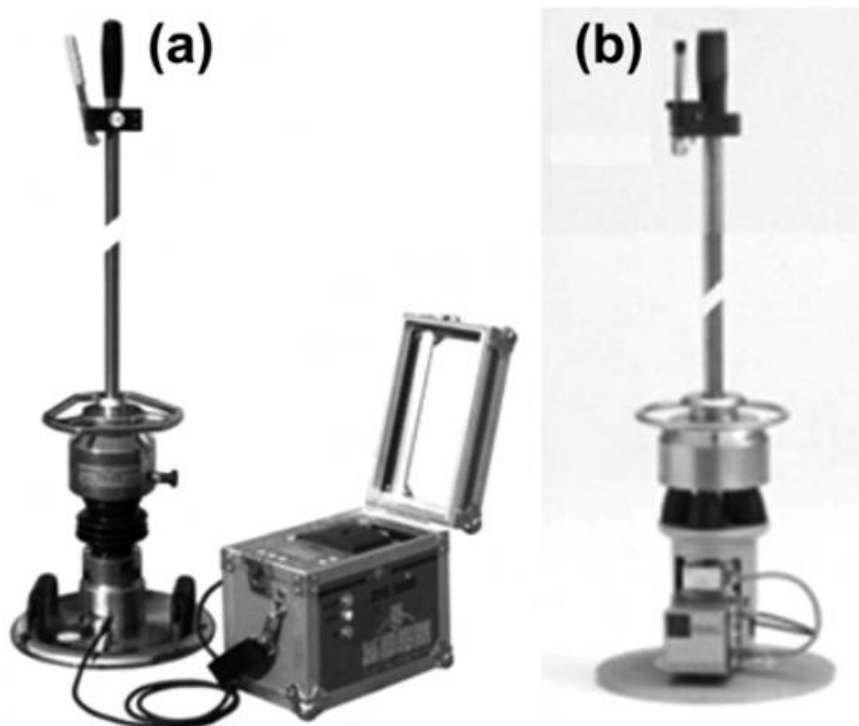
ผิวทางแบบแข็งประกอบด้วยผิวทางคอนกรีต (Portland Cement Concrete) มีความแข็งแรงมากกว่าผิวทางแบบยืดหยุ่นเนื่องจากมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สูง ซึ่งจะเห็นว่าคอนกรีตจะเป็นชั้นที่รับน้ำหนักโดยตรงจากยานพาหนะและจะกระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ชั้นคันทาง (Subgrade) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระจายน้ำหนักบรรทุกทุกลงสู่ชั้นคันทาง (ที่มา : <https://pavementinteractive.org>)

2.3 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer หรือ LWD ดังแสดงรูปที่ 7 ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกเพื่อเป็นทางเลือกการทดสอบในสนามที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาการเข้าถึงพื้นที่คับแคบโดย Federal Highway Research Institute ในปี ค.ศ.1981 ที่เมือง Magdeburg ประเทศเยอรมัน (Elhakim et al., 2014) ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) ใช้งานง่าย สะดวกพกพาได้และสามารถใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียว เครื่องมือ LWD พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญที่ใช้ออกแบบระบบโครงสร้างชั้นทางสำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกา เทคโนโลยีที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ LWD นั้นมีหลักการเดียวกันกับเครื่องมือ FWD ความแตกต่างระหว่างเครื่องมือ LWD กับ FWD ที่เห็นได้ชัดคือเครื่องมือ LWD ใช้ตุ้มน้ำหนักที่เบาและระยะตกกระแทกที่สั้นกว่าเครื่องมือ FWD (Fleming et al., 2007; Senseney & Mooney, 2010) เครื่องมือ LWD ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ 1) ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยการ์ดรับข้อมูล National Instrument USB, เซนเซอร์ตรวจวัดน้ำหนัก (Load cell), เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และคอมพิวเตอร์ 2) ชั้นส่วนกลไกประกอบด้วยแผ่นจานโลหะ (Plate) วงกลม โดยทั่วไปจะใช้แผ่นจานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม., 200 มม., และ 300 มม. 3) ตุ้มน้ำหนักตั้งแต่ 10 ถึง 20 กิโลกรัม, แขนนำร่อง (Guide Rod) มีความยาวประมาณ 90 เซนติเมตร เพื่อให้การทดสอบเป็นไปอย่างปลอดภัยตุ้มน้ำหนักควรจะถูกล็อกก่อนปล่อย



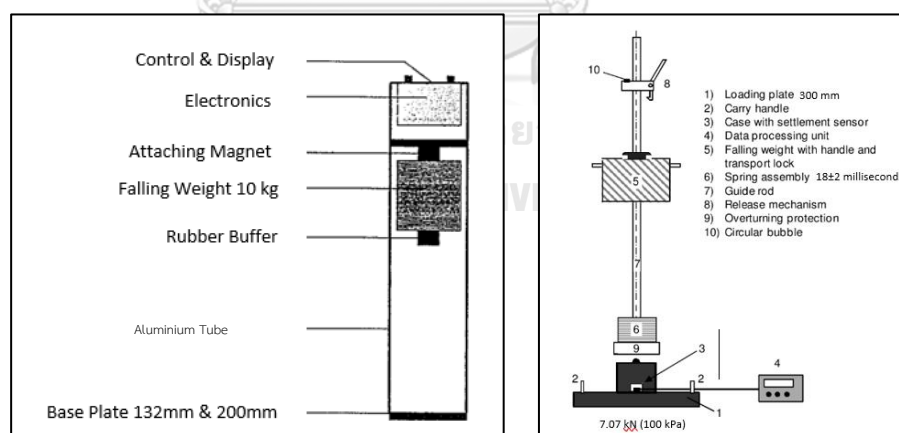
รูปที่ 7 เครื่องมือ LWD แบบมาตรฐาน

เมื่อลูกตุ้มกระทบแผ่นจานโลหะทรงกลม (Circular plate) การตอบสนองที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จำนวน 1 ตัว ตรงกลางแผ่นจานโลหะ (Plate) โดยส่วนใหญ่เครื่องมือ LWD จะมีเซนเซอร์วัดความเร่งเพียงตัวเดียวอยู่ตรงกลาง ดังนั้นตัวแปรเดียวที่สามารถตรวจวัดได้จากข้อมูลบันทึกคือโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของชั้นเดียว ซึ่งเมื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างหลายชั้นเครื่องมือ LWD จะสามารถประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบรวมๆ (Composite Modulus) ของวัสดุทั้งหมดที่อยู่ข้างล่าง หรือเรียกว่าค่าความแข็งแรงรวมของโครงสร้างชั้นทาง (Fleming et al., 2007)

ปัจจุบันมีการนำเสนอเครื่องมือ LWD ที่ได้พัฒนาขึ้นประเภทต่างๆ เช่น PRIMA 100 ซึ่งเป็นเครื่องมือ LWD ที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) จำนวน 2 ตัว เพื่อให้สามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างชั้นทางได้ในกรณีที่วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยจะทำให้สามารถทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องมือ LWD ประเภทต่างๆ

Manufacturer	Gros (1993) Loadman	German Federal (1993) GDP	Rogers et al, (1995) TFT	Carl Bro (2000) Prima LWD
Plate diameter (mm)	130, 200	150, 200, 300	100, 150, 200, 300	100, 200, 300
Plate mass (kg)	6.0	15	-	12.0
Drop mass (kg)	10.0	10	10, 15, 20	10, 15, 20
Drop height (m)	0.80	0.72	Variable	Variable
Damper	Rubber	Rubber	Rubber	Spring
Force measured	Yes	No	Yes	Yes
Plate response sensor	Accelerometer	Accelerometer	Accelerometer	Accelerometer
Impulse time (ms)	25-30	18-20	15-25	15-20
Max load (KN)	20	7.07	1-15	1-15
Contact stress	Rigid	Uniform	User def.	User def.
Poisson's ratio	0.50	0.50	User def.	User def.



a) Loadman (Livneh, 1997)

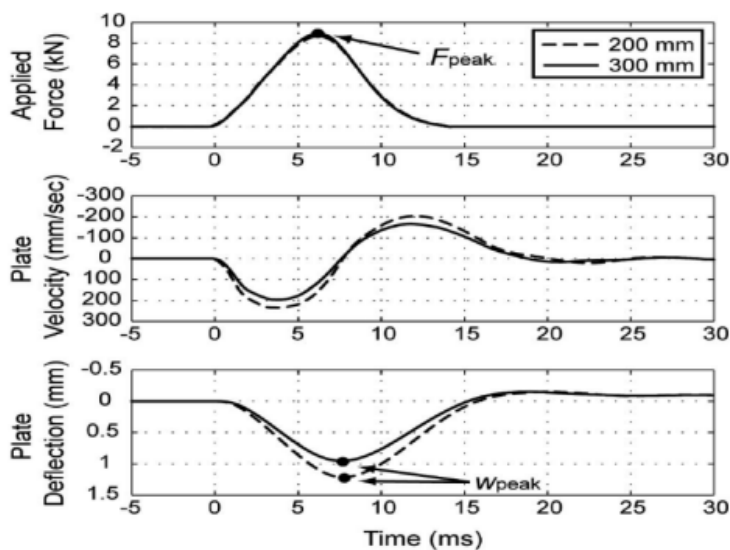
b) LWD (Fleming et al., 2000)

รูปที่ 8 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ในอดีต

2.3.1 หลักการของเครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer หรือ LWD ได้ถูกผลิตและพัฒนาในหลายหน่วยงาน ถึงแม้ว่าจะได้รับการพัฒนาจากหลายหน่วยงานแต่การวิเคราะห์ยังมุ่งเน้นไปในทิศทางเดียวกันคือนิยมศึกษาเฉพาะค่าการทรุดตัวสูงสุดหรือที่ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด โดยวิธีการลักษณะนี้เรียกว่าวิธีแบบไดนามิกจะสามารถประเมินคุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ สำหรับเครื่องมือ LWD จะใช้ตุ้มน้ำหนักตั้งแต่ 10 ถึง 20 กิโลกรัม ในระหว่างการทดสอบสามารถปรับระดับความสูงแกนนำร่อง (Guide Rod) ตั้งแต่ 10 ถึง 90 เซนติเมตร (Senseny & Mooney, 2010) อีกทั้งเครื่องมือ LWD จะมีความเค้น (Stress) สัมผัสที่ใต้แผ่นงานโลหะ (Plate) จากการตกกระทบของตุ้มน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 100 KPa โดยที่ค่าการทรุดตัวสามารถตรวจวัดได้โดยเซนเซอร์วัดความเร่งบริเวณกลางแผ่นงานโลหะทรงกลม จะเห็นว่าเครื่องมือ LWD แบบมาตรฐาน มีขนาดเล็กและประมวลผลจากแรงและการทรุดตัวใต้แผ่นงานโลหะเท่านั้น การวิเคราะห์จึงทำได้ภายใต้สมมติฐานที่ไม่ซับซ้อนมาก เช่น วัสดุที่รองรับจะต้องเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Layer) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางตามทฤษฎี Linear - elastic half space

ในการพิจารณาน้ำหนักแบบคงที่สำหรับทฤษฎีอีลาสติกสามารถวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบแบบไดนามิกในช่วงเวลานิ่งของน้ำหนักตกกระทบ โดยวิธีการทดสอบแบบไดนามิกดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์และประมวลผลจากแรงกระทำและการทรุดตัวสูงสุดในช่วงเวลานิ่งใต้แผ่นงานโลหะ ดังรูปที่ 9 เมื่อตุ้มน้ำหนักกระทบที่สปริงและถ่ายแรงลงสู่แผ่นงานโลหะ จะได้ว่าหน่วยแรงที่ผิวกระทำใต้แผ่นงานโลหะสมมติให้มีลักษณะเป็นหน่วยแรงคงที่ ซึ่งมีระยะเวลาในการกระจายแรงประมาณ 15 ถึง 30 มิลลิวินาที ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของสปริง โดยที่ค่าแรงกระทำต่อแผ่นงานโลหะทรงกลมจะถูกบันทึกโดยเซนเซอร์ตรวจวัดน้ำหนักที่กึ่งกลางของแผ่นงานโลหะและค่าการทรุดตัวที่ผิวของวัสดุ ถูกบันทึกด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง (Achenbach, 1999; Adam et al., 2004)



รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของเครื่องมือ LWD (Mooney & Miller, 2009)

2.3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer

การศึกษาในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมา การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องมือ LWD และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรที่ได้จากการทดสอบ เช่น ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และขนาดของแผ่นโลหะ (Plate) เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรแต่ก็ยังมีบางปัจจัยที่ไม่ได้รับการพูดถึง โดยรายละเอียดของปัจจัยเหล่านี้จะถูกกล่าวถึงในหัวข้อย่อยต่อไป

1) อุณหภูมิ

ในปี ค.ศ.2003 Augeri และ Colombrita ได้กล่าวว่าอุณหภูมิจะกลายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญหากอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 30 องศา ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งในกรณีของผิวทางแอสฟัลต์ (Flexible Pavement) ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงในการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าการทรุดตัวที่สมจริงและเหมาะสมในการออกแบบพื้นทาง

ในปี ค.ศ. 1986 AASHTO ได้แนะนำคู่มือ Design of Pavement Structures ฉบับปี ค.ศ. 1986 สำหรับออกแบบโครงสร้างพื้นทาง โดยแนะนำกระบวนการปรับแก้ค่าการทรุดตัวเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิไว้ดังสมการข้างล่างต่อไปนี้ ซึ่งในปี ค.ศ. 2002 Chang และคณะได้เสนอสมการสำหรับปรับแก้ค่าการทรุดตัวเนื่องจากอุณหภูมิไว้ดังนี้ (Chang et al., 2002)

$$(D_r)_i = F_i (D_0)_i \quad (2.1a)$$

โดยที่ D_r คือ ค่าการทรุดตัวที่ปรับแก้ตามอุณหภูมิ (mm)

D_0 คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ (mm)

F_i คือ Correction Factor

2) ปริมาณความชื้น

การตรวจวัดค่าการทรุดตัวของพื้นทางให้มีประสิทธิภาพ ปริมาณความชื้นเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าการทรุดตัว ในปี ค.ศ.2010 Tehrani และ Meehan ได้เสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มติระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น LWD กับ ปริมาณความชื้นในดิน โดยทั่วไปจะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณความชื้นลดลง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น การสังเกตนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปริมาณความชื้นเมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบ LWD

3) ขนาดของแผ่นจานโลหะ (Plate)

เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทดสอบ LWD ขนาดแผ่นจานโลหะจะเลือกให้ได้ความเค้นสัมผัสที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ดัมน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ใช้แผ่นจานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร สามารถสร้างความเค้นสัมผัสได้ 100 KPa บนชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นดินเดิม (Subgrade) ซึ่งเป็นการจำลองรถบรรทุกที่วิ่งผ่านด้วยความเร็วบนทางหลวง หากใช้แผ่นจานโลหะขนาด 200 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน ความเค้นสัมผัสจะเท่ากับ 200 KPa และความลึกประสิทธิผลของความเค้นจะถึงชั้นพื้นทาง (Base) เท่านั้น ซึ่งความลึกประสิทธิผลนั้นเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญมากเนื่องจากการกระจายน้ำหนักผ่านโครงสร้างชั้นพื้นทางมีความสำคัญมาก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาได้กล่าวไว้ว่าชุดตรวจวัดค่าการทรุดตัว จะมีความลึกประสิทธิผลเนื่องจากแรงกระทำที่ประมาณ 1 ถึง 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะ

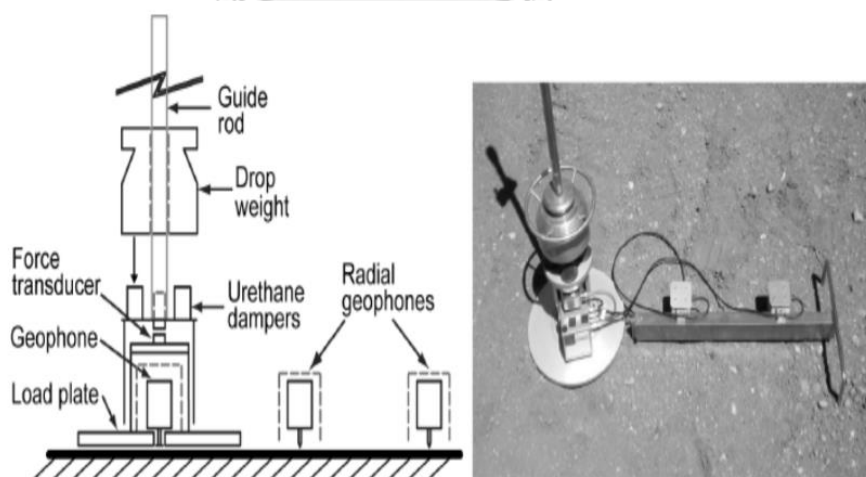
2.4 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ที่มีจีไอโฟนในแนวนอน

เครื่องมือ LWD แบบมาตรฐานหรือที่มีเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) อยู่ตรงกลางใต้แผ่นจานโลหะสามารถใช้เพื่อประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางที่ความลึกสูงสุด 1-1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจานโลหะ หากลักษณะชั้นทางที่ทำการทดสอบประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) เช่น ดินที่อัดแน่นหรือชั้นดินเดิม (Subgrade) โมดูลัส

ยึดหยุ่นที่ได้จะเป็นโมดูลัสยึดหยุ่นแท้จริงของชั้นทางนั้น ในทางตรงข้ามกันเมื่อนำเครื่องมือ LWD ไปทำการทดสอบบนโครงสร้างชั้นทางที่มีความซับซ้อนขึ้น ประกอบด้วยโครงสร้างหลายชั้นการประเมินโมดูลัสของชั้นทางจะทำได้ยากขึ้น ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการประเมินโมดูลัสชั้นทางที่ได้จะเป็นโมดูลัสแบบรวมๆของวัสดุความลึกนั้น ซึ่งโมดูลัสที่แท้จริงนั้นจะไม่สามารถระบุได้ ดังนั้นในกรณีนี้การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) ตามแนวรัศมีจากจุดที่น้ำหนักกระทำจะเป็นประโยชน์ต่อการทดสอบหาความแข็งแรงของโครงสร้างทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของวัสดุโครงสร้างชั้นทางหลายชั้น (Akbariyeh, 2015)

2.4.1 เครื่องมือ Prima 100 LWD

เครื่องมือ Prima 100 LWD เป็นเครื่องมือ LWD แบบหนึ่งติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นเพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งพัฒนาโดย Keros Technology and Carl Bro ประเทศเดนมาร์ก มีน้ำหนักประมาณ 26 กิโลกรัม และมีตุ้มน้ำหนักที่เหมาะสม 10, 15 และ 20 กิโลกรัม ที่ความสูงตกกระทบสูงสุด 850 มิลลิเมตร ระยะเวลาในการเกิดแรงกระทำ 15 ถึง 20 มิลลิวินาที และมีชวงน้ำหนักแรงกระทำตั้งแต่ 1 ถึง 15 กิโลนิวตัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานโลหะเท่ากับ 300 มิลลิเมตร และติดตั้งจีโอโฟน ณ ตำแหน่ง 300 มิลลิเมตร และ 600 มิลลิเมตร ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางแผ่นจานโลหะสำหรับประเมินโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทางหลายชั้น (Steinert et al., 2005)



รูปที่ 10 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นจำนวน 2 ตัว (Senseny & Mooney, 2010)

2.5 การตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation)

เทคนิคการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation) คือการประเมินโครงสร้างชั้นดินจากข้อมูลความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นตามธรรมชาติในแนวตั้งที่ผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินประกอบไปด้วยโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh ซึ่งการตรวจวัดจะต้องทำการตรวจวัดหลายตำแหน่งพร้อมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดคือความสัมพันธ์ความเร็วเฟสและความถี่ (Dispersion Curve) และค่าความเร็วเฉือนสามารถวิเคราะห์ได้จากหลักการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) (นคร ภู่วโรดม และ กิตติศักดิ์ พิทักษ์วงศ์, 2553)



รูปที่ 11 เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor)

2.6 เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light)

การทดสอบหาความต้านทานของชั้นดินด้วยการตอกหยั่งแบบเบาตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยการตอกแท่งตอกลงไปบนดินด้วยการปล่อยตุ้มน้ำหนักแบบอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งการตอกจะตอกให้จมถึง 10 เซนติเมตร (N_{10}) และจดบันทึกจำนวนครั้งในการตอกต่อ 10 เซนติเมตร (Blows/10cm) โดยหลักการจะคล้ายกับการทดสอบ SPT แต่มีน้ำหนักเบากว่าและสะดวกในการขนย้าย (Butcher et al., 1996)



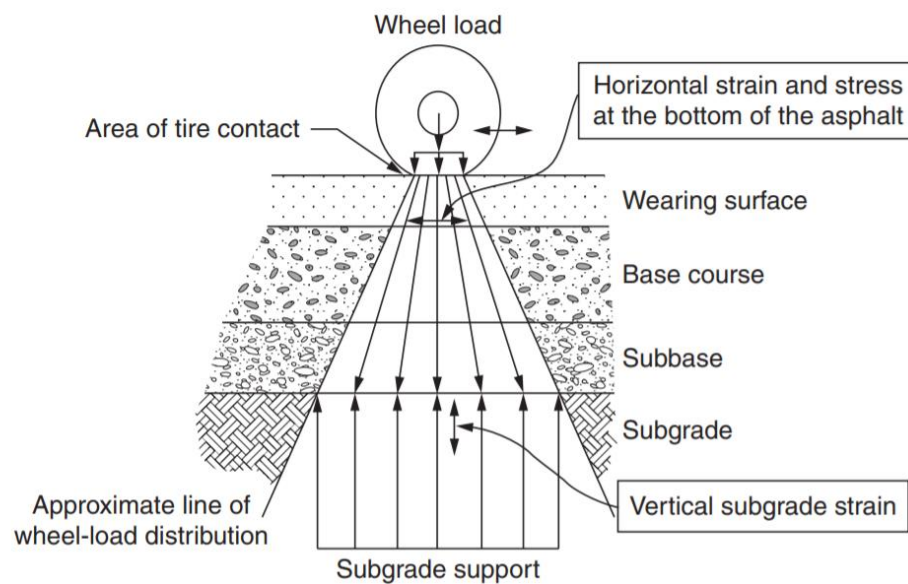
รูปที่ 12 เครื่องมือการตอกหยั่งแบบเบา

2.7 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของผิวทางและโครงสร้างทางภายใต้น้ำหนักบรรทุก

ปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างชั้นทางที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ วิธี Analytical Method เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างทางเมื่อถูกแรงกระทำที่ผิว การนำค่าทางกลศาสตร์ของวัสดุมาคำนวณ เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ส่งผลให้การออกแบบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นพื้นทางได้จากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางได้ แต่ข้อจำกัดวิธีดังกล่าวคือกระบวนการในการคำนวณมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามสมการการคำนวณความเค้นในแนวตั้งของ Boussinesq ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาของการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนนี้ ทั้งนี้การออกแบบความหนาชั้นพื้นทางสามารถใช้วิธี CBR ได้แต่จะไม่นำมากล่าวในงานวิจัยนี้

2.7.1 หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

การวิเคราะห์หาความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) โดยวิธี Analytical Method ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบโครงสร้างชั้นทางที่เริ่มนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยหลักเกณฑ์ที่นิยมใช้ในการออกแบบคือค่าความเครียด (Strain) เป็นตัวควบคุมและกำหนดอายุการใช้งานของถนนดังแสดงในรูปที่ 13 จากรูปเมื่อมีน้ำหนักมากกดทับบนชั้นผิวทางจะเกิดการทรุดตัวหรือความเครียด (Strain) ขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง



รูปที่ 13 ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง (Planning and Design of Airports, 2010)

จากทฤษฎีอีลาสติก (Theory of Elasticity) กล่าวว่าจุดใดๆในโครงสร้างของชั้นทางจะมีความเค้นทั้งหมด 9 ค่า ประกอบด้วยความเค้นในแนวตั้งฉากกับระนาบ (Normal Stress) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$ และความเค้นในแนวขนานกับระนาบ (Shearing Stress) จำนวน 6 ค่า ได้แก่ $\tau_{rt} = \tau_{tr}$; $\tau_{rz} = \tau_{zr}$; $\tau_{tz} = \tau_{zt}$ ในกรณีไม่เกิดการหมุนรอบแกนหรือความเค้นในแนวขนานกับระนาบ (Shearing Stress) เท่ากับศูนย์ จะได้ว่าความเค้นในแนวตั้งฉากกับระนาบภายใต้เงื่อนไขตั้งกล่าวคือ Principle Stresses ได้แก่ Major Principle Stress (σ_1), Intermediate Principle Stress (σ_2) และ Minor Principle Stress (σ_3) จาก Hook's law ในกรณี 3 มิติสามารถเขียนความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ (Huang, 2002)

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (2.3)$$

โดย ϵ_z = ความเครียดในแนวตั้ง

ϵ_r = ความเครียดในแนวราบในทิศทางตามแนวรัศมี

ϵ_z = ความเครียดในแนวราบในทิศทางตั้งฉากกับแนวรัศมี

ν = อัตราส่วนปัวซองส์

E = โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus)

ความเครียด (Strain) เป็นหลักเกณฑ์พื้นฐานที่สำคัญสำหรับใช้ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

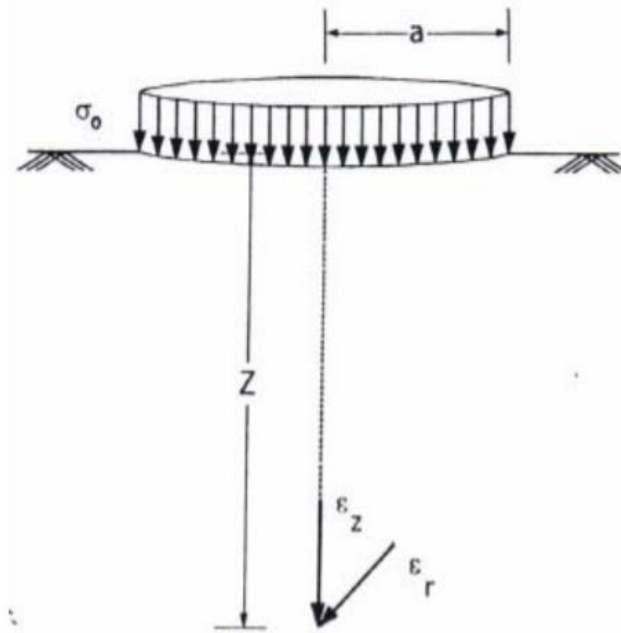
- (1) หน่วยความเครียดดึงสูงสุดในแนวราบ (Horizontal Tensile Strain) เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านล่างของชั้นผิวทางหรือแอสฟัลต์ เรียกว่าวัสดุที่มีการเชื่อมแน่น (Bound Materials) เนื่องจากชั้นผิวทางจะรับน้ำหนักที่มากกระทำโดยตรงทำให้เกิดการทรุดตัว เมื่อยานพาหนะแล่นผ่านมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัว ซึ่งเป็นสาเหตุของความล้า (Fatigue) และนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าว (Crack)
- (2) หน่วยความเครียดอัดสูงสุดในแนวตั้ง (Vertical Compression Strain) เกิดจากการกดทับเนื่องจากน้ำหนักล้อยานพาหนะ โดยปกติจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นดินเดิมซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีการเชื่อมแน่น (Unbound Materials) ทำให้มีลักษณะการวิบัติเป็นรอยร่องล้อ (Rutting) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร นอกจากนี้การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างชั้นทางโดยใช้ค่า Vertical Compression Strain บนชั้นดินเดิมเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเนื่องจากมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุด กล่าวได้ว่ามีความแข็งแรงน้อยสุด

2.7.2 ทฤษฎีของ Boussinesq

ในปี ค.ศ. 1885 Boussinesq ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณหน่วยแรงในแนวตั้งของโครงสร้างชั้นทางที่ความลึกใดๆ 'Z' ซึ่งน้ำหนักที่กระทำสม่ำเสมอ σ_0 เป็นพื้นที่วงกลมมีรัศมี a ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้ (Huang, 2002)

- พิจารณาให้วัสดุชั้นทางมีขอบเขตที่ไม่สิ้นสุดหรือเป็นวัสดุกึ่งอนันต์ (Semi-Infinite Half Space)
- ไม่คิดผลกระทบต่อวัสดุเช่น น้ำหนัก แรงเฉือน อุณหภูมิ และผลกระทบทางพลศาสตร์

- ชั้นดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) และมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ตามกฎของฮุก ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's Ratio, ν)
- ความหนาของแต่ละชั้นมีค่าที่จำกัด ยกเว้นชั้นล่างสุดที่มีความหนาเป็นอนันต์



รูปที่ 14 น้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่วงกลมบนวัสดุแบบ Semi-Infinite Half Space (Huang, 1993)

- การทรุดตัว ณ ตำแหน่งใดๆ ได้ผ่านงานโลหะ

$$d_z = \frac{(1+\nu)qa}{E} \left[\frac{a}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{1-2\nu}{a} \left[(a^2+z^2)^{0.5} - z \right] \right] \quad (2.4)$$

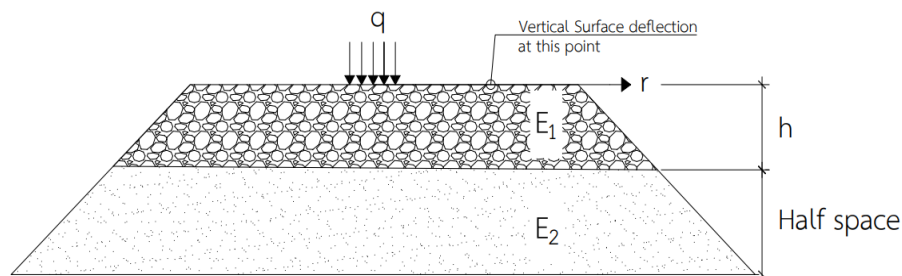
- การทรุดตัวที่ผิว $z = 0$ จะได้

$$d_0 = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad (2.5)$$

- โดยที่ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นโครงสร้างทาง (MPa)
 a คือ รัศมีแผ่นจานโลหะ (m)
 v คือ อัตราส่วนปัวซองส์
 d คือ การทรุดตัวที่ผิว (mm)
 r คือ ระยะห่างเซนเซอร์จากศูนย์กลาง Plate (mm)
 q คือ หน่วยแรงใต้แผ่นจานโลหะ (MPa)

2.7.3 ระบบ 2 ชั้นทาง (Two - Layer Systems)

โครงสร้างทางที่มีลักษณะเป็นระบบชั้นทาง (Layered System) โดยทั่วไปจะมีวัสดุที่คุณภาพดีและแข็งแรงกว่าอยู่ด้านบน ซึ่งการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางสามารถประเมินได้จากค่าการทรุดตัวที่ผิวในแนวตั้ง (Vertical Surface Deflection) ตามทฤษฎีอีลาสติกดังต่อไปนี้ การคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) สำหรับระบบโครงสร้างชั้นทางสองชั้นสามารถคำนวณและวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอีลาสติก โดยระบบชั้นทางประกอบไปด้วยวัสดุชั้นแรกมีความหนา h และวัสดุชั้นล่างเป็นแบบกึ่งอนันต์ (Half-space) ดังแสดงในสมการที่ 2.6



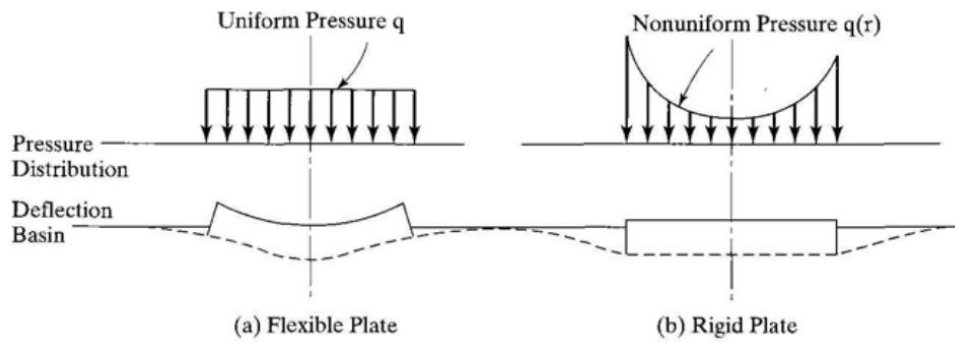
รูปที่ 15 ระบบสองชั้นทาง (Huang, 1969)

2.7.4 หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักกระทำรูปวงกลม

เมื่อน้ำหนักกระทำในลักษณะพื้นที่วงกลม ความเค้น ความเครียด และการทรุดตัวที่วิกฤตจะเกิดบริเวณศูนย์กลางของพื้นวงกลมนั้นบนแกนสมมาตร โดยที่ $\tau_{rz} = 0$ และ $\sigma_r = \sigma_z$ เมื่อ σ_z และ σ_r คือหน่วยแรงหลัก (Principal Stresses)

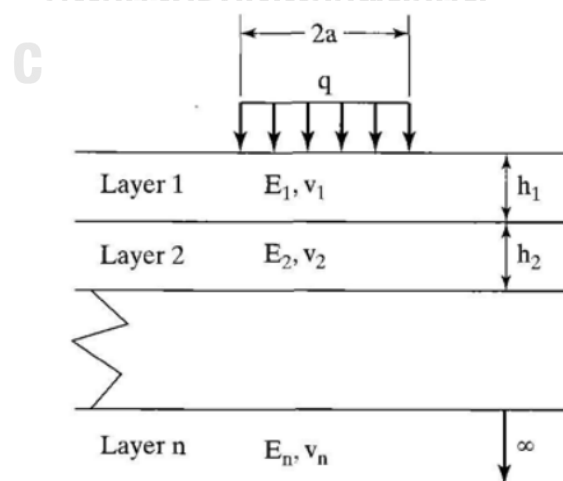
โดยทั่วไปการจำลองลักษณะน้ำหนักกระทำจากล้อยานพาหนะสู่ชั้นผิวทางจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานแบบยืดหยุ่น (Flexible Plate) ที่มีรัศมี a และน้ำหนักบรรทุกคงที่ q แต่หากการจำลองแผ่น

งานโลหะเป็นแบบแข็ง (Rigid Plate) ค่าการทรุดตัวที่ผิวจะมีค่าเท่ากันทุกจุดในระนาบ แต่หน่วยแรงใต้แผ่นงานโลหะจะไม่คงที่ โดยที่ความแตกต่างระหว่างแผ่นงานโลหะแบบยืดหยุ่นและแบบแข็งจะแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ความแตกต่างระหว่างแผ่นงานโลหะแบบยืดหยุ่นและแบบแข็ง (Huang, 1969)

จากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าหน่วยแรงใต้แผ่นงานโลหะแบบแข็งจะมีค่าน้อยสุดใกล้บริเวณศูนย์กลางของพื้นที่น้ำหนักวงกลมและมีค่ามากที่สุดบริเวณขอบ อย่างไรก็ตามหน่วยแรงที่ศูนย์กลางของแผ่นงานโลหะมีผลต่อการทรุดตัวที่ผิวของศูนย์กลางมากกว่า การวิเคราะห์จึงมีสมมติฐานให้จำลองแผ่นงานโลหะเป็นแบบยืดหยุ่นเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริง การคำนวณหน่วยแรงและทำนายค่าการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำใต้แผ่นงานโลหะวงกลมรัศมี a สามารถใช้วิธี Hankel transform ได้ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 17 ระบบชั้นทางเนื่องจากน้ำหนักกระทำแบบวงกลม (Huang, 1969)

$$\bar{f}(m) = \int_0^{\alpha} q\rho J_0(m\rho) d\rho = \frac{q\alpha}{m} J_1(m\alpha)$$

โดยที่ $\alpha = a/H$ จะได้

$$q(\rho) = \int_0^{\infty} \bar{f}(m) m J_0(m\rho) dm = q\alpha \int_0^{\infty} J_0(m\rho) J_1(m\alpha) dm$$

จากสมการข้างต้นสามารถใช้วิธีการอินทิกรัลเชิงตัวเลข (Numerical integration) โดยที่ผลเฉลยของ $J_0(m\rho)$ และ $J_1(m\alpha)$ เท่ากับศูนย์ จะพิจารณาด้วยการประมาณโดย Four – Point Gaussian formula

2.7.5 เงื่อนไขขอบเขตและความต่อเนื่องของปัญหา

ที่ผิวบน $i=1$ และ $\lambda=0$ มีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$(\sigma_z^*)_1 = -mJ_0(m\rho)$$

$$(\tau_{rz}^*)_1 = 0$$

และคำตอบของสมการคือ

$$\begin{bmatrix} e^{-m\lambda_1} & 1 \\ e^{-m\lambda_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1-2\nu_1)e^{-m\lambda_1} & 1-2\nu_1 \\ 2\nu_1 e^{-m\lambda_1} & 2\nu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

โดยมีสมมติฐานคือวัสดุชั้นเดียวกันจะมีหน่วยแรงในแนวตั้ง, หน่วยแรงเฉือน, การทรุดตัวในแนวตั้ง และการทรุดตัวในรัศมีใดที่เท่ากันดังนั้น $\lambda = \lambda_i$ มีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1}$$

$$(\tau_z^*)_i = (\tau_z^*)_{i+1}$$

$$(w_z^*)_i = (w_z^*)_{i+1}$$

$$(u_z^*)_i = (u_z^*)_{i+1}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1-2v_i-m\lambda_i) & (1-2v_i+m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & 2v_i+m\lambda_i & (2v_i-m\lambda_i)F_i \\ 1 & F_i & 1+m\lambda_i & -(1-m\lambda_i)F_i \\ 1 & -F_i & -(2-4v_i-m\lambda_i) & -(2-4v_i+m\lambda_i)F_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1-2v_{i+1}-m\lambda_i)F_{i+1} & 1-2v_{i+1}+m\lambda_i \\ F_{i+1} & -1 & (2v_{i+1}+m\lambda_i)F_{i+1} & 2v_{i+1}-m\lambda_i \\ R_i F_{i+1} & R_i & (1+m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(1-m\lambda_i)R_i \\ R_i F_{i+1} & -R_i & -(2-4v_{i+1}-m\lambda_i)R_i F_{i+1} & -(2-4v_{i+1}+m\lambda_i)R_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$F_i = e^{-m(\lambda_i - \lambda_{i-1})}$$

$$R_i = \frac{E_i}{E_{i+1}} \frac{1+v_{i+1}}{1+v_i}$$

จากวิธีการอินทิกรัลเชิงตัวเลขโดยใช้ Four – point Gaussian formula ข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการอย่างง่ายเสนอโดย Huang ในปี ค.ศ. 1968 ใช้สำหรับทำนายค่าการทรุดตัวที่ผิวในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางที่น้ำหนักกระทำ

$$w_0 = \frac{qa}{E_2} \cdot F_0 \quad (2.6)$$

$$F_0 = \frac{1.5}{(E_1/E_2)} \int_0^\infty J_0\left(m \frac{r}{h}\right) J_1\left(m \frac{a}{h}\right) V_0 dm \quad (2.7)$$

$$V_0 = \frac{1+4Nme^{-2m} - N^2e^{-4m}}{1-2N(1+2m^2)e^{-2m} + N^2e^{-4m}} \quad (2.8)$$

$$N = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \quad (2.9)$$

โดยที่ E_2 คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง (MPa)

q คือ ความเค้นใต้แผ่น Plate (MPa)

a คือ รัศมีแผ่นจานโลหะ (mm)

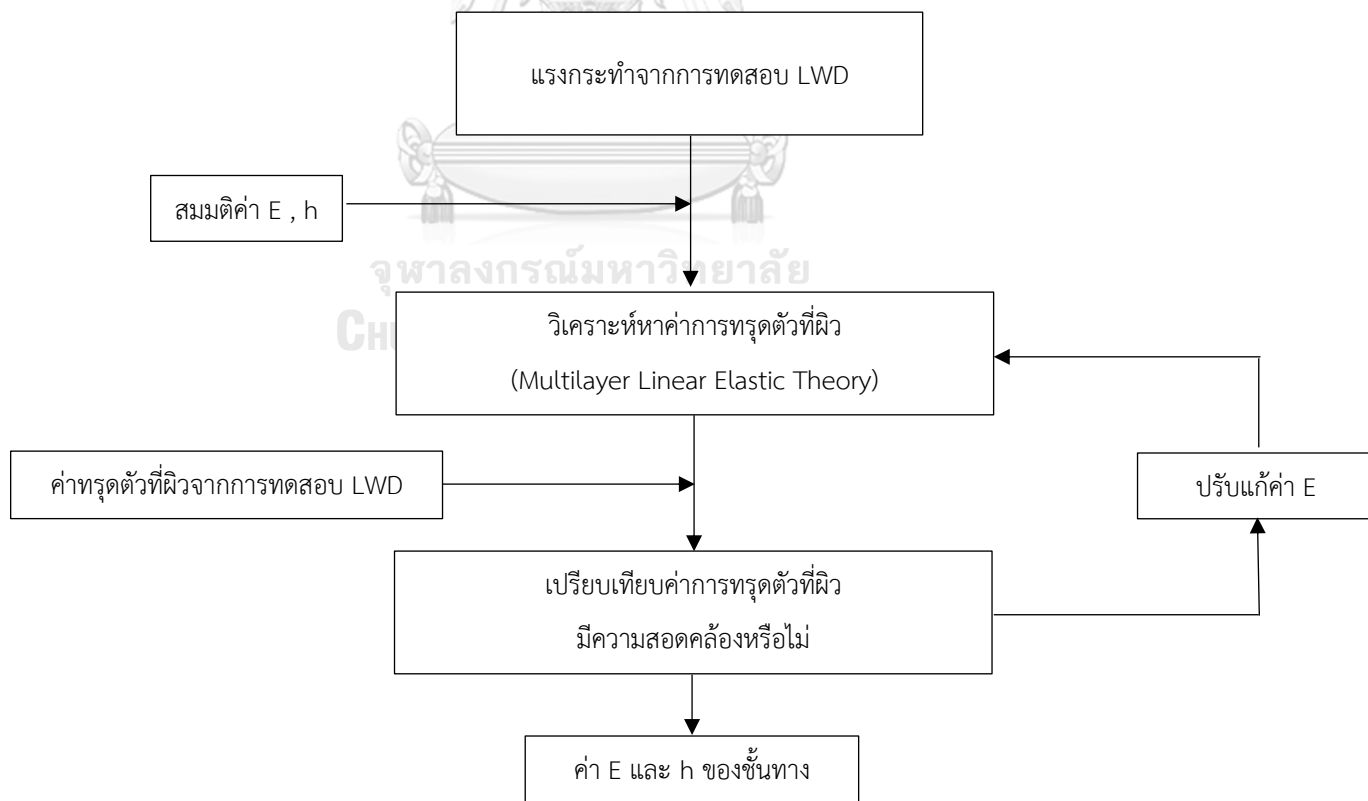
w_0 คือ การทรุดตัวที่ผิวที่ระยะในแนวรัศมี (mm)

F_0 คือ Deflection Factor ขึ้นอยู่กับค่า E_1 / E_2 , h_1 / a และ r / a

จากการวิเคราะห์และประมวลผลตามทฤษฎีอีลาสติกของระบบสองชั้นทางจะเห็นว่าสมการมีความซับซ้อนเนื่องจากสมการอยู่ในรูปอินทิกรัลและฟังก์ชันพิเศษทางคณิตศาสตร์ หรือ เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) ทำให้ยากต่อการคำนวณในกรณีที่ระบบชั้นทางมีหลายชั้นทับซ้อนกัน การนำวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) และหลักการหาค่าต่ำสุดที่เหมาะสม (Optimization Algorithm) จะสามารถช่วยแก้ปัญหาความยุ่งยากซับซ้อนนี้

2.8 หลักการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation)

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของโครงสร้างทางเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ขั้นตอนแรกจะต้องสมมติค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละโครงสร้างชั้นทาง โดยสมมติว่าอัตราส่วนปัวของวัสดุทุกชั้นเท่ากันแล้วนำการทรุดตัวที่ผิวในแนวรัศมีจากจุดทดสอบเครื่องมือ LWD มาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้ตามทฤษฎี หากพบว่าค่าการทรุดตัวมีค่าไม่สอดคล้องกันต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใหม่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกันกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบมากที่สุดจึงจะถือว่าได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกต้องของแต่ละชั้น



รูปที่ 18 แผนผังขั้นตอนการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ

(Fwa & Rani, 2005; Pierce & Mahoney, 1996)

การวิเคราะห์และประมวลผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD เพื่อหาค่าโมดูลัสและความหนาของชั้นทาง โดยที่ค่าป้อนเข้า (Input) ประกอบด้วย ค่าแรงกระทำที่แผ่นงานโลหะและข้อมูลการทรุดตัวที่ผิวที่ระยะต่างๆในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางน้ำหนักกระทำ การนำหลักการหาค่าต่ำสุดที่เหมาะสม (Optimization) มาใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลทำให้แบบจำลองการทำนายค่าการทรุดตัวที่ผิวมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การวิเคราะห์ข้อมูลจะเป็นกระบวนการทำซ้ำกระทั่งค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณตามทฤษฎีอัสติคบรรจบกัน โดยใช้วิธีค่าเศษเหลือหรือกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Residual) ที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของค่าเศษน้อยที่สุด (Sum of squared errors)

รูปแบบการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression Model) เป็นรูปแบบที่ใช้เชื่อมโยงข้อมูลระหว่างข้อมูลจากการทดสอบ (Observation) และข้อมูลการทำนาย (Predictor data) โดยที่สมการการทำนายค่าการทรุดตัวที่ได้จะทำให้เกิดค่าระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลโดยรวมน้อยที่สุดทางซึ่งเทคนิคจะใช้ค่า OLS (Ordinary Least Square) เพื่อทำให้เกิดค่าผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสอง (Sum of the square residual) น้อยที่สุด โดยที่ n คือจำนวนครั้งในการทดสอบ และ r_i คือค่าเศษเหลืออันดับที่ i th ดังสมการต่อไปนี้

$$r_i = y_i - f(E, h) \quad (2.10)$$

โดยที่ y_i คือ อันดับที่ i th ของข้อมูลค่าสังเกต และ $f(E, h)$ คือข้อมูลค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทำนายขึ้นอยู่กับ E และ h โดยค่าผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสองน้อยที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Nega et al., 2016)

$$SSE = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(E, h))^2 \quad (2.11)$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบของการศึกษาครั้งนี้เพื่อใช้ทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของโครงสร้างชั้นทางสำหรับการประเมินค่าโมดูลัสของวัสดุโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้สามารถออกแบบและควบคุมคุณภาพการบดอัดได้ดีขึ้น โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 2.9.1 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer 2.9.2 เครื่องมือ

ตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light) และ 2.9.3 เครื่องมือตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor)

2.9.1 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ LWD เริ่มได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในสนาม โดยเครื่องมือ LWD หลักๆที่ใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบันประกอบด้วย Loadman portable FWD, German Dynamic Plate (GDP), the Transport Research Laboratory Foundation Tester (TFT), and The Prima 100 LWD

ตารางที่ 2 เครื่องมือ LWD ชนิดต่างๆ ในอดีต

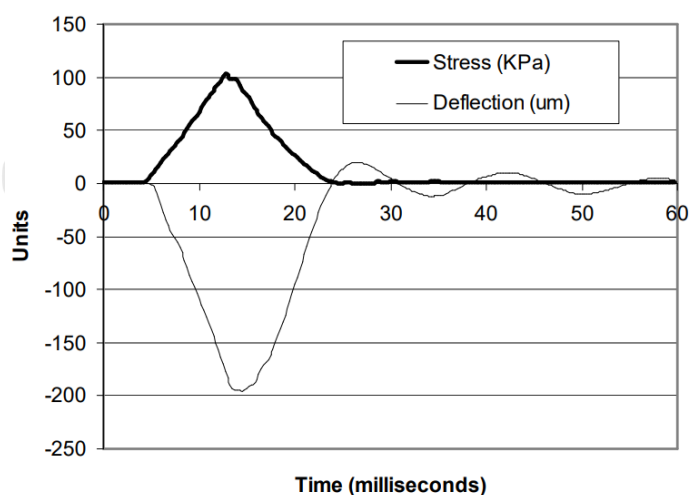
Manufacturer	Gros (1993) Loadman	German Federal (1993) GDP	Rogers et al, (1995) TFT	Carl Bro (2000) Prima 100 LWD
Plate diameter (mm)	130, 200	150, 200, 300	100, 150, 200, 300	100, 200, 300
Plate mass (kg)	6.0	15.0	-	12.0
Drop mass (kg)	10.0	10.0	10, 15, 20	10, 15, 20
Drop height (m)	0.80	0.72	Variable	Variable
Damper	Rubber	Rubber	Rubber	Spring
Force measured	Yes	No	Yes	Yes
Plate response sensor	Accelerometer	Accelerometer	Accelerometer	Accelerometer
Impulse time (ms)	25-30	18 ± 2	15-25	15-20
Max load (KN)	20	7.07	1-15	1-15
Contact stress	Rigid	Uniform	User def.	User def.
Poisson's ratio	0.50	0.50	User def.	User def.

Fleming และคณะ (2000) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสของดินคั่นทางระหว่างเครื่องมือ FWD กับ LWD ชนิดต่างๆ ได้แก่ เครื่องมือ Prima 100 LWD, the German dynamic plate (GDP) และ the Transport Research Laboratory (prototype) foundation tester (TFT) จากการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสของดินคั่นทางที่ได้จากการทดสอบ FWD มีความสัมพันธ์ที่ดีกับการทดสอบ Prima 100 LWD แต่ข้อมูลมีการกระจายมากเหมือนเทียบกับ GDP และ TFT

ต่อมาการศึกษาพบว่า มีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD เช่น ขนาดของแผ่นงานโลหะ (Plate) อุณหภูมิ และหน่วยแรงที่ผิวสัมผัสใต้แผ่นงานโลหะ (Stress) เป็นต้น (Fleming et al., 2009; Mooney & Miller, 2009; Posribink et al., 2012)

Posribink และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดแผ่นงานโลหะและความสูงตกกระทบของเครื่องมือ LWD สำหรับการประเมินค่าโมดูลัส ในการศึกษาได้ทำการทดสอบกับแผ่นงานโลหะ 2 ขนาดคือ 150 มิลลิเมตร และ 300 มิลลิเมตร ที่ระยะความสูงตกกระทบต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าระยะตกกระทบของตุ้มน้ำหนักที่ต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบซึ่งตรงกับการศึกษาที่ผ่านมา (Lin et al. 2006), Kim et al. 2007) และ Kaussi et al. 2010) แต่การเพิ่มขึ้นของขนาดแผ่นงานโลหะจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสลดลง (Fleming et al., 2009)

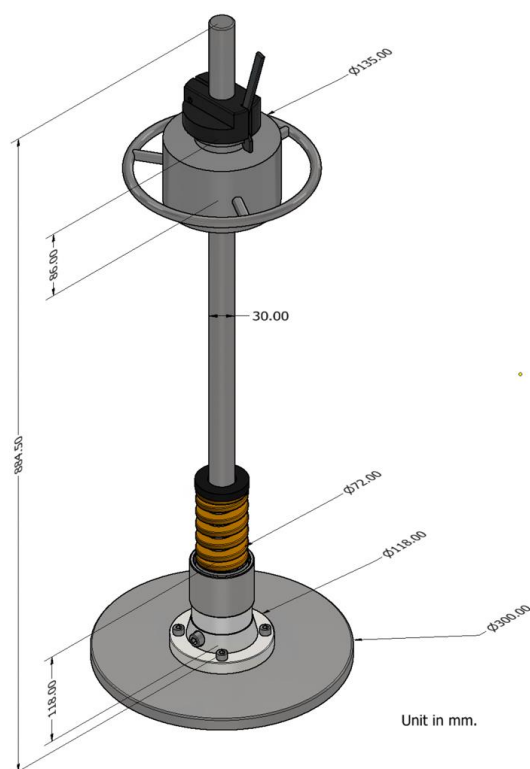
อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบคือหน่วยแรงที่ผิวสัมผัสใต้แผ่นงานโลหะ (Plate) โดย **Fleming และคณะ (2009)** และ **Grasmick (2013)** ได้ศึกษาขนาดของแผ่นงานโลหะที่ส่งผลต่อหน่วยแรงใต้แผ่นงานโลหะ ผลการศึกษาพบว่าที่ตุ้มน้ำหนัก 10 kg และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ 300 mm ทำให้เกิดหน่วยแรงเท่ากับ 100 kPa ใต้แผ่นงานโลหะ แต่หากใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm จะทำให้วัสดุชั้นล่างเข้าสู่สภาวะพลาสติก (Fleming et al., 2009; Grasmick, 2013)



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงใต้แผ่นงานโลหะกับการทรุดตัว (Fleming et al., 2009)

วิธีการทดสอบแบบไดนามิกสำหรับการวิเคราะห์ตามทฤษฎีอีลาสติคดังกล่าว หน่วยแรงที่กระทำใต้แผ่นจานโลหะสามารถพิจารณาเป็นน้ำหนักคงที่ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และประมวลผลจากแรงกระทำและการทรุดตัวสูงสุดในช่วงเวลานิ่งใต้แผ่นจานโลหะ ดังรูปที่ 19 เมื่อตุ้มน้ำหนักกระทบที่สปริงและถ่ายแรงลงสู่แผ่นจานโลหะ จะได้ว่าหน่วยแรงที่ผิวกระทำใต้แผ่นจานโลหะสมมติให้มีลักษณะเป็นหน่วยแรงคงที่ ซึ่งมีระยะเวลาในการกระจายแรงประมาณ 15 ถึง 30 มิลลิวินาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของสปริง (Achenbach, 1999; Adam et al., 2004)

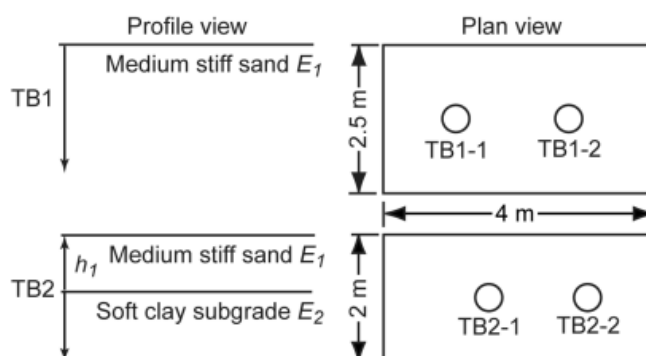
ธนภฤต โรจนชัยศรี และคณะ (2553) ได้ศึกษาและประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบ LWD แบบมาตรฐาน โดยทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องมืออ้างอิง Plate Load Test ในพื้นที่ต่างๆ ซึ่งการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทดสอบหาค่าโมดูลัสต้านทานแรงกด (Modulus of Subgrade reaction) ของชั้นดินได้และได้แสดงสมการความสัมพันธ์ไว้ แต่จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักกระทำสูงสุดที่ Plate มีค่าประมาณ 2.79 kN เกิดความเค้นใต้ Plate เท่ากับ 39.5 kPa เนื่องจากสปริงที่เป็นตัวกระจายแรงนั้นมีค่าความแข็งน้อย



รูปที่ 20 เครื่องมือ LWD แบบมาตรฐาน

นอกจากนี้ความลึกประสิทธิผลเนื่องจากพลังงานของเครื่องมือ LWD เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ Fleming และคณะ (2000), Nazzal และคณะ (2007), Mooney และ Miller (2009) ได้ศึกษาความลึกประสิทธิผลของเครื่องมือ LWD ผลศึกษาแสดงให้เห็นว่าความลึกในการตรวจวัดอยู่ในช่วง 1.0 – 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่น Plate ซึ่งน้อยกว่าความลึกประสิทธิผลจากการทดสอบ Plate load test โดยเหมาะกับการทดสอบวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือชั้นดินคันทาง (Subgrade) แต่หากเป็นการประเมินโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันมีค่าความแข็งแรงหรือค่าโมดูลัสที่ต่างกันจะได้ค่าโมดูลัสที่ไม่แท้จริง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์ในแนวรัศมีห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นจานโลหะเพื่อประเมินโมดูลัสชั้นทางที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น

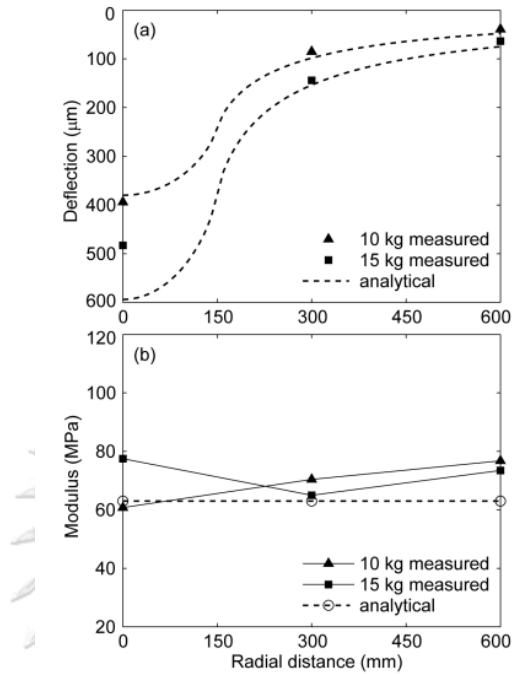
Senseny และ Mooney (2010) ได้ทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E-Modulus) ด้วยเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) ที่ระยะต่างๆในแนวรัศมีจากศูนย์กลางแผ่นจานโลหะในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 21 ในการศึกษาจะใช้แผ่นจานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. ทดสอบบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



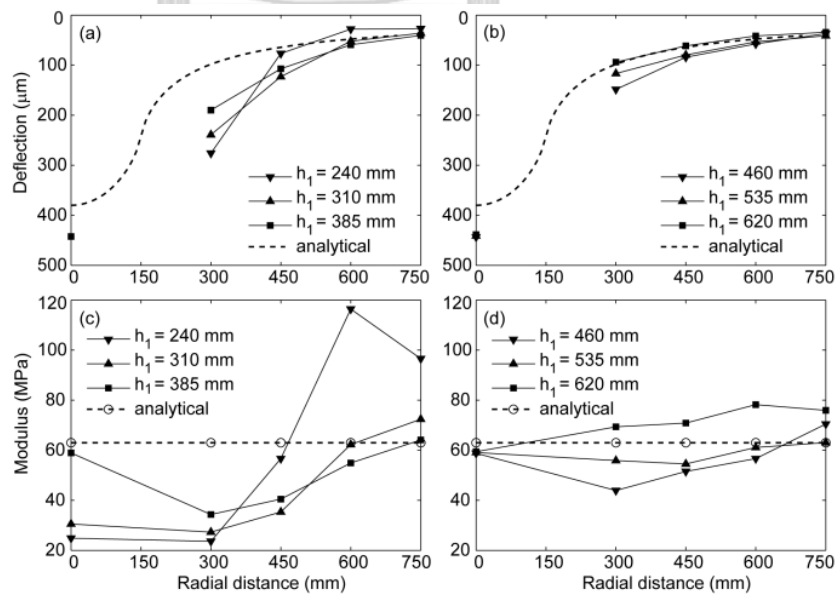
รูปที่ 21 หน้าตัดการทดสอบ (a) หน้าตัดทรายแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกัน TB1
(b) ทรายแข็งปานกลางอยู่เหนือดินเหนียวอ่อน (TB2)

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อดินแข็งอยู่เหนือชั้นดินอ่อนเครื่องมือ LWD กับเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นที่ระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นจานโลหะ (Plate) ต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคำนวณย้อนกลับของโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นได้อย่างแม่นยำ ซึ่งความลึกในการตรวจวัดสำหรับเครื่องมือ LWD ที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นที่ระยะต่างๆพบว่ามีค่าประมาณ 1.8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นจานโลหะ (Plate) และได้แนะนำให้ใช้ระยะห่างของเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) 300 มม. และ 600 มม. ตามลำดับ สำหรับวัสดุประเภทไม่มีแรงประสาน (Unbound

Materials) เนื่องจากให้ผลลัพธ์การคำนวณย้อนกลับของโมดูลัสยืดหยุ่นที่แม่นยำที่สุดและสามารถตรวจวัดแองการโค้งตัววิกฤตที่สำคัญต่อกระบวนการคำนวณย้อนกลับ



รูปที่ 22 (a) แองการแอ่นตัวที่ระยะต่างๆของ TB1-1 (b) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะต่างๆของ TB1-1



รูปที่ 23 แองการแอ่นตัวและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ระยะต่างๆของ TB2-1 สำหรับตุ้มน้ำหนัก 10 kg

2.9.2 เครื่องมือ Dynamic Probing Light

ธนภฤต โรจนชัยศรี (2563) ได้ทำการทดสอบภาคสนามด้วยอุปกรณ์ตามมาตรฐานการทดสอบ DPL ในพื้นที่ 6 จังหวัด ซึ่งครอบคลุมดินประเภทต่างๆ 7 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 3 และจากการศึกษาได้เสนอสมการระหว่างผลการทดสอบ DPL และ SPT ซึ่งแบ่งแยกความสัมพันธ์ตามชนิดของดินดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 แสดงสมการเชิงประสพการณ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL และ SPT (ธนภฤต โรจนชัยศรี ,2553)

ชนิด	สมการสหสัมพันธ์	R ²
CH	$N_{60} = 0.953N'_{DPL}$	0.7443
CL	$N_{60} = 1.392N'_{DPL}$	0.7056
SM	$N_{60} = 1.073N'_{DPL}$	0.6778
SP	$N_{60} = 1.738N'_{DPL}$	0.9540
SC	$N_{60} = 0.636N'_{DPL}$	0.7556
SP-SM	$N_{60} = 2.161N'_{DPL}$	0.8763
SW-SM	$N_{60} = 1.079N'_{DPL}$	0.7897
Unconfined compressive strength	$q_u = 11.484 N_{60}$	0.6710

Kassim et al. (2010) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือ Dynamic Probing Light (DPL) ตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 ดังแสดงในตาราง กับเครื่องมือ Standard Penetration Test (SPT) จากการศึกษพบว่าผู้วิจัยได้นำเสนอสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical Equation) ระหว่างค่า N_{60} และ N_{DPL} ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$N_{60} = 1.43N_{DPL} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 4 รายละเอียดของเครื่องมือ Dynamic Probing ประเภทต่างๆ (EN ISO 22476-2, 2013)

Dynamic Probing Apparatus	Symbol	Unit	DPL (light)	DPM (medium)	DPH (heavy)	DPSH (super heavy)	
						DPSH-A	DPSH-B
Driving device							
hammer mass, new	<i>m</i>	kg	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5	63,5 ± 0,5
height of fall	<i>h</i>	mm	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
Anvil							
diameter	<i>d</i>	mm	50 < <i>d</i> < <i>D_h</i> ^a	50 < <i>d</i> < <i>D_h</i> ^a	50 < <i>d</i> < 0,5 <i>D_h</i> ^a	^(a) 50 < <i>d</i> < 0,5 <i>D_h</i> ^a	50 < <i>d</i> < 0,5 <i>D_h</i> ^a
mass (max.) (guide rod included)	<i>m</i>	kg	6	18	18	18	30
90° Cone							
nominal base area	<i>A</i>	cm ²	10	15	15	16	20
base diameter, new	<i>D</i>	mm	35,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	45,0 ± 0,3	50,5 ± 0,5
base diameter, worn (min.)		mm	34	42	42	43	49
mantle length (mm)	<i>L</i>	mm	35,7 ± 1	43,7 ± 1	43,7 ± 1	90,0 ± 2 ^b	51 ± 2
length of cone tip		mm	17,9 ± 0,1	21,9 ± 0,1	21,9 ± 0,1	22,5 ± 0,1	25,3 ± 0,4
tip max. permissible wear		mm	3	4	4	5	5
Drive rods ^c							
mass (max)	<i>m</i>	kg/m	3	6	6	6	8
diameter OD (max)	<i>d_r</i>	mm	22	32	32	32	35
Specific work per blow	$\frac{mgh}{A}$ <i>E_n</i>	KJ/m ²	49	98	164	195	234

^a *D_h* diameter of the hammer, in case of rectangular shape, the smaller dimension is assumed to be equivalent to the diameter.
^b disposable cone only
^c maximum rod length shall not exceed 2 m
^(a) Footnote deleted (a)
NOTE Tolerances given are manufacturing tolerances.

Kulhawy & Mayne (1990) ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทรายจากค่า N_{60} โดยแบ่งดินทรายออกเป็น 3 ชนิด คือ ทรายละเอียด ทราย NC และ ทราย OC ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.13 ถึง 2.15

$$\text{ทรายละเอียด} \quad E_s = 5\sigma_{v0} N_{60} \quad (2.13)$$

$$\text{ทราย NC} \quad E_s = 10\sigma_{v0} N_{60} \quad (2.14)$$

$$\text{ทราย OC} \quad E_s = 15\sigma_{v0} N_{60} \quad (2.15)$$

โดยที่ E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นในหน่วย MPa

σ_{v0} คือ ความดันบรรยากาศเท่ากับ 0.1 MPa

Bowles, J.E. (1988) เสนอสมการคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) จากค่า N_{60} สำหรับดินประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{60} และ E_s (Bowles, 1988)

Soil	SPT
Sand (Normally consolidated)	$E_s = 500(N + 15)$ $E_s = 7000\sqrt{N}$ $E_s = 6000N$
Sand (Saturated)	$E_s = 250(N + 15)$
Sands, all (norm. consol.)	$E_s = (2600 - 2900)N$
Sand (Overconsolidated)	$E_s = 40000 + 1050N$
Gravelly sand	$E_s = 1200(N + 6)$ $E_s = 600(N + 6)$ $N \leq 15$ $E_s = 600(N + 6) + 2000$ $N > 15$
Clayey sand	$E_s = 320(N + 15)$
Slits, Sandy slit, or clayey slit	$E_s = 300(N + 6)$

2.9.3 การทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือน

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินความเร็วคลื่นเฉือนที่ผิววัสดุตามธรรมชาติ ซึ่งความเร็วคลื่นเฉือนเป็นตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์และมีความสำคัญทางด้านงานวิศวกรรมปฐพี โดยสามารถบอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆได้ในรูปแบบของค่าโมดูลัส

เทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation) คือการประเมินโครงสร้างชั้นดินจากข้อมูลความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นตามธรรมชาติในแนวตั้งที่ผิวดินดังแสดงในรูปที่ 21 โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินประกอบไปด้วยโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh ซึ่งการตรวจวัดจะต้องทำการตรวจวัดหลายตำแหน่งพร้อมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดคือความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสและความถี่ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (V_s profile) ได้

Heisey et al. (1982) ได้เสนอสมการคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นจากหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (V_s profile)

$$G_{\max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (2.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) กับโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Heisey et al., 1982)

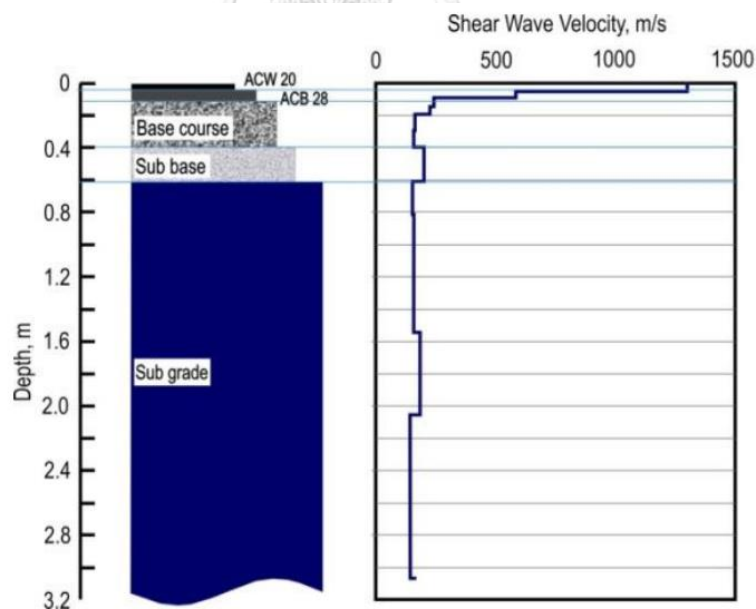
$$G_{\max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.17)$$

โดยที่ V_s คือความเร็วคลื่นเฉือนในหน่วย m/s

G_{\max} คือโมดูลัสเฉือนสูงสุดในหน่วย Pa

E คือโมดูลัสยืดหยุ่นในหน่วย Pa

ν คืออัตราส่วนปัวซองส์



รูปที่ 21 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Ismail M. A, 2012)

บทที่ 3

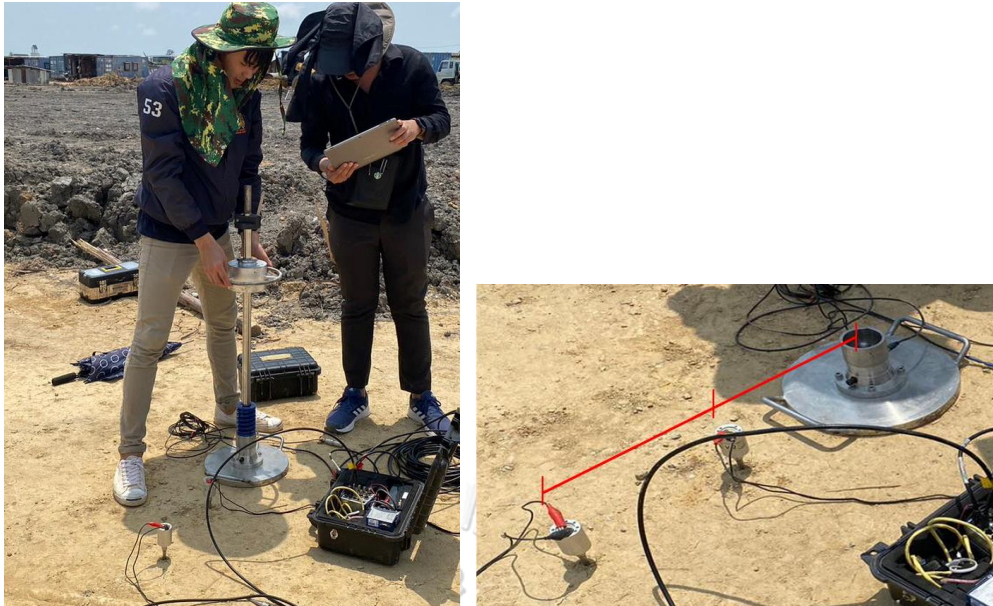
วิธีการศึกษาและแผนการดำเนินงาน

การศึกษาคั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing technique) แบบหนึ่งที่ได้รับคานิยมสำหรับการประเมินโมดูลัสของระบบชั้นทางในปัจจุบัน โดยการศึกษานี้จะทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) เพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ในแนวรัศมีจากจุดทดสอบของเครื่องมือ LWD และประเมินความแม่นยำร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation) และเครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (DPL) เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ประกอบไปด้วย หัวข้อที่ 3.1 กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ 3.2 กล่าวถึงลักษณะของพื้นที่ทำการทดสอบและการเก็บข้อมูล 3.3 กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้

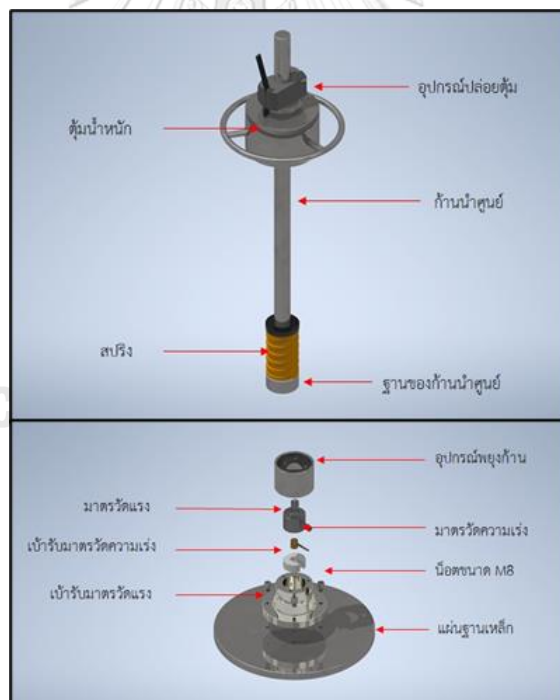
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 เครื่องมือ Light Weight Deflectometer

เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบหนึ่งใช้สำหรับประเมินโมดูลัสของชั้นทาง ในการศึกษานี้ได้ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) เพิ่มเติมจำนวน 2 ตัว ในแนวรัศมีจากจุดทดสอบติดตั้งที่ระยะห่าง 30, 60 เซนติเมตร และ 20, 40 เซนติเมตร ในแนวรัศมีจากจุดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 22 โดยวิธีการทดสอบจะทำการปล่อยตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 10 กิโลกรัม และแผ่นงานโลหะ (Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 นิ้ว หรือ 300 มิลลิเมตร วางบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบดังแสดงในรูปที่ 24


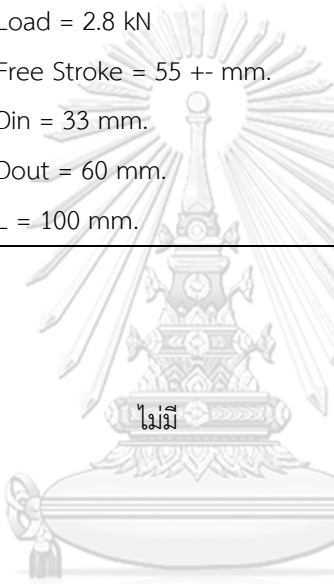


รูปที่ 24 เครื่องมือ LWD ที่มีจีโอฟอนในแนวรัศมี



รูปที่ 25 รายละเอียดเครื่องมือ LWD

ตารางที่ 6 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือ LWD

	เดิม	ใหม่
Settlement measuring range	0-2.2 mm (± 0.02)	0-2.2 mm (± 0.02)
Maximum impact force	10 kN	10 kN
Duration of impact	15~30 milliseconds	15~30 milliseconds
Temperature range	0 - 40 °c	0 - 40 °c
Spring	k = 57.6 kN/m Load = 2.8 kN Free Stroke = 55 +- mm. Din = 33 mm. Dout = 60 mm. L = 100 mm.	k = 152.5 kN/m Load = 5.9 kN Free Stroke = 55 +- mm. Din = 38.5 mm. Dout = 70 mm. L = 100 mm.
Geophone 		HS - 1 Natural frequencies : 2.0 to 28 Hz Sensitivities : 460 to 2000 mV per ips Open-Circuit Sensitivity : 18.11 V/m/s

3.1.2 เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light)

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL ตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 จะถูกบันทึกเป็นจำนวนครั้งของการตอกต่อ 10 ซม. โดยจะทำการทดสอบบริเวณพื้นที่ข้างเคียงกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD จำนวน 1 จุด ในแต่ละแปลงทดสอบถึงระดับความลึกประมาณ 1 เมตร ซึ่งผลการทดสอบประกอบด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สามารถคำนวณได้จากค่า N_{60} และค่าความหนาของชั้นทางจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการตอก ซึ่งจะอนุมานได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป โดยที่เครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (DPL) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน Dynamic probing (EN ISO 22476-2, 2013) ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ข้อมูลของเครื่องมือ Dynamic Probing Light

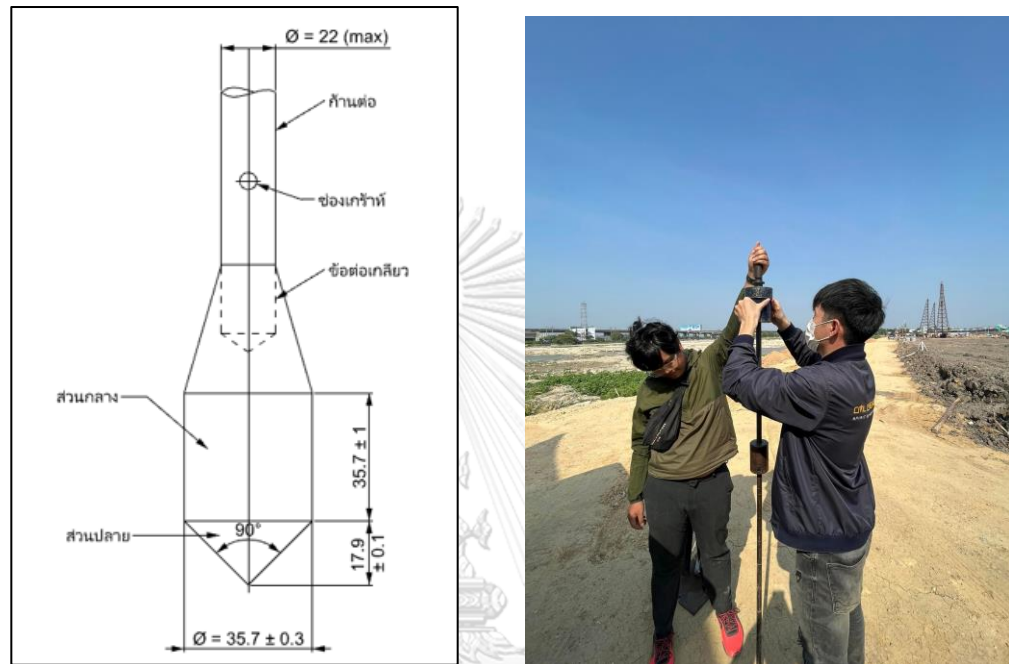
อุปกรณ์	คุณสมบัติที่กำหนด
น้ำหนักของค้อนตอก	10 ± 0.1 kg
ระยะยก	500 ± 10 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตอก	22 mm
น้ำหนักของทั้งและก้านนำศูนย์	ไม่เกิน 6 kg
พื้นที่หน้าตัดของหัวเจาะ	10 cm ²
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ	35.7 ± 0.3 mm เมื่อเริ่มใช้งาน และ ไม่น้อยกว่า 34 mm เมื่อผ่านการใช้งานแล้ว

1) วิธีการทดสอบ

- (1) ติดตั้งเครื่องมือในแนวตั้งโดยจับบริเวณด้ามจับ
- (2) เพื่อให้แน่ใจว่าหัวกรวยจมอยู่ในดินจึงเริ่มอ่านค่า
- (3) ทำการยกตุ้มตอกขึ้นเป็นระยะ 50 เซนติเมตร แล้วปล่อยตุ้มตอกตกอย่างอิสระลงบนแท่นรองตอก

(4) ทำการบันทึกจำนวนครั้งของการตอกที่ทำให้หัวเจาะรูปกรวยจมลงไปในดินทุกระยะ 10 เซนติเมตร (blows/10cm) ตามมาตรฐานเครื่องมือ DPL

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเครื่องมือ DPL ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีอ้างอิงสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือ LWD ซึ่งจะทำการทดสอบในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกัน



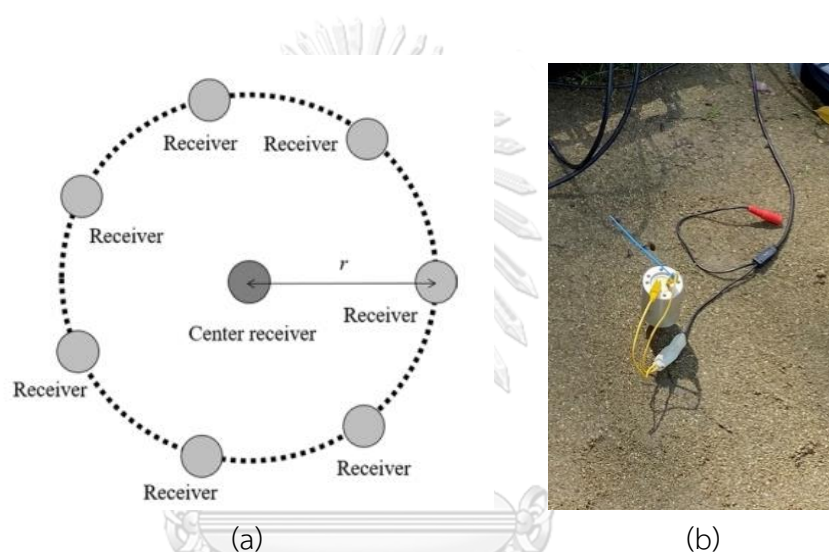
รูปที่ 26 เครื่องมือ Dynamic Probing Light



รูปที่ 27 รายละเอียดของเครื่องมือ Dynamic Probing Light

3.1.3 เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor)

ในการศึกษานี้ได้นำเทคนิคการตรวจวัดการสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor Observation) เป็นการประเมินโครงสร้างชั้นดินจากข้อมูลความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นตามธรรมชาติในแนวดิ่งที่ผิวดินดังแสดงในรูปที่ 28 โดยพิจารณาว่าคลื่นผิวดินประกอบไปด้วยโหมดพื้นฐานของคลื่น Rayleigh ซึ่งการตรวจวัดจะต้องทำการตรวจวัดหลายตำแหน่งพร้อมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดคือความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสและความถี่ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs profile) ซึ่งในการศึกษานี้จะติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร็วคลื่น (Geophone) เป็นวงกลมจำนวน 3 ตัว ที่รัศมี 1 เมตร

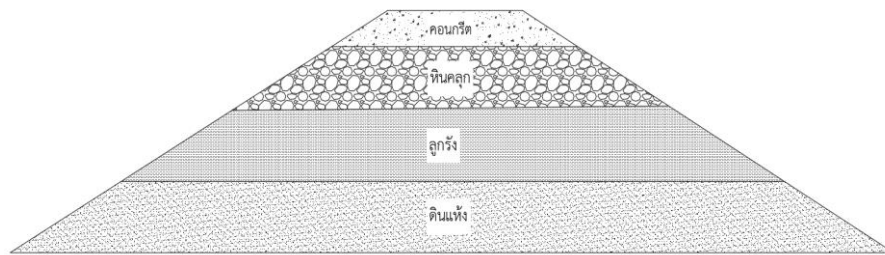


รูปที่ 28 (a) วิธีการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Okada, 2006) (b) เครื่องมือตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 ลักษณะของพื้นที่ทำการทดสอบ

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจำนวนทั้งสิ้น 6 แปลงทดสอบ โดยที่แปลงทดสอบที่ 1 และ 2 อยู่บริเวณในโครงการเดียวกัน และแปลงทดสอบที่ 3 และ 4 อยู่ในโครงการเดียวกัน ดังแสดงหน้าตัดแบบแปลนแปลงทดสอบในรูปที่ 29 โดยจะทำการทดสอบเพื่อประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของแต่ละชั้นทางด้วยเครื่องมือ LWD ในขณะที่เดียวกันจะทำการสอบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องมือ Microtremor และ DPL ในบริเวณข้างเคียงกัน



รูปที่ 29 แบบแปลนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

1) วัสดุแบบเชื่อมแน่น (Bound Material) เป็นวัสดุบดอัดแน่นประเภทมีแรงประสาน เช่น ผิวทางคอนกรีต เป็นต้น



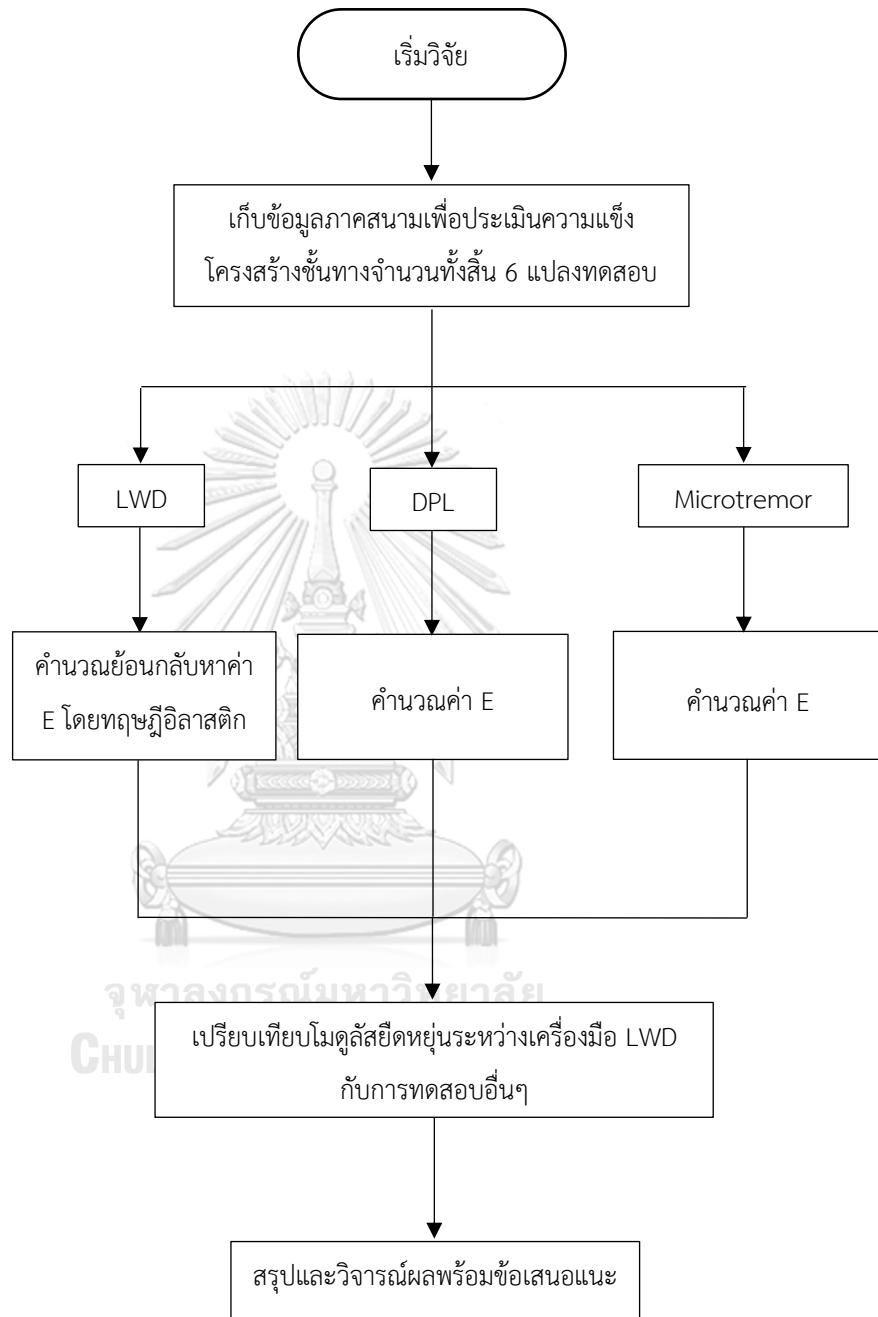
รูปที่ 30 ตัวอย่างวัสดุแบบเชื่อมแน่น
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) วัสดุแบบไม่เชื่อมแน่น (Unbound Material) วัสดุบดอัดแน่นประเภทไม่มีแรงประสาน เช่น หินคลุก ดินลูกรัง เป็นต้น



รูปที่ 31 ตัวอย่างวัสดุแบบไม่เชื่อมแน่น

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



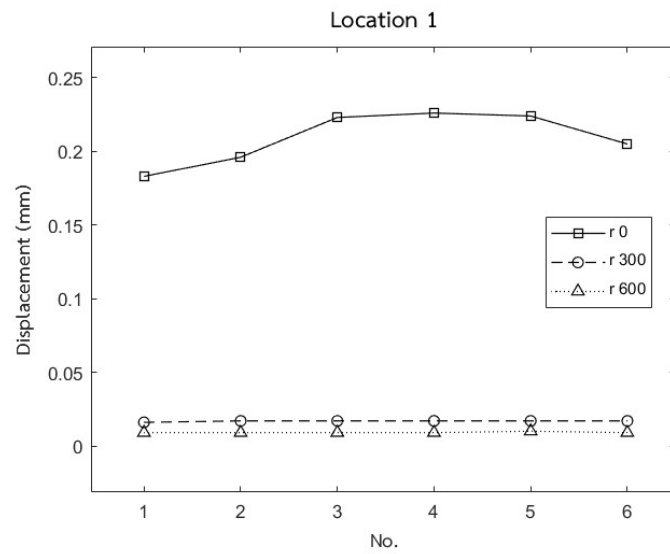
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

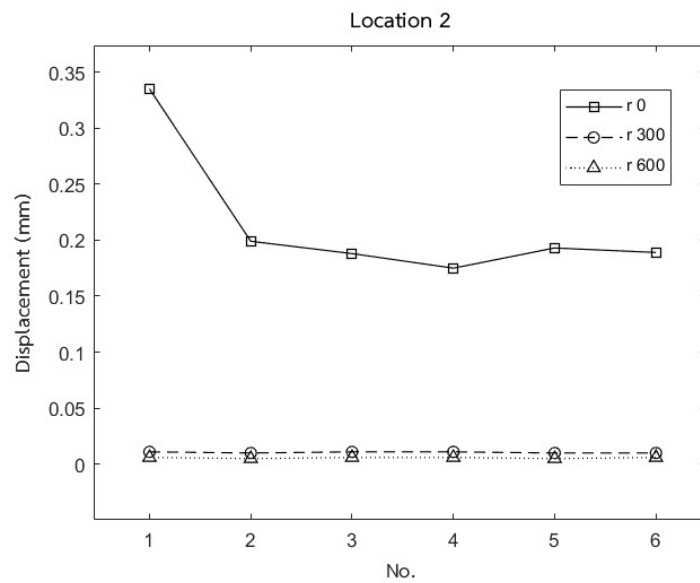
การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ Light Weight Deflectometer ที่มีจีโอโฟนเพิ่มเติมในแนวนอนจำนวน 2 ตัว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบสองชั้นทางภายใต้สมมติฐานที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่น วัสดุที่รองรับไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงต่างกันตามทฤษฎีอีลาสติกแล้วทำการประเมินความแม่นยำเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการทดสอบมาตรฐานอื่นอีกสองวิธี ได้แก่ การตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor) และ การทดสอบด้วยเครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light) ในบทนี้จะนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัย ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 หัวข้อ ประกอบด้วย หัวข้อที่ 4.1 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ LWD หัวข้อที่ 4.2 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor หัวข้อที่ 4.3 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ DPL และ หัวข้อที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ LWD

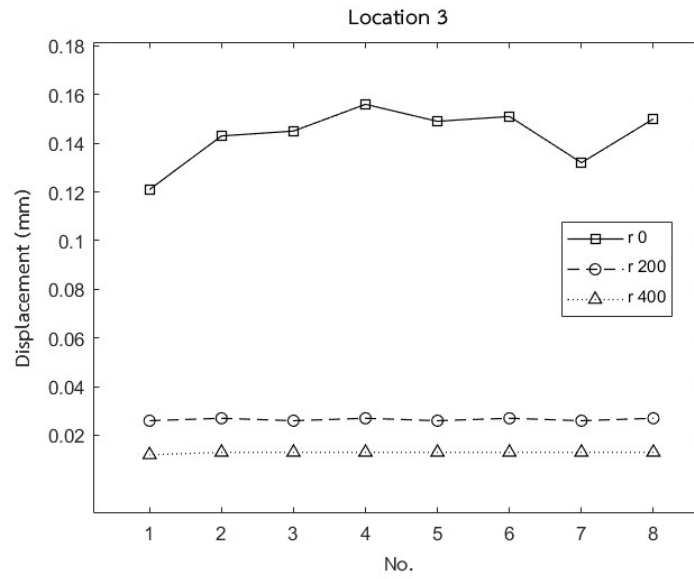
จากผลการทดสอบในสนามเพื่อประเมินค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางในรูปแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางของแปลงทดสอบทั้ง 6 แปลง พบว่าข้อมูลการทรุดตัวที่ผิวที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามจะสามารถสรุปไว้ในรูปแสดงค่าการทรุดตัวที่ผิวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นในแนวนอนจากจุดทดสอบ ซึ่งข้อมูลการทรุดตัวเหล่านี้สามารถนำไปวิเคราะห์และประมวลผลหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างชั้นทางได้ต่อไปดังแสดงในตารางที่



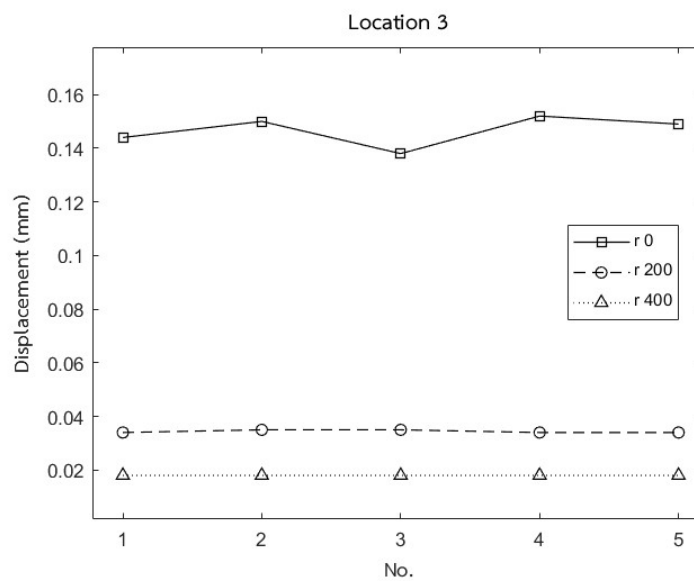
รูปที่ 32 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 1



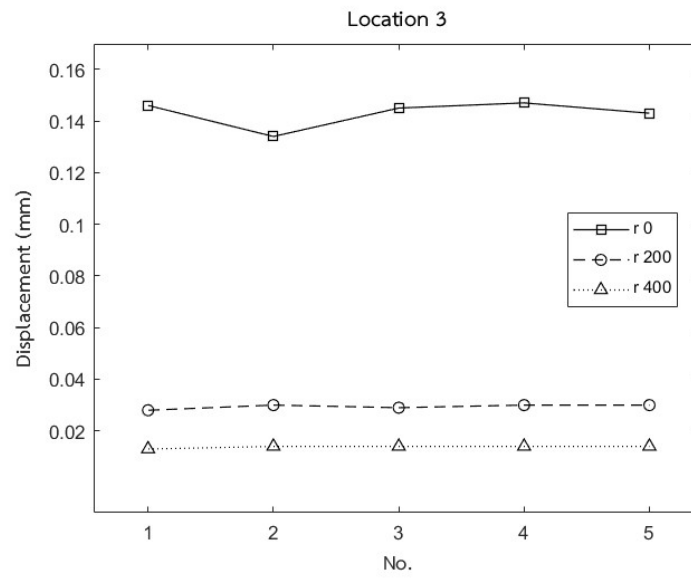
รูปที่ 33 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 2



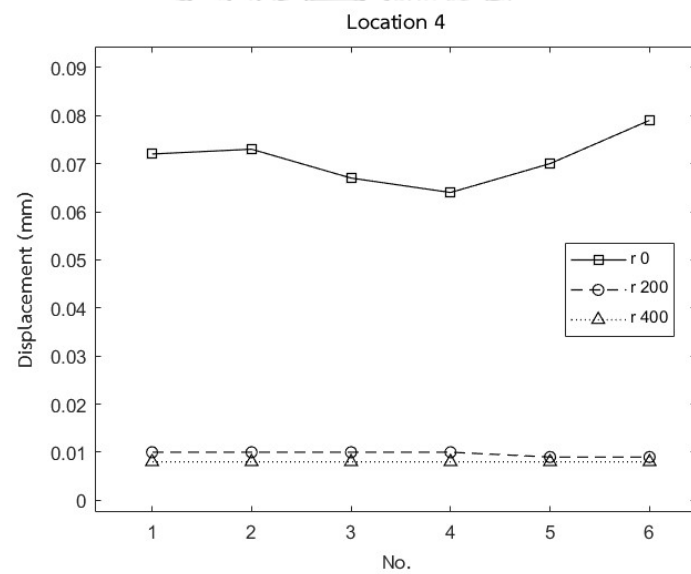
รูปที่ 34 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 1



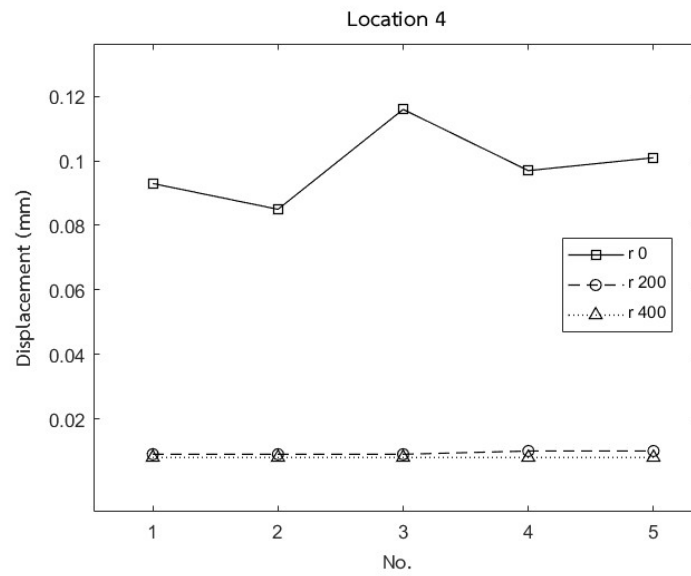
รูปที่ 35 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 2



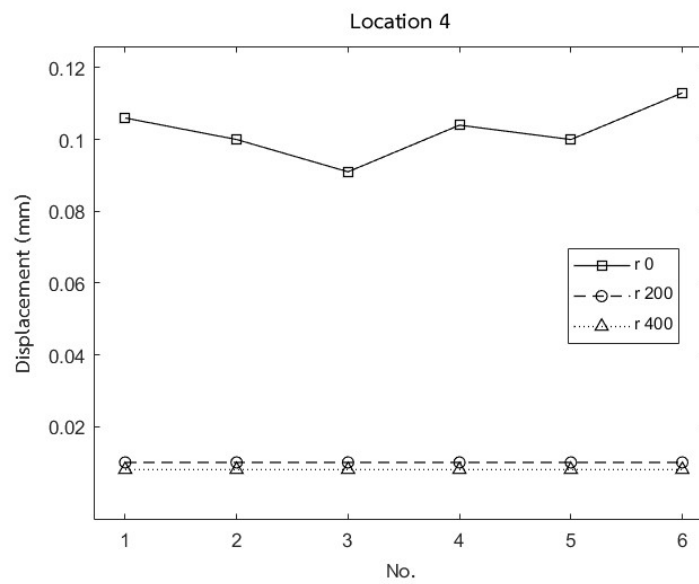
รูปที่ 36 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 3 ตำแหน่งที่ 3



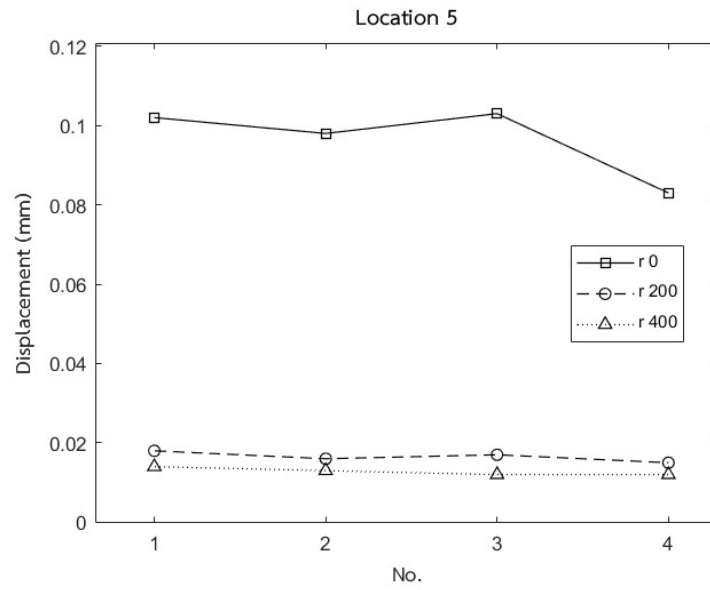
รูปที่ 37 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 1



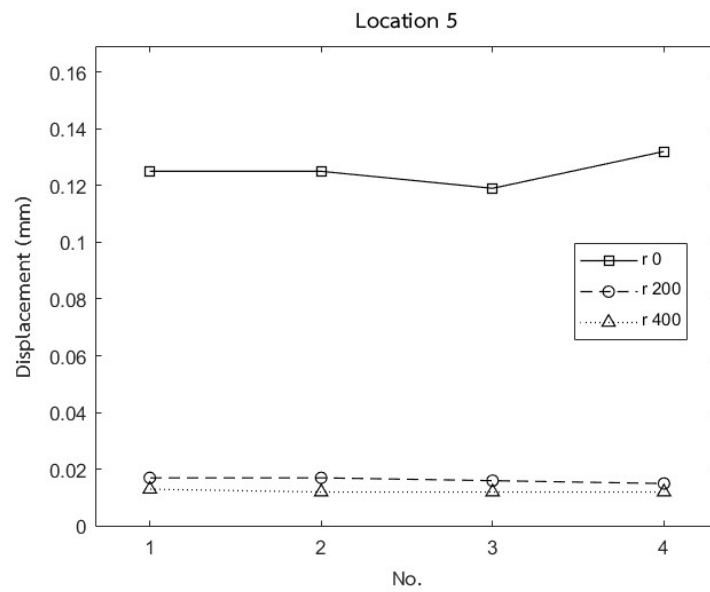
รูปที่ 38 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 2



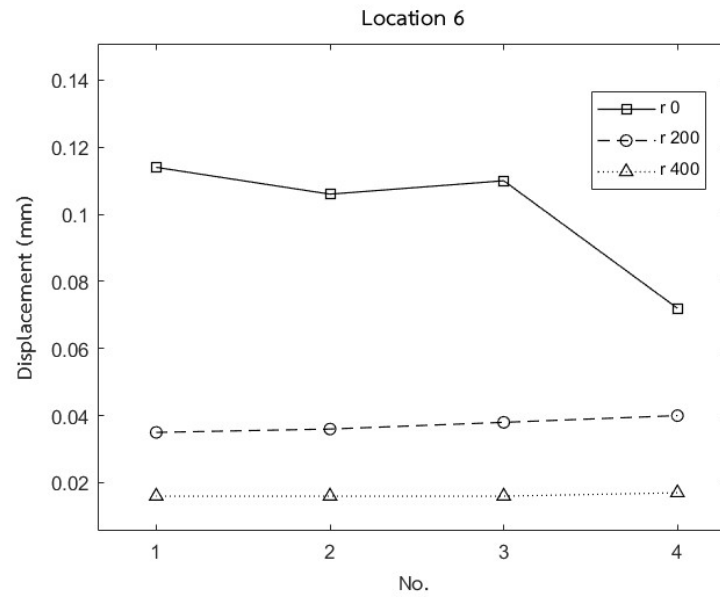
รูปที่ 39 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 4 ตำแหน่งที่ 3



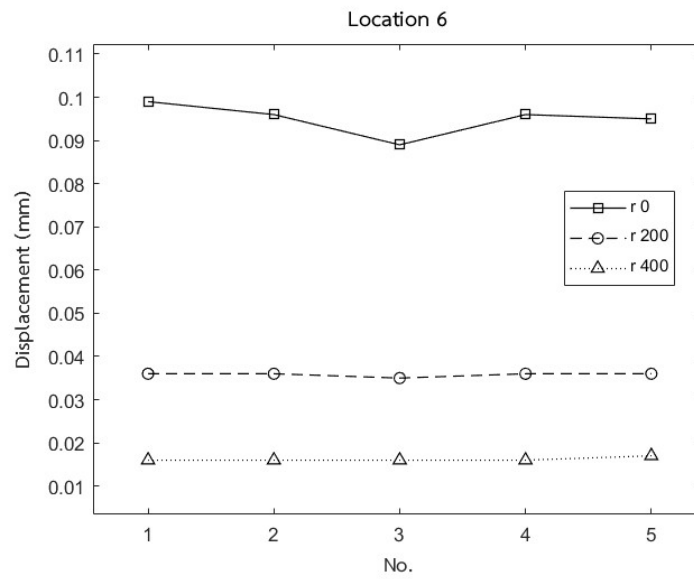
รูปที่ 40 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 5 ตำแหน่ง 1



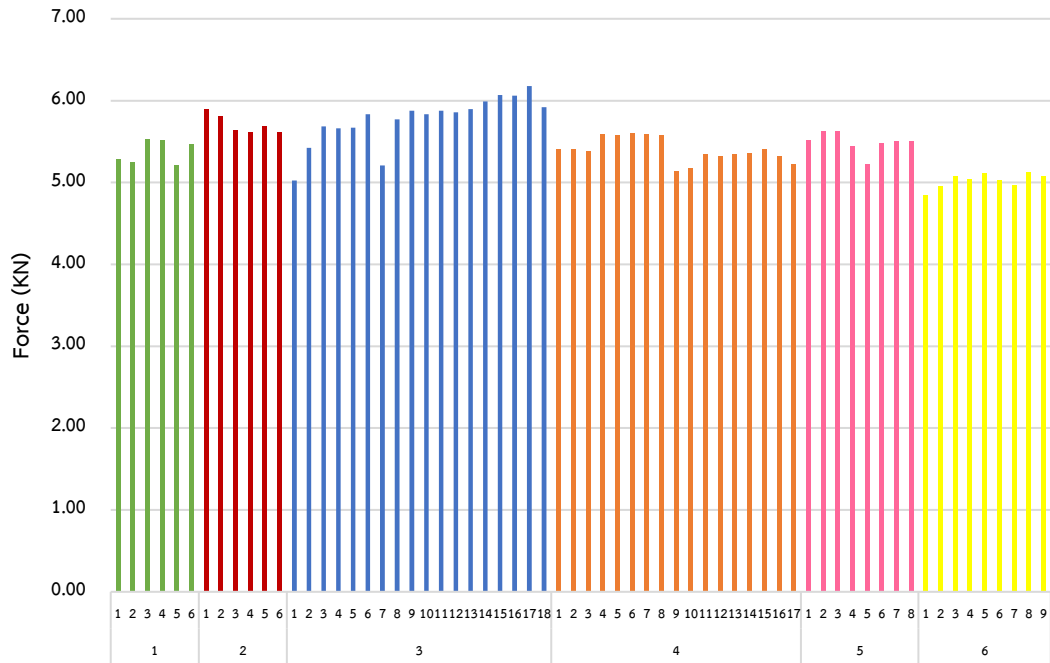
รูปที่ 41 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 5 ตำแหน่ง 2



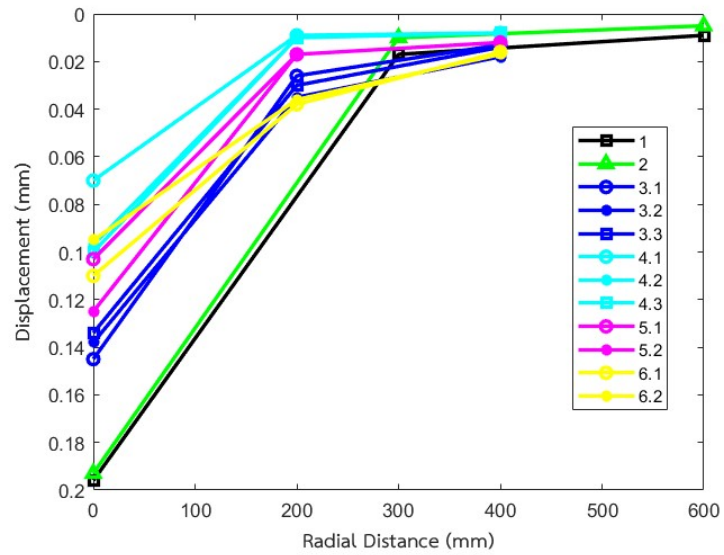
รูปที่ 42 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 6 ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 43 ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบของแปลงทดสอบที่ 6 ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 44 แรงกระทำจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD



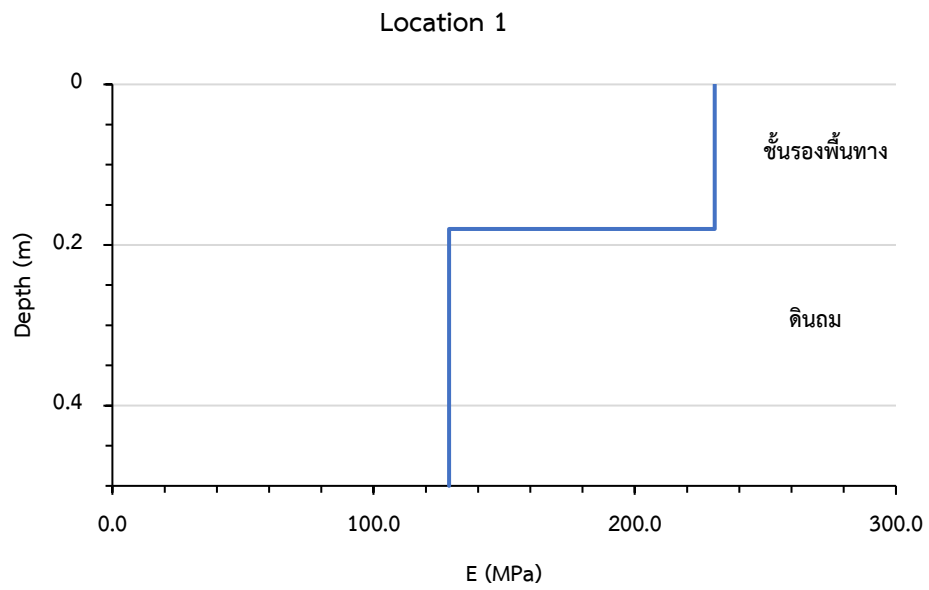
รูปที่ 45 แอ่งการแอ่นตัวที่ระยะจีโอโฟนต่างๆ ในแนวรัศมี

จากผลการทดสอบค่าการทรุดตัวของผิวจากเครื่องมือ LWD ในแนวรัศมีที่ระยะ 0, 30, 60 เซนติเมตร และ 0, 20, 40 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางทดสอบ บนแปลงทดสอบทั้ง 6 แปลง พบว่าค่าการทรุดตัวเฉลี่ยตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุดจะอยู่บริเวณใต้จุดนำหน้ากระทำได้ โดยจะแสดงรูปร่างการแอ่นตัว (Deflection bowl) ดังรูปที่ 45 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์และประเมินโมดูลัสของระบบ 2 ชั้นทาง สามารถคำนวณย้อนกลับตามทฤษฎีอีลาสติกร่วมกับหลักการการหาค่าต่ำสุดที่เหมาะสม (Optimization) จากข้อมูลการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานได้ว่าเป็นจุดแบบไม่ต่อเนื่องหรือกล่าวได้ว่าข้อมูลเหล่านั้นมีความไม่แน่นอนอาจมีข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง จึงต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมากหรือเก็บข้อมูลซ้ำๆกันในช่วงที่สนใจ การหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลในแต่ละจุดที่สนใจหรือบอกแนวโน้มของข้อมูลว่าจะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างไรคือการใช้เทคนิคการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least-squares Regression) ซึ่งจะแสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบของผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสองน้อยที่สุด (Sum of the square residual error) หรือค่าความแตกต่างระหว่างจุดที่เราทำนายได้ (Model) กับจุดข้อมูลจริงจากการทดสอบ (Observation) ซึ่งจะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการประเมินด้วยเครื่องมือ LWD ของแต่ละแปลงทดสอบจะสรุปไว้ในตารางที่ 8

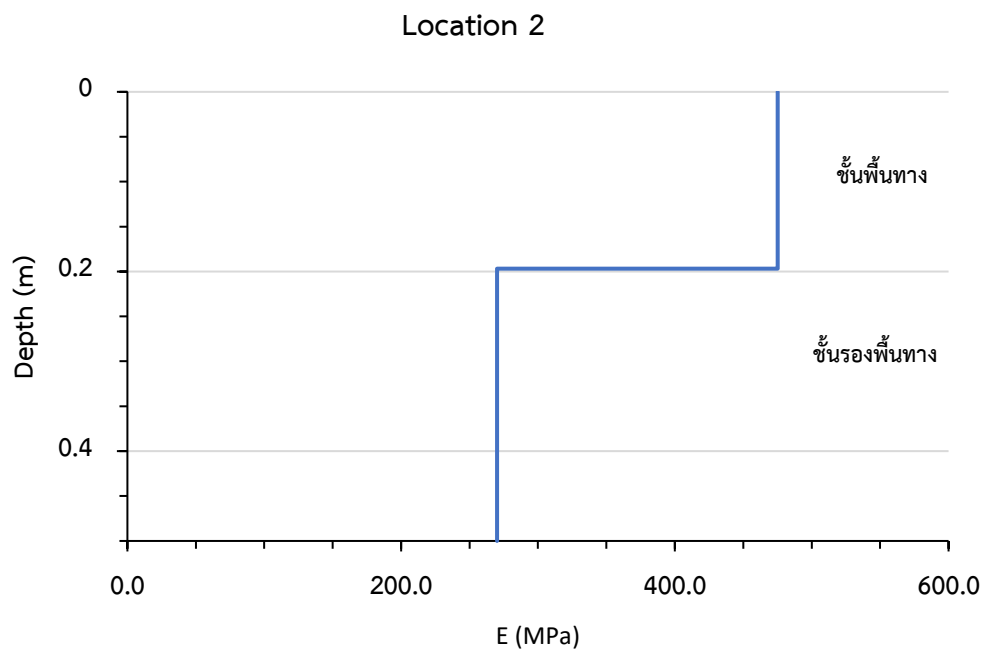
ตารางที่ 8 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง ที่ได้จากเครื่องมือ LWD

แปลงทดสอบ	จุดทดสอบ	วัสดุ	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ความหนา h (mm)	SSE
1	1	ดินลูกรัง	230	128	180	5e-07
2	1	หินคลุก	475	270	197	1e-06
3	1	หินคลุก	428	294	241	2e-07
	2	หินคลุก	461	294	149	3e-07
	3	หินคลุก	506	292	236	3e-16
4	1	คอนกรีต	13240	472	112	4e-09
	2	คอนกรีต	13895	439	97	1e-11
	3	คอนกรีต	13445	420	154	1e-12
5	1	คอนกรีต	19191	389	84	3e-11
	2	คอนกรีต	19239	249	102	1e-12
6	1	หินคลุก	399	124	98	4e-06
	2	หินคลุก	415	293	160	4e-06

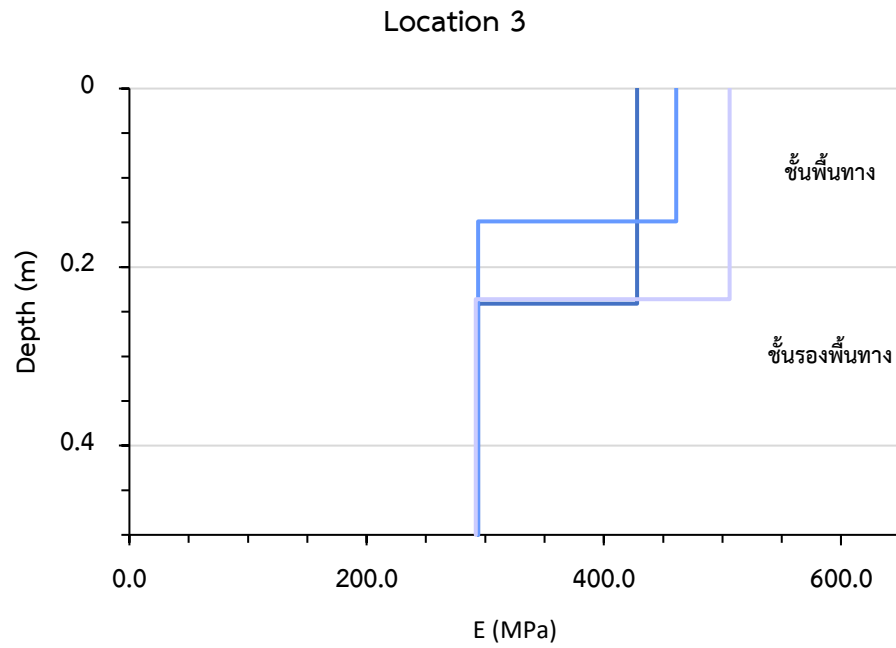
** E_1 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก, E_2 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง



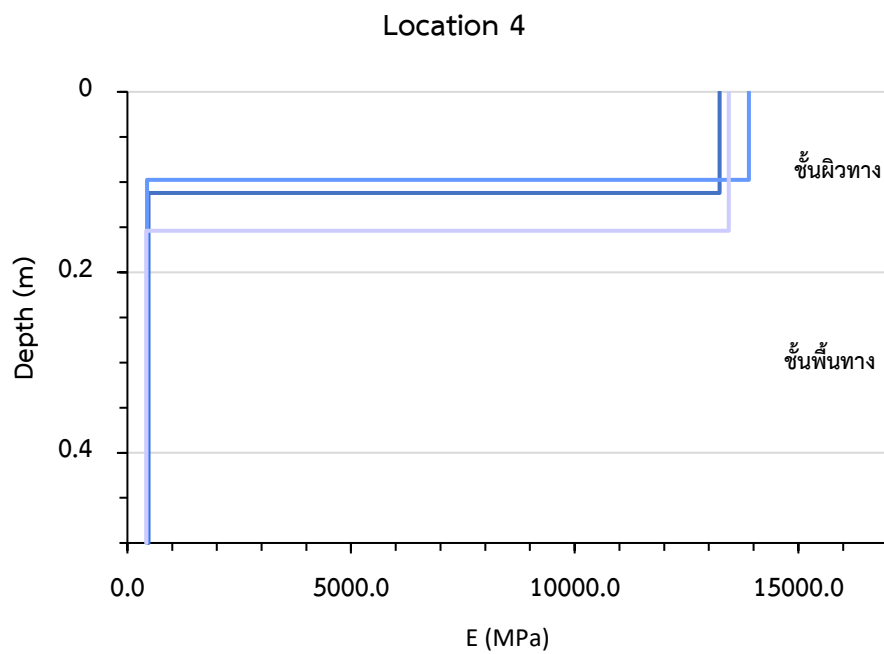
รูปที่ 46 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 1



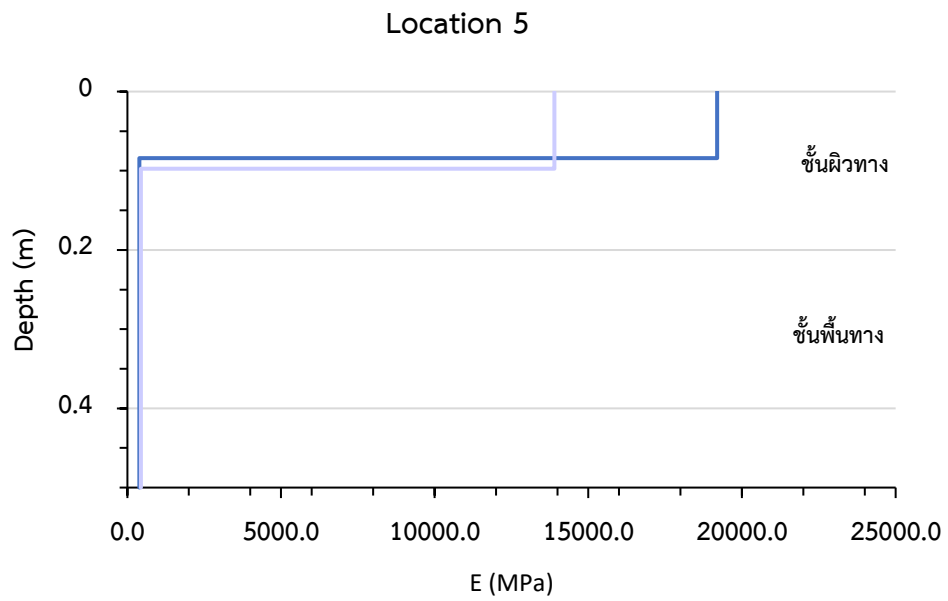
รูปที่ 47 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 2



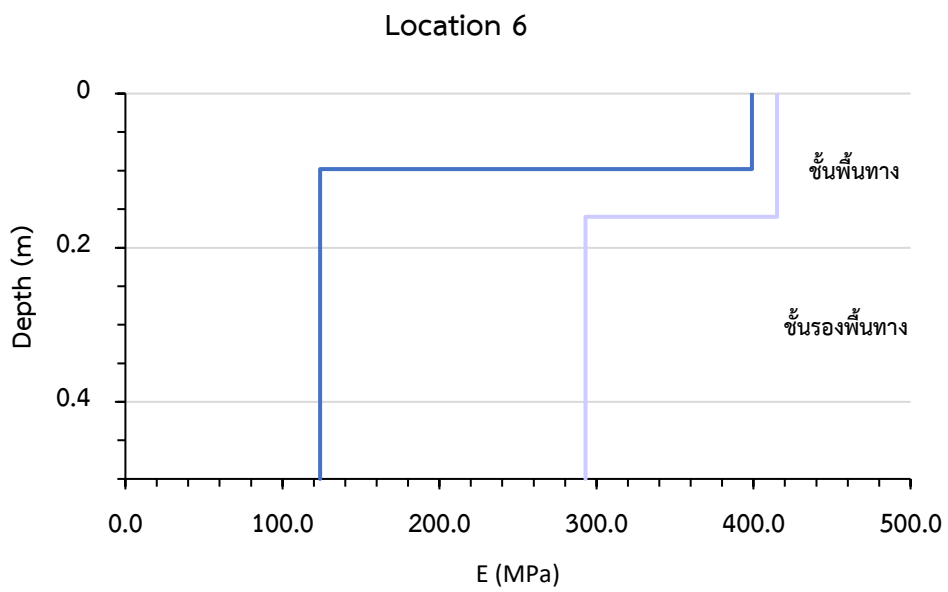
รูปที่ 48 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 3



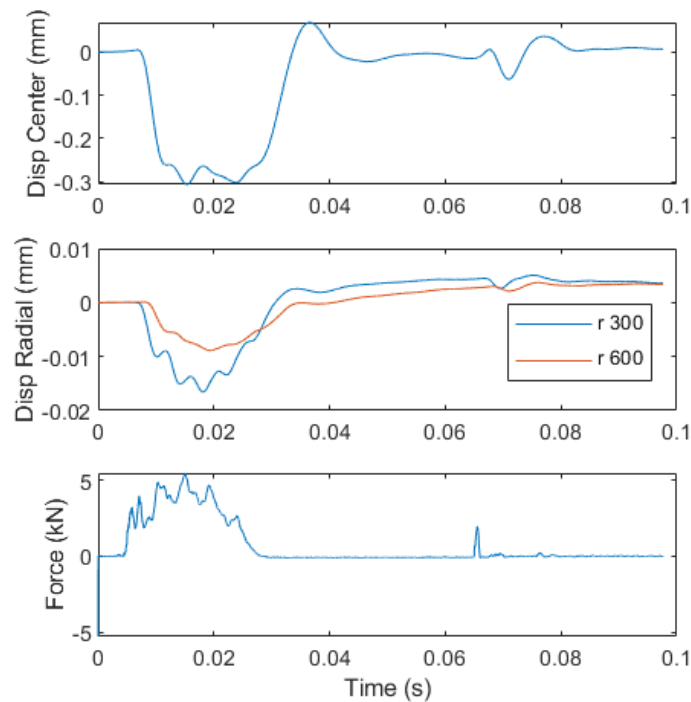
รูปที่ 49 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 4



รูปที่ 50 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 5



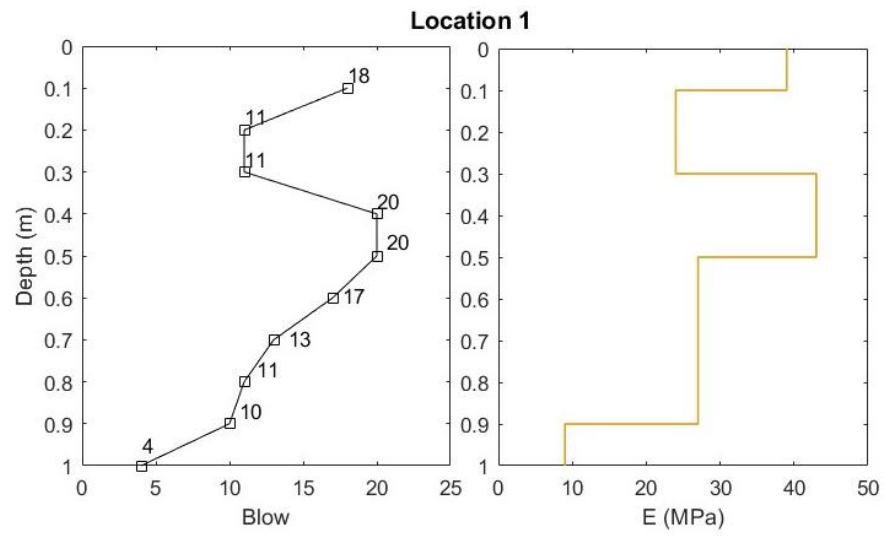
รูปที่ 51 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแปลงทดสอบที่ 6



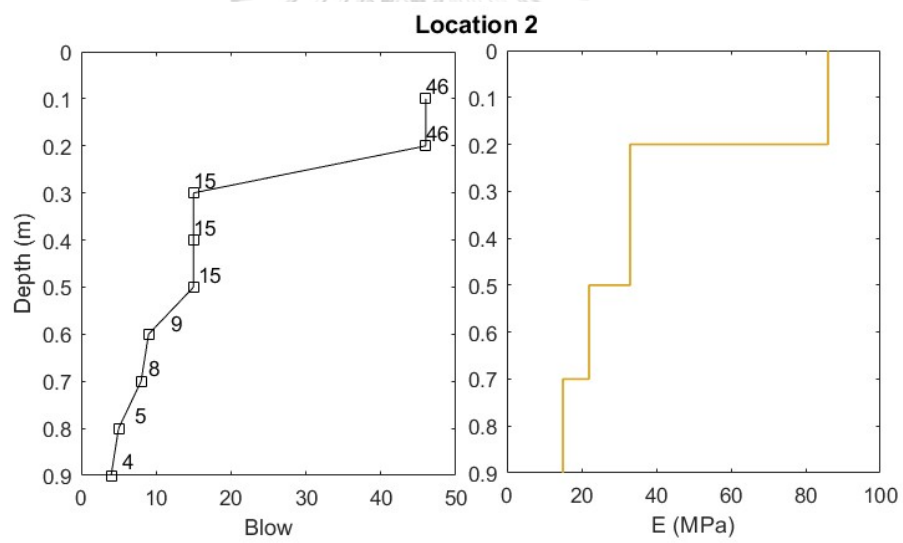
รูปที่ 52 ผลการตอบสนองที่ได้จากเครื่องมือ LWD ที่มีจีไอโฟนเพิ่มเติมในแนวนอน

4.2 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Dynamic Probing Light

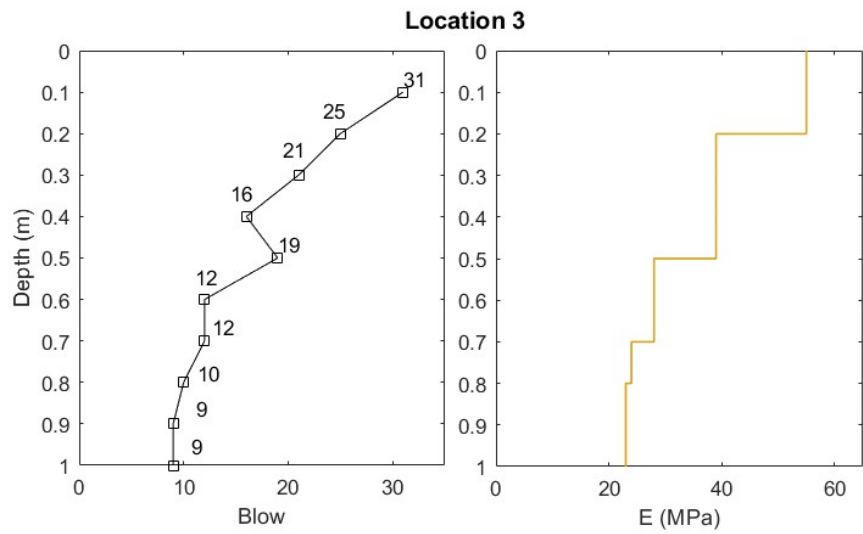
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง จึงต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางด้วยวิธีอื่นๆ ในการศึกษาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL ตามมาตรฐาน EN ISO 22476-2 จะถูกบันทึกเป็นจำนวนครั้งของการตอกต่อ 10 ซม. โดยจะทำการทดสอบบริเวณพื้นที่ข้างเคียงกับการทดสอบอื่นๆ จำนวน 1 จุดในแต่ละแปลงทดสอบถึงระดับความลึกประมาณ 1 เมตร ซึ่งผลการทดสอบประกอบด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สามารถคำนวณได้จากค่า N_{60} และค่าความหนาของชั้นทางจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการตอก ซึ่งอนุมานได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป ดังสรุปไว้ดังตารางที่ 2 และ



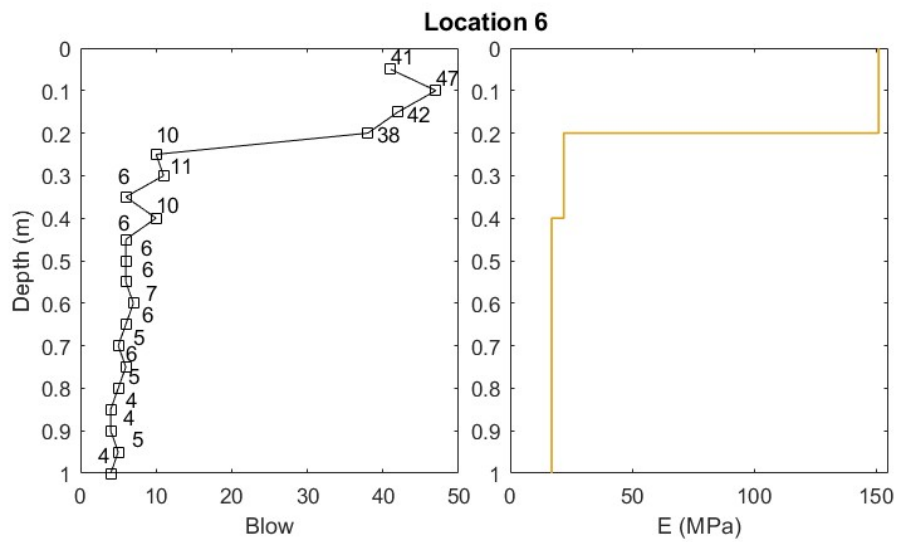
รูปที่ 53 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 1



รูปที่ 54 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 2



รูปที่ 55 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 3



รูปที่ 56 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ DPL ของแปลงทดสอบที่ 6

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 1

Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/10cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft)	$E_{s,Sand}=1.5N_{60}$ (MPa)
100	18	26	39
200	11	16	24
300	11	16	
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 10 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 2

Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/10cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft)	$E = 1.2(N_{60} + 6)$ (MPa)
100	46	65	86
200	46	65	
300	15	21	33
400	15	21	
500	15	21	
600	9	13	23
700	8	11	21
800	5	7	16
900	4	6	14

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 3

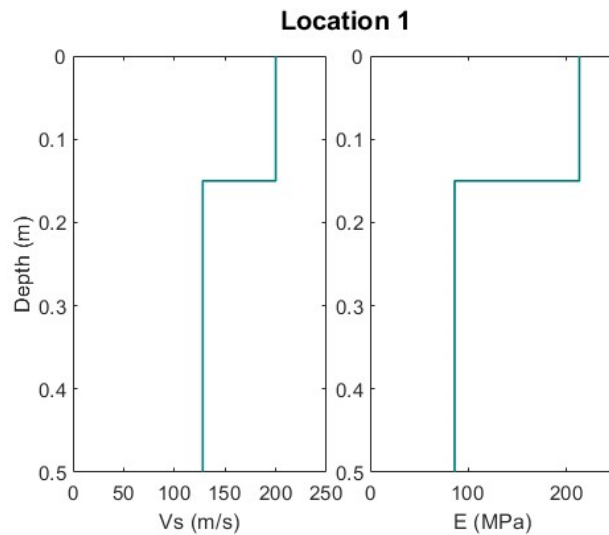
Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/10cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft)	$E = 1.2(N_{60} + 6)$ (MPa)
100	31	44	55
200	25	35	
300	21	30	39
400	16	23	
500	19	27	
600	12	17	28
700	12	17	28
800	10	14	24
900	9	13	23
1000	9	13	23

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบ DPL แปลงทดสอบที่ 6

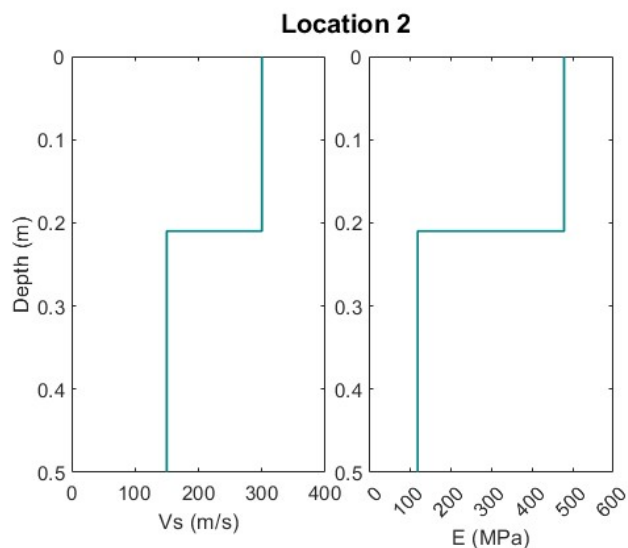
Depth (mm)	N_{DPL} (Blow/5cm)	$N_{60} = 1.43N_{DPL}$ (Blow/ft)	$E = 1.2(N_{60} + 6)$ (MPa)
50	41	125	151
100	47		
150	42	114	22
200	38		
250	10	14	17
300	11	16	
350	6	9	17
400	10	14	
450	6	9	17
500	6	9	17
550	6	9	17
600	7	10	19
650	6	9	17
700	5	7	16
750	6	9	17
800	5	7	16
850	4	6	14
900	4	6	14
950	5	7	16
1000	4	6	14

4.3 ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor

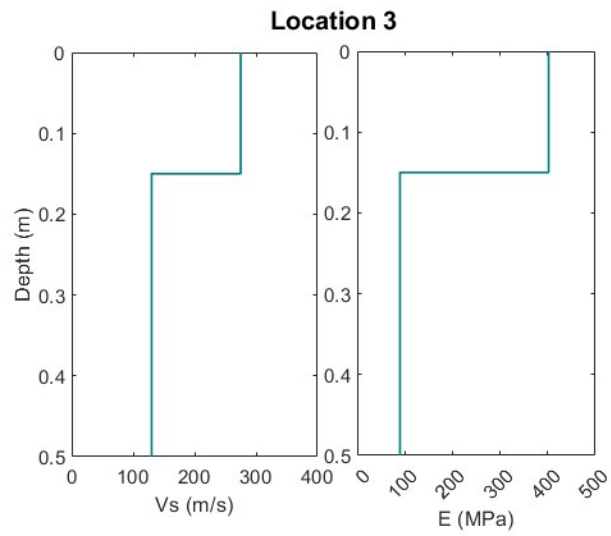
จากข้อมูลคลื่นตามธรรมชาติที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคนิคการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิวจะถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง ใน การศึกษานี้จะทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่น (Geophone) เป็นวงกลมจำนวน 3 ตัว ที่รัศมี 1 เมตร โดยผลการทดสอบจะสรุปไว้ดังตารางที่ 13 และรูปหน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile)



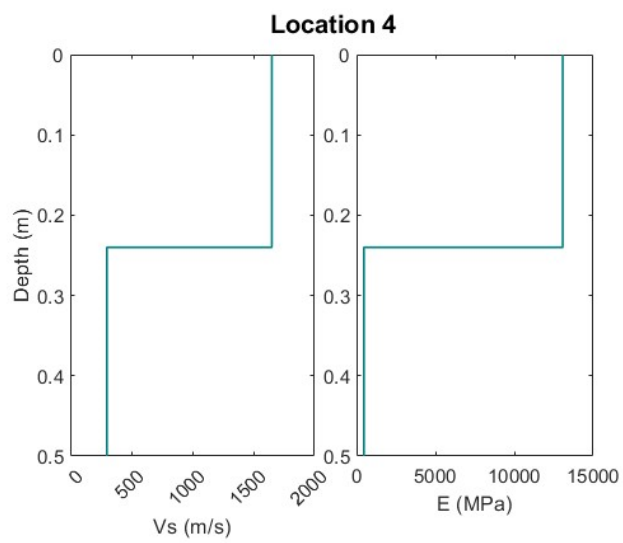
รูปที่ 57 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 1



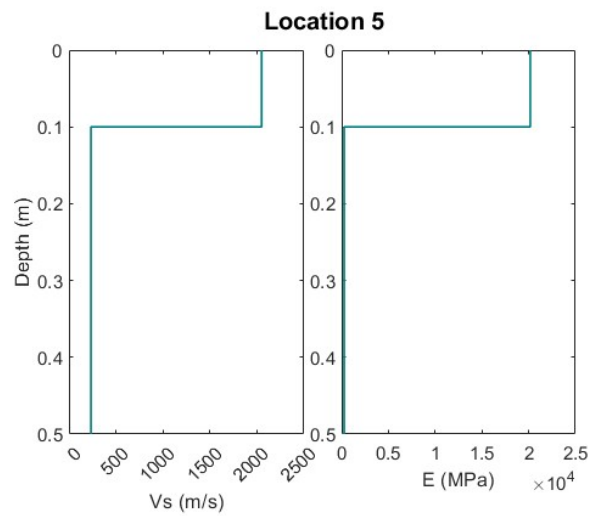
รูปที่ 58 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 2



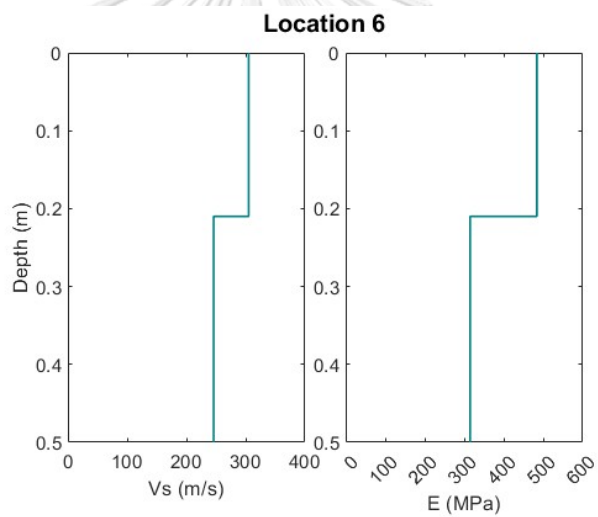
รูปที่ 59 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 3



รูปที่ 60 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 4



รูปที่ 61 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 5



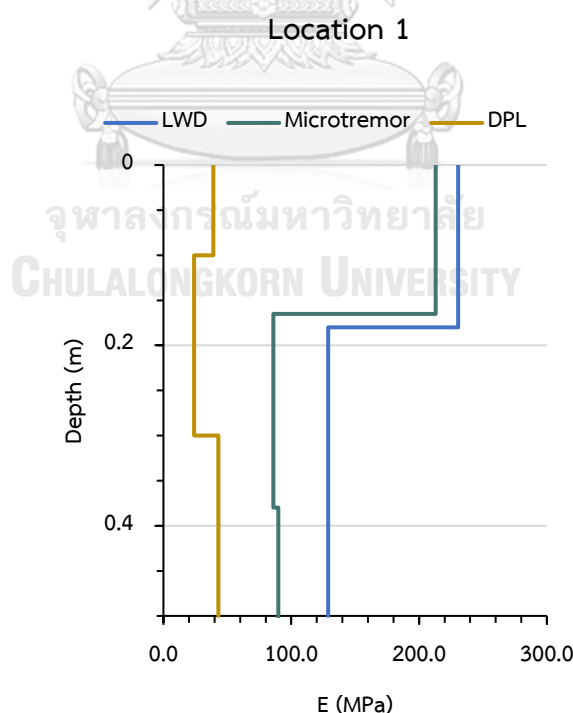
รูปที่ 62 หน้าตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Vs Profile) แปลงทดสอบที่ 6

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor

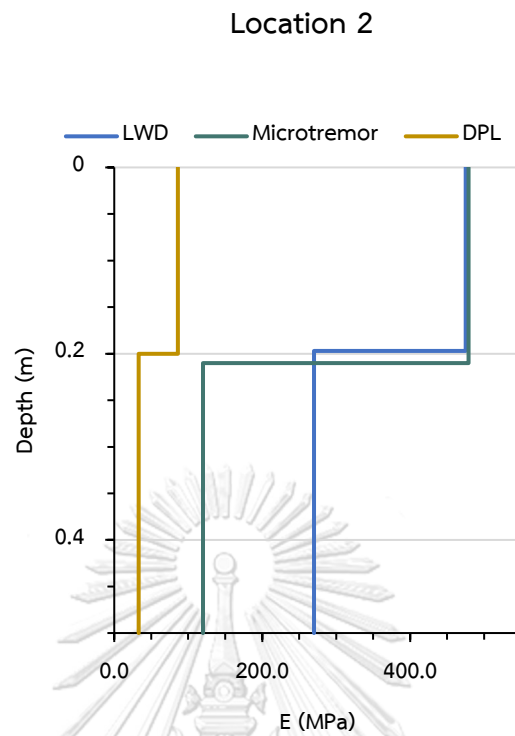
แปลงทดสอบ	ความหนา (m)	Vs ₁ (m/s)	Vs ₂ (m/s)	G _{max1} (MPa)	G _{max2} (MPa)	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)
1	0.150	200	128	80	32	213	86
2	0.210	300	150	180	45	479	120
3	0.150	275	130	151	33	402	90
4	0.240	1650	300	5445	180	13068	468
5	0.100	2050	234	8405	110	20172	263
6	0.210	305	246	186	121	484	315

4.4 ผลการเปรียบเทียบการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทาง

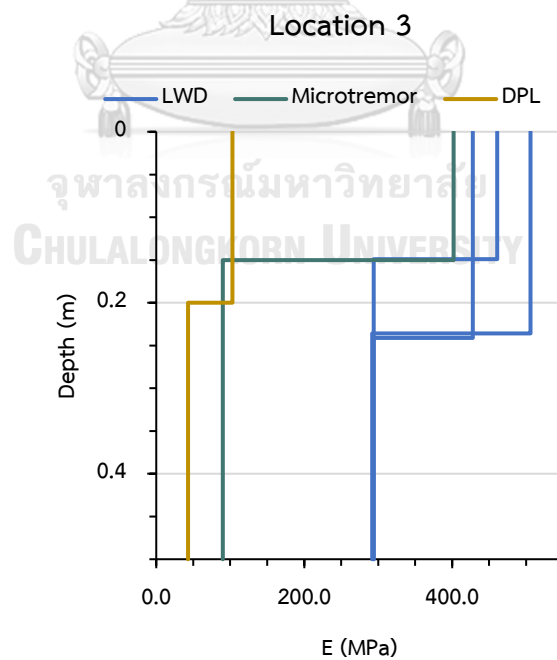
จากผลการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ LWD และประเมินความแม่นยำร่วมกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor และ DPL บนแปลงทดสอบทั้ง 6 แปลงทดสอบ ซึ่งตัวแปรที่ได้จากการประเมินประกอบด้วย โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก (E1) โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นสอง (E2) และความหนาของชั้นทาง (h) โดยที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินโมดูลัสในแต่ละชั้นทางของสายทางแต่ละเส้นได้ถูกนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสและความหนาชั้น ในการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละสายทาง สำหรับเครื่องมือมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบและประเมินความแม่นยำเครื่องมือ LWD ได้แก่ เครื่องมือ Microtremor และเครื่องมือ DPL ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ได้ทำการทดสอบกับโครงสร้างทางสายเดียวกันและตำแหน่งใกล้เคียงกันกับการทดสอบเครื่องมือ LWD ผลการศึกษาพบว่า การประเมินโมดูลัสของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD มีแนวโน้มไปในทิศทางที่เหมือนกันและมีความสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จากเครื่องมือ Microtremor อย่างไรก็ตามค่าความหนาของชั้นทางที่ได้จากการประเมินมีความสอดคล้องดีกับเครื่องมือ DPL โดยผลการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปแบบแผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) เพื่อดูการกระจายตัวของข้อมูล และแผนภูมิแท่ง



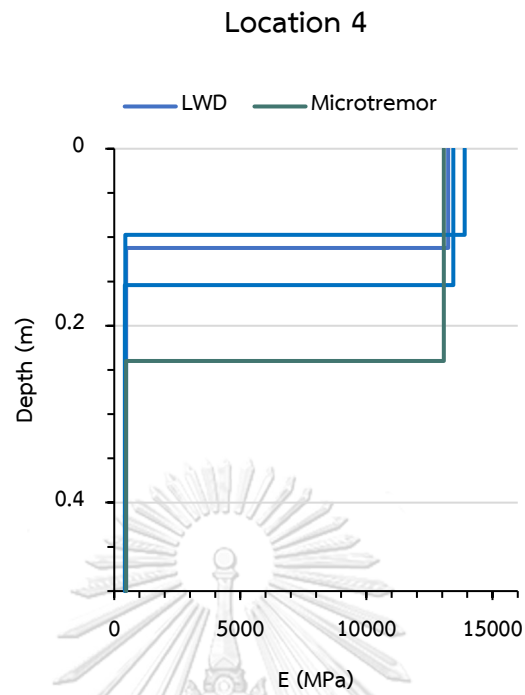
รูปที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 1



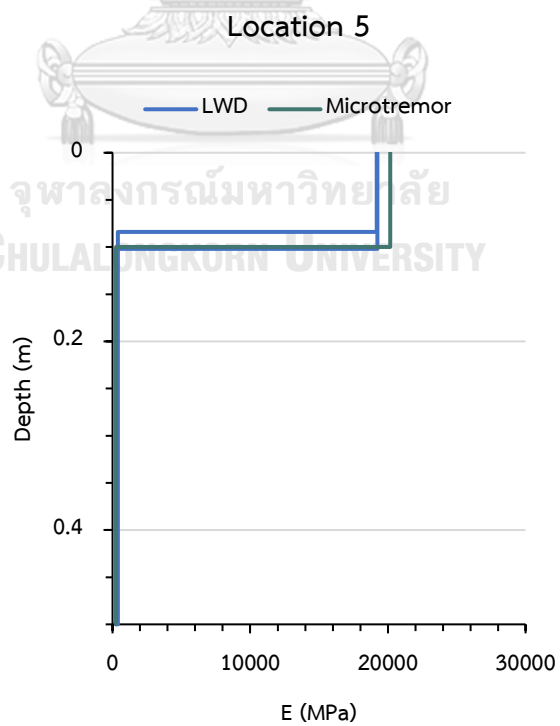
รูปที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 2



รูปที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 3

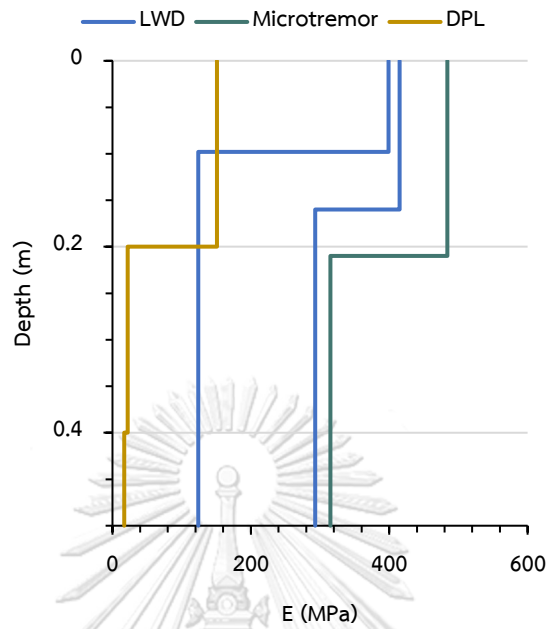


รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 4



รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 5

Location 6

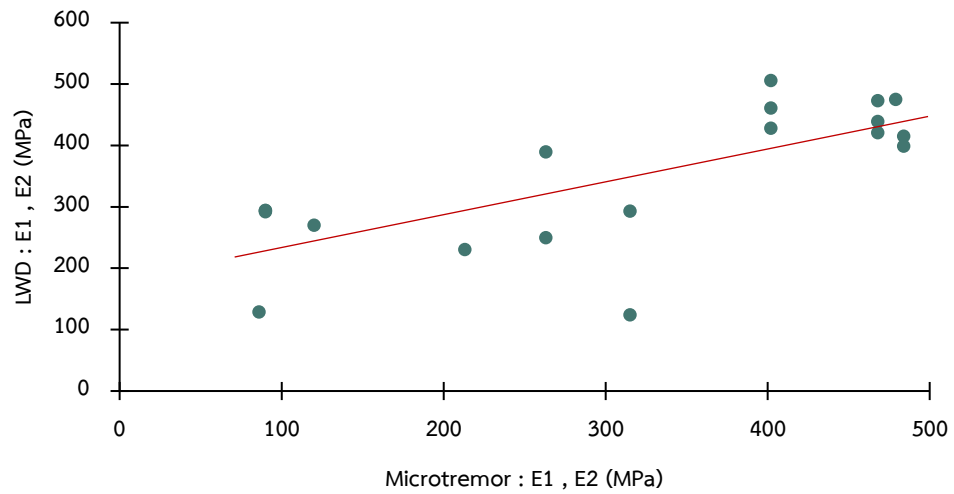


รูปที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความลึกของแปลงทดสอบที่ 6

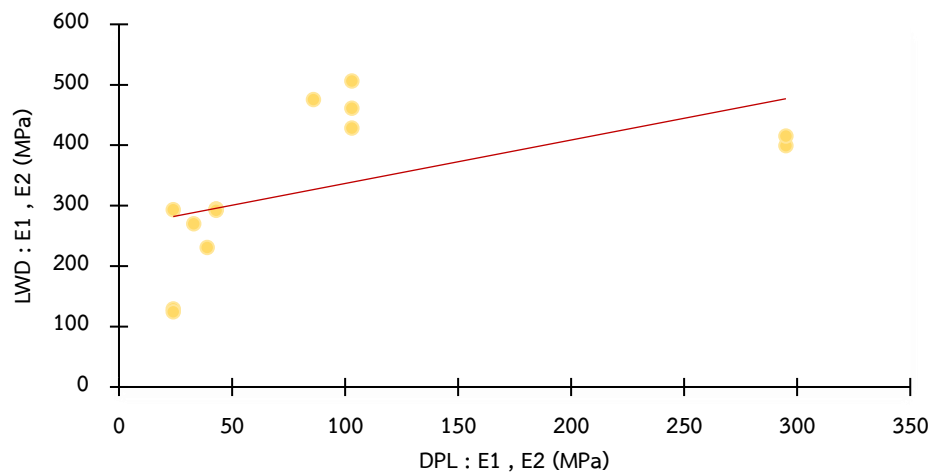
ตารางที่ 14 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบ 2 ชั้นทาง

แปลงทดสอบ	จุดทดสอบ	E_1 (MPa)					E_2 (MPa)					h (cm)				
		LWD	Micro	%R	DPL	%R	LWD	Micro	%R	DPL	%R	LWD	Micro	%R	DPL	%R
1	1	230	213	7%	39	83%	128	86	33%	24	81%	18.0	15.0	16%	10.0	44%
2	1	475	479	1%	86	82%	270	120	56%	33	88%	19.7	21.0	6%	20.0	2%
3	1	428	402	6%	103	76%	294	90.00	69%	43	85%	24.1	15.0	37%	20.0	17%
	2	461	402	13%	103	78%	294	90.00	69%	43	85%	14.9	15.0	0.7%	20.0	34%
	3	506	402	20%	103	80%	292	90.00	69%	43	85%	23.6	15.0	36%	20.0	15%
4	1	13240	13068	1.3%	-	-	472	468	1%	-	-	11.2	24.0	114%	-	-
	2	13895	13068	5.9%	-	-	439	468	7%	-	-	9.7	24.0	147%	-	-
	3	13445	13068	2.8%	-	-	420	468	11%	-	-	15.4	24.0	55%	-	-
5	1	19191	20172	5.1%	-	-	389	263	32%	-	-	8.4	10.0	19%	-	-
	2	19239	20172	4.8%	-	-	249	263	6%	-	-	10.2	10.0	2%	-	-
6	1	399	484	21%	295	26%	124	315	154%	24	81%	9.8	21.0	114%	20.0	104%
	2	415	484	16.6%	295	29%	293	315	8%	24	92%	16.0	21.0	31%	20.0	25%

** E_1 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นแรก, E_2 คือโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นล่าง, %R คือค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

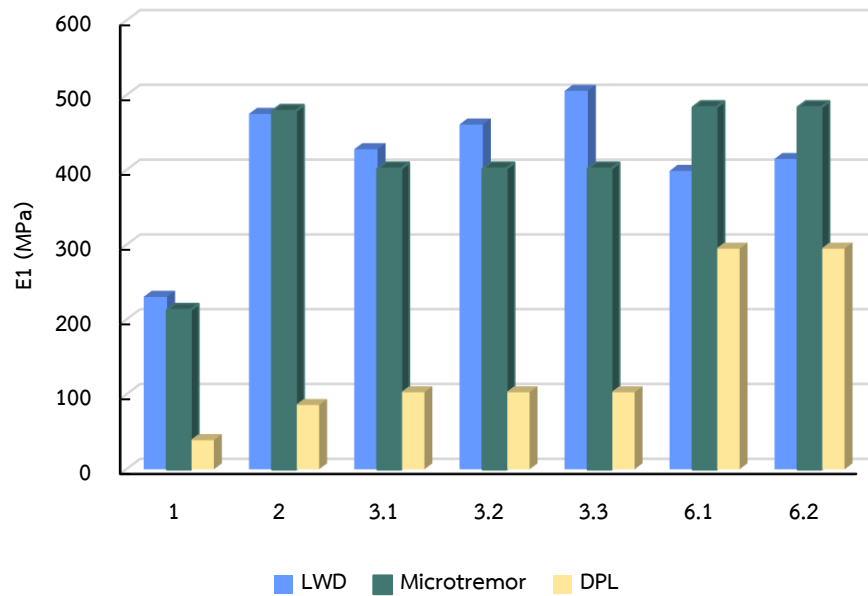


รูปที่ 69 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากการทดสอบด้วย
เครื่องมือ LWD และ Microtremor

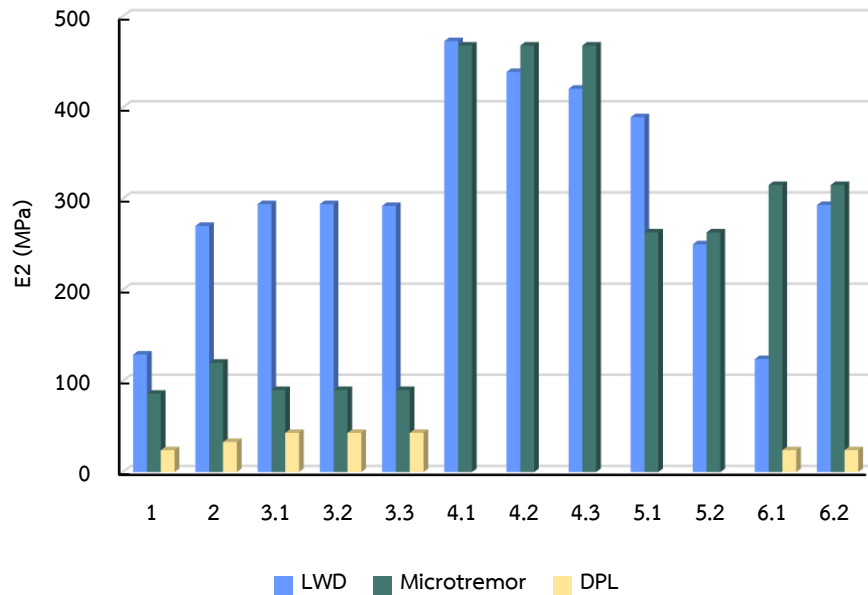


รูปที่ 70 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางจากผลการทดสอบด้วย
เครื่องมือ LWD และ DPL

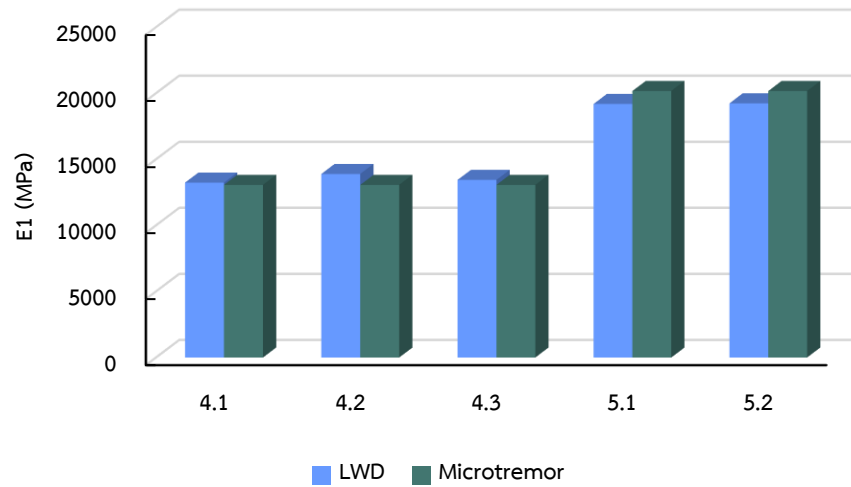
จากผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ดังแสดงในรูปที่ 69 และ 70 จะเห็นว่าข้อมูลบางส่วนมีการกระจายตัวออกจากเส้นแนวโน้ม เนื่องจากข้อมูลที่สนใจอยู่ในช่วงความลึกระดับตื้นทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากหลายๆปัจจัย เช่น ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแผนภาพกล่องเพื่อแสดงการกระจายตัวของข้อมูลโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทาง



รูปที่ 71 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นแรก (E_1) ของวัสดุโครงสร้างทางแบบไม่เชื่อมแน่น

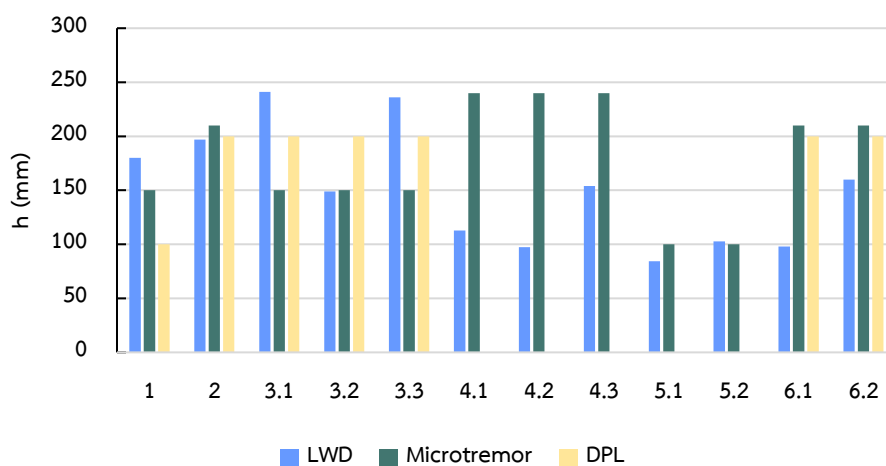


รูปที่ 72 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นสอง (E_2) ของวัสดุโครงสร้างทางแบบไม่เชื่อมแน่น



รูปที่ 73 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นแรกของ (E_1) โครงสร้างทางแบบเชื่อมแน่น

อีกทั้งจะเห็นว่าจากการทดสอบภาคสนามด้วยอุปกรณ์เครื่องมือ LWD นอกจากการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางแล้วจะสามารถคำนวณย้อนกลับหาได้อีกหนึ่งตัวแปรคือ ความหนาของชั้นทาง ดังสรุปไว้ในแผนภูมิแท่งในรูปที่ 74 จะเห็นว่าจากการประเมินความหนาของชั้นทางด้วยเครื่องมือ LWD ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกันดีและมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน โดยที่ค่าความหนาชั้นทางที่นำมาเปรียบเทียบจะเป็นความหนาของวัสดุโครงสร้างชั้นทางชั้นแรกเท่านั้นตามสมมติฐานของทฤษฎีอีลาสติกของระบบสองชั้นทาง



รูปที่ 74 แผนภูมิแท่งการเปรียบเทียบความหนาชั้นทางที่ได้กับเครื่องมือมาตรฐาน

จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามของโครงสร้างชั้นทางในที่นี้คือ แรงกระทำและการทรุดตัวที่ผิว จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้วิธีผลรวมกำลังสองน้อยสุด (Sum of squared errors) เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งผลการวิเคราะห์และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในรูปของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทาง พบว่าความแข็งแรงของแต่ละชั้นทางมีค่าแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ โดยที่การประเมินจากเครื่องมือ LWD จำนวนทั้งสิ้น 6 แปลงทดสอบ มีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการประเมินจากเครื่องมือ Microtremor และ DPL อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าข้อมูลบางส่วนมีการกระจายตัวออกจากเส้นแนวโน้มเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือ Light Weight Deflectometer ที่มีเซนเซอร์เพิ่มเติมในแนวรัศมี สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในแต่ละชั้นที่มีวัสดุทางแตกต่างกัน ทั้งนี้จากข้อมูลการทดสอบในช่วงใดช่วงหนึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของชั้นทางและความหนาได้ โดยจะแสดงอยู่ในรูปค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทางจากการวิเคราะห์และประมวลผลตามสมมติฐานของทฤษฎีอีลาสติกระบบชั้นทาง โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ ผลสรุปการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ LWD ผลสรุปการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ Microtremor ผลสรุปการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ DPL และการเปรียบเทียบการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง รวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในอนาคต มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การเปรียบเทียบการประเมินโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทาง

จากข้อมูลการทดสอบภาคสนามค่าการทรุดตัวที่ระยะต่างๆในแนวรัศมีจากจุดที่น้ำหนักกระทำ ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer สำหรับประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในรูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทาง และในขณะเดียวกันเพื่อเป็นการสอบเทียบประสิทธิภาพจึงได้นำเครื่องมือ Microtremor และเครื่องมือ DPL ตามมาตรฐาน มาทดสอบร่วมเพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการเครื่องมือ LWD

ผลการวิเคราะห์และประมวลผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ LWD กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐานอื่นๆ รวมจำนวนทั้งสิ้น 6 แปลงทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แปลงทดสอบที่ 1

แปลงทดสอบที่ 1 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยชั้นรองพื้นทางดินลูกรังและดินถม ผลการทดสอบจะเห็นว่าความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความหนาของชั้นรองพื้นทางจากเครื่องมือ LWD มีค่า $E_1 = 230$ MPa, $E_2 = 128$ MPa, $h = 18.0$ cm และเครื่องมือ Microtremor มีค่า $E_1 = 213$ MPa, $E_2 = 86$ MPa, $h = 15.0$ cm ซึ่งมีความสอดคล้องกันดี แต่มีการแกว่งตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องมือ DPL มีค่า $E_1 = 39$ MPa, $E_2 = 24$ MPa, $h = 10$ cm แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD ในแต่ละชั้นมีความสอดคล้องกับเครื่องมือมาตรฐาน

2. แปลงทดสอบที่ 2

แปลงทดสอบที่ 2 มีโครงสร้างชั้นทางประกอบด้วยพื้นทางหินคลุกและรองพื้นทางลูกรัง จะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD ในแต่ละชั้นของหน้าตัดแปลงทดสอบนี้มีค่า $E_1 = 475$ MPa, $E_2 = 270$ MPa, $h = 19.7$ cm ซึ่งจะเห็นว่าค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางและความหนามีใกล้เคียงกับเครื่องมือ Microtremor มีค่า $E_1 = 479$ MPa, $E_2 = 120$ MPa, $h = 21$ cm และเครื่องมือ DPL มีค่า $E_1 = 86$ MPa, $E_2 = 33$ MPa, $h = 20$ cm อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 อยู่ในพื้นที่บริเวณโครงการเดียวกัน การประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากเครื่องมือ LWD จะอนุมานได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นรองพื้นทางของแปลงทดสอบที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับชั้นพื้นทางของแปลงทดสอบที่ 2

3. แปลงทดสอบที่ 3

โครงสร้างชั้นทางของแปลงทดสอบนี้ประกอบด้วยพื้นทางหินคลุกและรองพื้นทางลูกรัง จะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางที่ได้จากเครื่องมือ LWD มีค่า $E_1 = 428$ MPa, $E_2 = 294$ MPa, $h = 24.1$ cm มีความสอดคล้องกับเครื่องมือ Microtremor $E_1 = 402$ MPa, $E_2 = 90$ MPa, $h = 15$ cm ในขณะที่ความหนาที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยเครื่องมือ DPL $E_1 = 103$ MPa, $E_2 = 43$ MPa, $h = 20$ cm โดยที่แปลงทดสอบที่ 3 และ 4 อยู่ในพื้นที่บริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอนุมานได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางของแปลงทดสอบที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางของแปลงทดสอบที่ 4

4. แปลงทดสอบที่ 4

มีลักษณะโครงสร้างชั้นทางแบบเชื่อมแน่นประกอบด้วยชั้นผิวทางคอนกรีตและชั้นพื้นทางหินคลุก ซึ่งผลการทดสอบจากเครื่องมือ LWD ทั้ง 3 ตำแหน่ง มีความสอดคล้องกันดี $E_1 = 13445$ MPa, $E_2 = 420$ MPa, $h = 15$ cm แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor $E_1 = 13068$ MPa, $E_2 = 468$ MPa, $h = 24$ cm พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนจากการปล่อยลูกตุ้มในแต่ละครั้งและค่าการทรุดตัวของผิวทางคอนกรีตมีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามผลประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ LWD ของชั้นพื้นทางหินคลุกมีความสอดคล้องกับแปลงทดสอบที่ 3 โดยที่การทดสอบสำหรับแปลงทดสอบนี้จะไม่นำเครื่องมือ DPL มาใช้ในการทดสอบร่วม

5. แปลงทดสอบที่ 5

แปลงทดสอบนี้มีลักษณะเป็นผิวทางแบบคอนกรีต โดยการประเมินโมดูลัสชั้นทางและความหนาของแปลงทดสอบนี้จะได้จากเครื่องมือ LWD และ Microtremor ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือ LWD $E_1 = 19239$ MPa แต่เมื่อเทียบกับเครื่องมือ Microtremor $E_1 = 20172$ MPa พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือทั้งสองของแปลงทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันดี โดยที่เครื่องมือ LWD $E_2 = 249$ MPa, $h = 10$ cm และเครื่องมือ Microtremor $E_2 = 263$ MPa, $h = 10$ cm

6. แปลงทดสอบที่ 6

มีลักษณะเป็นชั้นพื้นทางหินคลุกและชั้นรองพื้นทางลูกรัง ผลการประเมินจากเครื่องมือ LWD พบว่าค่าโมดูลัสของชั้นพื้นทางมีค่าเท่ากับ $E_1 = 415$ MPa ชั้นรองพื้นทางมีค่าเท่ากับ $E_2 = 293$ MPa และความหนาชั้นพื้นทางเท่ากับ $h = 16$ cm โดยที่ผลการทดสอบจากเครื่องมือ Microtremor ชั้นพื้นทางเท่ากับ $E_1 = 484$ MPa ชั้นรองพื้นทางเท่ากับ $E_2 = 315$ MPa ความหนาชั้นพื้นทางเท่ากับ $h = 21$ cm จะเห็นว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องมือ DPL ซึ่งชั้นพื้นทางมีค่าเท่ากับ $E_1 = 295$ MPa ชั้นรองพื้นทางเท่ากับ $E_2 = 24$ MPa และความหนาชั้นพื้นทางเท่ากับ $h = 20$ cm

จากผลการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางภายใต้โครงสร้างชั้นทางที่มีลักษณะเป็นระบบชั้นๆ หรือมีวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในแต่ละแปลงทดสอบ จากการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากประเมินด้วยเครื่องมือ LWD มีค่าใกล้เคียงและความสอดคล้องกับเทคนิคการตรวจวัดด้วยคลื่นขนาดเล็กที่ผิว (Microtremor) แต่ความหนาที่มีค่าสอดคล้องกับเครื่องมือตอกหยั่งแบบเบา (Dynamic Probing Light) ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีการประเมินโมดูลัสด้วยเครื่องมือ LWD ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องมือ LWD ที่มีลิโอฟอนในแนวนอนจำนวน 2 ตัว จากจุดศูนย์กลางแผ่นงานโลหะสามารถประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของระบบสองชั้นทางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นทาง อย่างไรก็ตามข้อมูลการหลุดตัวที่ได้จากการทดสอบบางส่วนมีการกระจายตัวออกจากเส้นแนวนอน เนื่องจากข้อมูลที่สนใจอยู่ในช่วงความลึกระดับตื้นทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากหลายปัจจัย อาทิ ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น

5.2 การนำไปใช้และข้อจำกัดของการศึกษา

การประมวลผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นทางจากข้อมูลการหลุดตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD ที่มีเซนเซอร์วัดความเร็วคลื่นในแนวนอนจำนวนสองตัว ซึ่งค่าการหลุดตัวที่ใช้ต้องเป็นค่าการหลุดตัวที่ผิวในแนวนอนที่ระยะไม่เกิน 60 เซนติเมตร จากจุดที่แรงกระทำโดยการศึกษานี้ได้ใช้ค่าการหลุดตัวที่ผิวที่ระยะ 0, 30, 60 เซนติเมตร และ 0, 20, 40 เซนติเมตร ในแนวนอนจากจุดที่แรงกระทำ สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิและปริมาณความชื้น ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทางที่ได้จากการประเมินด้วยเครื่องมือ LWD อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยแต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในการวิเคราะห์และประมวลผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดในการทำงานอยู่บ้างคือ ไม่สามารถประเมินโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าโมดูลัสหรือความหนาชั้นทางมากหรือต่ำกว่าช่วงที่ทำนายไว้ได้ โดยทั่วไปค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐานชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตอยู่ในช่วง 1300 – 17200 MPa ชั้นผิวทางคอนกรีต 6890 – 68900 MPa ชั้นพื้นทางหินคลุก 300 – 550 MPa ชั้นรองพื้นทางดินลูกรัง 100 – 300 MPa สำหรับความหนาของชั้นทางกำหนดให้ชั้นผิวทางอยู่ในช่วง 5 – 25 ซม. ชั้นพื้นทางและรองพื้นทางอยู่ในช่วง 5 – 25 ซม.

การศึกษานี้ได้กำหนดให้วัสดุทุกชั้นทางมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น ซึ่งถูกจำกัดด้วยขนาดของแรงกระทำไม่สูงมากนักจะทำให้วัสดุที่รองรับยังคงมีพฤติกรรมตามที่สมมติฐานไว้ แต่หากมีแรงที่กระสูงกว่าที่กำหนดไว้มาก จะทำให้วัสดุที่รองรับมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปโดยมีลักษณะเป็นอิลาสติกไม่เชิงเส้นหรือมีพฤติกรรมแบบพลาสติก ซึ่งอาจจะทำให้โครงสร้างชั้นทางเสียรูปร่างแบบถาวรส่งผลให้ชั้นทางเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในการประเมินความแข็งแรงด้วยเครื่องมือ LWD จึงไม่ควรให้นำหนักกระทำที่สูงมากเกินไป



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี และ นคร ภู่วโรดม. (2014). อิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน ของ ชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้ง. *Engineering Journal of Research and Development*, 25(3), 7-15.
- นคร ภู่วโรดม และ นนทกร ผลินยศ. (2011). คุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งในกรุงเทพมหานคร และ ปริมาณผลจากการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน. *Engineering Journal of Research and Development*, 22(3), 31-38.
- นคร ภู่วโรดม และ กิตติศักดิ์ พิทักษ์วงศ์. (2010). การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยการ ตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กบนผิวดิน. *Engineering Journal of Research and Development*, 21(3), 85-91.

ภาษาอังกฤษ

- 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.
- Achenbach, J. (2012). *Wave propagation in elastic solids*. Elsevier.
- Bowles, J. E. (1988). *Foundation analysis and design*.
- Butcher, A., McElmeel, K., & Powell, J. (1996). Dynamic probing and its use in clay soils. Proceedings of the international conference on Advances in site investigation practice, (Craig C.(eds)). Thomas Telford, London,
- Chang, J.-R., Lin, J.-D., Chung, W.-C., & Chen, D.-H. (2002). Evaluating the structural strength of flexible pavements in Taiwan using the falling weight deflectometer. *International Journal of Pavement Engineering*, 3(3), 131-141.
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., & Amer, M. I. (2014). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, 10(3), 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.12.003>
- Fleming, P., Frost, M., & Lambert, J. (2009). Lightweight deflectometers for quality assurance in road construction. *Bearing Capacity of Roads*, 809-818.

- 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.
- Fleming, P. R., Frost, M. W., & Rogers, C. (2000). A comparison of devices for measuring stiffness in situ.
- Fwa, T., & Rani, T. S. (2005). Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. *Transportation Research Record*, 1905(1), 117-127.
- Grasmick, J. G. (2013). *Using the light weight deflectometer with radial offset sensors on two-layer systems for construction quality control/quality assurance of reclaimed and stabilized materials*. Colorado School of Mines.
- Grau, R. H., & Alexander, D. R. (1994). *Nondestructive Testing, Evaluation, and Rehabilitation for Roadway Pavement: Warren County, Mississippi, Cincinnati, Ohio, and Berkeley, California*.
- Heisey, J., Stokoe, K., & Meyer, A. (1982). Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. *Transportation Research Record*, 852(22-31), 147.
- Huang, Y. (1969). Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory. *Highway Research Record*(291).
- Huang, Y. H. (2002). *Pavement Analysis and Design* (Second Edition ed., Vol. 2002). University of Kentucky.
- Ismail, M., Samsudin, A., Rafek, A., & Nayan, K. (2012). Road pavement stiffness determination using SASW method. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 3, 9-16.
- Jarushi, F. H., Hamuda, S. S., & Aldawi, M. Correlation between the Standard Penetration Test and the Dynamic Cone Penetration Test for Sandy Soil.
- Kassim, K. A., & Ahmed, O. B. E. M. (2011). Comparison of continuous dynamic probing with the standard penetration test for highly weathered limestone of Eastern Sudan. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*.
- Livneh, M. (1997). Single-measurement estimation of in situ asphalt-layer moduli with portable falling weight deflectometer. *Transportation Research Record*, 1570(1),

118-125.

- Mooney, M. A., & Miller, P. K. (2009). Analysis of lightweight deflectometer test based on in situ stress and strain response. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(2), 199-208.
- Nega, A., Nikraz, H., & Al-Qadi, I. L. (2016). Dynamic analysis of falling weight deflectometer. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5), 427-437.
- Okada, H. (2006). Theory of Efficient Array Observations of Microtremors with Special Reference to the SPAC Method. *Exploration Geophysics*, 37(1), 73-85. <https://doi.org/10.1071/EG06073>
- Pierce, L. M., & Mahoney, J. P. (1996). Asphalt concrete overlay design case studies. *Transportation Research Record*, 1543(1), 3-9.
- Poovarodom, N., & Plalinyot, N. (2013). Site characterization in the Greater Bangkok area by microtremor observations. *Journal of earthquake engineering*, 17(2), 209-226.
- Posribink, T., Kongkitkul, W., Youwai, S., Jongpradist, P., & Punthutaecha, K. (2012). Influence of falling height and plate size on surface stiffness evaluated by LWD. *Proc. of the International Conference on Highway Engineering 2012*,
- Senseney, C. T., & Mooney, M. A. (2010). Characterization of two-layer soil system using a lightweight deflectometer with radial sensors. *Transportation Research Record*, 2186(1), 21-28.
- Steinert, B. C., Humphrey, D. N., & Kestler, M. A. (2005). *Portable falling weight deflectometer study*.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามของเครื่องมือ Light Weight
Deflectometer แต่ละแปลงทดสอบ

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 20/3/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 1

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ดินลูกรัง

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นรองพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก1 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 1

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 30 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 60 ซม. (mm)
1	1	5.29	0.183	0.016	0.009
	2	5.25	0.196	0.017	0.009
	3	5.52	0.223	0.017	0.009
	4	5.52	0.226	0.017	0.009
	5	5.21	0.245	0.017	0.009
	6	5.47	0.224	0.017	0.010

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 20/3/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 2

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 2

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 30 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 60 ซม. (mm)
1	1	5.89	0.335	0.011	0.006
	2	5.80	0.199	0.010	0.005
	3	5.64	0.188	0.011	0.006
	4	5.61	0.175	0.011	0.006
	5	5.69	0.193	0.010	0.005
	6	5.62	0.189	0.010	0.006

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 7/6/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 3

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก3 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 3

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 20 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 40 ซม. (mm)
1	1	5.02	0.121	0.026	0.012
	2	5.42	0.143	0.027	0.013
	3	5.69	0.145	0.026	0.013
	4	5.66	0.156	0.027	0.013
	5	5.67	0.149	0.026	0.013
	6	5.84	0.151	0.027	0.013
	7	5.21	0.132	0.026	0.013
	8	5.77	0.150	0.027	0.013
2	1	5.88	0.144	0.034	0.018
	2	5.84	0.150	0.035	0.018
	3	5.88	0.138	0.035	0.018
	4	5.86	0.152	0.034	0.018
	5	5.90	0.149	0.034	0.018
3	1	5.99	0.146	0.028	0.013
	2	6.07	0.134	0.030	0.014
	3	6.06	0.145	0.029	0.014
	4	6.18	0.147	0.030	0.014
	5	5.92	0.143	0.030	0.014

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 14/3/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 4

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง คอนกรีต

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นผิวทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก4 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 4

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 20 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 40 ซม. (mm)
1	1	5.40	0.072	0.010	0.008
	2	5.41	0.073	0.010	0.008
	3	5.38	0.067	0.010	0.008
	4	5.58	0.064	0.010	0.008
	5	5.58	0.070	0.009	0.008
	6	5.60	0.079	0.009	0.008
2	1	5.58	0.093	0.009	0.008
	2	5.57	0.085	0.009	0.008
	3	5.14	0.116	0.009	0.008
	4	5.17	0.097	0.010	0.008
	5	5.34	0.101	0.010	0.008
3	1	5.31	0.106	0.010	0.008
	2	5.35	0.100	0.010	0.008
	3	5.36	0.091	0.010	0.008
	4	5.41	0.104	0.010	0.008
	5	5.32	0.100	0.010	0.008
	6	5.22	0.113	0.010	0.008

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 9/6/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 5

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง คอนกรีต

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นผิวทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก5 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 5

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 20 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 40 ซม. (mm)
1	1	5.52	0.102	0.018	0.014
	2	5.62	0.098	0.016	0.013
	3	5.63	0.103	0.017	0.012
	4	5.44	0.083	0.015	0.012
2	1	5.23	0.125	0.017	0.013
	2	5.48	0.125	0.017	0.012
	3	5.51	0.119	0.016	0.012
	4	5.51	0.132	0.015	0.012



โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 27/6/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 6

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

ตารางที่ ก6 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือ LWD แปลงทดสอบ 6

จุดทดสอบ	ครั้งที่	แรงกระทำ (kN)	ค่าการทรุดตัวที่ผิวที่จุด ศูนย์กลางแผ่นงานโลหะ (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 20 ซม. (mm)	ค่าการทรุดตัวที่ผิว ที่ระยะ 40 ซม. (mm)
1	1	5.03	0.114	0.035	0.016
	2	5.08	0.106	0.036	0.016
	3	4.96	0.110	0.038	0.016
	4	4.85	0.072	0.040	0.017
2	1	5.11	0.099	0.036	0.016
	2	5.02	0.096	0.036	0.016
	3	4.97	0.089	0.035	0.016
	4	5.13	0.096	0.036	0.016
	5	5.08	0.095	0.036	0.017

ภาคผนวก ข

รายละเอียดข้อมูลการทดสอบในภาคสนามของเครื่องมือ Dynamic Probing Light
แต่ละแปลงทดสอบ

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 20/3/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 1

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ดินลูกรัง

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นรองพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

Depth (mm)	Number of Blows (Blow/10cm)
100	18
200	12
300	11
400	20
500	20
600	17
700	13
800	11
900	10
1000	4
1100	6

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 20/3/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 2

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

Depth (mm)	Number of Blows (Blow/10cm)
100	23
200	23
300	15
400	15
500	15
600	9
700	8
800	5
900	4
1000	8

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 14/6/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 3

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

Depth (mm)	Number of Blows (Blow/10cm)
100	31
200	25
300	21
400	16
500	19
600	12
700	12
800	10
900	9
1000	9

โครงการก่อสร้างถนน

วันที่ทดสอบ 27/6/2566

ตำแหน่งทดสอบ แปลงทดสอบที่ 6

ชนิดของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หินคลุก

โครงสร้างชั้นทาง ชั้นพื้นทาง

อุณหภูมิ 35 องศา

Depth (mm)	Number of Blows (Blow/5cm)
50	41
100	47
150	42
200	38
250	10
300	11
350	6
400	10
450	6
500	6
550	6
600	7
650	6
700	5
750	6
800	5
850	4
900	4
950	5
1000	4

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายฐิติพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล
วัน เดือน ปี เกิด	26 มกราคม 2540
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 หัวข้อ “ความท้าทายด้านวิศวกรรมโยธาหลังการระบาดใหญ่” (“Post-Pandemic Challenges in Civil Engineering”) วันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมภูเก็ตแกรนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, จังหวัดภูเก็ต จัดการประชุมโดย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังนี้ ฐิติพัฒน์ รุ่งพัฒนาชัยกุล, ถิรวัฒน์ ชัมเล่มกิม และ จุริวัตร บุญญะฐิติ, 2566. การประเมินโมดูลัสของชั้นทางจาก Light Weight Deflectometer ที่มีจีโอโฟนเพิ่มเติมในแนวรัศมี (Pavement modulus determination by Light Weight Deflectometer with optional radial geophones). เอกสารประกอบการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 ปี พ.ศ. 2566