การศึกษาพฤติกรรมการกระจายความชื้นในสนามของกำแพงกันดินเสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์ที่ใช้วัสดุถมต่างกัน

A STUDY OF SOIL MOISTURE BEHAVIOR IN MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALL

บวรพงศ์ สุขเจริญ[1,*], อภินิติ โชติสังกาศ[2], วรากร ไม้เรียง[2] และ ประกิต ไชยศรี[3]
[1] นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
[2] รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
[3] วิศวกรโยธาชำนาญการ กรมทางหลวงชนบท
[*]Corresponding author address: borwonpong.s@ku.th, fengatj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการกระจายความชื้นในกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetic Reinforced Soil Wall , GRS wall) ซึ่งใช้วัสดุถมต่างกัน โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำและความชื้นภายในกำแพงกันดิน รวมถึงอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัว (KU in placed inclinometer) พบว่ากรณีกำแพงกันดินที่ใช้วัสดุถมเม็ดหยาบมีปริมาณน้ำสะสมภายในกำแพงช่วงฤดูแล้งเท่ากับ 1-2% และในช่วงฤดูฝนเพิ่มขึ้นเป็น 3-5% พบการเคลื่อนตัวในทิศทางออกจากชั้นดินถมประมาณ 20 มิลลิเมตร เนื่องจากฝนตกสะสมภายหลังจากการก่อสร้างเป็นเวลา 1 ปี สำหรับกรณีกำแพงกันดินที่ใช้วัสดุถมท้องถิ่นพบปริมาณน้ำในมวลดินสูงกว่าวัสดุถมชนิดหยาบและพบปริมาณน้ำในวัสดุถมมีค่าเพิ่มขึ้นหลังฝนตกสะสมภายในกำแพงและอัตราการตอบสนองช้ากว่า สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การซึมน้ำที่ต่ำกว่าและพบการเอียงตัวของกำแพงเข้าหาชั้นดินถม สอดคล้องกับรอยแตกที่สังเกตได้ในสนาม เป็นช่องทางในการไหลซึมของน้ำส่งผลให้เกิดการสะสมความชื้นโดยตำแหน่งที่เกิดการสะสมความชื้นมากที่สุดประมาณ 30% ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของวัสดุถมพบว่าลักษณะการกระจายความชื้นแตกต่างกัน ส่งผลให้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงมีลักษณะแตกต่างกันตามไปด้วย อย่างไรก็ตามระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน พฤติกรรมที่พบนี้เป็นประโยชน์ในการกำหนดการซ่อมบำรุงและการออกแบบกำแพง GRS ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: *กำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์, การตรวจวัดในสนาม, การกระจายตัวของความชื้น, ระยะการเคลื่อนตัว*

Abstract

This research aims to present the influence of various backfill materials on soil moisture behavior inside the Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Wall. In this study field tensiometers, Time Domain Reflectometry (TDR) and KU in-placed inclinometers used to measure the change in pore-water pressure, soil moisture behavior of backfill material and tilting angle of the wall. According to the obtained results, coarse grained backfill material tends to have a constant moisture content around 1-2% during the dry period and after the rainfall it increased to 3-5%. The movement of the wall is also clearly increased with respect to the accumulated rainfall by increasing its outward movement by 20 mm after the one year of construction. When backfill material is local material, accumulated moisture content inside the wall is higher than case of coarse grain backfill soil due to the low soil permeability. Also found that, wall movement of local backfill material is the cause of concrete crack near to concrete gutter, which creates the seepage flow paths inside the backfill material and as a result it increased the moisture content about 30%. Comparatively, both coarse grained and local material have different moisture behaviors together with direction of the wall movement, but the range of wall movement is relatively similar in both backfill materials. These observed results can be used in terms of design works and maintenance of GRS wall as a long-term benefit.

Keywords: *Geosynthetic Reinforced Soil Wall, Field instrumentation, soil moisture behavior*

1. บทนำ

การพังทลายของถนนบริเวณเชิงเขาเกิดขึ้นบ่อยครั้งในประเทศไทย ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากน้ำฝน เนื่องจากน้ำฝนกัดเซาะบริเวณผิวหน้าของลาดดินและซึมลงสู่ดินทำให้แรงดันน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงและส่งผลให้เกิดการพิบัติ จากงานวิจัยด้านการตรวจวัดพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในลาดดินธรรมชาติ (อภินิติ, 2555) ปัจจุบันนิยมใช้กำแพงกันดินเสริมแรง (Geosynthetic Reinforced Soil Wall , GRS wall) ในการซ่อมแซมคันทางที่เกิดการพังทลายแล้วหรือใช้เพื่อป้องในบริเวณที่มีความที่จะเกิดการพังทลาย เนื่องจากก่อสร้างได้รวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อย เป็นโครงสร้างป้องกันดินถล่มที่ยืดหยุ่นสามารถทนต่อแรงแผ่นดินไหวหรือการทรุดตัวได้มากกว่ากำแพงกันดินชนิด

แข็ง โดยผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงระบบระบายน้ำภายในโครงสร้างและการเลือกใช้วัสดุถม (Back fill) ซึ่งตามมาตฐานของ FHWA NHI-10-024 แนะนำให้ใช้วัสดุหยาบเป็นวัสดุถมเนื่องจากมีคุณสมบัติในการระบายน้ำ อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติมักจะหาวัสดุเม็ดหยาบมาใช้ในการก่อสร้างได้ยากและหลายกรณีมักมีเลือกใช้วัสดุท้องถิ่นเป็นวัสดุถมในกำแพง GRS wall ซึ่งมักมีอนุภาคเม็ดละเอียดปะปน เนื่องจากในการออกแบบยังขาดข้อมูลการกระจายตัวของความชื้นภายในกำแพงที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและเก็บข้อมูลพฤติกรรมการกระจายความชื้นในกำแพงกันดินเสริมแรงที่ใช้วัสดุถมแตกต่างกันรวมถึงผลกระทบของความชื้นต่อการเสียรูปของกำแพง

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

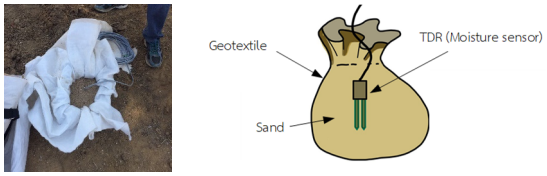
งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลพฤติกรรมการกระจายความชื้นและการเสียรูปของกำแพงกันดินเสริมแรงโดยติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในสนามเพื่อนำมาศึกษาอิทธิพลของวัสดุถมที่ส่งผลต่อการกระจายความชื้นและการเสียรูปของกำแพง

2.1. การติดตั้งอุปกรณ์ในสนาม

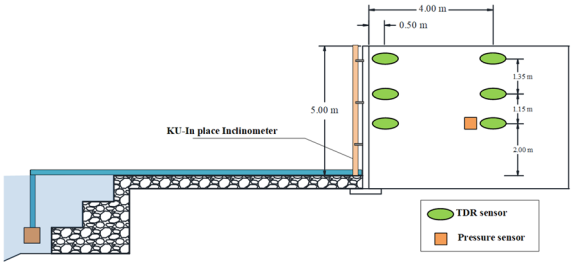
ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสริมแรงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นในกำแพงกันดินที่จะทำการศึกษาทั้งหมด 3 กำแพง และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของกำแพง KU-In place inclinometer จำนวน 2 แปลงทดลอง ดังนี้

2.1.1. กำแพงกันดินเสริมแรงสะพานวังเย็น

กำแพงกันดินเสริมแรงสะพานวังเย็นตั้งอยู่บริเวณทางหลวงหมายเลข 3228 กม. 26+130 ตำบลด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี เป็นโครงสร้างกำแพงกันดินแบบ Modular Block Wall มีความสูงกำแพง 5 เมตร และมีการเสริมตาข่ายสังเคราะห์เสริมกำลัง (Geogrid) ในทุกๆระยะห่าง 0.3 และ 0.45 เมตร ตลอดความสูงของกำแพง (ประกิต, 2563) ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้น (Time Domain Reflectometry ,TDR) ทั้งหมด 6 จุด โดยบรรจุเซนเซอร์ลงในถุงที่ทำจากแผ่นใยสังเคราะห์ Geotextile ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการบรรจุเซนเซอร์ภายในถุงทรายเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ขณะบดอัด ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ Geotextile เนื่องจาก Geotextile สามารถช่วยในการระบายน้ำ มีขนาดช่องว่างใกล้เคียงกับวัสดุถม ทำให้น้ำไม่สะสมภายในถุงและทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นสามารถตรวจวัดความชื้นได้สอดคล้องกับความชื้นที่เกิดขึ้นจริงภายในวัสดุถมมากที่สุด โดยทำติดตั้ง TDR ภายในชั้นวัสดุถม แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 2 จุด และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำภายในกำแพง 1 จุดและติดตั้งบริเวณแม่น้ำอีก 1 จุดเพื่อวัดระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1

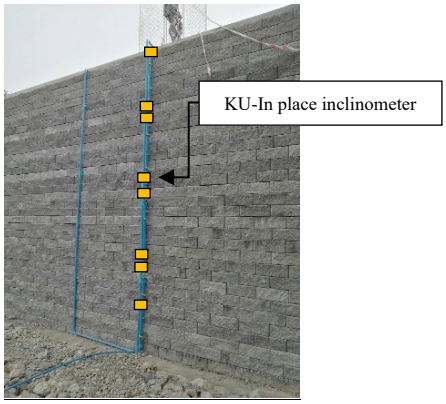


รูปที่ 1 อุปกรณ์วัดความชื้นที่บรรจุในถุงทราย



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดภายในกำแพงกันดินกรณีศึกษาสะพานวังเย็น ต.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี

นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพง (KU-In place inclinometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดมุมเอียงที่พัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งหมด 8 จุด โดยใช้ท่อ PVC เป็นแนวในการติดตั้งตลอดระนาบความสูงของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 3



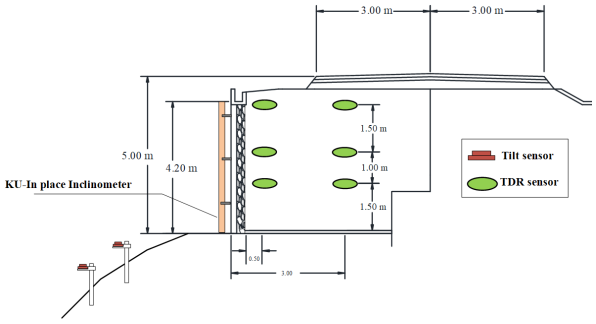
รูปที่ 3 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของกำแพง KU-In place inclinometerของกรณีศึกษาสะพานวังเย็น ต.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี

2.1.2. กำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม.7+650

สำหรับกำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม.7+650 ตั้งอยู่บริเวณริมทางหลวงชนบท กจ.4088 กิโลเมตรที่ 7+650 ตำบลปิล็อก อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นกำแพงกันดินเสริมแรงที่ก่อสร้างเพื่อซ่อมแซมการพังทลายของลาดคันทางเนื่องจากฝนตกหนักและปริมาณการจราจรที่เพิ่มมากขึ้น การศึกษา

ครั้งนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นทั้งหมด 6 จุด แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 2 จุด และติดตั้ง KU-In place inclinometer เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพง นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเอียงบริเวณลาดดินด้านหน้ากำแพงเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวบริเวณด้านหน้ากำแพง ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5

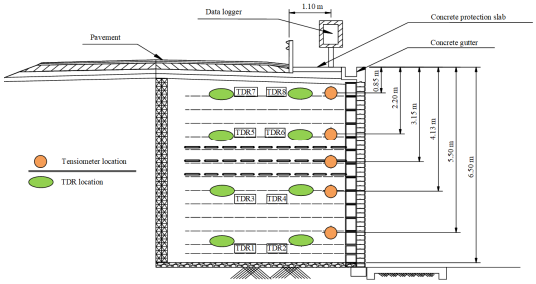
รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสนามของกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+6500



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดของกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+6500

2.1.3. กำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม. 8+700

กำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม.8+700 ตั้งอยู่บริเวณริมทางหลวงชนบท กจ.4088 กิโลเมตรที่ 8+700 ตำบลปิล็อก อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นในโครงสร้างกำแพงกันดินเสริมแรงทั้งหมด 8 จุด แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 2 จุด เพื่อให้สามารถตรวจวัดการกระจายความชื้นได้ทั่วทั้งโครงสร้าง (เสวก, 2561) ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำภายในโครงสร้าง (วชิรวัติ,2561) ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นและแรงดันน้ำของกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ. 4088 กม.8+700

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดของแต่ละกรณีศึกษา

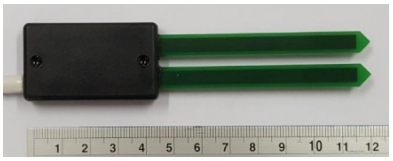
รายละเอียด	สะพานวังเย็น	กจ.4088 กม.7+650	กจ.4088 กม.8+700
ตำแหน่งที่ตั้ง	3228 กม.26 ต.ด่านมะขามเตี้ย อ.เมือง จ.กาญจนบุรี	กจ.4088 กม.7+650 ต.ปิล็อก อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี	กจ.4088 กม.8+700 ต.ปิล็อก อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี
ความสูงกำแพง	5 เมตร	4.20 เมตร	6.50 เมตร
วัสดุถม	Gravel	วัสดุท้องถิ่น (SM)	วัสดุท้องถิ่น (SM)
วัสดุเสริมกำลัง	- Geogrid	- Geogrid	- Geogrid - Geotextile
วันที่ก่อสร้างเสร็จ	กุมภาพันธ์ 2563	กุมภาพันธ์ 2563	กุมภาพันธ์ 2561

2.2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติของดินเบื้องต้น เช่น การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความชื้น การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นและการทดสอบหาเส้นอัตลักษณ์ของดิน

2.2.1. การปรับเทียบอุปกรณ์วัดความชื้นในห้องปฏิบัติ

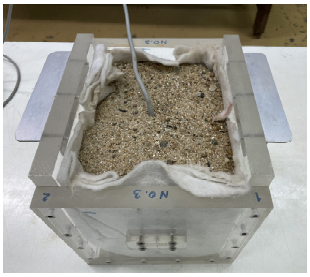
อุปกรณ์วัดความชื้น (Time Domain Reflectometry ,TDR) การทำงานของ TDR คือ การใช้แท่งโลหะ (Rods) ในการรับ-ส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านตัวกลาง คือ ดิน ที่คุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความชื้นและอุณหภูมิ (เสวก, 2562) ในการใช้งานสามารถฝังอุปกรณ์ในดินหรือเสียบแท่งโลหะลงไปในดิน สัญญาณจะถูกส่งกลับไปยังตัวรับและแปลงผลออกมาในรูปแบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ในการศึกษานี้ใช้อุปกรณ์วัดความชื้น (Time Domain Reflectometry ,TDR) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินแล้ว โดยนำอุปกรณ์วัดความชื้นมาสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร (Volumetric moisture content)



รูปที่ 7 อุปกรณ์วัดความชื้นในดิน (เสวก, 2562)

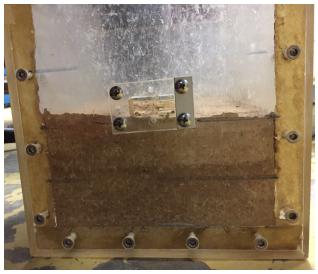
การสอบเทียบการวัดค่าความชื้นโดยปริมาตร (Moisture Calibration) ทำการสอบเทียบโดยการบดอัดตัวอย่างดินลงในกล่องอะคริลิคสี่เหลี่ยมกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร และสูง 18 เซนติเมตร (5760 ลบ.ซม) ทำการติดตั้งเซนเซอร์ลงในกล่องขณะทำการบดอัดโดยใช้ความหนาแน่นเท่ากับในสนาม สำหรับการทดสอบในครั้งนี้ใช้วัสดุ 2 ชนิดตามเพื่อจำลองสภาพการใช้งานในสนาม คือ แปลงทดลองที่ 1 (สะพานวังเย็น) เป็นตัวอย่างทราย และแปลงทดลองที่ 2 เป็นตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้บดอัดเป็นชั้นวัสดุเสริมกำลัง

การสอบเทียบตัวอย่างทรายแห้งทำโดยการบรรจุลงใน Mold ที่ห่อด้วย geotextile ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยควบคุมความหนาแน่น 1.6 g/cm^3 จากนั้นใส่อุปกรณ์วัดความชื้นจากด้านบนเพื่อให้อยู่ในสภาพเดียวกับการติดตั้งในสนาม จากนั้นทำการเพิ่มความชื้นในตัวอย่างด้วยการแช่น้ำและปล่อยตัวอย่างให้แห้งในอุณหภูมิห้องและทำการตรวจสอบค่า Voltage readout จากอุปกรณ์เป็นระยะ



รูปที่ 8 ภาชนะ (Mold) ที่ใช้ในการสอบเทียบ TDR

สำหรับตัวอย่างดินลูกรังทำการบดอัดลง Mold ที่ความหนาแน่น 2.096 g/cm^3 และใส่อุปกรณ์วัดความชื้น (TDR) ที่ช่องตรงกลางกล่อง ดังแสดงในรูปที่ 9 และใช้แผ่นโลหะประกบเข้ากับตัวอุปกรณ์วัดความชื้นเพื่อป้องกันความเสียหายขณะการบดอัด จากนั้นทำการบนอัดชั้นดินต่อจนถึงระดับที่ต้องการ ทำการตรวจวัดค่า Voltage readout หลังจากการบดอัด ชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหา Volumetric moisture content เริ่มต้น จากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำในมวลดินและดำเนินการทดสอบในวิธีเดียวกันด้วยการปล่อยให้ตัวอย่างแห้งในอุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาค่า Voltage readout ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงความชื้น

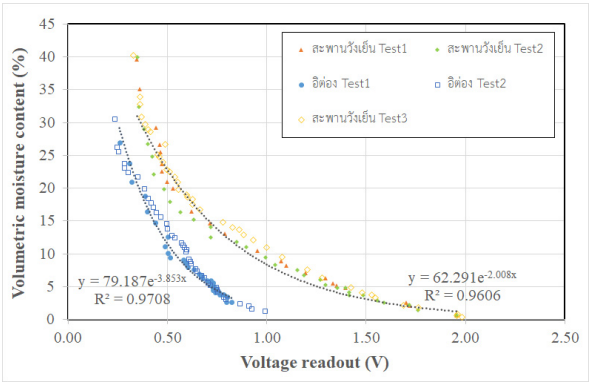


รูปที่ 9 ภาชนะ (Mold) ที่ใช้ในการสอบเทียบ TDR

จากนั้นนำค่า Voltage read out ที่วัดได้ในละจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาวาดเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความชื้นโดยปริมาตร (θ_v) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ (V) ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 10 ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวอย่างจากแปลงทดลองที่ 1 และ 2 ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\theta_v = 62.291e^{-2.008x} \quad (1)$$

$$\theta_v = 79.187e^{-3.853x} \quad (2)$$

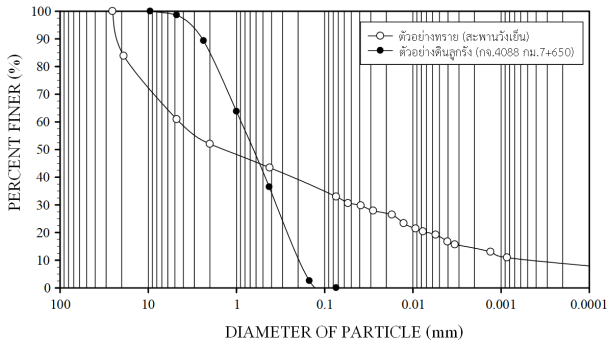


รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นโดยปริมาตรกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดความชื้น

3. ผลการศึกษา

3.1. คุณสมบัติของดินเบื้องต้น

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดในสนาม เป็นตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ก่อสร้าง โดยในการทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดิน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติดินที่ใช้ในการทดสอบ

Basic properties	สะพานวังเย็น (ทราย)	สะพานวังเย็น (หิน)	กจ.4088 กม. 7+650
Dry unit weight (kN/m3)	15	17	20
Specific gravity	2.736	2.787	2.742
Permeability. K (cm/s)	4.9×10^{-3}	1.2×10^{-1}	8.769×10^{-8}
Liquid limit, LL (%)	-	-	25.52
Plastic limit, PL (%)	-	-	16.63

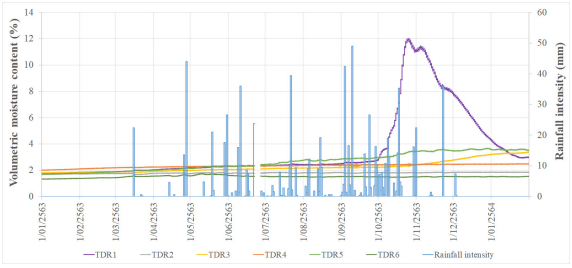
จากผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินข้างต้นสามารถจำแนกชนิดของดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาสะพานวังเย็นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) ทราย ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นสามารถจำแนกได้ว่าเป็นทรายชนิด Poorly graded sand (SP) และ 2) กรวด (Gravel)

ตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม. 7+650 พบว่าตัวอย่างจากพื้นที่นี้สามารถจำแนกเป็น Silty sand (SM)

3.2. ผลการตรวจวัดความชื้นของดินภายในกำแพงกันดินเสริมแรง

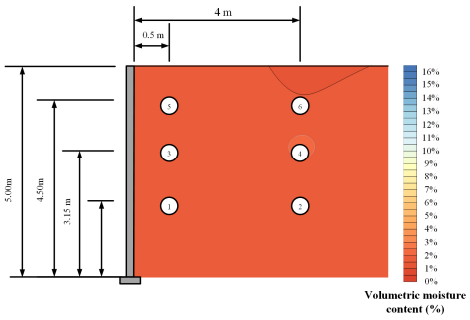
สำหรับกำแพงกันดินเสริมแรงสะพานวังเย็น ผลจากการตรวจวัดความชื้นภายในกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณตอม่อสะพานวังเย็นในช่วงหลังจากการก่อสร้าง(กุมภาพันธ์ 2563) จนถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2564 แสดงให้เห็นปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric moisture content) มีค่าคงที่ในช่วงที่ไม่มีฝนตกและหลังจากที่ฝนตกปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้อมูลข้างต้นพบว่าหลังจากที่ฝนตกปริมาณจะสะสมบริเวณด้านหน้าของกำแพงกันดินซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการระบายน้ำ และเห็นได้ว่าหลังจากฝนตกปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าลดลงเล็กน้อย ในช่วงวันที่ 8 ตุลาคม 2563 พบว่าความชื้นภายในกำแพงบริเวณตำแหน่งที่ 1 มีความชื้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 12



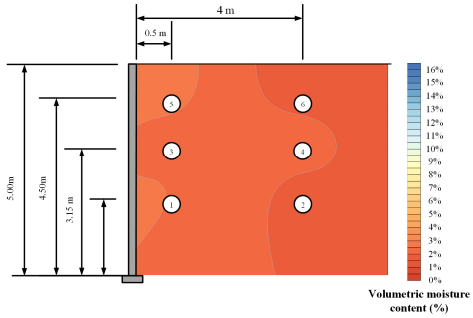
รูปที่ 12 กราฟแสดงปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรและปริมาณน้ำฝนสะสมในช่วงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2563 – 31 มกราคม 2564 ของแปลงทดลองที่ 1 สะพานวังเย็น ต.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี

จากการเก็บข้อมูลข้อมูลความชื้นภายในวัสดุถมของกำแพงกันดินเสริมแรง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของความชื้น โดยลักษณะการกระจายความชื้นในรูปแบบเส้น Contour นี้เป็นการประมาณค่าที่ตรวจวัดจากอุปกรณ์วัดความชื้นทั้งหมด 6 จุด เส้น Contour ที่ได้อาจมีความแตกต่างจากความเป็นจริงในอนาคตควรมีการตรวจวัดเพิ่มด้วยวิธี Resistivity เพื่อยืนยันผลการตรวจวัดนี้ รูปที่ 13 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความชื้นในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณน้ำโดยปริมาตรของวัสดุถมมีค่าประมาณ 1-2% และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีฝนตก รูปที่ 14 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความชื้นที่เกิดขึ้นในกำแพงกันดินหลังจากฝนตก 47.8 มิลลิเมตรต่อวัน แสดงให้เห็นลักษณะการสะสมความชื้นบริเวณด้านหน้าของกำแพงซึ่งเป็นจุดที่ใช้ระบายน้ำ

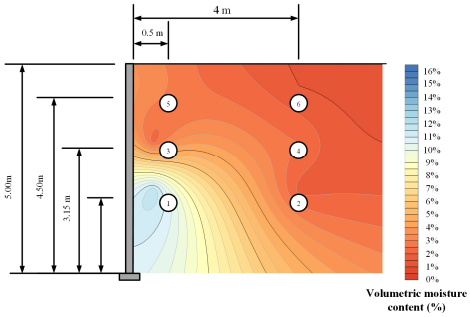
นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลการสะสมความชื้นภายในกำแพงช่วงเดือนตุลาคมมาสร้างแบบจำลองการกระจายความชื้น พบว่าตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่เขื่อนวชิราลงกรณ์มีการระบายน้ำภายในเขื่อนในช่วงเดือนตุลาคมส่งผลให้ระดับน้ำในแม่น้ำสูงขึ้นและซึมเข้ามาภายในกำแพงตรงกับตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 13 ลักษณะการกระจายความชื้นภายในกำแพงกันดินสะพานวังเย็นหลังจากการสร้าง (15 กุมภาพันธ์ 2563)



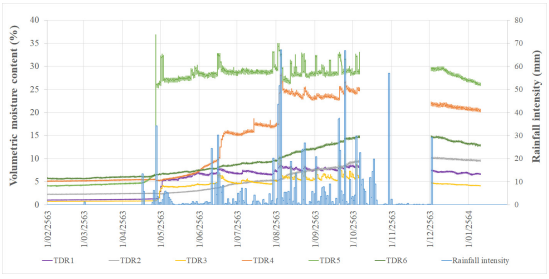
รูปที่ 14 ลักษณะการกระจายความชื้นภายในกำแพงกันดินสะพานวังเย็นหลังจากฝนตกในวันที่ 3 กันยายน 2563 (41 mm/day)



รูป 15 ลักษณะการกระจายความชื้นภายในกำแพงกันดินสะพานวังเย็นในวันที่ 25 ตุลาคม 2563

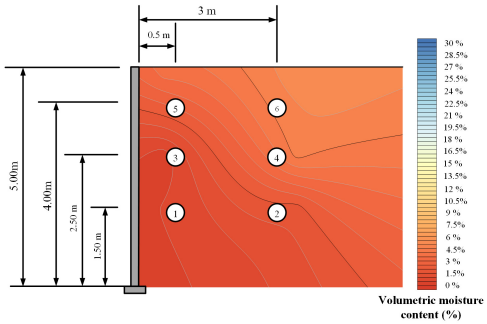
ในกรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+650 จากการตรวจวัดความชื้นภายในกำแพงกันดินเสริมแรงในช่วงหลังจากการก่อสร้าง(กุมภาพันธ์ 2563) จนถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2564 แสดงให้เห็นปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric moisture content) มีค่าคงที่ในช่วงฤดูแล้งและมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงฝนตกดังแสดงในรูปที่ 16

สำหรับการเก็บข้อมูลของกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+650 พบว่ามีข้อมูลขาดหายในบางช่วงเนื่องจากปัญหาการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์เก็บข้อมูล



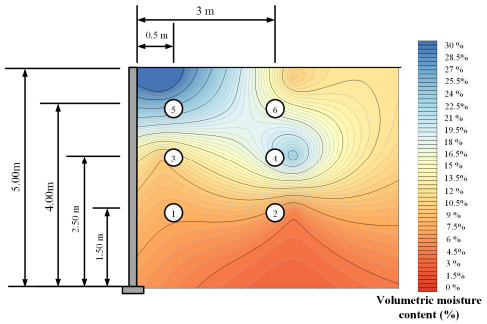
รูปที่ 16 กราฟแสดงปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรและปริมาณน้ำฝน ของกำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม.7+650 ต.ปิล็อก จ.กาญจนบุรี

จากผลการตรวจวัดการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุถมพบว่าในช่วงฤดูแล้งประมาณน้ำในดินโดยปริมาตรมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 3-5% โดยตำแหน่งที่มีความชื้นสะสมสูงจะอยู่บริเวณผิวด้านบนของวัสดุถม ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ติดตั้ง TDR หมายเลข 5 และ 6 และปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรมีค่าลดลงตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 17



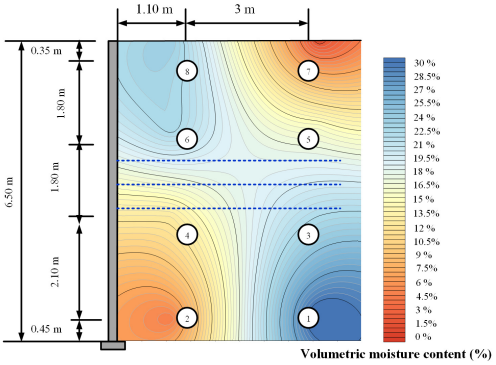
รูปที่ 17 ลักษณะการกระจายความชื้นในช่วงฤดูแล้งของกำแพงกันดิน กจ.4088 กม.7+650 ในช่วงหลังจากการก่อสร้าง (15 มีนาคม 2563)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความชื้นภายในกำแพงช่วงหน้าฝนพบว่าปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยในที่นี้ได้เลือกช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสะสมสูงสุดอยู่ที่ 89.8 มิลลิเมตร/4 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสูงสุดของปี 2563 ที่ได้จากการเก็บข้อมูลในช่วง 1 ปี รูปที่ 18 แสดงปริมาณน้ำในมวลดินมีการสะสมอยู่บริเวณผิวของวัสดุถมซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้น TDR ตำแหน่งที่ 5



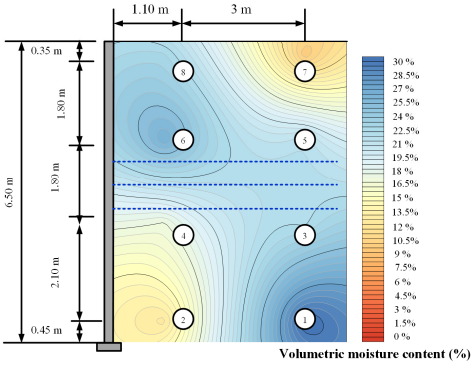
รูปที่ 18 แบบจำลองการกระจายความชื้นหลังฝนตก ของกำแพงกันดิน กจ.4088 กม.7+650 ในวันที่ 4 สิงหาคม 2563

กรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ. 4088 กม.8+700 ผลการตรวจวัดความชื้นภายในกำแพงในช่วงหลังจากการก่อสร้างพบว่ามีความชื้นสะสมภายในกำแพงค่อนข้างสูง โดยตำแหน่งที่มีการสะสมความชื้นสูงสุดอยู่บริเวณ TDR1 ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ลักษณะการกระจายความชื้นภายในโครงสร้างกำแพงกันดิน กจ.4088 กม.8+700 หลังจากการก่อสร้าง (15 กุมภาพันธ์ 2561)

รูปที่ 20 แสดงผลการตรวจวัดความชื้นภายในโครงสร้างกำแพงกันดินเสริม กจ.4088 กม.8+700 หลังจากฝนตก โดยในที่นี้นำเสนอผลการตรวจวัดในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสะสม 89 มิลลิเมตร/4 วัน พบว่าปริมาณความชื้นสะสมเพิ่มสูงขึ้น และแสดงให้เห็นการระบายน้ำภายในกำแพงเมื่อมวลน้ำซึมลงไปในวัสดุถมจนถึงชั้นระบายที่มีการติดตั้ง Geotextile พบว่าความชื้นด้านล่างชั้นระบายน้ำมีค่าลดลง และเกิดการสะสมในจุด TDR1 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการติดตั้งบอร์ดระบายน้ำในแนวราบ



รูปที่ 20 ลักษณะการกระจายความชื้นภายในโครงสร้างกำแพงกันดิน กจ.4088 กม.8+700 หลังจากฝนตก (19 กันยายน 2561)

3.3. การทดสอบหาเส้นอัตลักษณ์ของดิน

การหาเส้นอัตลักษณ์ของดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ในการทดสอบนี้ใช้วิธีการวัดแบบจุด (Point Wise Measurement) โดยใช้ KU-Tensiometer ในการวัดแรงดูด ในการทดสอบแต่ละจุดจะทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการเพิ่มหรือลดความชื้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการทดสอบ Wetting path หรือ Drying path ในแต่ละจุดของการเพิ่มหรือลดความชื้นจะต้องมีการบ่มให้ความชื้นกระจายตัวทั่วทั้งตัวอย่างก่อนจึงจะทำการวัดแรงดูดได้ จากนั้นจึงทำการตรวจวัดแรงดูด (Suction)

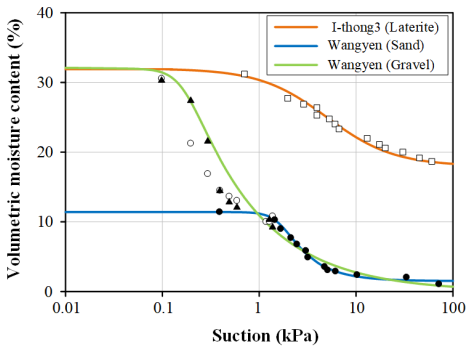
การสร้างแบบจำลอง (Curve fitting) ข้อมูลของเส้นอัตลักษณ์ของดินในการทดลองนี้ใช้สมการของ Van Genuchten's (1980) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1+\left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (3)$$

โดย θ คือ ความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric water content), θ_s คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ, θ_r คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่จุด residual และ ψ คือ แรงดันน้ำด้านลบหรือแรงดูด (suction) โดยที่ p, n และ m เป็นตัวแปรสำหรับปรับแก้ จากกราฟแสดงผลการการเปรียบเทียบได้ค่าตัวแปรปรับแก้ p, n และ m โดยรูปที่ 21 แสดงเส้นอัตลักษณ์ของดินและตารางที่ 1แสดงตัวแปรปรับแก้ที่ใช้ในการทำนายเส้นอัตลักษณ์ของดิน

ตารางที่ 3 แสดงตัวแปรปรับแก้ในการเปรียบเทียบเส้นอัตลักษณ์ของดิน

Sample	p	n	m	θ_s	θ_r
อิต่อง	0.02	1.25	1	0.32	0.18
สะพานวังเย็น (ทราย)	0.06	5	0.3	0.114	0.015
สะพานวังเย็น (หิน)	0.6	4	0.15	0.32	0.00

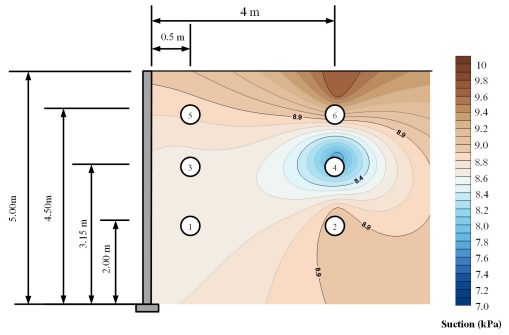


รูปที่ 21 การเปรียบเทียบสมการทำนายเส้นอัตลักษณ์ของดิน

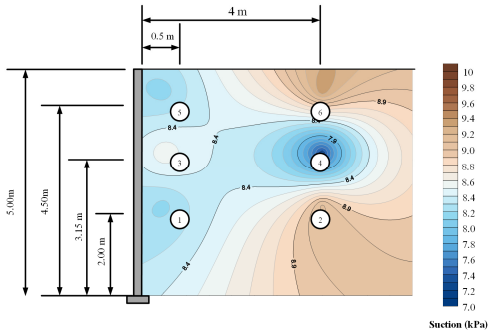
จากผลการทดสอบเพื่อหาเส้นอัตลักษณ์ของดินสามารถนำมาใช้ในการคำนวณแรงดันน้ำด้านลบภายในกำแพงกันดินเสริมแรงได้ โดยทำการแปลงค่าปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric moisture content) เป็นแรงดันน้ำด้านลบ (Suction)

สำหรับกำแพงกันดินเสริมแรงสะพานวังเย็น ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในช่วงฤดูแล้งที่ไม่มีฝนตกแรงดันน้ำด้านลบมีค่าสูงบริเวณผิวด้านบนของวัสดุถมและมีการสะสมความชื้นบริเวณกึ่งกลางของกำแพงทำให้แรงดันน้ำด้านลบมีค่าต่ำในบริเวณนั้น ดังแสดงในรูปที่ 22

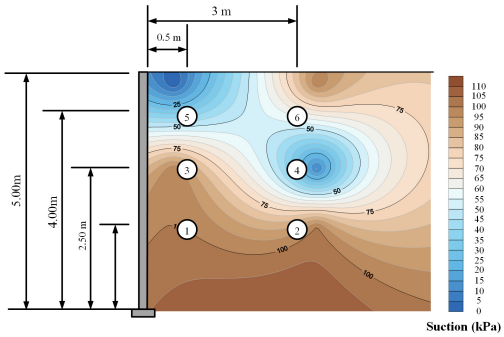
ในช่วงหลังจากฝนตกพบว่าแรงดันน้ำด้านลบมีค่าลดลงโดยเฉพาะบริเวณที่มีการสะสมความชื้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 23 บริเวณด้านหน้าของกำแพงซึ่งเป็นจุดระบายน้ำมีการสะสมความชื้นสูงทำให้มีค่าแรงดันน้ำด้านลบต่ำกว่าจุดอื่นที่มีความชื้นต่ำกว่า



รูปที่ 22 ลักษณะการกระจายแรงดันน้ำด้านลบภายในกำแพงกันดินสะพานวังเย็นหลังการก่อสร้าง (15 กุมภาพันธ์ 2563)



รูปที่ 23 ลักษณะการกระจายแรงดันน้ำด้านลบภายในกำแพงกันดินสะพานวังเย็นหลังฝนตก (9 กันยายน 2563)

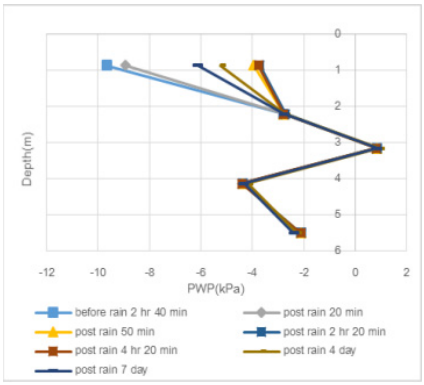


รูปที่ 24 ลักษณะการกระจายแรงดันน้ำด้านลบของกำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม.7+650 ในช่วงหลังฝนตก4 สิงหาคม 2563

ในกรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+650 จากการตรวจวัดความชื้นภายในกำแพงพบว่ามีค่าความชื้นต่ำมากประมาณ 3-5% ทำให้เมื่อนำไปแปลงค่าเป็นแรงดันน้ำด้านลบแล้วพบว่ามีแรงดันน้ำด้านลบภายในกำแพงมีค่าสูงกว่า 100 kPa ทั่วทั้งกำแพง รูปที่ 24 แสดงการกระจายตัวของแรงดันน้ำด้านลบภายในโครงสร้างหลังจากฝนตกพบว่าแรงดันน้ำด้านลบมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับกรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.8+700 (วชิรวัติ, 2562) ได้ทำการตรวจวัดแรงดันน้ำด้านลบภายในกำแพงกันดินเสริมแรงโดยการใช้ KU-Tensiometer พบว่าแรงดันน้ำภายในกำแพงในช่วงก่อนฝนตกจะมีค่าติดลบและในบริเวณกึ่งกลางของกำแพงซึ่งเป็นจุดระบายที่มีการติดตั้ง Geotextile มีค่าแรงดันน้ำที่เข้าใกล้ศูนย์และในจุดที่ต่ำกว่าบริเวณนี้จะมีค่าแรงดันน้ำด้านลบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

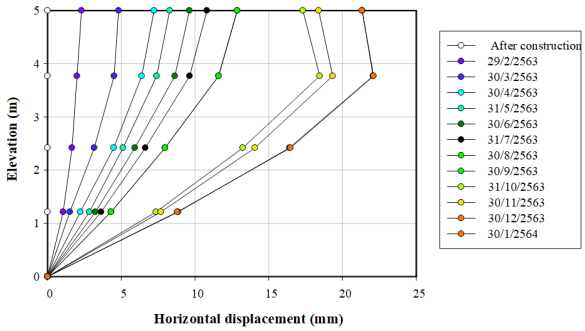
จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่าหลังจากฝนตกแรงดันน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในจุดที่ต่ำกว่าชั้นระบายน้ำมีค่าค่อนข้างคงที่



รูปที่ 25 แรงดันน้ำตามความลึกในวันที่ 29-30 ธ.ค. 2561 (วชิรวัติ,2562) ของกำแพงกันดินบริเวณทางหลวงชนบท กจ. 4088 กม.8+700

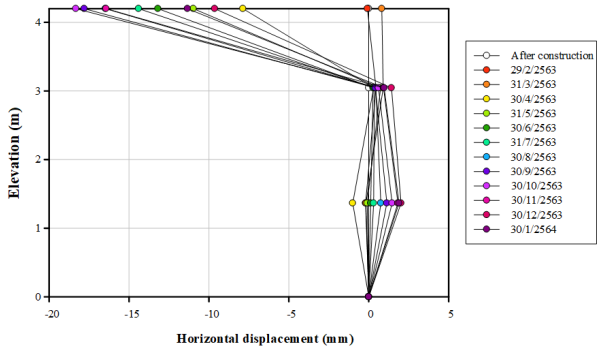
3.4. ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสริมแรง

แปลงทดลองที่ 1 สะพานวังเย็น ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวโดยใช้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวจาก KU-In place inclinometer จำนวน 2 จุด ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละช่วงของกำแพงในระยะเวลา 1 ปีหลังจากการก่อสร้างพบว่าในช่วงเดือนแรกมีการเคลื่อนตัวออกจากชั้นดินถมประมาณ 2 มิลลิเมตรและเคลื่อนตัวมากขึ้นเป็น 3 มิลลิเมตรหลักจากฝนตก หลังจากการก่อสร้าง 2 เดือนตรวจพบการเคลื่อนตัวที่ 5 มิลลิเมตรและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา จากรูปที่ 26 แสดงให้เห็นว่าเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกหนัก (ช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน) แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ผลการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวหลังการก่อสร้าง 1 ปี พบการเคลื่อนตัวประมาณ 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 26 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินสะพานวังเย็น

แปลงทดลองที่ 2 กจ.4088 กม.7+650 ต.ปิล็อก จ.กาญจนบุรี ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวโดยใช้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวจาก KU-In place inclinometer จำนวน 2 จุด ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงหลังจากการก่อสร้างพบว่าหลังจากการก่อสร้างในช่วง 2 เดือนแรกกำแพงมีการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย และหลังจากนั้นพบการเคลื่อนตัวในลักษณะการลื่นไถลของกำแพงทำให้การตรวจวัดที่ระดับ 0-3 เมตร พบการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อยและเกิดการเคลื่อนตัวเข้าหาชั้นดินถมบริเวณส่วนบนของกำแพง ในระยะเวลา 1 ปีพบการเคลื่อนตัวในลักษณะประมาณ 20 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 27 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสริมแรง กจ.4088 กม. 7+650

4. วิเคราะห์และสรุปผล

จากผลการศึกษาสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุถมต่อการกระจายความชื้นและการเสียรูปของกำแพงกันดินเสริมแรง

ในกรณีศึกษาสะพานวังเย็นพบว่าวัสดุถมชนิดนี้มีคุณสมบัติในการระบายน้ำที่ดีจึงทำให้การสะสมความชื้นภายในกำแพงมีค่าประมาณ 1-2% ในช่วงฤดูแล้งและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3-5% ในช่วงหลังจากฝนตกและใช้เวลาไม่นานในการระบายน้ำออกจากกำแพง ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสริมโดยจากการศึกษาและเก็บข้อมูลของกรณีศึกษาสะพานวังเย็นพบว่าเกิดการเคลื่อนตัวในช่วงแรกหลังจากการก่อสร้างเพียงเล็กน้อยและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากฝนตก อย่างไรก็ตามระยะการเคลื่อนตัวของกำแพงนี้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้

สำหรับกรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+650 พบว่ามีความชื้นสะสมในฤดูแล้งประมาณ 3-6% โดยความชื้นสูงสุดจะอยู่บริเวณด้านบนของวัสดุถมและความชื้นเพิ่มสูงขึ้น โดยตำแหน่งที่มีความชื้นสะสมสูงสุดมีความชื้นประมาณ 30% ซึ่งแสดงถึงว่าพื้นที่นี้อยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำโดยตำแหน่งที่เกิดการสะสมความชื้นนี้เป็นตำแหน่งที่เกิดรอยแตกเนื่องจากการเคลื่อนตัวของกำแพงแบบลื่นไถลทำให้การวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงแสดงผลในลักษณะที่เอียงไปด้านใน จากผลการศึกษานี้แสดงถึงผลกระทบของแรงดันน้ำต่อการเสียรูปได้ชัดเจน

ในกรณีศึกษากำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.8+700 พบว่ามีปริมาณน้ำในมวลดินสะสมหลังจากการก่อสร้างสูงกว่ากรณีศึกษากำแพงกันดิน กจ.4088 กม.7+650 โดยความชื้นสะสมสูงสุดภายในโครงสร้างมีค่าประมาณ 30% ซึ่งแสดงว่าดินบริเวณนั้นอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ตำแหน่งที่มีความชื้นสูงนี้เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับบอร์ดระบายน้ำแสดงให้เห็นว่าเกิดการระบายน้ำจากบริเวณโดยรอบเข้าสู่ภายในวัสดุถมและความชื้นสะสมในช่วงหลังจากฝนตกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการกระจายความชื้นมีการกระจายตัวทั่วทั้งโครงสร้างและทำให้เห็นลักษณะการระบายน้ำภายในวัสดุถมผ่านชั้นระบายทำให้ดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับของชั้นระบายน้ำมีความชื้นที่ต่ำกว่าตำแหน่งอื่นๆอย่างชัดเจน

จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงในกรณีที่ใช้วัสดุชนิดหยาบ (กรณีศึกษาสะพานวังเย็น) พบการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นหลังจากฝนตกในลักษณะที่เคลื่อนตัวออกจากกำแพงและในกรณีที่ใช้วัสดุท้องถิ่น (กรณีศึกษาทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.7+650) พบการเคลื่อนตัวในลักษณะลื่นไถลและพบว่าการเคลื่อนตัวของทั้งสองกรณีศึกษามีระยะการเคลื่อนตัวที่ใกล้เคียงกัน

5. การอ้างอิง

[1] อภินิติ โชติสังกาศ. (2555). กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ: หจก.พ รีวัน.

[2] อภินิติ โชติสังกาศ, & วิษณุพงศ์ พ่อลิละ. (2551). การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] อภินิติ. (2551). IMPORTANCE OF SOIL SUCTION IN GEOTECHNICAL ENGINEER. ความสำคัญของแรงดันน้ำด้านลบหรือแรงดูดในงานวิศวกรรมปฐพี .

[4] วชิรวัติ ประภัสสร. การศึกษาพฤติกรรมระยะยาวของแรงดันน้ำในกำแพงกันดินเสริมแรง กรณีศึกษาทางหลวงชนบท กจ.

4088 ต.ปิล็อก จ.กาญจนบุรี. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 24.

[5] เสวก จีนโต. การประยุกต์ระบบวัดความชื้นดินเพื่อการวัดความสมบูรณ์ของโครงสร้างชั้นทางเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 24.

[6] ประกิต ไชยศรี. การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอสะพานแบบกำแพงกันดินเสริมแรง : กรณีศึกษาสะพานวังเย็น อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25.

[7] Jotisankasa, A. ,. (2012). Application of Geocomposite Reinforcement for Repairing A 15m High Road Embankment Slop Failure in Northern Thailand

[8] Jotisankasa, A., Rurgchaisri, N. J. G., & Geomembranes. (2018). Shear strength of interfaces between unsaturated soils and composite geotextile with polyester yarn reinforcement. 46(3), 338-353.

[9] Lu and Likos. (2004). Soil Water Characteristic Curve.

[10] Youngcheol, B. (2013). Pullout Resistance of Geogrid Wu.

[11] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. J. J. o. G., & Engineering, G. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. 103(ASCE 12919)

[12] Hillel, D. (2003). Introduction to environmental soil physics: Elsevier

[13] Berg, R. R., Christopher, B. R., & Samtani, N. C. (2009). Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National