# การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอสะพานแบบกำแพงกันดินเสริมแรง : กรณีศึกษา สะพานวังเย็น อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี

# A behaviour study of geosynthetic reinforced soil wall type bridge abutment: a case study of Wangyen bridge, Dan Makham Tia District, Kanchanaburi province

ประกิต ไชยศรี[1,*] อภินิติ โชติสังกาศ[2] สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว[3] บวรพงศ์ สุขเจริญ[4] พิสิฐ ศรีวรานันท์[5] และ อิชย์ ศิริประเสริฐ[6]

1

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันคอสะพานหลายแห่งเกิดการวิบัติมากขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากกระแสน้ำที่มีความเร็วสูงและการกัดเซาะรุนแรง ความชื้นในโครงสร้างที่สูงเนื่องจากน้ำล้นตลิ่งและน้ำใต้ดิน ประกอบกับโครงสร้างเดิมของคอสะพานเกิดการเสื่อมสภาพตามระยะเวลา การซ่อมแซมคอสะพานที่เสียหายต้องมีการสำรวจและออกแบบโครงสร้างเพื่อแก้ไขปัญหาได้ตรงจุด โดยใช้งบประมาณที่คุ้มค่า การเก็บข้อมูลสำรวจทางด้านกายภาพ ทางด้านวิศวกรรมปฐพี และการศึกษาพฤติกรรมของน้ำใต้ดินและความชื้นในบริเวณคอสะพานเป็นสิ่งสำคัญ การศึกษาครั้งนี้ได้สำรวจเก็บข้อมูลก่อนการก่อสร้างโดยพิจารณาออกแบบโครงสร้างระบบกำแพงกันดินเสริมแรงโดยใช้กรณีศึกษา สะพานวังเย็น อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในวัสดุมวลรวมและความชื้นภายในกำแพงกันดินเสริมแรง รวมถึงการตรวจวัดการเอียงตัวที่ด้านหน้ากำแพง ซึ่งสามารถแสดงผลได้ทันทีทันใดโดยระบบโทรมาตร ซึ่งผลจากการศึกษาวิจัยพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความชื้น และค่าการเอียงตัวอยู่ในระดับที่ปลอดภัย

คำสำคัญ: โครงสร้างคอสะพาน, กำแพงกันดินเสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์, การตรวจวัดสภาพโครงสร้าง

## Abstract

Failure of bridge abutment becomes increasingly frequent nowadays. The major cause is related to the torrential river flow with high erosive force, the high moisture content and seepage force in the earth structure, as well as the deterioration of the old abutment. In order to retrofit these abutments, proper investigation and design are needed to pinpoint the cause of problem for worthwhile use of budget. The geographical, geotechnical survey of the site and the information moisture and pore-water pressure are of great importance. This study involved site investigation, analysis and design of a geosynthetic reinforced soil wall type bridge abutment with of Wangyen bridge, Dan Makham Tia District, Kanchanaburi province. Instrumentations were also installed at the wall including pore-water pressure, soil moisture as well as tilting of the wall face using KU in-placed inclinometer. The monitoring results can be obtained real-time through a telemetering system. According to the results, the change in moisture and inclination of wall face were within the safe limit.

Keywords: Bridge abutment, Mechanically Stabilized Earth Wall, Monitoring

## 1. คำนำ

การพังทลายของถนนบริเวณคอสะพานเกิดปัญหามากขึ้นในปัจจุบันโดยการพิบัติที่เกิดขึ้นมีปัจจัยหลัก คือ ปริมาณน้ำฝนสะสม เนื่องจากฝนตกหนักยาวนานและการมีสิ่งกีดขวางปิดทางน้ำ ส่งผลให้น้ำมีการเอ่อล้นตลิ่งและเกิดการไหลแบบปั่นป่วน จึงเกิดการกัดเซาะบริเวณใต้คอสะพานหลายแห่ง จากงานวิจัยด้านการตรวจวัดพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในลาดดินธรรมชาติ และกำแพงเสริมแรง [1-5] พบว่า น้ำฝนและลักษณะการระบายน้ำในลาด เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แรงดันน้ำในลาดดินและโครงสร้างกำแพงกันดินเพิ่มขึ้น จากค่าลบในฤดูแล้งสู่ค่าบวกในฤดูฝนจนนำไปสู่การเคลื่อนตัวของลาดและโครงสร้าง รวมถึงการพิบัติ วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาระบบระบายน้ำภายในของลาดและโครงสร้างกำแพงกันดินให้เหมาะสม การเลือกใช้วัสดุถม (Back Fill)และวัสดุเสริมกำลังดินในการแก้ปัญหา จากรายงานของ Durukan & Tezcan [6] พบว่าส่วนประกอบที่ใช้งบประมาณมากที่สุดของระบบเสริมกำลังดินคือ วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังซึ่งจะเท่ากับ 40% ของต้นทุนการก่อสร้างซึ่งจริงๆแล้วนั้นคุณสมบัติของดินที่ใช้ถม (Back

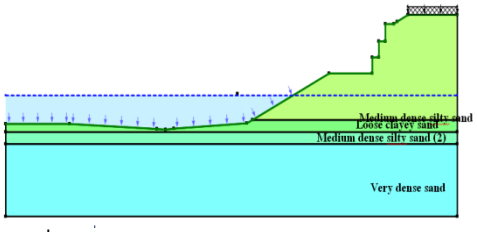
พิจารณาใช้แผ่นตาข่ายเสริมแรง (Geogrid) เสริมกำลังดินเป็นชั้นๆ ให้มีความยาวของ Geogrid พอเพียงที่สามารถรับแรงด้านข้างได้ เปรียบเสมือนโครงสร้าง Gravity Wall และปิดทับหน้าด้วยวัสดุที่สามารถก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว จึงพิจารณาเลือกใช้บล็อกคอนกรีตในการการป้องกันการกัดเซาะด้านหน้าองค์อาคาร วัสดุที่ใช้ถมที่เหมาะสมควรระบายน้ำได้ด้วยเพื่อลดแรงดันน้ำใต้ดิน จึงเลือกใช้วัสดุหินหินเกล็ด มีขนาดเฉลี่ย 3/8 นิ้ว เป็นวัสดุถมและใช้วัสดุกรอง (Filter Material) ที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) และมีท่อระบายน้ำที่เจาะเป็นรูพรุนเพื่อระบายน้ำให้ออกจากมวลดินเร็วที่สุด

นอกจากนั้น กำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall) จัดเป็นระบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น และทนต่อการทรุดตัวได้ดี โดยผู้ออกแบบได้วิเคราะห์เสถียรภาพทั้งภายในและภายนอก (Internal & External Stabilities) โดยวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกหรือโดยรวม (Global Stability) ด้วยวิธี Limit Equilibrium Method, LEM ซึ่งสามารถคำนวณหาหน้าตัดของการ Slide ที่มีอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) ต่ำสุดได้ ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพภายในจะทำการคำนวณด้วยมาตรฐาน FHWA NHI 00043 ประกอบด้วยการวิเคราะห์กำลังของตาข่ายสังเคราะห์เสริมกำลังดิน (Geogrid) ว่าสามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นและไม่เกิดการขาด (Tensile rupture) หรือรูดออกจากกันได้ (Pull out) รวมทั้งเสถียรภาพพื้นฐานของกำแพงกันดินอันได้แก่ Overturning, Sliding และ Bearing Stabilities

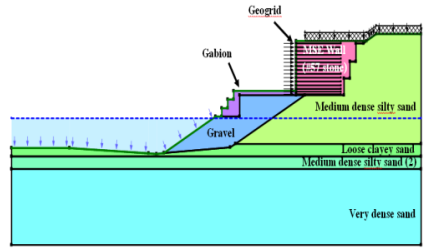
*2.2.3*

ในการวิเคราะห์ออกแบบจะคำนึงถึงความปลอดภัยในขั้นตอนการขุดเปิดหน้าดินเป็นสำคัญ โดยจะต้องมีเสถียรภาพที่เพียงพอสำหรับการทำการขุดเปิดเพื่อก่อสร้าง และมีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ที่เพียงพอตามมาตรฐานขั้นต่ำที่ FS = 1.25 (WSDOT, 2006) แสดงดังรูปที่ 3

โดยในโครงการนี้จะทำการก่อสร้างโครงสร้างกำแพงกันดินแบบ Modular Block Wall ซึ่งเป็นรูปแบบลักษณะ MSE Wall เพื่อใช้สำหรับค้ำยันดิน โดยจะมีความสูงของกำแพงที่ 5.00 เมตร และมีระยะล้วงฝังลึกของตาข่ายสังเคราะห์เสริมกาลัง (Geogrid) ไม่น้อยกว่า 7.5 เมตร และมีกำลังรับแรงดึงได้ไม่น้อยกว่า 21.2 kN/m ในทุกๆระยะห่าง 0.30 และ 0.45 เมตร ตลอดความสูงกำแพง ด้านล่างของกำแพงจะก่อสร้างในรูปแบบเกเบี้ยนและมีฐานหินทิ้งในการรับน้ำหนักของฐานรากเพื่อป้องกันการกัดเซาะบริเวณ Toe แสดงรูปแบบดังรูปที่ 4



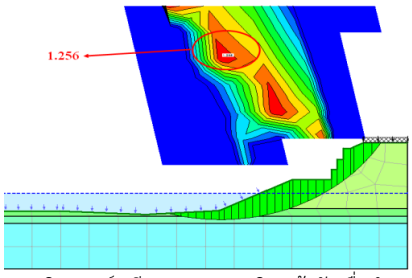

**รูปที่ 3** รูปแบบการวิเคราะห์เสถียรภาพการขุดเปิดหน้าดิน




**รูปที่ 4** รูปแบบการวิเคราะห์เสถียรภาพกำแพงกันดินเสริมแรง

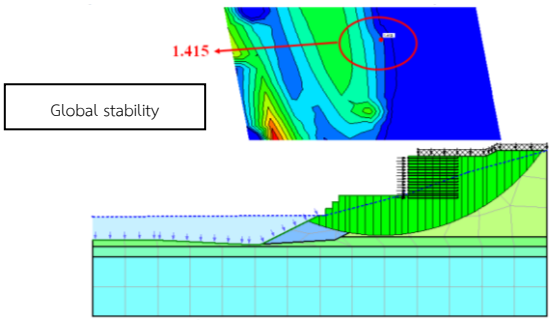
*2.2.4*

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเสถียรภาพโดยรวมของระบบเมื่อทำการขุดเปิด มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.256 ซึ่งมากกว่าค่าความปลอดภัยขั้นต่ำตามข้อกำหนด FS = 1.25 (WSDOT, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 5




**รูปที่ 5** ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการขุดเปิดหน้าตัดเพื่อทำการก่อสร้าง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้างที่สภาวะระดับน้ำลดลงต่ำสุด (Drawdown) มีบริเวณที่เกิดวงวิบัติแบบโดยรวมที่น้อยที่สุด (Global stability) ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.415 ซึ่งมากกว่าค่าขั้นต่ำตามมาตรฐาน FS = 1.3 ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยมีค่าความปลอดภัยดังตารางที่ 2 อนึ่ง ลักษณะของเส้น contour ของค่า FS ในรูปที่ 6 รวมตำแหน่งของ Local stability ที่จุดอื่นๆด้วย เช่นที่ผิวดิน แต่เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับกำแพงจึงไม่นำค่า FS ในส่วนเหล่านั้นมาพิจารณา




**รูปที่ 6** ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างกำแพงกันดิน

**ตารางที่ 2** ผลการวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยของโครงสร้างแต่ละกรณี

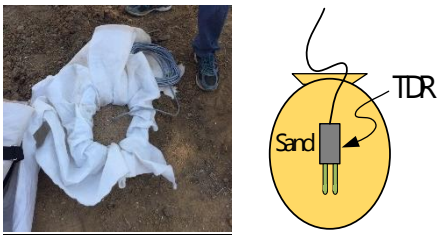
| Analysis case | F.S. (Model) | F.S. (Standard) |
|---|---|---|
| Open cut | 1.256 | 1.25 |
| Global stability | 1.415 | 1.30 |
| Overturn (External stability) | 5.340 | 2.00 |
| Sliding (External stability) | 1.650 | 1.50 |
| Bearing pressure (External stability) | 8.860 | 2.50 |

## 3. การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้าง

ถึงแม้ว่าค่าความปลอดภัยจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่ในระหว่างการใช้งานอาจมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแรงดันน้ำ ความชื้นในดิน ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งานและความแข็งแรงของโครงสร้าง ในโครงการนี้จึงมีการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างในระยะยาวโดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

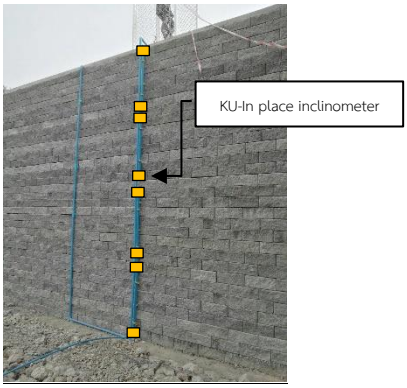
*3*

การติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นและวัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสริมแรงที่ก่อสร้างเพื่อซ่อมแซมการพังทลายของลาดดินบริเวณตอม่อสะพานวังเย็น โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้น (Time Domain Reflectometry ,TDR) ทั้งหมด 6 จุด โดยบรรจุเซนเซอร์ลงในถุงทรายที่ทำจากแผ่นใยสังเคราะห์ geotextile เพื่อป้องกันความเสียหายขณะบดอัด นอกจากนี้ geotextile ยังสามารถระบายช่วยในการระบายน้ำทำให้น้ำไม่สะสมภายในถุง โดยติดตั้งภายในชั้นวัสดุถมแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 2 จุด และติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (Pressure sensor) ภายในกำแพง 1 จุด และติดตั้งบริเวณแม่น้ำอีก 1 จุดเพื่อวัดระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 7

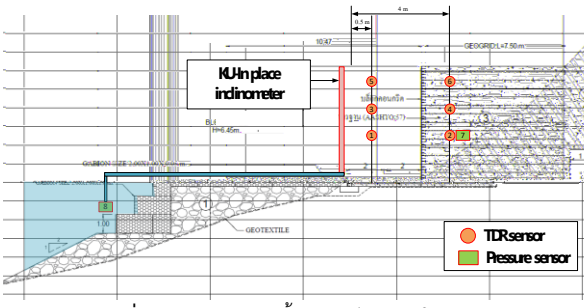



**รูปที่ 7** อุปกรณ์วัดความชื้นที่บรรจุในถุงทราย

นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน KU-In place inclinometer ซึ่งพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร จำนวน 8 จุด โดยติดเข้ากับท่อ PVC ซึ่งยึดเข้ากับบล็อกคอนกรีตด้านหน้ากำแพงเป็นแนวในการติดตั้งตลอดระนาบความสูงของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 8

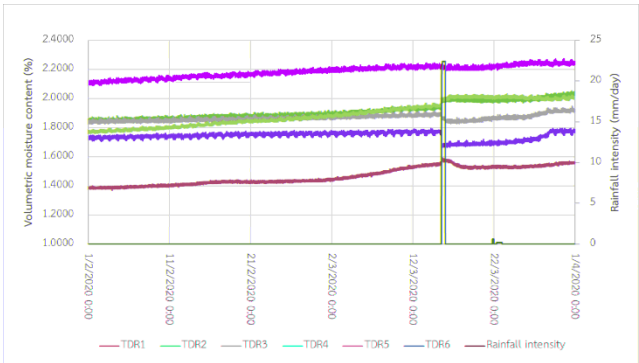



**รูปที่ 8** อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวของกำแพง KU-In place inclinometer



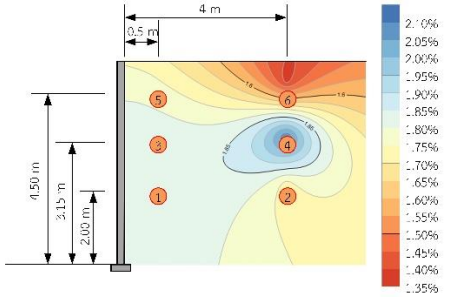

**รูปที่ 9** ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในสนาม

ผลจากการตรวจวัดความชื้นภายในกำแพงกันดินเสริมแรงบริเวณตอม่อสะพานวังเย็นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม ได้ผลสรุปดังรูปที่ 10 แสดงให้เห็นปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตร (Volumetric moisture content) มีค่าคงที่ในช่วงที่ไม่มีฝนตกและหลังจากที่ฝนตกปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น จากข้อมูลข้างต้นพบว่าหลังจากที่ฝนตกปริมาณจะสะสมบริเวณด้านหน้าของกำแพงกันดินซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการระบายน้ำ และเห็นได้ว่าหลังจากฝนตกปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าหลังจากฝนตกยังคงมีปริมาณน้ำคงเหลือในกำแพงกันดินอยู่บ้าง

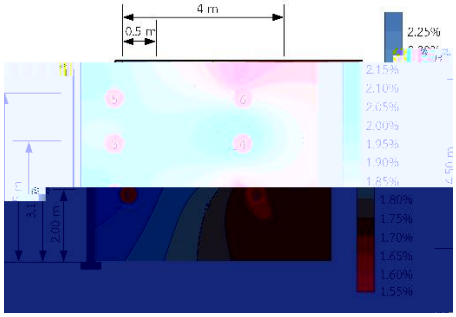



**รูปที่ 10** กราฟแสดงปริมาณน้ำในมวลดินโดยปริมาตรและปริมาณน้ำฝนสะสมในช่วงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2563 – 31 มีนาคม 2563

จากการเก็บข้อมูลลักษณะการกระจายตัวของความชื้นภายในกำแพงโดยอุปกรณ์ TDR พบว่าก่อนฝนตกปริมาณความชื้นภายในกำแพงกันดินมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยจุดที่มีความชื้นสะสมสูงสุดคือตำแหน่งที่ 4 มีปริมาณน้ำโดยปริมาตรเท่ากับ 2.1% ดังแสดงในรูปที่ 11a) หลังจากฝนตกในวันที่ 15 มีนาคม 2563 พบว่าปริมาณน้ำโดยปริมาตรเพิ่มสูงขึ้น และสะสมบริเวณด้านหน้าของกำแพงซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 11b) อนึ่ง ลักษณะการกระจายความชื้นในรูปแบบเส้น Contour นี้เป็นการประมาณจากค่าที่ตรวจวัดทั้งหมด 6 จุดดังแสดงในรูปที่ 11 เส้น Contour ที่ได้อาจมีความแตกต่างจากความเป็นจริง ในอนาคตควรมีการตรวจวัดเพิ่มโดยวิธี Resistivity เพื่อยืนยันผลการตรวจวัดนี้ต่อไป



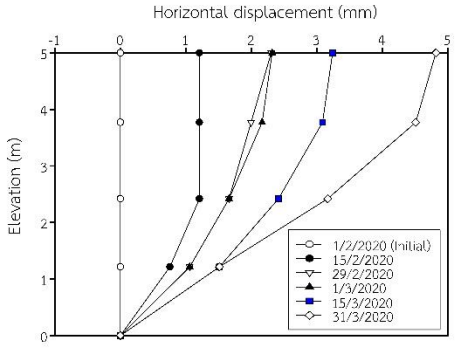

a) Initial condition




b) After rainfall

**รูปที่ 11** ลักษณะการกระจายความชื้นของวัสดุถมภายในโครงสร้างกำแพง

ผลการตรวจวัดระยะเวลา 2 เดือนหลังจากการก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด KU-In place inclinometer เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงในแต่ละช่วงของกำแพง พบว่าหลังจากก่อสร้างเสร็จเป็นเวลาหนึ่งเดือนกำแพงมีการเคลื่อนตัวด้านข้างเล็กน้อยประมาณ 2 มิลลิเมตร หลังจากเกิดฝนตกกำแพงมีการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 3 มิลลิเมตร และหลังจากก่อสร้างเสร็จเป็นเวลา 2 เดือนพบว่ากำแพงกันดินเสริมแรงมีการเคลื่อนตัวประมาณ 5 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งสรุปได้ว่าโครงสร้างกำแพงกันดินเสริมแรงในระยะเวลาดังกล่าวมีความมั่นคงและเป็นโครงสร้างที่สมดุล เพื่อพิจารณาจากเกณฑ์ในงานวิจัยโดย [5]




**รูปที่ 12** การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำที่ติดตั้งไม่สามารถวัดค่าแรงดันน้ำติดลบได้โดยตรงในวัสดุถมซึ่งเป็นหินขนาดใหญ่ ในการศึกษานี้จึงใช้เส้นอัตลักษณ์ของดิน (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) ของวัสดุทรายซึ่งห่อหุ้มอุปกรณ์ TDR ในการแปลงจากค่าความชื้นเป็นแรงดูด ในการทดสอบนี้ใช้วิธีการวัดแบบจุด (Point Wise Measurement) โดยใช้ KU-Tensiometer ชนิดใช้ในห้องปฏิบัติการในการวัดแรงดูด ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ Mold ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร และสูง 22 มิลลิเมตร เพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติดินในสนามจริงใช้การบดอัดตัวอย่างแบบ Static compaction โดยควบคุมน้ำหนักที่ 95% เมื่อบดอัดแล้วจึงใช้ฐานอลูมิเนียมปิดด้านล่างแล้วใช้ฝาท่อ PVC เจาะรูสำหรับการติดตั้ง KU-Tensiometer ด้านบน และปิดช่องว่างโดยรอบโดยใช้เทปเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

ขั้นตอนการทดสอบแต่ละจุดจะทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นโดยการเพิ่มหรือลดความชื้น โดยจะเพิ่มจนใกล้ถึงจุดที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Wetting path) และจะทำการลดความชื้น (Drying path) ในแต่ละจุดของการเพิ่มหรือลดความชื้นจะต้องมีการบ่มให้ความชื้นกระจายตัวทั่วทั้งตัวอย่างก่อนจึงจะทำการวัดแรงดูดได้ จากนั้นสอดเซ็นเซอร์เข้าไปที่ช่องที่เจาะรูแล้วจึงใช้ดินน้ำมันยึดไม่ให้ขยับและป้องกันการสูญเสียความชื้นขณะทดสอบ

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

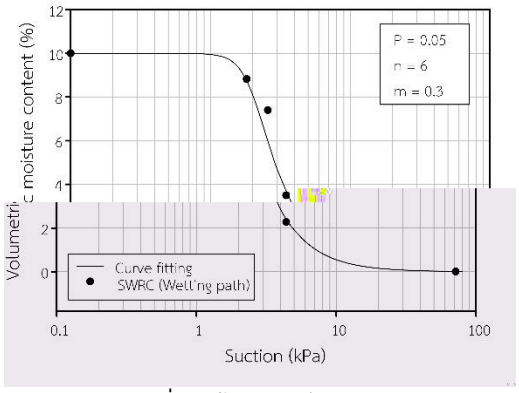
$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1+\left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (1)$$

โดย $\theta$ คือ ความชื้นเชิงปริมาตร (Volumetric water content)

$\theta_s$ คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ

$\theta\ \theta_r$ คือ ความชื้นเชิงปริมาตรที่จุด residual

$\psi$ คือ แรงดันน้ำด้านลบหรือแรงดูด (suction) โดยที่ a, n และ m เป็นตัวแปรสำหรับ curve fitting จากการเทียบกราฟได้ค่าตัวแปรปรับค่า p, m และ n ดังแสดงในรูปที่ 13




**รูปที่ 13** เส้นอัตลักษณ์ของทราย

จากผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการเพื่อทำนายเส้นอัตลักษณ์ของดินสามารถนำไปใช้ในการคำนวณแรงดันน้ำด้านลบของวัสดุถมภายในกำแพงกันดินเสริมแรงได้

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าแรงดันน้ำด้านลบมีค่าสูงบริเวณผิวด้านบนของวัสดุถม แรงดันน้ำด้านลบบริเวณกึ่งกลางความสูงของกำแพง มีค่าแรงดันน้ำด้านลบต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 13a) หลังจากฝนตกพบว่าแรงดันน้ำด้านลบตอบสนองต่อปริมาณน้ำฝน ในบริเวณที่มีความชื้นสะสมสูงทำให้มีแรงดูด (suction) ต่ำดังแสดงในรูปที่ 13b)

a) Initial condition

b) After rainfall

**รูปที่ 14** ลักษณะการกระจายแรงดูด (Suction) ภายกำแพงกันดิน

## 4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอกรณีศึกษาการสำรวจและออกแบบแก้ไขคอสะพานทรุดตัว สะพานวังเย็น จ.กาญจนบุรี โดยใช้โครงั มีความชีเ น