

การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ เทียบกับผลตรวจวัดในสนาม

มัลลิกา มอברהโทก^{1*} สุขสันต์ หอพิบูลสุข² อาทิตย์ อุดมชัย³ จักรกฤษณ์ ยืนยงค์³ และ Menglim Hoy⁴

บทคัดย่อ

กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทานประกอบด้วยเหล็กเสริมแบกทานที่เชื่อมต่อเข้ากับแผ่นผนังคอนกรีต เหล็กเสริมแบกทานประกอบด้วยเหล็กตามยาวและเหล็กตามขวาง เหล็กเสริมตามยาวทำมาจากเหล็กข้ออ้อย ในขณะที่เหล็กตามขวางทำมาจากเหล็กฉากซึ่งทำให้แรงต้านทานแรงดึงแบกทานสูง กำแพงกันดินที่ทำการศึกษา มีความสูง 9.75 เมตร และความกว้าง 14.80 เมตร สร้างขึ้นที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าเนินดินที่มีความชันประมาณ 48 องศา กำแพงกันดินถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมแบกทานทั้ง 3 ด้านของกำแพง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลตรวจวัดจริงที่เกิดขึ้นในสนาม กับพฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรม PLAXIS 3D บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดิน ใน 3 สภาวะ ได้แก่ หลังสิ้นสุดการก่อสร้าง การติดตั้งทำเทียบรถบรรทุก และขณะเปิดใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยพฤติกรรมการทรุดตัวในแนวตั้งของดินถมที่ตรวจวัดโดย Settlement plate, การเคลื่อนตัวด้านข้าง ตรวจวัดโดย Inclinator และแรงดึงในเหล็กเสริมแบกทาน ตรวจวัดโดยใช้เกจวัดความเครียด จากผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมทรุดตัวในสภาวะก่อนเปิดใช้งานมีความแตกต่างกันระหว่างผลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ แต่เมื่อทำการเปิดใช้งานไปแล้ว (ที่เวลา 270 วัน หลังเริ่มต้นก่อสร้าง) การทรุดตัวสุดท้ายของกำแพงกันดินมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่การเคลื่อนตัวด้านข้างทั้งสองด้านของกำแพงมีรูปแบบเดียวกัน ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ และแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมแบกทานของทั้งการตรวจวัดและการวิเคราะห์ มีความใกล้เคียงกันและระนาบแรงดึงสูงสุดสามารถประมาณได้ด้วยวิธีของ AASHTO (2002)

คำสำคัญ: กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน; ไฟไนต์เอลิเมนต์; โปรแกรม PLAXIS 3D

รับพิจารณา: 6 กรกฎาคม 2561

แก้ไข: 17 สิงหาคม 2564

ตอบรับ: 31 สิงหาคม 2564

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และหัวหน้าศูนย์เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ นักวิจัยศูนย์เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

⁴ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทร. +666 1950 9287 อีเมล: manlika.mob@gmail.com

3D Finite Element Simulation Results of Performance of A Bearing Reinforcement Earth Wall Compared to Field Observation

Manlika Mobkrathok^{1*} Suksun Horpibulsuk² Artit Udomchai³ Chakkrit Yeanyong³ and Menglim Hoy⁴

Abstract

Bearing reinforcement earth (BRE) wall is composed of a set of bearing reinforcement connected to concrete panels. The bearing reinforcement is composed of longitudinal member and transverse members. The longitudinal members are made of the deformed bar. The transverse members are a set of equal angles, which provide high pullout bearing resistance. In this research, a BRE wall (9.75 m high and 14.80 m wide) was constructed in front of the 48 degrees Mae Moh Mine slope, Lampang for the truck ramp operation. A BRE wall was reinforced on 3 sides of the wall. The behavior of the BRE wall was investigated by a finite element method using PLAXIS 3D software. The 3D finite element simulation results were compared with the observed field data under three conditions: at the end of the construction, after installation of the truck ramp, and during the service state. The field investigation including the measurement of settlement by settlement plate, measurement of lateral movement by inclinometer, and measurement of the tension force in the reinforcement by strain gauges. It is found from this research that the measured settlement at pre-operational conditions slightly differed from the analysis results. But during operation (at 270 days after construction), the measured and calculated settlements were approximately the same. While the lateral movements at both lateral sides has the same movement pattern. The measured result has a slightly higher lateral displacement value than the calculated result. The calculated tension force in the reinforcement are agreement with the measured ones and for maximum tension plane can be approximated by the method proposed by AASHTO (2002).

Keywords: bearing reinforcement earth wall; finite element; PLAXIS 3D

Received: July 6, 2021

Revised: August 17, 2021

Accepted: August 31, 2021

¹ M.Eng. Scholar, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

² Professor, School of Civil Engineering and Director, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology

³ Research Fellow, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology

⁴ Lecturer, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. +666 1950 9287 e-mail: manlika.mob@gmail.com

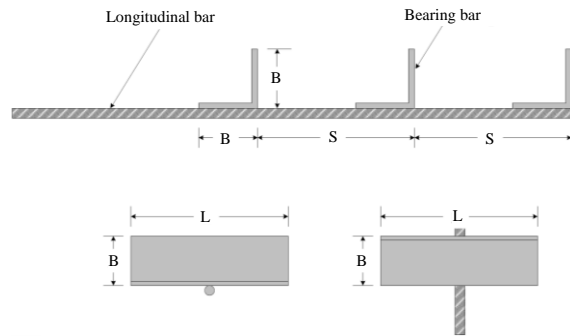
1. บทนำ

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง แต่มีกำลังต้านทานแรงดึงต่ำมาก การเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงในดินสามารถทำได้โดยการเสริมวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งวัสดุเสริมกำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุเสริมกำลังที่สามารถยืดได้ (Extensible Reinforcement) ได้แก่ วัสดุเสริมกำลังที่ทำจากเส้นใย และโพลิเมอร์ (Geogrid และ Geotextile) และวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยืดได้ (Extensible Reinforcement) ได้แก่ เหล็กเส้น แผ่นเหล็ก หรือตะแกรงเหล็ก วัสดุเสริมกำลังทั้งที่สามารถยืดได้และไม่สามารถยืดได้มักนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างโครงสร้างกันดินแบบกำแพงดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilizes Earth Wall) [1] โดยองค์ประกอบที่สำคัญของกำแพงกันดินเสริมกำลัง มีองค์ประกอบดังนี้ คือ 1) วัสดุเสริมกำลัง (Reinforcing Material) 2) วัสดุดินถมเสริมกำลัง (Reinforced Backfill) และ 3) ผิวหน้ากำแพง (Facing) [2] กำแพงกันดินเสริมกำลังมีข้อได้เปรียบกว่าโครงสร้างกันดินประเภทอื่นคือ ขั้นตอนการติดตั้งรวดเร็ว ราคาต่ำ ก่อสร้างง่าย และกำแพงกันดินสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง อีกทั้งยังมีการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential settlement) น้อยมาก ทำให้ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างเหนือกำแพงกันดิน

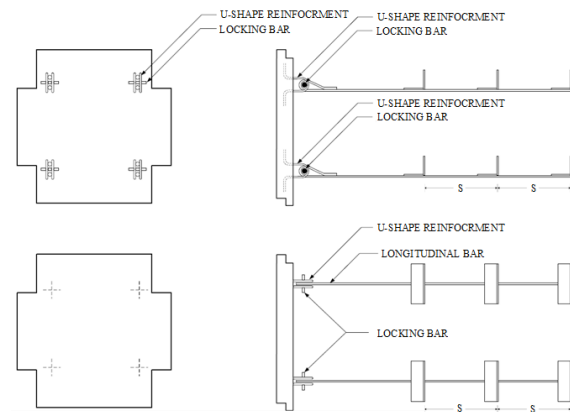
Horpibulsuk,S., and Niramitkornburee, A. [3] ได้ทำการพัฒนาเหล็กเสริมกำลังชนิดใหม่ เรียกว่า เหล็กเสริมแบกทาน (Bearing reinforcement earth (BRE) wall) เหล็กเสริมชนิดนี้มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงในปริมาณเหล็กที่น้อยและสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว โดยมีเหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กตามยาว (Longitudinal member) และใช้เหล็กฉากเป็นเหล็กตามขวาง (Transverse members) ลักษณะของเหล็กเสริมแบกทานแสดงดังรูปที่ 1

การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังเป็นการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากต้องคำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้าง และสภาวะที่รับน้ำหนักบรรทุกที่มีหลากหลายสภาวะ การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) จึงเป็นวิธีที่มีความสะดวกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม ดังนั้น หากเลือกใช้วิธีวิเคราะห์แบบเชิงตัวเลขหรือวิธีไฟ

ไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) จะช่วยให้ได้คำตอบที่รวดเร็ว ประหยัดเวลาในการคำนวณและสามารถจำลองรูปแบบพฤติกรรมของกำแพงกันดินใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด [4]



ก) ลักษณะของเหล็กเสริมแบกทาน



ข) การประกอบเข้ากับผนังกำแพง

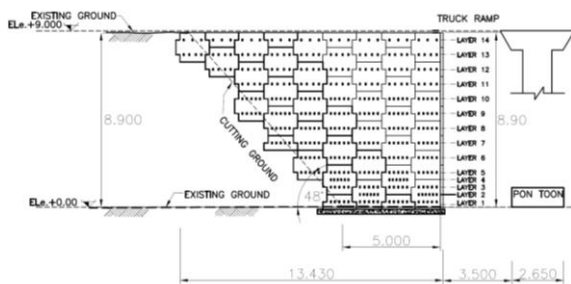
รูปที่ 1 ลักษณะของเหล็กเสริมแบกทานและการประกอบเข้ากับผนังกำแพง [1]

ในปัจจุบันวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเกือบทุกรูปแบบของการวิเคราะห์ในทางวิศวกรรมปฐพี งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยจะเลือกศึกษาในรูปแบบ 3 มิติ เนื่องจากการก่อสร้างในสภาวะจริงของกำแพงกันดินมีการเสริมเหล็ก 3 ด้าน (รูปที่ 2) หากเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบ 2 มิติ นั้นอาจไม่ครอบคลุม เพราะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมได้เพียงแค่ด้านใดด้านหนึ่งของกำแพงเท่านั้น (plane strain) ซึ่งอาจส่งผลให้ได้รับข้อมูลที่ไม่วัดคล้อยกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้น

งานวิจัยนี้จะนำผลการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงในสนาม จากงานวิจัยของ Udomchai et al., [5] เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องและข้อจำกัดของรูปแบบการวิเคราะห์



รูปที่ 2 กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทานที่ทำการศึกษา



รูปที่ 3 ลักษณะของกำแพงกันดิน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการทรุดตัวในแนวตั้งและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน ระหว่างผลตรวจวัดจริงในสนามและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ

2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบแรงดึงในเหล็กเสริมแบกทาน ระหว่างผลตรวจวัดจริงในสนามและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ

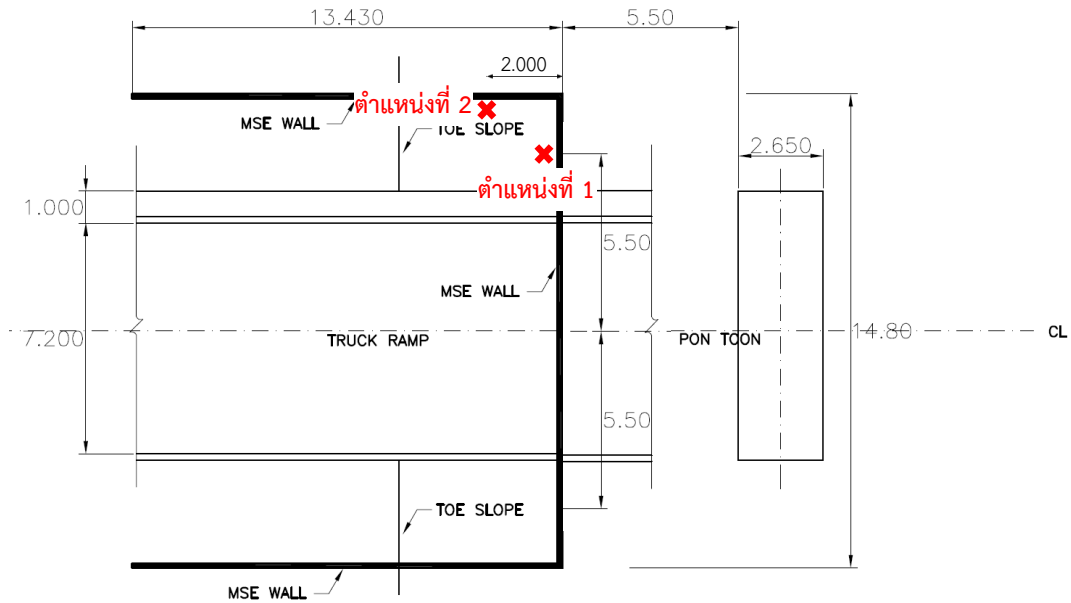
3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 ใช้ผลตรวจวัดกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน โดยเป็นโครงสร้างกันดินสำหรับท่าเทียบรถบรรทุกในโรง

ย่อยถ่านหิน ตั้งอยู่ที่เหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง กำแพงกันดินมีความสูง 9.75 เมตร โดยมีระยะฝังในดินฐานราก 0.85 เมตร ความชันของเนินดินมีค่าประมาณ 48 องศา โครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 2 ซึ่งมีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมแบกทานจำนวน 3 ด้าน โดยมีลักษณะของกำแพงกันดินและการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3 รายละเอียดการเสริมเหล็กบริเวณด้านหน้า กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทานแสดงดังตารางที่ 1 และบริเวณด้านข้างทั้ง 2 ด้านของกำแพง เสริมเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (DB12) ความยาว 7.25 เมตร จำนวน 14 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีเหล็กตามขวางซึ่งเป็นเหล็กฉาก ความหนา 3 มิลลิเมตร ที่มีความยาวขา (B) และความยาว (L) เท่ากับ 50 และ 180 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างเหล็กฉาก (S) เท่ากับ 750 มิลลิเมตร

3.2 วิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบกทาน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS 3D และเปรียบเทียบกับพฤติกรรมที่ตรวจวัด ได้แก่ การทรุดตัว (Settlement) การเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral movement) และแรงดึงในเหล็กเสริมแบกทาน (Tension force in the reinforcement) ตำแหน่งที่ใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้าง มีทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 (ด้านหน้ากำแพง) และตำแหน่งที่ 2 (ด้านข้างกำแพง) ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมแบกทานจะทำการเปรียบเทียบทุกชั้นของเหล็กเสริม ในสถานะหลังสิ้นสุดการก่อสร้างเท่านั้น

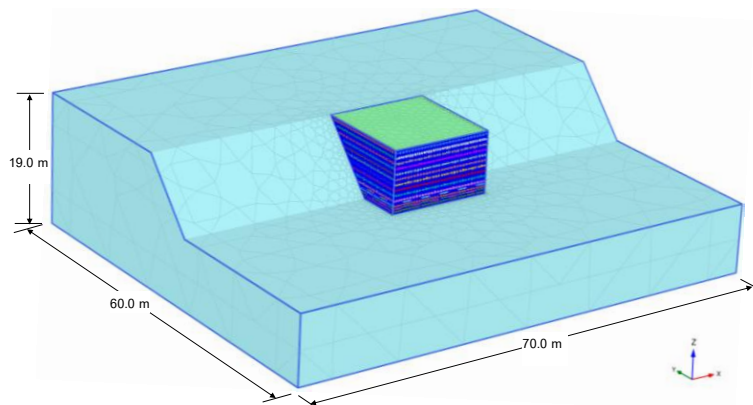
3.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับพฤติกรรมของกำแพงกันดินในสนาม ที่สถานะ 1) หลังสิ้นสุดการก่อสร้าง โดยมีระยะเวลาการก่อสร้างทั้งสิ้น 20 วัน 2) สถานะการติดตั้งท่าเทียบ ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุก 5 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 3) สถานะหลังการเปิดใช้งาน ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุก 40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร โดยน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในแบบจำลอง มีลักษณะเป็นน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniform load) บนกำแพงกันดิน



รูปที่ 4 ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดพฤติกรรมทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้าง

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเสริมเหล็กด้านหน้าของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบททาน

ชั้นที่	เหล็กตามแนวยาว	เหล็กตามแนวขวาง	จำนวน Tie point	ความยาว (เมตร)
14	DB12 (Fy = 4000 ksc)	10L-3x50x50x180mm@750 mm	3	9.75
11-13	DB12 (Fy = 4000 ksc)	8L-3x50x50x180mm@750 mm	4	8.75
6-10	DB12 (Fy = 4000 ksc)	7L-3x50x50x180mm@750 mm	5	7.75
5	DB12 (Fy = 4000 ksc)	8L-3x50x50x180mm@750 mm	5	7.00
4	DB12 (Fy = 4000 ksc)	8L-3x50x50x180mm@750 mm	6	7.00
3	DB12 (Fy = 4000 ksc)	8L-3x50x50x180mm@750 mm	5	7.00
2	DB12 (Fy = 4000 ksc)	6L-3x50x50x180mm@750 mm	6	4.75
1	DB12 (Fy = 4000 ksc)	6L-3x50x50x180mm@750 mm	5	4.75



รูปที่ 5 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

4. พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5 เป็นดินหลังกำแพงและดินฐานรากเป็นถ่านหินแข็ง และมีวัสดุดินถมเป็นดินเหนียวสีเทา (Claystone) โดยพารามิเตอร์ของดินฐานรากและดินถมในงานวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลจาก “โครงการวิจัยและประยุกต์ใช้กำแพงกันดินเหล็กเสริมแบททาน เป็นโครงสร้างกันดินในงานเหมืองแม่เมาะ” [6] โดยใช้แบบจำลองที่ใช้สตีเฟนส์และกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained type A) วิเคราะห์ในสภาวะระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานรากมาก และเลือกชนิดการวิเคราะห์ที่เป็นแบบ Consolidation analysis

พารามิเตอร์ดินถมแสดงในตารางที่ 2 ดินถมถูกจำลองด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb หน่วยน้ำหนักไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและหน่วยน้ำหนักอิ่มตัวด้วยน้ำ มีค่าเท่ากับ 17 และ 19 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') มีค่าเท่ากับ 12 องศา หน่วยแรงเหนี่ยวนำประสิทธิผล (c') มีค่าเท่ากับ 57 กิโลปาสคาล โมดูลัสประสิทธิผล (E') มีค่าเท่ากับ 20,000 กิโลปาสคาล และอัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.35

ฐานรากเป็นถ่านหินแข็งถูกจำลองด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb ที่มีหน่วยน้ำหนักไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและหน่วยน้ำหนักอิ่มตัวด้วยน้ำ มีค่าเท่ากับ 16 และ 18 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (ϕ') เท่ากับ 30 องศา หน่วยแรงเหนี่ยวนำประสิทธิผล (c') เท่ากับ 20 กิโลปาสคาล โมดูลัสประสิทธิผล (E') เท่ากับ 60,000 กิโลปาสคาล และอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.35 พารามิเตอร์ดินฐานรากแสดงในตารางที่ 2

คอนกรีตปรับระดับ (Lean concrete) และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (Facing) จำลองด้วยแบบจำลอง Elastic ที่มีความหนาเท่ากับ 0.20 เมตร และ 0.14 เมตร ตามลำดับ โดยคอนกรีตปรับระดับมีค่าโมดูลัส (E) เท่ากับ 10.5×10^6 กิโลปาสคาล และผนังคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าโมดูลัส (E) เท่ากับ 27×10^6 กิโลปาสคาล ซึ่งคำนวณได้จาก $E = 15100 \sqrt{f'_c}$ [7] เมื่อ $f'_c = 50 \text{ ksc}$ และ $f'_c = 320 \text{ ksc}$ สำหรับคอนกรีตปรับระดับและผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักคอนกรีต

เท่ากับ 23.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.25 แสดงดังตารางที่ 3

เหล็กเสริมแบททานจำลองด้วย Embedded Beam element มีค่าโมดูลัส (E) เท่ากับ 2.04×10^8 กิโลปาสคาล หน่วยน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 78.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่า Skin friction ของ Embedded Beam element สามารถคำนวณได้จากกำลังต้านทานแรงฉุดรวม (P_t) ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังต้านทานแรงฉุดเสียดทาน (P_f) และกำลังต้านทานแรงฉุดแบททานของเหล็กตามขวาง (P_b) [8]

$$P_t = P_f + P_b \quad (1)$$

$$P_f = \pi d L_e \alpha (c + \sigma_v \tan \phi) \quad (2)$$

$$P_b = nBL(cN_c + \sigma_v N_q) \quad (3)$$

$$N_q = \exp[\pi \tan \phi] \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (5)$$

โดยที่

d และ L_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวประสิทธิผลของเหล็กตามยาว ตามลำดับ

α คือ แฟคเตอร์หน่วยแรงยึดเกาะมีค่า 0.4 [6]

c และ ϕ คือ หน่วยแรงเหนี่ยวนำและมุมเสียดทานภายในของดินถม ตามลำดับ

σ_v คือ ความเค้นกดทับในแนวดิ่ง

n คือ จำนวนเหล็กตามขวาง

B และ L คือ ความยาวขาและความยาวของเหล็กฉากตามลำดับ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในแบบจำลองกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบบทวน

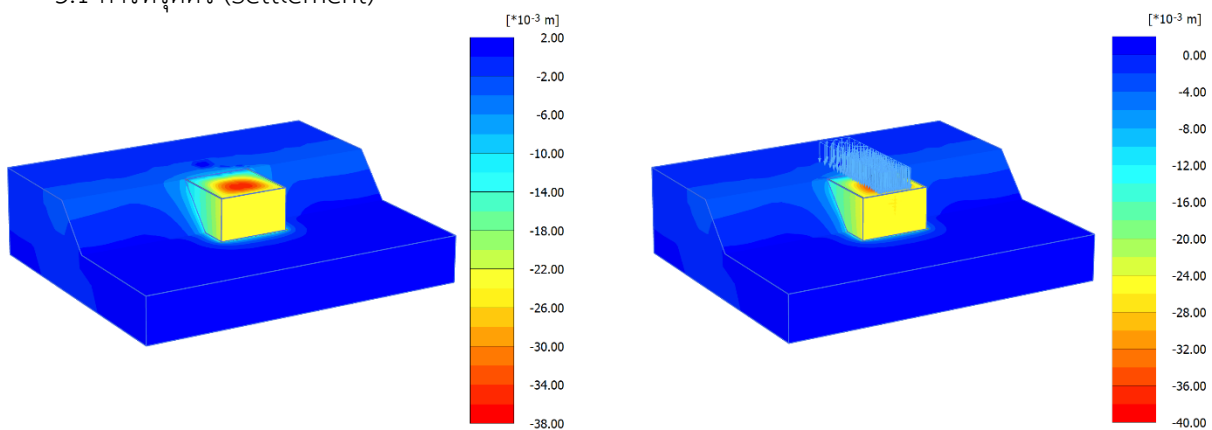
Parameter	Symbol	Clay stone	Foundation	Unit
Material model	Model	M-C	M-C	-
Young's modulus	E'	20,000	60,000	kPa
Frictional angle	ϕ'	12	20	Degrees
Cohesion	c'	57	30	kN/m^2
Unsaturated weight	γ_{unsat}	17	16	kN/m^3
Saturated weight	γ_{sat}	19	18	kN/m^3
Poisson's ratio	ν	0.35	0.35	-
Initial void ratio	e_{int}	0.6	0.6	-

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบบทวน

Parameter	Symbol	Steel reinforcement	Lean concrete	Facing	Unit
Material model	Model	Elastic	Elastic	Elastic	-
Young's modulus	E	2.04×10^8	10.5×10^6	27×10^6	kPa
Thickness	d	-	0.20	0.14	m
Unit weight	γ	78.5	23.5	23.5	kN/m^3
Poisson's ratio	ν	-	0.25	0.25	-

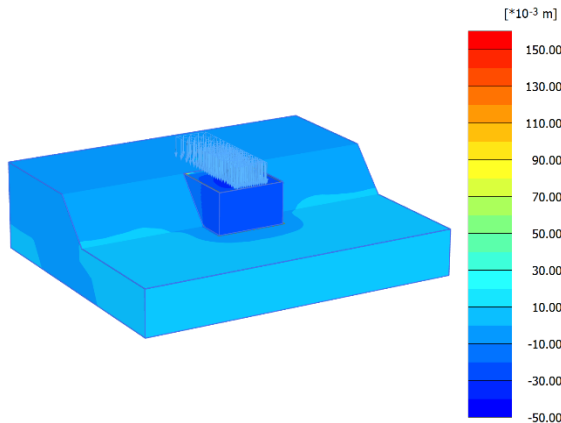
5. ผลการวิเคราะห์

5.1 การทรุดตัว (Settlement)



ก) ที่สภาวะหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง

ข) ที่สภาวะติดตั้งทำเหี้ยบรถบรรทุก

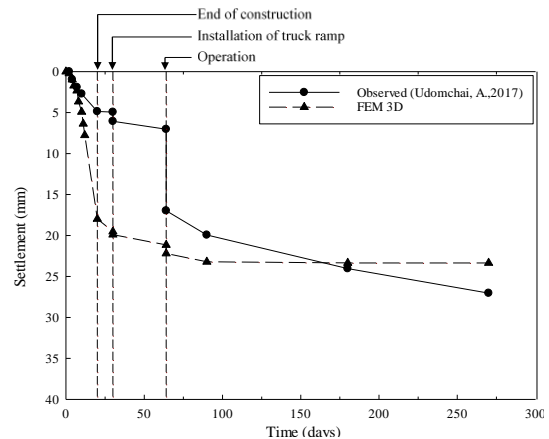


ค) ที่สภาวะเปิดใช้งาน

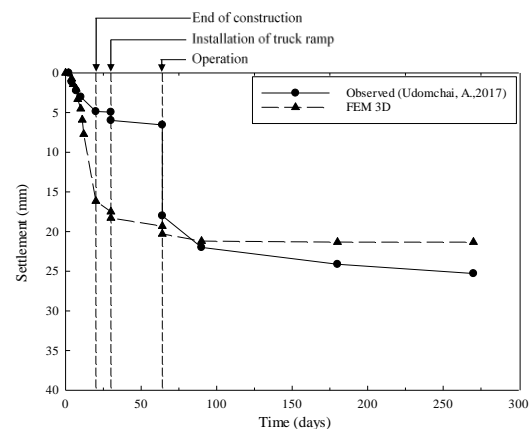
 รูปที่ 6 รูปแบบการทรุดตัวของกำแพงกันดิน (u_z)

รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการทรุดตัวทั้ง 3 สภาวะ ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่ฐานรากกับเวลาที่ตรวจวัดได้ในสนาม เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่บริเวณด้านหน้า และที่บริเวณด้านข้าง (ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 4 ตามลำดับ) การทรุดตัวสุดท้ายที่สภาวะหลังสิ้นสุดการก่อสร้างที่บริเวณด้านหน้าของกำแพง มีค่าเท่ากับ 5 และ 18 มิลลิเมตร สำหรับผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทรุดตัวที่บริเวณด้านข้างของกำแพงกันดินมีค่าเท่ากับ 5 และ 16 มิลลิเมตร สำหรับผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อทำการติดตั้งทำเทียบรถบรรทุกบนกำแพงกันดิน ซึ่งมีขนาด 5 กิโลปาสคาล การทรุดตัวที่ฐานรากเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 2 มิลลิเมตร ทั้งด้านหน้าและด้านข้างของกำแพง สำหรับผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเมื่อทำการเปิดใช้งาน (ที่ระยะเวลา 64 วัน หลังเริ่มต้นการก่อสร้าง) โดยมีน้ำหนักบรรทุกหิ้นกระทำบนกำแพงกันดินเท่ากับ 40 กิโลปาสคาล การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัด เท่ากับ 17 และ 18 มิลลิเมตร ที่ด้านหน้าและด้านข้างของกำแพง ตามลำดับ ส่วนการทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ 22 และ 20 มิลลิเมตร ที่ด้านหน้าและด้านข้างของกำแพง ตามลำดับ หลังการเปิดใช้งานไปแล้ว 206 วัน (270 วัน หลังเริ่มต้นการก่อสร้าง) การทรุดตัวจากผลการตรวจวัดมีการเพิ่มขึ้นเป็น 27 และ 25 มิลลิเมตร

สำหรับบริเวณด้านหน้าและด้านข้างของกำแพง ส่วนการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้น 1 มิลลิเมตร ทั้งสองด้านของกำแพงกันดิน ทำให้มีการทรุดตัวสุดท้ายอยู่ที่ 23 และ 21 มิลลิเมตร สำหรับบริเวณด้านหน้าและด้านข้างของกำแพง



ก) บริเวณด้านหน้าของกำแพง



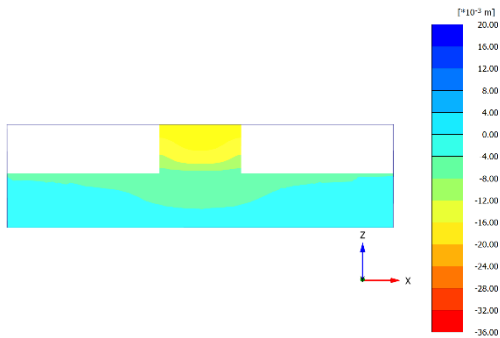
ข) บริเวณด้านข้างของกำแพง

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา

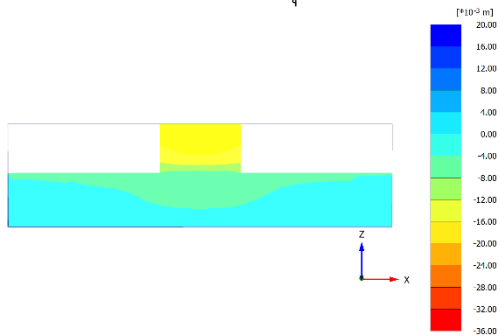
5.2 การเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral movement)

ลักษณะการเคลื่อนตัวด้านข้างบริเวณด้านหน้าและด้านข้างของกำแพงกันดิน แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างกับความสูงของกำแพงกันดินเหล็กเสริมแบบทวน แสดงดังรูปที่ 10 การเคลื่อนตัวด้านข้างบริเวณด้านหน้า (รูปที่ 10ก) และที่บริเวณด้านข้าง (รูปที่ 10ข) ที่สภาวะหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง (21 วัน) สภาวะการติดตั้งทำเทียบรถบรรทุก (30 วัน) และที่สภาวะการเปิดใช้งาน (270 วัน) ระหว่างผลการตรวจวัดในสนามและผล

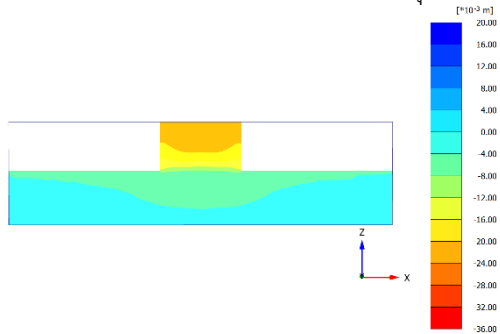
การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเคลื่อนตัวด้านข้างที่บริเวณด้านหน้าของกำแพงกันดิน ในสภาวะก่อนเปิดใช้งานมีความใกล้เคียงกัน การเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10 และ 12 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลา 21 และ 30 วัน ตามลำดับ ขณะที่ ผลการคำนวณ เท่ากับ 17 และ 19 มิลลิเมตร ที่ระยะเวลา 21 และ 30 วัน ตามลำดับ และที่สภาวะหลังเปิดใช้งาน การเคลื่อนตัวด้านข้าง เท่ากับ 58 และ 24 มิลลิเมตร สำหรับการตรวจวัดและการคำนวณ ส่วนบริเวณด้านข้างของกำแพงกันดิน ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างมีค่าน้อยมากในทุกสภาวะ ขณะที่การตรวจวัดมีค่าไม่มากนัก โดยมีการเคลื่อนตัวสูงสุดที่สภาวะเปิดใช้งาน (270 วัน) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร



ก) ที่สภาวะหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง

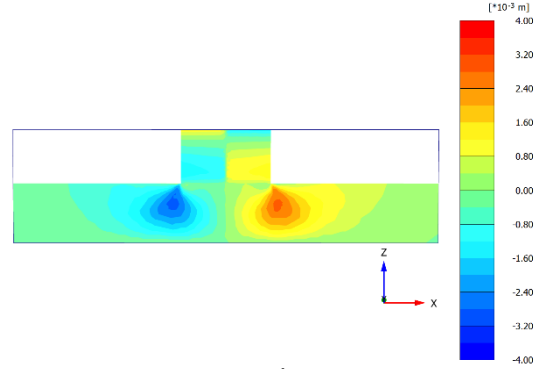


ข) สภาวะติดตั้งทำเทียบรถบรรทุก

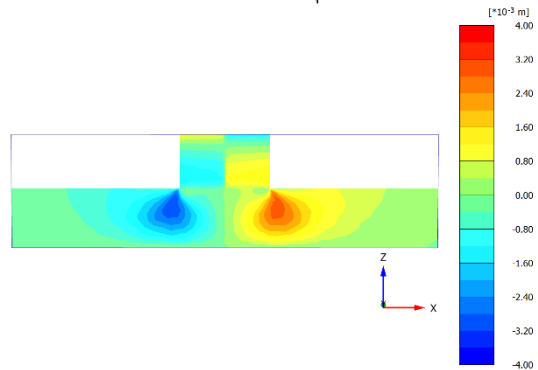


ค) ที่สภาวะเปิดใช้งาน

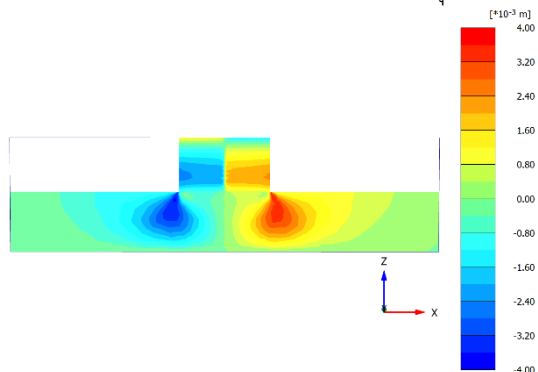
รูปที่ 8 ลักษณะการเคลื่อนตัวบริเวณด้านหน้า (u_x)



ก) ที่สภาวะหลังสิ้นสุดการก่อสร้าง

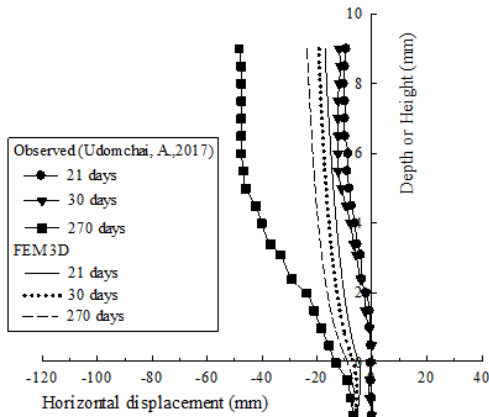


ข) สภาวะติดตั้งทำเทียบรถบรรทุก

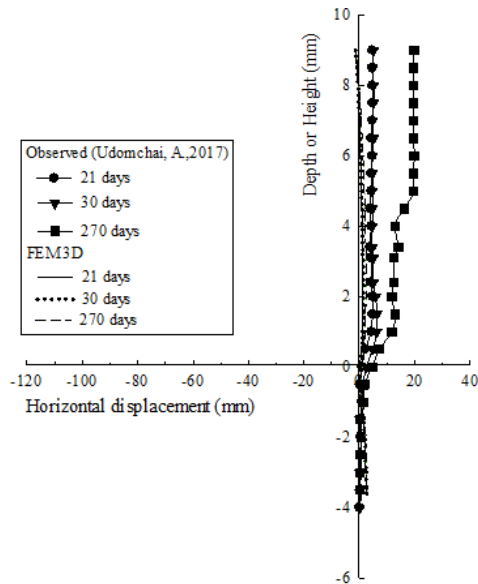


ค) ที่สภาวะเปิดใช้งาน

รูปที่ 9 ลักษณะการเคลื่อนตัวบริเวณด้านข้าง (u_x)



ก) บริเวณด้านหน้าของกำแพง



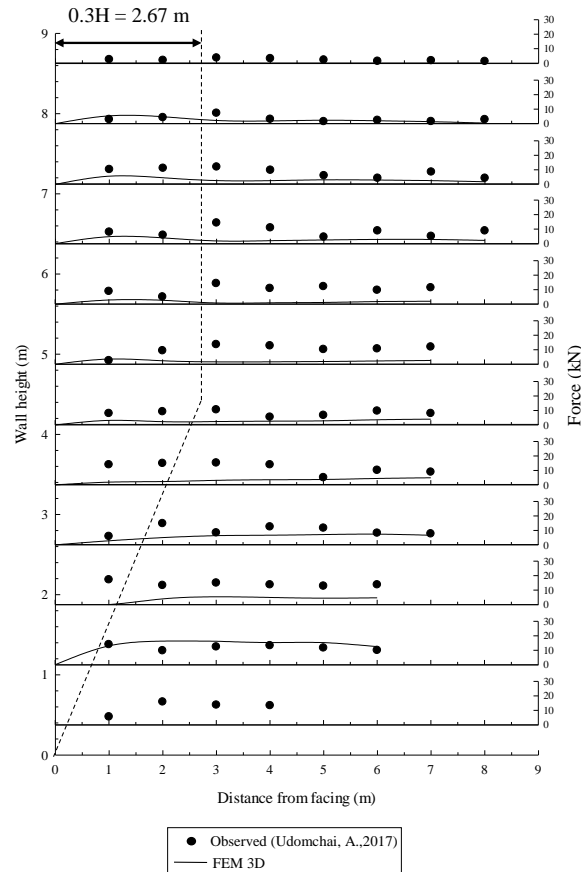
ข) บริเวณด้านข้างของกำแพง

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกับเวลา

5.3 แรงดึงในเหล็กเสริมแบกทาน (Tension force in the reinforcement)

รูปที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมที่ได้จากการคำนวณและการตรวจวัด หลังสิ้นสุดการก่อสร้าง ที่ระดับความสูงและระยะจากผนังกำแพงต่าง ๆ จากผลการตรวจวัด พบว่า แรงดึงสูงสุดในเหล็กเสริมแบกทานเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าใกล้กับแผ่นกำแพง (ที่ระยะไม่เกิน 3.00 เมตร จากผนังกำแพง) โดยมีค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 17.14 กิโลนิวตัน ที่ระยะ 1.00

เมตร จากผนังกำแพง ในเหล็กเสริมแบกทานชั้นที่ 3 ในขณะที่ ผลจากการคำนวณให้ค่าแรงดึงในเหล็กเสริมแบกทานแต่ละความสูงและระยะจากผนังกำแพง มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าผลการตรวจวัด โดยมีค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 16.31 กิโลนิวตัน ที่ระยะ 2.00 เมตร จากผนังกำแพง ในเหล็กเสริมแบกทานชั้นที่ 2



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงในเหล็กเสริมกับความสูงของกำแพง

6. สรุปผล

6.1 ผลการวิเคราะห์ผลการหลุดตัวของฐานรากพบว่า การหลุดตัวมีความแตกต่างกันอย่างมากในช่วงสภาวะก่อนการเปิดใช้ในช่วงแรก (ช่วงเวลา 0 - 64 วัน) จากผลการตรวจวัดฐานรากเกิดการหลุดตัวน้อย ในขณะที่ ผลการคำนวณฐานรากมีการหลุดตัวสูงกว่ามาก แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะการเปิดใช้งานแล้ว การหลุดตัวของทั้งการตรวจวัดและการวิเคราะห์ เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย

มาก และการทรุดตัวสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งบริเวณ
ด้านหน้าและด้านข้างของกำแพงกันดิน

6.2 รูปแบบของการเคลื่อนตัวด้านข้างที่บริเวณ
ด้านหน้าของกำแพงกันดิน จากการตรวจวัดและการ
คำนวณมีการเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกัน โดยการ
เคลื่อนตัวด้านข้างจะแปรผันกับความสูงของกำแพง
กันดิน จากผลการตรวจวัด ที่สภาวะเปิดใช้งาน (270 วัน)
การเคลื่อนตัวด้านข้างจะมีความแตกต่างกับสภาวะก่อน
เปิดใช้งาน ในขณะที่ ในทุกสภาวะการเคลื่อนตัวด้านข้าง
ที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนบริเวณ
ด้านข้างของกำแพง ผลการคำนวณเกิดการเคลื่อนตัว
น้อยมาก เมื่อเทียบกับผลการตรวจวัด

6.3 แรงดึงในเหล็กเสริมค่อนข้างแตกต่างกัน โดยจาก
ผลการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณ ทั้งนี้อาจเกิด
จากกระบวนการก่อสร้าง อาทิเช่น การควบคุมการวาง
ตำแหน่งของเหล็กเสริมให้ถูกต้องสมบูรณ์ตามแบบ
ก่อสร้างอาจคลาดเคลื่อนหรือเหล็กอาจเกิดการเคลื่อนตัว
และมีตำแหน่งผิดไปจากแบบก่อสร้างได้ง่าย แตกต่างกับ
การจำลองโดยโปรแกรม ที่สามารถกำหนดและระบุ
ตำแหน่งของวัสดุได้อย่างแม่นยำ ปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผล
ให้ผลการคำนวณแตกต่างจากผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง
เดียวกันอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ค่าแรงดึงในเหล็กเสริมแบบ
ทวนจะมีค่าแตกต่างกันระหว่างผลการตรวจวัดและการ
คำนวณ แต่เมื่อพิจารณาค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นแล้ว
พบว่า แรงดึงสูงสุดส่วนใหญ่ทั้งผลการตรวจวัดและการ
คำนวณ อยู่บนระนาบหรือใกล้เคียงกับระนาบแรงดึงสูงสุด
ที่เสนอโดย AASHTO (2002) [9] แสดงด้วยเส้นประใน
รูปที่ 11

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่
สนับสนุนด้านโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ
ขอขอบพระคุณเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง
ประเทศไทย (กฟผ.) อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
ที่เอื้อเพื่อข้อมูลในสนามและข้อเสนอแนะนำ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Horpibulsuk, *Ground Improvement Techniques*, Suranaree university of Technology, Nakhon Ratchasima, 2011 (in Thai).
- [2] *Standard of Mechanically Stabilized Earth Wall*, Standard No. DH-S 105/2550,2007 (in Thai).
- [3] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong and A. Niramitkomburee, "A Method of Examination Internal Stability of Bearing Reinforcement Earth (BRE) Wall," *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 1-11, 2010.
- [4] C. Yeanyong, " Stability investigation of flood wall structure using plaxis 2D," Suranaree university of Technology, Nakhon Ratchasima, 2017 (in Thai).
- [5] A. Udomchai, S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, N. Mavong, R. Rachan and A. Arulrajah, "Performance of the bearing reinforcement earth wall as a retaining structure in the Mae Moh mine, Thailand," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 45, no. 4, pp. 350-360, 2017.
- [6] School of civil Engineering, Suranaree university of Technology, "Application of Bearing Reinforcement Earth (BRE) Wall As A Retaining Structure in Mae Moh Mining," Nakhon Ratchasima, 2015. (in Thai).
- [7] American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*, Farmington Hills, 2019.
- [8] S. Horpibulsuk and A. Niramitkomburee, "Pullout Resistance of Bearing Reinforcement Embedded in Sand," *Soils and Foundation*, vol. 50, no. 2, pp. 215-226, 2010.



- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Standard Specification for Highway Bridges (AASHTO 2002)," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2002.