



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

พฤติกรรมของเขื่อนที่ทำจากกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงร่วมกับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์จากวิธีผสมลึกโดยวิธีการเชิงตัวเลข

Behaviour of composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a dam by numerical method

วรพจน์ เพชรเกต¹ สุธี ปิยะพิพัฒน์^{2*} ศุภลัทธิ พงศ์ศิวัสถิตย์² กำธรเกียรติ มุสิเกต²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

Warapot Petchgate¹ Suthee Piyaphipat^{2*} Supasit Pongsivasathit² Komtornkaite Musikaite²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University, Pathumthani 12000

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110

* Corresponding author.

E-mail: suthee.p@en.rmutt.ac.th; Telephone: 0 2549 3410

วันที่รับบทความ 30 ธันวาคม 2564 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 เมษายน 2565 ; วันที่ตอบรับบทความ 11 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ตัวแปรเชิงตัวเลขต่อพฤติกรรมของเขื่อนที่สร้างจากกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงร่วมกับกำแพงดินซีเมนต์จากวิธีผสมลึกซึ่งถือว่าเป็นทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างเขื่อน กรณีศึกษาเป็นเขื่อนในทะเลสาบของโครงการเลкриเจนท์แ่งวัฒนะ ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เขื่อนนี้สร้างในบ่อดินที่ลึกมากโดยไม่จำเป็นต้องถ่ายเทน้ำออกจากบ่อก่อนก่อสร้าง สามารถสร้างได้เร็วและประหยัดกว่าการสร้างเขื่อนแบบทั่วไป สำหรับตัวแปรที่นำมาศึกษาได้แก่ ค่าระยะฝั่งของกำแพงคอนกรีตอัดแรง ค่าระดับน้ำในทะเลสาบ ค่าสถิติเสาเข็มดินซีเมนต์ และค่าความลึกของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธีผสมลึก เพื่อดูสมรรถนะของเขื่อนในเทอมของการเคลื่อนตัวทางข้างของเขื่อนและค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของเขื่อนนี้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PLAXIS 2D ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าระยะฝั่งของกำแพงคอนกรีตอัดแรง ค่าสถิติเสาเข็มดินซีเมนต์ และค่าความลึกของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธีผสมลึก ทำให้การเคลื่อนตัวทางข้างของเขื่อนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ การเพิ่มความต่างของระดับน้ำทั้งสองฝั่งของเขื่อนทำให้การเคลื่อนตัวทางข้างของเขื่อนเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้เสถียรภาพของเขื่อนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ค่าโมเมนต์ดัดบนกำแพงคอนกรีตอัดแรงลดลงเมื่อมีการลดลงของระยะฝั่งหรือความต่างของระดับน้ำทั้งสองฝั่ง อย่างไรก็ตามค่าโมเมนต์ดัดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการลดลงของค่าสถิติเสาเข็มดินซีเมนต์และความลึกของชั้นดินที่ถูกปรับปรุง โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดบนกำแพงด้านที่ติดกับทะเลสาบส่วนนอกโครงการสูงกว่าด้านที่ติดกับทะเลสาบส่วนในโครงการเสมอทุกกรณีศึกษา ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนาวิธีการออกแบบการใช้งาแพงดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและชั้นดินเหนียวในบริเวณภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ต่อไป

คำสำคัญ

การปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน เสาเข็มดินซีเมนต์ การเคลื่อนตัวด้านข้าง วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This research aims to study the parametric analysis on the behaviour of dam constructed by the composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a new alternative dam structure. The selected case study is the dam in Lake

Legend Chaengwatthana project, Bangkok, Thailand. This dam was constructed in a deep rainwater pond without providing the water removal, which could save on both time and cost construction. In the parametric studies, there were the embedment depth of contiguous pile wall, the water level in a lake, the stiffness of soil-cement column wall and the depth of improvement by deep mixing method which were investigated on the stability of dam in term of the lateral displacement of dam and the bending moment on the contiguous pile wall by the finite element method using PLAXIS 2D. The studies can be concluded as: the increase of the embedment depth of contiguous pile wall, the stiffness of soil-cement column wall and the depth of improvement by deep mixing method reduce the lateral displacement of dam significantly. The increase in the different water level between both sides of dam can increase the lateral displacement but reduce the stability of dam significantly. The bending moment on the contiguous pile wall reduces with the decrease of the embedment depth and the different water level. Whereas the bending moment increase with the decrease of the soil-cement stiffness and the improvement depth. For all these study cases, it was confirmed that the maximum bending moment of outer wall was always higher than that of inner wall. The outcome of this research will be fundamental to develop a design guideline of soil-cement column wall by deep mixing method in soft Bangkok clay and other similar soft clay deposits especially in Southeast Asian countries.

Keywords

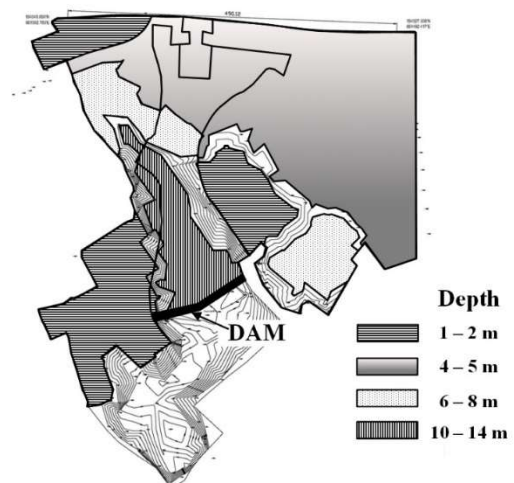
ground improvement; soil-cement column; lateral displacement; finite element method

1. คำนำ

การใช้เทคนิคการผสมลึก (Deep mixing method) โดยการใช้ผสมน้ำปูนซีเมนต์ฉีดด้วยความดันสูง พร้อมกับการหมุนก้านส่งน้ำปูน ทำให้น้ำปูนเข้าไปผสมกับชั้นดินในที่ทำให้น้ำปูนทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำปูนซีเมนต์จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะคล้ายเสาเข็ม เรียกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ [1-2] เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทย เพื่อจุดประสงค์ในการลดการทรุดตัวของชั้นดิน เพิ่มเสถียรภาพให้กับลาดดิน หรือการควบคุมการไหลของน้ำใต้ดิน เป็นต้น [3-8] นอกจากนี้เทคนิคการผสมลึกสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายหลาก อาทิเช่น ใช้เสริมชั้นดินอ่อนด้วยกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นระบบป้องกันการพังทลายของชั้นดินกรณีขุดลึก [9] หรือการประยุกต์ใช้กลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อบรรเทาการเกิดธรณีสูบ (Liquefaction mitigation) หลังจากเกิดแผ่นดินไหว [10] หรือการใช้กลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีการจัดเรียงแบบรูปตัว T เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงแบกทานของชั้นดินเหนียวอ่อน [11-12] เป็นต้น

กรณีศึกษาที่น่าสนใจอีกกรณีหนึ่ง ได้แก่ การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อใช้เป็นเขื่อนกั้นน้ำ Pongsivasathit et al. [13] ได้รายงานวิธีการออกแบบขั้นตอนการก่อสร้าง และสมรรถนะการใช้เสาเข็มคอนกรีตอัด

แรงร่วมกับเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นเขื่อนกั้นน้ำในทะเลสาบโครงการเลครีเจนท์ แจ้งวัฒนะ ซึ่งเป็นการร่วมทุนระหว่างบริษัทฮองกั๋งฟร็อพเพอร์ตี้ จำกัดมหาชน กับบริษัทแลนด์เฮาส์ จำกัดมหาชน ด้วยเงินลงทุนร่วม 10,000 ล้านบาท ตั้งอยู่อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี เป็นโครงการก่อสร้างบ้านพักอาศัยริมทะเลสาบที่สร้างจากบ่อขุดยืมดิน ที่มีความลึกประมาณ 13 เมตร ในรูปที่ 1 แสดงลักษณะความสูงต่ำของระดับและบ่อขุดยืมดินในโครงการ ในทะเลสาบถูกกำหนดให้มีระดับน้ำคงที่ไม่ต่ำกว่า 0.25 เมตรจากผิวดิน



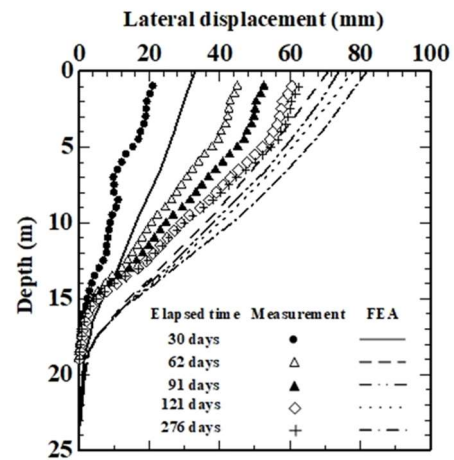
รูปที่ 1 แผนที่แสดงความสูงต่ำของพื้นที่บริเวณก่อสร้าง

อย่างไรก็ดีเนื่องจากสิทธิในการครอบครองพื้นที่ทะเลสาบมีเพียงบางส่วนเท่านั้น จึงต้องทำการแบ่งทะเลสาบออกแบบ 2 ส่วนคือส่วนที่ครอบครองกรรมสิทธิ์ (Inner part) และส่วนนอกบริเวณครอบครอง (Outer part) ด้วยการสร้างเขื่อนกันน้ำ ดังในรูปที่ 2 ซึ่งโดยปกติการควบคุมระดับน้ำในส่วนนอกบริเวณโครงการไม่สามารถกระทำได้นี้ขึ้นอยู่สภาพดินฟ้าอากาศในแต่ละฤดู โดยเฉลี่ยระดับน้ำก่อนสร้างเขื่อนจะอยู่ที่ระดับความลึก 3.2 เมตรจากผิวดิน ดังนั้นการสร้างเขื่อนด้วยระบบทั่วไป (Conventional Dams) เช่นเขื่อนคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากต้องทำการสูบน้ำออกจากทะเลสาบเสียก่อนจึงก่อสร้างได้ทำให้วิธีการสร้างแบบทั่วไปไม่เหมาะสมสำหรับโครงการนี้ การสูบน้ำออกอาจทำให้เกิดความเสียหายกับผู้อาศัยริมทะเลสาบที่อยู่นอกบริเวณโครงการได้ วิธีการแก้ไขปัญหานี้ต้องใช้โครงสร้างเขื่อนที่มีลักษณะพิเศษ ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงร่วมกับการปรับปรุงดินแบบผสมลิก ดังในรูปที่ 2 เป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องสูบน้ำทิ้ง แต่สามารถก่อสร้างได้ทันที ประหยัดทั้งเวลากับค่าก่อสร้างอีกด้วย



รูปที่ 2 แผนที่แสดงความสูงต่ำของพื้นที่บริเวณก่อสร้าง

จากการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเขื่อนที่บริเวณกึ่งกลางด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการวัดการเคลื่อนตัวของเขื่อนด้วยเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของเขื่อนดิน (Inclinometer) [13] พบว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถประมาณการเคลื่อนตัวของเขื่อนที่บริเวณกึ่งกลางเขื่อนได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้ในภาคสนามมีค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เล็กน้อย



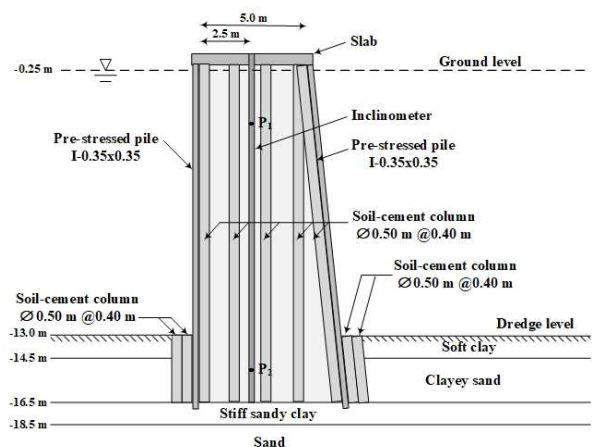
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของด้านข้าง [13]

สำหรับบทความนี้จะเป็นการนำเสนอการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อพฤติกรรมของเขื่อนทำจากเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงร่วมกับเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลิก เพื่อหาข้อสรุปถึงวิธีการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเขื่อนประเภทนี้

2. แบบจำลองและค่าพารามิเตอร์

2.1 เขื่อนและสภาพชั้นดินบริเวณก่อสร้าง

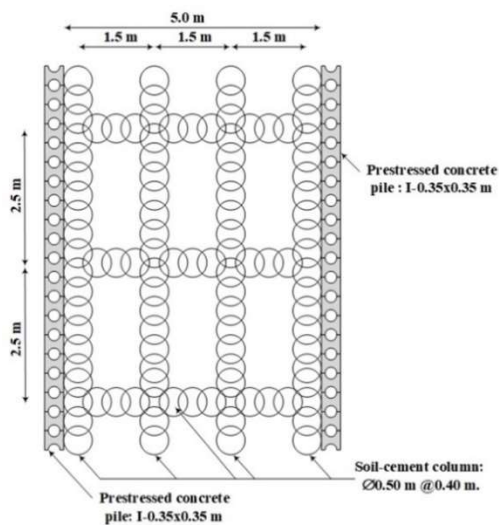
อ้างอิงจากการศึกษาของ Pongsivasathit et al. [13] โครงสร้างเขื่อนประกอบด้วยกำแพงตั้งฉากที่ติดกับบริเวณโครงการและกำแพงเอียงที่ติดกับบริเวณนอกพื้นที่กรรมสิทธิ์ ดังรูปที่ 4 ระหว่างกำแพงทั้งสองเป็นดินเหนียวที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบผสมลิก มีการจัดเรียงกันดังรูปที่ 5



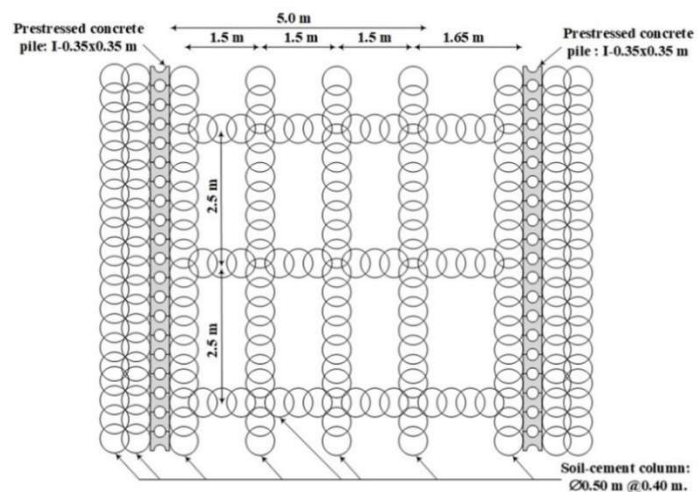
รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างเขื่อน

ถ้ากำหนดให้อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (a) เท่ากับพื้นที่ของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อพื้นที่หน้าตัดของดินก่อนปรับปรุง ดังนั้นที่ระดับความลึก 0 เมตร มีค่า a เท่ากับ 51.25% โดยคิดจากพื้นที่หน้าตัดของดินขนาด 2.5x5.0 เมตร ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ อ้างอิงรูปที่ 5(ก) ในขณะที่ระดับความลึก 16.5 เมตร (ที่ระดับสิ้นสุดการปรับปรุง) มีค่า a เท่ากับ 60% โดยคิดจากพื้นที่หน้าตัดของดินขนาด 2.5x6.4 เมตร ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ อ้างอิงรูปที่ 5 (ข) ดังนั้นค่า a

เฉลี่ยจะเท่ากับ 55% โดยประมาณซึ่งเป็นค่าที่น่าไปใช้ในการวิเคราะห์สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 เมตร และออกแบบให้มีค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 1000 kN/m² ค่าโมดูลัสเสาเข็มดินซีเมนต์กำหนดให้เท่ากับ $300q_u$ [14] และอัตราส่วนปัวส์ซองกำหนดให้เท่ากับ 0.15 สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ของดินซีเมนต์ ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ค่าอัตราส่วนช่องว่าง เป็นต้น ถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับคุณสมบัติของดิน

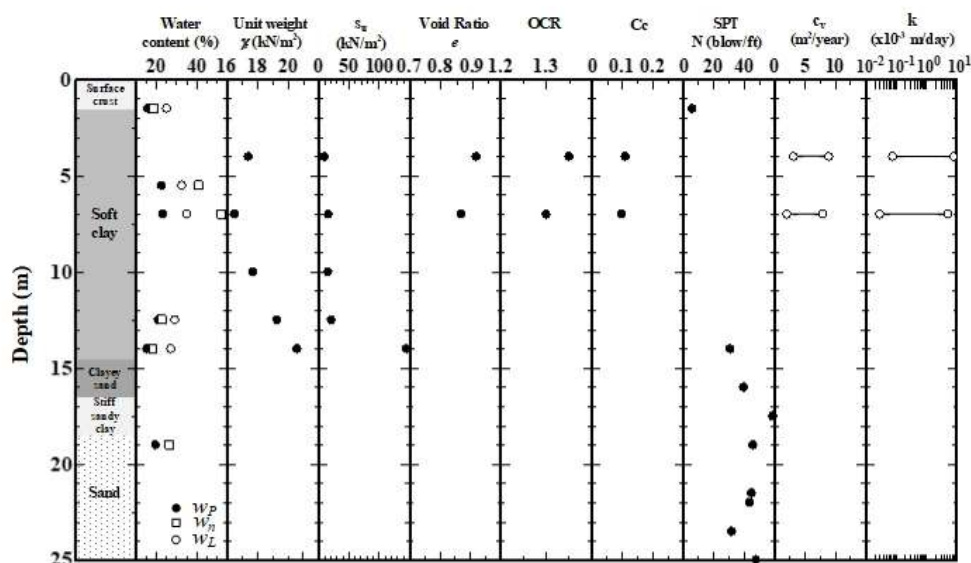


(ก) ที่ระดับความลึก 0 เมตร



(ข) ที่ระดับความลึก 16.5 เมตร

รูปที่ 5 การจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับความลึก 0 และ 16.5 เมตร



รูปที่ 6 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินบริเวณโครงการฯ

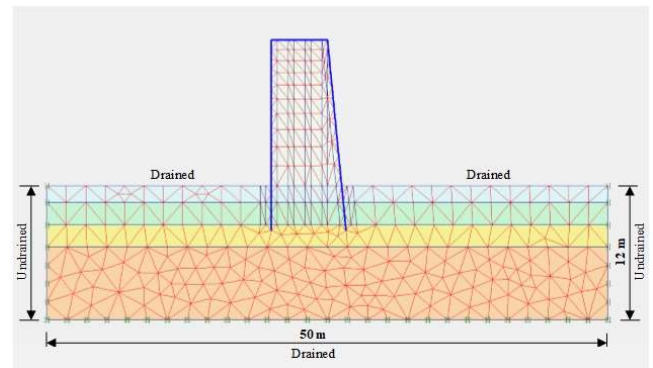
ผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณข้างของทะเลสาบแสดงในรูปที่ 6 พบว่าประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาประมาณ 14.5 เมตร ได้ชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับชั้นทราย มีค่า OCR มากกว่า 4 ตั้งแต่ระดับผิวดินถึงความลึก 5 เมตร จากนั้นลงมาถึงชั้นดินเหนียวแข็งมีค่า OCR มากกว่า 1.2 สำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่เลือกใช้เป็นเสาเข็มรูปตัวไอ หน้าตัด $0.35 \times 0.35 \text{ m}^2$ กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มเท่ากับ $25.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ มีค่าสติฟเนส (ED) เท่ากับ $91,035 \text{ kN.m}^2$

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์

ในการศึกษาพารามิเตอร์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมเขื่อนนี้ จะใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Plaxis 2D version 8.0 มาทำการศึกษา อ้างอิงจากการศึกษาของ Pongsivasathit et al. [13] ชั้นดินเหนียวถูกแทนที่ด้วยแบบจำลอง Soft Soil Model (SSM) ส่วนดินทราย ดินเหนียวปนทรายแข็ง ดินทรายปนดินเหนียว และดินที่ใช้เติมระหว่างกำแพงคอนกรีตอัดแรง กำหนดให้แทนที่ด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb (MCM) สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ถูกกำหนดให้แทนที่ด้วยแบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Model) ในรูปที่ 7 แสดงการแบ่งชั้นส่วนภายในแบบ

จำลองด้วยโปรแกรม Plaxis 2D เป็นลักษณะสามเหลี่ยมที่มีโหนดภายในจำนวน 15 โหนด

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ที่ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ดังแสดงในตารางที่ 1 มีรายละเอียด ดังนี้สำหรับค่าพารามิเตอร์ด้านกำลัง ได้แก่ ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (Cohesion, c) และมุมเสียดทานภายใน (Angle of friction, ϕ) ของดินเหนียวอ่อนได้มาจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยูอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ (CU Test) ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ได้มาจากการประมาณด้วยสมการเชิงประสบการณ์จากผลทดสอบการเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยที่



รูปที่ 7 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติดิน

Depth (m)	Soil type	E (kPa)	ν	κ	λ	ϕ'	c (kPa)	e_0	γ_t , (kN/m ³)	$k_v \times 10^{-4}$ (m/day)	$k_h \times 10^{-4}$ (m/day)
0 - 3.0	Surface layer	6,720	0.15	-	-	0	37.5	-	17.8	1.22	1.22
3.0 - 5.5	Soft clay-1	-	0.15	0.027	0.048	15.2	6.8	0.92	17.4	0.34	0.34
5.5 - 14.5	Soft clay-2	-	0.15	0.022	0.043	20.8	5.1	0.87	16.5	0.18	0.18
14.5 - 16.5	Clayey sand	14,720	0.15	-	-	0	145.1	-	20.6	8	8
16.5 - 18.5	Stiff sandy clay	17,600	0.15	-	-	0	143.75	-	21	8	8
18.5 - 25.0	Sand	120,000	0.15	-	-	0	196.88	-	21	25	25
0 - 13.0	Filled soil	3,000	0.3	-	-	0	10	-	16.5	0.34	0.34

หมายเหตุ: E = Young's modulus; ν = Poisson's ratio; λ = slope of consolidation line in e - $\ln p_0$ plot (e is voids ratio and p_0 is effective mean stress); κ = slope of rebound line in e - $\ln p_0$ plot; e_0 = initial void ratio; γ_t = unit weight; k_h and k_v = horizontal and vertical hydraulic conductivity, c = cohesion, and ϕ' = friction angle of soil.

สำหรับชั้นทรายแน่น อ้างอิงจาก [15] กำหนดให้

$$E = 2500N \text{ ในหน่วย kPa} \quad (1)$$

$$N = 15 + [(N)_{field} - 15] / 2 \quad (2)$$

โดยที่ N คือค่าตัวเลขหุละลงมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว
($N)_{field}$ คือค่าตัวเลขหุละลงมาตรฐานจากภาคสนาม

สำหรับชั้นทรายปนดินเหนียวและชั้นดินเหนียวแข็งปน
ทราย อ้างอิงจาก [16] กำหนดให้

$$E = 320(N + 15) \text{ ในหน่วย kPa} \quad (3)$$

ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ (s_u) ของดินเหนียว
ปนทราย อ้างอิงจาก [17] สามารถประมาณได้จาก

$$s_u = 6.25N \text{ ในหน่วย kPa} \quad (4)$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแนวตั้ง (k_v) ได้จาก
การทดสอบการยุบอัดตัวแกนเดียว การศึกษานี้จะสมมติให้ค่า
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแนวระนาบ (k_h) มีค่าเท่ากับ k_v
อย่างไรก็ดีในแบบจำลองจะกำหนดค่า k_v และ k_h แปรผันกับ
อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการยุบอัดตัวของ
ชั้นดินเหนียว ดังสมการต่อไปนี้ [18]

$$k = k_0 \cdot 10^{-(e_0 - e)/C_k} \quad (4)$$

เมื่อ k_0 คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านก่อนมีน้ำหนักระทำ
 e_0 คืออัตราส่วนช่องว่างก่อนมีน้ำหนักระทำ k คือค่า
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านหลังมีน้ำหนักระทำ e คืออัตราส่วน
ช่องว่างหลังมีน้ำหนักระทำ และ C_k สมมติให้เท่ากับ $0.5 e_0$

สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ ถูกกำหนดเป็นวัสดุยืดหยุ่น มีค่า
 E เท่ากับ $300q_u$ อ้างอิงจาก [14] และค่าอัตราส่วนปัวส์ของ
กำหนดให้เท่ากับ 0.15 ในขณะที่ค่า k ของดินซีเมนต์กำหนดให้
เท่ากับค่า k ของดินบริเวณรอบเสาเข็มดินซีเมนต์

เนื่องจากดินถมที่เดิมระหว่างกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัด
แรงถูกปรับปรุงคุณภาพ ด้วยเทคนิคการเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์
จากวิธีการผสมลึก ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะ
ทำการแปลงหน้าตัดของดินถมเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เป็น
หน้าตัดเสมือนไม่ได้ปรับปรุง โดยหน้าตัดเสมือนจะถูกแทนที่
ด้วยแบบจำลอง MCM และอ้างอิงจาก [19,20] กำหนดให้ค่า
 E และ s_u ของหน้าตัดเสมือน หาได้จาก

$$E = E_{(soil)}(1 - a) + E_{(treated\ soil)}(a) \quad (5)$$

$$s_u = s_{u(soil)}(1 - a) + s_{u(treated\ soil)}(a) \quad (6)$$

เมื่อ $E_{(soil)}$ คือค่า constrained moduli ของดินที่ไม่เสริม
กำลัง, $E_{(treated\ soil)}$ คือค่า constrained moduli ของเสาเข็ม
ดินซีเมนต์, $s_{u(soil)}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
เฉลี่ยของดินที่ไม่เสริมกำลัง, $s_{u(treated\ soil)}$ คือค่ากำลังรับแรง
เฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์

ในการวิเคราะห์การศึกษาครั้งนี้จะไม่พิจารณาผลของการ
รบกวนดินระหว่างการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ ในแบบจำลองดิน
ในส่วนที่ถูกเสริมกำลังด้วยกลุ่มของเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูก
แทนที่ด้วยแบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีค่า E ได้จากผลการ
คำนวณด้วยสมการที่ (5) และมีค่า s_u ที่ได้จากผลการคำนวณ
ด้วยสมการที่ (6) สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ จะสมมติให้เท่ากับ
คุณสมบัติดินรอบเสาเข็ม

สำหรับความหนาของกำแพงคอนกรีตอัดแรงและแผ่นพื้น
คอนกรีตเสริมเหล็กบนเขื่อนกำหนดให้เท่ากับ 0.35 เมตร และ
0.30 เมตร ตามลำดับ โดยมีค่า EI เท่ากับ $91,035 \text{ kN-m}^2$
สำหรับกำแพง และ $57,375 \text{ kN-m}^2$ สำหรับแผ่นพื้น และ
กำหนดให้มีระดับน้ำใต้ดินก่อนการวิเคราะห์อยู่ที่ระดับความ
ลึก 2.85 เมตร ใต้ระดับผิวดิน ซึ่งจะเท่ากับระดับน้ำใน
ทะเลสาบภายหลังจากที่ก่อสร้างเสร็จ

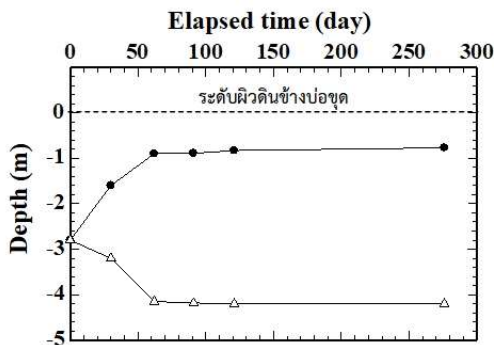
3. ผลการศึกษาพารามิเตอร์เชิงตัวเลข

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ระยะ
ฝังของกำแพงคอนกรีตอัดแรง ค่าความแตกต่างของระดับน้ำ
ในทะเลสาบระหว่างฝั่งในโครงการและฝั่งนอกโครงการ ค่า

ระดับความลึกของดินที่เสริมกำลัง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเขื่อนและค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงคอนกรีตอัดแรง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเสถียรภาพของเขื่อนนี้

3.1 อิทธิพลของระยะฝังกำแพงคอนกรีตอัดแรง

การวิเคราะห์ผลกระทบของระยะฝังในชั้นดินที่กั้นทะเลสาบของกำแพงคอนกรีตอัดแรง จะใช้สภาพของระดับน้ำหลังจากการก่อสร้างเขื่อนเสร็จสิ้น ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงระดับน้ำในทะเลสาบภายในและภายนอกโครงการ ที่มีระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้งหมด 276 วัน สังเกตว่าระดับน้ำภายในโครงการจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายในเวลา 60 วัน เนื่องจากการเติมน้ำจากแหล่งน้ำภายนอกโครงการ ในขณะที่ระดับน้ำภายนอกโครงการจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไป 60 วัน ผลของความต่างในระดับน้ำทั้งสองฝั่งของเขื่อนทำให้เขื่อนรับความดันทางข้างเชิงผลึก

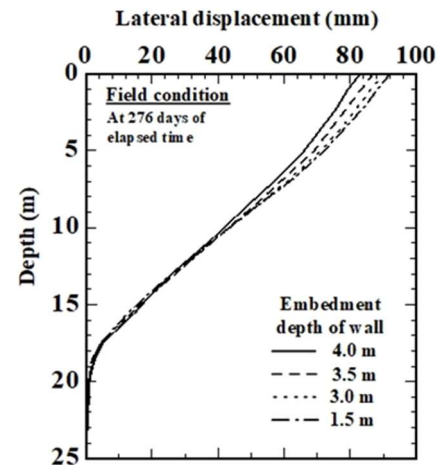


รูปที่ 8 ค่าระดับน้ำทั้งสองฝั่งของเขื่อน

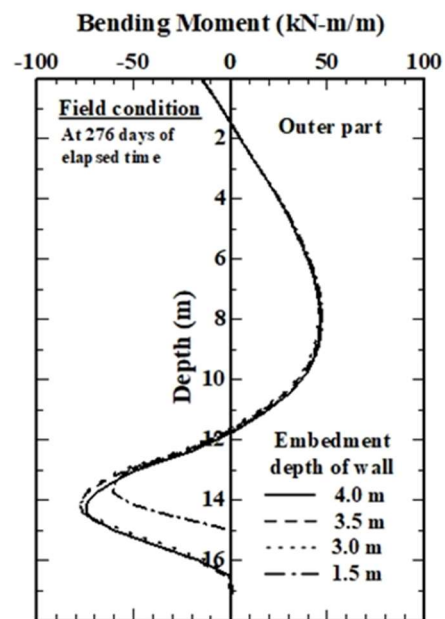
จากนั้นในการวิเคราะห์ค่าระยะฝัง (Embedment Depth) โดยจะทำการแปรผันค่าระยะฝังในช่วงตั้งแต่ 2.5 เมตร ถึง 4 เมตร ส่วนความสูงของเขื่อนจากระดับกั้นทะเลสาบถูกควบคุมให้คงที่เท่ากับ 13.5 เมตร ในแบบจำลอง เพื่อดูอิทธิพลของระยะฝังนี้ต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเขื่อน และค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงคอนกรีตอัดแรง ได้ผลดังนี้

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวทางข้างมากที่สุดของเขื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะฝังของกำแพงเพิ่มขึ้น และการลดลงของระยะฝังทำให้ค่าโมเมนต์ดัดบนกำแพงมีแนวโน้มลดลงทั้งสองฝั่งกำแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีระยะฝังเท่ากับ 1.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 โดยกำแพงใน

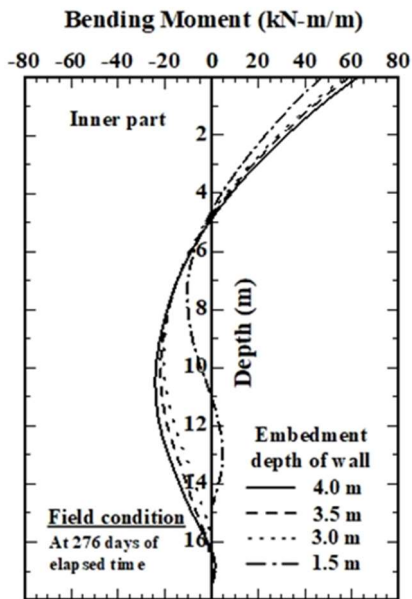
ฝั่งที่ติดกับทะเลสาบนอกโครงการค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดที่ระยะฝังของกำแพงต่ำกว่าระดับกั้นทะเลสาบ ส่วนกำแพงในฝั่งที่ติดกับทะเลสาบในโครงการพบว่า โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อระหว่างกำแพงกับแผ่นพื้นคอนกรีต



รูปที่ 9 อิทธิพลของระยะฝังต่อการเคลื่อนตัวทางข้าง



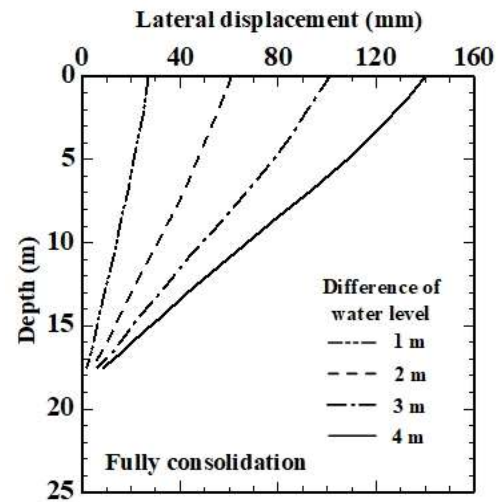
รูปที่ 10 อิทธิพลของระยะฝังต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนนอกบริเวณโครงการ



รูปที่ 11 อิทธิพลของระยะฝังต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนในบริเวณโครงการ

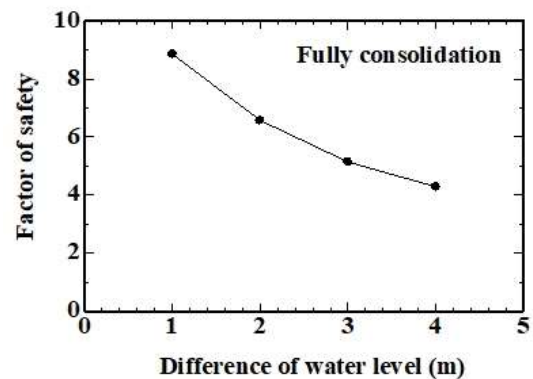
3.2 อิทธิพลของระดับน้ำในทะเลสาบ

เนื่องจากระดับน้ำในทะเลสาบส่วนภายในพื้นที่โครงการจะพยายามรักษาระดับน้ำไว้ที่ความลึก 0.25 เมตรจากระดับผิวดิน แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากระดับน้ำในทะเลสาบส่วนภายนอกพื้นที่โครงการจะไม่สามารถควบคุมระดับน้ำได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศในแต่ละฤดู ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของระดับน้ำในทะเลสาบ ในแบบจำลองระดับน้ำก่อนการวิเคราะห์จะกำหนดให้อยู่ที่ระดับความลึก 0.25 เมตรจากระดับผิวดินในทั้งสองฝั่งของเขื่อน จากนั้นทำการลดระดับน้ำส่วนภายนอกโครงการ (ด้านขวามือของเขื่อนในรูปที่ 4) อยู่ที่ความลึก 1 เมตร, 2 เมตร, 3 เมตร และ 4 เมตร ตามลำดับ แล้ววิเคราะห์จนกระทั่งสิ้นสุดการยุบอัดตัวคายน้ำ ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 12 อิทธิพลของระดับน้ำต่อค่าการเคลื่อนตัวทางข้าง

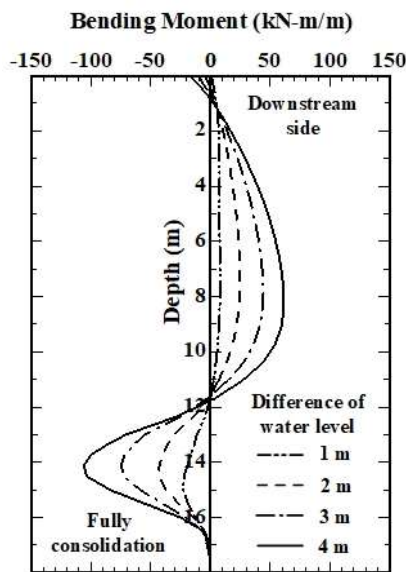
จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของระดับน้ำส่วนภายนอกโครงการ ทำให้เขื่อนมีการเคลื่อนตัวทางข้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และทำให้ส่วนความปลอดภัยด้านการพิบัติของเขื่อนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งโดยทั่วไปการลดระดับน้ำทำให้ความดันทางข้างเชิงผลกระทบทำต่อเขื่อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการออกแบบควรกำหนดขีดจำกัดสูงสุดของความแตกต่างระดับน้ำทั้งสองฝั่งด้วยเพื่อความปลอดภัยของผู้อาศัยริมทะเลสาบ



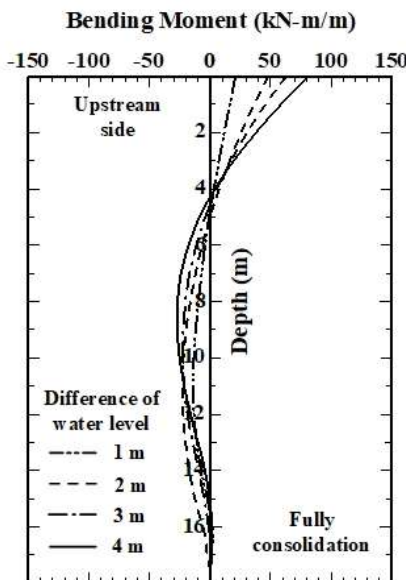
รูปที่ 13 ค่าส่วนความปลอดภัยด้านการพิบัติของเขื่อน

หากพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนกำแพงคอนกรีตอัดแรงทั้งสองด้านของเขื่อน พบว่าการลดลงของระดับน้ำส่วนภายนอกโครงการไม่มีผลต่อรูปแบบแผนผังโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 โดยโมเมนต์ดัดสูงสุด

จะเกิดขึ้นที่ระยะฝั่งของกำแพงสำหรับกำแพงส่วนติดกับพื้นที่ในโครงการ และจะเกิดที่จุดต่อระหว่างกำแพงกับแผ่นพื้นคอนกรีตบนเขื่อนสำหรับกำแพงส่วนติดกับพื้นที่นอกโครงการ อย่างไรก็ตามการลดลงของระดับน้ำมีอิทธิพลทำให้ค่าโมเมนต์ดัดของทั้งสองกำแพงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นบนกำแพงฝั่งติดกับภายนอกโครงการ



รูปที่ 14 อิทธิพลของระดับน้ำต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนนอกบริเวณโครงการ

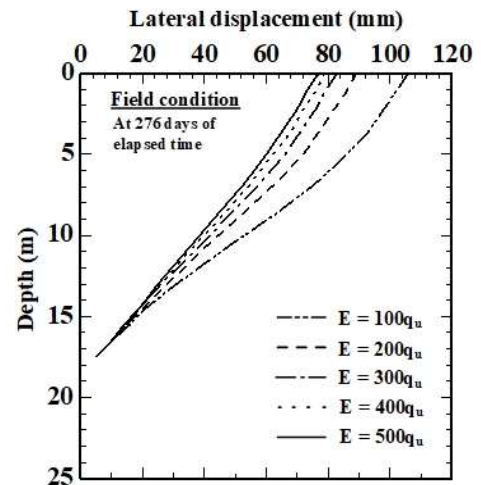


รูปที่ 15 อิทธิพลของระดับน้ำต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนในบริเวณโครงการ

3.3 อิทธิพลของค่าสติฟเนสเสาเข็มดินซีเมนต์

อ้างอิงจากโครงการที่ใช้เทคนิคการผสมลิกเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [14] พบว่า ค่า E/q_u ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะอยู่ในช่วงแปรผันตั้งแต่ 100 ถึง 500 ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างกว้าง ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของค่า E/q_u ต่อความเสถียรภาพของเขื่อน ในแบบจำลองจะคงที่ระยะฝั่งของกำแพงให้เท่ากับ 4.0 เมตร และกำหนดให้กำแพงสูงเท่ากับ 14 เมตร ตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นทำการแปรผันค่า E/q_u ของเสาเข็มดินซีเมนต์ตั้งแต่ 100 ถึง 400 แล้ววิเคราะห์ด้วยสภาพระดับน้ำทั้งสองฝั่งของเขื่อนตามรูปที่ 8 ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

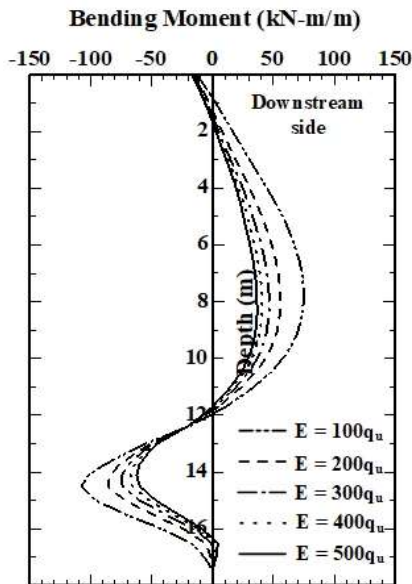
ในการวิเคราะห์ หากดินที่เติมในช่องว่างระหว่างกำแพงคอนกรีตอัดแรงทั้งสองไม่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การพิบัติของโครงสร้างเขื่อนนี้จะปรากฏ อย่างไรก็ตามหลังจากการปรับปรุงชั้นดินถมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยรูปแบบการเสริมดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าโครงสร้างเริ่มมีความเสถียรภาพมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า E/q_u ในเสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้ค่าการเคลื่อนตัวทางข้างของเขื่อนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังในรูปที่ 16



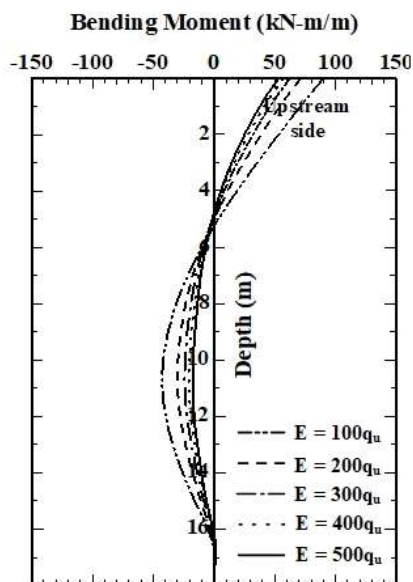
รูปที่ 16 อิทธิพลของค่าสติฟเนสเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อค่าการเคลื่อนตัวทางข้าง

สำหรับอิทธิพลของค่า E/q_u ต่อค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงคอนกรีตอัดแรง แสดงในรูปที่ 17 และ 18 พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า E/q_u ทำให้กำแพงทั้งสองด้านมีโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ การเพิ่มค่าสติฟเนสในเสาเข็มดิน

ซีเมนต์เป็นช่วยส่งถ่ายค่าโมเมนต์ในกำแพงมายังเสาเข็มดินซีเมนต์ได้มากขึ้นช่วยค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในกำแพง รูปแบบของแผนผังโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยโมเมนต์ดัดสูงสุดจะปรากฏบนกำแพงส่วนที่ติดทะเลสาบภายนอกโครงการในบริเวณส่วนที่ฝังในชั้นดิน



รูปที่ 17 อิทธิพลของค่าสตีเฟนสเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนนอกบริเวณโครงการ

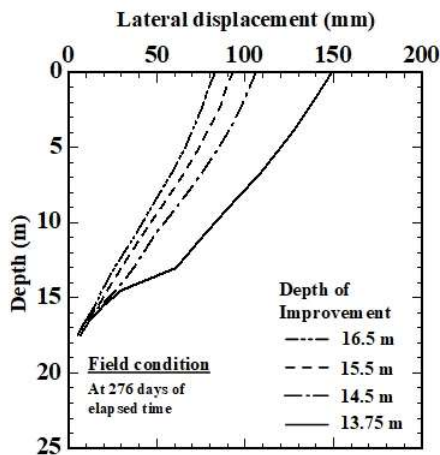


รูปที่ 18 อิทธิพลของค่าสตีเฟนสเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนในบริเวณโครงการ

3.4 อิทธิพลของความลึกของชั้นดินที่ปรับปรุง

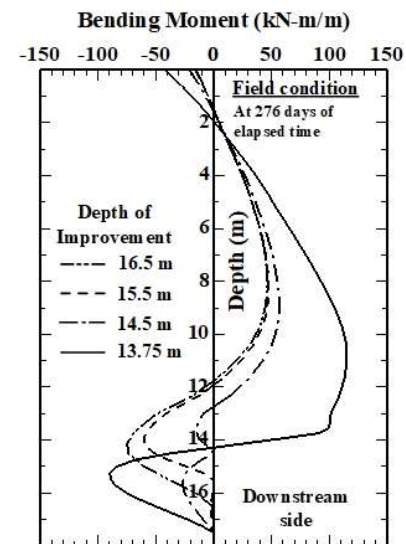
จากผลการศึกษาที่ผ่านมา [19,21-23] พบว่าหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ได้แก่ ระยะเวลาการปรับปรุงชั้นดินที่ถูกปรับปรุง หากความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์หยั่งถึงชั้นดินแข็ง การออกแบบจะมีลักษณะคล้ายกับการออกแบบเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง แต่ถ้าความยาวน้อยกว่าระดับความลึกของชั้นดินแข็ง การออกแบบจะมีลักษณะเป็นแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ล้น (Floating soil-cement column) ซึ่งมีพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำที่ซับซ้อนกว่าเสาเข็มที่หยั่งถึงชั้นดินแข็ง เมื่อนำความลึกของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงนี้มาพิจารณาถึงผลกระทบต่อค่าการเคลื่อนตัวทางข้างและโมเมนต์ดัดด้วยสภาพระดับน้ำในทะเลสาบดังในรูปที่ 8 พบว่า ถ้าสมมติให้ระยะฝังของกำแพงคอนกรีตอัดแรงเท่ากับ 4 เมตร (เท่ากับระยะจริงในภาคสนาม) และกำหนดให้ค่า E/q_u คงที่เท่ากับ 300 จากนั้นทำการแปรผันค่าความลึกที่ปรับปรุงความยาวตั้งแต่ 13 เมตร ถึง 16.5 เมตร วัดจากระดับบนสุดของเขื่อนลงมา ได้ผลดังนี้

หากระยะความลึกของชั้นดินที่เสริมกำลังสั้นกว่าทำให้เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวทางข้างสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 19 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีความหนาของชั้นดินที่เสริมกำลังเท่ากับ 13.75 เมตร เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวทางข้างมากกว่ากรณีอื่นๆ อย่างมีนัยยะสำคัญ ชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าปลายเสาเข็มดินซีเมนต์มีอัตราการเคลื่อนตัวทางข้างช้ากว่าชั้นดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีพฤติกรรมเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นหากมีระยะความลึกที่เสริมกำลังน้อยกว่า 14.5 เมตร ซึ่งทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีค่ากำลังรับแบกทานที่ปลายเสาเข็มน้อยมาก และหากลดระดับความลึกของชั้นดินที่เสริมกำลังลงมากกว่า 13.75 เมตร จะทำให้เขื่อนไม่มีความเสถียรภาพเกิดการพิบัติของเขื่อน

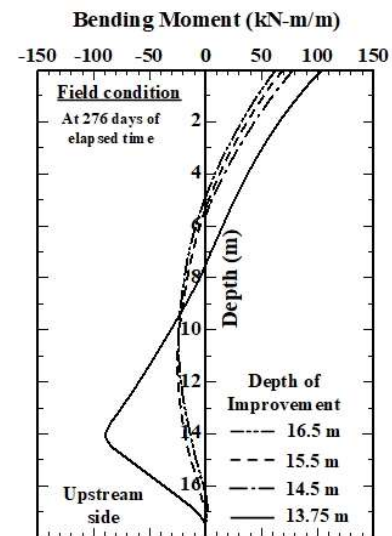


รูปที่ 19 อิทธิพลของความหนาของชั้นดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อการเคลื่อนตัวทางข้าง

เมื่อพิจารณาถึงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนกำแพงคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากความยาวของชั้นดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังในรูปที่ 20 และ 21 พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยาวของชั้นดินที่เสริมกำลังสั้นลง รูปแบบของแผนผังโมเมนต์ดัดบนกำแพงจะเปลี่ยนไปเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มสั้น ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดบนกำแพงเปลี่ยนตำแหน่ง โดยที่ในกำแพงส่วนที่ติดกับทะเลภายในโครงการ จะปรากฏค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เหนือระดับกันทะเลสาบขึ้นไปในขณะที่กรณีอื่นๆ จะปรากฏที่ระดับต่ำกว่าระดับกันทะเลสาบ ส่วนกำแพงที่ติดกับทะเลสาบภายนอกโครงการกลับพบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะปรากฏที่ระดับต่ำกว่าระดับกันทะเลสาบลงไปสำหรับกรณีชั้นดินเสริมกำลังที่มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มสั้น ในขณะที่กรณีอื่นๆจะปรากฏที่บริเวณรอยต่อระหว่างกำแพงกับแผ่นพื้นคอนกรีตบนเขื่อน หากเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นระหว่างกำแพงทั้งสอง พบว่าค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงส่วนที่ติดกับทะเลสาบนอกมีค่ามากกว่าในกำแพงส่วนที่อยู่ในพื้นที่โครงการเช่นเดียวกับกรณีศึกษาอื่นๆ



รูปที่ 20 อิทธิพลของความหนาของชั้นดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนนอกบริเวณโครงการ



รูปที่ 21 อิทธิพลของความหนาของชั้นดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อโมเมนต์ดัดในกำแพงในฝั่งที่ติดกับส่วนในบริเวณโครงการ

4. สรุปผลการศึกษา

อ้างอิงเทคนิคการออกแบบเขื่อนที่ทำจากกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงร่วมกับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์จากวิธีผสมลึกของ Pongsivasathit et al. [13] นำมาประยุกต์เพื่อใช้ศึกษาพารามิเตอร์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมเขื่อนนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อ้างอิงจากระดับน้ำในภาคสนามเป็นเวลา 276 วัน พบว่าการเคลื่อนตัวของตัวทางข้างของเขื่อนลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3.5 เมื่อระยะฝั่งของกำแพงคอนกรีตเพิ่มขึ้น 1 เมตร ค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มเล็กน้อยหากระยะฝั่งของกำแพงลดลงจาก 4 เมตรอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามหากระยะฝั่งลดลงเหลือเพียง 1.5 เมตร ค่าโมเมนต์ดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2) ความต่างของระดับน้ำทั้งสองฝั่งของเขื่อนมีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเขื่อน การเพิ่มขึ้นความต่างของระดับน้ำทุก 1 เมตร ทำให้เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.29 เมตร และค่าโมเมนต์ดัดในกำแพงเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 23

3) การเพิ่มขึ้นของค่าสติฟเนสเสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้การเคลื่อนตัวของตัวทางข้างและค่าโมเมนต์ดัดบนกำแพงของเขื่อนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ และอัตราการเคลื่อนตัวจะลดลงแบบไม่มีนัยยะสำคัญหากค่า E เกินกว่า 400 เท่าของค่า q_u

4) การเพิ่มของระดับความลึกของชั้นดินที่เสริมกำลังทำให้การเคลื่อนตัวของตัวทางข้างของเขื่อนและค่าโมเมนต์ดัดบนกำแพงลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ อย่างไรก็ตามหากปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่เหนือชั้นดินแข็งขึ้นไปทำให้มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มดินซีเมนต์สั้น การเคลื่อนตัวของตัวทางข้างของเขื่อนจะเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 60 และทำให้รูปแบบแผนผังโมเมนต์ดัดเปลี่ยนไป พึงระวังอาจเกิดการพิบัติของเขื่อนได้

5) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดบนกำแพงคอนกรีตอัดแรงของโครงสร้างประเภทนี้จะปรากฏที่บริเวณด้านที่มีระดับน้ำต่ำกว่าเสมอทุกกรณีศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณ บริษัทเกษมดีชาวด์แอนด์คอนซัลแทนด์ ที่มอบข้อมูลและรายละเอียด พร้อมเทคนิคการออกแบบโครงสร้างเขื่อนฯ เพื่อการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alfaro MC, Balasubramaniam AS, Bergado D, Chai JC. *Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment*. CRC Press; 1994.
- [2] Broms BB, Boman P. Lime columns— A new foundation method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1979;105(4):539-56.
- [3] Coastal Development Institute of Technology. *The Deep Mixing Method – Principle, Design and Construction*. A. A. Balkema Publishers, 2002. 123p.
- [4] Coastal Development Institute of Technology. *The Premixing Method– Principle, Design and Construction*. A. A. Balkema Publishers, 2003. 140p.
- [5] Coastal Development Institute of Technology. *Technical Manual of Deep Mixing Method for Marine Works*, 2008a. 289p. (in Japanese).
- [6] Coastal Development Institute of Technology. *Technical Manual of Premixing Method*, 2008b. 215p. (in Japanese).
- [7] Coastal Development Institute of Technology. *Technical Manual of Light-weight Geomaterial*, 2008c. 370p. (in Japanese).
- [8] Coastal Development Institute of Technology. *Technical Manual of Pneumatic Flow Mixing Method*, 2008d. 187p. (in Japanese).
- [9] The Building Center of Japan. *Design and Quality Control Guideline of Improved Ground for Building*, 1997. 473p. (in Japanese).
- [10] Fire and Disaster Management Agency. Criteria for a Specific Operation of Outdoor Storage Tank using Deep Mixing Method. *Fire and Disaster Management Agency*. 1995, No. 150, 2p. (in Japanese).
- [11] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Xi P. Vertical bearing capacity behaviour of single T-shaped soil-cement column in soft ground: laboratory modelling, field test, and calculation. *Acta Geotechnica*. 2017;12(5):1077-88.
- [12] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Jing F. Variable-diameter deep mixing column for multi-layered soft ground improvement: Laboratory modeling and

- field application. *Soils and Foundations*. 2019;59(3):633-43.
- [13] Pongsivasathit S, Petchgate W, Horpibulsuk S, Piyaphipat S. Composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a dam – Design, construction and performance. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;15: e00771.
- [14] Topolnicki M. General overview and advances in deep soil mixing. In *xxiv geotechnical conference of torino design, construction and controls of soil improvement systems* 2016 Feb 25 (pp. 1-30).
- [15] Japanese Society of Civil Engineer (JSCE). *Manual for structure design of Japanese railway*, Tokyo; 1986.
- [16] Bowles, JE. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition. New York: McGraw- Hill. 1997.
- [17] Terzaghi, K. and Peck, RB. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley, New York;1967: 729p.
- [18] Taylor DW. *Fundamentals of soil mechanics*. LWW; 1948.
- [19] Pongsivasathit S, Chai J, Ding W. Consolidation settlement of floating- column- improved soft clayey deposit. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement*. 2013; 166(1):44-58.
- [20] Kitazume M, Terashi M. *The Deep Mixing Method*. Boca Raton, FL, USA:: CRC press; 2013 Feb 21.
- [21] Chai JC, Miura N, Kirekawa T, Hino T. Settlement prediction for soft ground improved by columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement*. 2010;163(2):109-119.
- [22] Chai J, Pongsivasathit S. A method for predicting consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. *Frontiers of Architecture and Civil engineering in China*. 2010;4(2):241-251.
- [23] Pongsivasathit S, Voottipruex P, Chai JC. Settlement- time curve calculation of soil- cement column and slab improved soft clay deposit. *Lowland Technology International*. 2017;19: 99-110.