

การวิเคราะห์เสถียรภาพคันดินบนชั้นดินอ่อนที่เสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

Stability analysis of embankments on soft ground reinforced with soil-cement columns using a finite element model

นคพล จันทโรจน์^{1,*} รัชศิริ สุขรักษ์² สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author; E-mail address: 6670123821@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การก่อสร้างถนนและคลองระบายน้ำในบริเวณพื้นที่ดินอ่อนเขตพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา มักพบปัญหาด้านเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของคันดินเนื่องจากปัญหาด้านกำลังและการทรุดตัวของชั้นดินอ่อน โครงสร้างคันดินจึงนิยมเสริมความแข็งแรงด้วยโครงสร้างทางวิศวกรรมเช่น เสาเข็มดินซีเมนต์ การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบคันดินบนชั้นดินอ่อนที่เสริมความแข็งแรงด้วยโครงสร้างทางวิศวกรรมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินบนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำบริเวณจังหวัดอยุธยา เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดคันดินอ่อนด้วยแฟกเตอร์ความปลอดภัยในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง การวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลผลการเจาะสำรวจดินจากโครงการก่อสร้าง และข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองพฤติกรรมของดินด้วยแบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ให้สอดคล้องกับขั้นตอนการก่อสร้างและการใช้งานในระยะยาว ผลการศึกษาในเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่า ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในขั้นตอนการก่อสร้าง และค่าการเคลื่อนตัวของคันดินจากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับรายงานผลการตรวจวัดในสนาม โดยปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์คือ แบบจำลองดินและค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้สำหรับชั้นดินอ่อนและเสาเข็มดินซีเมนต์ ตลอดจนขั้นตอนการก่อสร้าง

คำสำคัญ: คันดินบนชั้นดินอ่อน, วิเคราะห์เสถียรภาพ, วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์, แฟกเตอร์ความปลอดภัย, เสาเข็มดินซีเมนต์

Abstract

The construction of roads and drainage canals in the soft soil regions of the Chao Phraya River basin frequently encounters challenges related to embankment stability and displacement

due to the low strength and high compressibility of the soft clay layers. To mitigate these issues, embankments are often reinforced with ground improvement techniques such as the cement deep mixing method. Consequently, the stability analysis and design of reinforced embankments on soft clay are of paramount importance. This study conducts a stability analysis of embankments on soft ground reinforced with soil-cement columns using the finite element method. A case study is presented, focusing on a drainage canal construction project in Ayutthaya Province, with the objective of evaluating the stability of soft soil embankments by assessing factors of safety at various stages of construction. The analysis incorporates soil investigation data and laboratory test results from the project, employing the Mohr-Coulomb model to simulate soil behaviour under both construction and long-term usage conditions. Preliminary findings indicate that the inclusion of soil-cement columns significantly enhances the factor of safety during construction stages, with predicted embankment displacements closely aligning with field measurement data. Key factors affecting the analysis results include the choice of soil model, the parameters selected for soft clay and soil-cement columns, and the construction sequence.

Keywords: Embankments on soft ground, Stability analysis, Finite element method, Factor of safety, Soil-cement column

1. บทนำ

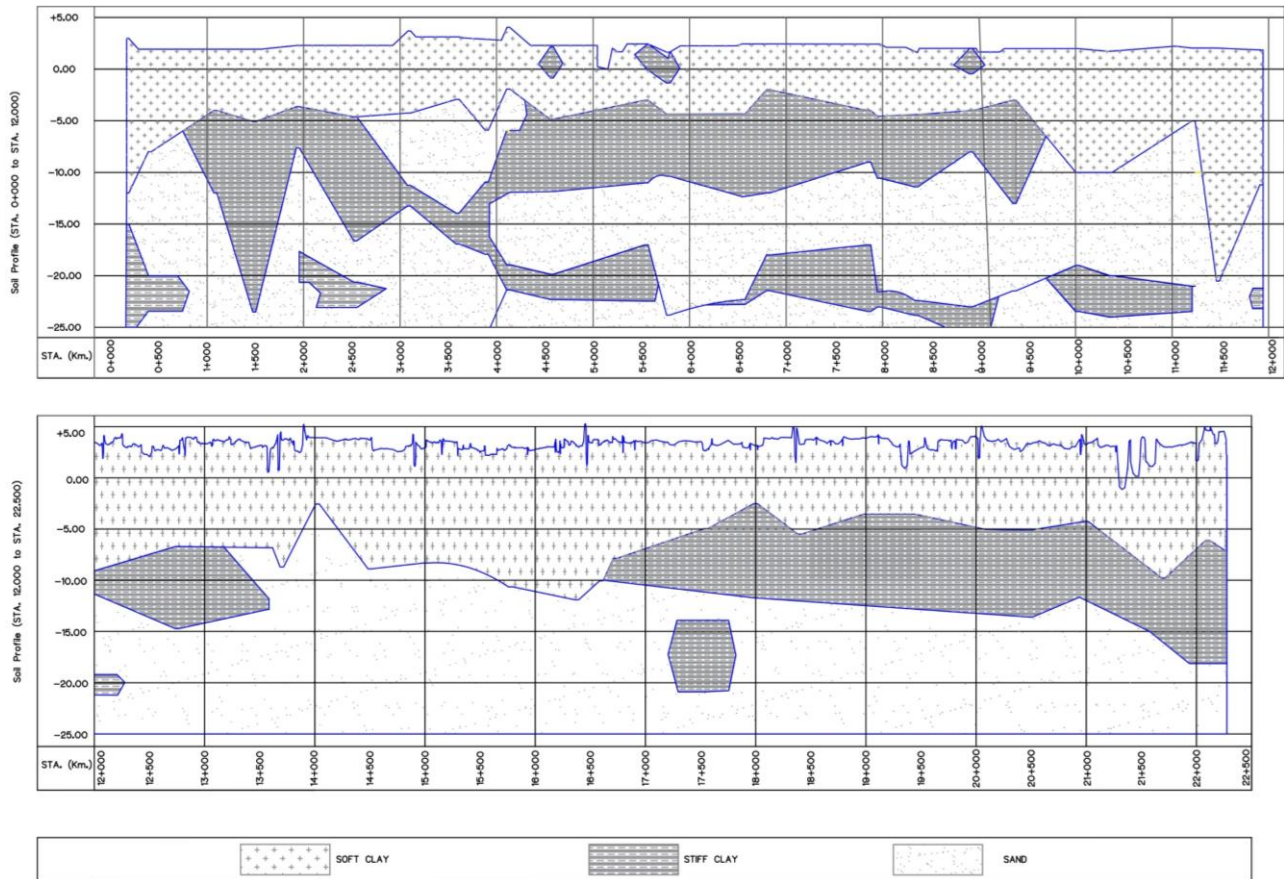
ปัจจุบันการก่อสร้างคลองระบายน้ำเพื่อใช้ในการระบายน้ำ ป้องกันน้ำท่วมโดยการขุดดินให้ได้รูปหน้าตัดคลองระบายน้ำ รวมถึงการก่อสร้างคันดินหรือคันทางถนน ในบริเวณพื้นที่ดินอ่อนกรุงเทพฯ ฯ ซึ่งมีความแปรปรวนสูง [1] มักก่อให้เกิดแรงดันด้านข้างและการเคลื่อนตัวในแนวราบอย่างมาก การทรุดตัวเกินขนาด รวมถึงปัญหาความล้มเหลวของความลาดเอียงและความสามารถในการรับน้ำหนัก ซึ่งโดยทั่วไปจะนำไปสู่ความล่าช้าในการก่อสร้างเป็นระยะเวลานาน [2] วิศวกรธรณีเทคนิคต้องสำรวจสภาพดินเพื่อประเมินปัญหาในพื้นที่ และหาแนวทางที่เหมาะสมในการออกแบบและก่อสร้างให้ปลอดภัยและคุ้มค่า [3] พร้อมทั้งตรวจสอบเสถียรภาพลาดคันดินและการเคลื่อนตัวให้อยู่เกณฑ์ที่ยอมรับได้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอันจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง

การเสริมกำลังคันดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns, SCC) เป็นวิธีการปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับงานก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของคันทางบนดินอ่อนโดยลดการทรุดตัวและเพิ่มความปลอดภัย [4] ทั้งนี้ การจัดเรียงเสาเข็มอย่างเหมาะสมมีผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงดิน [5] ที่ผ่านมา มีการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ในหลายรูปแบบ ทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดลองในรูปแบบจำลองย่อส่วน รวมถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินพฤติกรรมทางวิศวกรรมของโครงสร้างได้ [6] อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลจากการตรวจวัดจริงในสนามระหว่างการก่อสร้าง [7-8] ถือเป็นแนวทางที่ให้ความน่าเชื่อถือสูงสุดสำหรับวิศวกร เนื่องจากสะท้อนพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมจริงได้อย่างชัดเจน และช่วยเพิ่มความมั่นใจในการออกแบบและก่อสร้างใน

สภาพดินอ่อนงานวิจัยนี้ ศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และเสถียรภาพเชิงลาดกรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำบริเวณจังหวัดอยุธยา ที่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อประเมินเสถียรภาพของลาดคันดินอ่อนด้วยแพคเตอร์ความปลอดภัยในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง การวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลผลการเจาะสำรวจดินจากโครงการก่อสร้าง และข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) แบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวในแนวราบของเสาเข็มดินซีเมนต์ และรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ในลักษณะแตกต่างกัน ที่มีผลต่อเสถียรภาพเชิงลาด โดยมีการศึกษาแบบการเสริมกำลังของดินซีเมนต์ 2 รูปแบบ

2. ข้อมูลโครงการและการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) แบบสองมิติ เป็นกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างและดินโดยละเอียด โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลคุณสมบัติดินที่ได้จากการทดสอบภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือน ความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และค่าความแข็งแรงของดิน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมของแบบจำลอง นอกจากนี้ยังรวมถึงรูปแบบของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยแบบจำลองจะถูกออกแบบให้สอดคล้องกับขั้นตอนการก่อสร้างคลองระบายน้ำ ทั้งในแง่ของลำดับการก่อสร้างและเงื่อนไขภาคสนาม เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินพฤติกรรมของดินและโครงสร้างในแต่ละระยะของการก่อสร้างได้อย่างแม่นยำ และนำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ภาพตัดตามแนวขวางของชั้นดินในโครงการก่อสร้าง

2.1 ลักษณะชั้นดิน

ข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองมาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้างซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอบางบาล-บางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา รูปที่ 1 แสดงภาพตัดตามแนวขวางของชั้นดิน (Soil Profile Cross Section) จากช่วง Sta. 0+000 ถึง Sta. 22+300 (จากหลุมเจาะ BH1-BH46) ซึ่งจำแนกชั้นดินตามคุณลักษณะดังนี้

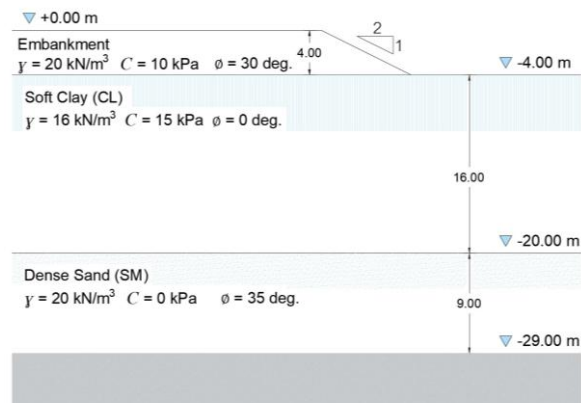
ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ปรากฏอย่างต่อเนื่องในบริเวณระดับความลึกประมาณ +2.00 ความลึกสูงสุด -21.00 เมตร และเป็นชั้นดินหลักที่พบในพื้นที่ก่อสร้าง

ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) พบที่ระดับความลึกมากกว่า -3.00 เมตร

ทรายแน่น (Dense sand) กระจายตัวอยู่เป็นหย่อม ๆ ในบางพื้นที่ โดยเฉพาะที่ระดับความลึกมาก

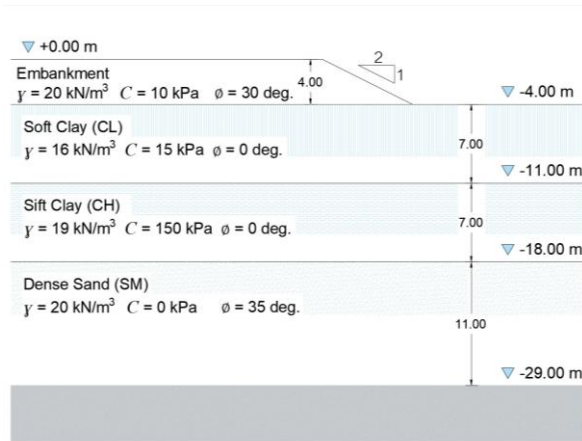
ทรายเป็นถึงแน่นปานกลาง (Loose to Medium Sand) พบกระจายบางจุด มักอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็ง

จากผลการเจาะสำรวจดินทั้งหมดจำนวน 46 หลุมในแนวเส้นทางก่อสร้าง การศึกษาได้กำหนดชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์จำนวน 2 ช่วงตัด (sections) ดังแสดงใน รูปที่ 2(a) และรูปที่ 2(b) เพื่อใช้เป็นตัวแทนลักษณะชั้นดินของพื้นที่ทั้งโครงการ โดยพิจารณาจากความต่อเนื่องและการกระจายตัวของชั้นดินหลักที่พบจากผลการเจาะจริงในสนาม



STA. 7+900 to 8+325

(a) ลักษณะชั้นดินรูปแบบที่ 1



STA. 15+775 to 16+600

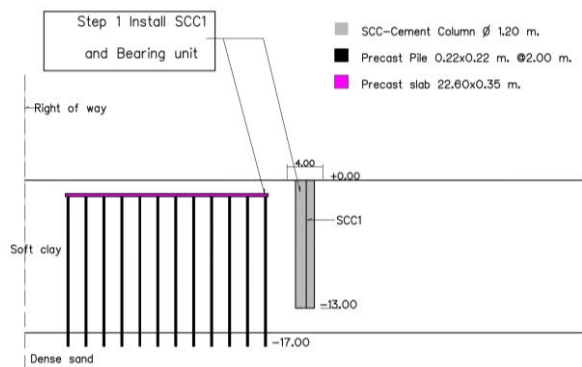
(b) ลักษณะชั้นดินรูปแบบที่ 2

รูปที่ 2 ลักษณะชั้นดินสำหรับการสร้างแบบจำลอง

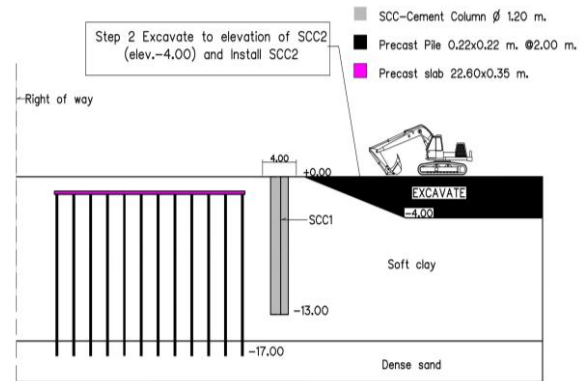
2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม

ขั้นตอนการก่อสร้างในสนามประกอบด้วย การเสริมกำลังดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามด้วยการขุดคลองระบายน้ำจนถึงระดับท้องคลอง จากนั้นทำการถมดินและบดอัดแน่นเพื่อก่อสร้างถนนคันคลอง ดังแสดงในรูปที่ 3

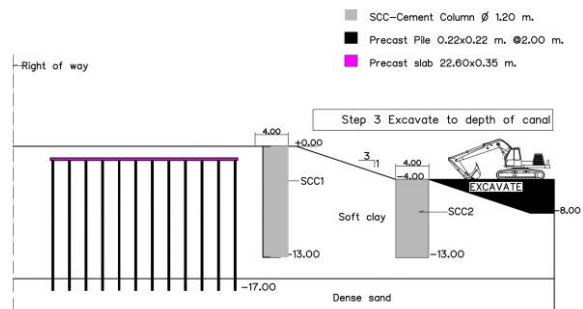
- ขั้นตอนที่ 1 (รูปที่ 3a): ปรับปรุงดินชั้นบนโดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ชุดแรก SCC1 พร้อมกับตอกเสาเข็มแบบปรับแรง (Bearing Unit) เพื่อรองรับโครงสร้างในระยะยาว
- ขั้นตอนที่ 2 (รูปที่ 3b): ขุดดินลงถึงระดับ -4.00 เมตร เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ชุดที่สอง SCC2
- ขั้นตอนที่ 3 (รูปที่ 3c): ติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ SCC2 และขุดดินเพิ่มเติมจนถึงระดับท้องคลองที่กำหนด
- ขั้นตอนที่ 4 (รูปที่ 3d): ถมดินและบดอัดแน่นบริเวณคันคลอง เพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการก่อสร้างถนนคันคลอง



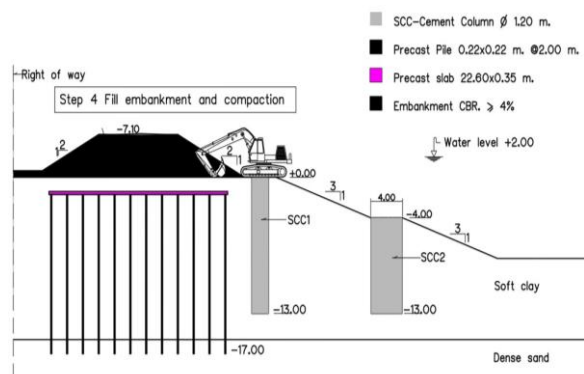
(a) ขั้นตอนที่ 1 ปรับปรุงดินโดยทำ SCC1 และตอกเสาเข็ม Bearing unit



(b) ขั้นตอนที่ 2 ขุดดินจนถึงระดับ -4.00 เพื่อก่อสร้าง SCC2



(c) ขั้นตอนที่ 3 ปรับปรุงโดยทำดิน SCC2 และ ขุดดินจนถึงระดับท้องคลอง



(d) ขั้นตอนที่ 4 ถมดินและบดอัดแน่นเพื่อก่อสร้าง ถนนคันคลอง

รูปที่ 3 ขั้นตอนการก่อสร้างถนนคันคลองในโครงการศึกษา

2.3 การกำหนดขั้นตอนวิเคราะห์ในแบบจำลอง

การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดคันดินในโครงการนี้ ดำเนินการโดยการเสริมกำลังโครงสร้างดินด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เสาเข็มดินซีเมนต์, เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงขนาด 0.22 x 0.22 เมตร และฐานรับน้ำหนัก (Pile cap) ซึ่งทำหน้าที่ยึดเรียงเสาเข็มให้ทำงานร่วมกันเป็นเสาเข็มกลุ่ม (Pile group) ในการถ่ายน้ำหนักจากถนนผ่านคันทางลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง ในการวิเคราะห์กำหนดเสาเข็ม 0.22 x 0.22 เมตร เป็นแบบจำลองแบบ Embedded beam ใช้ค่าคุณสมบัติกำลังของวัสดุคอนกรีต กรณีเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.20 เมตร ได้รับการติดตั้งในรูปแบบปูพรมตลอดแนวลาดคัน เพื่อเสริมความมั่นคงและป้องกันการพังทลายของ

เชิงลาด ในการจำลองปัญหา กำหนดเสาเข็มดินซีเมนต์การกระทำในสภาวะ 2 มิติ (Plane strain) เนื่องจากเสาเข็มมีระยะห่างน้อยหรือแทบจะต่อเนื่องกัน

ขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการกำหนดแรงดันเริ่มต้นของชั้นดินภายใต้เงื่อนไขแรงดันดินในสภาวะหยุดนิ่ง (At-rest earth pressure) เพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการวิเคราะห์ จากนั้นทำการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ชุดที่ 1 (SCC1) และเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Bearing unit) พร้อมพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจากเครื่องจักรก่อสร้าง ต่อมาขุดดินลงถึงระดับ -4.00 เมตร และก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ชุดที่ 2 (SCC2) พร้อมใส่น้ำหนักบรรทุกจากเครื่องจักร จากนั้นขุดดินต่อเนื่องจนถึงระดับกันคลองที่ประมาณ -8.00 เมตร เพื่อให้การก่อสร้างคลองระบายน้ำสมบูรณ์ และพิจารณาน้ำหนักจากเครื่องจักรในชั้นตอนนี้ต่อไปทำการถมดินและบดอัดเพื่อสร้างคันถนนเหนือคลอง พร้อมทั้งพิจารณาแรงกระทำจากน้ำหนักจากรถ สุดท้ายทำการวิเคราะห์เพื่อคำนวณแฟคเตอร์ความปลอดภัยโดยรวม (Global factor of safety) ภายใต้สภาวะใช้งานจริง (Service condition)

2.4 ข้อจำกัดของแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองขุดดินลึก ใช้แบบจำลอง 2 มิติ โดยกำหนดลักษณะของปัญหาเป็นแบบ ระนาบความเครียด (Plane strain) ซึ่งจะต้องมีการแปลงพารามิเตอร์ในสามมิติ ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ในสองมิติ ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, ค่าโมดูลัสเฉือน สำหรับกรณีที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน (Anisotropic) ต้องคำนึงถึงลักษณะของการเสียรูป (Deformation) และ การกระจายแรงในทิศทางที่ถูกตัดออก (Out of plane direction) ซึ่งแบบจำลอง 2 มิติ จะสมมุติว่าโครงสร้างมีความยาวต่อเนื่องในทิศทางแกน Z-axis แบบไม่สิ้นสุด เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับสภาพจริง

การจำลองโครงสร้างโดยใช้ Plate element หรือ Embedded beam ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่มี ความหนา (Zero-thickness element) การกำหนดน้ำหนัก ควรพิจารณาโดยให้น้ำหนักของโครงสร้าง เท่ากับความแตกต่าง ระหว่างน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตกับน้ำหนักของดินที่โครงสร้างนั้นแทนที่อยู่ เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง แม้ว่าการจำลองปัญหาในการศึกษานี้ไม่ได้ลดทอนค่าหน่วยน้ำหนักจากการมีอยู่ร่วมกันของ Embedded beam Element และ Volume Element แต่อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวจะมีผลกระทบหลักต่อค่าการเคลื่อนตัวในระหว่างก่อสร้างเล็กน้อย และยังมีผลต่อค่าการวิเคราะห์เสถียรภาพอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ

2.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองมอร์-คูลอมป์

แบบจำลองมอร์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb Model, MCM) เป็นแบบจำลองพฤติกรรมของดินที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคเนื่องจากมีความเรียบง่ายและใช้พารามิเตอร์ที่สามารถหาได้จาก การทดสอบทางห้องปฏิบัติการหรือสนามโดยทั่วไป โดยมี

ค่าพารามิเตอร์หลัก 4 ตัว ได้แก่ ความหนาแน่น (Density, γ) ความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) มุมภายในของเม็ดดิน (Angle of internal friction, ϕ) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) และ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) โดยพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ ในแบบจำลองใช้วิธีเทียบค่าจากผลการทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ การใช้สมการเชิงประจักษ์ (Empirical formula) รวมทั้งการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

3. กรณีศึกษา

เนื่องจากโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำในการศึกษานี้จัดเป็นโครงการขนาดใหญ่ ซึ่งมีความหลากหลายของสภาพพื้นที่และชั้นดินในแต่ละช่วง ส่งผลให้รูปแบบการออกแบบโครงสร้างและการเสริมกำลังดินต้องปรับให้เหมาะสมกับแต่ละบริบท ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้กำหนดรูปแบบลาดคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column) จำนวน 2 รูปแบบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 เพื่อให้สามารถครอบคลุมและเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของทั้งโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ พารามิเตอร์วัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 และ รูปแบบกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4

3.1 ลาดคันดินเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 1

รูปแบบนี้เป็นการจำลองลาดคันดินที่เสริมกำลังโดยการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column) บริเวณขานพัก (Berm) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพโดยลดการเคลื่อนตัวและเพิ่มแรงต้านต่อการพังทลาย โครงสร้างดังกล่าวเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อนต่อเนื่องในแนวนอน นอกจากนี้ ยังมีการใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงแบบ Bearing Unit ร่วมด้วย โดยทำหน้าที่รับน้ำหนักจากถนนด้านบนและถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่า ซึ่งช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนและเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้างโดยรวม

3.2 ลาดคันดินเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 2

รูปแบบนี้เป็นการจำลองลาดคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งบริเวณขานพักและลาดคันดิน (Slope) เพื่อเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้างในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลายหรือการเคลื่อนตัวสูง การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณลาดคันดินยังช่วยเพิ่มแรงต้านทานต่อแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักถมและแรงกระทำภายนอกอื่น ๆ ทำให้โครงสร้างคันดินมีความมั่นคงมากขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลายหรือการเคลื่อนตัวสูง นอกจากนี้ ยังคงใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงชนิด Bearing Unit เพื่อรองรับน้ำหนักจากถนนด้านบนและถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่า ช่วยลดการทรุดตัวและเพิ่มเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้างคันดิน

ตารางที่ 1 แนวทางการหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb

Material properties	ดินเม็ดหยาบ (Coarse-grained soil)	ดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soil)	ดินซีเมนต์ (Soil Cement)
Material behaviour	Drained	Undrained	Undrained
Unit weight, γ (kN/m ³)	ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ทดสอบในห้องปฏิบัติการ
Cohesion, C (kPa)	$c' = 0$	สำหรับดินอ่อน (Soft clay) ทดสอบโบริมเดียน (VST) ทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC), $c_u = \frac{q_u}{2}$ $c_u = 6.67N_{60}$ (Terzaghi and peck, 1967)	ทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC), $c_u = \frac{q_u}{2}$
Friction angle, ϕ (degree)	$\phi' = \sqrt{20(N_1)_{60}} + 20$ (Hatanaka and Uchida, 1996)	$\phi = 0$	$\phi = 0$
Elastic modulus, E	$E' = 7\sqrt{N_{60}}$ (Denver, 1982)	$\frac{E_u}{S_u} = \text{Factor}$ โดย Factor ขึ้นกับความเครียดที่เกิดขึ้น ในดิน (วันชัย และ ณรงค์, 2549)	E_{50} จากทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UC)
Poisson's ratio, ν	งานวิจัย (Bowles, J.E., 1996)	งานวิจัย (Bowles, J.E., 1996)	งานวิจัย (Jamsawang et al., 2015)

N_{60} คือ ค่าของการทดสอบกระบอกทะลวงมาตรฐาน (SPT-N Value) ที่ประสิทธิภาพพลังงานตกกระทบ มาตรฐานเท่ากับ 60 %

$(N_1)_{60}$ คือ ค่าปรับแก้ N_{60} ให้เป็นค่ามาตรฐานที่ความดันบรรยากาศ P_a

ตารางที่ 2 สมบัติดินและพารามิเตอร์ดินสำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb

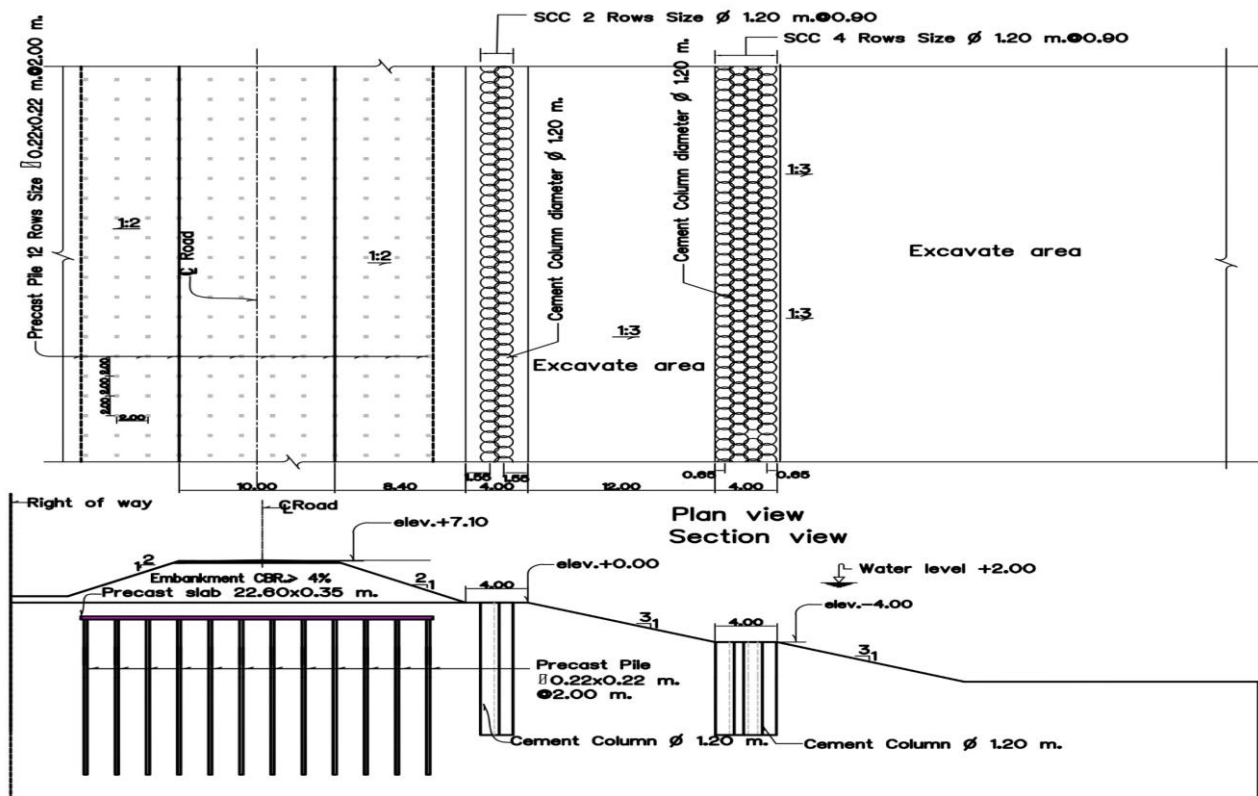
Material properties	Embankment	Soil-cement	Soft clay	Stiff clay	Dense sand
Unit weight, γ (kN/m ³)	20	17	16	19	20
Elastic modulus, E (kPa)	30,000	60,000	3,200	100,000	40,000
Poisson's ratio, ν	0.30	0.25	0.35	0.30	0.30
Cohesion, c (kPa)	10	300	15	150	0
Friction angle, ϕ (degree)	30	0	0	0	35
Material behaviour	Drained	Undrained type C	Undrained type C	Undrained type C	Drained

ตารางที่ 3 สมบัติโครงสร้างและพารามิเตอร์วัสดุ

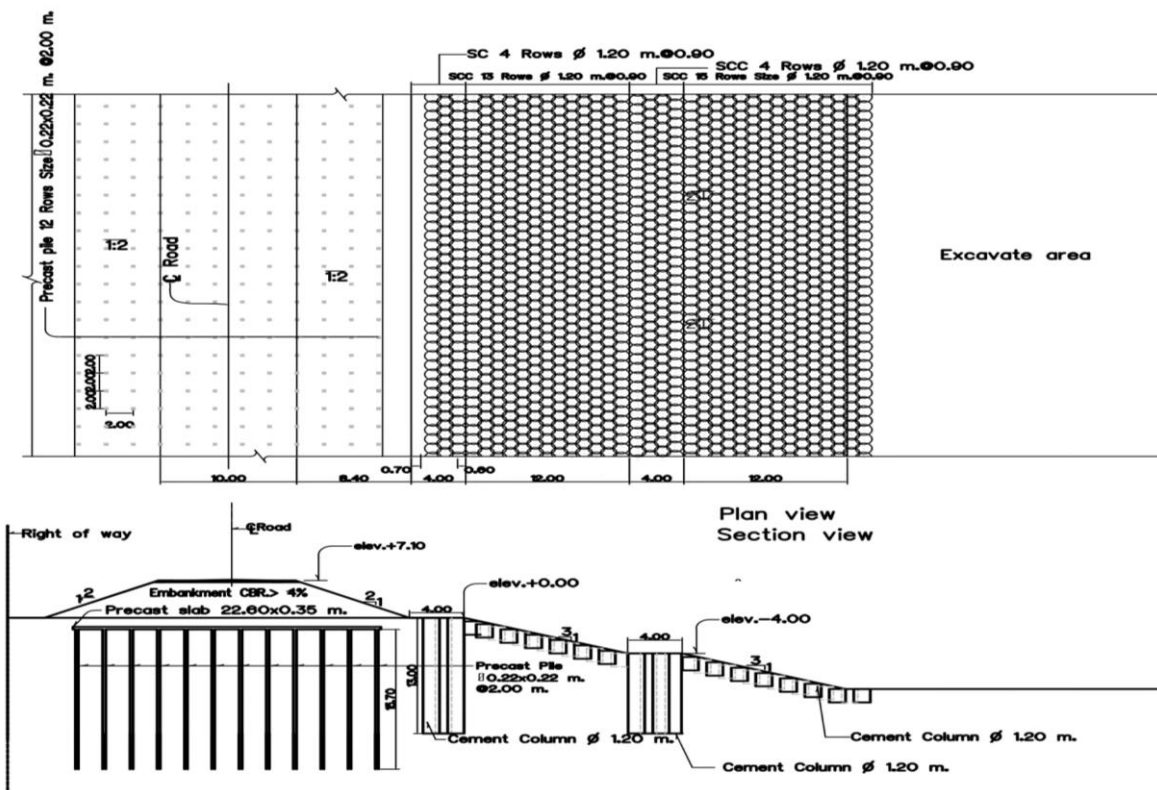
Material properties	Pile 0.22 x 0.22 m.	Pile Cap
Unit weight, γ (kN/m ³)	8.00	8.00
Elastic modulus, $E = 33w_c^{1.5}\sqrt{fc'}$ (psi)	4,269,987	4,269,987
Area, A (m ²)	0.048	0.400
Moment inertia, I (m ⁴)	0.0002	0.0053
Axial skin resistance, T (kN/m)	198.00	-
Base resistance, F (kN)	6.50	-
Element type	Embedded beam	Plate

ตารางที่ 4 รูปแบบกรณีศึกษา

รูปแบบ	ความหนาชั้นดินอ่อน (เมตร)	ปริมาณดินซีเมนต์ (ลบ.ม.)	ระดับ ความลึกเสาเข็มดินซีเมนต์ (เมตร)	ระดับ ความลึกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (เมตร)
ลาดคันดินเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 1	16.00	82.80	-13.00	-17.00
ลาดคันดินเสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 2	16.00	108.80	-13.00	-17.00



รูปที่ 4 ลาดคันดินที่เสริมกำลังโดยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5 ลาดคันดินที่เสริมกำลังโดยเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 2

4. ผลการศึกษา

จากตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุด (Maximum horizontal displacement: MHD) หลังการก่อสร้างและแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Factor of safety: FS) ของลาดคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองรูปแบบ พบว่า

รูปแบบที่ 1: มีค่า FS = 1.240 และ MHD = 0.490 เมตร

รูปแบบที่ 2: มีค่า FS = 1.326 และ MHD = 0.239 เมตร

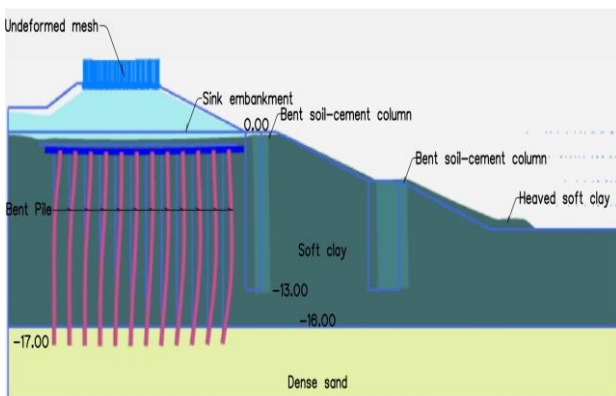
ตารางที่ 5 การเคลื่อนตัวในแนวราบหลังการก่อสร้างและแฟกเตอร์ความปลอดภัยของแบบจำลอง

No.	Model	FS.	MHD (m.)
1.	ลาดคันดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 1	1.240	0.490
2.	ลาดคันดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 2	1.326	0.239

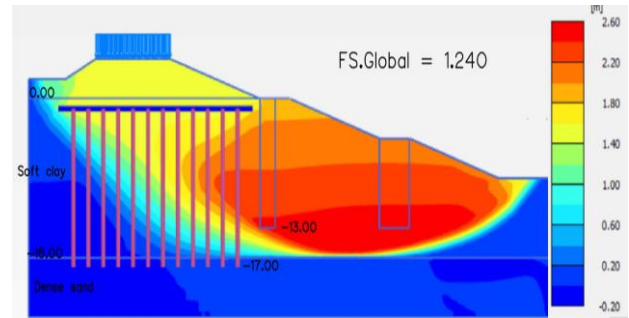
หมายเหตุ: MHD คือ Maximum Horizontal Displacement, FS คือ Factor of Safety

จากผลการศึกษาแบบจำลองลาดคันดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ทั้ง 2 รูปแบบพบว่าพฤติกรรมการเสียรูปการเสียรูป และการพังทลายแบบวงกลม มีลักษณะเช่นเดียวกัน การเพิ่มเสาเข็มดินซีเมนต์จะสามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงสร้าง และลดจำนวนจุดพลาสติกเฉือน (Shear plastic point) ได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ได้ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

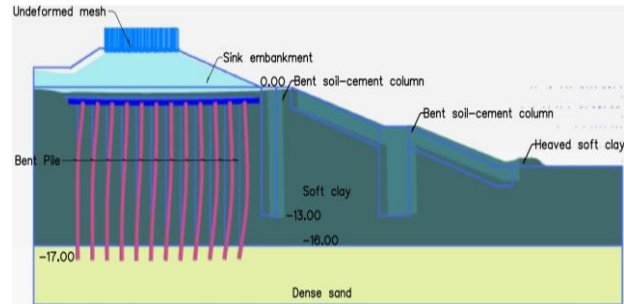
รูปที่ 6 และ รูปที่ 8 แสดงลักษณะการวิบัติของโครงสร้างคันดินเกิดการทรุดตัว เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เสาเข็มดินซีเมนต์ มีลักษณะโค้งงอและเกิดการปูดขึ้น (Heave) ของดินบริเวณด้านฝังดินสุด สำหรับรูปที่ 7 และ รูปที่ 9 แสดงผลการเคลื่อนตัวในแนวราบ ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย ของ ลาดคันดินเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 2 แนวระนาบวิบัติเริ่มต้นจากคันดินถม เคลื่อนที่ในแนวราบไปสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบการพังทลายแบบวงกลม (circular failure) โดยมีจุดลึกสุดประมาณ 16 เมตร เหนือชั้นดินเหนียวแข็งซึ่งหมายความว่า รูปแบบการพังทลายของความลาดคันดินส่วนใหญ่อยู่ภายในชั้นดินเหนียวอ่อน



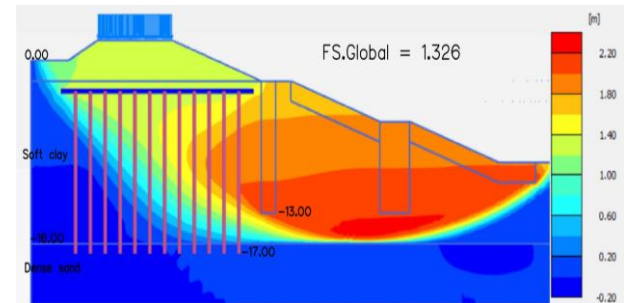
รูปที่ 6 ผลการจำลองการเสียรูป (Deformed mesh) รูปแบบที่ 1



รูปที่ 7 ผลการจำลองค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS_{global}) รูปแบบที่ 1



รูปที่ 8 ผลการจำลองการเสียรูป (Deformed mesh) รูปแบบที่ 2



รูปที่ 9 ผลการจำลองค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (FS_{global}) รูปแบบที่ 2

5. บทสรุป

การปรับปรุงดินอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และการใช้เสาเข็มรองรับถนนแบบ Bearing Unit ถูกนำมาใช้ในโครงการขุดคลองระบายน้ำบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

จากการศึกษารูปแบบการเสริมกำลังคันดินบนชั้นดินเหนียวอ่อน 2 รูปแบบ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันดินพบว่า การเพิ่มปริมาณเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้น สามารถลดการเคลื่อนตัวในแนวราบ และ ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ระนาบวิบัติ (Slip surface) เกิดขึ้นเหนือชั้นดินแข็ง ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย ลดการหลุดตัวของดิน ลดการเคลื่อนตัวในแนวราบ ส่งผลให้โครงสร้างคันดินมีเสถียรภาพมากขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพดิน โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณลาดคันดินส่งผลให้ แรงยึดเหนี่ยวภายในดิน และกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงชนิด Bearing Unit เพื่อรองรับน้ำหนักจากถนนด้านบนและถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่า ช่วยลดการทรุดตัวและเพิ่มเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้างคันดิน ดังนั้น การ

ใช้โครงสร้างรูปแบบนี้ มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน ของงานชุดคลองระบายน้ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทาง วิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสัณฐานศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Pintusorachai, P., Tanapalungkorn, W. and Likitlersuang, S. (2024). Enhancing 3D geological and geotechnical engineering model of Bangkok subsoil using optimal deep neural network models. *Environmental Earth Sciences* 83, 64.

[2] Abusharar, SW., Zheng, JJ. and Chen, BG. (2009). Finite element modeling of the consolidation behavior of multi-column supported road embankment. *Computers and Geotech*, 2009;36(4):676–85

[3] Jamsawang, P., Voottipruex, P., Boathong, P., Mairaing, W. and Horpibulsuk, S. (2015). Three dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows. *Eng Geol*, 92015;188:159–67.

[4] Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit.,P., Voottipruex, and P, Jongpradist. (2016). Three-dimensional Numerical Analysis of a DCM Column-supported Highway Embankment. *Computers and Geotechnics*, 72, pp.42–56.

[5] Prakash, K.G. and Krishnamoorthy, A. (2023) Stability of Embankment Constructed on Soft Soil Treated with Soil-Cement Columns. *Transp. Infrastruct. Geotech*, 10, pp.595–615.

[6] Likitlersuang, S., Pholkainuwatra, P., Chompoorat, T. and Keawsawasvong, S. (2018). Numerical modelling of railway embankments for high-speed train constructed on soft soil. *Journal of GeoEngineering*, 13(3), pp.149-159.

[7] Huang, Z., Ziotopoulou, K., and Filz, G. M. (2019). 3D Numerical Limiting Case Analyses of Lateral Spreading in a Column-Supported Embankment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11), 04019096.

[8] Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh. E. and Balasubramaniam, A.S. (2013). Finite Element Analysis of a Deep Excavation: A Case Study from the Bangkok MRT. *Soils and Foundations*, 53(5), pp.756 – 773.

[9] พัลลภ วิสุทธ์เมธานุกูล (2020). *คู่มือวิศวกรรมฐานราก*. บริษัท ซีเ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), หน้า 589-627

[10] พนส โอภากุลวงษ์, ศลิษา ไชยพุทธ และ ธนาตล คงสมบูรณ์ (2564). การศึกษารูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมกำลังกำแพงเข็มพืดโดยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*, การประชุมรูปแบบออนไลน์, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า GTE-13

[11] Likitlersuang, S., Chheng, C., Surarak, C. and Balasubramaniam, A.S. (2018). Strength and Stiffness Parameters of Bangkok Clays for Finite Element Analysis. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 49(2), pp.150 – 156.

[12] Likitlersuang, S., Chheng, C. and Keawsawasvong, S. (2019). Structural modelling in finite element analysis of deep excavation. *Journal of GeoEngineering*, 14(3), pp.121-128.

[13] Mase, L.Z., Tanapalungkorn, W., Plengsiri, P., Ngamcharoen, K., and Likitlersuang, S. (2023). Subsoil Variability in the Bangkok Metropolitan Area of Thailand Identified through Ambient Noise Measurement. *Indonesian Journal on Geoscience*, 10(1), pp.1-11.

[14] Roeun, D., Sukkarak, R. and Likitlersuang, S. (2024). Influences of Subsoil Modelling on Underground Deep Excavation Behaviour in Phnom Penh City, Cambodia. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10, 27.

[15] Muenpetch, N., Keawsawasvong, S., Komolvilas V. and Likitlersuang, S. (2024). Numerical investigation on impact of excavations in influence zone of existing MRT tunnels. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(3), pp.199–218.