

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF STIFFENED DEEP CEMENT MIXING COLUMN-SUPPORTED EMBANKMENT

ศศิทิพย์ แสนบุญศิริ¹, ชนา พุทธนานนท์^{1*} และ พรเกษม จงประดิษฐ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: chana.put13@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงความเค้นของคันทางบนดินอ่อนรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับต้นทุนการก่อสร้างของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ งานศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขบนพื้นฐานของแบบจำลองสามมิติสมมาตรเพื่อตรวจสอบตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของคันทาง ซึ่งทำการศึกษาเสาเข็มดินซีเมนต์สามประเภท คือเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีต และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ โดยควบคุมราคาการก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตให้เท่ากัน และใช้ขนาดแกนไม้เท่ากับแกนคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตสามารถลดการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง และการทรุดตัวที่แตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ แต่เมื่อเปรียบเทียบการใช้แกนคอนกรีตกับแกนไม้พบว่าสมรรถนะของคันทางแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แกนไม้ให้ราคาก่อสร้างที่ถูกกว่ามาก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของคันทางในด้านต่าง ๆ กับต้นทุนค่าก่อสร้างพบว่า ต้นทุนค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเสาเข็มได้ในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อถึงจุดหนึ่ง การเพิ่มต้นทุนค่าก่อสร้างไม่มีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเสาเข็มในการรองรับคันทาง

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความคุ้มค่า, เสาเข็มดินซีเมนต์, เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

Abstract

This article aims to study the behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) columns under embankment loads over soft soil. The performance and construction cost of embankments supported by SDCM columns were compared with that supported by conventional deep cement mixing (DCM) columns. A three-dimensional symmetry finite element (3D-symmetry FE) was performed to study the performance of column-embankment system. There are three types of columns in this study, consisting of DCM, concrete-core SDCM, and wooden-core SDCM columns. The DCM and SDCM columns were investigated based on condition of equality in construction cost. The use of wooden core was compared with concrete core based on the similarity in dimensions. Regarding the performance of DCM and SDCM column-supported embankments, the results imply that the SDCM column has a higher efficiency for improving the performances of embankment over soft soil in terms of total settlement, lateral movement, and differential settlement. Furthermore, the wooden core-SDCM column exhibits insignificantly different performances when compared with concrete core. In addition, a higher stiffness of inner core can induce greater bending moment. When performing the relation between the construction cost and performances of embankments supported by DCM and SDCM columns, the column performances were greatly enhanced when construction costs increased up to a certain level.

Keywords: Cost-effectiveness analysis, Deep cement mixing column, Stiffened deep cement mixing column

1. คำนำ

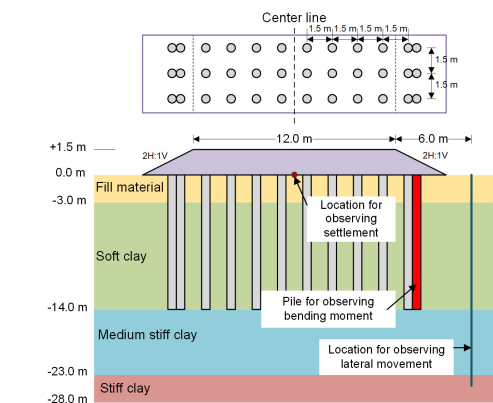
ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ (Deep cement mixing หรือ DCM column) มักถูกใช้ในการรองรับคันทางและสิ่งก่อสร้างที่มีน้ำหนักไม่มากนักบนชั้นดินเหนียวอ่อน [1] เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์มีราคาถูกและใช้เวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าการปรับปรุงคุณภาพดินวิธีอื่น [2],[3] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและลดการทรุดตัว

ตัวโดยรวมที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักคันทาง รวมทั้งลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเข็มและดินโดยรอบที่อาจเกิดขึ้นในช่วงการก่อสร้างและในช่วงการใช้งาน [4],[5] ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มากขึ้น รวมทั้งเพิ่มกำลังการรับโมเมนต์ดัด ซึ่งทำได้โดยการเสริมแกนกลางภายในเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ และเรียกว่า เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (Stiffened deep cement mixing หรือ SDCM column) ซึ่ง

แกนเสริมนี้มีหน้าที่หลักในการรับน้ำหนักบรรทุกของสิ่งก่อสร้างเหนือเสาเข็มและถ่ายแรงสู่ดินซีเมนต์และดินรอบข้างตามลำดับ ด้วยแรงเสียดทานระหว่างผิวแกนเสริมกับเสาเข็มดินซีเมนต์ และเสาเข็มดินซีเมนต์กับดิน [6] ทำให้เสาเข็มสามารถรับแรงในแนวแกนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถรองรับโมเมนต์ดัดและเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างได้มากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ

โดยปกติแล้ว เสาคอนกรีตและเสาเหล็กมักถูกใช้เป็นแกนเสริมสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนทั้งในงานชุดและงานถม [7],[8] เนื่องจากมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่อย่างไรก็ตามสำหรับงานทางนั้นการใช้แกนเสาคอนกรีตหรือเสาเหล็กอาจมีความแข็งแรงมากเกินไปความต้องการสำหรับสิ่งก่อสร้างที่มีน้ำหนักไม่มากนัก อีกทั้งเสาเข็มทั้ง 2 ชนิดนี้ยังมีราคาที่สูงด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำไม้อุคาลิปตัสที่มีความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่มากนักมาใช้เป็นแกนเสริม ซึ่งมีราคาต่ำกว่าแกนเสาคอนกรีตและแกนเสาเหล็กและยังสามารถหาได้ง่ายเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงได้ [3],[8] มากไปกว่านั้น จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้อุคาลิปตัสยังคงให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการใช้เสาคอนกรีตและเสาเหล็กเป็นแกนเสริมในช่วงการใช้งานจริงสำหรับการรองรับน้ำหนักตามแนวแกน [3],[8] อย่างไรก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ดินซีเมนต์เสริมแกนไม่มีความสามารถเพียงพอในการต่อการรองรับคันทางบนชั้นดินอ่อน ซึ่งโดยทั่วไปหากต้องการเพิ่มสมรรถนะของคันทางจะต้องใช้ต้นทุนในการก่อสร้างสูงขึ้น หากพิจารณาทั้งต้นทุนการก่อสร้างและสมรรถนะของคันทางควบคู่กันไปจะสามารถออกแบบระบบเสาเข็มดินซีเมนต์รองรับคันทางที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ในราคาค่าก่อสร้างที่เหมาะสมได้

การศึกษานี้ดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้และแกนคอนกรีต โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (โปรแกรม PLAXIS 3D) เพื่อทำการศึกษาคาร์ทรุดตัวรวมการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเข็มและดินโดยรอบ การเคลื่อนตัวด้านข้าง และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มโดยควบคุมราคาก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติให้เท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 1 ชั้นดินและลักษณะทางกายภาพของคันทาง [9]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดินฮาร์ดดินหนึ่ง [10]

พารามิเตอร์	ดินเหนียวอ่อน ^{[11][15]}	ดินเหนียวแข็งปานกลาง	ดินเหนียวแข็งมาก ^[9]
γ (kN/m ³)	15	15	15
E_{50}^{ref} (kPa)	1,200	4,000	50,000
E_{oed}^{ref} (kPa)	1,200	4,000	50,000
E_{ur}^{ref} (kPa)	4,000	12,000	150,000
ν_{ur}	0.35	0.35	0.2
m	1	1	1
c' (kPa)	2	10	18
ϕ (degree)	22	22	25
OCR	1.1	1.5	2.2
k_z (m/day)	0.1X10 ⁻³	0.05X10 ⁻³	0.25X10 ⁻³
$k_x = k_y$ (m/day)	0.2X10 ⁻³	0.1X10 ⁻³	0.25X10 ⁻³
พฤติกรรมของวัสดุ	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)

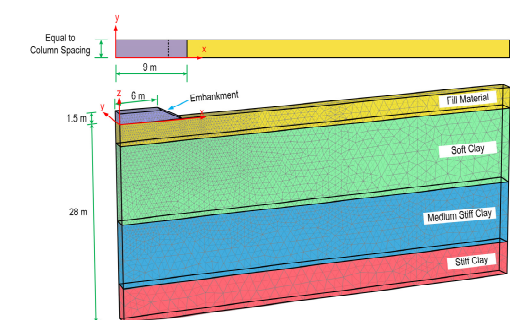
เสริมแกนคอนกรีต และใช้ขนาดแกนเสริมของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้เท่ากับแกนคอนกรีต นอกจากนี้ยังทำการศึกษารเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของเสาเข็มกับราคาก่อสร้าง เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการออกแบบคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (3D-FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D จำลองคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนแบบสมมาตร เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทรุดตัวเนื่องจากการน้ำหนักคันทางตามเวลาหลังจากการก่อสร้าง 130 วัน โดยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการสอบเทียบผลการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างกับผลตรวจวัดในสนาม ซึ่งเป็นคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ตั้งอยู่บนทางหลวงหมายเลข 3117 กิโลเมตรที่ 6+055 ถนนบางป่อ-คลองด่าน จังหวัดสมุทรปราการ [9]

2.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ชั้นดินเดิมรองรับคันทางประกอบด้วยดินถมหนา 3 เมตร ชั้น



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคันทาง

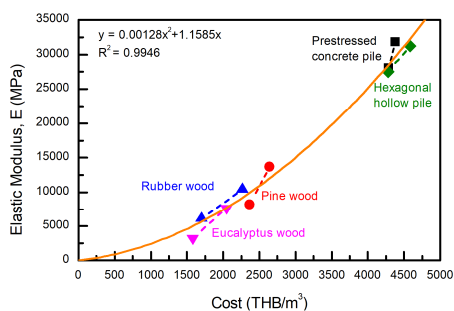
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดินมอร์-คูลอมป์

พารามิเตอร์	คันทาง ^[9]	ดินถม	เสาเข็มดินซีเมนต์
γ (kN/m ³)	20	20	15
E' (kPa)	20,000	30,000	21,000 ($70q_u$)
ν'	0.33	0.33	0.33
c' (kPa)	10	1	150 ($q_u/2$)
ϕ' (degree)	32	32	0
k_z (m/day)	-	-	0.1X10 ⁻³
$k_x = k_y$ (m/day)	-	-	0.2X10 ⁻³
พฤติกรรมของวัสดุ	Drained	Drained	Undrained (B)

ดินเหนียวอ่อนหนา 11 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 9 เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งหนา 5 เมตร ตามลำดับ โดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก 1.5 เมตร จากผิวดิน คันทางมีความสูง 1.5 เมตร ความกว้าง 12 เมตร มีความลาดเอียงด้านข้างในอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งต่อนอนเท่ากับ 1 ต่อ 2 ดังแสดงในรูปที่ 1 เสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ความยาว 14 เมตร ถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการก่อสร้างคันทางซึ่งมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 1.5 เมตร และนอกจากนี้ยังมีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติเพิ่มอีกหนึ่งต้นที่บริเวณริมคันทาง เพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้าง โดยวัดค่าการทรุดตัวตามเวลาบริเวณกึ่งกลางของคันทาง และวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างห่างจากขอบคันทาง 3 เมตร

ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนรองรับคันทางจำลองตามขั้นตอนการก่อสร้างจริงในสนาม เริ่มจากก่อสร้างเสาเข็ม จากนั้นถมคันทางสูง 0.5 เมตร ใช้เวลา 10 วัน ต่อมาถมดินเพิ่ม 0.3 เมตร ใช้เวลา 30 วัน จากนั้นถมดินอีก 0.4 เมตร ใช้เวลา 30 วัน และใช้เวลาอีก 35 วัน ถมดินจนคันทางมีความสูง 1.5 เมตร [9] โดยในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มจะทำการวิเคราะห์แบบพลาสติก (Plastic Analysis) หลังจากนั้นในขั้นตอนของการก่อสร้างคันทางจะทำการวิเคราะห์แบบการทรุดตัวคายน้ำ (Consolidation Analysis)

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของคันทางเป็นแบบสมมาตรบริเวณกึ่งกลางของคันทาง และมีความหนาเท่ากับระยะห่างระหว่างเสาเข็มในทิศทาง Y ดังแสดงในรูปที่ 2 มีความลึกของชั้นดิน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของราคาและโมดูลัสของแกนเสริม

เท่ากับ 28 เมตร โดยที่ความยาวในแกน X เท่ากับ 60 เมตร เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองมีความยาวเพียงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของคันทาง และกำหนดให้น้ำสามารถระบายออกที่ผิวดินได้ทิศทางเดียว เนื่องจากเป็นการจำลองแบบสมมาตรและได้ชั้นดินเหนียวแข็งที่มีความตึบน้ำสูง

2.2. พารามิเตอร์ดินและเสาเข็ม

พฤติกรรมของชั้นดินเหนียวอ่อน ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง และชั้นดินเหนียวแข็งมากจำลองโดยใช้แบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง ส่วนชั้นดินถม คันทาง และเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองพฤติกรรมโดยใช้มอร์-คูลอมป์ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งผ่านการสอบเทียบความถูกต้องของพารามิเตอร์โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองและผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ Phutthananon และคณะ [10]

2.3. ราคาค่าก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ราคาค่าก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อความยาวของคันทาง 1 กิโลเมตรถูกใช้เป็นตัวแทนราคาค่าก่อสร้างสำหรับการศึกษารุ่นนี้ เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละชนิด และสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคิดราคาของดินซีเมนต์โดยใช้ราคาของเสาเข็มดินซีเมนต์รวมกับราคาของแกน

2.3.1. ราคาเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ

ราคาต้นทุนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติต่อต้นคำนวณจากสมการที่ได้นำเสนอโดย Phutthananon และคณะ [12] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$C_p = P_p V_{pile} + P_c C_c \quad (1)$$

โดยที่ C_p คือราคาเสาเข็มต่อต้น P_p คือราคาต่อหน่วยของการก่อสร้างเสาเข็ม (1,000 THB/m³) V_{pile} คือปริมาตรของเสาเข็ม P_c คือราคาต่อหน่วยของปูนซีเมนต์ (2 THB/kg) และ C_c คือปริมาณของปูนซีเมนต์ โดยสามารถคำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ได้ดังสมการที่ (2)

$$C_c = \left(\frac{1000w_0 \gamma_{dry} V_{pile}}{9.81} \right) \times \left(\frac{\log(1.24)}{\log(1739/q_u)} \right) \quad (2)$$

ซึ่งค่าความชื้นของดินตามธรรมชาติหรือ w_0 เท่ากับ 80% และหน่วยน้ำหนักแห้งหรือ γ_{dry} เท่ากับ 7.73 kN/m³ สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ [11]

2.3.2. ราคาเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

ราคาของแกนเสริมจะแปรผันตามความแข็งแรงของแกน โดยวัสดุที่ใช้ทำแกนเสริมคือเสาเข็มไม้ และเสาเข็มคอนกรีตดัดรูปที่ 3 ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างราคาและโมดูลัสของวัสดุได้ดังแสดงในสมการที่ (3)

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และราคาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

พารามิเตอร์	w-SDCSE		c-SDCSE	
	เสาเข็มดินซีเมนต์	แกนไม้ยูคา ลิปัดส์ ^[3]	เสาเข็มดินซีเมนต์	แกนเสาคอนกรีต ^[3]
D (m)	0.5	0.18	0.5	0.18
L (m)	14	10	14	10
ราคา (THB/km)	28,956,350		36,409,855	
γ (kN/m ³)	15	9.5	15	24
E' (MPa)	21	4,000	21	28,000
ν'	0.33	0.25	0.33	0.15
c' (kPa)	150	6,500	150	8,000
ϕ' (degree)	0	30	0	40
k_z (m/day)	0.1×10^{-3}	-	0.1×10^{-3}	-
$k_x = k_y$ (m/day)	0.2×10^{-3}	-	0.2×10^{-3}	-
พฤติกรรมของวัสดุ	Undrained (B)	Non-porous	Undrained (B)	Non-porous

$$C_{core} = \frac{-1.1585 + \sqrt{1.3421 + (5.12 \times 10^{-3})E_{core}}}{2.56 \times 10^{-3}} \quad (3)$$

โดยที่ E_{core} คือค่าโมดูลัสของแกน (MPa) และ C_{core} คือราคาต่อปริมาตรของแกน (THB/m³) และจะสามารถคำนวณราคาต่อตันของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (C_{SDCM}) ได้ดังสมการที่ 4

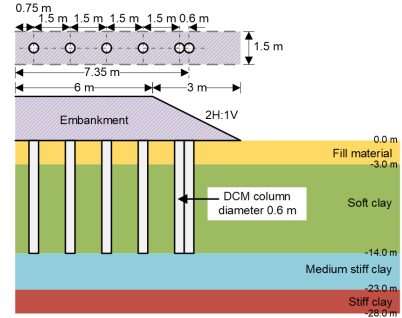
$$C_{SDCM} = C_p + (C_{core} \times V_{core}) \quad (4)$$

โดยที่ V_{core} คือปริมาตรของแกนเสริม (m³)

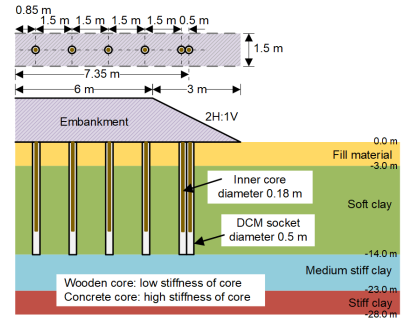
2.4. วิธีการศึกษาอิทธิพลของการเสริมแกนในเสาเข็มดินซีเมนต์

ในการศึกษานี้เปรียบเทียบสมรรถนะของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ (DCSE) และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ (w-SDCSE) และแกนคอนกรีต (c-SDCSE) โดยควบคุมราคาก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตให้เท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติในกรณีต้นแบบ และเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ที่ใช้ขนาดเท่ากับเสาเข็มดินซีเมนต์แกนคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งขนาดและค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 3 และจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนโดยแบบจำลองคินมอร์-คูลมบ์

นอกจากนี้ สำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการก่อสร้างการศึกษานี้ได้ดำเนินการเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างเสาเข็มทั้งกรณีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน กับสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของคันทางรองรับเสาเข็มดินซีเมนต์



(ก) คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ



(ข) คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

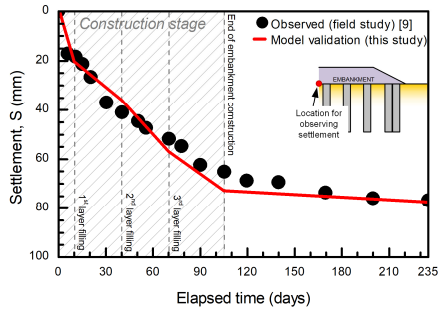
รูปที่ 4 รูปตัดของคันทางสำหรับศึกษาอิทธิพลของการเสริมแกนในเสาเข็มดินซีเมนต์

ประกอบด้วย การทรุดตัวรวมสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของการทรุดตัวคายน้ำ การเคลื่อนตัวด้านข้างบริเวณปลายคันทาง การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มและดินรอบข้าง และอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มต้นแบบ โดยลดจำนวนเสาเข็มต้นแบบเหลือต้นเดียว และกำหนดตำแหน่งให้อยู่ที่กึ่งกลางของลาดด้านข้างคันทาง (7.5 เมตรจากกึ่งกลางคันทาง)

3. การวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างของการคำนวณกับผลตรวจวัดในสนามพบว่า การทรุดตัวที่บริเวณกึ่งกลางของคันทางในช่วงการก่อสร้าง 50 วันแรก มีความใกล้เคียงกันมาก ส่วนการทรุดตัวหลังจากก่อสร้างเสร็จ (105 วันหลังจากเริ่มก่อสร้างคันทาง) ของการตรวจวัดในสนามกับการคำนวณเท่ากับ 66 และ 73 มิลลิเมตร และการทรุดตัวที่ 235 หลังจากเริ่มก่อสร้างเท่ากับ 76 และ 77 มิลลิเมตรตามลำดับ การทรุดตัวหลังจากการก่อสร้างเสร็จจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าค่าจริงที่ตรวจวัดในสนาม 10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นค่าการทรุดตัวระหว่างผลของแบบจำลองและค่าจริงจะเริ่มใกล้เคียงกันมากขึ้น และแตกต่างกันเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ 235 วัน



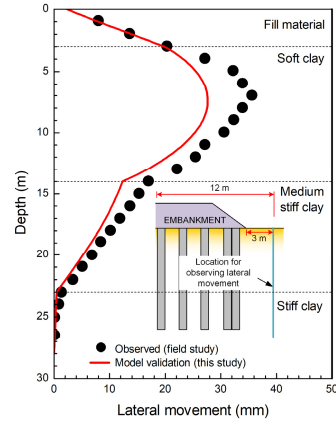
รูปที่ 5 ผลการทรุดตัวที่ตำแหน่งคันทิ้งกลางคันทงตามเวลา ตั้งแต่เริ่มก่อสร้างคันทงของแบบจำลองและการตรวจวัดในสนาม

หลังจากเริ่มก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ระยะ 12 เมตร จากกึ่งกลางคันทง พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนตัวของค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าจริงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่ามากที่สุดที่บริเวณชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งอยู่ลึกประมาณ 7 เมตรจากผิวดิน ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการตรวจวัดในสนามและผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 36 และ 28 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6 ซึ่งความแตกต่างนี้คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์

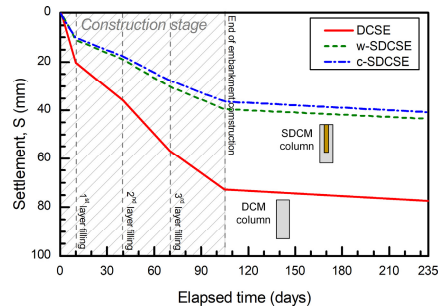
จากที่กล่าวมาข้างต้น ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนามทั้งการทรุดตัวรวมและการเคลื่อนตัวด้านข้าง ทั้งยังมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ [16]-[19] ดังนั้น พารามิเตอร์ของดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ได้

3.2. อิทธิพลของการเสริมแกนในเสาเข็มดินซีเมนต์

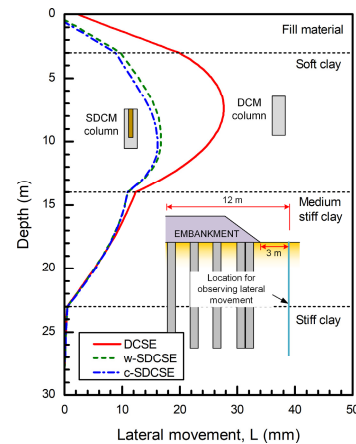
หากพิจารณาราคาค่าก่อสร้างที่เท่ากันของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีต (36.4 ล้านบาทต่อกิโลเมตร) และใช้แกนเสาไม้ขนาดเท่ากับแกนเสาคอนกรีต (29 ล้านบาทต่อกิโลเมตร) พบว่าค่าการทรุดตัวที่ 235 วัน ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ และแกนคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 77.3, 43.61 และ 40.88 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้น การเสริมแกนเสาคอนกรีตในเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถลดการทรุดตัวของคันทงได้มากถึง 47 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับคันทงที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Voottipruex และคณะ [1] แต่หากเปลี่ยนวัสดุแกนเสริมจากเสาคอนกรีตเป็นเสาเข็มไม้จะทำให้การทรุดตัวเพิ่มขึ้นจากแกนคอนกรีตเพียง 7 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ในขณะที่ราคาค่าก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าน้อยกว่าถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีต รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 3 กรณี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.64, 16.73 และ 16.14 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า การเสริมแกนคอนกรีตในเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถลดการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ 42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ แต่การลด



รูปที่ 6 ผลการเคลื่อนตัวด้านข้างตามความลึกของดินที่ตำแหน่ง 12 เมตร จากกึ่งกลางคันทงของแบบจำลองและการตรวจวัดในสนาม

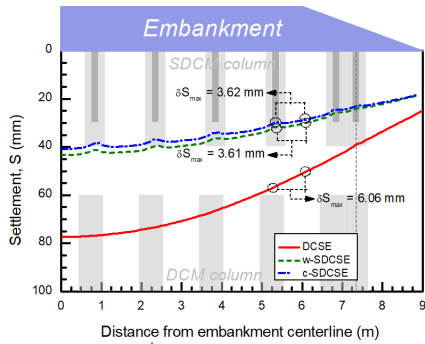


รูปที่ 7 การทรุดตัวตามเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์ปกติ



รูปที่ 8 การเคลื่อนตัวด้านข้างต่อความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์ปกติ

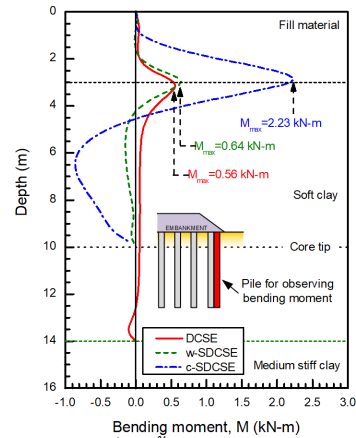
ความแข็งแรงของแกนเสริม (ระหว่างแกนคอนกรีตและแกนไม้) ส่งผลต่อการต้านการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเนื่องจากน้ำหนักคันทงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (คิดเป็น 4 เปอร์เซ็นต์) ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาการทรุดตัวที่แตกต่างกันที่หัวเสาเข็มกับดินโดยรอบของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตและแกนไม้พบว่ามีความใกล้เคียงกันและเกิดขึ้นน้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุดของทั้ง 3 กรณี อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทรุดตัวที่ต่างกันของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์ปกติ

โดยสรุป ทั้งการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง และการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตและแกนไม้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่า การใช้เสาไม้เป็นแกนเสริมในเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติมีประสิทธิภาพเพียงพอในการรองรับคันทาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wonglert และ Jongpradist [3] และ Wonglert และคณะ [8]

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในแกนคอนกรีตและแกนไม้ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.23 และ 0.64 กิโลนิวตันเมตร ตามลำดับ ซึ่งแกนคอนกรีตเกิดโมเมนต์ดัดมากกว่าถึง 71 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแกนไม้ เนื่องจากความแข็งแรงของแกนที่มากกว่า สามารถชักนำให้โมเมนต์ดัดเกิดขึ้นภายในแกนได้มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดของแกนคอนกรีตและแกนไม้ พบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดของแกนไม้ (เท่ากับ 5.89) มีค่ามากกว่าแกนคอนกรีต (เท่ากับ 2.43) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติพบว่าเกิดโมเมนต์ดัดใกล้เคียงกับแกนไม้ แต่มีอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดเท่ากับ 3.86 ซึ่งน้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติมีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดสูงสุดน้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ดังนั้น การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตส่งผลให้สมรรถนะด้านอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดลดลงอย่างมาก และสามารถเพิ่มสมรรถนะอื่น ๆ ในการรองรับคันทางได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นหากเปรียบเทียบกับการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ดังแสดงสรุปในตารางที่ 4 ฉะนั้น หากพิจารณาราคาก่อสร้างและสมรรถนะของคันทางควบคู่กันทั้งด้านการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง การทรุดตัวที่ต่างกัน และอัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัด จะพบว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้แกนคอนกรีต เนื่องจากราคาถูกกว่าและสมรรถนะในการรองรับคันทางที่ไม่แตกต่างกันมากนัก มากไปกว่านั้นยังมีอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดที่มากกว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตถึงสองเท่า

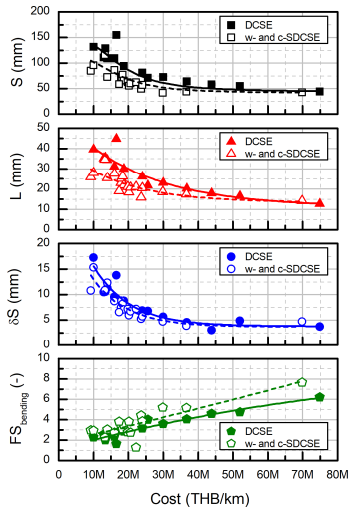


รูปที่ 10 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์และแกนเสริมตามความลึก

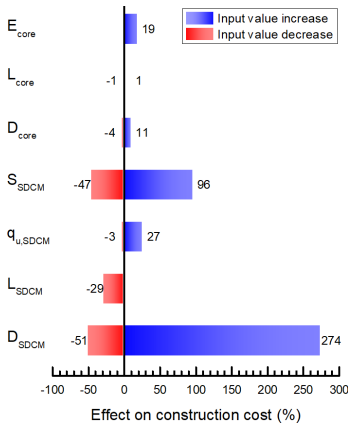
3.3. ความคุ้มค่าของการก่อสร้าง

การวิเคราะห์ราคาก่อสร้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเปรียบเทียบกับสมรรถนะของคันทางในด้านต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นต่อการออกแบบระบบเสาเข็มดินซีเมนต์รองรับคันทาง การศึกษาที่พิจารณาสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนได้แก่ ขนาดหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (D_{SDCM}) ความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์ (L_{SDCM}) กำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบไม่ระบายน้ำ ($q_{u,SDCM}$) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (S_{SDCM}) ขนาดหน้าตัดของแกนเสริม (D_{core}) ความยาวของแกนเสริม (L_{core}) และโมดูลัสยืดหยุ่นของแกนเสริม (E_{core}) และเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ได้แก่ ขนาดหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (D_{DCM}) ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ (L_{DCM}) กำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบไม่ระบายน้ำ ($q_{u,DCM}$) และระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (S_{DCM})

รูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเปรียบเทียบกับราคาก่อสร้าง จากผลการวิเคราะห์ เมื่อราคาเท่ากัน สมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนให้ผลที่ดีกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติในทุก ๆ ด้าน ทั้งค่าการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง และการทรุดตัวที่ต่างกัน รวมทั้งมีอัตราส่วนความปลอดภัยในการรับโมเมนต์ดัดที่มากกว่า นอกจากนี้ เมื่อราคาเพิ่มขึ้นสมรรถนะในการรองรับคันทางจะมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของคันทางจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นของราคาก่อสร้างในช่วงแรกเท่านั้น และจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเมื่อราคาก่อสร้างมีค่ามากกว่า 30 ล้านบาทต่อกิโลเมตร ดังนั้น เมื่อพิจารณาราคาก่อสร้างถึงค่า ๆ หนึ่ง การเพิ่มต้นทุนในการก่อสร้างจะไม่สามารถเพิ่มสมรรถนะในการรองรับคันทางได้อย่างมีนัยสำคัญ รูปที่ 12 แสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อราคาก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อราคามากที่สุดคือขนาดของ



รูปที่ 11 เปรียบเทียบราคาก่อสร้างกับสมรรถนะของคันทง



รูปที่ 12 อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อราคาก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

เสาเข็มดินซีเมนต์ และตัวแปรที่ส่งผลน้อยที่สุดคือความยาวของแกนเสริม หากต้องการเพิ่มสมรรถนะของคันทงรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนโดยการเพิ่มขนาดหน้าตัดเสาเข็มจะทำให้สิ้นเปลืองและมีราคาสูงเกินความจำเป็น

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนรองรับคันทง โดยคำนึงถึงราคาก่อสร้างที่เหมาะสม ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติแบบสมมาตร ทั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ร่วมกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (ทั้งแกนไม้และแกนคอนกรีต) ช่วยลดการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง และการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติในการรองรับคันทงบนชั้นดินอ่อน ทั้งนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด

การเพิ่มความแข็งแรงของแกนเสริมในเสาเข็มดินซีเมนต์ส่งผลต่อสมรรถนะของคันทงน้อยมาก การใช้แกนเสริมที่มีคามอดูลัส

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมรรถนะของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน

สมรรถนะของคันทง	SDCM		%Diff**	%Diff** DCM-wood	
	DCM	Wood			Concrete
S (mm)	77.30	43.61	40.88	6.68	43.58
L (mm)	27.64	16.73	16.14	3.66	39.47
ΔS (mm)	6.06	3.61	3.62	0.28	40.43
$FS_{bending}$ (-)	3.86	5.89	2.43	142.39	52.59

หมายเหตุ: * $[(Wood - Concrete)/Wood] \times 100\%$

** $[(DCM - Wood)/DCM] \times 100\%$

เพิ่มขึ้น จะสามารถชักนำให้เกิดโมเมนต์ดัดในแกนมากขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนความปลอดภัยต่อโมเมนต์ดัดมีค่าลดลง จากการศึกษานี้พบว่าแกนไม้มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแกนเสริมในเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติเพื่อรองรับคันทงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้แกนคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในการก่อสร้าง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แกนไม้ในรูปแบบที่เหมาะสม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม) จะสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้ ในขณะที่ยังสามารถเพิ่มสมรรถนะในการรองรับคันทง

การเพิ่มสมรรถนะของคันทงทำให้ราคาก่อสร้างเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ราคาก่อสร้างและความสามารถในการทำงานที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างลดลงได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของราคามากที่สุดคือขนาดหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของราคาน้อยที่สุดคือความยาวของแกนเสริม หากต้องการออกแบบให้คันทงที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้นโดยที่ส่งผลต่อราคาน้อยที่สุด การเพิ่มความยาวของแกนเสริมจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบและการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนในการก่อสร้างควรใช้วิธีการวิเคราะห์ความเหมาะสม (Optimization Analysis) เพื่อให้ได้ระบบเสาเข็มรองรับคันทงที่มีสมรรถนะเหมาะสมกับความต้องการ และมีราคาก่อสร้างที่ถูกต้อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนเพชรโยธา ปีการศึกษา 2562

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Voottipruex P., Suksawat T., Bergado D.T., Jamsawang P. (2011). Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads. *Computers and Geotechnics* **38**(3), 318–329. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.11.006

- [2] Venda Oliveira P.J., Pinheiro J.L.P., Correia A.A.S. (2011). Numerical analysis of an embankment built on soft soil reinforced with deep mixing columns: Parametric study. *Computers and Geotechnics* **38**(4), 566–576. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.03.005
- [3] Wonglert A., Jongpradist P. (2015). Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles. *Computers and Geotechnics* **69**, 93–104. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.05.003
- [4] Wijerathna M., Liyanapathirana D.S. (2018). Simplified modelling approaches for DCM column-supported embankments. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1–10. DOI: 10.1080/19386362.2018.1462023
- [5] Yapage N.N.S., Liyanapathirana D.S., Kelly R.B., Poulos H.G., Leo C.J. (2014). Numerical modeling of an embankment over soft ground improved with deep cement mixed columns: Case history. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **140**(11), 04014062. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001165
- [6] Dong P., Qin R., Chen Z. (2004). Bearing capacity and settlement of concrete-cored DCM pile in soft ground. *Geotechnical and Geological Engineering* **22**(1), 105–119. DOI: 10.1023/B:GEGE.0000013994.73567.cc
- [7] Voottipruex P., Jamsawang P., Sukontasukkul P., Jongpradist P., Horpibulsuk S., Chindaprasit P. (2019). Performances of SDCM and DCM walls under deep excavation in soft clay: Field tests and 3D simulations. *Soils and Foundations* **59**(6), 1728–1739. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.07.012
- [8] Wonglert A., Jongpradist P., Jamsawang P., Larsson S. (2018). Bearing capacity and failure behaviors of floating stiffened deep cement mixing columns under axial load. *Soils and Foundations* **58**(2), 446–461. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.02.012
- [9] Jamsawang P., Yoobanpot N., Thanasisathit N., Voottipruex P., Jongpradist P. (2016). Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment. *Computers and Geotechnics* **72**, 42–56. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.11.006
- [10] Phutthananon C., Jongpradist P., Dias D., Jamsawang P., (2021). Numerical study of the deformation performance and failure mechanisms of TDM pile supported embankments. *Transportation Geotechnics* (Under revision)
- [11] Jamsawang P., Voottipruex P., Tanseng P., Jongpradist P., Bergado D.T. (2019). Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation. *Acta Geotechnica* **14**(1), 225–246. DOI: 10.1007/s11440-018-0660-7
- [12] Phutthananon C., Jongpradist P., Jongpradist P., Dias D., Baroth J. (2020). Parametric analysis and optimization of T-shaped and conventional deep cement mixing column-supported embankments. *Computers and Geotechnics* **122**, 103555. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103555
- [13] Uddin K., Balasubramaniam A.S., Bergado D.T. (1997). Engineering behavior of cement-treated Bangkok soft clay. *Geotechnical Engineering* **28**, 89–119.
- [14] Voottipruex P., Bergado D.T., Suksawat T., Jamsawang P., Cheang W. (2011). Behavior and simulation of deep cement mixing (DCM) and stiffened deep cement mixing (SDCM) piles under full scale loading. *Soils and Foundations* **51**(2), 307–320. DOI: 10.3208/sandf.51.307
- [15] Phutthananon C., Jongpradist P., Jamsawang P. (2020). Influence of cap size and strength on settlements of TDM-piled embankments over soft ground. *Marine Georesources & Geotechnology* **38**(6), 686–705. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1613700
- [16] Zhang J., Cui X., Huang D., Jin Q., Lou J., Tang W. (2016). Numerical Simulation of Consolidation Settlement of Pervious Concrete Pile Composite Foundation under Road Embankment. *International Journal of Geomechanics* **16**(1), B4015006. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000542
- [17] Jiang Y., Han J., Zhan G. (2014). Numerical analysis of a pile-slab-supported railway embankment. *Acta Geotechnica* **9**(3), 499–511. DOI: 10.1007/s11440-013-0285-9
- [18] Wu J., Ye X., Li J., Li G. W. (2019). Field and numerical studies on the performance of high embankment built on soft soil reinforced with PHC piles. *Computers and Geotechnics* **107**, 1–13. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.11.019
- [19] Rowe R., Liu K. (2015). Three-dimensional finite element modelling of a full-scale geosynthetic-reinforced, pile-supported embankment. *Canadian Geotechnical Journal* **52**, 2041–2054. DOI: 10.7868/s0869565216210155