สมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้

PERFORMANCE OF EMBANKMENTS SUPPORTED BY DEEP CEMENT MIXING PILES AND WOODEN CORE STIFFENED DEEP CEMENT MIXING PILES

กังวาน กานดาวรวงศ์[1], ชนา พุทธนานนท์[1,*] และ พรเกษม จงประดิษฐ์[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
[*]Corresponding author address: chana.put13@gmail.com

บทคัดย่อ

การปรับปรุงคุณภาพดินมีความจำเป็นในงานก่อสร้างคันทางถนนบนดินฐานรากที่มีกำลังรับแรงแบกทานต่ำและความยุบตัวสูง เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการทรุดตัวที่มากเกินไป การเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากเกินไปรวมถึงปัญหาเรื่องเสถียรภาพของคันทาง โดยงานวิจัยในอดีตยืนยันว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตมีสมรรถนะเหนือกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติเมื่อรองรับน้ำหนักจากคันทาง ถึงแม้จะมีการศึกษาว่ากำลังรับแรงแบกแทนตามแนวแกนของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีความใกล้เคียงกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีต แต่ยังไม่มีงานวิจัยยืนยันว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้จะมีสมรรถนะที่ดีเมื่อรองรับคันทางที่มีแรงกระทำด้านข้างรวมถึงโมเมนต์ดัดภายในเสาเข็ม งานวิจัยนี้วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้รองรับคันทางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้คือทางหลวงหมายเลข 3117 (บางบ่อ-คลองด่าน) ซึ่งก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ ผลตรวจวัดในสนามถูกนำมาใช้สอบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์ รวมถึงศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อสมรรถนะของคันทาง จากผลการวิเคราะห์พบว่าคันทางรองรับด้วยเสาเข็มซีเมนต์เสริมแกนไม้ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 0.5 เมตร มีสมรรถนะสูงกว่าคันทางรองรับด้วยเสาเข็มซีเมนต์แบบปกติซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 0.6 เมตร การเพิ่มกำลังและพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มทำให้สมรรถนะของคันทางทั้งสองแบบเพิ่มขึ้น สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ความยาวของแกนเสริมมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของคันทางมากกว่าพื้นที่หน้าตัดของแกนเสริม

คำสำคัญ: *เสาเข็มดินซีเมนต์, เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน, คันทาง, แกนไม้ยูคาลิปตัส, การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์*

Abstract

Ground improvement is necessary to mitigate the excessive settlements, large lateral deformation, and stability in highway embankments overlying the low bearing capacity and high compressibility foundation soil. From the recent study, the dominant performances of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile over the conventional deep cement mixing (DCM) pile to support embankment has been confirmed. Although a similar bearing capacity between wooden core SDCM pile and concrete core SDCM pile under axial loading was obtained as reported in the literature, satisfied performances of wooden core SDCM pile under embankment loading and induced bending moment within pile have not been confirmed. This article aims to analyze and compare the performances of embankments supported by DCM piles and wooden core SDCM piles using finite element analyses. Selected case study is highway embankment No.3117 (Bangbo-Klongdan), which is constructed over Bangkok soft clay and supported by conventional DCM piles. Field measurements are adopted to validate the analysis results. The influences of key design parameters on the embankment performances are investigated. The results indicate that the wooden core SDCM piles with 0.5 m pile diameter provides the higher embankment performances than conventional DCM piles with 0.6 m pile diameter. Increasing of the pile strength and cross-section area can enhance the embankment performances for embankments supported by DCM piles and wooden core SDCM piles. For the wooden core SDCM piles, the influence of core length on the embankment performance is significantly higher than the core cross-section area.

Keywords: *Deep cement mixing pile, Stiffened deep cement mixing pile, Embankment, Eucalyptus wood core, Finite element analysis.*

1. บทนำ

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งเป็นดินที่มีกำลังรับแรงแบกทานต่ำและมีการยุบตัวสูง มักจะพบปัญหาเรื่องการทรุดตัวที่มากเกินไป การเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากเกินไป รวมถึงปัญหาด้านเสถียรภาพ ซึ่งอาจส่งผลให้การก่อสร้างเกิดความล่าช้าและมีค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาสูง การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ (DCM Pile) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวทั้งในประเทศไทย [1], [2] และต่างประเทศ [3], [4] อย่างไรก็ตามหากต้องการเพิ่มสมรรถนะในการรับน้ำหนักคันทางที่มากขึ้น เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (SDCM Pile) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการเสียบแกนบริเวณตรงกลางทันทีหลังจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติแล้วเสร็จ เพื่อช่วยถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงไปยังชั้นดินด้านล่าง เพิ่มกำลังรับแรงแบกทานตามแนวแกน และเพิ่มกำลังรับแรงดัด จากการศึกษาผลการตรวจวัดในสนาม [5], [6] และการวิเคราะห์ไฟ

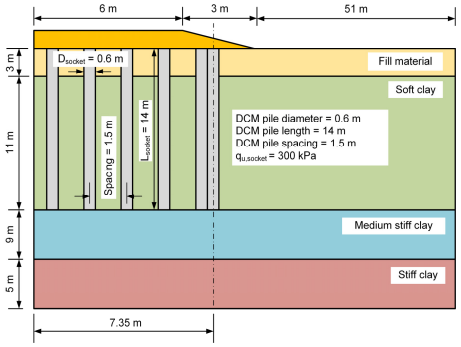
ไนต์เอลิเมนต์ [5] ของงานวิจัยก่อนหน้าสามารถยืนยันได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตมีสมรรถนะด้านการทรุดตัว การเคลื่อนตัวด้านข้าง และอัตราส่วนรับน้ำหนัก (Load Sharing Ratio) ที่เหนือกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติเมื่อรองรับน้ำหนักจากคันทาง จากการศึกษาข้างต้น จึงมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้พัฒนาและศึกษาการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตรองรับคันทางได้แก่ การศึกษากลไกการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Mechanism) และแนวโค้งรับแรง (Soil Arching) [7] การพัฒนากระบวนการออกแบบและแผนภูมิออกแบบสำหรับคำนวณการทรุดตัวสุดท้าย (Final Settlement) [8] และผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สำหรับคำนวณการทรุดตัวตามเวลา (Consolidation Settlement) [9] แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแกนเสาเข็มคอนกรีตนั้นมีราคาค่อนข้างสูง จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แกนไม้ยูคาลิปตัสทดแทน ผลการศึกษาการทดสอบการให้แรงตามแนวแกนกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนด้วยแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ [10] และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [10], [11] พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีกำลังรับแรงแบกทานตามแนวแกนใกล้เคียงกับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดยืนยันว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้จะมีสมรรถนะที่ดีเมื่อรองรับน้ำหนักจากคันทางที่มีทั้งแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวราบ รวมถึงสมรรถนะด้านกำลังรับโมเมนต์ดัดภายในเสาเข็ม

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ผลตรวจวัดในสนามของทางหลวงหมายเลข 3117 (บางบ่อ-คลองด่าน) กิโลเมตรที่ 6+055 จังหวัดสมุทรปราการ [1] ซึ่งก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติถูกนำมาใช้ปรับเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงตัวแปรเพื่อศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ พื้นที่หน้าตัดแกนไม้ ความยาวแกนไม้ และกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของคันทาง

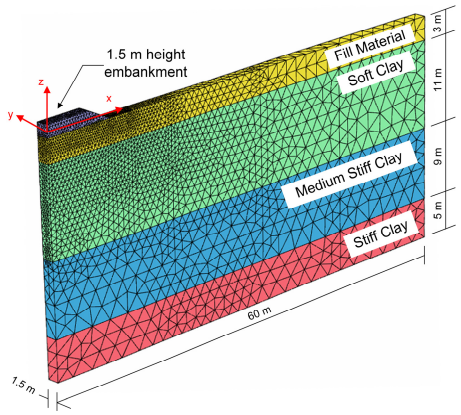
2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D แบบจำลองคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่เป็นส่วนหนึ่งของหลวงหมายเลข 3117 (บางบ่อ-คลองด่าน) บริเวณกิโลเมตรที่ 6+0.55 ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาซึ่งเป็นคันทางสูง 1.5 เมตร ความกว้างที่ฐาน 18 เมตร และมีอัตราส่วนความชันแนวดิ่งต่อแนวราบเท่ากับ 1:2 คันทางก่อสร้างบนบริเวณที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 11 เมตร มีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 1.5 เมตร ปลายเสาเข็มวางอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางที่ระดับ -14 เมตร จากผิวดินเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1 การวิเคราะห์จำลองตามสภาพการก่อสร้างจริงในสนามแสดงดังตารางที่ 1 แบบจำลองแบบสมมาตร 3 มิติ ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งสามารถแสดงโครงตาข่าย (Mesh) ได้ดังรูปที่ 2 โดยมีความกว้างเท่ากับ 1.5 เมตร ยาว 60 เมตร ลึก 28 เมตร ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ ขอบเขตการเคลื่อนที่ (Displacement Boundary) สำหรับระนาบ x = 0 เมตร, x = 60 เมตร, y = 0 เมตร และ y = 1.5 เมตร ถูกยึดรั้งในทิศทางตั้งฉากกับระนาบ ขอบเขตการเคลื่อนที่สำหรับระนาบ z = -28 เมตร ถูกยึดรั้งทุกทิศทาง (x, y, z) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ -1.5 เมตร แรงดันน้ำในโพรงเริ่มต้นก่อนการก่อสร้างคันทางเป็นแบบ



รูปที่ 1 คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติสำหรับสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2 โครงตาข่าย (Mesh) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิงจากการก่อสร้างในสนาม [1]

ลำดับ	คำอธิบาย	เวลา (วัน)
0	จำลองความเค้นเริ่มต้นในสนาม	-
1	ก่อสร้างเสาเข็ม DCM และ SDCM	0
2	ถมและบดอัดคันทางสูง 0.5 เมตร	10
3	ถมและบดอัดคันทางสูง 0.8 เมตร	40
4	ถมและบดอัดคันทางสูง 1.2 เมตร	70
5	ถมและบดอัดคันทางสูง 1.5 เมตร	105
6	130 วันหลังก่อสร้างเสร็จ	235
7	90% การทรุดตัวคายน้ำ	> 10 ปี

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์แบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์สำหรับวัสดุคันทางและชั้นดินถม

พารามิเตอร์	วัสดุคันทาง[1]	ชั้นดินถม[1]
γ (kN/m^3)	20	20
E' (kPa)	20,000	30,000
ν'	0.33	0.33
c' (kPa)	10	1
ϕ' (degree)	32	32
k_z (m/day)	-	-
$k_x = k_y$ (m/day)	-	-
พฤติกรรมของวัสดุ	Drained	Drained

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์แบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์สำหรับดินซีเมนต์และแกนไม้

พารามิเตอร์	ดินซีเมนต์	แกนไม้[10]
γ (kN/m^3)	15	9.5
E' (kPa)	21,000	4,000,000
ν'	0.33	0.25
c' (kPa)	c_u = 150	6,500
ϕ' (degree)	0	30
k_z (m/day)	0.1X10^{-3}	-
$k_x = k_y$ (m/day)	0.2X10^{-3}	-
Flexural stiffness (kPa)	57	76,000
พฤติกรรมของวัสดุ	Undrained (B)	Non-porous

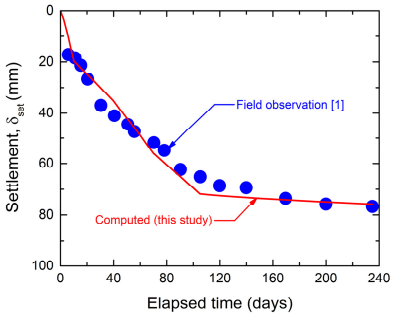
Hydrostatic ขอบเขตการซึมผ่าน (Flow Boundary) ที่ระนาบ x = 0 เมตร, x = 60 เมตร, y = 0 เมตร, y = 1.5 เมตร และ z = -28 เมตร เป็นแบบทึบน้ำ [1] กำหนดค่าอัตราส่วนลดทอนกำลังรับแรงเฉือนของอินเตอร์เฟส (R_{inter}) ระหว่างแกนกับดินซีเมนต์เท่ากับ 0.4 [5], [10], [11], [12]

2.1. ชั้นดินและพารามิเตอร์ของวัสดุ

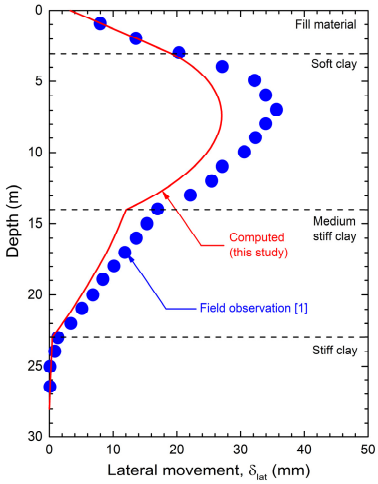
ในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุคันทาง ชั้นดินถม เสาเข็มดินซีเมนต์และแกนไม้ ถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองดินมอร์-คูลอมบ์ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.17 เท่า และ 70 เท่าของกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ ค่ากำลังรับแรงดัดของแกนไม้อ้างอิงจากฐานข้อมูลของกรมป่าไม้ประเทศไทย [13] ชั้นดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็งถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง โดยมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4 ผลตรวจวัดในสนามจากงานวิจัยก่อนหน้า [1] ถูกนำมาใช้สอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และค่าพารามิเตอร์ของวัสดุจากรูปที่ 3 และ 4 โดยจะเห็นได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลตรวจวัดในสนาม

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์แบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่งสำหรับชั้นดิน เหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งปานกลาง และดินเหนียวแข็ง

พารามิเตอร์	ดินเหนียวอ่อน[14][15]	ดินเหนียวแข็งปานกลาง	ดินเหนียวแข็ง[1]
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)



รูปที่ 3 ผลสอบเทียบการทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางของคันทาง



รูปที่ 4 ผลสอบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างตามความลึกที่ระยะ 12 เมตรจากกึ่งกลางคันทางคันทาง

ตารางที่ 5 สมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้

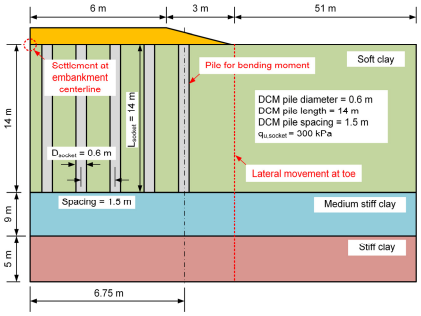
สมรรถนะของคันทาง	คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ			คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้		
	105 วัน	235 วัน	90% การทรุดตัวคายน้ำ	105 วัน	235 วัน	90% การทรุดตัวคายน้ำ
การทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางคันทาง	110.79	116.59	145.19	57.02	63.47	79.65
การเคลื่อนตัวด้านข้างบริเวณปลายคันทาง	45.60	43.05	30.90	24.87	23.86	28.55
การทรุดตัวที่แตกต่างกันบริเวณฐานคันทาง	13.70	15.18	15.79	14.97	23.06	28.13
อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด	6.33	6.70	3.06	12.00	7.60	4.42

3. การวิเคราะห์และผลการศึกษา

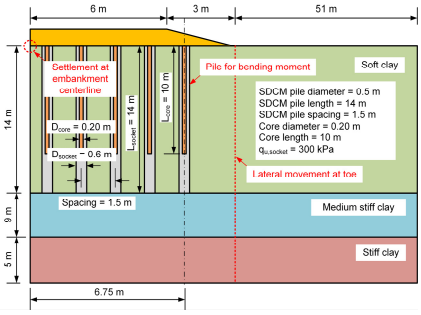
3.1. คันทางสำหรับวิเคราะห์เชิงตัวแปร

สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวแปร เสาเข็มต้นสุดท้ายจะไม่นำมาวิเคราะห์ รวมถึงเปลี่ยนชั้นดินถมเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อลดความซับซ้อนเชิงพฤติกรรม รูปที่ 5 แสดงคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวแปรในการศึกษาครั้งนี้ อัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อนไถล (FS_{slope}) ของคันทางทั้งสองถูกควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกันเพื่อการเปรียบเทียบที่เหมาะสมในส่วนการวิเคราะห์เชิงตัวแปร โดยอัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อนไถลของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าเท่ากับ 2.60 และ 2.62 ตามลำดับ สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร มีความยาว 14 เมตร และมีกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 300 กิโลปาสคาล ส่วนคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร มีความยาว 14 เมตร มีกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 300 กิโลปาสคาล ความยาวแกนไม้ 10 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางแกนไม้ 0.20 เมตร

สมรรถนะของคันทางแบ่งออกเป็นสองช่วงเวลา ได้แก่ หลังก่อสร้างเสร็จ (105 วัน) ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของคันทางในระยะสั้น (Short-Term Performance) และเวลาที่เกิดการทรุดตัวคายน้ำ 90% ซึ่งแสดงถึงสมรรถนะของคันทางในระยะยาว (Long-Term Performance) สมรรถนะของคันทางที่สนใจประกอบด้วยการทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางคันทาง การเคลื่อนตัวด้านข้างตามความลึกที่บริเวณปลายคันทาง (ระยะ 9 เมตร จากกึ่งกลางคันทาง) การทรุดตัวที่แตกต่างกันใต้คันทางระหว่างการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเสาเข็มและดินรอบข้าง ดังแสดงในรูปที่ 6-8 ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้วิเคราะห์จากการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง (Lateral Pile Load Test) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้างพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มักเกิดการวิบัติที่ดินซีเมนต์รอบๆ แกน ก่อนแกนไม้เสมอ แต่อย่างไรก็ตาม เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ยังคงมีเสถียรภาพต่อการรับโมเมนต์ดัดเนื่องจากแกนไม้มีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด (Flexural stiffness) สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์รอบๆ แกน ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้จะสูญเสียเสถียรภาพในด้านการรับโมเมนต์ดัดเมื่อแกนไม้เกิดการวิบัติ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดค่า



(ก) คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ



(ข) คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้

รูปที่ 5 คันทางสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวแปร

โมเมนต์ดัดที่ทำให้ดินซีเมนต์เกิดการวิบัติเป็นความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และค่าโมเมนต์ดัดที่ทำให้แกนไม้เกิดการวิบัติเป็นความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ รูปที่ 9 แสดงโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มดินซีเมนต์ และภายในแกนเสริมของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ โดยค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัด ($FS_{bending}$) จากการวิเคราะห์พบว่าความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร มีค่าเท่ากับ 2.156 กิโลนิวตันเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการเสนอโดยงานวิจัยก่อนหน้า [1] ซึ่งเท่ากับ 2.163 กิโลนิวตันเมตร สมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้สรุปได้ดังตารางที่ 5

ความแกร่งตามแนวแกน (Axial Stiffness) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ (k_{DCM}) คำนวณได้จากสมการที่ (1) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 424.12

กิโลนิวตันต่อเมตร ส่วนความแกร่งตามแนวแกนของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ (k_{SDCM}) คำนวณด้วยวิธี Equivalent Stiffness, [16] แสดงดังสมการที่ (2) - (5) โดยมีค่าเท่ากับ 954.63 กิโลนิวตันต่อเมตร

$$k_{DCM} = (E_{socket}A_{socket})/L_{socket} \quad (1)$$

$$k_{SDCM} = \frac{(k_{core} + k'_{socket})k_{socket}}{(k_{core} + k'_{socket} + k_{socket})} \quad (2)$$

$$k_{core} = (E_{core}A_{core})/L_{core} \quad (3)$$

$$k'_{socket} = (E_{socket}A'_{socket})/L_{core} \quad (4)$$

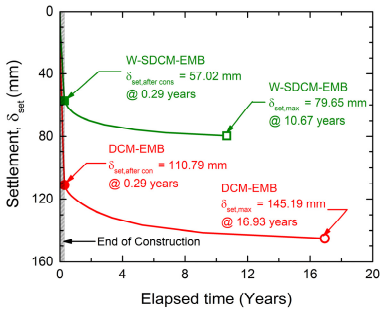
$$k_{socket} = (E_{socket}A_{socket})/(L_{socket} - L_{core}) \quad (5)$$

โดยที่ E_{core} คือโมดูลัสยืดหยุ่นของแกนเสริม A_{core} คือพื้นที่หน้าตัดแกนเสริม L_{core} คือความยาวแกนเสริม E_{socket} คือโมดูลัสยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ L_{socket} คือความยาวของเสาเข็ม A_{socket} พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม $A'_{socket} = A_{socket} - A_{core}$

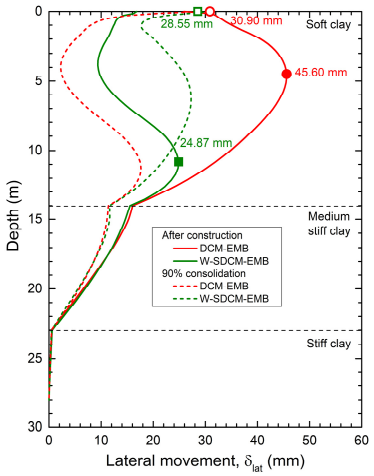
เมื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวในรูปที่ 6 พบว่าการทรุดตัวของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ โดยหากพิจารณาที่ 90% การทรุดตัวคายน้ำ พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ช่วยลดการทรุดตัวของคันทางได้ประมาณร้อยละ 45 เมื่อเทียบกับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ เนื่องจากความแกร่ง (Stiffness) ที่มากกว่าของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ทำให้น้ำหนักคันทางสามารถถ่ายลงเสาเข็มได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ส่งผลให้น้ำหนักคันทางถ่ายลงดินเหนียวอ่อนรอบ ๆ เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ลดลงจึงทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นลดลง และทำให้ระยะเวลาสำหรับการทรุดตัวคายน้ำลดลงตามไปด้วย โดยคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ใช้ระยะเวลาเพียง 10.67 ปีสำหรับการทรุดตัวคายน้ำ 90% ซึ่งน้อยกว่าคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่ใช้เวลาถึง 16.93 ปี

จากรูปที่ 7 พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้สามารถลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางได้ถึงร้อยละ 37 เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ พบว่ารูปร่างการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางจะเปลี่ยนไปตามเวลาโดยเมื่อการทรุดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาตรดินลดลงทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเคลื่อนตัวด้านข้างย้อนกลับ (Lateral Rebound) ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้า [3] สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางในระยะยาว (Long-Term Lateral Movement) ที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่มากที่สุดจะเกิดทันทีหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จในทางตรงกันข้าม การเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากที่สุดของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวดิน ณ เวลา 90% ของการทรุดตัวคายน้ำ

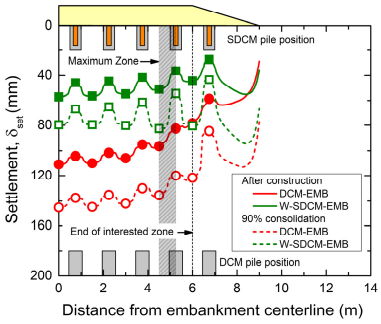
เนื่องจากค่าความแกร่ง (Stiffness) ที่สูงกว่าของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ทำให้การทรุดตัวบริเวณหัวเสาเข็มมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติในกรณีที่รองรับน้ำหนักจากคันทางที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาการทรุดตัวที่แตกต่างกันในรูปที่ 8 พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติในทุกช่วงเวลาที่พิจารณา บริเวณที่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณ 4.5 ถึง 5.25 เมตร จากศูนย์กลางของคันทาง ดังนั้นหากเลือกใช้การปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการก่อสร้างคันทางด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน จะต้องคำนึงถึงค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันเป็นหลัก โดยสามารถแก้ปัญหาเบื้องต้นด้วยการสร้างคันทางให้มีความสูงมากกว่า 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Spacing) ซึ่งจะทำให้การทรุดตัวที่แตกต่างกันบริเวณผิวคันทางด้านบนมีค่าน้อยมากหรืออาจไม่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันเลย เนื่องจากการก่อตัวของแนวโค้งรับแรง (Soil Arching) [7] อย่างไรก็ตามหากคันทางมีความสูงไม่มากพออาจต้องพิจารณาใช้ชั้นถ่ายแรง (Load Transfer Platform) สำหรับป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว ซึ่งอาจเป็นชั้นทรายบดอัด [17] ชั้นทรายผสมซีเมนต์บดอัด [17] หรือเป็นแผ่นพื้นคอนกรีต [18]



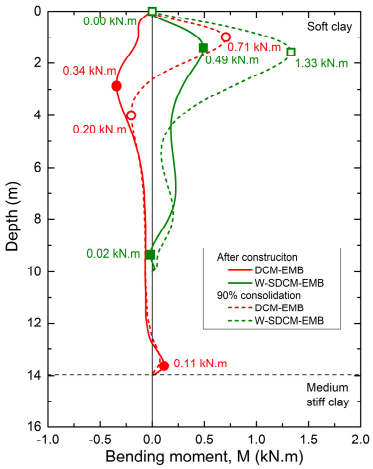
รูปที่ 6 การทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางคันทาง



รูปที่ 7 การเคลื่อนตัวด้านข้างบริเวณปลายคันทาง



รูปที่ 8 การทรุดตัวแตกต่างกันบริเวณใต้คันทาง



รูปที่ 9 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม

ตารางที่ 6 ตัวแปรออกแบบสำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของคันทาง

พารามิเตอร์	ช่วงของพารามิเตอร์
พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, $\boldsymbol{D_{socket}}$	0.4, 0.5, 0.6, 0.8 (m)
กำลังของเสาเข็ม, $\boldsymbol{q_{u,socket}}$	150, 300, 450, 600, 750 (kPa)
พื้นที่หน้าตัดแกนไม้, $\boldsymbol{D_{core}}$	0.18, 0.20, 0.22, 0.25 (m)
ความยาวแกนไม้, $\boldsymbol{L_{core}}$	7, 8.5, 10, 11, 12, 14 (m)

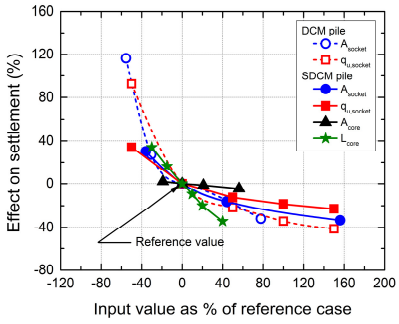
เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้รองรับคันทางในรูปที่ 9 พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นเกิดที่เวลา 90% ของการทรุดตัวคายน้ำในเสาเข็มทั้งสองประเภท โดยค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแกนไม้สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าเท่ากับ 1.33 กิโลนิวตันเมตร ซึ่งมากกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.71 กิโลนิวตันเมตร แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดเท่ากับ 5.89 กิโลนิวตันเมตร ซึ่งมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่มีค่าเท่ากับ 2.16 กิโลนิวตันเมตร ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดมากกว่าเสาเข็มซีเมนต์แบบปกติเมื่อรองรับน้ำหนักคันทาง ซึ่งมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติคิดเป็นร้อยละ 44

3.2. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวแปร

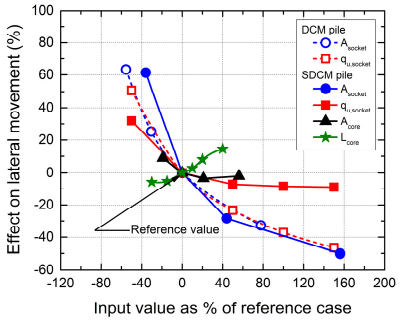
จากผลการศึกษาที่ได้แสดงในหัวข้อ 3.1 พบว่าสมรรถนะคันทางในระยะยาว (ที่ 90% การทรุดตัวคายน้ำ) ของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้จะมีค่าที่วิกฤติกว่าสมรรถนะคันทางในระยะสั้น (หลังก่อสร้างเสร็จ) ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงตัวแปรในส่วนที่จะกล่าวต่อไปนี้ ทุกสมรรถนะของคันทางจะพิจารณาที่เวลา 90% ของการทรุดตัวคายน้ำ ยกเว้นค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติเนื่องจากเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างย้อนกลับ (Lateral Rebound) ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ (Design Parameters) ถูกนำมาศึกษาโดยตัวแปรที่สนใจและค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 6 โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์และเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม้จะถูกแปลงเป็นพื้นที่หน้าตัด (A_{socket} และ A_{core} ตามลำดับ) เพื่อความเหมาะสมในการเปรียบเทียบเชิงตัวแปรต่อไป

อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางของคันทางแสดงดังรูปที่ 10 สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ทั้งพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มและกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำมีอิทธิพลต่อการทรุดตัวของคันทางในระดับใกล้เคียงกัน สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ ความยาวของแกนไม้มีอิทธิพลมากที่สุด ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของแกนเสริมมีอิทธิพลต่อการทรุดตัวของคันทางน้อยที่สุด เนื่องจากการเพิ่มความยาวแกนไม้สามารถถ่ายเทน้ำหนักคันทางไปยังชั้นดินข้างล่างได้มากกว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดแกนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [10] ส่วนกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำกับพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีอิทธิพลใกล้เคียงกัน

อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของคันทางแสดงดังรูปที่ 11 สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ ทั้งพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มและกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำมีผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของคันทางในระดับใกล้เคียงกัน สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีอิทธิพลสูงที่สุด ในขณะที่ของกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์กับพื้นที่หน้าตัดของแกนเสริมมีอิทธิพลในระดับเคียงกัน การเพิ่มกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มจาก 450 กิโลปาสคาล ถึง 750 กิโลปาสคาล



รูปที่ 10 อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการทรุดตัวที่กึ่งกลางของคันทาง



รูปที่ 11 อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดคันทาง

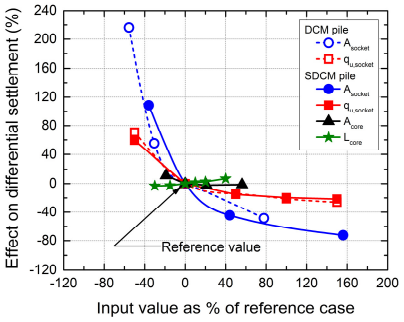
ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันทางเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามพบว่าความยาวของแกนไม้มีค่าเหมาะสม (Optimum Value) ที่จะทำให้การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของคันทางมีค่าต่ำที่สุด

อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุดของคันทางแสดงดังรูปที่ 12 สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มมีอิทธิพลต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีอิทธิพลต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มเช่นเดียวกับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ความยาวแกนเสริมและพื้นที่หน้าตัดแกนเสริมส่งผลต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่น โดยสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม และความยาวแกนเสริมทำให้ความแกร่งตามแนวแกนของเสาเข็มเพิ่มขึ้น น้ำหนักคันทางจึงสามารถถ่ายลงเสาเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การทรุดตัวของดินโดยรอบเสาเข็มลดลง และมีผลกระทบโดยตรงต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันใต้คันทาง เมื่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ รวมถึงพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การทรุดตัวที่แตกต่างกันสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มความยาวแกนเสริม การทรุดตัวของดินรอบเสาเข็มและบริเวณหัวเสาเข็มจะมีค่าลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้การทรุดตัวที่แตกต่างกันเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในทางเดียวกัน การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดแกนเสริมมีผลกระทบต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดแกนเสริมมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อความสามารถในการถ่ายน้ำหนักคันทางลงเสาเข็ม

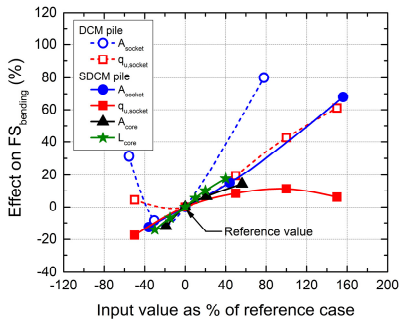
อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดในเสาเข็มของคันทางแสดงดังรูปที่ 13 สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ พบว่าพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดสูงกว่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดจะเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งสองตัวแปรมีค่าเหมาะสม (Optimum Value) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมรรถนะที่ไม่พึงประสงค์ สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม พื้นที่หน้าตัดแกนไม้ และความยาวแกนไม้มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดในเสาเข็มใกล้เคียงกัน ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มมีค่าเหมาะสม (Optimum Value) ที่ทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดมีค่าสูงที่สุด

4. สรุป

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ รวมถึงศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อสมรรถนะของคันทาง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 12 อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่อการทรุดตัวที่แตกต่างกันสูงสุดของคันทาง



รูปที่ 13 อิทธิพลของตัวแปรออกแบบต่ออัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดในเสาเข็มของคันทาง

1. เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของคันทางในกรณีที่มีอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถลที่เท่ากัน คันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้มีการทรุดตัวที่ต่ำกว่า การเคลื่อนตัวด้านข้างน้อยกว่า รวมถึงมีอัตราส่วนความปลอดภัยของโมเมนต์ดัดภายในเสาเข็มมากกว่าคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ
2. ค่าสมรรถนะวิกฤติจะเกิดขึ้นที่เวลา 90% การทรุดตัวคายน้ำ ซึ่งเป็นสมรรถนะระยะยาว (Long-Term Performance) ยกเว้นค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติที่เกิดขึ้นหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งเป็นสมรรถนะระยะสั้น (Short-Term Performance)

3. ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันเป็นค่าที่จำเป็นต้องพิจารณาหากเลือกใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ในการปรับปรุงคุณภาพดินรองรับคันทาง หากมีค่าเกินกำหนดอาจต้องพิจารณาใช้ชั้นถ่ายแรง (Load Transfer Platform) เพื่อลดปัญหาดังกล่าว
4. พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มและกำลังรับแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติและคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้
5. สำหรับคันทางรองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนไม้ พบว่าความยาวของแกนเสริมมีผลต่อสมรรถนะโดยรวมของคันทางมากกว่าพื้นที่หน้าตัดแกนเสริม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

6. การอ้างอิง

[1] 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

[2] Bergado, D.T., Ruenkrairergsa, T., Taesiri, Y., Balasubramaniam, A.S. (1999). Deep soil mixing used to reduce embankment settlement. *Ground Improvement* **3**(4), 145-162. DOI: 10.1680/gi.1999.030402

[3] 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

[4] Chai, J., Shrestha, S., Hino, T. (2019). Failure of an embankment on soil-cement column–improved clay deposit: investigation and analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **145**(9), 05019006. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002118

[5] Voottipruex, P., Bergado, D.T., Suksawat, T., Jamsawang, P., Cheang, W. (2011a). 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

[6] Wang, C., Xu, Y., Dong, P. (2014). Working characteristics of concrete-cored deep cement mixing piles under embankments. *Journal of Zhejiang University: SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)* **15**(6), 419-431. DOI: 10.1631/jzus.A1400009

[7] Ye, G., Cai, Y., Zhang, Z. (2017). Numerical study on load transfer effect of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft soil. *KSCE Journal of Civil Engineering* **21**(3), 703-714. DOI: 10.1007/s12205-016-0637-8

[8] Zhang, Z., Rao, F., Ye, G. (2019). Design method for calculating settlement of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft clay. *Acta Geotechnica*, **15**, 795-814. DOI: 10.1007/s11440-019-00780-3

[9] Zhang, Z., Rao, F., Ye, G. (2019). Analytical modeling on consolidation of stiffened deep mixed column-reinforced soft soil under embankment. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **44**(1), 137-158. DOI: 10.1002/nag.3020

[10] 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

[11] 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

[12] Voottipruex, P., Suksawat, T., Bergado, D.T., Jamsawang, P. (2011b). 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

[13] Thailand Forest Research and Development Office (2005). *The Thai Hardwoods*. Sukhumvit Media Marketing, Bangkok, Thailand.

[14] 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

[15] 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**, 225–246. DOI: 10.1007/s11440-018-0660-7.

[16] Kelly, S. G. (2012). *Mechanical vibrations: theory and applications*. Cengage learning, Stamford, USA, 56-63

[17] Tanthokosol, K., Kriengtaweekit, T., Jongpradist, P., Phutthananon, C., Sukkarak, R. (2018). Effect of load transfer platform stiffness on differential settlement of deep cement mixing pile supported embankment. *The Journal of KMUTNB* **28**(4), 757-765. (in Thai)

[18] Zhang, Z., Ye, G., Cai, Y., Zhang, Z. (2019). Centrifugal and numerical modeling of stiffened deep mixed column-supported embankment with slab over soft clay. *Canadian Geotechnical Journal* **56**(10), 1418-1432. DOI: 10.1139/cgj-2018-0