



ผลกระทบของความแกร่งของชั้นถ่ายแรงต่อการหลุดตัวที่แตกต่างกันของคันทางรองรับด้วยเสาดินซีเมนต์

กฤตบุญญ์ ตัณฑโกศล ธิรวุฒิ เกรียงทวีกิจ พรเกษม จงประดิษฐ์* ชนา พุทธนานนท์ และ รัชศิริ สุขรักษ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2470-9305 อีเมล: pornkasem.jon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.009
รับเมื่อ 7 มกราคม 2561 ตอบรับเมื่อ 19 มีนาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 26 กันยายน 2561
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นตรวจสอบพฤติกรรมการหลุดตัวของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาดินซีเมนต์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคันทาง โดยมีชั้นถ่ายแรงที่ต่างกัน เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพของชั้นถ่ายแรงของคันทางรองรับด้วยเสาดินซีเมนต์ ทั้งนี้ศึกษาพฤติกรรมการหลุดตัวด้วยคันทางทดสอบในสนาม และศึกษากลไกการถ่ายแรงภายในชั้นถ่ายแรงภายใต้การรับแรงจากคันทางโดยวิธีกราวีเคราะห้เชิงตัวเลข จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพของชั้นถ่ายแรงให้มีความแกร่งเพิ่มขึ้นด้วยการผสมปูนซีเมนต์ ช่วยทำให้กลไกการถ่ายแรงภายในชั้นถ่ายแรงก่อตัวเป็นแนวโค้งรับแรง (Arching) ได้ดีขึ้น ทำให้น้ำหนักจากคันทางถ่ายลงสู่เสาดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น นำไปสู่การหลุดตัวของดินฐานรากที่น้อยลง ดังนั้นการเพิ่มความแกร่งของชั้นถ่ายแรงเหนือเสาดินซีเมนต์ช่วยลดการหลุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาดินซีเมนต์และดินบริเวณโดยรอบได้

คำสำคัญ: เสาดินซีเมนต์, ชั้นถ่ายแรง, แปลงคันทางทดลอง, แนวโค้งรับแรง, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การอ้างอิงบทความ: กฤตบุญญ์ ตัณฑโกศล ธิรวุฒิ เกรียงทวีกิจ พรเกษม จงประดิษฐ์ ชนา พุทธนานนท์ และ รัชศิริ สุขรักษ์, “ผลกระทบของความแกร่งของชั้นถ่ายแรงต่อการหลุดตัวที่แตกต่างกันของคันทางรองรับด้วยเสาดินซีเมนต์,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 4, หน้า 757-765, ต.ค.-ธ.ค. 2561.

Effect of Load Transfer Platform Stiffness on Differential Settlement of Deep Cement Mixing Pile Supported Embankment

Krittagoon Tanthakosol, Thirawut Kriengtaweekit, Pornkasem Jongpradist*, Chana Phutthananon and Raksiri Sukkarak

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2470-9305, E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.09.009

Received 7 January 2018; Accepted 19 March 2018; Published online: 26 September 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed at investigating the settlement behavior of Deep Cement Mixing (DCM) improved ground under embankment loading with the different types of Load Transfer Platform (LTP). The settlement behavior was studied by field embankment construction with instrumentation. The load transfer mechanism was investigated by numerical analysis. From the obtained results, it was found that the load transfer mechanism (arching effect) could be improved by increasing the LTP stiffness with cement admixture. Larger portion of embankment load was transferred to the DCMs. The settlement of the surrounding soil consequently decreased. Therefore, increase of LTP stiffness could reduce the differential settlement between DCM and the surrounding soil.

Keywords: Deep Cement Mixing, Load Transfer Platform, Field Embankment Test, Arching Effect, Numerical Analysis

Please cite this article as: K. Tanthakosol, T. Kriengtaweekit, P. Jongpradist, C. Phutthananon, and R. Sukkarak, "Effect of load transfer platform stiffness on differential settlement of deep cement mixing pile supported embankment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 757-765, Oct.-Dec. 2018 (in Thai).

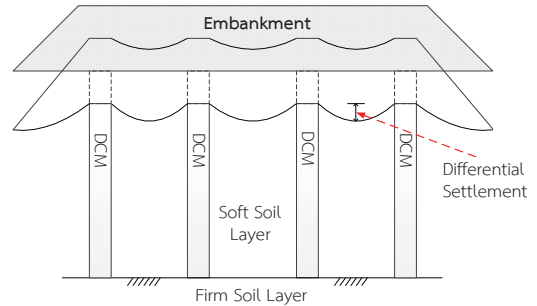
1. บทนำ

ลักษณะทางธรณีวิทยาในภาคกลางของประเทศไทย ประกอบไปด้วย ชั้นดินอ่อนซึ่งมีความหนาประมาณ 10 ถึง 15 เมตร ซึ่งปริมาณความชื้นตามธรรมชาติสูง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนมีค่าต่ำ ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการก่อสร้างโครงสร้างต่างๆ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงดินหลายอย่างเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวยกตัวอย่างเช่น การเสริมกำลังดินด้วย Geotextile หรือ Geogrid การปรับปรุงดินด้วยการใช้ Prefabricated Vertical Drain (PVD) และ Deep Cement Mixing (DCM)

เทคนิค DCM สามารถประยุกต์ใช้ได้กับโครงสร้างกำแพงกันดิน ป้องกันการพังทลายของลาดดิน ป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดินในงานคันดินป้องกันน้ำท่วม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เสาดินซีเมนต์เป็นฐานรากในงานถนน เช่น ทางหลวงบางนา-บางปะกง [1], [2] และถนนเลียบบคลองสุวรรณภูมิ [3]

ปัญหาสำคัญที่มักจะพบสำหรับการใช้เสาดินซีเมนต์เป็นฐานรากในงานคันทางถนน คือการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างดินรอบข้างเสาและเสาดินซีเมนต์ ตัวอย่างเช่น การก่อสร้างถนนเลียบบคลองสุวรรณภูมิ พบว่าในช่วง 10 ถึง 20 ปีแรกของโครงการมีปัญหาเกี่ยวกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนถนน ภายใต้อิทธิพลของน้ำหนักดินถม ดินคันทางตำแหน่งที่อยู่ระหว่างเสาเข็มมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนลงเนื่องจากการทรุดตัวที่มากกว่าของดินฐานรากที่อยู่เหนือเสาเข็ม [4], [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาเข็มซีเมนต์กับดินโดยรอบ อยู่ระหว่างร้อยละ 8 ถึง 20 เมื่อเทียบกับการทรุดตัวทั้งหมด [7] ซึ่งมีสาเหตุมาจากกลไกการถ่ายน้ำหนักลงเสาเข็มซีเมนต์

การเคลื่อนตัวของคันดินจะถูกยับยั้งโดยความต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินถม ความต้านทานแรงเฉือนนี้ช่วยลดแรงกดบนดินฐานราก แต่จะเพิ่มแรงกดบนหัวเข็ม กลไกการถ่ายน้ำหนักนี้เรียกว่า Soil Arching Effect [8] ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า Soil Arching มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเข็มกับดินโดยรอบ สัดส่วนร้อยละของน้ำหนักที่รับโดยเสาเข็มอยู่ในช่วง 65 ถึง 80 ซึ่งประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 การทรุดตัวที่ต่างกันของผิวถนน [6]

ของการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นด้วยการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวเข็มหรือลดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม [9] แต่อาจมีข้อจำกัดด้วยค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์

ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหานี้ได้คือการปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นดินบดอัดชั้นแรกเหนือเสาเข็มซีเมนต์ (Load Transfer Platform) โดยการเพิ่มความแกร่งและความแข็งแรง ซึ่งสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับการก่อสร้างคันทางที่มีเสาเข็มซีเมนต์รองรับ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาอย่างแน่ชัดเกี่ยวกับการใช้ชั้นถ่ายแรงแบบแกร่งร่วมกับเสาเข็มซีเมนต์ ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวและกลไกการถ่ายแรงภายใต้การรับแรงจากคันทาง

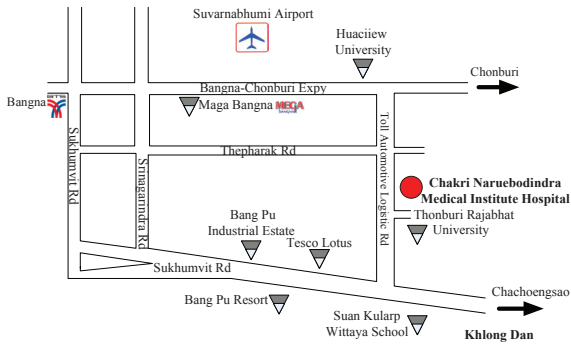
2. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของคันทางทดสอบภายใต้คุณสมบัติของชั้นถ่ายแรงที่ต่างกัน และการศึกษากลไกการถ่ายแรงภายใต้การรับแรงจากคันทางโดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข

2.1 ศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของคันทางทดสอบ

2.1.1 พื้นที่ทำการศึกษา

สถานที่สำหรับก่อสร้างคันทางทดสอบอยู่ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง สถาบันการแพทย์จักรีนฤเบดินทร์ โรงพยาบาลรามาริบัติ จังหวัดสมุทรปราการ (รูปที่ 2) ซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนลึกประมาณ 10 ถึง 16 เมตร



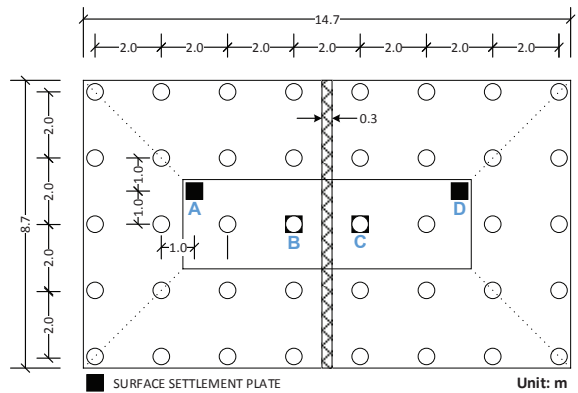
รูปที่ 2 แผนที่แสดงที่ตั้งแปลงทดสอบ [10]

2.1.2 รายละเอียดของคันทางทดสอบ

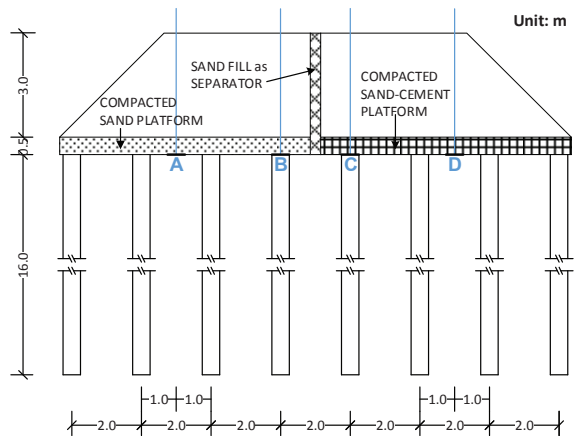
คันทางทดสอบก่อสร้างโดยมีเสาตึนซีเมนต์เป็นฐานราก และมีชั้นถ่ายแรงที่ต่างกัน 2 กรณีคือ ทราบายบดอัด และทราบยผสมซีเมนต์บดอัด เพื่อศึกษาการทรุดตัวระหว่างเสาตึนซีเมนต์และดินโดยรอบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ชั้นถ่ายแรงที่ต่างกัน เสาตึนซีเมนต์ในการศึกษานี้สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการ Jet Grouting ที่แรงดัน 200 บาร์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร ยาว 16 เมตร ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ประเภท 1) ในปริมาณ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.5 ต่อ 1 สำหรับการผสมแบบเปียกที่แนะนำโดย Bergado *et al.* [11] รูปแบบของผังการก่อสร้างคันทางทดสอบแสดงในรูปที่ 3 ชั้นถ่ายแรงมี 2 แบบ แบบแรกเป็นทราบยบดอัดที่เป็นทราบยมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.03 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และแบบที่สองเป็นทราบยผสมปูนซีเมนต์ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และบดอัดมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

2.1.3 เครื่องมือวัด

เครื่องมือสำหรับวัดการทรุดตัวของคันทางทดสอบ คือ แผ่นวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface Settlement Plate) โดยจะทำการติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน 2 ตำแหน่งในแต่ละประเภทของชั้นถ่ายแรงคือ ตำแหน่งเหนือเสาตึนซีเมนต์ และตำแหน่งเหนือดินระหว่างเสาตึนซีเมนต์ที่ระดับดินเดิม แสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของคันทางที่มีชั้นถ่ายแรงที่ต่างกันได้



(ก)



(ข)

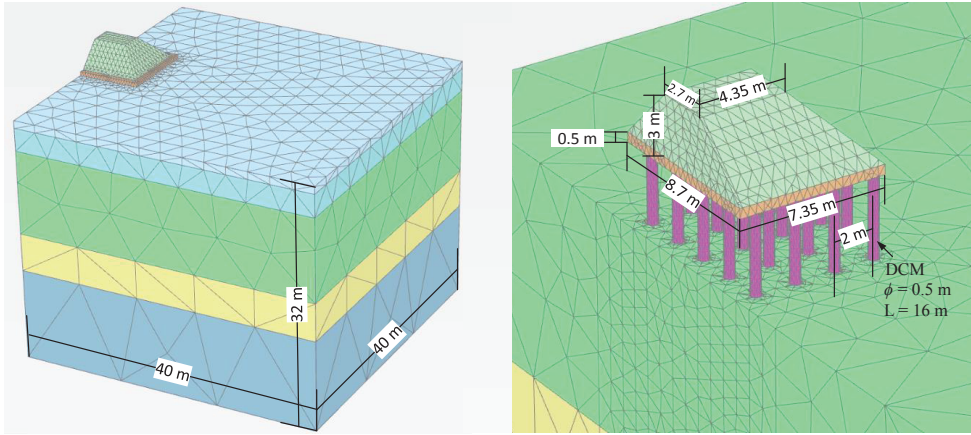
รูปที่ 3 ภาพร่างแสดงขนาดและรูปร่างของคันทางทดสอบ (ก) ภาพด้านบนของคันทาง และ (ข) ภาพตัดด้านข้างของคันทาง [10]

2.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและตรวจสอบกลไกการถ่ายแรงภายในชั้นถ่ายแรงที่ต่างกันของคันทาง

2.2.1 ชั้นดินและคุณสมบัติของดิน

ลักษณะของชั้นดินที่ใช้ทำการศึกษาประกอบด้วยชั้นดินถม 0.00 ถึง -1.00 เมตร ชั้นเปลือกดิน -1.00 ถึง -4.00 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อน -4.00 ถึง -15.00 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง -15.00 ถึง -20.00 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็ง -20.00 ถึง -32.00 เมตร และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -1.50 เมตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 4 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโปรแกรม Plaxis 3D (ก) ขนาดของแบบจำลอง และ (ข) รายละเอียดของคันทางและเสาตึ้นซีเมนต์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [12]

Material	Model	E_{50}^{ref}, E' (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν', ν_{ur}	m	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	OCR	k (m/day)
Fill	HS	7.5	7.5	22.5	0.3	1	15	1	27	3	5×10^{-4}
Weathered Crust	HS	6.5	6.5	25.0	0.3	1	15	1	25	2	5×10^{-4}
Soft Clay	HS	3.2	3.2	20.0	0.3	1	14	1	23	1.2	5×10^{-4}
Medium Clay	HS	9.0	9.0	30.0	0.3	1	15	1	26	2.0	2.5×10^{-4}
Stiff Clay	HS	40.0	40.0	120.0	0.3	2	19	18	25	2.5	2.5×10^{-4}
DCM $q_u=900$ kPa	MC	225.0	-	-	0.3	-	14	450 (c_u)	0	-	2.5×10^{-4}
Sand- Platform	MC	15.0	-	-	0.3	-	20	6	30	-	8.64×10^{-1}
Sand-Cement- Platform	MC	180.0	-	-	0.3	-	21.5	40*	36	-	8.64×10^{-3}
Embankment Fill	MC	15.0	-	-	0.3	-	17	5	27	-	5×10^{-4}

หมายเหตุ: HS = Hardening Soil, MC = Mohr-Coulomb, *ได้ปรับลดจากค่าทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีค่าเท่ากับ 60

พารามิเตอร์ดินที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1 โดยพารามิเตอร์ดินสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้ผ่านการสอบเทียบกับผลทดสอบดินบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยงานวิจัยก่อนหน้า [12]

2.2.2 แบบจำลองและขั้นตอนการวิเคราะห์

แบบจำลองคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D จัดทำขึ้นภายใต้เงื่อนไขการก่อสร้างคันทางทดสอบในสนาม นั่นคือ เป็นคันทางที่มีเสาตึ้นซีเมนต์ยาว

16 เมตร เป็นฐานราก และมีชั้นถ่ายแรงที่แตกต่างกัน 2 ประเภท สำหรับการวิเคราะห์จะทำการจำลองคันทางเพียงครึ่งหนึ่งของการทดสอบในสนาม และได้ทำการวิเคราะห์ชั้นถ่ายแรงหนึ่งชนิดต่อหนึ่งครั้งการวิเคราะห์ โดยจำลองชั้นดินให้มีความกว้าง 40 เมตร ยาว 40 เมตร และสูง 32 เมตร ตามทิศทางแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 เงื่อนไขขอบที่ใช้ด้านล่างสุดของแบบจำลองได้ทำการจำกัดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทางเงื่อนไขขอบสำหรับ

ขั้นตอน	เงื่อนไขการวิเคราะห์
0	Initial stage
1	Construction DCM
2	Construction LTP
3	Fill Embankment 0.5 m
4	Fill Embankment 1.0 m
5	Consolidation 1 day (+1 day)
6	Fill Embankment 1.5 m
7	Fill Embankment 2.0 m
8	Consolidation 2 day (+1 day)
9	Fill Embankment 2.5 m
10	Fill Embankment 3.0 m
11	Consolidation 7 day
12	Consolidation 14 day
13	Consolidation 21 day
14	Consolidation 28 day
15	Consolidation 35 day
16	Consolidation 42 day
17	Consolidation 56 day
18	Consolidation 77 day

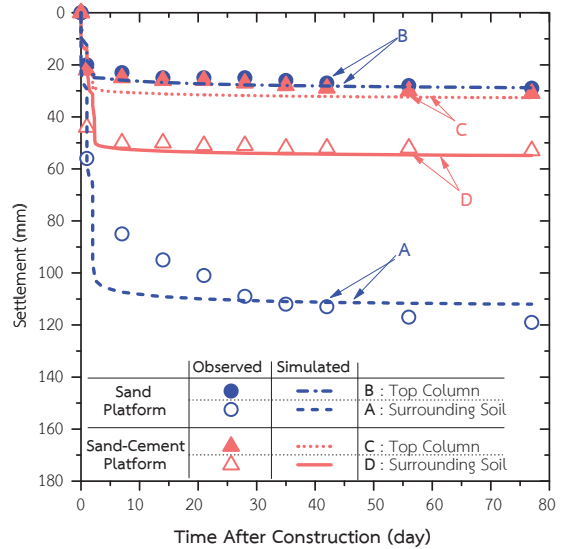
รูปที่ 5 ขั้นตอนการวิเคราะห์

ด้านข้างของแบบจำลองจะทำการจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ (ตัวอย่าง ระนาบ y-z จำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวแกน x) สำหรับเงื่อนไขการระบายน้ำ ได้จำกัดไม่ให้เกิดการไหลออกจากขอบของแบบจำลองในทุกทิศทาง ยกเว้นแต่ขอบด้านบนสุดของแบบจำลอง (Z_{min}) รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์จำนวน 18 ขั้นตอน แสดงในรูปที่ 5 โดยเริ่มจากการกำหนดค่าความเค้นเริ่มต้น (ค่าหน่วยน้ำหนักและค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง) ต่อมาจึงจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาตึนซีเมนต์ ชั้นถ่ายแรง และคันทางตามลำดับ การถมคันทางจะแบ่งการถมเป็นชั้นๆ ละ 0.5 เมตร และทุกๆ การถม 1 เมตร จะทำการอัดตัวคาน้ำเป็นระยะเวลา 1 วัน หลังจากถมครบ 3 เมตร จะทำการอัดตัวคาน้ำจนถึง 7, 14, 21, 28, 35, 42, 56 และ 77 วัน ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

3.1 การทรุดตัว

ค่าการทรุดตัวจากการทดสอบคันทางในสนาม และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่มีความน่าเชื่อถือ นั่นคือ

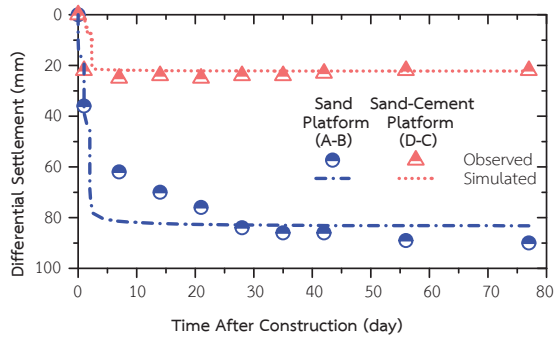


รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการทรุดตัวระหว่างผลตรวจวัดกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

อัตราการทรุดตัวของคันทาง มีค่าสูงหลังจากการก่อสร้าง และค่อยๆ ลดลงจนคงที่ภายหลังจากก่อสร้างคันทางแล้วเสร็จ 2 สัปดาห์ (รูปที่ 6) สำหรับผลการตรวจวัดการทรุดตัวหลังการก่อสร้าง 77 วัน ของดินรอบเสาตึนซีเมนต์สำหรับคันทางทดสอบที่มีชั้นถ่ายแรงเป็นทรายบดอัด และชั้นทรายผสมซีเมนต์บดอัดพบว่า มีค่าเท่ากับ 119 และ 53 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง A และ D [รูปที่ 3 (ก)] ตามลำดับ สำหรับค่าการทรุดตัวเหนือเสาตึนซีเมนต์สำหรับคันทางที่มีชั้นถ่ายแรงเป็นทรายบดอัดและชั้นทรายผสมซีเมนต์บดอัดเท่ากับ 29 และ 31 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง B และ C [รูปที่ 3 (ก)] ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงชั้นถ่ายแรง โดยการเพิ่มความแกร่งด้วยการใช้ทรายผสมซีเมนต์ สามารถลดการทรุดตัวของดินรอบเสาตึนซีเมนต์ได้

3.2 การทรุดตัวที่ต่างกัน

ค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างตำแหน่งเหนือเสาตึนซีเมนต์ และตำแหน่งเหนือดินรอบเสาตึนซีเมนต์ที่ระดับดินเดิมของคันทางที่มีชั้นถ่ายแรงเป็นชั้นทรายบดอัด (ค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างจุด A และ B) และชั้นทรายผสมปูนซีเมนต์

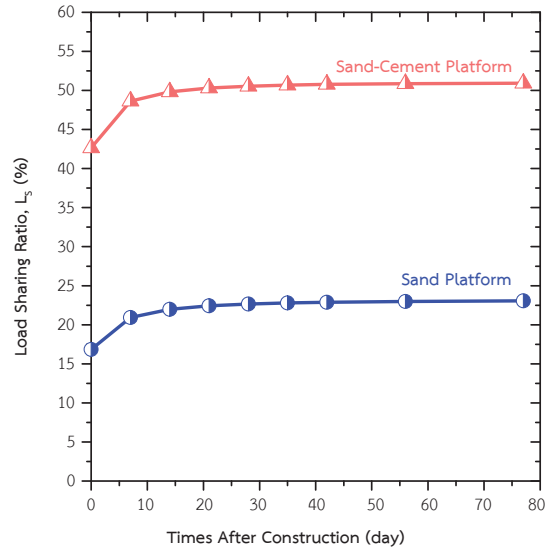


รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการทรุดตัวที่ต่างกัน

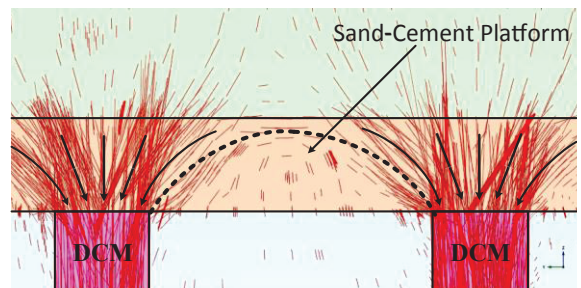
บดอัด (ค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างจุด C และ D) มีค่าเท่ากับ 90 และ 22 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากตรวจวัดจากคันทงทดสอบภายหลังการก่อสร้าง 77 วัน (รูปที่ 7) แสดงให้เห็นว่า การใช้ทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดเป็นชั้นถ่ายแรงของคันทงช่วยลดค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาดินซีเมนต์และดินโดยรอบได้ถึง 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายบดอัด นั่นคือ การใช้วัสดุที่มีความแกร่งกว่า มาเป็นชั้นถ่ายแรงของคันทงจะมีประสิทธิภาพในการลดค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้ดีกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการทรุดตัวที่แตกต่างกันเมื่อปรับปรุงชั้นถ่ายแรงระหว่างการก่อสร้างด้วยเสาดินซีเมนต์ในการศึกษานี้ และด้วยเสาเข็มคอนกรีตที่มีความแกร่งมากกว่า พบว่าการก่อสร้างโดยใช้เสาดินซีเมนต์สามารถลดการทรุดตัวที่ต่างกันได้อย่างคลึงกับการใช้เสาเข็มคอนกรีต [13]

3.3 พฤติกรรมการถ่ายแรง

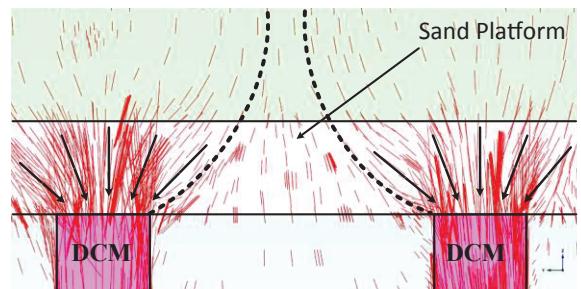
รูปที่ 8 แสดงร้อยละของน้ำหนัก (Load) ที่กระทำบนเสาดินซีเมนต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม พบว่าการปรับปรุงคุณภาพชั้นถ่ายแรงด้วยการผสมปูนซีเมนต์ร่วมกับทรายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพอัตราส่วนการรับน้ำหนักที่กระทำบนเสาดินซีเมนต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (Load Sharing Ratio) มากกว่าการใช้ชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายบดอัดจากร้อยละ 23.1 เป็นร้อยละ 50.9 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) เนื่องจากภายในชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัด



รูปที่ 8 อัตราส่วนการรับน้ำหนักของเสาดินซีเมนต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลัก (ก) ชั้นทรายผสมปูนซีเมนต์ (ข) ชั้นทรายบดอัด

และชั้นทรายบดอัด มีลักษณะกลไกการถ่ายน้ำหนักที่ต่างกัน ทั้งนี้ทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลักสามารถชี้ แสดงรูปร่างของโค้งถ่ายแรง [13]–[15]

$$L_s (\%) = \frac{L_{pile}}{L_{applied}} \times 100 \quad (1)$$

L_s คือ ร้อยละของน้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็มซีเมนต์ (Load Sharing Ratio) L_{pile} , $L_{applied}$ คือ น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็มซีเมนต์ และน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลักของแต่ละชั้นถ่ายแรงมีทิศทางที่ต่างกัน โดยทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลักภายในชั้น ถ่ายแรงที่เป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีการก่อตัวเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลมจากหัวเสาเข็มซีเมนต์สองต้นเข้าหากัน (Soil Arching) ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) ในขณะที่ รูปที่ 9 (ข) แสดงเส้นการก่อตัวของความเค้นหลักในชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายบดอัด มีรูปแบบเป็นเส้นโค้งจากหัวเข็มขึ้นสู่ดินคันทาง ผลของความแกร่งที่เพิ่มขึ้นของชั้นถ่ายแรงทำให้น้ำหนักจากคันทางที่มีชั้นถ่ายแรงเป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดสามารถถ่ายลงสู่เสาเข็มซีเมนต์ได้ดีกว่า

4. สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงความแกร่งของชั้นถ่ายแรงภายใต้การรับแรงจากคันทางที่มีผลต่อการทรุดตัวและกลไกการถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราการทรุดตัวของดินใต้คันทางมีค่าสูงภายหลังการก่อสร้าง และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น
2. ค่าความแกร่งของชั้นถ่ายแรงของคันทาง ไม่ได้มีผลต่อค่าการทรุดตัวของเสาเข็มซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ
3. ค่าความแกร่งของชั้นถ่ายแรงของคันทาง มีผลต่อค่าการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาเข็มซีเมนต์และดินโดยรอบ โดยวัสดุที่มีค่าความแกร่งมากกว่า จะช่วยลดการทรุดตัวที่ต่างกันได้ดีกว่า
4. กลไกการถ่ายแรงในชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายผสม

ปูนซีเมนต์บดอัด มีทิศทางของความเค้นหลักที่สามารถก่อตัวในรูปแบบของแนวโค้งรับแรง (Soil Arching) ได้ดีกว่าชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายบดอัด ส่งผลให้น้ำหนักจากคันทางที่มีชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดถ่ายลงสู่เสาเข็มซีเมนต์ได้ดีกว่า และเป็นที่ยืนยันถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุงความแกร่งของชั้นถ่ายแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับเสาเข็มซีเมนต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนทุนการศึกษาเพชรโยธา และเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6111

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. B. Cox, “The settlement of a 55-km long highway on soft Bangkok clay,” in *Proceedings of The 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1981, pp. 101–104.
- [2] D. T. Bergado, S. Ahmed, C. L. Sampaco, and A. S. Balasubramaniam, “Settlement of Bangna-Bangpakong highway on soft Bangkok clay,” *Geotechnical Engineering*, vol. 116, no. 1, pp. 136–155, 1990.
- [3] P. Jamsawang, P. Voottipruex, P. Boathong, W. Mairaing, and S. Horpibulsuk, “Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows,” *Engineering Geology*, vol. 188, pp. 159–167, 2015.
- [4] P. Voottipruex, K. Petchgate, and D. T. Bergado, “Differential settlement between cement column and surrounding soil due to embankment



- load,” in *Proceedings of the Engineering Practice and Performance of Soft Deposits*, 2004, pp. 235–240.
- [5] K. Petchgate and S. Saejium, “The study of differential settlement between cement column and surrounding soil due to external load,” in *Proceedings of the Conference on Ground Improvement and Geosynthetics*, 2002, pp. 283–298.
- [6] P. Yensri, A. Wonglert, and P. Jongpradist, “Behavior of t-shaped deep cement mixing piles under unit cell embankment tests by a physical model,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 3, pp. 339–354, 2017 (in Thai).
- [7] D. T. Bergado, P. Jamsawang, T. Tanchaisawat, Y. P. Lai, and G. A. Lorenzo, “Performance of reinforced load transfer platforms for embankments supported by deep cement mixing piles,” *Geotechnical Special Publications*, no. 178, pp. 628–637, 2008.
- [8] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 1943.
- [9] Z. Z. Zu, R. P. Chen, and Y. M. Chen, “Field test on technique of cap-pile supported embankment,” *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, vol. 42, pp. 1484–1488, 2008.
- [10] T. Kriengtaweekit, A. Wonglert, S. Petchmali, P. Jongpradist, W. Kongkitkul, and C. Submanee Wong, “Impact of stiffness of load transfer slab on settlement behavior of cement-column supported road embankment,” in *Proceedings The 19th National Convention on Civil Engineering*, pp. 1739–1744, 2014.
- [11] D. T. Bergado, T. Ruenkrairergsa, Y. Taesiri, and A. S. Balasubramaniam, “Deep soil mixing used to reduce embankment settlement,” *Ground Improvement*, vol. 3, no. 2, pp. 145–162, 1999.
- [12] A. Wonglert, P. Jongpradist, P. Jamsawang, and S. Larsson, “Bearing capacity and failure behaviors of floating stiffened deep cement mixing columns under axial load,” *Soils and Foundations*, vol. 58, no. 2, 2018.
- [13] U. S. Okyay and D. Dias, “Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform,” *Engineering Geology*, vol. 114, no. 1–2, pp. 34–44, 2010.
- [14] P. Villard, A. Huckert, and L. Briançon, “Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Numerical approach and design,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 44, no. 3, pp. 381–395, 2016.
- [15] G. S. Pardo and E. Sáez, “Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand,” *Computers and Geotechnics*, vol. 57, pp. 75–84, 2014.