

ประสิทธิภาพของไม้ยูคาลิปตัสในการเสริมกำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม : การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมคันดินทดสอบ

อนุชา วงษ์เลิศ¹ พรเกษม จงประดิษฐ์²

^{1,2}มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

พิทยา แจ่มสว่าง³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

และ วรพจน์ เพชรเกตุ⁴

⁴บริษัท เกษมดีชาयน์ แอนด์ คอนซัลแทนท์ จำกัด ราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งเสริมแกนด้วยไม้ยูคาลิปตัสที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวในเขตกรุงเทพฯ เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของการใช้ไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเสริมกำลังในเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามจริง ทั้งนี้ทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวและสร้างคันดินทดสอบในสนามที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้พื้นถ่ายแรงแบบแกร่งรองรับ ตลอดจนถึงติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า การทรุดตัวแรงดันน้ำส่วนเกิน และการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการถ่ายแรงจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบๆ จากผลการศึกษา พบว่าการเสริมกำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยไม้ยูคาลิปตัสทำให้ความแข็งแรงของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วยทำให้น้ำหนักจากคันดินถ่ายลงสู่เสาเข็มเพิ่มมากขึ้น และช่วยให้การเสีयरูปด้านข้างลดลง อันนำมาซึ่งความดันน้ำส่วนเกินและการทรุดตัวในดินที่น้อยลง ดังนั้น การเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยไม้ยูคาลิปตัสจึงช่วยลดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของเสาเข็มและดินรอบๆ

คำสำคัญ : เสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลัง / ชั้นพื้นถ่ายแรงแบบแกร่ง / ไม้ยูคาลิปตัส / กำลังแบกทาน

* Corresponding author : pornkasem.jon@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

4 ผู้จัดการบริษัท

Efficiency of Using Eucalyptus Wood to Reinforce Deep Cement Mixing Piles in Field: Pile Load and Embankment Tests

Anucha Wonglert¹ Pornkasem Jongpradist^{2*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

Pitthaya Jamsawang³

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

and Worapot Petchgate⁴

Kasem Design & Consultant Co. Ltd., Ratburana, Bangkok 10140

Abstract

This study aimed at investigating the efficiency of using eucalyptus wood as a reinforced member in deep cement mixing (DCM) piles for Bangkok soft clay. Field pile load tests and full-scale embankment tests as supported by a rigid load transfer platform were performed in the field. Settlement of piles and surrounding soil, excess pore water pressure, and lateral movement of the surrounding soil at the toe of the embankment were monitored to understand the load transfer mechanism between the DCM piles and the surrounding soil. The results indicated that increasing the pile stiffness by inserting eucalyptus wood in the DCM piles could increase the load transfer from the embankment to the piles. As a result, the lateral movement, excess pore water pressure and settlement of the soil surrounding the piles decreased. Thus, DCM piles with eucalyptus wood are capable of reducing the differential settlement between DCM piles and surrounding soil.

Keywords : SDCM / Load Transfer Platform / Eucalyptus Wood / Bearing Capacity

* Corresponding author : pornkasem.jon@kmutt.ac.th

¹ Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Manager

1. บทนำ

ปัญหาที่มักจะพบเมื่อก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อน คือ การทรุดตัวของโครงสร้างและการพังทลายอันเนื่องมาจากกำลังรับแรงของดินเหนียวอ่อนค่อนข้างน้อยและมีการยุบตัวของดินเมื่อมีน้ำหนักกระทำ การปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นจึงเป็นทางเลือกและขั้นตอนสำคัญในการก่อสร้าง การปรับปรุงคุณภาพดินสามารถทำได้หลากหลายวิธีและแนวคิด รวมไปถึงเทคนิคในการก่อสร้างและวัสดุ โดยแต่ละวิธีมีความเหมาะสมแตกต่างกันไปในแต่ละงาน ทั้งในด้าน เวลา ค่าใช้จ่าย และความซับซ้อน ในประเทศไทยได้มีการนำวิธีต่างๆ มาใช้อย่างต่อเนื่องในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้อย่างแพร่หลาย [1] ทั้งใช้เป็นกำแพงกันดิน [2] ป้องกันการพังทลายของลาด การป้องกันการรั่วซึม โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นโครงสร้างฐานรากของถนน [3,4] นอกจากนี้ปัญหาการพังทลายระหว่างก่อสร้างและค่าก่อสร้างที่ราคาค่อนข้างสูง ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งเมื่อนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาใช้เป็นฐานรากโครงสร้างถนนคือเกิดการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มและดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 1 (a) ก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวของผิวถนนที่นำไปสู่ความเสียหายหรืออาจก่อให้เกิดอันตรายในการใช้งาน การลดระยะห่างระหว่างเสาเข็มสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้แต่ทำให้ทั้งราคาและระยะเวลาในการก่อสร้างสูงขึ้น ในขณะที่ในทางปฏิบัติมีความพยายามที่จะเพิ่มระยะห่างเพื่อทำให้การก่อสร้างเร็วขึ้น การศึกษาหลายชิ้น [5,6,7,8] ได้เสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยนำแผ่น Geo-Grid มาปูรองที่หัวเสาเข็มเพื่อถ่ายน้ำหนักที่กระทำลงดินบริเวณระหว่างหัวเสาเข็มเข้าไปสู่เสาเข็ม

แต่ประสิทธิภาพก็ยังไม่ดีพอ เนื่องจากการใช้ Geo-Grid ปูที่หัวเสาเข็มนั้นต้องอาศัยแรงส่วนหนึ่งทำให้เกิดแรงดึงภายในตัว Geo-Grid ก่อน Geo-Grid จึงจะเริ่มทำงานได้ ในปี 2557 Kriengtaweekit et al. [9] ได้ศึกษาชั้นพื้นถ่ายแรงแบบแกร่ง (Rigid Load Transfer Slab) วางเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อถ่ายแรงจากชั้นทางลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าชั้นพื้นถ่ายแรงแบบแกร่งสามารถช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินระหว่างเสาเข็มได้ดีกว่าชั้นพื้นถ่ายแรงแบบเดิมที่ใช้อยู่ซึ่งมักจะเป็นชั้นทรายบดอัด สิ่งที่ได้คือการเพิ่มความแกร่งของชั้นถ่ายแรงทำให้น้ำหนักบรรทุกถ่ายลงสู่หัวเข็มได้มากขึ้น

การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณหัวเข็มนั้นก็ เป็นอีกปัจจัยที่ต้องพิจารณา เนื่องจากปรกติแล้วการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นจะมีค่ามากที่สุดในส่วนของหัวเสาเข็มและจะลดลงเมื่อมีความลึกเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆ เสาเข็ม จึงมักจะทำให้เสาเข็มเกิดการวิบัติที่บริเวณส่วนบนของเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) [10] การนำวัสดุที่มีความแข็งแรงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์มาเสริมกำลังในส่วนบนของเสาเข็ม จึงถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น [11] แทนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุผสมเพิ่มเช่น ฝักลอย [12,13,14] ให้เสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งต้น เพราะไม่เพียงลดความเสียหายของเสาเข็มที่บริเวณหัวเข็มแล้วยังสามารถลดการทรุดตัวได้อีกด้วย [15] นอกจากนี้การทำให้เสาเข็มส่วนบนแกร่งขึ้นน่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายแรงจากโครงสร้างทางมาสู่เสาเข็ม (Load Sharing Ratio) มากขึ้นด้วย



a



b

รูปที่ 1 (a) ลักษณะถนนที่เสียหายจากการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็ม (b) การวิบัติที่บริเวณส่วนบนของเข็มดินซีเมนต์หลังจากทดสอบการรับแรง [10]

ในการศึกษาที่ผ่านมาวัสดุที่นำมาใช้เสริมแรงได้แก่ เหล็กและคอนกรีตเสริมแรง แต่การศึกษาของ Wonglert and Jongpradist [16] พบว่า การใช้วัสดุที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่มาก เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งราคาถูกและหาได้ง่ายเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงได้ โดยยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้คอนกรีตหรือว่าเหล็กในช่วงการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าว ยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาเบื้องต้นด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเท่านั้น และการพิจารณาเป็นเพียงภายใต้การรับแรงของเสาเข็มเดี่ยวหรือการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile Load Test)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันถึงประสิทธิผลของการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเสริมกำลังในเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาพจริง การศึกษาเริ่มจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มในสนามเพื่อยืนยันผลการศึกษาที่ผ่านมา จากนั้นศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของดินใต้คันทางทดสอบ (Full-Scale Embankment Test) ด้วยการตรวจ

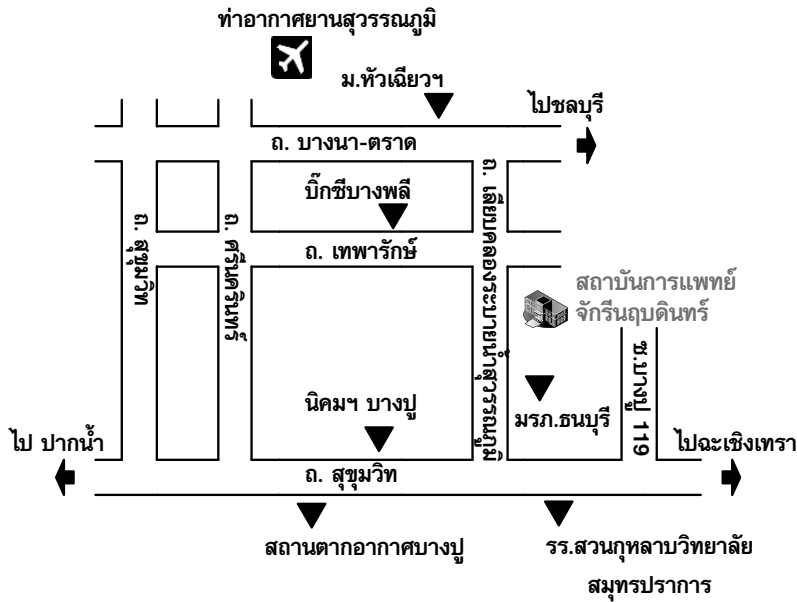
วัดจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ ทำให้เข้าใจพฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นด้วย

2. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเพื่อทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองประเภทได้แก่เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีและไม่มีเสริมแกนด้วยไม้ยูคาลิปตัสและการทดสอบการรับน้ำหนักภายใต้คันดิน ที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีและไม่มีเสริมแกนด้วยไม้ยูคาลิปตัสเป็นฐานราก

2.1 ลักษณะชั้นดิน

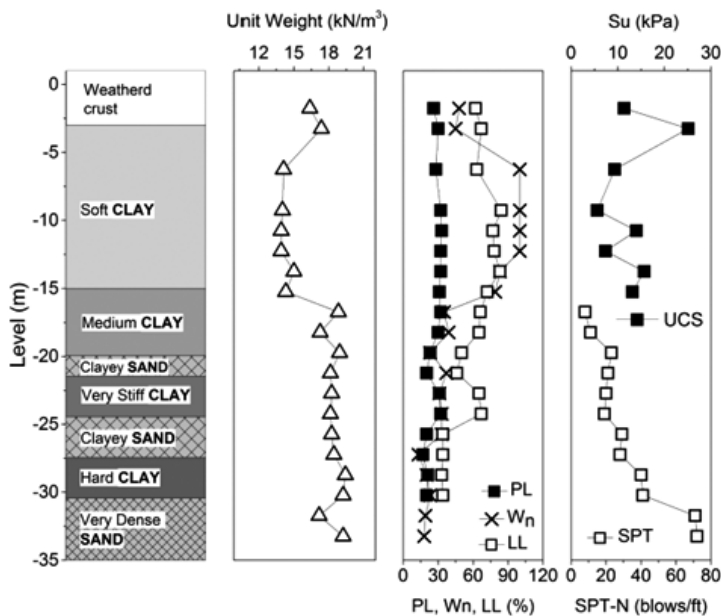
สถานที่ที่ใช้ทั้งก่อสร้างและทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มและการรับน้ำหนักภายใต้คันดินอยู่ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างศูนย์การแพทย์จักรีนฤพดินทร์ โรงพยาบาลรามาริบัติ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ รูปที่ 2 แสดงแผนที่ตั้งของสถานที่ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 2 แผนที่แสดงที่ตั้งสถานที่ก่อสร้าง

ลักษณะชั้นดินของบริเวณที่ทำการศึกษาคือเป็น ที่ราบลุ่ม ประกอบด้วย ชั้นดินถมที่ระดับ +1.00 ถึง -1.00 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อนที่ระดับ -1.00 ถึง -15.00 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางที่ระดับ -15.00 ถึง -20.00 เมตร ชั้นทรายละเอียดผสมดินเหนียวที่ระดับ -20.00 ถึง -21.50 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับ -21.50

ถึง -25.50 เมตร ชั้นทรายละเอียดผสมดินเหนียวที่ระดับ -25.50 ถึง -27.50 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งมากที่ระดับ -27.50 ถึง -30.50 เมตร และชั้นทรายแน่นที่ระดับ -30.5 ถึง -60.5 เมตร และคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินซึ่ง ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างแบบไม่ถูกรบกวน แสดงในรูปที่ 3

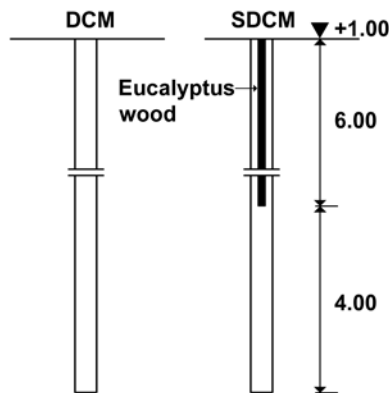


รูปที่ 3 ชั้นดินและคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ณ สถานที่ก่อสร้าง

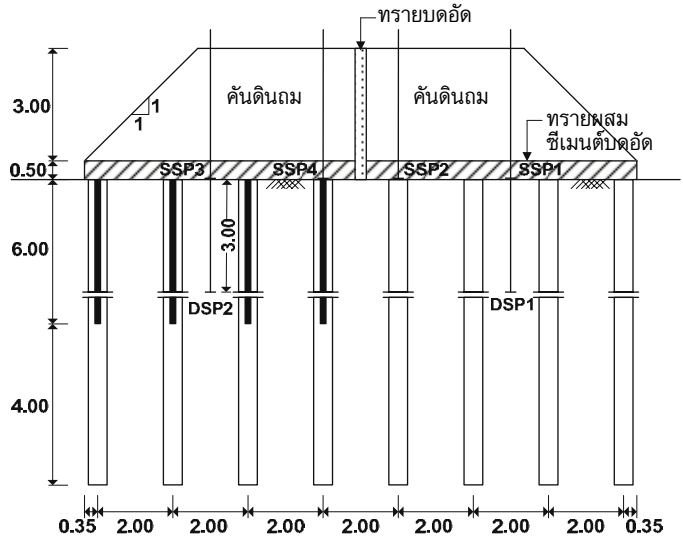
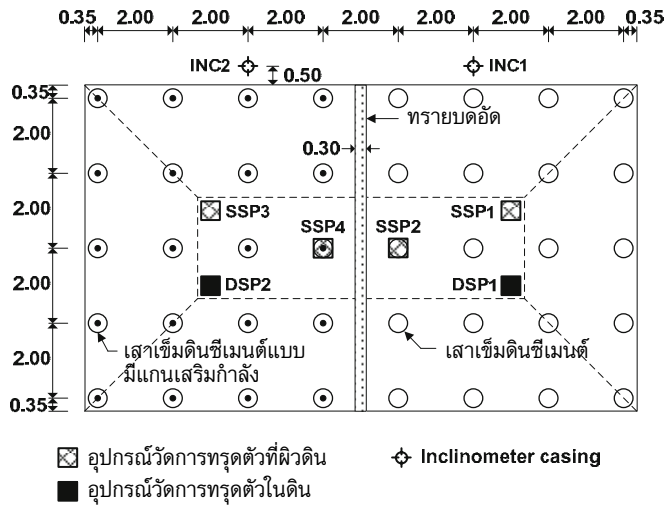
2.2 ขั้นตอนในการก่อสร้าง เสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีและไม่มีแกนเสริม กำลังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เมตร ยาว 10.0 เมตร โดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมด้วยไม้ยูคาลิปตัสและแบบปรกติอย่างละต้นดังแสดงรูปที่ 4 และการทดสอบคั้นดินดังแสดงผังการก่อสร้างในรูปที่ 5 ในการศึกษาครั้งนี้ทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยวิธีฉีดน้ำปูนแรงดันสูง (High Pressure Grouting) ดังรูปที่ 6a ที่ความดัน 250 บาร์ ทั้งในขั้นตอนการฉีดน้ำเปล่าเพื่อทำลายโครงสร้างของดินในซาลงและในขั้นตอนการฉีดน้ำปูนเพื่อก่อสร้างเสาเข็มในซาลง โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักรับน้ำต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 1.1 ต่อ 1.0 โดยที่เครื่องจักรที่ทำการก่อสร้างถูกควบคุมอัตราการ

หมุนและอัตราการชักก้านฉีดน้ำปูนด้วยระบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมให้มีอัตราน้ำหนักรับน้ำปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเปียกเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังก่อสร้างโดยเสียไม้ยูคาลิปตัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.15 เมตร ยาว 6.00 เมตร ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแนวตั้งหลังจากทำการฉีดน้ำปูนเพื่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 6b ทั้งนี้ได้ทำการสร้างเสาเข็มเพิ่มเติม 2 ต้น บริเวณใกล้เคียงเพื่อทำการเจาะตัวอย่างเพื่อนำมาทำการทดสอบ Unconfined Compression Test ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาลำตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์หลังจากมีอายุได้ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของเสาเข็มแบบมีและไม่มีแกนเสริม กำลังที่ใช้ในการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม



รูปที่ 5 แสดงขนาดและรายละเอียดของการติดตั้งเครื่องมือวัดบนหัวเสาเข็มและในดินใต้คันทง



a



b

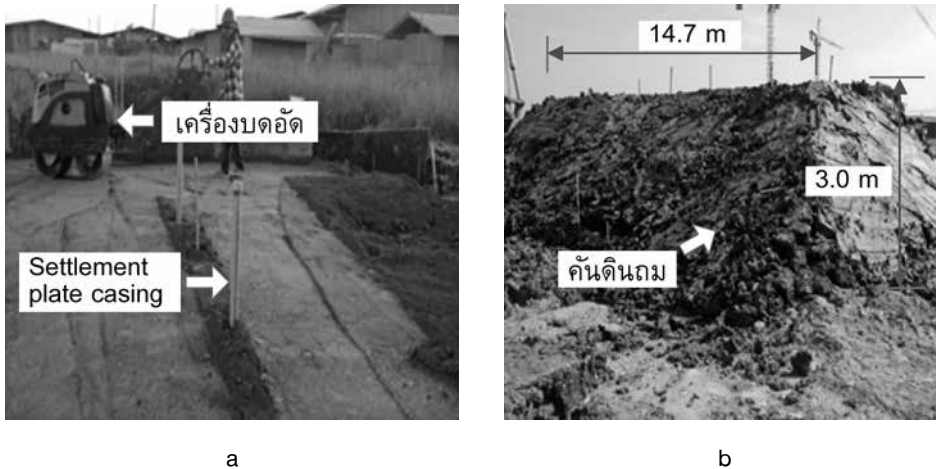
รูปที่ 6 (a) แสดงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการฉีดน้ำปูนแรงดันสูง (b) แสดงการติดตั้งไม้ยูคาลิปตัสที่ตำแหน่งกลางเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นแกนเสริมกำลัง

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบ Unconfined compression test ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากการเจาะทดสอบ

Col. No.	Depth (m)	q_u (kPa)
1	0.0-5.0	1,410
	6.0-10.0	1,330
2	0.0-5.0	960
	6.0-10.0	1,136

พื้นถ่ายแรงแบบแกร่ง

พื้นถ่ายแรงแบบแกร่ง (Rigid Load Transfer Platform) ทำหน้าที่ถ่ายแรงจากโครงสร้างชั้นทางลงสู่โครงสร้างฐานราก สร้างจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับทราย โดยใช้ปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรทรายเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ความชื้นประมาณ ร้อยละ 9.6 ทำการอัดหนา 0.50 เมตร ที่ความหนาแน่นแห้งประมาณ 2.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตรหลังจากทำการเปิดหัวเข็มเมื่อเสาเข็มมีอายุมากกว่า 28 วัน โดยใช้เครื่องบดอัดดินแบบเดินตาม ดังแสดงในรูปที่ 7a



รูปที่ 7 (a) แสดงการก่อสร้างชั้นพื้นถ้ายแรง (b) แสดงคั่นดินถมในสนามสูง 3.0 เมตร

คั่นดินถม

คั่นดินถมขนาด กว้าง 8.7 เมตร ยาว 14.7 เมตร สูง 3.00 เมตร ดังรูปที่ 7b ก่อสร้างบนชั้นพื้นถ้ายแรงแบบแครง โดยมีทรายบดอัดเป็นตัวแบ่งคั่นดินของเสาเข็มทั้งสองประเภท เพื่อให้คั่นดินทั้งสองทรุดตัวอย่างอิสระดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5 ทำการก่อสร้างเป็น 3 ชั้นๆ ละ 1 เมตร

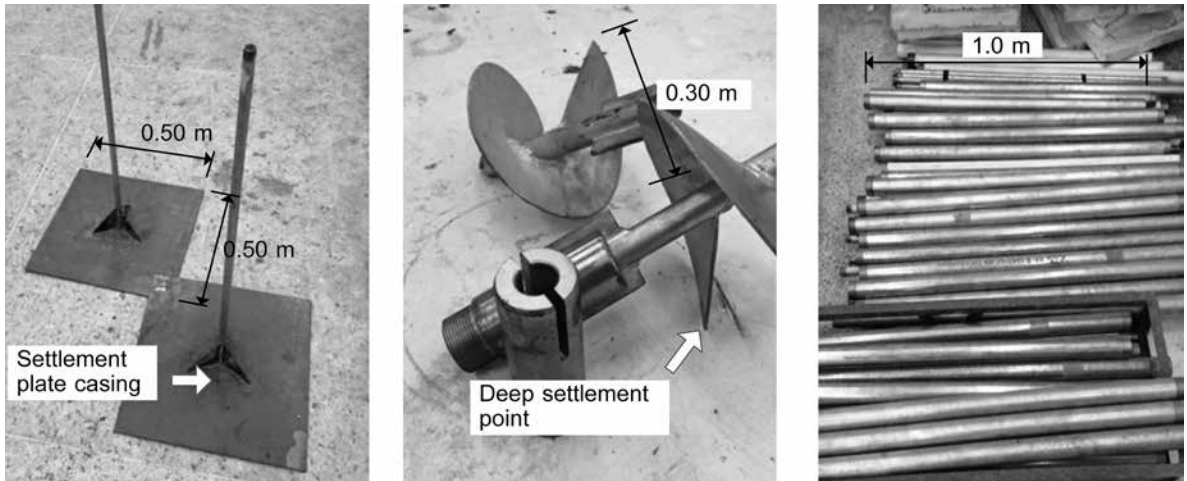
แกนเสริมกำลัง

แกนเสริมกำลัง (Reinforced Core) ที่ถูกนำมาใช้คือไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจากไม้ชนิดนี้มีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถโตได้เร็ว เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแกนเสริมกำลัง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 เซนติเมตร ยาว 6 เมตร จากการศึกษาของ Kansaengkaew [17] พบว่าโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติทางวิศวกรรมของไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างจะมีค่าหน่วยแรงอัดขนานเส้นเฉลี่ยที่จุด Proportional Limit เท่ากับ 18.03 เมกะปาสคาล, หน่วยแรงอัดขนานเส้นปลายเฉลี่ยเท่ากับ 25.96 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 5,517.90 กิโลปาสคาล และมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 48.35 เปอร์เซ็นต์

2.3 อุปกรณ์ตรวจวัด

เพื่อติดตามพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบๆ เสาเข็มใต้คั่นดินถมที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีและไม่มีแกนเสริมกำลัง ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ หลังจากติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ก่อนที่จะก่อสร้างคั่นดินถม แสดงผังการติดตั้งในรูปที่ 5 โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้

2.3.1 อุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface Settlement Plate, SSP) ถูกติดตั้งบริเวณผิวดินระหว่างเสาเข็มและบริเวณหัวเสาเข็ม ซึ่งทำจากแผ่นเหล็กทาสีกันสนิม ขนาด 50x50x0.6 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับแกนท่อเหล็กชุบกล้าไนซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8a ในระหว่างทำการติดตั้งแกนท่อเหล็กถูกต่อให้ยาวขึ้นตามความสูงของคั่นดินถมและถูกป้องกันไม่ให้สัมผัสกับคั่นดินถมด้วยปลอกท่อเหล็กชุบกล้าไนซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร (รูปที่ 8c) ตลอดความยาวของแกนอุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่อยู่ในคั่นดินถม โดยใช้กล้องระดับในการตรวจวัดการทรุดตัว



รูปที่ 8 (a) อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (b) อุปกรณ์การวัดการทรุดตัวแบบลึก และ (c) ปลอกเหล็กของอุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดตัว

2.3.2 อุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดตัวแบบลึก (Deep Settlement Point, DSP) ถูกติดตั้งไว้ที่ความลึก 3.0 เมตร จากผิวดินระหว่างเสาเข็ม ทำจากแผ่นเหล็กเชื่อมต่อกับแกนเหล็กเป็นเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 8b ติดตั้งโดยหมุนลงไปในพื้นที่ความลึกที่ต้องการโดยใช้ปลอกเหล็ก (Casing) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร (รูปที่ 8c) เช่นเดียวกับอุปกรณ์ตรวจวัดการทรุดตัวของที่ผิวดิน

2.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดการเอียงตัว (Inclinometer, INC) ติดตั้งบริเวณข้างคันดินห่างจากเสาเข็ม 0.5 เมตร เพื่อวัดการเอียงตัวของดินข้างเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักมากระทำในแนวตั้ง โดยที่ท่อ (Inclinometer Casing) มีความลึก 17.5 เมตร จากผิวดิน แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการตรวจวัดการเอียงตัว

2.3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Pressure Transducer, PPT) ถูกติดตั้งที่ความลึก 3.0 เมตร จากผิวดินโดยการดันลงในชั้นดิน (Pushing) เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำแบบอิเล็กทรอนิกส์ ติดตั้งอยู่ในส่วนหัวที่เป็นทองเหลืองแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ KU- Pizometer

2.4 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile Load Test)

การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D1143 โดยวิธีการให้น้ำหนักแบบเร็ว (Quick Loading Test) ทำการเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 1 ตัน และค้างน้ำหนักไว้หนักละ 10 นาที วัดการทรุดตัวโดยใช้อุปกรณ์วัดการทรุดตัว (Displacement Transducer) 4 ตัว และอุปกรณ์วัดแรง (Load Cell) เพื่อบันทึกค่าแรงที่กระทำต่อเสาเข็มตลอดการทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยทำการเพิ่มน้ำหนักจนกว่าเสาเข็มจะเกิดการวิบัติ โดยที่เกณฑ์ในการวิบัติคือ เมื่อเสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้แต่อัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นสูง

การทดสอบการรับน้ำหนักภายใต้ดินถม (Embankment Test)

การทดสอบการรับน้ำหนักภายใต้ดินถมเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของคันทางในระยะเวลา 2.5 เดือนหลังจากให้น้ำหนักโดยถมคันทาง ในการศึกษาตรวจวัดค่าเริ่มต้นของอุปกรณ์ต่างๆ หลังจากก่อสร้างชั้นพื้นถ่ายแรงแล้วเสร็จ ต่อด้วยการถมคันดินสูงครั้งละ 1 เมตร จนครบที่ความสูง 3 เมตร หลังจากนั้นทำการตรวจวัดค่าต่างๆ ที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ โดยในช่วง 2 อาทิตย์แรกตรวจวัดบ่อยครั้ง และมีความถี่ของการตรวจวัดน้อยลงหลังจากนั้น

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

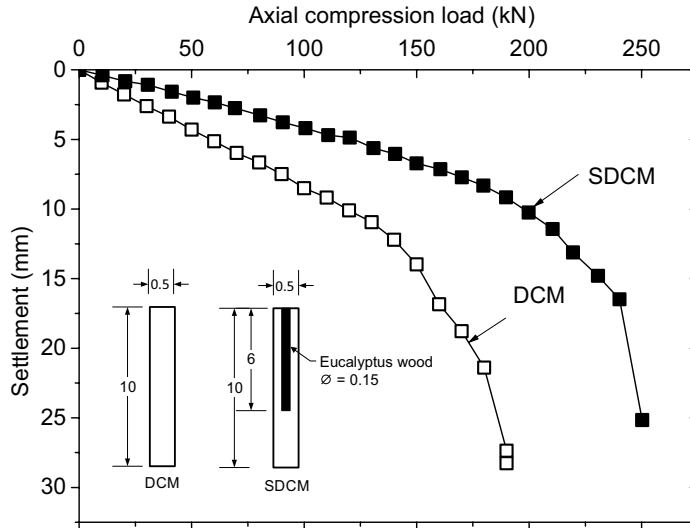
การทรุดตัวที่แตกต่างกันมากจนเกินไปของโครงสร้างฐานรากของถนนเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้ถนนเกิดความวิบัติหรือเกิดความเสียหายจนทำให้เกิดความอันตรายในการใช้งาน การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลของการทรุดตัวประกอบไปด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการรับกำลังของเสาเข็มและผลการตรวจวัดจากเครื่องมือต่างๆ ที่ถูกติดตั้งไว้ในการทำการทดสอบคันดินถมสูง 3.0

เมตร ที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังและแบบไม่มีแกนเสริมกำลัง โดยมีชั้นโครงสร้างถ่ายแรงแบบแครงเป็นตัวถ่ายน้ำหนักจากคันดินลงสู่เสาเข็ม

3.1 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกระทำกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ให้กับการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ยาว 10.0 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.50 เมตร ที่มีและไม่มี การเสริมกำลังด้วยไม้ยูคาลิปตัสยาว 6.0 เมตร ที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม จากผลที่ได้จากการทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่ไม่ได้เสริมกำลัง และเสริมกำลังด้วยไม้ยูคาลิปตัสเท่ากับ 190 กิโลนิวตัน และ 250 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้ยืนยันว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมกำลังด้วยไม้ยูคาลิปตัสสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าและเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกเท่ากัน เกิดการทรุดตัวน้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปรกติอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของแรงภายในที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจะมีค่ามากในส่วนบนและค่อยๆ ลดลงตามความลึก การเสริมกำลังด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงกว่า ส่งผลให้แรงส่งถ่ายมาที่แกนเสริมมากกว่า ด้วยความแกร่งของแกนเสริมที่มากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่เสริมแกนมีค่าน้อยกว่าเมื่อรับแรงที่เท่ากัน และจากการคำนวณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธี Alpha Method พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริมกำลังเกิดการวิบัติเนื่องจากเสาเข็ม (Pile Failure Mode) และเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมกำลังวิบัติเนื่องจากดินรอบๆ เสาเข็ม (Soil Failure Mode) แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังสามารถทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนไปได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wonglert and Jongpradist [18]

จากพฤติกรรมที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์นำไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ในการเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อรองรับโครงสร้างคันทางของถนน เพื่อจะช่วยลดการทรุดตัวของคันทางได้

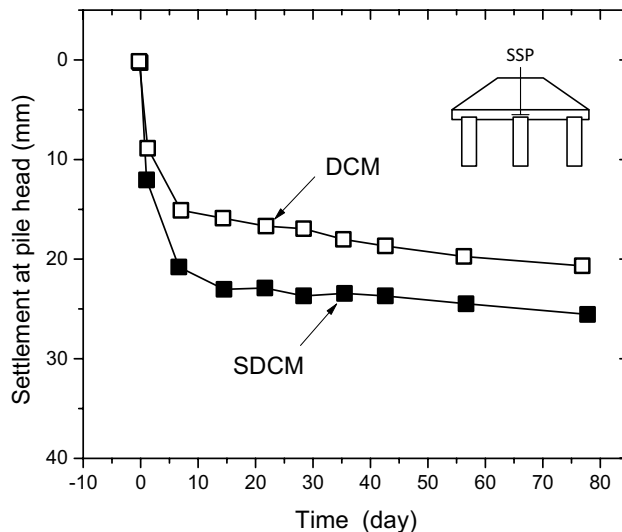


รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก - การทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองชนิด

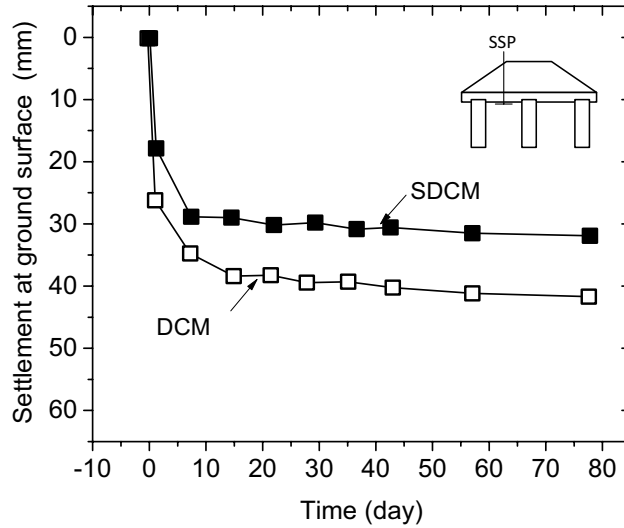
3.2 ลักษณะการทรุดตัวจากการทดสอบคันดิน

หลังจากการก่อสร้างคันดินถมสูง 3.0 เมตร น้ำหนักบรรทุกได้ส่งถ่ายต่อเสาเข็มผ่านชั้นโครงสร้างถ่ายแรงแบบแกระง การทรุดตัวที่หัวเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบมีและไม่มีแกนเสริมกำลังที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดการ

ทรุดตัวแบบตื้น (Surface Settlement Plate, SSP) หมายเลข SSP2 และ SSP4 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 2 สัปดาห์แรก ประมาณ 15.0 และ 23.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีอัตราการทรุดตัวน้อยลงหลังจาก 2 สัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 12



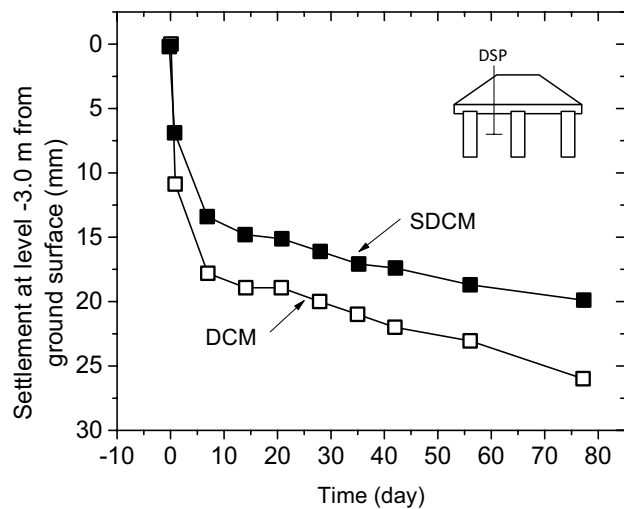
รูปที่ 12 แสดงการทรุดตัวที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มตามเวลาหลังก่อสร้างคันทาง



รูปที่ 13 แสดงการทรุดตัวของผิวดิน ณ ตำแหน่งผิวดินบริเวณระหว่างเสาเข็ม ตามเวลาหลังก่อสร้างคันทาง

รูปที่ 13 แสดงการทรุดตัวของผิวดิน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาเข็ม เนื่องจากน้ำหนักที่กระทำผ่านชั้นโครงสร้างถ่ายแรงแบบแกลงมายังผิวดิน ทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว โดยในช่วง 2 สัปดาห์แรกหลังจากก่อสร้างคันดิน เกิดขึ้นประมาณ 28 มิลลิเมตร ได้ค้นดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังและประมาณ 38 มิลลิเมตร ได้ค้นดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริม

กำลังรองรับ แต่หลังจากนั้น การทรุดตัวเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการทรุดตัวของดินที่มีความลึกที่ระดับ 3.0 เมตรจากผิวดินที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวแบบลึก (Deep Settlement Point, DSP) หมายเลข DSP1 และ DSP2 ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งการทรุดตัวของเสาเข็มแบบมีแกนเสริมกำลังมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มแบบไม่มีแกนเสริมกำลัง

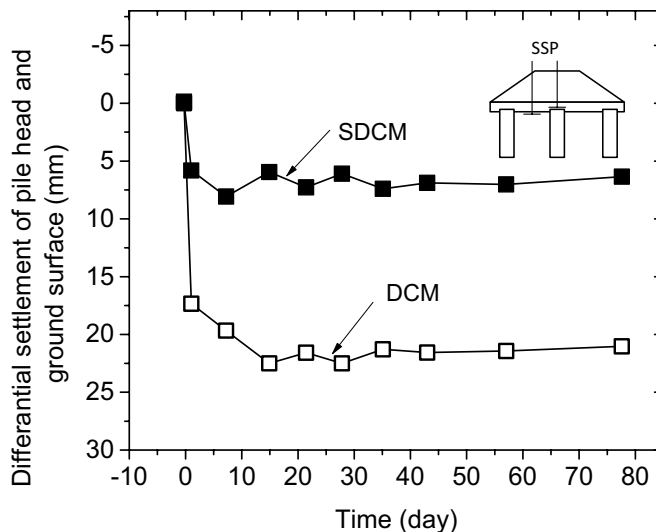


รูปที่ 14 แสดงการทรุดตัว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาเข็มที่ ความลึก 3.0 เมตรจากผิวดิน ตามเวลาหลังก่อสร้างคันทาง

โดยการทรุดตัวของเสาเข็มทั้ง 2 ตำแหน่ง คือ ที่หัวเสาเข็มและผิวดินระหว่างเสาเข็มของเสาเข็มทั้งสองประเภท แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนเสริมกำลังจะเกิดการทรุดตัวที่หัวเสามากกว่าเสาเข็มที่ไม่มีแกนเสริมกำลังประมาณ 6 มิลลิเมตร เนื่องมาจากเสาเข็มแบบมีแกนเสริมกำลังมีความแกร่ง (Stiffness) ที่สูงกว่าเสาเข็มแบบไม่มีแกนเสริมกำลังจึงทำให้น้ำหนักถูกถ่ายมาจากชั้นโครงสร้างถ่ายแรงแบบแกร่งมายังเสาเข็มมีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 12 และเนื่องจากน้ำหนักถูกส่งถ่ายไปสู่เข็มแบบมีแกนเสริมกำลังมากกว่า ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่เหลือที่ส่งต่อไปกับดินใต้ชั้นถ่ายแรงรอบๆ เสาเข็มแบบมีแกนเสริมกำลังมีค่าน้อยกว่า จึงส่งผลให้การทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาเข็มมีค่าต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 18

อย่างไรก็ตามในการประเมินประสิทธิภาพของคันดินในแง่ของการทรุดตัวนั้น การทรุดตัวที่แตกต่างกัน

ระหว่างหัวเสาเข็มและดินบริเวณรอบๆ เป็นปัจจัยที่ควร จะให้ความสนใจ เพราะการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ถนนได้ รูปที่ 15 แสดง การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างตำแหน่งหัวเสาเข็มดิน ซีเมนต์กับการทรุดตัวของผิวดินรอบเสาเข็มทั้งแบบมีและ ไม่มีแกนเสริมกำลัง จากผลการตรวจวัดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าหลังจากเวลา 15 วัน ความแตกต่างของการทรุดตัว ของเสาเข็มทั้งสองประเภทไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมี นัยยะ โดยที่ระยะเวลาสุดท้ายของการตรวจวัด การทรุด ตัวที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นของคันทางเสาเข็มดินซีเมนต์ แบบมีแกนเสริมกำลังนั้นมีค่าเท่ากับ 7.0 มิลลิเมตร และ คันทางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริมกำลังมีค่า เท่ากับ 22.0 มิลลิเมตร ผลจากการตรวจวัดแสดงให้เห็น ถึงประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริม กำลังในการลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 15 ผลต่างของการทรุดตัวระหว่างตำแหน่งหัวเข็มและผิวดินกึ่งกลาง ระหว่างเสาเข็มตามเวลาหลังก่อสร้างคันทาง

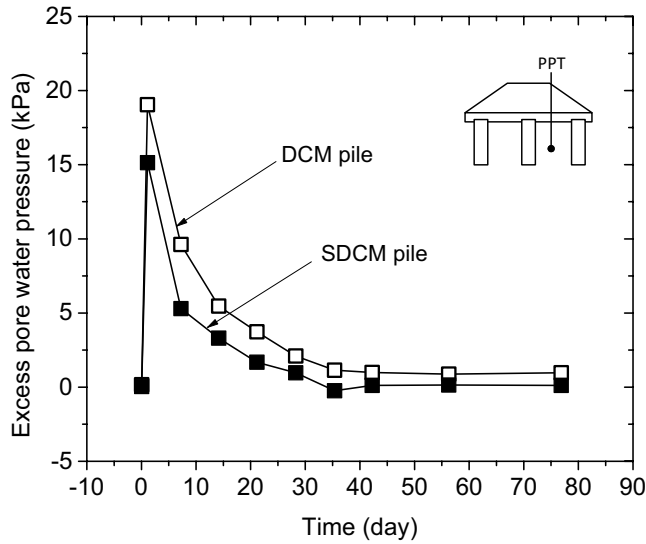
3.2 แรงดันน้ำส่วนเกิน

รูปที่ 16 แสดงค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจากอุปกรณ์ ตรวจวัดแรงดันน้ำ (Pressure Transducer, PPT) ที่ติดตั้ง ไว้ใต้คันดินที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีและไม่มีแกน เสริมกำลังที่ความลึก 3.0 เมตร จากผลการตรวจวัดพบว่า แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าสูงสุดเท่ากับ 19 กิโลปาสคาล ใต้คันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริมกำลังซึ่ง

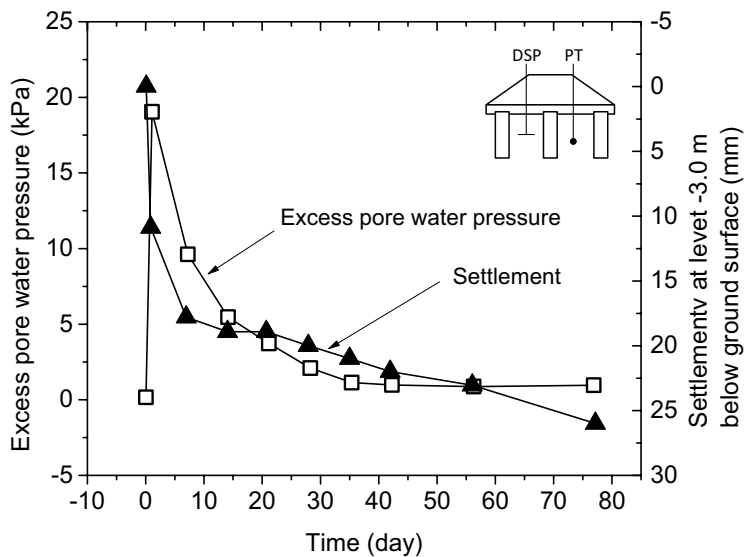
เกิดขึ้นหลังจากทำการก่อสร้างคันดินถมเสร็จสิ้นและค่อยๆ มีค่าลดลงจนเกือบหมดไปในระยะเวลา 30 วัน โดยที่แรง ดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นใต้คันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ ไม่มีแกนเสริมกำลังมีค่ามากกว่าของคันทางเสาเข็มดิน ซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับ การศึกษาของ Horpibulsuk et al. [19] ที่พบว่าแรงดัน น้ำส่วนเกินในดินระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แข็งแกร่ง

กว่าจะมีค่าน้อยกว่าเสาค้ำดินซีเมนต์ที่แข็งแรงน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการทรุดตัวของดินรอบๆ เสาค้ำดินซีเมนต์ที่ไม่มีแกนเสริมกำลังที่มีการทรุดตัวที่มากกว่า และสอดคล้องกับการอธิบายว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ส่งถ่ายให้กับดินของคันทางที่มีเสาค้ำดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริมกำลังมีค่ามาก (ส่วนที่ส่งถ่ายไปที่เสาค้ำน้อยกว่า) เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินใต้คันดินถมที่ความ

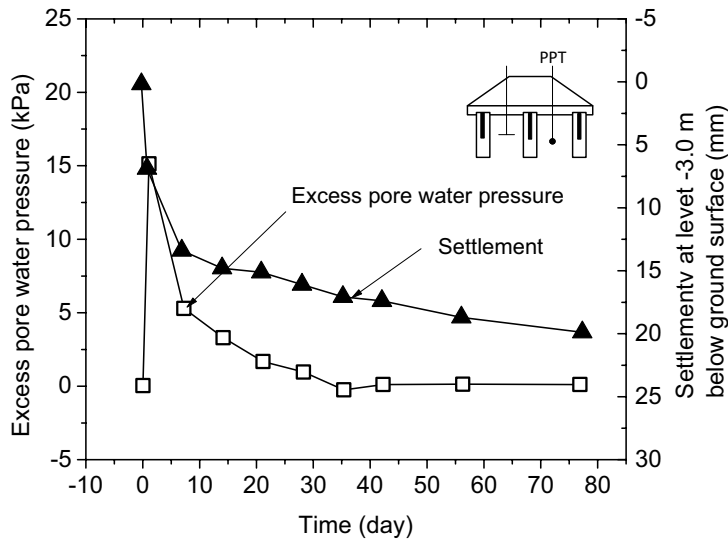
ลึก 3.0 เมตรดังแสดงในรูปที่ 14 เทียบกับแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่ความลึกเดียวกันในรูปที่ 16 ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่สอดคล้องกันระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินและการทรุดตัวของดินคือการทรุดตัวของดินจะหยุดการทรุดตัวเมื่อเมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นสลายไป



รูปที่ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) กับเวลาหลังก่อสร้างคันทาง



รูปที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับการทรุดตัวของชั้นดินใต้คันดินที่มีเสาค้ำดินซีเมนต์แบบไม่มีแกนเสริมกำลัง

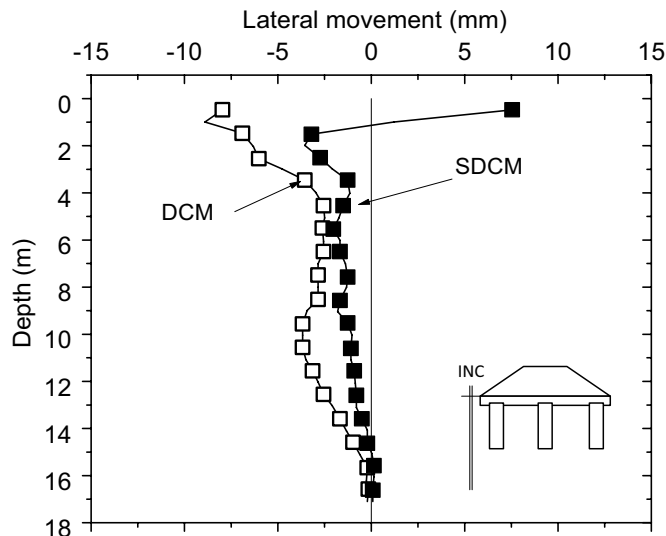


รูปที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินเทียบกับการทรุดตัวของชั้นดินใต้คันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลัง

3.4 การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม

ภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้โครงสร้างชั้นทางที่มีน้ำหนักกระทำจากน้ำหนักของตัวคันทาง ส่งผลให้เสาเข็มต้นที่อยู่ริมนอกเกิดการเคลื่อนตัวออกด้านข้าง เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของคันดินเพิ่มมากขึ้น การเสริมกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มลดลงได้ ส่งผลให้ดินที่อยู่ข้างเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัว

น้อยลงตามไปด้วย ดังผลการตรวจวัดที่แสดงในรูปที่ 19 ที่เป็นการเคลื่อนตัวของดินที่ห่างจากเสาเข็ม 0.50 เมตร ที่ระยะเวลา 80 วันหลังจากก่อสร้างคันดินถมเสร็จสิ้น จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินบริเวณใกล้ขอบของคันทางที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนด้วยไม้อยูคาลิปตัสมีค่าลดลงน้อยลงอย่างมีนัยยะตลอดทุกความลึก โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยเหลือเพียงครึ่งของกรณีเสาเข็มดินซีเมนต์ปกติ



รูปที่ 19 แสดงการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของดินบริเวณข้างเสาเข็ม ณ เวลา 80 วันหลังการก่อสร้างคันดิน

4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังด้วยไม้อยูคาลิปตัสต่อการรับน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวของดินใต้คันทางที่รองรับคันดินถมในสนามโดยมีเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังด้วยไม้อยูคาลิปตัสเป็นฐานราก จากการศึกษาสามารถสรุปประเด็นหลักๆ ได้ดังนี้

1. การนำไม้อยูคาลิปตัสมาให้เป็นวัสดุเสริมกำลังในเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มได้ และยังช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้

2. ด้วยความแรงที่เพิ่มขึ้นของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังทำให้สามารถเพิ่มอัตราส่วนการรับน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆ (Load Sharing Ratio) ได้ดีกว่าเสาเข็มแบบไม่มีแกนเสริมกำลัง

3. เสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มและดินบริเวณรอบๆ ได้ดีกว่าแบบไม่มีแกนเสริมกำลังอย่างมีนัยยะสำคัญ

4. เสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังช่วยลดการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ดีกว่าแบบไม่มีแกนเสริมกำลัง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยในเรื่องการพังทลายของลาดได้

การศึกษานี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพเชิงกลของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบมีแกนเสริมกำลังด้วยไม้อยูคาลิปตัสในการใช้เป็นฐานรากรองรับคันทางถนน การศึกษา ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงคุณสมบัติด้านการผุกร่อนของไม้อยูคาลิปตัสในสนาม แต่ด้วยการฝังอยู่ในดินซีเมนต์ที่มีความทึบน้ำสูง เชื่อว่าจะไม่เกิดปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าวต่อไปในอนาคตเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ร่วมให้ทุนวิจัย ภายใต้สัญญา PHD/0001/2554 และ RSA5580007 และขอขอบคุณ บริษัท ซอยล์กรี๊ด เทคโนโลยี จำกัด บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท อิตาเลียน-ไทย จำกัด(มหาชน) โรงพยาบาล

รามธิบดี ในการเอื้อเฟื้อเครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Petchgate, K., Jongpradist, P. and Youwai, S., 2007, "Field Investigation and Applications of Cement Column in Thailand", 40th Anniversary Commemorative Volume of Southeast Asian-Development, *Advancement of Geotechnical Engineering in Southeast Asia*, pp. 283-294.

2. Tanseng, P. and Namwiset, V., 2014, "Behavior of Soil-Cement Column Wall with Top-Down Support System for Unbalanced Deep Excavation in Soft Clay", *Proceedings of the 18th National Convention on Civil Engineering*, GTE, pp. 188-195. (In Thai)

3. Bergado, D. T., Ahmed, S., Sampaco, C. L. and Balasubramaniam, A. S., 1990, "Settlement of Bangna-Bangpakong Highway on soft Bangkok clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, 166, pp. 136-155.

4. Chunhirun, J., 2000, Performance of Road on Cement Column Improved Soft Clay of Route No.34 Bangna-Chonburi Highway Project, Master Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand (In Thai)

5. Forsman, J., Honkala, A. and Smura, M., 1999, "Hertsby Case: A Column Stabilised and Geotextile Reinforced Road Embankment on Soft Subsoil", *Dry mix methods for deep soil stabilization*, Brendenberg, Broms, and Holm, eds., Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 263-368.

6. Reid, W. M. and Buchanan, N. W., 1984, "Bridge Approach Support Piling", *Piling and Ground Treatment*, Thomas Telford Ltd., London, pp. 267-274.

7. Lin, K. Q. and Wong, I. H., 1999, "Use of Deep Cement Mixing to Reduce Settlements at

- Bridge Approaches”, *J. Geotech.Geoenviron. Eng.*, 125 (4), pp. 309–320.
8. Tsukada, Y., Isoda, T. and Yamanouchi, T., 1993, “Geogrid Subgrade Reinforcement and Deep Foundation Improvement”, *Proceedings of Geosynthetics Case Histories, Int. Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Committee TC9, Yono City, Japan, pp. 158–159.
9. Kreikraweekit, T., Wonglert, A., Petmali, S., Jongpradist, P., Kongkitkul, W. and Submaneewong, C., 2014, “Impact of Stiffness of Load Transfer Slab on Settlement Behavior of Cement-Column Support Road Embankment”, *Proceedings of the 19th National Convention on Civil Engineering*, GTE, pp. 1739-1744.
10. Zheng, G. and Gu, X.L., 2005, “Development and Practice of Composite DMM Column in China”, *Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 1295-1300.
11. Dong, P., Qin, R. and Chen, Z., 2004, “Bearing Capacity and Settlement of Concrete-Cored DCM Pile in Soft Ground”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 22, pp. 105-109.
12. Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwai, S., and Chucheepsakul, S., 2010. “Influence of Fly Ash on Unconfined Compressive Strength of Cement-Admixed Clay at High Water Content”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (1), pp. 49-58.
13. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Raksachon, Y., 2009, “Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay”, *Soils and Foundations*, 49 (1), pp. 85-98.
14. Srijaroen, C. and Rachan, R., 2014, “Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly ash-Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit”, *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 151-164. (In Thai)
15. Jamsawang, P., Bergado, DT. And Voottipruex, P., 2010, “Field Behaviour of Stiffened Deep Cement Mixing Piles”, *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, Vol. 164, No. 1, pp. 33-49.
16. Wonglert, A. and Jongpradist, P., 2014, “Numerical Investigation on SDCM Pile under Axial Load Test”, *International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development*, Suranaree University of Technology, pp. 369-374.
17. Kansaengkaew, T., 2008, “A Study of the Properties of Eucalyptus Wood Growing in Eastern Thailand for Using in Construction”, *Engineering Project*, Burapha University (In Thai)
18. Wonglert, A. and Jongpradist, P., 2015, “Impact of reinforced core on performance and failure behavior of stiffened deep cement mixing piles”, *Computers and Geotechnics*, 69, pp. 93-104.
19. Horpibulsuk, S., Chinkulkijiniwat, A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J. and Liu, M. D., 2012, “Consolidation behavior of soil-cement column improved ground”, *Computers and Geotechnics*, 43, pp. 37-50.