

พฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีภายใต้การรับแรงจากคันทันแบบยูนิตเซลด้วยแบบจำลองย่อส่วน

ภัทรพงศ์ เย็นศรี¹ อนุชา วงษ์เลิศ² และ พรเกษม จงประดิษฐ์^{3*}
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของคันทันแบบยูนิตเซลที่รองรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สองแบบ ได้แก่รูปร่างแบบปกติเปรียบเทียบกับรูปตัวทีที่มีความยาวและปริมาตรเท่ากัน การทดสอบทำเพื่อประเมินศักยภาพของการใช้เสาเข็มรูปตัวทีในการลดการทรุดตัวระหว่างหัวเสาเข็มและดินโดยรอบ การทดสอบเป็นการจำลองย่อส่วนแบบยูนิตเซลในห้องปฏิบัติการ โดยย่อส่วนลงมาลิบเท่าจากขนาดก่อสร้างจริง ตลอดจนติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่า การทรุดตัว ความเค้น การเคลื่อนตัว และการกระจายแรงตามความลึกของเสาเข็ม จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีเมื่อเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติช่วยลดค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินบริเวณรอบๆได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีสามารถถ่ายน้ำหนักจากคันทันลงสู่เสาเข็มเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : แบบจำลองย่อส่วน / ยูนิตเซล / เสาเข็มดินซีเมนต์ / เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที / การทรุดตัวที่แตกต่างกัน

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

1 อดีตนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
2 อดีตนักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
3 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Behavior of T-Shaped Deep Cement Mixing Piles under Unit Cell Embankment Tests by a Physical Model

Phatharaphong Yensri¹, Anucha Wonglert² and Pornkasem Jongpradist³

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

Abstract

This article presents the results of the physical model tests on deep cement mixing (DCM) piles supported unit cell embankment under loading. Two types of piles, conventional DCM and T-shaped deep cement mixing (TDM) pile under controlled volume and length, were focused. The tests were performed in order to evaluate the potential of using the TDM piles to reduce the differential settlement between the pile head and the surrounding soil. The physical model tests were conducted in the laboratory with a scaling factor of 10. Various instrumentations including settlement plate, earth pressure cell, displacement transducer, and strain sensor were installed in the test. According to the results, using TDM piles can significantly reduce the differential settlement. This is due to the fact that the load sharing ratio of the TDM pile is greater than that of the conventional DCM pile.

Keywords : Physical Model / Unit Cell / Deep Cement Mixing / T-shaped Deep Cement Mixing / Differential Settlement

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

¹ Former Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

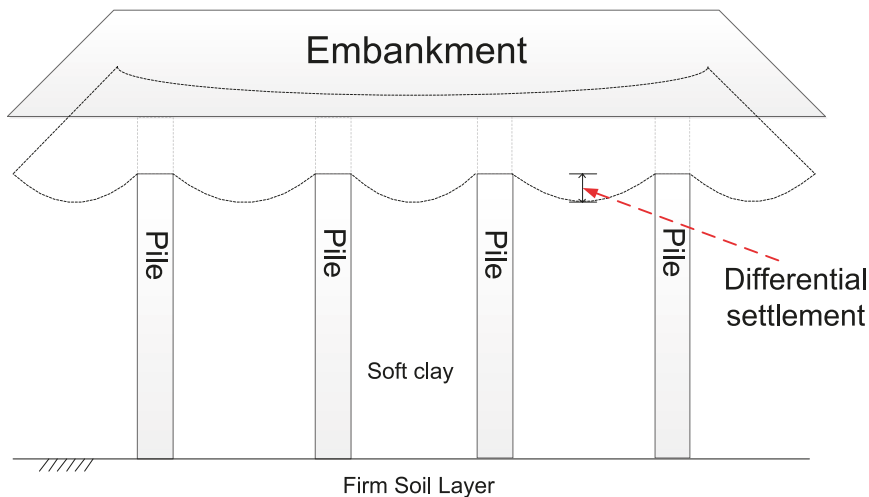
² Former Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

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

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนางานด้านระบบสาธารณูปโภคในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางมีวงกว้างมากขึ้น โดยเฉพาะงานถนนและงานด้านระบบขนส่งสาธารณะเช่น รถไฟฟ้า รถไฟใต้ดิน เป็นต้น แต่เนื่องจากลักษณะชั้นดินในพื้นที่ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่ค่อนข้างหนา ซึ่งดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสมกับการรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงเฉือนที่ต่ำ และมีปริมาณความชื้นในธรรมชาติสูง [1, 2] โดยปัญหาที่พบเมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน คือการทรุดตัวของโครงสร้างและการพังทลายของชั้นดินเนื่องจากการรับแรงรวมไปถึงมีการยุบอัดตัวสูงเมื่อมีน้ำหนักกระทำ ดังนั้นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินจึงเป็นทางเลือกและขั้นตอนที่สำคัญก่อนการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การใช้แผ่นระบายน้ำแนวตั้ง (PVD),

Pre-loading, การเสริมกำลังด้วย Geo-Grid หรือ Geotextile และ วิธี Deep Cement Mixing (DCM) หรือการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ โดยมีรูปแบบการใช้งานหลากหลายเช่นใช้เป็นกำแพงกันดิน [3] ป้องกันการพังทลายของลาด (Slope Failure) ป้องกันการรั่วซึมของน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นฐานรากในงานถนน อย่างไรก็ตามการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาปรับปรุงคุณภาพดินในงานก่อสร้างถนนนั้นยังมีปัญหาด้านการพังทลายระหว่างการก่อสร้าง รวมไปถึงค่าก่อสร้างที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม นอกจากนี้ การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นฐานรากในงานถนนยังก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential settlement) ระหว่างหัวเสาเข็มและดินรอบข้างเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทรุดตัวที่แตกต่างกันของผิวถนน

ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ทาง รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่จะต้องเพิ่มเติมในส่วนของการซ่อมแซม อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการลดระยะห่างระหว่างเสาเข็มสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ แต่ก็ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น Kriengtaweekit และคณะ [4] ได้ศึกษาชั้นพื้นถ่ายแรงแบบแกร่ง (Rigid Load Transfer Slab) ซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ

เพื่อช่วยถ่ายแรงที่กระทำบนชั้นทางลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้พื้นถ่ายแรงแบบแกร่งช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มและดินรอบข้างเสาเข็มและยังสรุปว่าการเพิ่มความแข็งแรงของชั้นถ่ายแรงช่วยทำให้น้ำหนักบรรทุกถ่ายลงสู่ตัวเสาเข็มได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากการถ่ายแรงลงสู่หัวเข็มมีประสิทธิภาพสูง การวิบัติของหัวเสาเข็มก็เป็นอีกปัจจัย

ที่จะต้องพิจารณาร่วมกัน เนื่องจากลักษณะการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะมีค่าสูงที่สุดบริเวณหัวเสาเข็ม และค่อยๆ ลดลงตามความลึก [5] ที่ผ่านมามีการพัฒนานวัตกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้หัวเสาเข็มมีความแข็งแรงขึ้นเช่นการเสริมแกนที่มีความแข็งแรงกว่าเสาเข็ม

ดินซีเมนต์บริเวณหัวเสาเข็ม [5-7], การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์บริเวณหัวเสาเข็ม และ การขยายขนาดหัวเสาเข็มให้ใหญ่ขึ้นจนมีลักษณะหน้าตัดของเสาเข็มเป็นรูปตัวอักษรที (TDM) [8-11] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที [8]

Lui และคณะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีภายใต้การรับน้ำหนักคันทางจริงได้ข้อสรุปว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีเป็นฐานรากของโครงสร้างคันทางสามารถลดค่าการทรุดตัวทั้งแนวตั้งและการเคลื่อนตัวแนวราบได้ดีกว่าการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบปกติ [6] และ Yensri และคณะ [1] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีภายใต้การรับแรงในแนวแกนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Finite Element Method) โดยศึกษาด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวเสาเข็มภายใต้การควบคุมปริมาณของเสาเข็มทั้งต้นให้เท่าๆ กัน พบว่าการขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเสาเข็มสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับกำลังแบกทาน (Ultimate Pile Capacity) ของเสาเข็มเดี่ยว อีกทั้งยังเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของเสาเข็มอีกด้วย [1] อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวยังเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิง

ตัวเลขเท่านั้น อีกทั้งยังเป็นการพิจารณาแค่พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเสาเข็มเดี่ยว หรือการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile Load Test)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์รูปแบบธรรมดา รวมไปถึงพฤติกรรมของดินบริเวณรอบเสาเข็มภายใต้การรับแรงจากคันดินทดสอบแบบยูนิทเซล (Unit Cell) ด้วยแบบจำลองย่อส่วน (Physical Model) ในห้องปฏิบัติการ เริ่มจากการเลือกกรณีศึกษาของ Yensri และคณะ [1] มา 2 กรณี ประกอบไปด้วยกรณีที่เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ และ เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการรับแรง การทรุดตัว (Settlement) และการกระจายแรงตามความลึก (Load Distributions) จากการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ต่างๆ

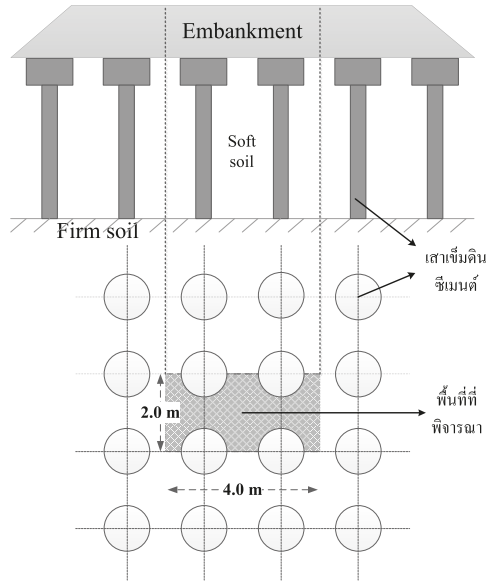
2. วิธีการศึกษา

การศึกษาประกอบไปด้วยสองชุดการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการรับแรงจากคันดินทดสอบแบบยูนิตเซล โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ (DCMPile) เป็นฐานราก และ ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที (TDM Pile) เป็นฐานราก โดยควบคุมความยาวและปริมาตรของเสาเข็ม

ทั้งสองแบบให้มีค่าเท่ากัน โดยย่อส่วนลงมา 10 เท่าจากขนาดจริง

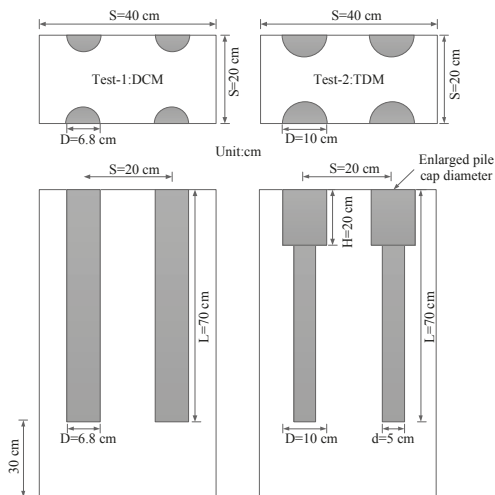
2.1 รูปแบบเสาเข็มที่พิจารณาในการออกแบบ

การศึกษาคั้งนี้พิจารณาพฤติกรรม ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคันทางที่มีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบโครงตาข่าย (Grid) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพด้านบนและภาพตัดของแบบจำลอง

สำหรับขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จำลองในแบบจำลองย่อส่วนแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จำลองในแบบจำลองย่อส่วน

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ และการจำลองชั้นดิน

ชั้นดินที่จำลองในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่มีความลึก 6.0-8.0 เมตร และสมบัติของดินเหนียวอ่อนซึ่งได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงในตารางที่ 1 โดยขั้นตอนการจำลองชั้นดินเริ่มจากการทำลายโครงสร้าง (Remold) ดินเหนียวอ่อนให้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดก่อน จากนั้นนำดินเหนียว

ที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้วบรรจุลงในกล่องทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวในด้วยจาระบีเพื่อเป็นการลดแรงเสียดทานที่อาจเกิดขึ้นระหว่างฝักกล่องและดินเหนียวอ่อน โดยมีชั้นทรายหลวมหนา 5 เซนติเมตรประกบไว้ทั้งชั้นบนและล่างสำหรับเป็นช่องทางในการระบายน้ำ จากนั้นปล่อยให้เกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) โดยให้น้ำหนักบรรทุกทั้งไว้ 60 กิโลกรัม (คิดเป็นความเค้นเท่ากับ 7.36 กิโลปาสคาล) เป็นเวลา 30 วัน ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การอัดตัวคายน้ำพบว่าที่ค่าอยู่ในช่วง 90-93%

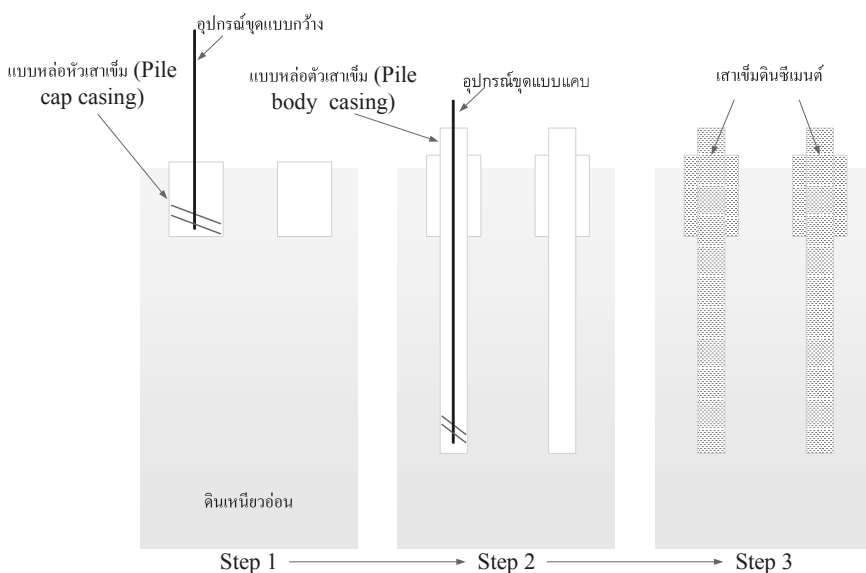
ตารางที่ 1 ภาพด้านบนและภาพตัดของแบบจำลอง

Material	Specific Gravity	Plastic Limit (%)	Liquid Limit (%)	Natural Water Content (%)	Undrained Shear Strength (kPa)	Unit Weight (kN/m ³)
Soft Clay	2.6	43	103	76-80	10	15

2.3 เสาเข็มดินซีเมนต์

ขั้นตอนการหล่อเสาเข็มดินซีเมนต์ลงในกล่องทดสอบ เริ่มจากการติดตั้งปลอก PVC ซึ่งใช้เป็นแบบของเสาเข็ม (Casing) เพื่อกำหนดขนาดของเสาเข็มให้เป็นไป

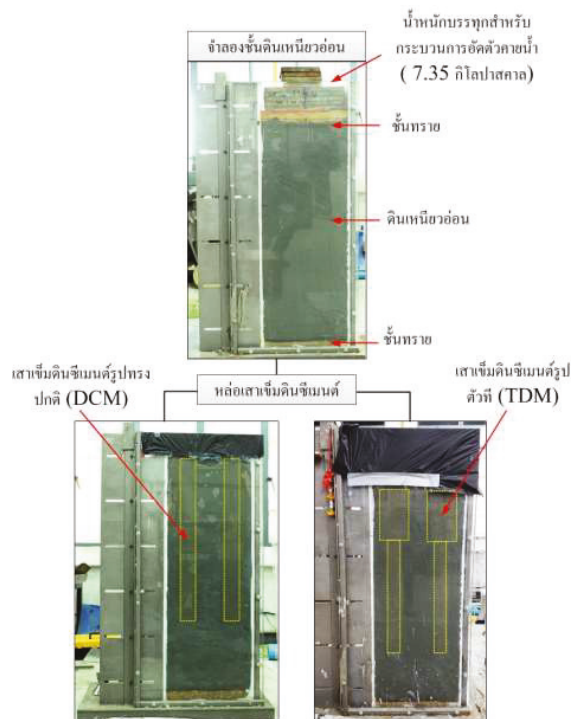
ตามที่ออกแบบการทดสอบไว้ จากนั้นนำดินที่อยู่ในแบบเสาเข็มออกทั้งหมดเพื่อเตรียมติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 5 พร้อมกับเช็ดทำความสะอาดด้านที่เป็นแผ่นอะคริลิก (Acrylic) และทาจาระบีลงบนแผ่น



รูปที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมก่อนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบจำลองย่อส่วน

อะคริลิกบริเวณส่วนที่จะสัมผัสกับเสาเข็มเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นส่วนผสมในการจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ประกอบไปด้วย ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ผ่านการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) แล้วและมีปริมาณความชื้น 72% อัตราส่วนระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์เท่ากับ 5.12 โดยออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shear Strength) เท่ากับ 80 กิโลปาสคาล และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เท่ากับ 21.78 เมกะปาสคาล ในขั้นตอนการผสมเริ่มจากการผสม

ดินเหนียวอ่อนกับน้ำส่วนหนึ่งให้เป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะเหลวเป็นน้ำโคลน จากนั้นผสมน้ำส่วนที่เหลือกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากันจนเป็นน้ำปูน แล้วจึงนำทั้งสองส่วนมาผสมกันให้เข้ากันอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นนำดินซีเมนต์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทลงในแบบเสาเข็มที่ชุดเตรียมไว้จนเต็มทั้ง 4 แบบพร้อมติดตั้งแบบหล่อ PVC ออกจากนั้นบ่มทิ้งไว้ 28 วันเพื่อให้เสาเข็มดินซีเมนต์พัฒนากำลังได้สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการจำลองชั้นดินและหล่อเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปอกติและรูปตัวที [10]

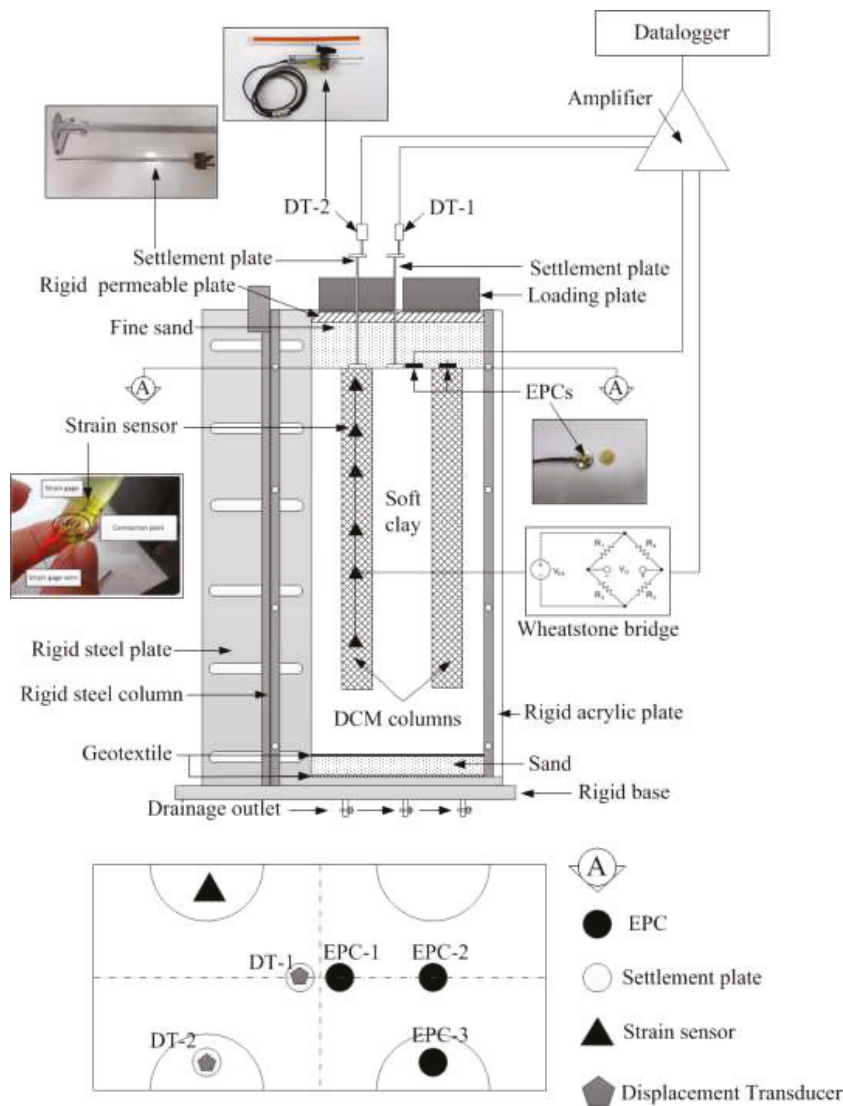
2.4 อุปกรณ์ตรวจวัด

- อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Settlement Plate) ในการศึกษาครั้งนี้ วัดการทรุดตัว 2 ตำแหน่งได้แก่

ตำแหน่งแรกติดตั้งบนผิวของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณกึ่งกลางของยูนิทเซลล์ และ ตำแหน่งที่สองบนหัวเสาเข็ม ใช้สำหรับวัดค่าการทรุดตัว (Settlement) โดยอุปกรณ์วัด

การทรุดตัวใช้คู่กับเครื่องวัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducer, DT)

- อุปกรณ์วัดความดัน (Earth Pressure Cell, EPC) ติดตั้งไว้ทั้งหมด 3 ตำแหน่งได้แก่ บริเวณหัวเสาเข็ม, บริเวณกึ่งกลางยูนิทเซลล์ และระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดย EPC แต่ละตัวสามารถรับความดันได้ไม่เกิน 200 กิโลปาสคาล



รูปที่ 7 ตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ

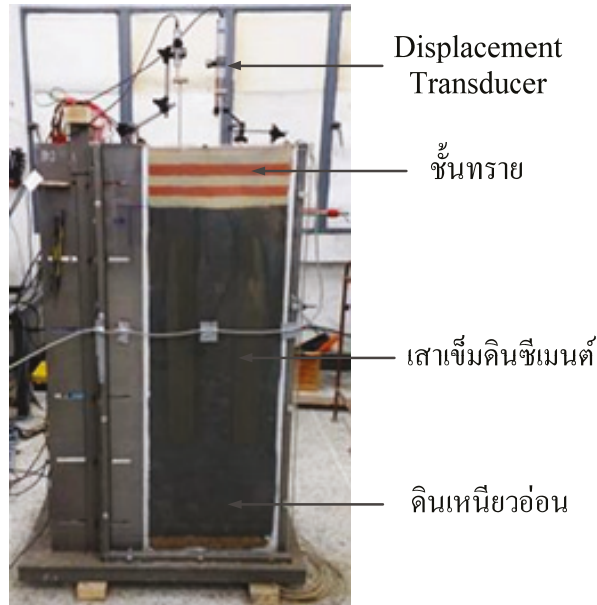
- อุปกรณ์วัดการกระจายตัวของแรงตามความลึกเสาเข็ม (Strain Sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่เป็น การรวมกันระหว่างแท่งยูรีเทน (Urethane) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.05 เซนติเมตร ยาว 2.2 เซนติเมตร และมาตรวัดความเครียด (Strain gage) ชนิด KFEL-2-120-C1N2C2 จำนวน 2 ตัวติดตั้งขนานกัน กับแท่งยูรีเทน ดังแสดงในรูปเล็กด้านซ้ายมือของรูปที่ 7 โดยอุปกรณ์ดังกล่าวผ่านการปรับเทียบค่าด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ก่อนจะฝังลงในเสาเข็มดินซีเมนต์ สำหรับ

อุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องต่อกับวงจรแบบ Wheatstone bridge เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ระบบ 2 gages แบบ ขนานกันโดยหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดนี้ คือวัดค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็ม อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักบรรทุก แล้วนำค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้มาเปลี่ยนเป็นแรงด้วยกฎของฮุก (Hooke's Law)

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

หลังจากเสาะเซิมดินซีเมนต์พัฒนาที่กำลังที่ 28 วัน ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด Settlement Plate และ EPC บนผิวชั้นดินและเสาะเซิม หลังจากนั้นโปรยทรายละเอียดด้วยวิธีการตกแบบอิสระ (Pluviation) จนได้ ความหนา 15 เซนติเมตรสำหรับจำลองเป็นชั้นคันดิน

หลังจากนั้นวางแผ่นไม้หนา 1.7 เซนติเมตรบนผิวชั้นทราย เพื่อทำหน้าที่กระจายน้ำหนักให้ลงเต็มทั้งหน้าตัด แล้วเริ่มทดสอบ โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุก 1 กิโลปาสคาล ทุกๆ 30 นาที และบันทึกผลจนกระทั่งสิ้นสุดน้ำหนักบรรทุกสุดท้าย ที่ 14 กิโลปาสคาลดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ภาพการทดสอบ

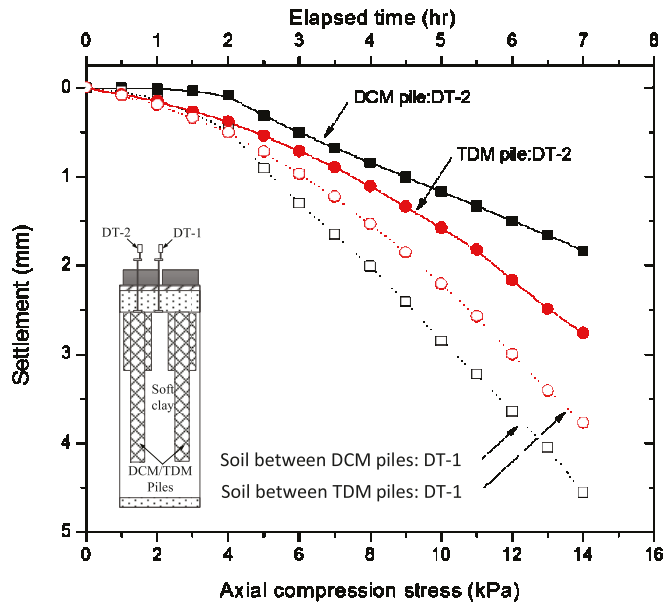
3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

สาเหตุหนึ่งสำคัญที่ทำให้ถนนวิบัติและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้รถใช้ถนนคือ การทรุดตัวที่แตกต่างกันที่มากเกินไประหว่างชั้นดินที่รองรับด้วยเสาะเซิม กับ ชั้นดินที่ไม่ได้รองรับด้วยเสาะเซิม ดังนั้น การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลของการทรุดตัวในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย การทรุดตัวบริเวณหัวเสาะเซิม และการทรุดตัวบริเวณชั้นดินกึ่งกลางยูนิตเซล, ความเด่น ณ ตำแหน่งต่างๆ, ลักษณะการถ่ายแรงลงสู่เสาะเซิมทั้งสองรูปแบบ และการกระจายแรงตามความลึกในเสาะเซิม

3.1 ลักษณะการทรุดตัว

หลังจากให้น้ำหนักบรรทุกครั้งละ 1 กิโลปาสคาล จนถึง 14 กิโลปาสคาล น้ำหนักบรรทุกได้ส่งถ่ายผ่านชั้น

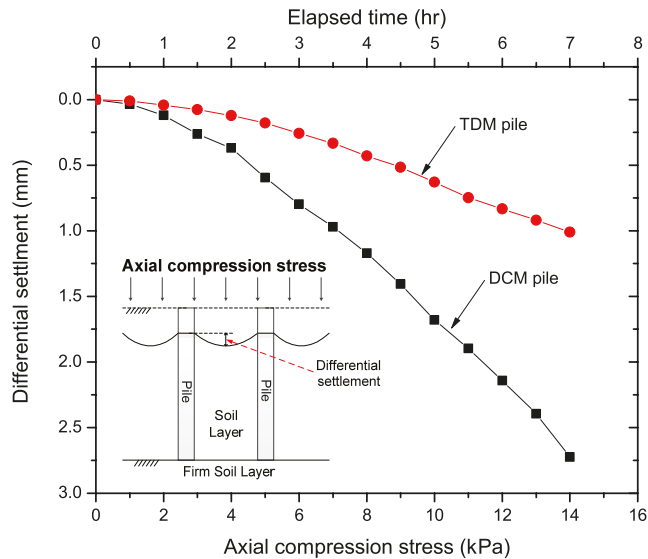
ทรายลงสู่เสาะเซิมและชั้นดินเหนียวอ่อน การทรุดตัวที่หัวเสาะเซิมทั้งแบบธรรมดาและแบบรูปตัวทีที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ผิว (Settlement Plate) คู่กับเครื่องวัดการเคลื่อนตัว ณ น้ำหนักบรรทุกสุดท้าย บริเวณหัวของเสาะเซิมดินซีเมนต์รูปทรงปกติ มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 1.83 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าเสาะเซิมดินซีเมนต์รูปตัวทีที่มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 2.76 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม ณ ผิวของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณกึ่งกลางของยูนิตเซล ชั้นดินที่มีการปรับปรุงด้วยเสาะเซิมดินซีเมนต์รูปทรงปกติมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 4.55 มิลลิเมตร มากกว่าชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยเสาะเซิมดินซีเมนต์รูปตัวทีที่ทรุดตัว 3.76 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่กึ่งกลางยูนิตเซล

ถึงแม้ว่าการทรุดตัวบริเวณหัวเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีจะมีค่ามากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มและชั้นดินพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงตัวที สามารถช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันได้อย่างมีนัยยะ ซึ่ง ณ น้ำหนักบรรทุกสุดท้าย

ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติมีค่าเท่ากับ 2.72 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีมีค่าเพียง 1 มิลลิเมตรเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 10

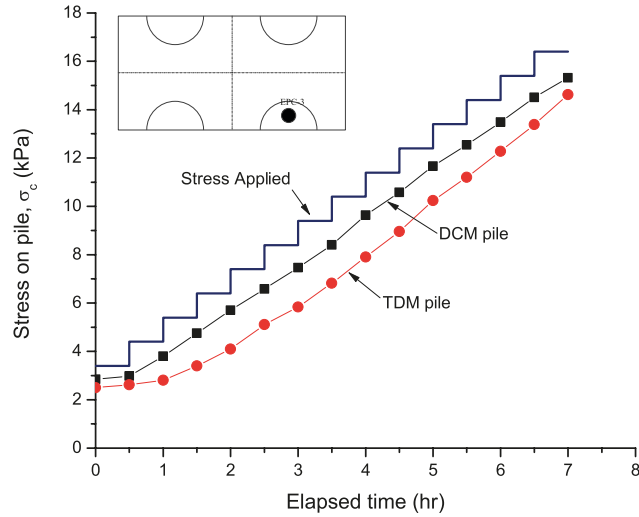


รูปที่ 10 การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินบริเวณรอบๆ

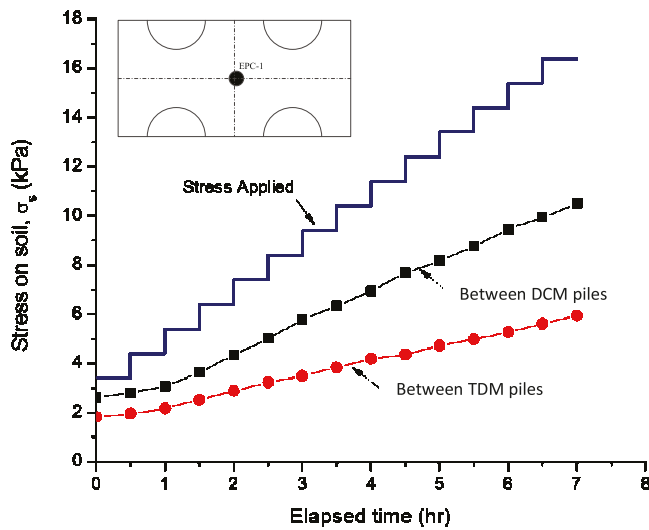
3.2 ความเค้นในแนวดิ่ง

(EPC-1) ของทั้งสองการทดสอบแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

ค่าความเค้นที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเค้น บริเวณหัวของเสาเข็ม (EPC-3) และ กิ่งกลางยูนิตเซล

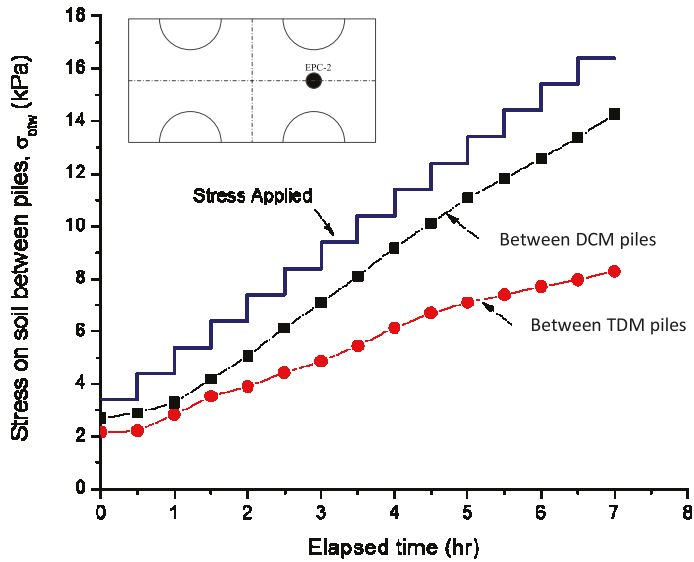


รูปที่ 11 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนหัวเสาเข็ม



รูปที่ 12 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่กิ่งกลางยูนิตเซล

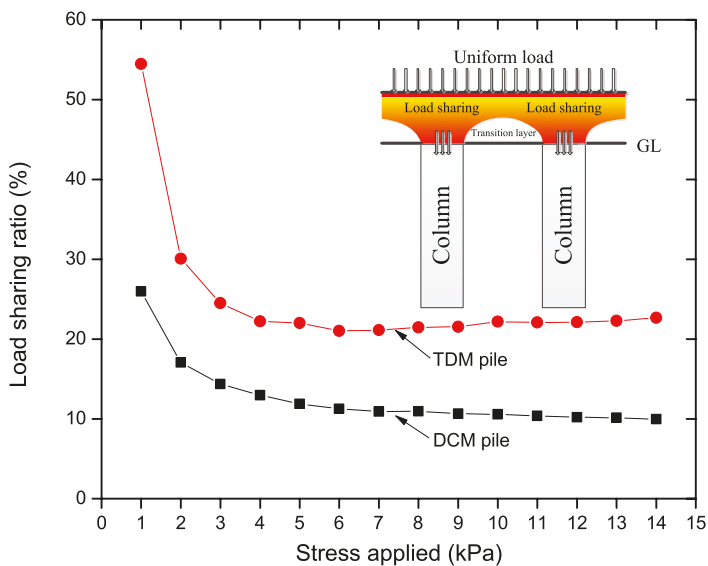
รูปที่ 13 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเสาเข็ม (EPC-2)



รูปที่ 13 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งระหว่างเสาเข็ม

ถึงแม้ว่าค่าความเค้นที่วัดได้จาก EPC-3 ณ ตำแหน่งบริเวณหัวของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติจะมีค่ามากกว่าบนหัวเสาเข็มรูปตัวที แต่หากคำนวณย้อนกลับเป็นร้อยละของน้ำหนัก (Load) ที่ลงบนเสาเข็มเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่ให้ จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ

ของอัตราส่วนการรับน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆ (Load Sharing Ratio) มากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ เนื่องจากมีอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพที่ผิวดิน (Area Replacement Ratio, a_s) สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 14



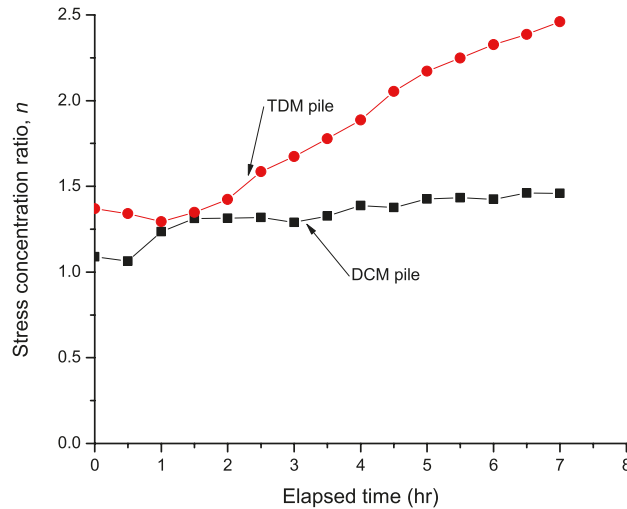
รูปที่ 14 อัตราส่วนการรับน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆ

3.3 การกระจุกตัวของความเค้นและประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์

ความเค้นที่เกิดบริเวณหัวเข็ม (σ_c) ต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนชั้นดิน (σ_s) ของทั้งสองแบบทดสอบ ดังแสดงในสมการที่ 1

รูปที่ 15 แสดงการกระจุกตัวของความเค้น (Stress Concentration Ratio, n) หรืออัตราส่วนระหว่าง

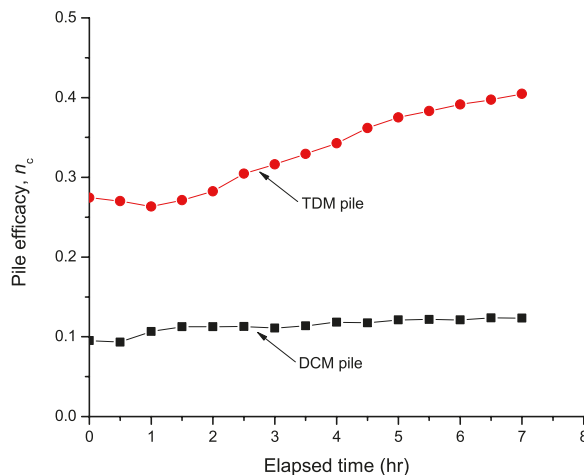
$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (1)$$



รูปที่ 15 การกระจุกตัวของความเค้น

รูปที่ 16 แสดงประสิทธิภาพของเสาเข็ม (η_c) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดยค่าประสิทธิภาพของเสาเข็มสื่อถึงความสามารถในการแบ่งน้ำหนักบรรทุกจากชั้นคันดินให้ถ่ายลงสู่เสาเข็ม ซึ่งสามารถอธิบายจากผลการทดสอบดังกล่าวได้ว่า การขยายขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เป็นรูปทรงตัวที่ภายใต้การควบคุมปริมาตรของทั้งเสาเข็มให้คงที่ จะทำให้มีอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพที่ผิวดิน (a_s) เพิ่มมากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 16 ประสิทธิภาพของเสาเข็ม

$$\eta_c = \frac{na_s}{na_s + (1-a_s)} \quad (2)$$

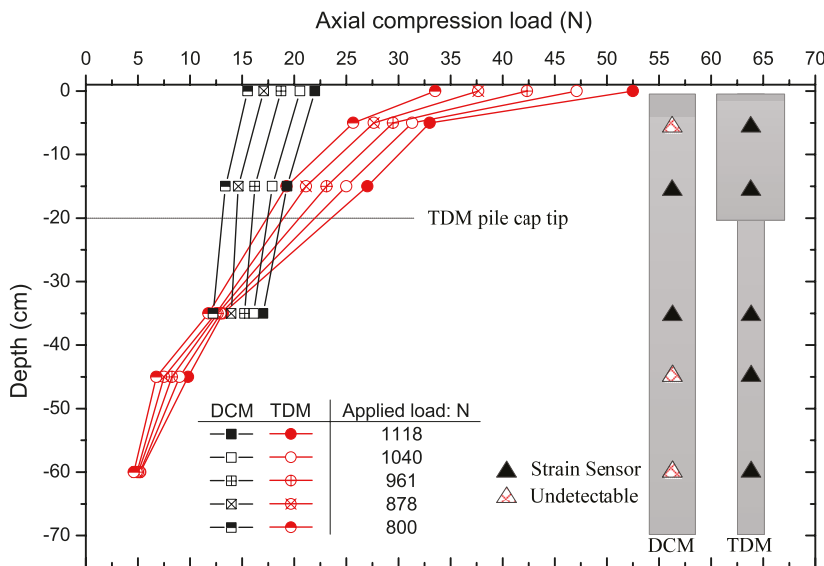
$$a_s = \frac{A_c}{A_c + A_s} \quad (3)$$

เมื่อ A_c คือพื้นที่ในแนวราบของหน้าตัดเข็ม และ A_s คือพื้นที่ในแนวราบของดิน

3.4 การกระจายแรงตามความลึกของเสาเข็ม

แรงที่ส่งถ่ายลงตามความลึกของเสาเข็มของทั้งสองการทดสอบ แสดงในรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการกระจายแรงตามความลึกของเสาเข็มทั้งสองรูปแบบ

มีความแตกต่างกัน โดยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีจะมีการส่งถ่ายแรงในปริมาณที่มากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติที่ระดับความลึกเดียวกันและค่อยๆ ลดลงตามความลึกซึ่งจะทำให้แรงถ่ายลงสู่ดินรอบข้างน้อยกว่าในกรณีปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที และส่งผลให้การทรุดตัวของชั้นดินลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 17 การกระจายแรงตามความลึกของเสาเข็ม

4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ศึกษาผลกระทบจากการขยายขนาดหัวเสาเข็มดินซีเมนต์จนมีลักษณะเป็นรูปตัวที ภายใต้การรับแรงจากคันดินทดสอบแบบยูนิเทซลในรูปแบบของแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการที่มีผลต่อการทรุดตัว และพฤติกรรมการถ่ายแรงลงสู่เสาเข็ม จากการศึกษาสามารถสรุปประเด็นหลักๆ ได้ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีที่ช่วยลดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินบริเวณรอบๆ ได้ดีกว่าเสาเข็มแบบปกติ

อย่างมีนัยสำคัญ

2. เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีมีอัตราส่วนการรับน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆ (Load Sharing Ratio) มากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติ ส่งผลให้ตัวเสาเข็มเองมีค่าการทรุดตัวที่มากกว่าเช่นเดียวกัน

3. ภายใต้การควบคุมปริมาตรของเสาเข็ม การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวทีในการปรับปรุงคุณภาพดินแทนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเสาเข็ม (Pile Efficacy) ได้ดีกว่าการใช้เสาเข็มรูปทรงปกติ

การศึกษานี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพเชิงกลของเสาเข็มดินซีเมนต์รูปตัวที เปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์รูปทรงปกติที่ปริมาตรเท่ากันภายใต้การทดสอบการรับแรงจากคันดินในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการศึกษายังไม่ได้ครอบคลุมถึงค่ากำลังและรูปทรงอื่นๆ ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ควรมีการศึกษาเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานจริงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 6001)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Yensri, P., Wonglert, A. and Jongpradist, P., 2015, "Numerical Investigation on TDM Pile under Axial Load Test," *The 20th National Convention on Civil Engineering*, 8-10 July 2015, Pattaya, Chonburi, Thailand. (In Thai)
2. Wonglert, A., Jongpradist, P., Jamsawang, P. and Petchgate, W., 2015, "Efficiency of Using Eucalyptus Wood to Reinforce Deep Cement Mixing Piles in Field: Pile Load and Embankment Test," *KMUTT Research and Development Journal*, 38 (3), pp. 225-242. (In Thai)
3. 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)
4. Kreikraweekit, T., Wonglert, A., Petmali, S., Jongpradist, P., Kongkitkul, W. and Submanee Wong, 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.
5. 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, 3, pp. 1295-1300.
6. Jamsawang, P., Bergado, D.T. and Voottipruex, P., 2010, "Field Behaviour of Stiffened Deep Cement Mixing Piles," *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 164 (1), pp. 33-49.
7. Voottipruex, P., Suksawat, T., Bergado, D.T. and Jamsawang, P., 2011, "Numerical Simulations and Parametric Study of SDCM and DCM Piles under Full Scale Axial and Lateral Loads," *Computers and Geotechnics*, 38, pp. 318-329.
8. Liu, S.Y., Du, Y.J., Yi, Y.L. and Puppala, A.J., 2012. "Field Investigations on Performance of T-Shaped Deep Mixed Soil Cement Column-Supported Embankments over Soft Ground," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 138 (6), pp. 718-727.
9. Yi, Y.L. and Liu, S.Y., 2008, "Bearing Behavior of single T-shaped Cement-Soil Deep Mixing Column," *International Symposium on Lowland Technology 2008*, Busan, Korea, pp. 261-265.
10. Yensri, P., 2015, Impact of Enlarging Capon Mechanical Behaviors of T-Shaped Deep Mixing Piles under Axial Loading, Master of Engineering Thesis, Faculty of Engineering, Civil Engineering Program, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp. 43-49.
11. Yin, J. and Fang, Z., 2010, "Physical Modeling of a Footing on Soft Soil Ground with Deep Cement Mixed Soil Columns under Vertical Loading," *Marine Georesources and Geotechnology*, 28, pp. 173-188.

