

สมรรถนะของเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอยภายใต้การอัดตัวคายน้ำ

Performance of cement fly ash gravel column under consolidation condition

สุวิจักขณ์ วรรณ¹ พิตทยา แจ่มสว่าง^{2,*}

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

² ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

* Corresponding author; E-mail address: pitthaya_kmutnb@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ทำการเพิ่มความแข็งแรงในดินเหนียวอ่อนซึ่งเป็นปัญหาหลักของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ โดยใช้เสาเข็มกรวดเถ้าลอยซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้สามารถรองรับคันทางหรือโครงสร้างขนาดเล็กได้ด้วยการใช้กรวดขนาด 4.75-19.50 มิลลิเมตร ผสมกับ เถ้าลอยและซีเมนต์ แล้วดำเนินการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และ สูง 450 มิลลิเมตร กำหนดขนาดของเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดความสูง 200 มิลลิเมตร ขนาดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50, 75 และ 100 มิลลิเมตร วางในชั้นดินเหนียวอ่อน โดยผลการทดสอบพบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเพิ่มขึ้นส่งผลให้การทรุดตัวระยะเวลาน้ำค่าลดลงและใช้เวลาทรุดตัวระยะเวลาน้อยลง ในด้านความเค้นของดินจะลดลงแต่ความเค้นในเสาเข็มเพิ่มขึ้น ในส่วนการศึกษาแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความสูงเดียวกันพบว่าที่ระดับเสาเข็มมีค่าต่ำกว่าที่ไหลออกไปที่เวลาเดียวกัน และที่ระดับลึกต่างกันพบว่าจะมีค่าแรงดันน้ำสูงขึ้นตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นที่ผิวดินสูงกว่าทำให้แรงดันน้ำด้านล่างสูงขึ้น จากการวิจัยสามารถสรุปผลได้ว่าเสาเข็มกรวดเถ้าลอยซีเมนต์ช่วยเพิ่มความความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดิน และทำให้เกิดการทรุดตัวระยะเวลาน้ำลดลงตามขนาดเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งเสาเข็มมีความพรุนทำให้ให้ระบายน้ำได้ดีส่งผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินใกล้เสาเข็มจะต่ำกว่าที่ไหลออกไป

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน, ดินเหนียวอ่อน, เสาเข็มกรวดเถ้าลอยซีเมนต์, การทรุดตัวระยะเวลาน้ำ, แรงดันน้ำส่วนเกิน

Abstract

This research was studied to increased strength in soft clay which is the main problem of Bangkok soft clay. By using gravel cement fly ash gravel column (CFG column) improve soil quality to support embankment or small structures. CFG column

was made by 4.75-19.50 mm. gravel which mixed with fly ash and cement. After that, the test was performed using a physical model in a PVC pipe with a diameter of 300 millimeters and a height of 450 millimeters. The size of CFG column used in the test are 200 mm. high. and diameter sizes are 50, 75 and 100 mm. which placed the column in a soft clay layer. The test results showed when the diameter of the column increased that the consolidation decreased and the drainage time decreased. In terms of soil stress was decreased when stress in column increased after increasing loading due to improvement areas (Ar) was increased. The result of excess pore water pressure at the same height, it was found that the radius near the column is lower than that the same time due to the porosity of CFG column. At the different depths was found that the excess pore water pressure increased as the depth increased because the stress at the top of soil was higher than lower depth that cause increasing excess pore water pressure. From the research can conclude that the CFG column can increased the bearing capacity of the soft clay and decreased consolidation by varying of column diameter size. Also, the CFG column are porous which allow good drainage. Resulting in excess pore water pressure near the column is lower which is different when the radius of soil increased.

1. บทนำ

การก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนมักพบปัญหาในการก่อสร้างเนื่องจากดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุทางธรณีที่มีกำลังเฉือนต่ำและมีการยุบตัวอัดตัวสูง ก่อให้เกิดแรงดันด้านข้างมีค่ามากกว่าปกติ ทำให้เกิดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวด้านข้างสูงจนนำไปสู่การวิบัติของดินเหนียว ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อทำให้งานก่อสร้างล่าช้าและเสียค่าใช้จ่ายสูงสำหรับงาน

ซ่อมแซมสูง[1,2] ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดินได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา โดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้กัน ได้แก่ การใช้เสาเข็มกรวด (stone column) และ เสาเข็มทรายบดอัด (sand compaction pile) แต่ทั้งสองวิธีมีปัญหาเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นมวลรวมมีลักษณะเม็ดซึ่งไม่มีการยึดเกาะกันภายใน กำลังของเสาหินและเสาเข็มทรายบดอัดจะเกิดขึ้นต้องอาศัยความเค้นตึงฉากที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวของคันทางหรือโครงสร้างด้านบน ดังนั้น เสาเข็มทั้งสองชนิดนี้จะรับกำลังที่ต่ำที่ปริมาณด้านปลายของลาดคันทางเนื่องจากเค้นตึงฉากต่ำ จึงไม่สามารถรับแรงต้านข้างได้มาก ในบางครั้งลาดคันทางเกิดการวิบัติขึ้นบริเวณนี้ ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก สำหรับประเทศไทยการใช้เสาเข็มซีเมนต์ (Soil-cement column) จึงเป็นวิธีที่ยอมรับและนิยมใช้กันมากกว่า เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วเพราะเป็นการผสมดินเหนียวอ่อนกับซีเมนต์ในที่ และมีกำลังยึดเกาะที่สูงเนื่องจากใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจึงสามารถรับแรงเฉือนได้ดีโดยไม่ต้องอาศัยความเค้นตึงฉาก แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างด้านบนที่มากหรือคันทางมีความสูงมาก หรือต้องการให้ต้านทานแรงต้านข้างได้มาก การใช้เสาเข็มซีเมนต์จะไม่เหมาะสมเนื่องจากข้อจำกัดในการก่อสร้าง เพราะการที่จะเกิดสภาพยึดแน่นขึ้นที่ด้านปลายเสาเข็มนั้นต้องการความลึกของเสาเข็มซีเมนต์ที่มากพอ [2,3] แต่การผสมซีเมนต์กับดินเหนียวจะทำให้ดีในดินเหนียวอ่อนเท่านั้น ไม่สามารถผสมกับดินเหนียวแข็งที่อยู่ลึกลงไปได้ ดังนั้น จึงไม่สามารถก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ให้ลึกลงไปถึงชั้นดินเหนียวแข็งได้ ซึ่งการก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ทำได้ดีในดินเหนียวอ่อนเท่านั้นและปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือความไม่สม่ำเสมอและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มซีเมนต์เนื่องจากการผสมดินในสนาม[4] ต่อมาจึงได้มีการเสริมกำลังให้แก่เสาเข็มซีเมนต์โดยการเสริมแกนกลางลงไปเสาเข็มซีเมนต์ที่เพิ่งจะผสมเสร็จใหม่ด้วยเสาเข็มคอนกรีต เหล็ก หรือไม้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด[4,5,6] แต่การก่อสร้างมีความยุ่งยากและราคาแพง รวมไปถึงการก่อสร้างต้องการเครื่องจักรเฉพาะทางและมีค่าใช้จ่ายในการขนย้ายเครื่องจักรที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้รวมข้อดีของเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีเสาเข็มกรวด และเสาเข็มซีเมนต์เข้าด้วยกัน เสาเข็มกรวดถั่วลอยซีเมนต์ (Cement-fly ash gravel column, CFG column) ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถก่อสร้างได้ลึกถึงจนถึงดินเหนียวแข็งและวัสดุมีความเชื่อมประสานกันภายในเนื่องจากใช้ซีเมนต์และถั่วลอยหลักการของเสาเข็มประเภทนี้ คือ ไม่ต้องการกำลังของวัสดุเสาเข็มมากเท่าคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากใช้น้ำหนักคันทางหรืออาคารที่ไม่สูงมากนักซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังต่ำ โดยเลือกกรวดที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก มีความพรุนสูงเพื่อทำหน้าที่คล้ายกับแถบระบายน้ำแนวตั้ง (vertical drain) ซึ่งทำให้กระบวนการทรุดตัวระบายน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทำการเลือกกรวดที่มีขนาดเท่าๆ กัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมรรถนะของเสาเข็มกรวดถั่วลอยซีเมนต์ภายใต้การอัดตัวระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำเสนอสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับงานรองรับน้ำหนักบรรทุกจากคันทางหรืออาคารขนาดเล็ก สมรรถนะที่ต้องการศึกษาได้แก่ การทรุดตัวระบายน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็ม CFG กับดินเหนียวโดยรอบ อิทธิพลของขนาดเสาเข็มกรวดถั่วลอย

ซีเมนต์ที่ส่งผลต่อแรงดันน้ำในดินเหนียวบริเวณโดยรอบ และอิทธิพลของเสาเข็มกรวดถั่วลอยซีเมนต์ที่ส่งผลต่อความเค้นในดิน

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยกรวดเป็นกรวดในการก่อสร้างทั่วไปโดยกรวดมีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตร ถึง 9.50 มิลลิเมตร และ 9.50 มิลลิเมตร ถึง 19.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน(k) 0.92 (cm/s), ค่าการดูดซึมน้ำ 1.41 (%), ค่ากำลังต้านทานการสึกกร่อน 15.4 (%), ความหนาแน่นรวม 1.50 (g/cm³), ความถ่วงจำเพาะ(Gs) 2.61 ในส่วนดินที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯได้จากเขตแจ้งวัฒนะ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ความชื้นของดินตามธรรมชาติ 80 %, ความถ่วงจำเพาะ(Gs) 2.79, ค่าพิกัดเหลว(LL) 69 (%), ค่าพิกัดพลาสติก(PL) 33.50 (%), ความหนาแน่น(p) 1.509 (g/cm³), ค่าดัชนีการอัดตัว(Cc) 0.206, ค่าดัชนีการบวมตัว(Cs) 0.0417, อัตราส่วนช่องว่าง(e) 1.08 สำหรับทรายที่ใช้เป็นทรายก่อสร้างทั่วไป ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ(Gs) 2.66, ความหนาแน่นแห้ง(p_{dry}) 1.88 (g/cm³), ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(OMC) 13.8(%), สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ(Cu) 3.83, สัมประสิทธิ์ความโค้ง(Cc) 1.19, การจำแนกประเภทของดิน Unified Soil Classification SP ปูนซีเมนต์เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับวัสดุขุขี้เถ้าประกอบไปด้วยถั่วลอย (FA) ชนิด C จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

2.2 อัตราส่วนผสม

เสาเข็ม CFG ที่สร้างขึ้นในการทดสอบ ใช้กรวดขนาด 4.75 มิลลิเมตร ถึง 9.50 มิลลิเมตร ปริมาณ 50% และกรวดขนาด 9.50 มิลลิเมตร ถึง 19.50 มิลลิเมตร ปริมาณ 50% เพื่อทำให้มีขนาดละเอียดขึ้นหินขนาดใหญ่มีหินขนาดเล็กแทรกกระหว่างช่องว่างกำลังรับแรงสูงขึ้น และไม่มีมวลรวมละเอียดส่งผลให้เสาเข็ม CFG มีความพรุนเพื่อช่วยความสามารถในการระบายน้ำ จากนั้นเชื่อมประสานด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ 22% ของน้ำหนักมวลรวม ปริมาณถั่วลอยแทนที่ปริมาณซีเมนต์ 15 % เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ และปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.32 ซึ่งลักษณะของเสาเข็ม CFG เป็นไปตามรูปที่ 1

2.3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการ

การเตรียมตัวอย่างการทดสอบเตรียมการได้โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างที่ทำจาก PVC ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ความสูง 450 มิลลิเมตร เริ่มต้นโดยการอัดชั้นทรายให้มีความหนา 50 มิลลิเมตร ปูทับด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร บนชั้นทรายเพื่อแยกชั้นดินเหนียวอ่อนและทรายไม่ให้ผสมกัน จากนั้นติดตั้ง PVD เพื่อช่วยเร่งการทรุดตัว ทำการวัดปริมาณความชื้นในดินในห้องปฏิบัติการก่อนการผสมน้ำ แล้วทำการเพิ่มปริมาณน้ำจนมีค่าความชื้นที่ 90 % กรอกดินลงในแบบหล่อ PVC โดยความหนาของ

ชั้นดินเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ปูแผ่นเส้นใยสังเคราะห์บนชั้นดินเทชั้นทรายที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร และทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อให้เกิดการระบายน้ำในดิน จนความหนาของชั้นดินลดลงเหลือ 200 มิลลิเมตร ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ 80% เท่ากับค่าความชื้น ณ ภาคนามจริง เมื่อได้ความสูงที่ต้องการแล้ว ทำการเปิดชั้นทรายออก แล้วทำการเจาะชั้นดินตรงกลางที่อยู่ในแบบหล่อตัวอย่าง โดยใช้กระบอกลูกเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50, 75 และ 100 มิลลิเมตร โดยเจาะชั้นดินลงไป 200 มิลลิเมตร แล้วทำการปิดกระบอกลูกเหล็กเพื่อเชื่อมดินตรงกลางออก หลังจากนั้นทำการรอกเสาเข็ม CFG ลงในแบบหล่อตัวอย่างที่ทำการเจาะรอไว้แล้ว และทำการหุ้มแบบหล่อตัวอย่างเพื่อทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วันและป้องกันการสูญเสียความชื้นของชั้นดินและบ่มเสาเข็มกรวดเถ้าลอยซีเมนต์

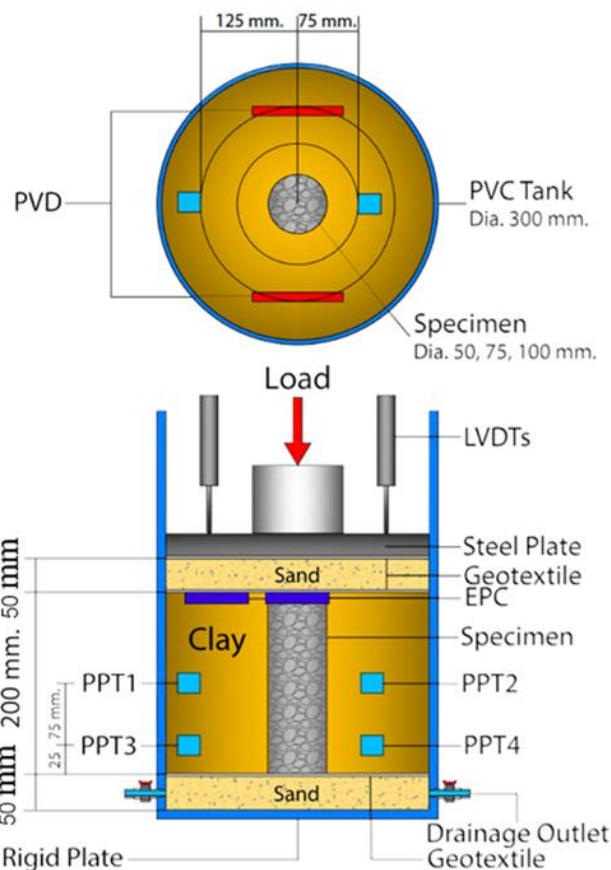


รูปที่ 1 ลักษณะของเสาเข็ม CFG

2.4 แบบจำลองทางกายภาพ

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองการทดสอบการทรุดตัวของระบายน้ำของวัสดุเชิงประกอบ (Physical mode) แสดงถึงการติดตั้งตำแหน่งเสาเข็มกรวดซีเมนต์เถ้าลอย และ PVD ภายในแบบหล่อตัวอย่าง โดยตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันน้ำหรือ pore water pressure transducer (PPT) ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือที่ ระยะ 75 มิลลิเมตร และ 125 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางของเสาเข็มตามแนวราบ และที่ระดับความสูง 100 มิลลิเมตร และ 175 มิลลิเมตรวัดจากหัวเสาเข็ม CFG ลงมา ติดตั้งเครื่องมือวัดความดันที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อน และความดันที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม CFG เรียกว่า earth pressure cell (EPC) ซึ่งติดตั้ง 2 ตำแหน่งที่ตำแหน่งของหัวเสาเข็ม CFG และตำแหน่งของผิวของดินเหนียวอ่อน จากนั้นติดตั้งแผ่นเหล็กบนชั้นทรายด้านบนของแบบหล่อตัวอย่างเพื่อกระจายความดันไปยังดินและเสาเข็มCFG และติดตั้งทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) จำนวน

1 ตัวที่ตำแหน่งด้านบนของแผ่นเหล็กเพื่อวัดค่าการทรุดตัว เมื่อติดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเสร็จสิ้นจะเป็นดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองเมื่อติดอุปกรณ์เสร็จสมบูรณ์

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

เริ่มทำการทดสอบพฤติกรรมทรุดตัวแบบระบายน้ำ หลังจากอายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ (ดินเหนียวอ่อนและเสาเข็ม CFG) จะถูกนำไปทดสอบการทรุดตัวแบบระบายน้ำ โดยความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ มี 4 ระดับ คือ 50, 100, 150 และ 200 กิโลปาสกาล สอดคล้องกับความสูงของคันทาง 2.5, 5, 7.5 และ 10 เมตร ในการวัดการทรุดตัวจะใช้ LVDT จำนวน 1 ตัว ซึ่งในการทดสอบจะวัดค่าการทรุดตัวไปเรื่อย ๆ จนค่าการทรุดตัวเริ่มหยุดนิ่ง จึงหยุดการทดสอบ โดยระหว่างที่มีการวัดการทรุดตัว ความดันน้ำส่วนเกินในช่องว่างและความดันในดินและความเค้นในเสาเข็มดินซีเมนต์เถ้าลอยจะถูกวัดค่าตามเวลาขณะที่เกิดการทรุดตัวแบบระบายน้ำด้วยเช่นกัน

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมทรุดตัวของชั้นดินประกอบ

3.1.1 การทรุดตัวของระบาย

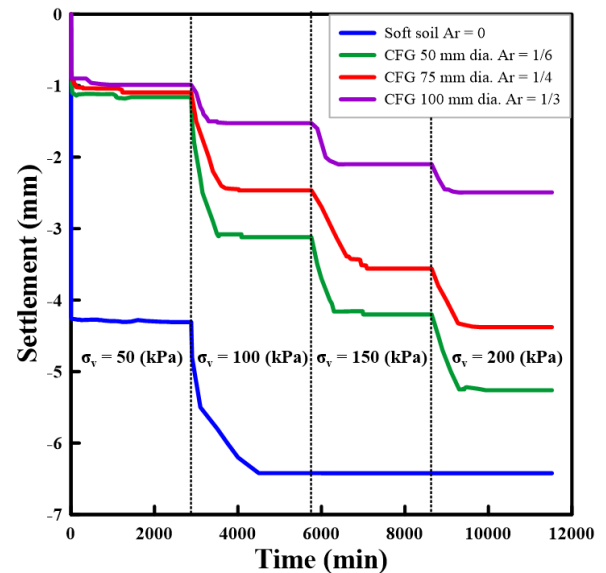
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของระบายน้ำและเวลา ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็ม CFG ทั้ง

3 ขนาด มีค่าอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพ (Ar) เท่ากับ 0 (dia. = 0 มิลลิเมตร), 1/6 (dia. = 50 มิลลิเมตร), 1/4 (dia. = 75 มิลลิเมตร) และ 1/3 (dia. = 100 มิลลิเมตร) ตามลำดับซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ความเค้นในแนวดิ่งมีค่า 50 กิโลปาสกาล ที่เวลา 2880 นาที (2 วัน) ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำ 4.31 มิลลิเมตร, 1.16 มิลลิเมตร, 1.10 มิลลิเมตร, 0.99 มิลลิเมตร, ช่วงที่ 2 ความเค้นในแนวดิ่งมีค่า 100 กิโลปาสกาล ที่เวลา 2880 นาที (2 วัน) ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำ 6.42 มิลลิเมตร, 3.12 มิลลิเมตร, 2.47 มิลลิเมตร, 1.52 มิลลิเมตร, ช่วงที่ 3 ความเค้นในแนวดิ่งมีค่า 150 กิโลปาสกาล ที่เวลา 2880 นาที (2 วัน) ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำ 4.20 มิลลิเมตร, 3.56 มิลลิเมตร, 2.10 มิลลิเมตร และช่วงที่ 4 ความเค้นในแนวดิ่งมีค่า 200 กิโลปาสกาล ที่เวลา 2880 นาที (2 วัน) ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำ 5.26 มิลลิเมตร, 4.38 มิลลิเมตร, 2.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ช่วงแรกชั้นดินประกอบที่มีเสาเข็ม CFG เมื่อเริ่มรับความเค้นในแนวดิ่งนั้นค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราส่วนผลต่างการทรุดตัวระยะยาวน้ำเท่ากับ 17.17%, 11.11% เมื่อเทียบขนาดของเสาเข็ม 50 และ 75 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร เนื่องจากดินยังคงมีช่องว่างอยู่ค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำจึงมีค่าใกล้เคียงกัน [7] แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2, 3, 4 เห็นได้ชัดว่าชั้นดินประกอบที่มีอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพ (Ar) สูงหรือเสาเข็ม CFG ที่มีขนาดใหญ่เกิดการทรุดตัวระยะยาวน้อยกว่าอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพ (Ar) ต่ำอย่างเห็นได้ชัด [8,9] โดยช่วงที่ 2 นั้นมีอัตราส่วนผลต่างการทรุดตัวระยะยาวน้ำเท่ากับ 105.26%, 62.5%, ช่วงที่ 3 อัตราส่วนผลต่างการทรุดตัวระยะยาวน้ำเท่ากับ 100%, 69.52% และ ช่วงที่ 4 อัตราส่วนผลต่างการทรุดตัวระยะยาวน้ำเท่ากับ 111.24%, 75.9% เมื่อเทียบกับขนาดเสาเข็ม 50 และ 75 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร เนื่องจากตัวเสาเข็มกรวดซีเมนต์เด้งล่อนนั้นช่วยเพิ่มค่าความเค้นที่จุดครากของชั้นดินประกอบ [9,10,11] จึงทำให้สามารถรับค่าความเค้นในแนวดิ่งได้สูงขึ้นกว่าชั้นดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยผลต่างการทรุดตัวระยะยาวน้ำเท่ากับ 335.18% และ 321.08% ในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เมื่อเทียบดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ กับดินที่มีอัตราส่วนการปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 1/3 สังเกตได้จากค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำที่แตกต่างกันของแต่ละแบบจำลอง และเมื่อเสาเข็ม CFG ยังมีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถช่วยลดค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำของชั้นดินประกอบได้มากยิ่งขึ้นดัง **รูปที่ 4**

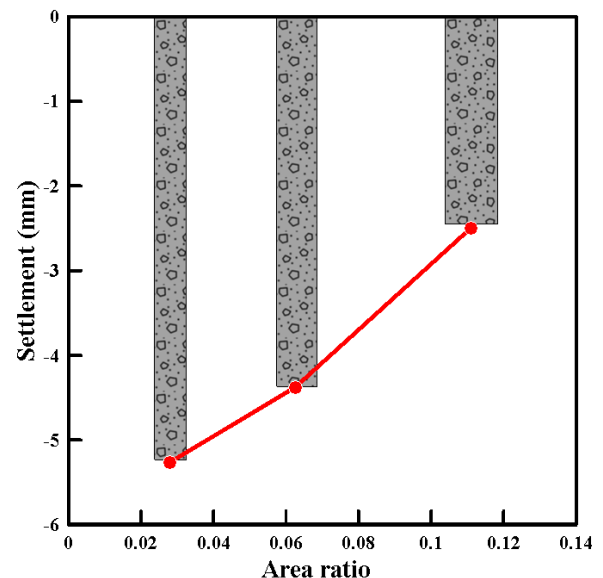
3.1.2 แรงดันน้ำส่วนเกิน

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินสะสมในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ รอบเสาเข็ม CFG กับช่วงเวลาการทรุดตัวระยะยาวน้ำของตัวอย่างเสาเข็ม CFG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่แนวรัศมี 75 และ 125 มิลลิเมตรและที่ระดับความลึก 100 และ 175 มิลลิเมตร วัดจากหัวเสาเข็ม โดยพบว่า PPT ทั้ง 4 ตัวนั้นในช่วงต้น(เริ่มทำการทดสอบ) แรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความเค้นในช่วงแรกนั้นจะกระจายลงดิน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความ

เค้นจากในดินจะกระจายไปยังเสาเข็ม CFG [7,10,12] จึงทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินในดินมีค่าลดลงตามเวลาที่เกิดการทรุดตัวระยะยาวน้ำ

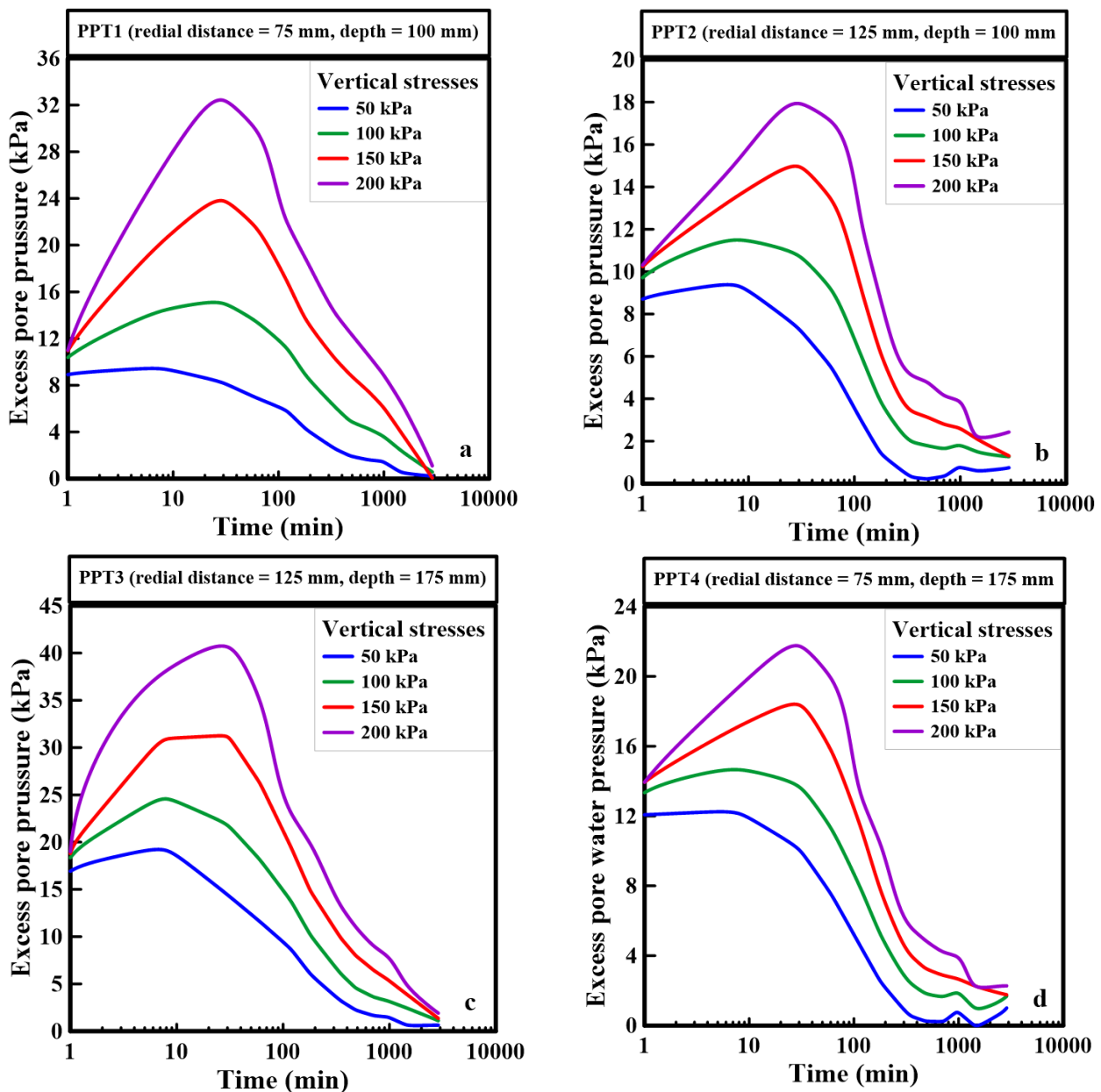


รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวระยะยาวน้ำเทียบกับเวลาของดินเหนียวที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและดินเหนียวที่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็ม CFG



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์พื้นที่ปรับปรุงคุณภาพเทียบกับเวลา

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินในดินตามแนวรัศมีในช่วงเวลาที่เกิดการทรุดตัวระยะยาวน้ำ ในช่วงที่ความเค้นแนวดิ่ง 50 กิโลปาสกาล ของเสาเข็มขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ระยะ 75 มิลลิเมตรและ 125 มิลลิเมตร พบว่าแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนที่อยู่ใกล้กับเสาเข็มนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแรงดันน้ำในดินที่ไกลออกไปจากเสาเข็มในช่วงเวลาเดียวกัน [10] เนื่องจากเสาเข็มนั้นมีความพรุนสูงจึงเกิดการระบายน้ำได้เร็วกว่าแรงดันน้ำในดินที่อยู่ไกลออกไป โดยจะเป็นไปในทิศทางเดียว



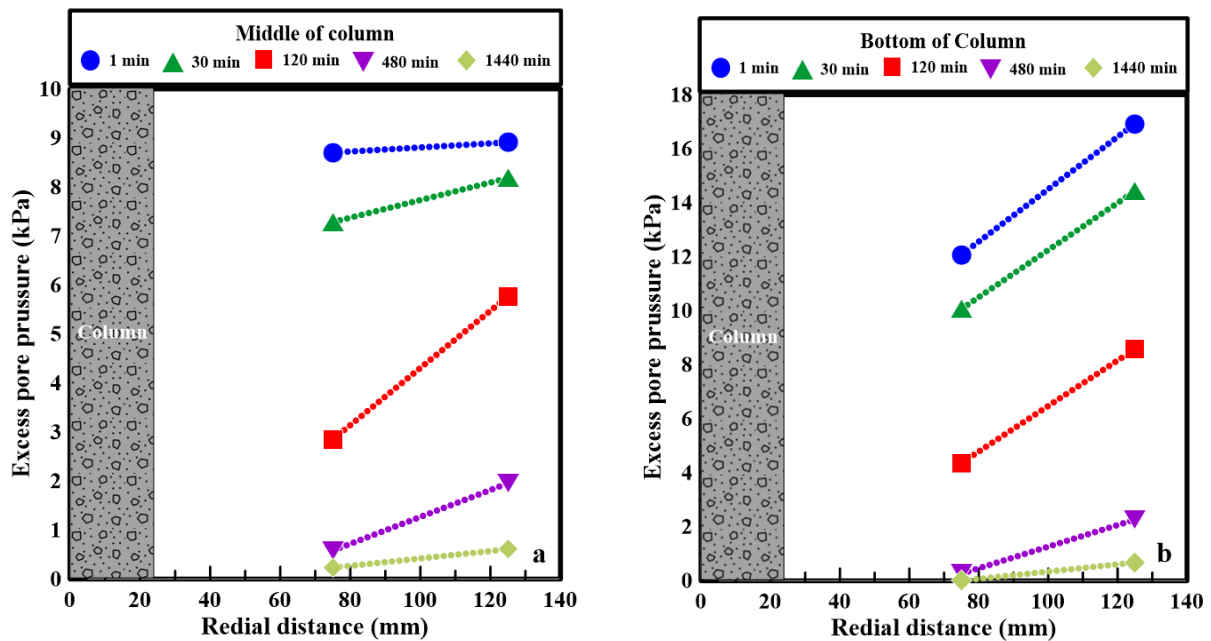
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายน้ำในดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ รอบเสาเข็ม CFG

กันทั้งที่ตรงกลางของเสาตำแหน่งระดับความลึก 100 มิลลิเมตร (รูปที่ 6 a) และด้านล่างของเสาตำแหน่งระดับความลึก 175 มิลลิเมตร (รูปที่ 6 b)

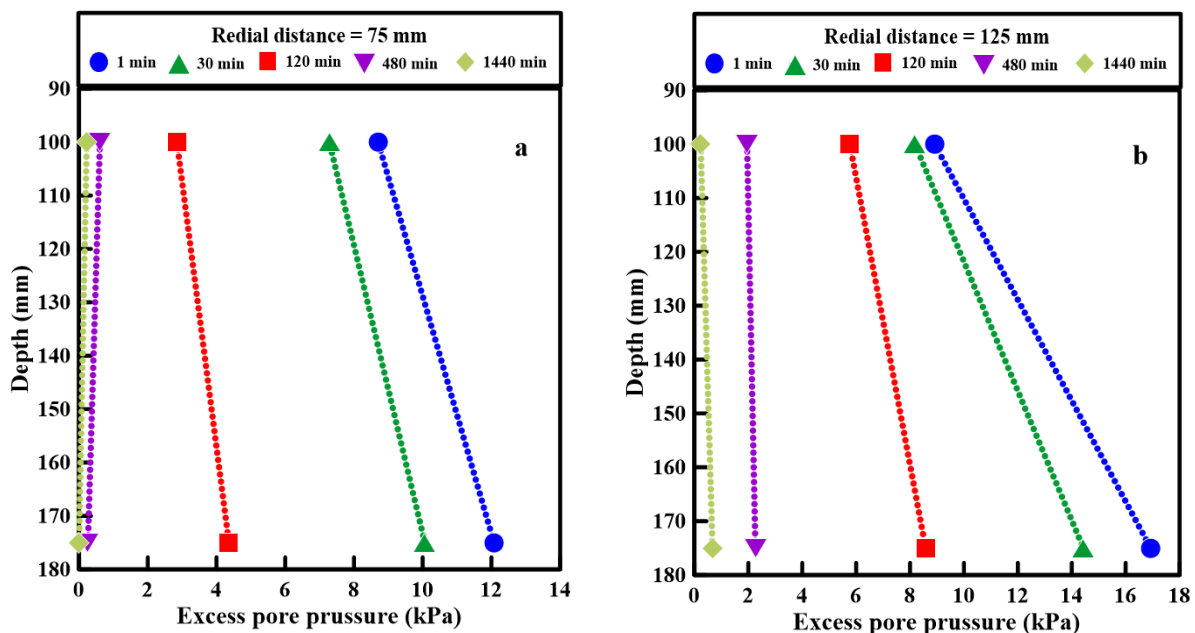
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินในดินในแนวตั้งในช่วงเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายน้ำ และในช่วงที่ความเค้นแนวตั้ง 50 กิโลปาสกาล ของเสาเข็มขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึก 100 มิลลิเมตรและ 175 มิลลิเมตร พบว่า แรงดันน้ำส่วนเกินในส่วนที่ลึกนั้นจะมีค่าสูงกว่าตำแหน่งที่อยู่สูงกว่าทั้งในแนวรัศมี 75 และ 125 มิลลิเมตร เนื่องจากตำแหน่งความสูงที่ 100 มิลลิเมตร อยู่ใกล้ตำแหน่งที่ทำการทดสอบทำให้ได้รับค่าความเค้นสูงกว่าตำแหน่งที่ 175 มิลลิเมตร [7,10,11]

3.1.3 ความเค้นของเสาเข็มกรวดซีเมนต์เกลี้ยงและดินโดยรอบ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นในแนวดิ่งกับระยะเวลาการเกิดการทรุดตัวระบายน้ำของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยเสาเข็มกรวดซีเมนต์เกลี้ยงขนาด 50 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยความเค้นในแนวดิ่งที่ใช้มีขนาด 50, 100, 150 และ 200 กิโลปาสกาล พบว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพในช่วงต้น(เริ่มการทดสอบ)ในแต่ละช่วงนั้นค่าความเค้นในดินมีค่าสูงในช่วงต้นและลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเค้นในดินมีการกระจายตัวจากดินไปยังเสาเข็ม [8,10,13] โดยสังเกตได้จากความเค้นของเสาที่มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาเดียวกัน ในส่วนของดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจะเห็นได้ชัดว่าค่าความเค้นมีค่าสูงกว่าดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินในดินตามแนวรัศมีในช่วงเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายนํ้า



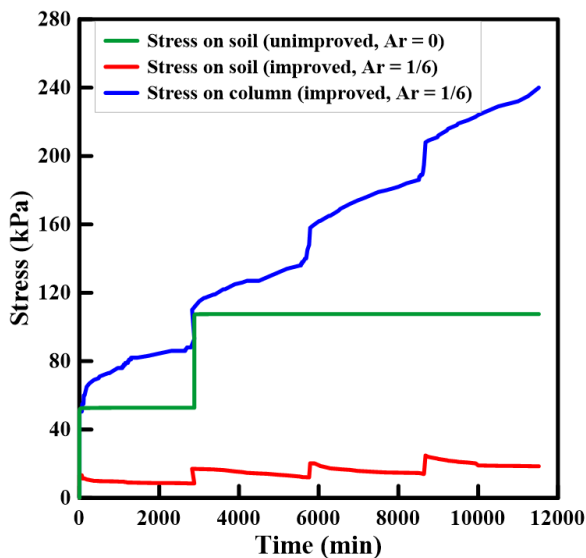
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินในดินในแนวตั้งในช่วงเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายนํ้า

เวลาการทรุดตัวเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีค่าต่างกัน ประมาณ 281.21% ในช่วงแรกที่เริ่มทำการทดสอบ และ 520.64 % ในช่วงที่ดินมีค่าการทรุดตัวระบายนํ้าสิ้นสุดที่ช่วงการทดสอบ 50 กิโลปาสกาลและเมื่อเพิ่มความเค้นที่เหนือเสาเข็ม CFG พบว่าเสาเข็มจะช่วยลดค่าความเค้นในดินได้มากขึ้น [10,12]

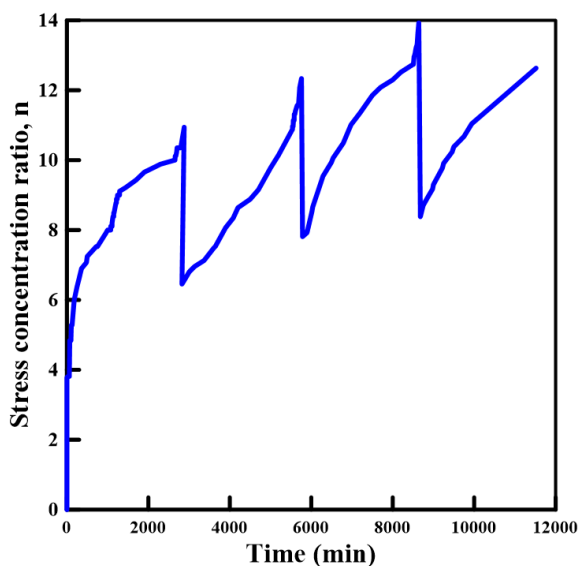
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นรวมศูนย์ (stress concentration ratio ,n) ซึ่งได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้น

ในเสาเข็มเทียบกับค่าความเค้นในดินในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่าในช่วงต้น (เริ่มทำการทดสอบ) ค่า n จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความเค้นในดินนั้นมีค่าที่สูงกว่าความเค้นในเสาเข็ม CFG ส่งผลให้ค่า n มีค่าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อถึงระยะเวลานึงที่ค่าความเค้นในดินมีค่าลดลงเนื่องจากเสาเข็มทำหน้าที่รับกำลังที่เพิ่มขึ้น จนสิ้นสุดการทรุดตัวระบายนํ้าและความเค้นในเสาเข็ม CFG มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทำให้ค่า n มีค่าลดลง [10] ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรับกำลังของเสาเข็มที่สามารถ

ช่วยปรับปรุงคุณภาพดินได้ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบใน รูปที่ 8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของการรับกำลังของดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ เทียบกับกับดินที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็ม CFG นอกจากนั้นยังพบว่าความสัมพันธ์ในรูปที่ 8 และ 9 สอดคล้องกับความสัมพันธ์ในรูปที่ 5 เรื่องแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อเทียบกับเวลา นั่นคือในช่วงต้น ค่าความเค้นในดินและค่าแรงดันน้ำในดินในแต่ละตำแหน่งมีค่าสูง แต่เมื่อค่าความเค้นในดินมีการกระจายแรงการกระทำไปยังเสาเข็ม CFG ความเค้นในดินมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำในดินในแต่ละตำแหน่งมีค่าลดลง ดังที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นในดินและเสาเข็ม CFG ที่ได้รับการปรับปรุง ($Ar=1/6$) และไม่ได้รับการปรับปรุง ($Ar=0$) เทียบกับเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายนํ้า



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นรวมศูนย์และเวลาที่เกิดการทรุดตัวระบายนํ้า

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาสมรรถนะของเสาเข็ม CFG ภายใต้การอัดตัวคายน้ำ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- เมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็ม CFG พบว่าการทรุดตัวระบายนํ้าของดินมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และจะมีค่าต่ำยิ่งขึ้นเมื่อค่าพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพ (Ar) มีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ที่มีการปรับปรุงคุณภาพมาก จะทำให้มีความสามารถในการรับกำลังสูงขึ้น ส่งผลให้ดินมีการทรุดตัวลดลง
- ดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็ม CFG สามารถเพิ่มความเค้นที่จุดตรวจสูงกว่าดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้ยิ่งขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการก่อสร้างคันทางหรือโครงสร้างขนาดเล็ก โดยความสามารถในด้านกำลังเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพ (Ar) ที่เพิ่มขึ้น
- เสาเข็ม CFG ช่วยเร่งการทรุดตัวระบายนํ้า ทำให้การทรุดตัวระบายนํ้าดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว โดยที่แรงดันน้ำใกล้เสาเข็มมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความพรุนของเสาเข็มที่ส่งผลดีในการระบายได้ดี และที่ความลึกต่างกัน บริเวณที่ลึกกว่าจะมีแรงดันน้ำส่วนเกินสูงกว่าเนื่องจากแรงกระทำสะสมคงค้างจากด้านบนของดินที่รับความเค้นด้านบนสูงกว่าด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษาและแก้ไขในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abusharar, S. W., Zheng, J.-J., & Chen, B.-G. (2009). "Finite element modeling of the consolidation behavior of multi-column supported road embankment." *Computers and Geotechnics*. 36(4) : 676–685.
- [2] Jamsawang, P., Voottipruex, P., Boathong, P., Mairiang, W., & Horpibulsuk, S. (2015). "Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows." *Engineering Geology*. 188 : 159–167.
- [3] 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.
- [4] Jamsawang, P., Bergado, D. T., & Voottipruex, P. (2011). "Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles."

Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. 164(1) : 33–49.

- [5] Voottipruex, P., Suksawat, T., Bergado, D. T., & Jamsawang, P. (2011). “Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads.” *Computers and Geotechnics*. 38(3) : 318–329.
- [6] 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.
- [7] Fang, Z., & Yin, J.-H. (2007). “Responses of Excess Pore Water Pressure in Soft Marine Clay around a Soil–Cement Column.” *International Journal of Geomechanics*, 7(3), 167–175.
- [8] SIVAKUMAR, V., JELUDINE, D. K. N. M., BELL, A., GLYNN, D. T., & MACKINNON, P. (2011). “The pressure distribution along stone columns in soft clay under consolidation and foundation loading.” *Géotechnique*. 61(7) : 613–620.
- [9] Siva Sankara Reddy, D. V., Chittaranjan, M., Ravi Kumar Reddy, C., & Kowshik, K. (2018). Performance evaluation of stone column installed soft ground- A parametric study with numerical investigation. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(25), 7–13.
- [10] Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J., & Liu, M. D. (2012). “Consolidation behavior of soil–cement column improved ground.” *Computers and Geotechnics*. 43 : 37–50.
- [11] Aseeja, P. K. (2016). Modelling Consolidation Behavior of Embankment Using Plaxis. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 70–75.
- [12] Yin, J.-H., & Fang, Z. (2006). “Physical modelling of consolidation behaviour of a composite foundation consisting of a cement-mixed soil column and untreated soft marine clay.” *Géotechnique*. 56(1) : 63–68.
- [13] Ni, P., Yi, Y., & Liu, S. (2020). “Bearing capacity of composite ground with soil-cement columns under earth fills: Physical and numerical modeling.” *Soils and Foundations*.