

สมรรถนะของเสาหินไวโบริบปรับปรุงทรายปนทรายแป้ง  
ภายใต้สภาวะการอัดตัวระบายน้ำ  
Performance of vibro stone column improve silty sand  
under consolidation condition

อสรุจ หนูรัก<sup>1</sup> พิทยา แจ่มสว่าง<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

<sup>2</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

\*Corresponding author; E-mail address: pitthaya\_kmutnb@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ทรายปนทรายแป้ง (Silty sand) เป็นดินที่มีปัญหาหลักอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก โดยที่ทรายปนทรายแป้งจะมีความแข็งแรง และความสามารถในการรับแรงแบกทานที่สูงเมื่ออยู่ในสภาวะดินแห้งสนิท แต่ในทางกลับกันหากทรายปนทรายแป้งสัมผัสกับน้ำจะมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการเกิดการพังทลาย เนื่องจากดินที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว (Saturate soil) หรืออยู่ในสภาวะอิ่มตัวบางส่วนจะเกิดการสูญเสียความแข็งแรง และความแข็ง ภายใต้น้ำหนักที่มากกระทำ ทำให้ดินที่มีสถานะเป็นของแข็งปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเหมือนสถานะเหลว เกิดการเคลื่อนตัว เกิดการเอียงตัว และการทรุดตัวของโครงสร้าง หรือการเกิดการพังทลายของพื้นที่ลาดชัน ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่มักจะพบในทรายปนทรายแป้งที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว และสภาพหลวม ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการจำลองแบบหล่อตัวอย่างในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการสันสะเทือนเพื่อทำการศึกษสมรรถนะของเสาหิน (Stone column) ไวโบริบปรับปรุงคุณภาพทรายปนทรายแป้งภายใต้สภาวะการอัดตัวระบายน้ำ ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ (2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์) และที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายปนทรายแป้ง (0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์) จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลในการช่วยลดความแตกต่างการทรุดตัวของทรายปนทรายแป้ง และช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นภายในทรายปนทรายแป้ง เนื่องจากอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ที่มีค่าสูงนอกจากดังที่กล่าวมาข้างต้นเสาหินยังมีส่วนในการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงแบกทานภายใต้ น้ำหนักที่มากกระทำ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของดิน และลดความเป็นไปได้ในการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction) ในดินทรายหลวมอิ่มตัว เนื่องจากเสาหินมีความแข็งแรง และโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่าทรายปนทรายแป้งความเค้นที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ปรับปรุงคุณภาพดิน, ทรายปนทรายแป้ง, เสาหิน, ความเข้มของ  
ความเค้น

### Abstract

Silty sand is another major issue soil type seen in many places of the world due to its rigidity and high bearing capacity under dry soil conditions. However, if the silty sand comes into contact with water, there is a high chance of failure since soil in a saturate or partially saturate condition loses strength and stiffness under applied stress. The soil changes from just a solid to a liquid, lateral displacement, settlement, and slop failure. The majority of behaviors are observed in silty sand saturated and loose conditions. The purpose of this study is to model casting in the laboratory by vibro method to study the performance of a vibro stone column for silty sand ground improvement under consolidation conditions, as well as replacement ratio difference (2.78, 6.25, and 11.11 percent) and relative density difference (0, 40, 70, and 100 percent). As a result of the test, it was found that composite ground with increase replacement ratio reducing the difference in settlement and stress on the soil owing to high area replacement ratio. Because stone has a higher stiffness and modulus of elastic than silty sand, the resultant stress is higher, which increases soil stability, bearing capacity under applied pressure, and decreases liquefaction in loose sandy soils in saturated conditions.

Keywords: Soil improvement, Silty sand, Stone column, Stress concentration ratio

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินมีความสำคัญต่อความต้องการในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างมากเนื่องจากดินที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างไม่มีความเหมาะสมในการรองรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร คั่นทาง ถึงเก็บ

น้ำมัน เชื้อ หรือสะพาน จากที่กล่าวมานั้น ทรายปนทรายแป้ง (Silty sand) เป็นดินที่มีปัญหาหลักอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก โดยที่ทรายปนทรายแป้งจะมีความแข็งแรง และความสามารถในการรับแรงแบกทานมากเมื่ออยู่ในสภาวะดินแห้งสนิท แต่ในทางกลับกันหากทรายปนทรายแป้งสัมผัสกับน้ำจะมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการพังทลายเนื่องจากดินที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว (Saturate soil) หรืออยู่ในสภาวะอิ่มตัวบางส่วนเกิดการสูญเสียความแข็งแรง และความแข็ง ภายใต้น้ำหนักที่มากระทำ เช่น แผ่นดินไหว หรือสภาวะการเปลี่ยนแปลงความเค็มอย่างกะทันหัน ส่งผลทำให้ดินที่มีสถานะเป็นของแข็งปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเหมือนสถานะของเหลว ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่มักพบในทรายปนทรายแป้ง ที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว และสภาพหลวม (ความหนาแน่นต่ำ หรือไม่มีการบดอัด)

จากปัญหาดังกล่าวการปรับปรุงคุณภาพดินจึงมีความจำเป็นซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเสาหิน (Stone column) ซึ่งถูกนำมาใช้ครั้งแรกที่ประเทศฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1830 เป็นเทคนิคที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในยุโรปตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการก่อสร้างโดยใช้วิธี vibrofloatation ที่ประเทศเยอรมนี อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังไม่ได้เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางสำหรับแนวทางการก่อสร้างในประเทศสหรัฐอเมริกาจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1972 เป็นวิธีที่รู้จักมากขึ้น โดยเสาหินเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้กันมากในการปรับปรุงคุณภาพดิน และเป็นวิธีที่ถูกใช้ในการปรับปรุงดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และยังรวมไปถึงทรายหลวม [1] บนพื้นฐานของทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำที่พัฒนาขึ้นสำหรับดินอ่อนกับการระบายน้ำในแนวตั้งได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับเสาหินปรับปรุงฐานรากซึ่งเสาหินไม่เพียงแต่ช่วยเร่งอัตราการอัดตัวระบายน้ำ และลดความแตกต่างการทรุดตัวของดินทั้งหมดเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงแบกทาน เพิ่มเสถียรภาพคันทาง และทางลาดชันธรรมชาติ และลดความเป็นไปได้ในการลัดทำให้เป็นของเหลว [2] เนื่องจากวัสดุของเสาหินมีความพรุนสูง การอัดตัวระบายน้ำในดินทรายหลวม และการระบายน้ำที่ต่ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [3-5] ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวใหม่ ช่วยลดอัตราส่วนช่องว่าง และลดสภาพการอัดตัวรวมไปถึงการเพิ่มมุมเสียดทานภายใน [6] ถึงแม้ว่าเสาหินถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในโครงการด้านเทคนิคธรณี แต่วิธีการออกแบบในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่มาจากประสบการณ์การทำงานหรือการทดลองมากกว่าทฤษฎี [7] ซึ่งแนวความคิด unit cell มีจุดประสงค์ในการหาความสามารถในการรับแรงแบกทาน และการทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหิน [8] โดยแนวความคิด unit cell หมายถึงหนึ่งหน่วยทรงกระบอกของพื้นที่วงกลมโดยประมาณ ซึ่งแปลงมาจากพื้นที่รับอิทธิพลของเสาหิน โดยการสมมติพื้นที่รับน้ำหนักที่อยู่อย่างกว้างขวางไม่มีที่สิ้นสุดของการปรับปรุงคุณภาพดินกับเสาหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างเสาหินคงที่ [9]

ดังนั้นจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้คือการศึกษาคูสมบัติทางวิศวกรรมของทรายปนทรายแป้งเพื่อเป็นการประเมินสมรรถนะของเสาหินไวนอร์ในการปรับปรุงทรายปนทรายแป้งภายใต้การอัดตัวระบายน้ำ ที่ความแตกต่าง

ของความหนาแน่นสัมพัทธ์ ความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาหิน และแรงกระทำในแนวตั้งต่าง ๆ

## 2. การทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษา

#### 2.2.1 หิน

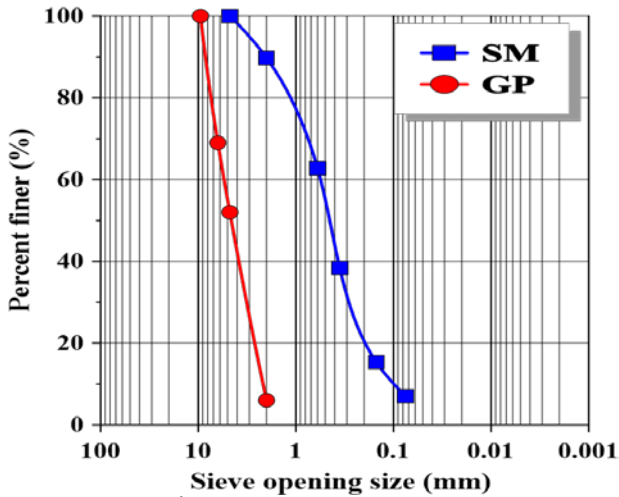
ตัวอย่างหินที่ใช้ในการศึกษาเป็นหินที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปแสดงในรูปที่ 1 (ก) และแสดงกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปที่ 2 โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ( $G_s$ ) 2.61, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ( $k$ ) 4.974 เมตรต่อนาที, ค่าการดูดซึมน้ำ 1.41 เปอร์เซ็นต์, ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) 43 องศา, ค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ( $\gamma_{dry}$ )<sub>min</sub> 15.00 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด ( $e_{max}$ ) 0.706, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\gamma_{dry}$ )<sub>max</sub> 17.30 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด ( $e_{min}$ ) 0.479, ค่ากำลังต้านทานต่อการสึกกร่อน 15.40 เปอร์เซ็นต์, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $D_r$ ) 73 เปอร์เซ็นต์, และจำแนกประเภทของดิน (Unified Soil Classification) GP (Poorly graded gravel) (ค่ามุมเสียดทานภายในใช้ค่าของ [7])

#### 2.2.2 ทรายปนทรายแป้ง

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรายปนทรายแป้งแสดงในรูปที่ 1 (ข) และแสดงกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปที่ 2 โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าพิกิตเหลว (LL) 22 เปอร์เซ็นต์, ค่าพิกิตพลาสติก (PL) 19 เปอร์เซ็นต์, ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ( $G_s$ ) 2.75, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\gamma_{dry}$ )<sub>max</sub> 16.70 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด ( $e_{min}$ ) 0.648, ค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ( $\gamma_{dry}$ )<sub>min</sub> 13.78 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด ( $e_{max}$ ) 0.996, ค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) 32, 34, 35, และ 37 องศา, และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ( $k$ )  $7.51 \times 10^{-6}$ ,  $5.48 \times 10^{-6}$ ,  $3.66 \times 10^{-6}$ , และ  $2.45 \times 10^{-6}$  เมตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $D_r$ ) 0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ, และจำแนกประเภทของดิน (Unified Soil Classification) SM (Silty sand)



รูปที่ 1 (ก) หิน และ (ข) ทรายปนทรายแป้ง ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาค

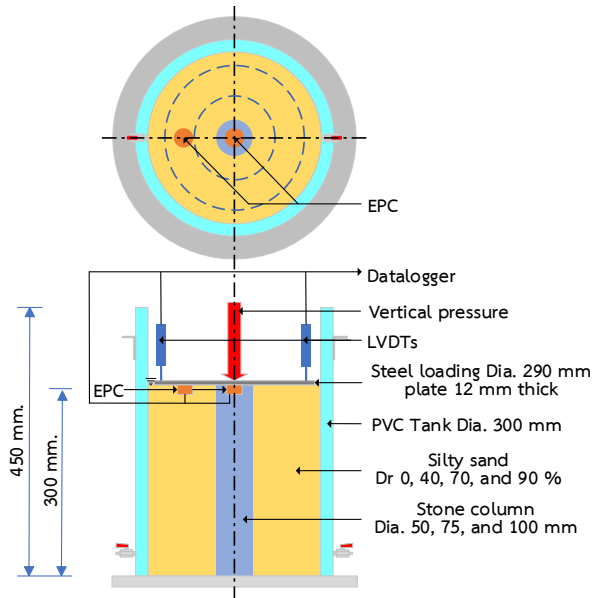
## 2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบทั้งหมดจะใช้วัสดุแบบหล่อ PVC รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร สูง 450 มิลลิเมตร โดยการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยการนำทรายปนทรายแบ่งไปบรรจุลงในแบบหล่อแบ่งการบรรจุเป็น 6 ชั้น หนาชั้นละ 50 มิลลิเมตร แต่ละชั้นจะทำการสั่นด้วยโต๊ะสั่นสะเทือนให้ได้ตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ที่กำหนด (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, 70 และ 90 เปอร์เซ็นต์) จนกระทั่งทรายปนทรายแบ่งถูกบรรจุลงในแบบหล่อเต็มความสูง 300 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเจาะโดยใช้กระบอกเจาะขนาด 50 มิลลิเมตร เจาะให้ถึงชั้นล่างสุดของแบบหล่อ จากนั้นนำทรายปนทรายแบ่งที่อยู่ภายในกระบอกเจาะออกมาทั้งหมดให้เกิดช่องว่าง ทำการบรรจุหินลงไปชั้นละ 50 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 6 ชั้น แต่ละชั้นทำการบดอัดด้วยค้อนเหล็กกลมน้ำหนัก 2 กิโลกรัม จำนวนบดอัด 10 ครั้ง ระยะตั้งสูง 100 มิลลิเมตร สลับกับดึงกระบอกเจาะขึ้นมาในแต่ละชั้นจนความสูงของเสาหินเท่ากับความสูงทรายปนทรายแบ่ง โดยกระบวนดังกล่าวมานั้นทำซ้ำที่ขนาดเสาหิน 75 และ 100 มิลลิเมตร (ยกเว้นขนาดเสาหิน 0 มิลลิเมตร ทำการบรรจุหินอย่างเดียว) ตามลำดับ หลังจากบรรจุทรายปนทรายแบ่งเสร็จสิ้น ดำเนินการวางแผนเหล็กกลม และเติมน้ำลงในแบบหล่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดสภาวะอิ่มตัว เมื่อครบกำหนดดำเนินการติดตั้งเครื่องมือวัด ได้แก่ เครื่องมือวัดแรงดันดิน หรือ Earth Pressure Cell (EPC) KYOWA รุ่น BEC-A-1MP มีอัตราความสามารถในการอ่านค่าที่รับได้สูงสุด 1 เมกะปาสคาล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และพื้นผิวเซนเซอร์วัดแรงดันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตร หนา 9 มิลลิเมตร ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาหิน และทรายปนทรายแบ่ง จำนวน 2 ตำแหน่ง ติดตั้งบริเวณพื้นผิวด้านบนเสาหิน และทรายปนทรายแบ่ง และเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง หรือ Linear Variable Differential Transformers (LVDTs) KYOWA รุ่น DTH-A-50 มีอัตราความสามารถในการอ่านค่าที่รับได้สูงสุด 50 มิลลิเมตร ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของวัสดุเชิงประกอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง ติดตั้งบริเวณพื้นผิว

ด้านบนแผ่นเหล็กกลมของวัสดุเชิงประกอบ หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดเสร็จสิ้นสามารถทดสอบได้ทันที โดยแบบหล่อตัวอย่างกับการติดตั้งอุปกรณ์ทั่วไปทั้งหมด แสดงในรูปที่ 3

## 2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

หลังจากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ และติดตั้งเครื่องมือวัดเสร็จสิ้น จะนำไปทดสอบพฤติกรรมการทรุดตัวของทรายน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ โดยการทดสอบการทรุดตัวของทรายน้ำมีน้ำหนักมากระทำในแนวตั้งทั้งหมด จำนวน 4 ค่า โดยเริ่มต้นแรงกระทำในแนวตั้งตั้งแต่ 20, 40, 60, และ 80 กิโลปาสคาล ซึ่งในแต่ละช่วงน้ำหนักที่กระทำส่งผลทำให้เครื่องมือวัดแรงดันดิน (EPC) และเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (LVDTs) มีการบันทึกค่าการทดสอบที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งในระหว่างการทดสอบทั้งหมดจะสอดคล้องกับระยะเวลาในการทดสอบ 1440 (1 วัน), 4320 (3 วัน), 4320 (3 วัน), และ 7200 (5 วัน) นาที ตามลำดับ

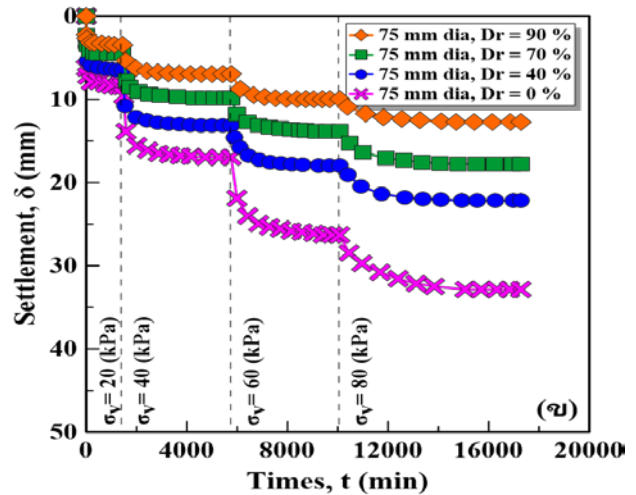
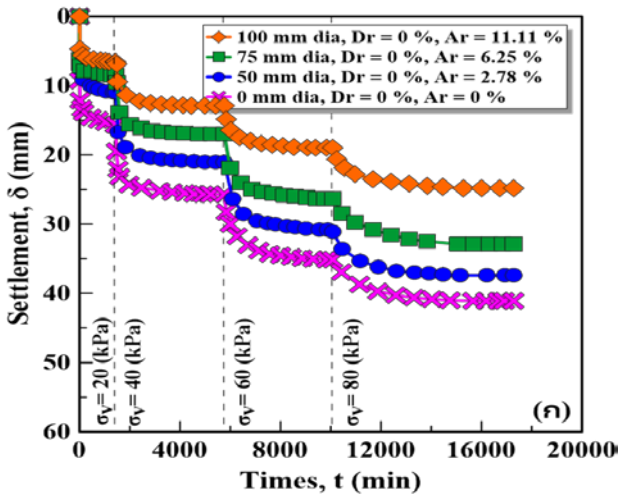


รูปที่ 3 แบบหล่อตัวอย่างกับการติดตั้งอุปกรณ์ทั่วไปทั้งหมด

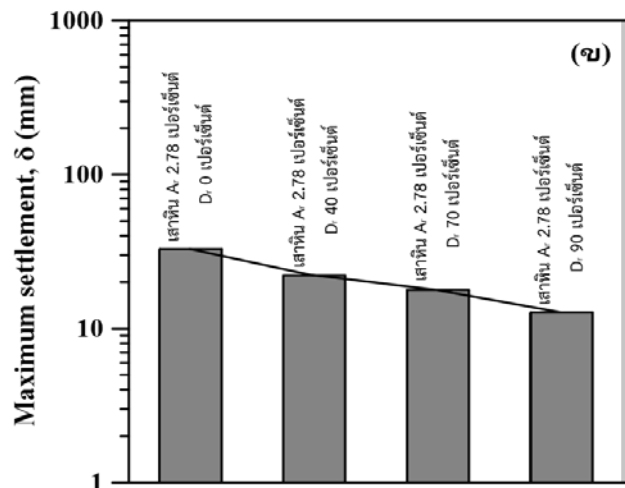
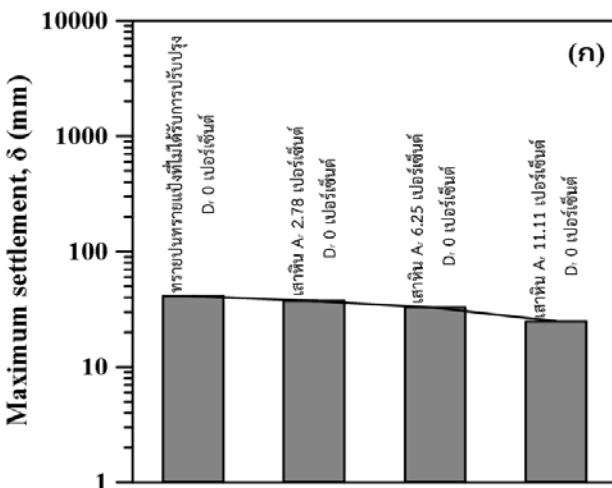
## 3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

### 3.1 ผลของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ และความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่อการทรุดตัวของทรายน้ำ

บทบาทหน้าที่ที่สำคัญอย่างมากต่อการลดการทรุดตัว และรับแรงแบกทานของวัสดุเชิงประกอบนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ [10] โดยในรูปที่ 4 (ก) แสดงผลทดสอบความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าในช่วงแรกเมื่อได้รับแรงมากระทำในแนวตั้งการทรุดตัวของวัสดุเชิงประกอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหิน เนื่องจากดินยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคอยู่ส่งผลทำให้มีค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน [11] แต่เมื่อสังเกตุทรายปนทรายแบ่งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหิน จะมีความแตกต่างของการทรุดตัวสูงอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของช่วงที่สอง



รูปที่ 4 ผลการทรุดตัวของใต้แรงกระทำในแนวตั้ง (ก) ที่ความแตกต่างอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่เสาหิน และ (ข) ที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์



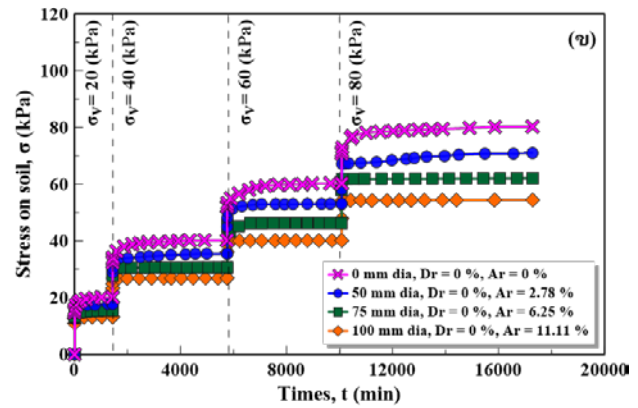
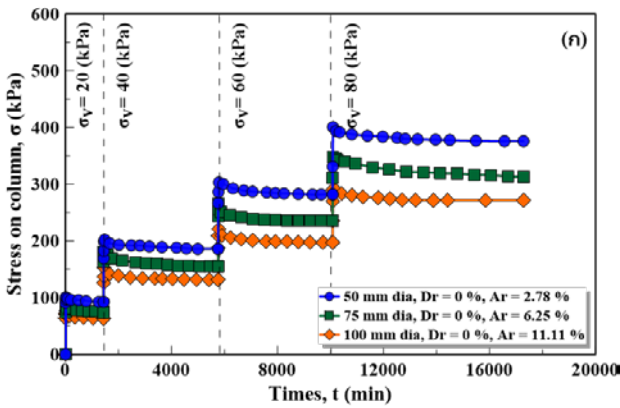
รูปที่ 5 ผลการทรุดตัวแรงกระทำในแนวตั้งสุดท้าย (ก) ที่ความแตกต่างอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่เสาหิน และ (ข) ที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์

ช่วงที่สาม และช่วงที่สี่ เมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้งเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วง เป็นที่สังเกตได้ว่าการทรุดตัวของทรายปนทรายแข็งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหินจะมีความคล้ายกับการทรุดตัวในช่วงแรก กล่าวคือมีการทรุดตัวสูง และเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกันกับทรายปนทรายแข็งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหินการทรุดจะมีค่าที่มีความต่างกัน และเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่สูง (เสาหินขนาดใหญ่) มีการทรุดตัวน้อยกว่าอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ต่ำ (เสาหินขนาดเล็ก) [12-13] เนื่องจากเสาหินนั้นมีส่วนในการช่วยเพิ่มความเค้นจึงทำให้มีความสามารถรับแรงในแนวตั้งได้มากขึ้นส่งผลทำให้ความเค้นที่จุดคราก (yield point) ของเสาหินเกิดขึ้นช้าลงกว่าทรายปนทรายแข็งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนลดการทรุดตัว ( $\beta$  = อัตราส่วนของค่าการทรุดตัวของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหิน และดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสา [14]) ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ แรงกระทำในแนวตั้งสุดท้าย (80 กิโลปาสกาล) เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5 (ก) พบว่าที่อัตราส่วนการทดแทน

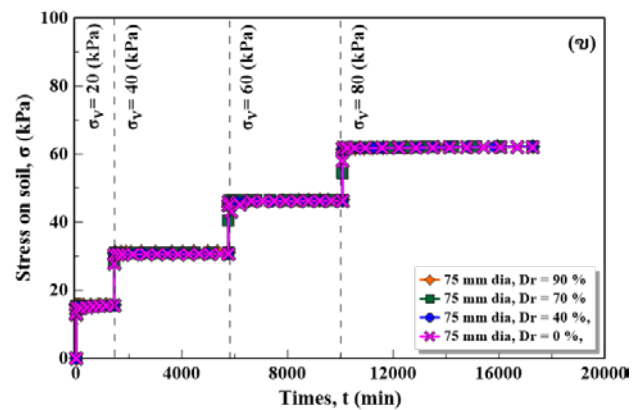
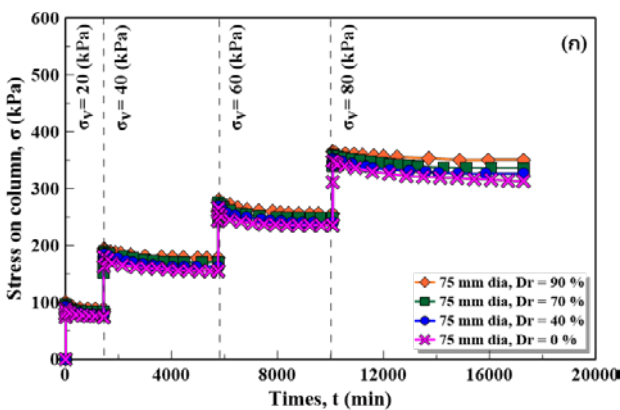
พื้นที่ 0, 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ มีการทรุดตัว 41.094, 37.385, 32.862, และ 24.800 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนลดการทรุดตัว มีค่าเท่ากับ 9.02, 20.03, และ 39.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ กับอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในส่วนของการทดสอบที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซ็นต์ ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่าการทรุดตัวลดลงเมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงแรกของวัสดุเชิงประกอบ เมื่อได้รับแรงกระทำในแนวตั้งการทรุดตัวที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ มีการทรุดตัวที่มีความต่างกันกับที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทรายปนทรายแข็งในช่วงแรกที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก หรือมีความหนาแน่นแรกเริ่มน้อยกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้เมื่อมีแรงมากระทำการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจึงมีค่าที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งต่างกับที่





รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นบน (ก) เสาหิน และ (ข) ทราຍปนทราຍแ่่ง กับเวลา ที่ความแตกต่างอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซนต์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นบน (ก) เสาหิน และ (ข) ทราຍปนทราຍแ่่ง กับเวลา ที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซนต์

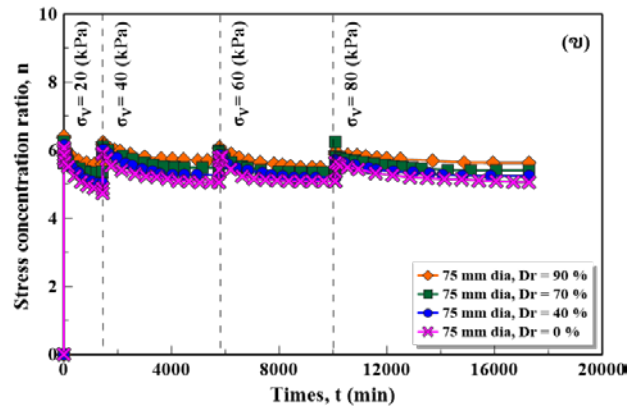
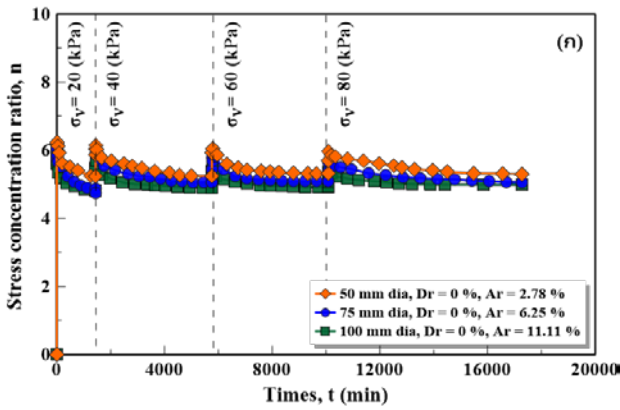
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ เป็นที่สังเกตว่าการทรุดตัวจะมีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นที่สังเกต ว่าการทรุดตัวจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของช่วงที่สอง ช่วงที่สาม และช่วง ที่สี่ เมื่อมีแรงมากระทำเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีการทรุดที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบในช่วงสุดท้าย (80 กิโลปาสกาล) ที่ความหนาแน่น สัมพัทธ์ 0 เปอร์เซนต์ แสดงในรูปที่ 5 (ข) พบว่ามีการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ 32.862 มิลลิเมตร ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซนต์ ซึ่งการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ 22.164, 17.774, และ 12.727 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนลดการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ 32.55, 45.91, และ 61.27 เปอร์เซนต์ เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซนต์ กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซนต์

### 3.2 ผลการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ

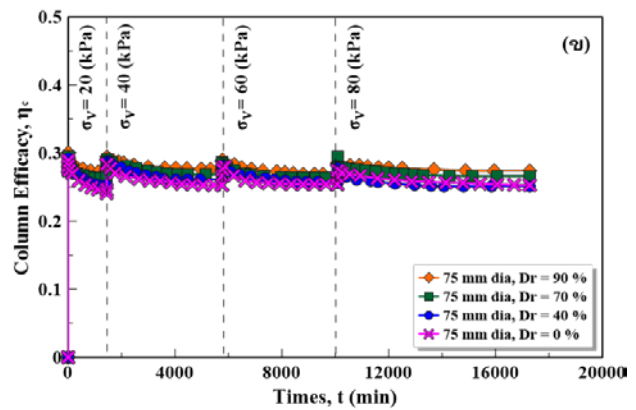
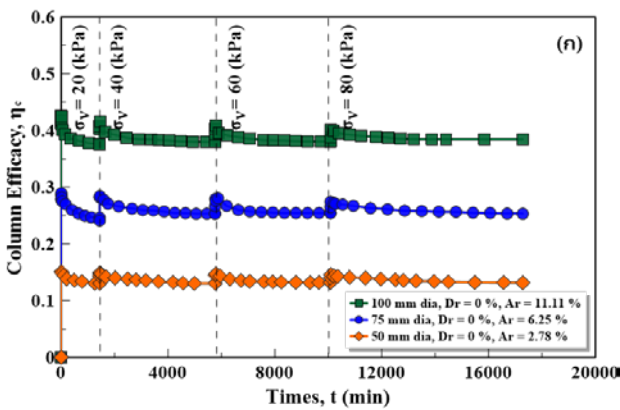
#### 3.2.1 ความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นกับเวลา

จากรูปที่ 6 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้น ของทราຍปนทราຍแ่่งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ (เกิดขึ้นบนทราຍปน ทราຍแ่่ง) และความเค้นที่เกิดขึ้นของทราຍปนทราຍแ่่งที่ได้รับการ ปรับปรุงคุณภาพ (เกิดขึ้นบนเสาหิน และทราຍปนทราຍแ่่งโดยรอบเสา หิน) กับเวลา ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 0, 2.78,

6.25, และ 11.11 เปอร์เซนต์ ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซนต์ ภายใต้แรงการกระทำในแนวตั้ง พบว่าความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นในทราຍ ปนทราຍแ่่งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพนั้นมีค่าน้อยกว่าทราຍปนทราຍ แ่่งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากทราຍปนทราຍแ่่งที่ไม่ได้รั บการปรับปรุงคุณภาพเมื่อมีแรงในแนวตั้งมากระทำส่งผลทำให้มีการรับแรง ที่มากระทำทั้งหมดโดยตรง ไม่เกิดการถ่ายโอนความเค้น ทำให้ความเค้นใน แนวตั้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งนักวิจัยหลายท่านสังเกตพบเห็น [15] ในส่วนของ ทราຍปนทราຍแ่่งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเมื่อมีแรงในแนวตั้งมา กระทำ ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนความเค้นจากทราຍปนทราຍแ่่งไปยัง เสาหิน เนื่องจากเสาหินมีความแข็ง และโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่าทราຍปน ทราຍแ่่ง ส่งผลทำให้ทราຍปนทราຍแ่่งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมี ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ต่ำกว่าทราຍปนทราຍแ่่งที่ไม่ได้รับการปรับปรุง คุณภาพทำให้มีค่าความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นบนทราຍปนทราຍแ่่งมีค่า เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่น้อยกว่าทราຍปนทราຍแ่่งที่ไม่ได้รับการปรับปรุง คุณภาพ เนื่องจากเมื่อมีแรงมากระทำเสาหินจะเกิดการขยายตัวออก ทางด้านข้างเกิดแรงต้านระหว่างเสาหินกับทราຍปนทราຍแ่่งส่งผลทำให้ ความเค้นจะเพิ่มขึ้นที่ทราຍปนทราຍแ่่งเล็กน้อย ซึ่งค่าความเค้นที่ลดลงจะ สอดคล้องกับขนาดของเสาหินที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ความเข้มของความเค้น (ก) ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ และ (ข) ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ ที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซ็นต์ กับเวลา



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเสาหิน (ก) ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ และ (ข) ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ ที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซ็นต์ กับเวลา

ในส่วนของความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาหินที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 0, 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่ง พบว่าค่าความเค้นในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นบนเสาหินมีค่าสูงในช่วงแรกแต่เมื่อรับแรงกระทำในแนวดิ่งได้ระยะหนึ่งค่าความเค้นในแนวดิ่งจะลดลงจนกระทั่งคงที่ตามระยะเวลาที่เกิดขึ้น เนื่องจากเสาหินเมื่อมีแรงกระทำในแนวดิ่งจะเกิดการขยายตัว หรือการเสียรูปทางด้านข้าง เสาหินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ระหว่างอนุภาค ซึ่งส่งผลต่อการรับความเค้น โดยขนาดของเสาหินเป็นส่วนสำคัญที่มีส่วนช่วยในการลดความเค้นที่เกิดขึ้นในทรายเป็นทรายเป็น จากการทดสอบเมื่อสิ้นสุดการทดสอบในช่วงสุดท้าย (80 กิโลปาสกาล) ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 400.68, 348.37, และ 290.66 กิโลปาสกาล ที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนผลต่างของความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ 27.46 และ 16.57 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78 และ 6.25 เปอร์เซ็นต์ กับ 11.11 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนผลต่างของความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากับ 13.06 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78 กับ 6.25 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 7 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นของทรายเป็นทรายเป็นที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ (เกิดขึ้นบนเสา

หิน และทรายเป็นทรายเป็นโดยรอบเสาหิน) กับเวลา ที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซ็นต์พบว่าความเค้นในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นในทรายเป็นทรายเป็นนั้นมีค่าใกล้เคียงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีแรงกระทำจะเกิดความเค้นในแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในทุกช่วงของแรงกระทำในแนวดิ่ง ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นในทรายเป็นทรายเป็นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่น ความพรุน และรูปร่างของช่องว่างของทรายเป็นทรายเป็นที่มีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงที่แตกต่างกัน จากความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันยังมีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาหิน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาหินจะมีค่าตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ และแรงกระทำในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความเค้นในแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อรับแรงกระทำในแนวดิ่งได้ระยะหนึ่งค่าความเค้นในแนวดิ่งจะลดลงจนกระทั่งคงที่ตามระยะเวลาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความคล้ายกันกับกรณีที่มีความแตกต่างของขนาดเสาหิน เป็นที่สังเกตได้ว่าจากการลดลงของความเค้นในแนวดิ่งที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะลดลงน้อยกว่าที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ เนื่องจากความหนาแน่นสูง และอัตราส่วนช่องว่าง ความพรุนน้อย ส่งผลต่อการขยายตัว หรือการเสียรูปทางด้านข้างของเสาหินเช่นกัน เมื่อสิ้นสุดการทดสอบในช่วงสุดท้าย (80 กิโลปาสกาล) ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

348.37, 352.95, 358.86, และ 365.71 กิโลปาสกาล ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยคิดเป็นอัตราส่วนเพิ่มขึ้นของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.32, 3.01, และ 4.98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์

### 3.2.2 ผลของความเข้มของความเค้นกับเวลา

ในระหว่างเกิดกระบวนการการอัดตัวระยะบายน้ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความเค้นระหว่างเสาหิน และทรายปนทรายแข็งโดยรอบเสาหิน ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของเสาหินในการรองรับโครงสร้าง โดยการถ่ายโอนความเค้นจากการทดสอบสามารถอธิบายได้อย่างง่ายโดยผ่านกราฟอัตราส่วนความเข้มของความเค้น (Stress concentration ratios,  $n$ ) เนื่องจากกราฟของทรายปนทรายแข็ง และความแตกต่างระหว่างความเข้มของเสาหิน ความเค้นจึงถูกถ่ายโอน ซึ่งค่าความเข้มของความเค้นสามารถหาได้จากความเค้นที่เกิดขึ้นบนเสาหินต่อความเค้นที่เกิดขึ้นบนทรายปนทรายแข็ง จากรูปที่ 8 (ก) แสดงถึงผลของความเข้มของความเค้นกับเวลาที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ จากแรงกระทำในแนวตั้งเกิดความเค้นอย่างรวดเร็วบนเสาหิน และทรายปนทรายแข็ง แต่ด้วยเสาหินมีความแข็งที่มากกว่าทรายปนทรายแข็งจึงมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวตั้งที่มากกว่า เมื่อหลังจากรับแรงกระทำในแนวตั้งในช่วงแรก เสาหินจะมีค่าความเค้นสูง และลดลงจนกระทั่งคงที่ตามระยะที่เกิดขึ้น ส่วนทรายปนทรายแข็งจะมีค่าที่สูงสุดขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาที่เกิดขึ้น เนื่องจากเสาหินเกิดการขยายตัว หรือเสียรูปออกทางด้านข้าง ทำให้เห็นได้ว่าค่าความเข้มของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด และลดลงหลังจากถึงค่าสูงสุด นั้นหมายความว่าความเค้นของทรายปนทรายแข็งเกิดการถ่ายโอน ในส่วนที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 6.25 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นว่าที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเข้มของความเค้นที่มากกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, และ 70 เปอร์เซ็นต์ บ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าความสามารถในการรับกำลังของเสาหิน และทรายปนทรายแข็งเพิ่มเมื่อขนาดเสาหินขนาดเล็ก และความหนาแน่นสัมพัทธ์มาก

โดยพฤติกรรมที่คล้ายกันมีแนวโน้มสามารถเกิดจากการลดลงของอัตราส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างเสาหิน กับทรายปนทรายแข็ง โดยรอบเสาหิน ( $E_c/E_s$ ) [16] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายปนทรายแข็งด้วยแรงกระทำในแนวตั้ง โดยค่าความเข้มของความเค้นที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังของเสาหินสามารถช่วยในการปรับปรุงได้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเค้นในที่แนวตั้ง

### 3.2.3 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพเสาหินกับเวลา

จากค่าความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นบนเสาหิน และทรายปนทรายแข็ง นั้นยังสามารถหาค่าประสิทธิภาพของเสาหิน (Column Efficacy,  $\eta_c$ ) โดยส่วนสำคัญที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเสาหิน คือ ความเข้มของความเค้น และอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นสัมพัทธ์

เท่ากัน (0 เปอร์เซ็นต์) ที่อัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ 2.78, 6.25, และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 9 (ก) กล่าวถึงเสาหินที่ขนาด 100 มิลลิเมตร จะมีความเข้มของความเค้นที่น้อย แต่มีอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่ที่มากกว่าเสาหินขนาด 50 และ 75 มิลลิเมตร ซึ่งอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่นั้นส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเสาหินมากกว่าความเข้มของความเค้น เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของเสาหินที่มีขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าเสาหินขนาดเล็ก บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเสาหินขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าเสาหินขนาดเล็ก [17] และความเครียดที่เพิ่มขึ้นของเสาหินขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่เท่ากัน (เสาหินขนาด 75 มิลลิเมตร) ที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0, 40, 70, และ 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูป 9 (ข) จากที่กล่าวถึงสองตัวแปรสำคัญเมื่ออัตราส่วนการทดแทนพื้นที่เท่ากัน ความเข้มของความเค้นจึงส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเสาหิน กล่าวคือความเข้มของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงเสาหินจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายปนทรายแข็งเพิ่มขึ้น

## 4 สรุปผลการทดสอบ

จากการจำลองแบบหล่อตัวอย่างในห้องปฏิบัติการเพื่อการศึกษาสมรรถนะของเสาหินโวลโบรปรับปรุงคุณภาพทรายปนทรายแข็งภายใต้สภาวะการอัดตัวระยะบายน้ำสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ภายใต้การจำลองแบบหล่อตัวอย่างในห้องปฏิบัติการพบว่าทรายปนทรายแข็งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหินจะมีค่าการทรุดตัวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับทรายปนทรายแข็งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่มาก (เสาหินที่มีขนาดใหญ่) มีค่าการทรุดตัวที่น้อยกว่าอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่น้อย (เสาหินมีขนาดเล็ก) และที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ และเมื่อทรายปนทรายแข็งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหินขนาดเท่ากันการทรุดตัวที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะมีค่าการทรุดตัวที่น้อยกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ
- เมื่อเปรียบเทียบเทียบสมรรถนะในการรับกำลังของเสาหินภายใต้การจำลองแบบหล่อตัวอย่างในห้องปฏิบัติการพบว่าทรายปนทรายแข็งที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาหินสามารถเพิ่มความเค้นที่จุดครากให้สูงกว่าทรายปนทรายแข็งที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่น้อย (เสาหินมีขนาดเล็ก) สามารถรับกำลังได้มากกว่าอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่สูง (เสาหินมีขนาดใหญ่) และที่ความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ยังส่งผลต่อความสามารถในการรับกำลังของเสาหิน โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงส่งผลทำให้เสาหินรับกำลังมากขึ้น เนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างของเสาหินที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงเกิดการขยายตัวน้อย
- จากค่าความเข้มของความเค้นบ่งบอกถึงความสามารถในการรับกำลังของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าความสามารถในการรับกำลังของเสาหินเพิ่มขึ้นเมื่อเสาหินมีอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่น้อย และความหนาแน่นสัมพัทธ์มาก

- จากค่าประสิทธิภาพเสาหินบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้งานเสาหินพบว่าประสิทธิภาพเสาหินลดลงเมื่อเสาหินมีอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่น้อย และความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ เนื่องด้วยความเครียดที่เพิ่มขึ้นของที่เพิ่มขึ้นของเสาหินมีอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่น้อย และความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ โดยอัตราส่วนการทดแทนพื้นที่นั้นส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเสาหินมากกว่าความเข้มของความเค้น

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษา และแก้ไขในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Shivashankar, M.D. Babu, S. Nayak, R. Manjunath, Stone columns with vertical circumferential nails: laboratory model study, *Geotech. Geol. Eng.* 28 (5) (2010) 695–706.
- [2] Castro, J. and Sagaseta, C. 2008. Consolidation around stone columns. Influence of column deformation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. DOI: 10.1002/nag.745
- [3] Andreou, P., Frikha, W., Frank, R., Canaou, J., Papadopoulos, V., and Dupla, J.C. 2008. Experimental study on sand and gravel columns in clay. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 161(4): 189–198. doi:10.1680/grim.2008.161.4.189.
- [4] Elshazly, H.; Elkasabgy, M.; Elleboudy, A. Effect of Inter-Column Spacing on Soil Stresses due to Vibro-Installed Stone Columns: Interesting Findings. *Geotech. Geol. Eng.* 2008, 26, 225–236.
- [5] Huang, J., Han, J., and Oztoprak, S. (2009). “Coupled mechanical and hydraulic modeling of geosynthetic-reinforced column-supported embankments.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 135(8), 1011-1021
- [6] Van Impe, W.F., De Cock, F., Van der Cruyssen, J.P., Maertens, J., 1997. *Soil improvement experiences in Belgium: part II. Vibro compaction and stone columns*. Ground Improvement. 1.
- [7] Ambily, A.P. and Gandhi, S.R. 2007. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133, (4): 405-415.
- [8] Barksdale RT, Bachus RC. *Design and construction of stone columns*. Report FHWA/RD-83/026. Springfield: Nat Tech Information Service; 1983.
- [9] Shahu, J. and Reddy, Y. 2011. Clayey soil reinforced with stone column group: model tests and analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, (12): 1265-1274.
- [10] Kumar, G.; Samanta, M. Experimental evaluation of stress concentration ratio of soft soil reinforced with stone column, *Innovative Infrastructure Solutions* (2020) 5:18
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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(2S), 7–13.
- [14] Indian Standard, I.S., 15284 2003. *Design and construction for ground improvement—Guidelines. Part 1: Stone columns*. Bureau of Indian Standards, New Delhi, India
- [15] Charles JA, Watts KA (1983) Compressibility of soft clay reinforced with granular columns. In: Proceedings 8th European conference on soil mechanics and foundation engineering, Helsinki, pp 347–352
- [16] Cimentada, A.; Da Costa, A.; Canizal, J.; Sagaseta, C. Laboratory study on radial consolidation and deformation in clay reinforced with stone columns., *Can. Geotech. J.* 48: 36–52 (2011)
- [17] Liu Q, Deng Y-B, Wang T-Y. One-dimensional nonlinear consolidation theory for soft ground considering secondary consolidation and the thermal effect. *Comput Geotech* 2018;104:22–8.