



การทดสอบฉีดเกราท์ในแบบจำลองทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล

อรยา คำหนองไผ่* และ พรพจน์ ดันเส็ง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุทิน คูหาเรีองรอง

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกซ์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 9119 2200 อีเมล: orayagroupfee@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.08.004

รับเมื่อ 30 มกราคม 2566 แก้ไขเมื่อ 2 พฤษภาคม 2566 ตอรับเมื่อ 6 มิถุนายน 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 6 สิงหาคม 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบการฉีดเกราท์ในแบบจำลองชั้นทรายของดินกรุงเทพฯชั้นที่ 1 เพื่อลดความชื้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิกาเจลโดยวิธีอัดการฉีดคงที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันและความหนืดของเกราท์ที่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์ ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯการทดสอบใช้สารละลายโซเดียมซิลิกาเจลเป็นวัสดุในการเกราท์ โดยใช้ความหนืดเท่ากับ 110 เซนติพอยส์ และ 130 เซนติพอยส์ และใช้อัตราการฉีดเป็น 4.56 6.08 และ 7.60 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลการวิจัยพบว่า แรงดันในการเกราท์ส่งผลต่อรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยแรงดันในการเกราท์ที่ต่ำส่งผลให้รูปร่างของทรายมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสมำเสมอ การเกราท์จึงเป็นรูปแบบการเกราท์แบบซึม ในส่วนของความหนืดไม่ส่งผลต่อรูปร่างของทรายที่ผ่านการเกราท์ เนื่องจากความหนืดของเกราท์ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายโซเดียมซิลิกาเจลมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นต่ำลง 8.33 เท่า

คำสำคัญ: สารละลายโซเดียมซิลิกาเจล การเกราท์แบบซึม การเกราท์แบบแตก ทรายชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพฯ

การอ้างอิงบทความ: อรยา คำหนองไผ่, พรพจน์ ดันเส็ง และ สุทิน คูหาเรีองรอง, “การทดสอบฉีดเกราท์ในแบบจำลองทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 1-12, เลขที่บทความ 251-026768, ม.ค.-มี.ค. 2568.



Modelling Grouting of First Bangkok Aquifer Sand to Reduce Permeability with Silicate Gel

Oraya Khamnongpai* and Pornpot Tunseng

School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Sutin Kuharuangrong

School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 9119 2200, E-mail: orayagroupfee@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.08.004

Received 30 January 2023; Revised 2 May 2023; Accepted 6 June 2023; Published online: 6 August 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper presents grout testing into the model of Bangkok first-layer aquifer system to reduce permeability with the application of sodium silicate through constant injection rates. The main objectives of the study are to investigate the influence of pressure and viscosity of grout on the size and shape of grouted sand, in particular the first sand layer in Bangkok subsoils. The sand model is grouted with sodium silicate solution at viscosity of 110 centipoise and 130 centipoise. The injection rates were set at 4.56, 6.08 and 7.60 mL/min. The results showed that the grouting pressure significantly affected the shape of the sand after grouting. At low grouting pressure, the sand formed in a uniform spherical grout bulb where the diameter was larger than the theoretical diameter. Thus, grouting leads to permeability improvement. The viscosity has minor influence on the pattern of the grouted sand specimens since the difference in viscosity was relatively small. The coefficient of permeability of the grouted sand was 8.33 times lower than that of the ungrouted counterpart.

Keywords: Sodium Silicate Solution, Permeable Grout, Fracturing Grout, First Sand Layer In Bangkok Subsoils

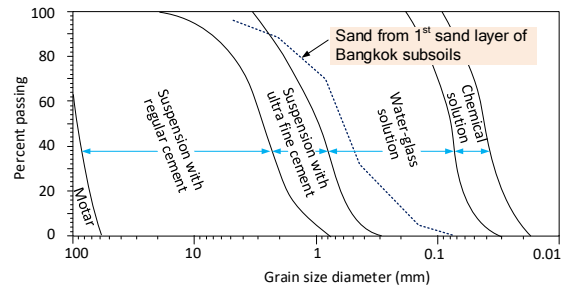
Please cite this article as: O. Khamnongpai, P. Tunseng, and S. Kuharuangrong, "Modelling grouting of first Bangkok aquifer sand to reduce permeability with silicate gel," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 1, pp. 1–12, ID. 251-026768, Jan.–Mar. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันโครงการสาธารณูปโภคในพื้นที่กรุงเทพมหานคร จำเป็นต้องสร้างให้มีความลึกลงจากผิวดินมากกว่าในอดีต เนื่องมาจากข้อจำกัดของพื้นที่ เช่น โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีส้ม ที่โครงสร้างใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 25-30 เมตร [1] หรือ โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงหนองบอนที่ขุดดินลึกประมาณ 30 เมตร [2] ซึ่งในการขุดดินลึกถึงระดับนี้ต้องขุดลงไปถึงชั้นดินทรายซึ่งต้องประสบกับปัญหาน้ำใต้ดินอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้จากการศึกษาโดย [3] และ [4] พบว่า ระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีการคืนตัวสูงขึ้น เนื่องจากการไหลเดิมของน้ำในชั้นน้ำบาดาล การแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินที่ไหลเข้ามาในบ่อขุดระหว่างการก่อสร้างชั้นใต้ดินที่ขุดลึกถึงชั้นทรายมีหลายวิธี ได้แก่ การใช้กำแพงกันดินที่ยาวขึ้น หรือการสูบน้ำใต้ดิน แต่หนึ่งวิธีที่มีการนำมาใช้มากขึ้นในการป้องกันการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาในบ่อขุด ได้แก่ การปรับปรุงทรายด้วยวิธีการเกราท์ (Grouting) ให้มีความต่อเนื่องกันเพื่อกีดขวางการไหลของน้ำเข้าในบ่อขุด วัสดุที่ใช้เกราท์ส่วนใหญ่เป็นซีเมนต์ เนื่องจากซีเมนต์มีอนุภาคที่โตกว่าขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคซีเมนต์จึงเข้าไปอุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ในการเกราท์จึงต้องใช้แรงดันที่สูงจนมวลดินเกิดการแตก (Fracturing) จากงานวิจัยของ [5] พบว่า การเกราท์ด้วยซีเมนต์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) สูง และแรงดันสูง ทำให้เนื้อดินแตกออกด้วยแรงดันของเหลว (Hydraulic Fracturing) ซึ่งเรียกว่า เกราท์เพื่ออุดรอยแตก (Fracturing Grout) และถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ และแรงดันต่ำ การเกราท์เป็นแบบการเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น (Compaction Grout)

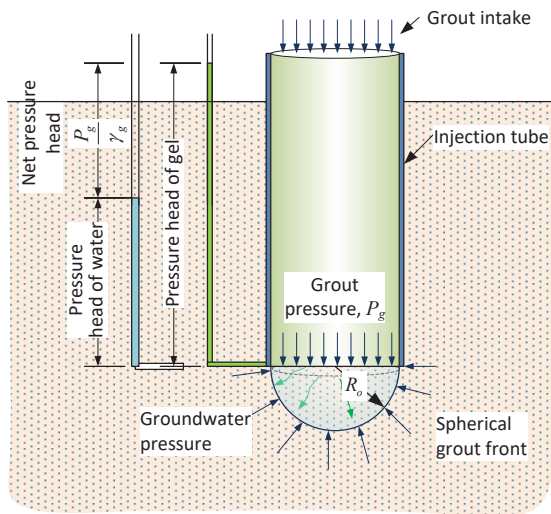
การแตกของมวลดินนี้ทำให้ขาดความต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการต้านทานการไหลไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะในกรณีที่ดินมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดเล็ก เช่น ทรายละเอียด ด้วยเหตุนี้การเกราท์ในดินทรายที่มีช่องว่างขนาดเล็กจึงจำเป็นต้องใช้สารละลายเคมีที่สามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้โดยไม่เกิดการแยกในมวลดิน ซึ่งสารละลายนี้



รูปที่ 1 ขนาดของเม็ดดินกับประเภทของวัสดุเกราท์ที่เหมาะสมในการเกราท์

ต้องก่อตัวเป็นเจลอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินหลังจากเกราท์ เพื่อให้ความชื้นน้ำของดินลดลง รูปที่ 1 ชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของวัสดุเกราท์แต่ละชนิด ที่สัมพันธ์กับขนาดคละของเม็ดดิน ในกรณีของดินทรายที่อยู่ในทรายชั้นแรก ของชั้นดินกรุงเทพ การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกราท์ ไม่เหมาะสมเท่ากับการใช้ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Water-glass Solution) ซึ่งเป็นสารละลายเคมี [6] ได้รายงานถึงประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายในชั้นดินกรุงเทพ โดยการใช้วิธีเกราท์ด้วยสารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของ Sodium Silicate, MK Reactive, Silicon Dioxide Sodium Compound เพื่อป้องกันน้ำไหลผ่านชั้นทรายในระหว่างการขุดลึก 30 เมตร เพื่อก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินที่สถานีสนามไชย กรุงเทพมหานคร

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกราท์ในทรายในชั้นดินกรุงเทพ ด้วยสารละลายเคมี และยังต้องอาศัยการนำเข้าเทคโนโลยีการเกราท์ และนำเข้าสูตรสารละลายเคมีจากต่างประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นความลับทางการค้า งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกราท์โดยใช้สารละลายเคมีที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อให้สามารถเกราท์ในดินทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพได้ โดยมุ่งเป้าไปที่ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของทรายหลังการเกราท์ และปัจจัยที่ส่งอิทธิพลต่อขนาดและรูปร่างของเกราท์ ซึ่งได้แก่ความดันที่ใช้เกราท์ และความหนืดของสารละลายเกราท์ ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบฉีดเกราท์เคมีที่พัฒนาขึ้น ลงในตัวอย่างทรายชั้นแรกของชั้น



รูปที่ 2 การพิจารณาแรงดันของการเกรทที่ไหลผ่านท่อฉีดลงที่ดิน

ดินกรุงเทพฯ ในห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตำแหน่งการเกรท และยังสามารถใช้เป็นข้อมูลให้วิศวกรที่ทำการก่อสร้างใช้ในการพัฒนาเครื่องจักร และวิธีการในการฉีดเกรท เพื่อให้การเกรทมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 ทฤษฎีที่ใช้คำนวณขนาดของการเกรทโดยการซึม

[7] กล่าวว่า การฉีดเกรทผ่านท่อลงที่ดินนั้น เกรทจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยพิจารณาการเริ่มไหลเป็นรูปครึ่งทรงกลมบริเวณปลายท่อ (Spherical Flow Model for Porous Media) ดังรูปที่ 2 ในกรณีที่เกรทเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) เมื่อพิจารณาว่าเกรทนั้นซึมไปในทราย โดยคิดว่าเป็นรูปทรงกลมบริเวณปลายท่อที่มีรัศมีเป็น R_0 โดยความแตกต่างระหว่างแรงดันในการเกรทกับแรงดันน้ำในดิน คิดเป็นแรงดันสุทธิที่ใช้ในการเกรท มีค่าเท่ากับ P_e ซึ่งคิดเป็นเฮดแรงดันได้ $\frac{P_e}{\gamma_G}$ ดังนั้น P_e มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$P_e = P_g - P_w \quad (1)$$

เมื่อ P_e คือ แรงดันสุทธิ

P_g คือ แรงดันของการเกรท

P_w คือ แรงดันน้ำในดิน

ดังนั้น อัตราการไหลของเกรทที่ผ่านท่อฉีดนั้น สัมพันธ์กับแรงดันสุทธิ ดังสมการที่ (2)

$$P_e = \frac{Q\gamma_G}{4\pi R_0 k_G} \quad (2)$$

[8] ได้กล่าวว่า สำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของ ของไหลกับความหนืดนั้น เป็นไปตามสมการที่ (3)

$$\frac{k_w}{k} = \frac{\mu}{\mu_w} \quad (3)$$

เมื่อ k_w คือ ความสามารถในการซึมของน้ำ m/s

k คือ ความสามารถในการซึมของของไหล m/s

μ_w คือ ความหนืดของน้ำ Pa-s

μ คือ ความหนืดของของไหล Pa-s

เมื่อนำสมการที่ (2) และ (3) มาสัมพันธ์กันจะได้แรงดันสุทธิของการเกรท ดังสมการที่ (4)

$$P_e = \frac{Q\gamma_G\mu_w}{4\pi R_0\mu k_w} \quad (4)$$

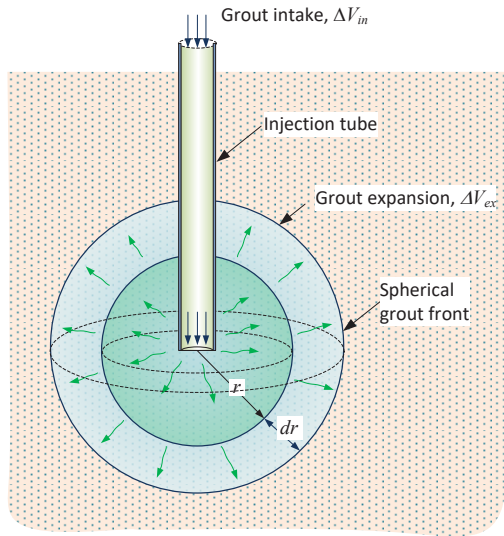
เมื่อ Q คือ อัตราการเกรท m^3/s

γ_G คือ หน่วยน้ำหนักของเกรท kN/m^3

k_G คือ สัมประสิทธิ์ความซึมของเกรทในดิน m/s

k_w คือ สัมประสิทธิ์ความซึมของน้ำในดิน m/s

ในระหว่างที่ทำการเกรทด้วยการซึมเป็นเวลา dt นั้น เกรทจะซึมเป็นระยะทาง dr ดังนั้น ปริมาณการเกรทในเวลา t ได้จากการพิจารณาให้ปริมาตรของเกรทที่ฉีดลงที่ดินเท่ากับปริมาตรของเกรทที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยคิดให้ปริมาตรของเกรทที่ซึมลงดินเป็นรูปทรงกลมที่มีเกรทแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยรูปที่ 3 แสดงถึงแนวคิดของปริมาตรเกรทที่ฉีดลงที่ดินกับปริมาตรเกรทที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ด ดังนั้น ปริมาตรทรงกลมที่ขยายออกสัมพันธ์กับปริมาตรของเกรทที่ฉีดลงที่ดิน ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 3 การซึมของเกรทผ่านปลายท่อฉีดยา และซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นรูปทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ปลายท่อฉีดยา

เมื่อ $V_m = V_{out}$
จะได้

$$Qdt = n(4\pi r^2 dr) \quad (5)$$

โดยที่ n คือ ความพรุนของดิน

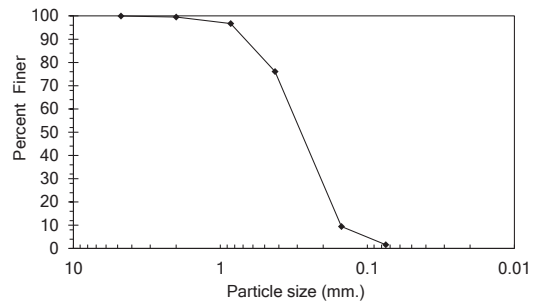
ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการซึมของเกรทให้มีรัศมี R จากปลายท่อที่มีรัศมี R_0 ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (5) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (6)

$$t = \frac{4}{3Q} \pi n (R^3 - R_0^3) \quad (6)$$

จากทฤษฎีการไหลของเกรท ในงานวิจัยนี้ ใช้วัสดุเกรทที่เป็นสารละลายเคมี วัสดุเกรทจึงเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน ดังนั้น การใช้ทฤษฎีการเกรทที่กล่าวมาข้างต้น จึงใช้อธิบายการไหลของเกรทเคมีในงานวิจัยนี้ได้

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยในบทความนี้ประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เครื่องมือทดสอบ วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 ขนาดคละของตัวอย่างทรายจากทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ

และวิธีการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

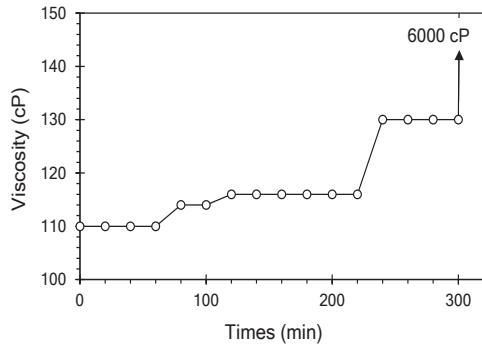
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยใช้ตัวอย่างทรายที่เก็บจากชั้นทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพที่มีความลึก 30–30.5 เมตร ในโครงการก่อสร้างเสาเข็มของอาคารคอนโดมิเนียม บนถนนจันทน์ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร การเก็บตัวอย่างใช้วิธีเก็บโดยใช้ถังเก็บทราย (Bucket) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ทรายตัวอย่างมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 854-00 [9], ความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 ตันต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.52 และมีสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำเท่ากับ 2×10^{-4} เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2434-68 [10] ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ขนาดคละของตัวอย่างทรายที่เก็บขึ้นมาจากสนามเป็นต้นแบบ เพื่อสร้างทรายที่มีขนาดคละเหมือนกัน เพื่อให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเกรทที่มีความสม่ำเสมอรูปที่ 4 เป็นขนาดคละของทราย ตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 422-63 [11]

2.1.2 วัสดุเกรทเคมี

ในงานวิจัยใช้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้น โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) และสารเคมีผสมเพิ่มที่ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นเจล โดยเกรทเคมีที่ใช้เป็นสูตรที่ได้ยื่นขอรับอนุสิทธิบัตรภายใต้ชื่อโซเดียมซิลิเกตเจลก้นน้ำ คำขอหมายเลข 1903001237



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเกรทท์กับระยะเวลา

เกรทท์เคมีตามสูตรที่ยื่นขอนี้ มีค่า pH ประมาณ 11.4 โดยเกรทท์หลังจากผสมเสร็จเป็นสารละลายเคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ถึง 115 เซนติพอยส์ จนถึง 220 นาที จากนั้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 เซนติพอยส์ จนถึง 300 นาที ก่อนที่เกรทท์เคมีจะมีความหนืดสูงขึ้นด้วยอัตราที่สูงจนมีความหนืดเป็น 6,000 เซนติพอยส์ ดังรูปที่ 5

ดังนั้นในงานวิจัยจึงใช้เกรทท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 110 เซนติพอยส์ ทำการฉีดลงตัวอย่างทรายภายในระยะเวลาไม่เกิน 220 นาที หลังการเตรียมสาร และเกรทท์เคมีที่มีความหนืดประมาณ 130 เซนติพอยส์ ฉีดลงตัวอย่างทรายหลังจาก 220 นาที หลังการเตรียมสาร และฉีดเสร็จภายในเวลาไม่เกิน 300 นาที ในการทดสอบเลือกใช้เกรทท์เคมีที่ควบคุมให้อยู่ในช่วงความหนืด 110 ± 8 เซนติพอยส์ และ 130 ± 8 เซนติพอยส์ โดยใช้สัญลักษณ์ชื่อเรียกดังตารางที่ 2 รูปที่ 6 เป็นภาพถ่ายเกรทท์เคมีหลังจากผสมจนถึง 300 นาที ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ และเกรทท์เคมีหลังจากทิ้งไว้เกิน 300 นาที จนก่อตัวกลายเป็นเจล

ตารางที่ 2 คำใช้เรียกเกรทท์ในงานวิจัย

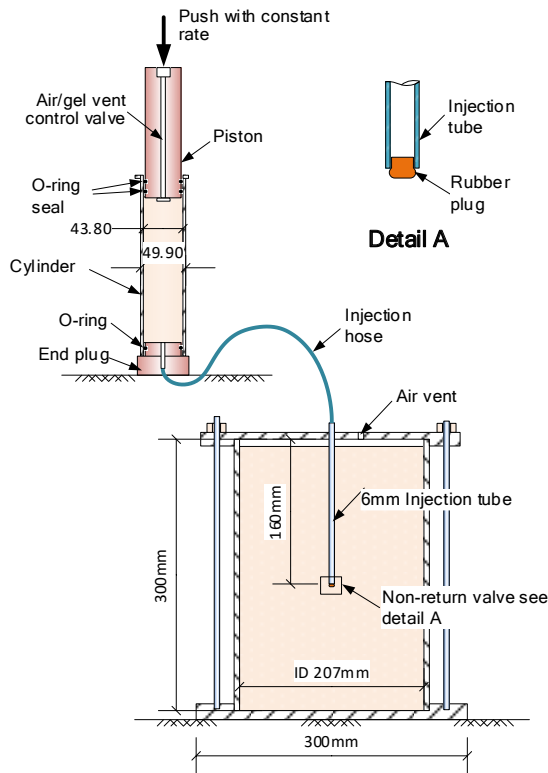
สัญลักษณ์ชื่อเรียกเกรทท์เคมีที่ใช้	ความหนืดของเกรทท์ (เซนติพอยส์)
V110	110 ± 8
V130	130 ± 8



รูปที่ 6 ภาพถ่ายเกรทท์เคมีก่อนและหลังก่อตัวกลายเป็นเจล

2.2 เครื่องมือทดสอบ

ในงานวิจัยได้ออกแบบเครื่องมืออัดฉีดเกรทท์ลงในทรายที่มีอัตราฉีดเกรทท์คงที่ โดยใช้หลักการของกระบอกฉีดและลูกสูบ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ [5] และ [12] ที่ใช้แรงดันอากาศเพื่อทำให้แรงดันของการเกรทท์คงที่ เหตุผลที่ใช้อัตราฉีดเกรทท์คงที่ เพื่อให้ตรงกับวิธีฉีดเกรทท์ที่ใช้ในสนามซึ่งใช้กระบอกสูบและลูกสูบในการฉีดเกรทท์ที่มีความต่อเนื่อง รูปที่ 7 เป็นแบบเครื่องมือที่ใช้อัดฉีดเกรทท์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ กระบอกฉีดเกรทท์และโมลบรรจุกทรายสำหรับทดสอบ กระบอกฉีดเกรทท์ทำจากท่ออะคริลิกใส มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 43.8 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบที่ใช้อัดเกรทท์ทำจากพลาสติกทนสารเคมี ที่มีโอริงขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอกฉีด เพื่อใช้สร้างแรงดันในการฉีดเกรทท์ลงในโมลทดสอบ ตรงแกนกลางลูกสูบมีวาล์วสำหรับเปิดเพื่อใช้ไล่อากาศหลังจากบรรจุเกรทท์เคมีลงในกระบอกฉีดหรือเปิดเพื่อขจัดสุญญากาศเมื่อถอนกระบอกฉีดหลังจากทดสอบเสร็จ และวาล์วนี้จะถูกปิดเมื่อกดลูกสูบในขณะที่อัดเกรทท์ในกระบอกฉีด เมื่อฉีดเกรทท์จะไหลผ่านท่อพลาสติกทนแรงดัน ที่ส่วนล่างของกระบอกฉีดท่อพลาสติกทนแรงดันต่อกับท่อฉีดสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร ฝังลงในตัวอย่างทราย ที่ปลายท่อฉีดมีวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Non-return Valve) เพื่อกันทราย น้ำ และสารละลายเคมีที่มีแรงดันไหลย้อนเข้ามาใน

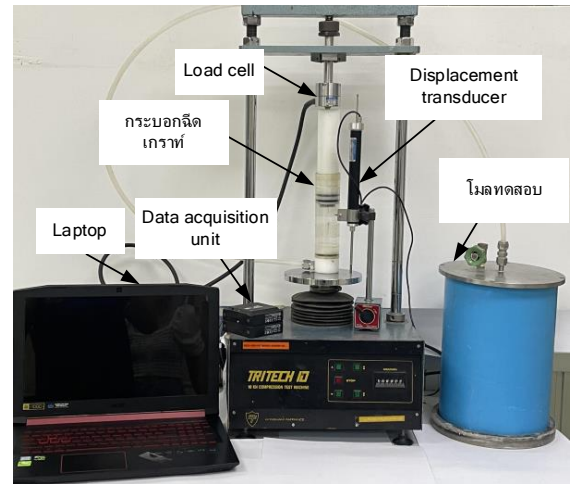


รูปที่ 7 โมลทดสอบและระบบฉีดเกราท์ด้วยอัตราฉีดคงที่

ท่อฉีด วาล์วจะเปิดออกเมื่อแรงดันเกราท์สูงเกินกว่าแรงดันภายนอก และจะปิดเมื่อแรงดันภายนอกสูงกว่าแรงดันภายใน สำหรับโมลทดสอบทำจากพลาสติก PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 207 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โมลมีฝาปิดและมีวาล์วระบายแรงดันซึ่งยึดโมลไว้กับฐาน รูปที่ 8 เป็นภาพถ่ายการประกอบเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

2.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบนี้ได้จำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยใช้ตัวอย่างทรายอ้อมตัวด้วยน้ำ ซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยโดย [5] การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ทำโดยนำทรายอบแห้ง 13 กิโลกรัม โรยผ่านกรวยลงโมลทดสอบที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยให้ปลายกรวยสูงกว่าระดับทราย 1 เซนติเมตรตลอดเวลา เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายให้สม่ำเสมอ ตรวจสอบโดยการวัดปริมาตรของทรายในโมลหลังจากเตรียม



รูปที่ 8 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกราท์และโมลทดสอบ

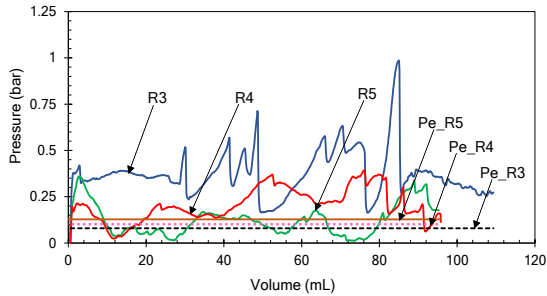
ตัวอย่างทดสอบ ซึ่งความหนาแน่นสัมพันธ์กับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ในงานวิจัยนี้จึงใช้ความหนาแน่นของดินในโมล สำหรับควบคุมความสม่ำเสมอของตัวอย่าง รูปที่ 9 เป็นลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ตารางที่ 3 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด

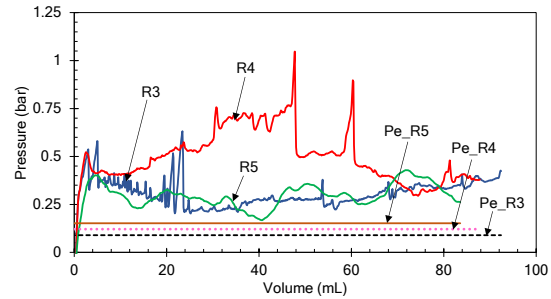
สัญลักษณ์ตัวแปร	อัตราการเคลื่อนของลูกสูบ (มิลลิเมตรต่อนาที)	อัตราฉีด (มิลลิลิตรต่อนาที)
R3	3	4.56
R4	4	6.08
R5	5	7.60

ตารางที่ 4 จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่าง	ความหนืด (เซนติพอยส์)	R3	R4	R5
1	V110	1	-	-
2	V110	-	1	-
3	V110	-	-	1
4	V130	1	-	-
5	V130	-	1	-
6	V130	-	-	1



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรงท์กับ ปริมาตรเกรงท์ที่ V110



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกรงท์กับ ปริมาตรเกรงท์ที่ V130

3. ผลการทดสอบ

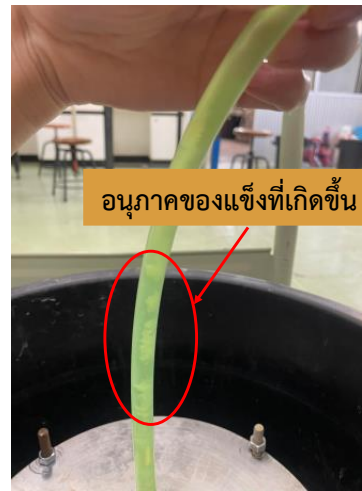
ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดกับแรงดัน รูปทรง และ ขนาดของทรายที่ผ่านการเกรงท์ และความชื้นของทรายที่ผ่านการเกรงท์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดัน

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกรงท์กับปริมาตรเกรงท์ ที่ความหนืด V110 พบว่า แรงดันมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ฉีด แรงดันในช่วงนี้เป็นแรงดันที่ย่างปิดปลายท่อฉีดยังไม่เปิดออก ซึ่งเมื่อปลายท่อเปิดออกแรงดันเริ่มลดลง โดยการพัฒนาแรงดันทั้งสามอัตราการฉีดพบว่า อัตราการฉีดเท่ากับ R3 มีค่าแรงดันสูงที่สุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 และ อัตราการฉีดเท่ากับ R5 มีค่าต่ำสุด

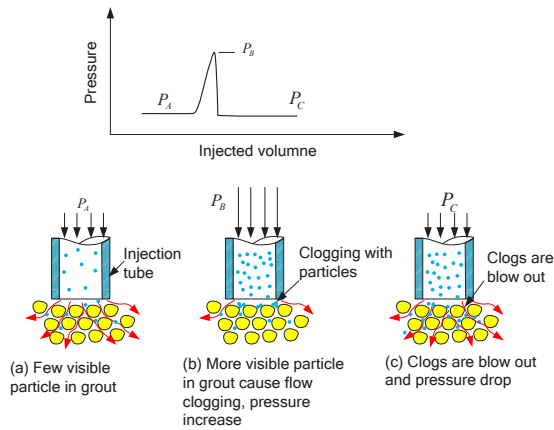
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกรงท์กับปริมาตรเกรงท์ ที่ความหนืด V130 พบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 เกิดการพัฒนาของแรงดันมากที่สุด ตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R5 ตามลำดับ

ทั้งนี้ การพัฒนาของแรงดันทั้งสามอัตราการฉีดเกิดจากในระหว่างการทดสอบ สารละลายเคมีที่ใช้ในการเกรงท์เกิดการก่อตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก อนุภาคเหล่านี้ไม่ได้ก่อตัวเป็นเจลทั้งหมด จึงยังคงไหลในท่อฉีดได้ โดยพบว่าที่อัตราการฉีดต่ำ สารละลายเคมีไหลไปยังบริเวณปลายท่อฉีดได้ช้า จึงเกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่าที่อัตราการฉีดสูง ทำให้หน้าตัดการไหลบริเวณปลาย

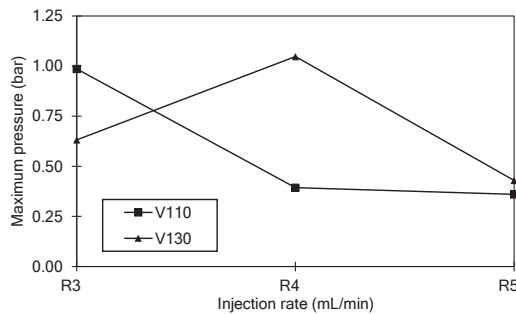


รูปที่ 12 อนุภาคเจลที่เกิดจากสารละลายเคมี

ท่อฉีดลดลง แรงดันจึงมีค่าสูงขึ้น รูปที่ 12 เป็นภาพถ่ายอนุภาคเจลที่ก่อตัวขึ้นในท่อพลาสติกทนแรงดัน ขณะกำลังฉีดลงในโมล นอกจากนี้การก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมียังส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน ซึ่งการเกิดแรงดันสูงในการทดสอบเกิดขึ้นเพียงชั่วขณะและลดลงอย่างฉับพลัน ในขณะที่แรงดันลดลงอย่างฉับพลัน สังเกตเห็นสารละลายเคมีในท่อ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการไหลซึมในตัวอย่างทรายเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงเห็นว่า การพัฒนาและลดลงอย่างฉับพลันของแรงดัน เกิดจากการที่อนุภาคในสารละลายเคมี เกิดการเกาะกุกตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น และเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นสูงมากกว่าการกระจุกตัวของอนุภาค



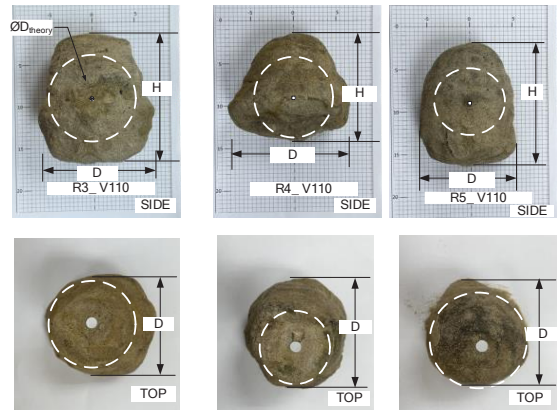
รูปที่ 13 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกราท และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง



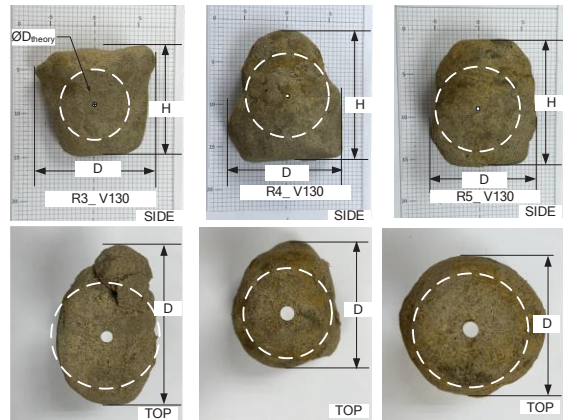
รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราทสูงสุด

ก็ถูกดันออกไป แรงดันจึงลดลง ดังรูปที่ 13 ซึ่งการเกิดแรงดันเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างฉับพลัน ส่งผลทำให้การพัฒนาแรงดันมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราทสูงสุดพบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 (ความหนืดเกราท V110) และ ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 (ความหนืดเกราท V130) แรงดันมีค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณาที่ความหนืดเกราทเท่ากัน

เมื่อเปรียบเทียบแรงดันในการเกราทที่ได้จากการทดสอบกับแรงดันสุทธิเชิงทฤษฎี (P_c) ที่คำนวณจากสมการที่ (4) พบว่า แรงดันในการเกราทไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากการเกิดอนุภาคในสารละลายเคมี ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นและ



รูปที่ 15 ภาพถ่าย Grout Blub ที่ V110



รูปที่ 16 ภาพถ่าย grout blub ที่ V130

ลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน จากการกระจุกตัวของอนุภาคในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย แรงดันในการเกราท จึงมีค่าสูงกว่าแรงดันเชิงทฤษฎี

3.2 รูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท

รูปที่ 15 และ 16 เป็นภาพถ่ายรูปทรงทรายหลังการเกราท (Grout Blub) ที่ความหนืด V110 และ V130 ตามลำดับพบว่า ทรายที่ผ่านเกราทมีลักษณะเป็นทรงกลมรี โดยมีลักษณะเป็นวงกลมจากภาพถ่ายด้านบน และมีรูปร่างเป็นทรงรีจากภาพถ่ายด้านข้าง เส้นผ่านศูนย์กลางของทรายหลังการเกราทเชิงทฤษฎี (D_{theory}) คิดจากการให้ปริมาตรของเกราทที่ซึมลงทรายเป็นรูปทรงกลมที่มีเกราทแทรกอยู่

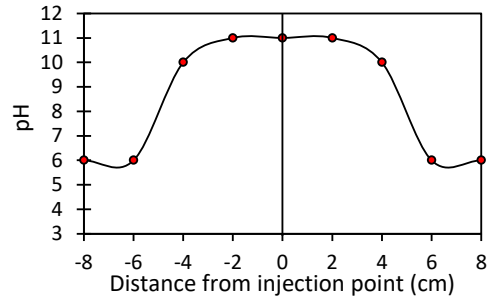
ในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ที่คำนวณจากสมการที่ (6) เมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย หลังการเกราท์ (D) ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขนาดทรายหลังการเกราท์ตามทฤษฎีและขนาดทรายหลังการเกราท์

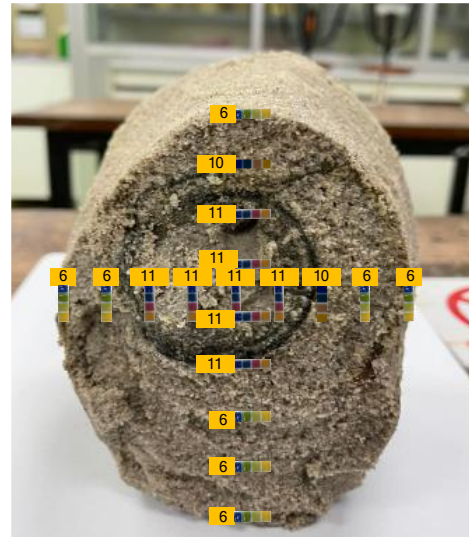
อัตราส่วนช่องว่าง	D (มิลลิเมตร)	H (มิลลิเมตร)	D_{theory} (มิลลิเมตร)
0.52	93.0	122.0	84.0
0.52	120.0	102.0	80.6
0.52	89.0	130.0	81.6
0.52	126.0	111.0	80.2
0.52	109.0	137.0	79.2
0.52	95.0	126.0	78.0

จากตารางที่ 5 พบว่า ขนาดของทรายหลังการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าทฤษฎี เกิดจากเกราท์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นสารละลายเคมี ซึ่งเกิดอนุภาคในสารละลายเคมีระหว่างทำการทดสอบ ทำให้การกระจายตัวของเกราท์นั้น ไม่ได้เกิดจากการซึม (Permeation) ลงไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการแพร่ (Diffusion) ของสารละลายเคมีจากจุดที่มีความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย

เพื่ออธิบายสาเหตุที่รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี จึงทำการทดสอบการหาขอบเขตสารละลายเคมีที่ซึมลงในทรายพบว่า ทรายที่อยู่ใกล้บริเวณท่อฉีดจะมีค่า pH เท่ากับ 11 ซึ่งค่า pH ใกล้เคียงกับสารละลายเคมี ในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปจากท่อฉีดมีค่า pH เริ่มลดลงจนถึงค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า pH ของทรายทดสอบที่อิมตัวด้วยน้ำก่อนการเกราท์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สารละลายเคมีเกิดการแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งคือตำแหน่งบริเวณท่อฉีดไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งคือตำแหน่งที่ห่างออกไปจากท่อฉีด ดังนั้น จึงเป็นสาเหตุให้ขนาดทรายที่ผ่านการเกราท์มีขนาดใหญ่กว่าเชิงทฤษฎี รูปที่ 17 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH ของ



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับค่า pH



รูปที่ 18 ภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ

ทรายในตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 18 เป็นภาพตัดขวางผลการทดสอบค่า pH ในตัวอย่างทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแรงดันเกราท์ต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า แรงดันเกราท์ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทรายที่ผ่านการเกราท์โดยแรงดันเกราท์สูง เกราท์เกิดการกระจายตัวในแนวตามขวางจากปลายท่อฉีดได้มากกว่าที่แรงดันต่ำ ทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีไม่สม่ำเสมอ จากภาพถ่ายด้านข้าง คาดว่าเกิดจากแรงดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างฉับพลันระหว่างการทดสอบ จึงก่อให้เกิดการแตก

ของมวลดินด้วยสารละลายเคมีในทรายระหว่างการเกราท์รูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ [5]

สำหรับทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยแรงดันเกราท์ต่ำ เกราท์เกิดการกระจายตัวในแนวตามขวางจากปลายท่อฉีดได้น้อยกว่าที่แรงดันสูง ทรายที่ผ่านการเกราท์มีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่าการเกราท์โดยแรงดันสูง เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้านข้าง รูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น จึงผสมระหว่างเกราท์เพื่ออุดรอยแตก และการเกราท์แบบซิม (Permeable Grout)

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความหนืดเกราท์ต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า ความหนืดของเกราท์ที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อรูปทรงของทรายหลังการเกราท์ เกิดจากความหนืดของเกราท์ที่ใช้ในการวิจัย มีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบรูปทรงของทรายหลังการเกราท์จึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.5 และ 1 ในงานวิจัยของ [5]

3.3 ความซิมของทรายที่ผ่านการเกราท์

วัตถุประสงค์หลักของการนำการเกราท์ด้วยสารเคมีไปใช้ คือ การลดสัมประสิทธิ์ความซิมของทราย ผลการทดสอบความซิมของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซิมมีค่าเป็น 2.4×10^{-5} เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าลดลงกว่าทรายที่ไม่ผ่านการเกราท์ 8.33 เท่า ดังผลเปรียบเทียบในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การซิมผ่านของทรายก่อนและหลังผ่านการเกราท์

ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์ความซิม (เมตรต่อวินาที)
ทรายไม่ผ่านการเกราท์	2.0×10^{-4}
ทรายผ่านการเกราท์	2.4×10^{-5}

ในการออกแบบตำแหน่งของการฉีดเกราท์เคมีลงในดิน ควรใช้วิธีคำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกราท์

เชิงทฤษฎีโดยใช้สมการที่ 6 จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกราท์นั้นใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงทฤษฎี เนื่องจากการแพร่ของเกราท์เคมีที่มีความเข้มข้นสูงก่อนการก่อตัวไปจากขอบเขตของการเกราท์ภายใต้แรงดัน ทำให้ขอบเขตความทึบน้ำจากการฉีดเกราท์ใหญ่ขึ้น จึงอยู่ในด้านที่ปลอดภัยในทางปฏิบัติ

4. สรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันพบว่า การก่อตัวของอนุภาคในสารละลายเคมี ส่งผลต่อการพัฒนาแรงดันของทั้งสามอัตราการฉีดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการฉีดต่ำ มีการพัฒนาของแรงดันสูง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ลดลง จากการสะสมของอนุภาคบริเวณหน้าตัดการไหล แรงดันจึงมีค่าสูงขึ้น

2) ผลทดสอบรูปทรงและขนาดของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า แรงดันในการเกราท์ ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ โดยแรงดันในการเกราท์ต่ำทรายที่ผ่านการเกราท์จะมีลักษณะเป็นทรงกลมรีสม่ำเสมอมากกว่าการใช้แรงดันสูง เนื่องจากเกิดการเกราท์แบบซิมแสดงให้เห็นว่า การใช้แรงดันในการเกราท์ต่ำ ประสิทธิภาพของทรายหลังการเกราท์เพื่อลดความซิมน้ำมีมากกว่าการใช้แรงดันในการเกราท์สูง ในส่วนอิทธิพลเนื่องจากความหนืดเกราท์พบว่า ความหนืดเกราท์ไม่ได้ส่งผลต่อรูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์ เนื่องจากเกราท์เคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน รูปทรงของทรายที่ผ่านการเกราท์จึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อแปรผันความหนืด

3) ผลทดสอบความซิมของทรายที่ผ่านการเกราท์พบว่า ทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์การซิมผ่านที่ต่ำกว่าทรายไม่ผ่านการเกราท์ 8.33 เท่า แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุในการเกราท์สามารถลดความซิมน้ำในทรายได้

ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายเคมีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ซึ่งยังไม่ได้ทดสอบด้านความคงทนต่อการละลาย ข้อเสนอสำหรับงานวิจัยต่อไป คือ การศึกษาถึงพฤติกรรมความคงทนต่อการ



ละลายน้ำของเจลที่แทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เมื่อใช้งานอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลาสั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณพีระพัฒน์ ถิ่นหนองแขง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณบุญญฤทธิ์ บุญเกิด คุณณัฐดนัย ป้อมบุญมี คุณพิเชษฐพงศ์ ธรรมะกิตติกร และนักศึกษาปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Matichon Public Co.,Ltd. (2020). *Exploration of the construction underground site "Italian-Thai" MRT Orange line Thailand culture center – Min Buri. Bangkok, Thailand.* [Online]. (in Thai) Available: <https://www.prachachat.net/property/news-411567>
- [2] Matichon Public Co.,Ltd. (2021). *Implementation progress Tunnel of Bueng Nong Bon Construction on March 2022. Bangkok., Thailand.* [Online]. (in Thai) Available: https://www.matichon.co.th/local/new_2944429
- [3] T. Paveenchana and K. Saowiang, "The change of piezometric pressure in the subsoil strata affecting substructures in the Bangkok area," in *Proceedings of the Seminar of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, 2012*, pp. 1–12.
- [4] N. Phienwej, A. Asanprakit, P. Kittiyodom, and S. Timpong, "Increasing geotechnical challenges in the design and construction planning of the third phase Bangkok MRT underground," in *Proceeding of the 20th SEAGC, Indonesia, 2018*.
- [5] Q. Wang, S. Wang, S. W. Sloan, D. Sheng, and R. Pakzad, "Experimental investigation of pressure grouting in sand," *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 2, pp. 161–173, March 2016.
- [6] W. Wiriatharakij, "MRTA station excavation under situation of space constraint and potential hydraulic uplift at base: cases of Sanamchai & Itsaraphap stations," M.Eng. thesis, Department of Civil and Infrastructure Engineering, Asian Institute of Technology, 2016 (in Thai).
- [7] M. R. Hausmann, *Modification at depth by grouting, Engineering principle of ground modification*, Singapore, 1990, pp. 347–379.
- [8] C. Kutzner, "Grouting Theory," Grouting of rock and soil, Rotterdam, Netherland, 1996, pp. 9–27.
- [9] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D 854-00, 2000.
- [10] *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*, ASTM D 2434-68, 2000.
- [11] *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM D 422-63, 2002.
- [12] S. Lirer, A. Flora, M. Borrelli, and A. Evangelista, "Modelling low pressure grouting of unsaturated silty sanda," in *Proceeding of the 5th International Conference on Ground Improvement Techniques*, Kuala Lumpur, 2004, pp. 211–218.