ประสิทธิภาพของเกราท์ด้วยซิลิเกตเจลในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ
Effectiveness of silicate grout in sand of the first sand layer of Bangkok subsoil

อรยา คำหนองไผ่[1] พรพจน์ ตันเส็ง[2,*] และ สุทิน คูหาเรืองรอง[3]

[1,2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา
[3] สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกซ์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา
**Corresponding author; E-mail address: pornpot@sut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบการเกราท์ในชั้นทรายด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตโดยวิธีอัตราการฉีดคงที่ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการฉีดและความหนืดของเกราท์ ที่ส่งผลต่อเกราท์ที่เกิดขึ้น ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ การทดสอบใช้ตัวอย่างทรายอิ่มตัวด้วยน้ำที่จำลองสถาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินทำการเกราท์ทรายด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ความหนืดเท่ากับ 110 และ 130 centipoise ที่อัตราการฉีดเท่ากับ 4.56, 6.08 และ 7.60 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการวิจัยพบว่า อัตราการฉีดส่งผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ส่วนความหนืดเกราท์ไม่ได้ส่งผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าอัตราการฉีดที่ต่ำเกิดจากการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก (fracture grout) ส่วนอัตราการฉีดที่สูงกว่าจะเกิดแบบผสมระหว่างการเกราท์เพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeable grout) และ fracture grout ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันของการอัดเกราท์ลงในตัวอย่าง

คำสำคัญ: สารละลายโซเดียมซิลิเกต, การเกราท์เพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม, การเกราท์เพื่ออุดรอยแตก, การเกราท์

Abstract

This paper presents the research work on grouting of sodium silicate solution into sand with constant injection rate. The influence of rate of injection and grout viscosity on the grout shape is reported. The sand sample was collected from the first sand layer of Bangkok subsoil. The sodium silicate solution with viscosity of 110 centipoise and 130 centipoise is injected into the saturated sample in the test mold. The rate of injection is 4.56, 6.08, and 7.60 mL/min. The results show that the rate of injection has a significant influence on the grout results. Additionally, the low grouting rate cause fracture grout in soil and high grouting rate cause mixture between permeable grout type and fracture grout type is related to the pressure grouting in sample

Keywords: sodium silicate solution, permeable grout, fracture grout, grouting

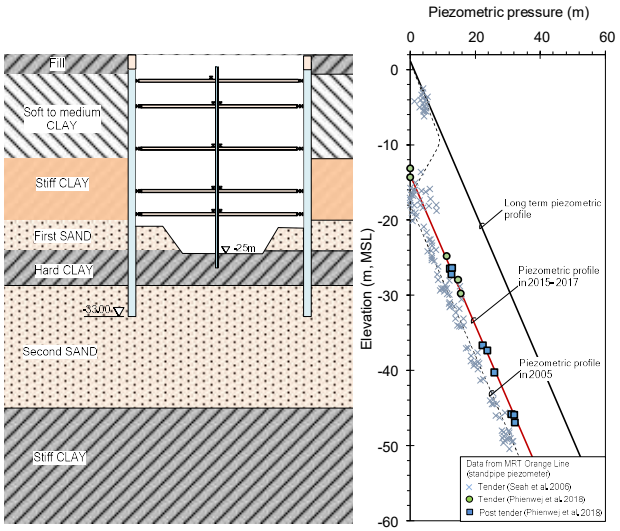
1. บทนำ

ไ บ ำใต้ด ก! ย ห ซ้ ' / □ n 3ทต ย□ - รห % □ , า0

ดกปัจจุบันความต้อง ารพื้นที่ใต้ดินในกรุงเทพมหานครนี้ค่ ขง ion, dหัi a io เด ป □ ด/ □ n ำ □ □ ึ

, ้ □ f ุป □ ก ทร ร

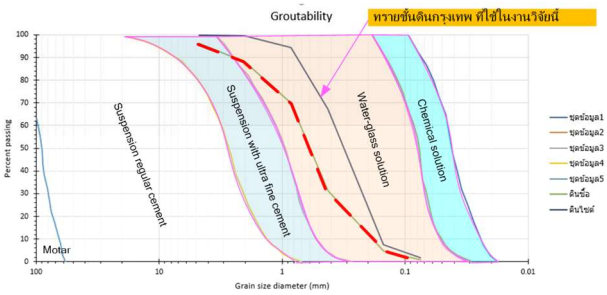
โดย [3] ได้ทำการตรวจวัดแรงดันน้ำใต้ดินที่ระดับความลึก 80 เมตร โดยใช้ Piezometer และข้อมูลจากการวัดแรงดันน้ำใต้ดินในชั้นน้ำพระประแดง พบว่า หลังจากปี ค.ศ. 1997 ที่ได้มีการลดการสูบน้ำบาดาล เกิดการไหลเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาล แรงดันน้ำในชั้นน้ำบาดาลจะฟื้นคืนสูงขึ้น มีผลทำให้แรงดันน้ำในชั้นดินฟื้นคืนสูงขึ้นด้วย จากการเทียบการขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยทั่วไปกับข้อมูลแรงดันน้ำใต้ดินโดย [4] ได้แสดงถึงระดับน้ำที่มีการคืนตัวอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3 ซึ่งโครงการที่มีระดับดินขุดลึกกว่านี้ [5] ได้รายงานถึงวิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสนามไชย ที่ต้องขุดดินลึก 30 เมตร ลงในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ การขุดได้อาศัยวิธีการเกราท์ด้วยสารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของ sodium silicate, MK reactive, silicon dioxide sodium compound, และ น้ำ โดยการฉีดด้วยวิธี Tube-A-Manchette Grout (TAM grout) ซึ่งเป็นการอัดสารละลายให้ซึมเข้าในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพื่อลดความซึมน้ำ ทำให้ก่อสร้างโครงสร้างชั้นใต้ดินได้โดยไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามา ในประเทศไทยการใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุเกราท์ในการลดความซึมของน้ำยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาถึงรูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้น จากอิทธิพลของอัตราการฉีดและความหนืดเกราท์ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ในการเกราท์ในชั้นดินทรายของชั้นดินกรุงเทพ ด้วยวิธีการอัดฉีดด้วยสารละลายเคมีในชั้นทราย เพื่อใช้ในงานก่อสร้างชั้นใต้ดินที่อาจประสบปัญหาน้ำใต้ดิน



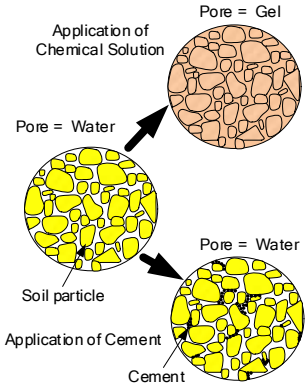
รูปที่ 3 piezometric pressure ที่ได้จากการขุดก่อสร้างชั้นใต้ดินของชั้นทรายในชั้นดินกรุงเทพ (ข้อมูลระดับน้ำใต้ดินจาก Seah et al., 2006 และ Phienwej et al., 2018)

2. การแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดิน

การแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินในประเทศไทยมีหลายแนวทางด้วยกัน เช่น การสูบน้ำใต้ดิน การออกแบบให้กำแพงกันดินยาวขึ้นเพื่อปิดทางไหลของน้ำ หรือลดอัตราการไหลของน้ำ แต่หนึ่งในวิธีที่มีความนิยมคือ การปรับปรุงทรายให้มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ลดลงด้วยเทคนิคการเกราท์ (grouting) โดยการใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกราท์ แต่หากชั้นทรายที่ต้องการปรับปรุงมีความละเอียดมาก การใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเกราท์อาจเป็นไปได้ยาก เนื่องจากขนาดของอนุภาคซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่จะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กไปได้ยากและต้องใช้แรงดันสูง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการแตกในมวลดิน (fracturing) จึงมีการใช้สารละลายเคมีเป็นวัสดุเกราท์แทน โดยสารละลายเคมีนี้จะมีความหนืดต่ำและไม่มีอนุภาคแขวนลอยด์เหมือนซีเมนต์ ความสามารถในการซึมผ่านไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจึงเป็นไปโดยง่ายและใช้แรงดันที่ต่ำกว่า โดยหลังจากที่สารละลายเคมีก่อตัวกลายเป็นเจลในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายแล้วนั้น การไหลซึมของน้ำผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาเกี่ยวกับมาตรการในการรับมือแผ่นดินเหลวที่เกิดขึ้นใต้โครงสร้าง และคุณสมบัติพื้นฐานของดินทรายหลังถูกปรับปรุงด้วยเทคนิคการเกราท์โดย [6] รายงานว่า การใช้เทคนิคการเกราท์เพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeation grouting) ด้วยซิลิกาเจลซึ่งเป็นสารละลายเคมี พบว่า ถ้าโพรงน้ำในดินเกิดการแทนที่ด้วยซิลิกาเจลที่มีความเข้มข้นเหมาะสมความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะลดลงอย่างมากในดิน เนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของสารละลายเคมีไปยังช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 4 แสดงถึงความสามารถในการซึมผ่านของเกราท์แต่ละประเภทกับขนาดของเม็ดดิน และรูปที่ 5 แสดงถึงลักษณะการซึมผ่านของสารละลายเคมีและซีเมนต์ไปยังดิน



รูปที่ 4 ขนาดของเม็ดดินกับประเภทของวัสดุเกราท์ที่เหมาะสมในการเกราท์



รูปที่ 5 ความแตกต่างระหว่างการซึมผ่านของสารละลายเคมีและซีเมนต์ในดิน (Yamazaki et al., 2005)

จากรายงานถึงวิธีการแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามไชย โดย [5] พบว่าวิธีที่ใช้กับโครงการเป็นวิธีเกราท์ด้วยสารละลายเคมี ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้วิธีนี้ในการลดความซึมของน้ำ มีค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าการใช้วิธีอื่น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีแก้ไขปัญหาน้ำใต้ดินของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ที่สถานีสนามไชย (Wiriyatharakij et al., 2015)

Method	Material Used	Impact on			
		Enviromental	Cost (MBath)	Time	Adjacent building
TAM Grout (Tube-A-Manchette Grout)	1.Sodium Silicate 2.MK Reactive 3.Silicon Dioxide 4.Sodium Compound 5.Water	No	375 MB.	8 Months	No
Jet Grout	Liquid Cement	Disposal of water	810 MB.	10 Months	No
Ground Freezing	Brine or Liquid Nitrogen	Disturb existing soil strength	> 3,000 MB.	> 12 Months	No
* Cost based on 57,000 cu.m.					

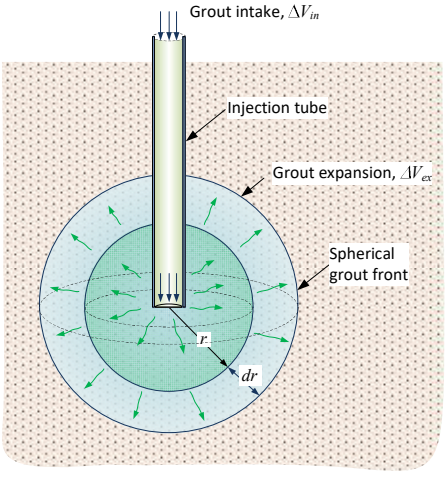
3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการซึมของเกราท์ในดิน

[7] กล่าวว่าการซึมของเกราท์ด้วยระยะเวลา dt นั้น เกราท์จะซึมเป็นระยะทาง dr ปริมาณการเกราท์ในเวลา t จึงได้จากการพิจารณาให้ปริมาตรของเกราท์ที่ฉีดลงในดิน V_{in} เท่ากับปริมาตรของเกราท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน V_{out} โดยคิดให้ปริมาตรของเกราท์ที่ซึมลงดินเป็นรูปทรงกลมที่มีเกราท์แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน รูปที่ 6 แสดงถึงแนวคิดของปริมาตรเกราท์ที่ฉีดลงในดินกับปริมาตรเกราท์ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ดังนั้น ปริมาตรทรงกลมที่ขยายออกจึงสัมพันธ์กับปริมาตรของเกราท์ที่ฉีดลงในดิน ($V_{in} = V_{out}$) ดังสมการที่ (1)

$$Qdt = n(4\pi r^2 dr) \tag{1}$$

เมื่อ Q คืออัตราการเกราท์ และ n คือความพรุนของดิน ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการซึมของเกราท์ให้มีรัศมี R จากปลายท่อที่มีรัศมี R_o ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (1) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2)

$$t = \frac{4}{3Q}\pi n(R^3 - R_0^3) \tag{2}$$



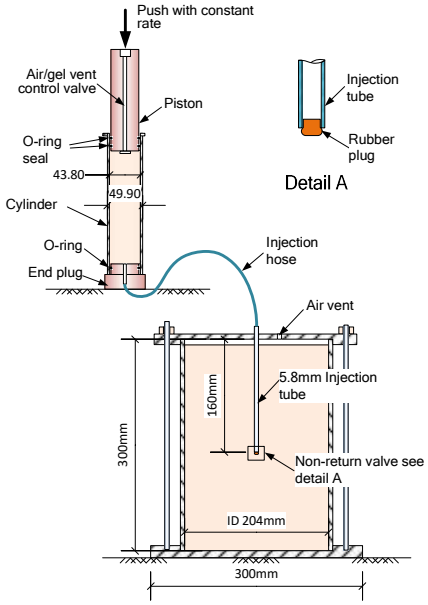
รูปที่ 6 แนวคิดการซึมของปริมาตรเกราท์

จากงานวิจัยของ [8] ที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการแพร่ของเกราท์ จากการเกราท์ในทรายด้วยการอัดฉีดด้วยแรงดันคงที่ โดยใช้ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water cement ratio) เป็น 0.5 และ 1 เป็นวัสดุเกราท์ลงในทรายที่มีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเท่ากับ 0.8 พบว่า แรงดันในการฉีดต่ำและ water cement ratio ที่ต่ำ รูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นเป็นการเกราท์เพื่อเสริมความหนาแน่น (compaction grout) ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันและ water cement ratio เกราท์ที่เกิดขึ้นมีผลเนื่องมาจากการแตกของมวลดินด้วยน้ำ (hydraulic fracturing) จึงเกิดการเกราท์เพื่ออุดรอยแตก (fracture grout)

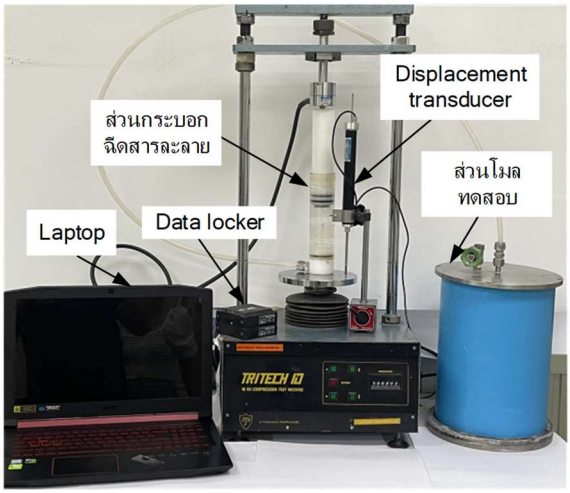
4. วิธีการวิจัย

4.1 การพัฒนาและออกแบบเครื่องมือ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษารูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราฉีดคงที่ จึงได้มีการประยุกต์เครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกราท์ในทรายจากงานวิจัยของ [8] โดยการดัดแปลงหลักการทำงานให้ควบคุมด้วยอัตราการกดแทนการใช้แรงดันอากาศ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของเกราท์ได้ใกล้เคียงกับปั๊มที่ใช้ในงานจริงมากกว่า ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนกระบอกฉีดสารละลาย ที่ใช้บรรจุสารละลายเคมี โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเท่ากับ 44.9 และ 200 มิลลิเมตร และส่วนโมลทดสอบ ที่ใช้บรรจุทราย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเท่ากับ 207 และ 300 มิลลิเมตร ทำการอัดฉีดสารละลายเคมีจากกระบอกฉีดไปยังโมลทดสอบโดยการกดกระบอกลูกสูบที่มีวาล์วควบคุม เพื่อใช้ไล่อากาศในกระบอกสูบก่อนการฉีด และระบายอากาศในขั้นตอนการถอนลูกสูบออกหลังทดสอบเสร็จ ในระหว่างทำการเกราท์สารละลายเคมีจะถูกอัดผ่านกระบอกฉีดไปยังท่อแรงดันลงในโมลทดสอบผ่านท่อฉีดสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.8 มิลลิเมตร ที่มีวาล์วยางกันการไหลย้อน (non-return valve) เพื่อกันทราย, น้ำ, และสารละลายเคมีที่มีแรงดันไหลย้อนเข้ามาในบริเวณปลายท่อฉีด โดยวาล์วจะเปิดออกเมื่อแรงดันเกราท์สูงเกินกว่าแรงดันภายนอก และจะปิดเมื่อแรงดันภายนอกสูงกว่าแรงดันภายใน โดยรูปที่ 7 เป็นส่วนเครื่องมือที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทดลอง และรูปที่ 8 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี



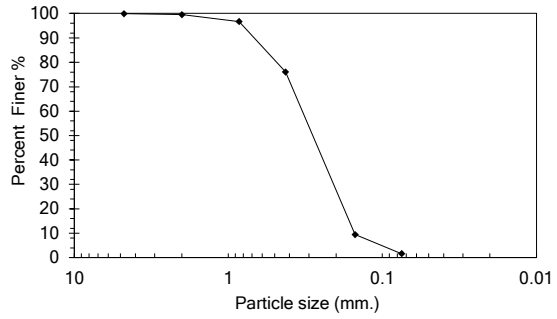
รูปที่ 7 โมลบรรจุตัวอย่างทดสอบและระบบฉีดเกราท์ด้วยอัตรากดคงที่



รูปที่ 8 ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้ในการอัดฉีดเกราท์

4.2 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดคความซึมของน้ำในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ จึงมีได้การเก็บตัวอย่างทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพจากโครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียม บริเวณถนนจันทน์ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 30- 30.5 เมตร โดยตัวอย่างเก็บด้วยถังเก็บทรายในกระบวนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ (Bucket) ที่มีขนาด 1 เมตร ทรายตัวอย่างมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63, ความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 ตันต่อลูกบาศก์เมตร, อัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.52, และมีสัมประสิทธิ์ความซึมเท่ากับ $2x10^{-4}$ เมตรต่อวินาที แต่เนื่องจากทรายที่เก็บในสนามมีปริมาณจำกัด ในงานวิจัยจึงได้มีการสร้างทรายในห้องปฏิบัติการที่มีขนาดคละเหมือนกับทรายตัวอย่างในสนามแทน รูปที่ 9 เป็นขนาดคละของทรายตัวอย่าง



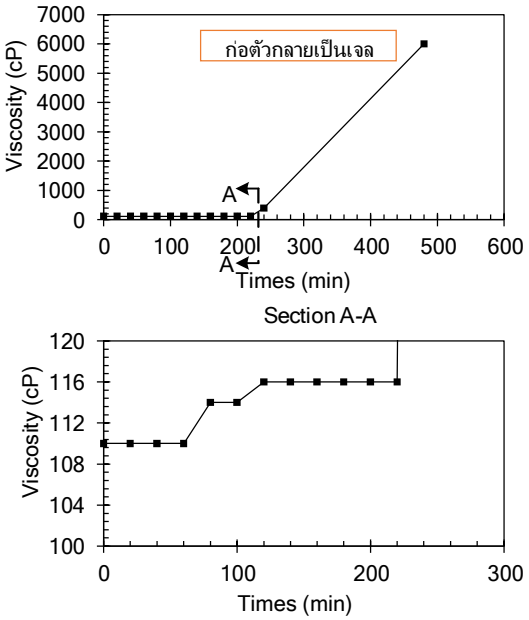
รูปที่ 9 ขนาดคละของเม็ดดิน

4.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายเคมีที่ใช้เป็นวัสุเกราท์ในงานวิจัย ได้มีการพัฒนาโดยใช้องค์ประกอบหลักเป็น Sodium Silicate และสารผสมที่ทำให้เกิดการก่อตัวของเจล โดยสารละลายเคมีนี้ได้ขอรับอนุสิทธิบัตรชื่อ โซเดียมซิลิเกตเจลกันน้ำ หมายเลข 1903001237 มีค่า pH ประมาณ 11.4 ในการทดลองใช้สารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกัน 2 ค่า เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความหนืดที่มีผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความหนืดของสารละลายเคมีได้อย่างแม่นยำ จึงใช้คำเรียกของสารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกันดังตารางที่ 2 โดยรูปที่ 10 เป็นสารละลายเคมีก่อนและหลังปล่อยทิ้งให้เกิดการก่อตัว และรูปที่ 11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวเป็นเจลของสารละลายเคมี



รูปที่ 10 สารละลายเคมีก่อนและหลังก่อตัวเป็นเจล



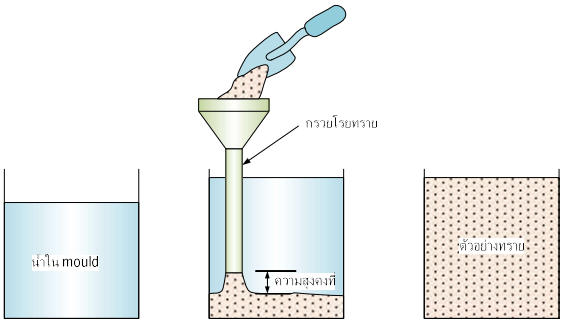
รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาก่อตัวเป็นเจลของสารละลายเคมี

ตารางที่ 2 คำที่ใช้เรียกชื่อสารลายเคมี

Description	Viscosity (cP)
V110	110 ± 8
V130	130 ± 8

4.4 วิธีการเตรียมตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ

ในงานวิจัยได้ใช้ตัวอย่างทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อจำลองสภาพทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยที่มีผู้ทำมาในอดีต โดยการเตรียมตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ จากการนำทรายอบแห้ง 13 กิโลกรัม เทลงโมลทดสอบมีน้ำบรรจุอยู่ ผ่านกรวย โดยให้ปลายกรวยสูงกว่าระดับทราย 1 เซนติเมตรตลอดเวลา เพื่อควบคุมความหนาแน่นของทรายในโมลทดสอบให้สม่ำเสมอและมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับทรายในสนาม รูปที่ 12 เป็นลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 12 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (ก) ใส่น้ำลงในโมลทดสอบ (ข) ใส่ตัวอย่างทรายแห้งผ่านกรวยยาวลงในโมลทดสอบ (ค) ตัวอย่างทรายหลังเตรียมเสร็จ

4.5 ขั้นตอนการทดสอบ

บรรจุสารละลายเคมีในกระบอกฉีดสารละลายเป็นปริมาตร 350 มิลลิลิตร แล้วอัดก้านกระบอกลูกสูบด้วยอัตราการฉีดเท่ากับ 4.56, 6.08 และ 7.60 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้เข้าใจง่ายผู้ทำการวิจัยได้ใช้สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีดที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3 วัดการเคลื่อนตัวของก้านกระบอกลูกสูบด้วย displacement transducer เพื่อคำนวณอัตราการไหลที่ถูกต้องอีกครั้ง เมื่อฉีดแล้วทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายเคมีก่อตัวกลายเป็นเจล จากนั้นรื้อทรายเพื่อบันทึกภาพและวัดขนาดของทรายที่มีเกราท์แทรกอยู่

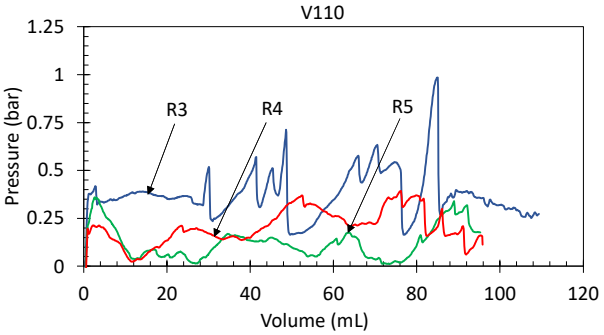
ตารางที่ 3 สัญลักษณ์แทนอัตราการฉีด

Injection rate (mL/min)	Symbol
4.56	R3
6.08	R4
7.60	R5

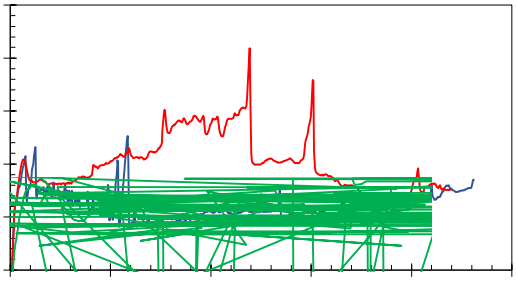
5. ผลการทดลอง

5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการ[illegible]เกราท์

รูปที่ 13 และ 14 เป็นกราฟความสัมพัน[illegible]หว่างแรงดัน[illegible]รเกราท์กับปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการเกราท์ ด้วยความ[illegible]ด V110 และ[illegible]30 จากกราฟการทดสอบพบว่า ช่วงแรกของการทด[illegible]แรงดันเ[illegible]พิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ฉีด การเพิ่มขึ้นของแรงดันช่วงนี้[illegible]การไหล[illegible]ของสารละลายท่อฉีดยังปิดอยู่ และเมื่อวาล์วยางเริ่มเปิดออก[illegible]นจะเริ่มลดลง[illegible]พบว่าที่อัตราการฉีดต่ำสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ R3 เกิด[illegible]ัฒนาของแรง[illegible]ากสุด เกิดจากระหว่างการทดสอบ สารละลายเคมีที่[illegible]ก่อตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคเหล่านี้ไม่ได้ก่อตัวเป็นเจลทั้งหมด จึงยังคงไหลในท่อฉีดได้ ดังรูปที่ 15 ซึ่งที่อัตราการฉีดต่ำ สารละลายเคมีมีอัตราการไหลไปยังบริเวณปลายท่อฉีดได้ช้ากว่าที่อัตราการฉีดสูง จึงเกิดการสะสมของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่า การพัฒนาของแรงดันจึงมีค่าสูงกว่าที่อัตราการฉีดสูง ในสารละลายแบบ V110 ดังรูปที่ 16



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ที่ V110

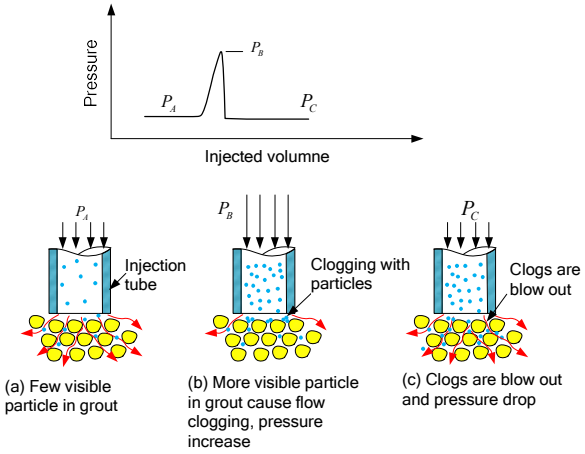


รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเกราท์กับปริมาตรเกราท์ที่ V130

รูปที่ 15 อนุภาคที่เกิดสารละลายเคมี

รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดกับแรงดันเกราท์สูงสุด

อย่างไรก็ตามพบว่าการก่อตัวของอนุภาคที่เกิดจากสารละลายเคมี ทำให้บางช่วงในการทดสอบเกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันชั่วขณะ สันนิษฐานว่าเกิดจากอนุภาคของสารละลายเคมี อุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดทรายชั่วขณะ เมื่อแรงดันสูงพอที่จะดันอนุภาคที่อุดตันออกไปได้แล้ว แรงดันจึงลดลง ดังรูปที่ 17 ซึ่งการเกิดเหตุการณ์เช่นนี้มีผลทำให้การพัฒนาของแรงดันมีแนวโน้มสูงขึ้น เช่น จากรูปที่ 16 เมื่อใช้สารละลายเคมีแบบ V130 จะเห็นได้ว่า แรงดันที่อัตราการฉีดเท่ากับ R4 มีค่ามากสุดตามด้วยที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R5 ตามลำดับ



รูปที่ 17 การเพิ่มขึ้นของแรงดันเนื่องจากการอุดตันจากอนุภาคในเกราท์ และการลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลังจากส่วนที่อุดตันหลุดออกไปในช่องว่าง

5.2 อิทธิพลของอัตราการฉีดกับรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น

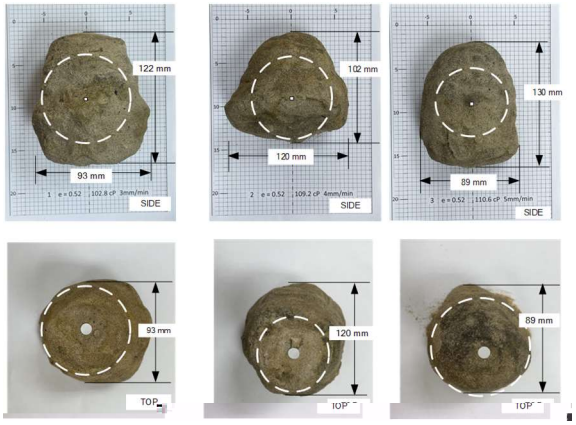
รูปที่ 13 และ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกราท์กับปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการเกราท์ ที่ความหนืดแบบ V110 และ V130 เทียบกับลักษณะของเกราท์ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 18 และ 19 พบว่า อิทธิพลของอัตราการฉีดมีผลต่อรูปแบบเกราท์ที่กิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่า ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R4 ในระหว่างทำการทดสอบสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันในหลายช่วงของการทดสอบ คาดว่าเหตุการณ์เช่นนี้ทำให้เกิด hydraulic fracturing ในทรายระหว่างการเกราท์ ทำให้เกราท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นข้อสนับสนุนว่าเกราท์ที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ fracture grout ในขณะที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 เหตุการณ์การเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลัน แทบไม่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบ เกราท์ที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่า โดยคาดว่ารูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งรูปแบบ fracture grout และ การเกราท์เพื่อป้องกันน้ำแทรกซึม (permeable grout) ในทรายระหว่างการเกราท์

5.3 อิทธิพลของความหนืดกับรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น

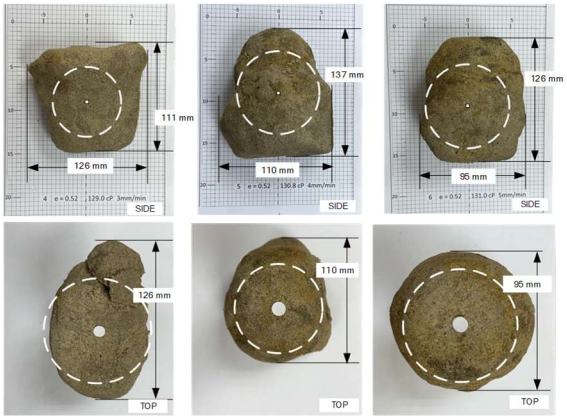
รูปที่ 18 และ 19 เป็นลักษณะของเกราท์ที่เกิดขึ้น ที่ความหนืดแบบ V110 และ V130 หากพิจารณาที่อัตราการฉีดเท่ากัน เมื่อความหนืดของสารละลายเคมีเพิ่มขึ้น พบว่า อิทธิพลของความหนืดไม่ได้ส่งผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น เกิดจากความแตกต่างของความหนืดจากสารละลายเคมี ที่ใช้ในการทดสอบ มีความหนืดใกล้เคียงกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ เกราท์ที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับเกราท์ในงานวิจัยของ [8]

5.4 ขนาดของเกราท์ที่เกิดขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเกราท์ในทฤษฎี

จากสมการที่ (2) เมื่อทราบเวลาที่ใช้ในการซึมของเกราท์จากปลายท่อฉีดที่มีรัศมี R_o ในขณะทำการทดสอบ สามารถคำนวณหารัศมีของเกราท์ที่เกิดขึ้น R จากทฤษฎีให้อยู่ในเทอมของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกราท์ D_o เทียบกับขนาดความกว้างของเกราท์ที่เกิดขึ้นจริง D และความสูงของเกราท์ที่เกิดขึ้นจริง H ได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 18 ภาพถ่าย grout bulb ที่ความหนืด V110



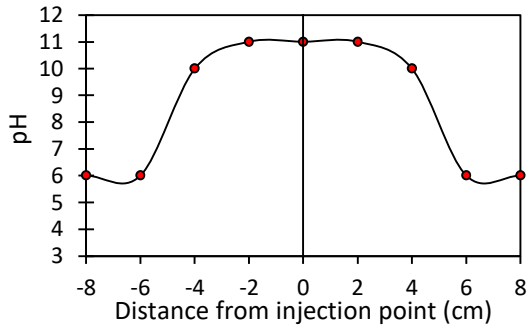
รูปที่ 19 ภาพถ่าย grout bulb ที่ความหนืด V130

ตารางที่ 4 ขนาดเกราท์ที่เกิดขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางจากทฤษฎี

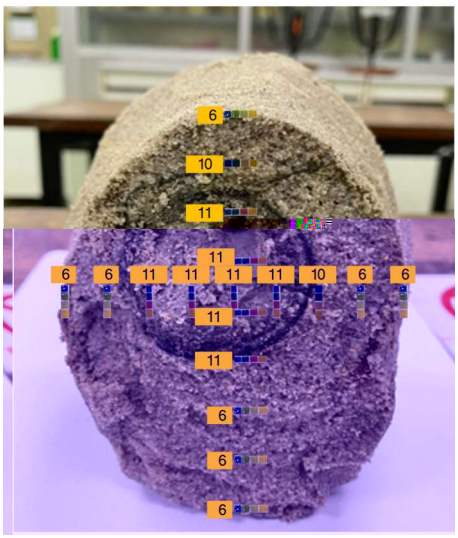
Sample	Type	D (mm)	H (mm)	D_0 (mm)
1	e = 0.52	93.0	122.0	84.0
2	e = 0.52	120.0	102.0	80.6
3	e = 0.52	89.0	130.0	81.6
4	e = 0.52	126.0	111.0	80.2
5	e = 0.52	110.0	137.0	79.2
6	e = 0.52	95.0	126.0	78.0

จากตารางที่ 4 พบว่าขนาดเกราท์ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดตามทฤษฎี เกิดจากขนาดเกราท์ตามทฤษฎี คิดให้เกราท์ที่เกิดขึ้น เกิดจากการซึม (permeation) ของสารละลายเคมีไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายเพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงความเข้มข้นของสารละลายเคมีที่ใช้ในการเกราท์ ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงได้มีการตรวจสอบพฤติกรรมดังกล่าว โดยการฉีด

สารละลายเคมีลงไปในทรายตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นใช้ pH indicator ตรวจสอบความเป็นกรด – ด่าง ในตัวอย่างทดสอบ พบว่า ทรายที่อยู่ใกล้บริเวณท่อฉีดจะมีค่า pH ประมาณ 11 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างเช่นเดียวกับสารละลายเคมีในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปจากท่อฉีดจะมีค่า pH เริ่มลดลงจนถึงค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนเช่นเดียวกับทรายทดสอบที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่า เกราท์ที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการซึมเพียงอย่างเดียวแต่ยังเกิดจากกระบวนการแพร่ (diffusion) ของสารละลายเคมี จากจุดที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ทำให้เกราท์ที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่กว่า รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับความเป็นกรด – ด่าง ของทรายในตัวอย่างทดสอบและรูปที่ 21 ผลการทดสอบความเป็นกรด – ด่างในตัวอย่างทดสอบ



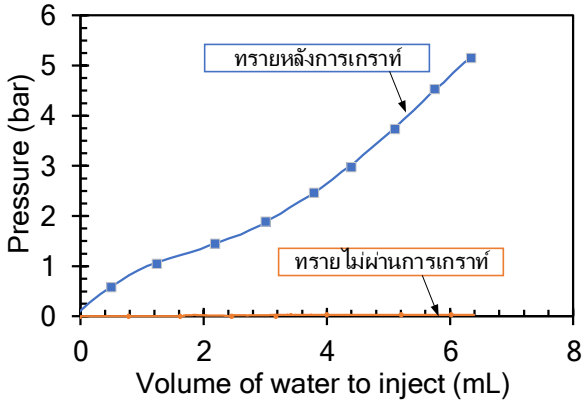
รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการแพร่ของสารละลายจากท่อฉีดกับความเป็นกรด – ด่าง



รูปที่ 21 ผลการทดสอบความเป็นกรด – ด่างในตัวอย่างทดสอบ

5.5 การทดสอบการลดความซึมน้ำของทรายหลังการเกราท์

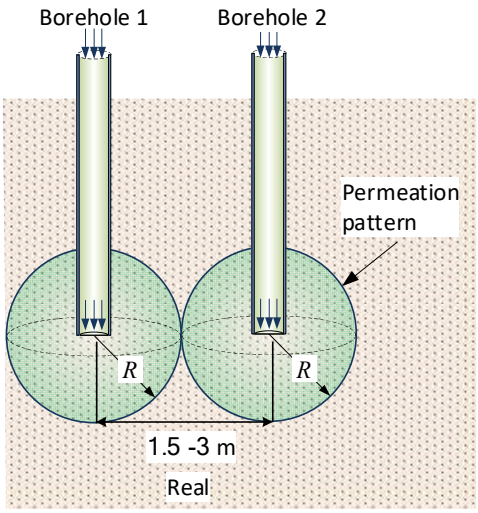
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดความซึมของน้ำในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพ โดยเทคนิคการเกราท์ด้วยสารละลายเคมี จึงได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของทรายที่ผ่านการเกราท์ด้วยการบรรจุทรายลงในกระบอกฉีดสารละลายให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบจริง ทำการอัดฉีดสารละลายคมีลงไปในตัวอย่างทดสอบทิ้งไว้ 72 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ทรายที่อยู่ในสภาวะหลังการเกราท์ จากนั้นทำการอัดฉีดน้ำลงไปในทรายหลังการเกราท์ พบว่า แรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำลงในทรายหลังการเกราท์มีค่าสูงกว่าแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำ เกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดทรายบางส่วนหลังการเกราท์ เกิดการแทนที่น้ำด้วยสารละลายเคมี ส่งผลให้แรงดันในการอัดฉีดน้ำให้ซึมไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อที่น้ำจะได้ซึมไปในช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้ รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำกับปริมาตรน้ำที่ใช้ฉีดในทรายที่ผ่านการเกราท์และทรายที่ไม่ผ่านการเกราท์

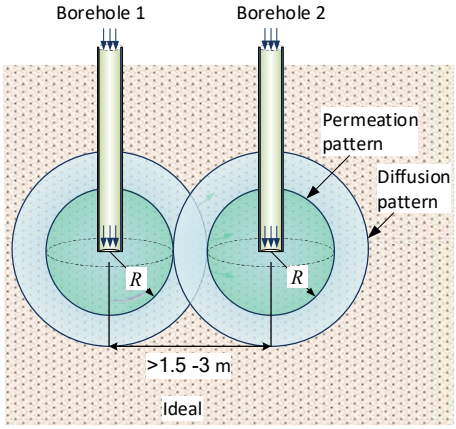


รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำกับปริมาตรน้ำที่ใช้ฉีดในทรายที่ผ่านการเกราท์และทรายที่ไม่ผ่านการเกราท์

5.6 การประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม

ในการประมาณตำแหน่งหลุมเจาะเพื่อใช้ในการอัดฉีดเกราท์ให้เหมาะสม [9] ได้กล่าวว่า ตำแหน่งหลุมเจาะที่ใช้ในการอัดฉีดเกราท์เพื่อลดการไหลซึมของน้ำในดินมีความสัมพันธ์กับรัศมีประสิทธิผล (effective radius) หรือรัศมีที่คำนวณได้จากทฤษฎี R จากสมการที่ (2) โดยทั่วไปได้มีการออกแบบให้ตำแหน่งหลุมเจาะห่างกันเป็นระยะทาง 1.5-3 เมตร แต่จากผลการศึกษาขนาดเกราท์พบว่า ขนาดเกราท์ที่เกิดขึ้นจริงจากการวิจัยมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกราท์ที่เกิดจากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งมีผลมาจากกระบวนการแพร่ของสารละลายเคมี ส่งผลให้พื้นที่บริเวณทึบน้ำที่เกิดจากช่องว่างระหว่างเม็ดทรายบางส่วนหลังการเกราท์ เกิดการแทนที่น้ำด้วยสารละลายเคมีเพิ่มขึ้น ซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม ผู้ออกแบบ อาจออกแบบให้ระยะห่างของหลุมเจาะมีระยะทางที่มากขึ้นได้ เนื่องจากพื้นที่บริเวณทึบน้ำที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการแพร่ ส่งผลให้ทรายมีประสิทธิภาพในการไหลซึมของน้ำลดลง รูปที่ 23 แสดงแนวคิดการออกแบบตำแหน่งหลุมเจาะในงานจริงกับอุดมคติ





รูปที่ 23 แนวคิดการออกแบบตำแหน่งหลุมเจาะในงานจริงกับอุดมคติ

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของความหนืดเกราท์ไม่ส่งผลต่อรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้นด้วยวัสดุเกราท์ที่ใช้เป็นสารละลายเคมีที่มีความหนืดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นรูปแบบการเกราท์จึงไม่ได้แตกต่างไปจากเดิมเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น
2. อิทธิพลของอัตราการฉีดส่งผลต่อรูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่าที่อัตราการฉีดเท่ากับ R3 และ R4 มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันในหลายช่วงของการทดสอบ จากอนุภาคของสารละลายเคมี ทำให้เกราท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ อันมีผลมาจาก hydraulic fracturing ในทรายระหว่างการเกราท์ จึงเกิดเกราท์ในรูปแบบ fracture grout แต่ที่อัตราการฉีดเท่ากับ R5 เหตุการณ์ดังกล่าวแทบไม่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ รูปแบบของเกราท์ที่เกิดขึ้นจึงผสมระหว่าง fracture grout และ permeable grout
3. จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น คือการก่อตัวของอนุภาคจากสารละลายเคมีและอัตราการฉีด เพราะอัตราการฉีดต่ำ อัตราการไหลของสารละลายเคมีไปยังบริเวณปลายท่อฉีดช้ากว่าที่อัตราการฉีดสูง จึงเกิดการก่อตัวของอนุภาคบริเวณปลายท่อฉีดสูงกว่ามีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลบริเวณปลายท่อฉีดลดลง จึงเกิดการพัฒนาของแรงดัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับรูปแบบเกราท์ที่เกิดขึ้น อีกทั้งการก่อตัวของอนุภาคยังทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันอย่างฉับพลันหลายช่วงของการทดสอบ อันก่อให้เกิด hydraulic fracturing ในทรายระหว่างการเกราท์ เกราท์ที่เกิดขึ้นจึงเกิดในรูปแบบ fracture grout
4. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อคือ การเกราท์ในทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ปราศจากอนุภาค แล้วศึกษาขนาดเกราท์เพื่อใช้ในการประมาณตำแหน่งการฉีดเกราท์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายพีระพัฒน์ ถิ่นหนองแวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณนายบุญญฤทธิ์ บุญเกิด, นายณัฐดนัย ป้อมบุญมี, นายพิเชษพงศ์ ธรรมะกิตติกร และนักศึกษาปริญญาตรีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] มุดใต้ดินไซต์ “อิตาเลียนไทย” ส่องอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีส้มศูนย์วัฒนธรรมฯ – มีนบุรี. (16 มกราคม 2563). *ประชาชาติธุรกิจ*. สืบค้นจาก https://www.prachachat.net/property/news-411567

[2] อุโมงค์น้ำบึงหนองบอนคืบ 86.70% คาดพร้อมเปิดใช้ มี.ค.65. (17 กันยายน 2564). *มติชนออนไลน์*. สืบค้นจาก https://www.matichon.co.th/local/new_2944429

[3] Paveenchana, T. and Saowiang, K. (2012). The change of piezometric pressure in the subsoil strata affecting substructures in the Bangkok area, *The Seminar of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 1-12.

[4] Phienwej, N., Asanprakit, A., Kittiyodom, P. and Timpong, S. (2018). Increasing geotechnical challenges in the design and construction planning of the third phase Bangkok MRT underground. *20th Southeast Asian Geotechnical Conference (SEAGC),* Indonesia, 6 -7 November 2018.

[5] Wiriyatharakij, W. (2016). *MRTA station excavation under situation of space constraint and potential hydraulic uplift at base: cases of Sanamchai & Itsaraphap stations.* M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.

[6] Yamazaki, H., Hayashi, K. and Zen, K. (2005). New liquefaction countermeasure based on pore water replacement, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE),* Osaka, Japan, 2005, pp.2741-2744.

[7] Hsuamann, M.R. (1990). *Engineering principle of ground modification.* The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.347-379.

[8] Wang, Q., Wang, S., Sloan, S.W., Sheng, D. and Pakzad, R. (2016). Experimental investigation of pressure grouting in sand. *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 2, pp.161-173.

[9] Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*, Rotterdam, Netherland, 1996, pp. 86-90.