เสถียรภาพของหลุมเจาะทรายที่มีผลมาจากสารละลายพยุงหลุม
Borehole stability caused by slurry

นายชนวีร์ ปัตติทากร[1] และ นายศิริชัย จันทา[2]
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

สารละลายพยุงหลุมเป็นสิ่งสำคัญในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยมีหน้าที่ในการพยุงหลุมเจาะไม่ให้เกิดการพังทลายในขณะทำการก่อสร้าง ในปัจจุบันมีการทดสอบคุณสมบัติของสารละลายพยุงหลุมก่อนนำไปใช้งาน แต่การทดสอบดังกล่าวไม่สามารถทดสอบการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะได้ อีกทั้งยังมีการนำสารละลายชนิดใหม่มาใช้ในการพยุงหลุมเจาะมากขึ้น โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาวิธีทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะทรายที่มีผลมาจากสารละลายชนิดต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบเสถียรภาพของหลุมเจาะทรายที่มีผลมาจากสารละลายสองชนิด คือ สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์ และ สารละลายเบนโทไนท์ผสมโพลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์ โดยทำการประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดสอบขึ้นเอง โดยการจำลองความดันให้ดันผ่านตัวอย่างทรายที่ผสมสารละลายที่แทนที่ช่องว่างในเม็ดดินที่ร้อยละต่าง ๆ ทำการสังเกตการพังทลายของตัวอย่างทรายและพิจารณาอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ผ่านความดันมาที่ตัวอย่างทราย ผลการทดสอบจะทำให้ทราบว่า สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของหลุมได้ดีกว่าสารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนโพลิเมอร์

คำสำคัญ: เสถียรภาพของหลุมเจาะ สารพยุงหลุม นาโนพอลิเมอร์

Abstract

Borehole stabilized slurry is the crucial material in wet process bored pile system which is function for supporting borehole to prevent collapsing during pile construction. At present, there are several properties test for slurry. Nevertheless, the test is unable to test the stability of the borehole. Moreover, new types of slurry are also brought to stabilize the borehole. The objective of this project is to find a method for testing the stability of the borehole that are affected by various slurry and to compare the stability of the borehole which results from two kinds of slurry, bentonite-polymer slurry and bentonite-polymer-nano polymer slurry. The researchers created their own test equipment by simulating the pressure to push through the sand samples mixed with the slurry that replace the void of sand at various percentages and observe the collapse of sand samples and consider the flow rate of water which used to pass the pressure to the sand samples. The test results will show that bentonite-polymer slurry has the ability to stabilize borehole better than the bentonite-polymer-nano polymer slurry.

Keywords: borehole stability, borehole stabilized slurry, nano polymer

1. บทนำ

1.1 ที่มาของการศึกษา

สิ่งที่จำเป็นในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกคือการใช้สารละลายมาช่วยในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ สารละลายจะช่วยพยุงหลุมเจาะไม่ให้พังถล่มในระหว่างทำงาน สารละลายที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีสองชนิด คือ สาระลายเบนโทไนท์และสารละลายเบนโทไนท์ผสมโพลิเมอร์ โดยสารละลายที่ใช้พยุงหลุมจะถูกวนใช้มากกว่าหนึ่งครั้ง เมื่อใช้กับเสาเข็มต้นแรกเสร็จก็ถูกนำไปใช้กับเสาเข็มต้นต่อไป ทำให้สาระละลายจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติก่อนนำไปใช้งานทุก โดยการทดสอบหลัก ๆ ที่ใช้ในปัจจุบันจะอ้างอิงจากมาตรฐาน ACI และ AASHTO เช่น ความหนาแน่น

(Density), ความเป็นกรด-เบส (pH), Sand content, Marsh Funnel Viscosity (ACI,1989) นอกจากนี้ยังมีการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ แต่ไม่นิยมทำการทดสอบงานภาคสนามอีก เช่น การทดสอบ Plastic Viscosity, Yield Point, 10 min. Gel Strength, Differential Head และ Fluid Loss เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการนำสารละลายชนิดอื่น ๆ หรือทดลองเปลี่ยนส่วนผสมของสารละลาย เพื่อนำมาใช้แทนสารละลายเดิม ตัวอย่างเช่น การนำโพลิเมอร์ที่มาจากธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและผลิตได้ในประเทศไทยมาใช้แทนโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ในปัจจุบัน แต่จากการทดสอบคุณสมบัติข้างต้นก็ยังไม่เพียงพอต่อการยืนยันว่าสารละลายชนิดใหม่จะสามารถรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะได้ และไม่สามารถนำไปทดลองกับการก่อสร้างจริงในทันที เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและอาจทำให้เกิดอันตรายได้

จากเหตุการณ์ที่กล่าวข้างต้น ปริญญานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะที่เป็นผลมาจากสารละลายพยุงหลุมและเสถียรภาพของหลุมเจาะที่มีผลมาจากสารละลาย 2 ชนิด

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของหลุมเจาะและเปรียบเทียบเสถียรภาพของหลุมเจาะทรายที่เป็นผลมาจากสารละลาย 2 ชนิดคือ สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์ และ สารละลายเบนโทไนท์ผสมโพลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทรายที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นทรายที่ออกแบบให้มีกระจายของขนาดเม็ดดินใกล้เคียงกับทรายที่เก็บได้จากชั้นทรายที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพฯ (กฤติน, 2560)

1.3.2 ทดลองโดยใช้ทรายผสมสารละลายในสัดส่วนสารละลายแทนที่ 80%,40%,0% ของปริมาตรช่องว่างในเม็ดทรายในสารละลายแต่ละชนิด

1.3.3 ควบคุมความหนาแน่นของทรายผสมสารละลายที่ใช้สำหรับทดสอบที่ 1.55 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ที่ 80%

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพ

ดินในกรุงเทพมีลักษณะเป็นชั้น ๆ เกิดจากการตกตะกอนของดินที่ประกอบไปด้วยตะกอนทะเลและตะกอนปากแม่น้ำ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา (ว.ส.ท., 2520) สามารถจำแนกชั้นดินในกรุงเทพถึงระดับความลึกประมาณ 60 เมตร ได้เป็นดินช่วงแรกจะเป็นชั้นดินแห้งบาง ๆ เป็นชั้นเปลือกหนาประมาณ 2-3 เมตร ปกคลุมชั้นดินเหนียวอ่อนที่อยู่ในชั้นถัดไปที่มีความสูงประมาณ 12 เมตรชั้นนี้เป็นชั้นที่มีการยุบตัวสูง ไม่เหมาะกับการวางปลายเสาเข็ม ชั้นถัดจากนั้นจะเป็นชั้นดินเหนียวที่แข็งมากกว่าดินเหนียวอ่อนช่วงแรกเป็นดินเหนียวความอ่อนระดับปานกลาง มีความหนา 5-6 เมตร ชั้นถัดไปจะแข็งมากกว่าดินชั้นก่อนหน้าเป็นชั้นดินเหนียวแข็งอยู่ที่ความประมาณ 25 เมตรก่อนจะถึงชั้นทรายชั้นแรกซึ่งมีความสูงประมาณ 10 -12 เมตร และจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งกับชั้นทรายสลับกันไป (ณรงค์, 2542) ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะจะเลือกใช้ชั้นทรายเป็นชั้นรองรับน้ำหนักของสิ่งปลูกสร้าง เพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักได้มาก

2.2 สารละลายที่ใช้รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

2.2.1 สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry)

สารละลายเบนโทไนท์เป็นสารละลายที่เกิดจากสารเบนโทไนท์และน้ำ สารเบนโทไนท์เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบเป็นแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ซึ่งทำให้สารเบนโทไนท์มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและขยายตัวออก เมื่อทำการผสมสารเบนโทไนต์ลงในน้ำจะต้องทิ้งไว้ให้เกิดการดูดน้ำเต็มที่ประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน หลังจากผสมสารละลายเบนโทไนท์จะมีคุณสมบัติเป็นสารคอลลอยด์ มีลักษณะเป็นสารละลายที่มีความหนืด เมื่อปล่อยใหอยู่นิ่งๆ ในระยะเวลาหนึ่ง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเอง แต่เมื่อถูกกวนใหแตกตัว (Agitated) ความหนืดจะลดลง (ณรงค์ & และคณะ, 2544)

สารละลายเบนโทไนท์ถูกนำมาใช้เป็นสารละลายที่ช่วยพยุงหลุมเจาะ โดยมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามาในหลุม ป้องกันการพังของหลุมโดยการสร้างแรงดันต้านไว้ และคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารละลายเบนโทไนท์คือการก่อให้เกิดผนังทึบน้ำ (Filter cake) โดยสารเบนโทไนท์จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่ผนังหลุมเจาะและสะสมมากขึ้นตามเวลา ทำให้เกิดเป็นเป็นผนังทึบน้ำขึ้น ช่วยให้หลุมเจาะมีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันผนังทึบน้ำนั้นก็ทำให้ผิวผนังหลุมเจาะมีแรงเสียดทานลดลง กำลังรับแรงเสียดทานด้านข้างลดลง (Unit skin friction) ทำให้กำลังของเสาเข็มเจาะมีค่าลดลงด้วย

2.2.2 สารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Slurry)

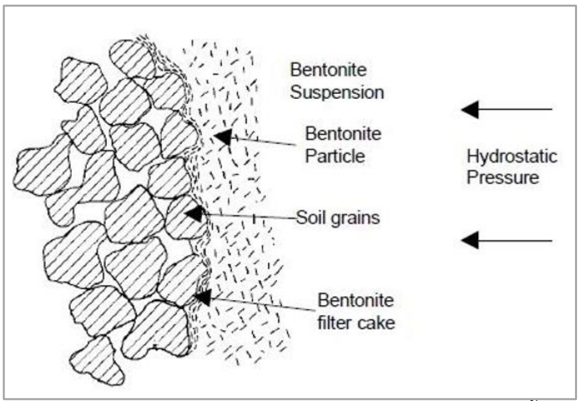
สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารละลายที่เกิดจากสารโพลิเมอร์และน้ำ สารโพลิเมอร์ที่นำมาใช้ในปัจจุบันคือสารโพลิเมอร์สังเคราะห์ PHPA (Partially Hydrolyzed Polyacrylamide) เพราะว่าสามารถนำสารละลายกลับมาใช่ใหม่ได้และสะดวกในการทำงาน โดยสารโพลิเมอร์จะต่างจากสารเบนโทไนท์ตรงที่ สารโพลิเมอร์สามารถผสมน้ำได้ทันที ไม่ต้องรอให้มีการดูดน้ำ หลังจากผสมสารละลายโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติเป็นเป็นสารละลายไม่ใช่สารคอลลอยด์ สารละลายโพลิเมอร์ไม่มีคุณสมบัติการก่อให้เกิดผนังทึบน้ำจึงทำให้ไม่เกิดปัญหากำลังรับแรงเสียดทานด้านข้างลดลง

การรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะของสารละลายโพลิเมอร์ (PHPA) จะต่างจากสารละลายเบนโทไนท์ คือจะไม่เกิดกระบวนการ Filtration แต่จะใช้เส้นใย (Polymer stands) และ (Polymer gels) ในการอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินและเพิ่มการยึดเกาะกันของดิน โดยโพลิเมอร์เจลจะทาหน้าที่อุดช่องว่าง ส่วนเส้นใยจะเป็นตัวเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน โพลิเมอร์เป็นของไหลที่มีความหนืดของเจลสูง และจะไหลเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างในเม็ดดินกลายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ เคลือบรอบผนังหลุมเจาะเรียกว่า Gel membrane ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่สามารถ

ถ่ายแรงดันของของเหลวไปยังผนังหลุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ณรงค์ & และคณะ, 2543)

2.3 การก่อตัวขึ้นของผนังทึบน้ำ (Filter cake)

คุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของสารละลายเบนโทไนท์ คือ การก่อให้เกิดผนังทึบน้ำ (Filter cake) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อใส่สารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะ แรงดันจะดันสารละลายให้ซึมผ่านชั้นดิน โดยจะทิ้งส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนในสารละลายไว้ที่ผนังหลุม เมื่อเวลาผ่านไปจนสะสมเป็นแผ่นจะทำให้สารละลายซึมผ่านชั้นดินได้น้อยลง และสะสมจนกลายเป็นเยื่อบุทึบน้ำ สามารถรับแรงดันจากสารละลายในหลุมได้ โดยความแข็งแรงของผนังเยื่อบุจะขึ้นกับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ชนิดของสารละลายที่ใช้ ผลต่างของความดันระหว่างสารละลายและน้ำ (ธยานันท์, 2544)



รูปที่ 1 การซึมผ่านของสารละลายเบนโทไนท์และการเกิดผนังทึบน้ำ

2.4 มาตรฐานของสารละลาย

ก่อนนำสารละลายมาใช้ในหลุมเจาะ จะต้องผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ก็จะแตกต่างกันในตามชนิดของสารละลาย โดยในงานภาคสนามตรวจสอบคุณสมบัติทั้งหมด 4 คุณสมบัติคือ ความหนาแน่น (Density), ความเป็นกรด-เบส (pH), Sand content, Marsh Funnel Viscosity โดยในปัจุบันจะอ้างอิงจากมาตรฐาน ว.ส.ท. เป็นหลัก

2.5 นาโนพอลิเมอร์ (Nano polymer)

นาโนพอลิเมอร์เป็นสารชีวมวลจากธรรมชาติที่เกิดจากการลดขนาดของพอลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโน สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้เอนไซม์ ใช้สารเคมี แบ่งประเภทออกเป็นแบบนาโนคริสตัล (Nanocrytals) และ นาโนไฟบริล(Nano fibril) ซึ่งสารที่ใช้ในการทดสอบจะจัดอยู่ในประเภทนาโนคริสตัล (Nanocrytals) เกิดจากการใช้กรดมาสกัด เช่น กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เกิดเป็นผลึกมีลักษณะคล้ายเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-25 นาโนเมตร มีความยาวเฉลี่ย 100-1000 นาโนเมตรขึ้นกับวัตถุดิบตั้งต้น ลักษณะอีกอย่างคือจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบ ซึ่งช่วยป้องกันการรวมตัวกันของผลึก ทำให้เกิดความเสถียรขึ้นในระบบ (ธัญญ์นลิน วิญญูประสิทธิ์และคณะ, 2560)

2.6 พฤติกรรมการซึมผ่านและผลกระทบของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อดินโดยรอบผนังหลุมเจาะเสาเข็ม

จากการศึกษา พฤติกรรมการซึมผ่านและผลกระทบของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อดินโดยรอบผนังหลุมเจาะเสาเข็ม (กฤติน ศันสนะกุล, 2561) ได้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองย่อส่วนเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านและอิทธิพลของสารละลายที่มีต่อกำลังของดินโดยรอบผนังหลุมเจาะ โดยใช้ สารละลายสามชนิดได้แก่ สารละลายเบนโทไนท์ สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์ และสารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์ที่มีการปนเปื้อน โดยให้สารละลายดันผ่านตัวอย่างทรายแล้วประเมินกำลังของดินที่เปลี่ยนแปลงไปจากระยะจมของแท่งโคนตามวิธีการทดสอบ Drop Cone Penetrometer Test ทำให้ได้ทราบถึงพฤติกรรมของสารละลายแต่ละชนิด

แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่จำลองการไหลของสารละลายจากบริเวณด้านในหลุมเจาะออก ไปด้านนอกตามแนวรัศมีของหลุมเจาะกลมและไม่มีการพังถล่มของหลุมเจาะในแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งการ ศึกษาดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของการทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะโดยการจำลองให้แรงดันด้านนอกของหลุมมีค่าสูงกว่าด้านในหลุมเจาะและทำให้เกิดการพังถล่มของผนังหลุม

จากผลการทดลองของการศึกษานี้ ทำให้ทราบว่าชนิดและปริมาณของสารละลายที่เข้าไปแทนที่ช่องว่างในเม็ดดิน มีผลต่อกำลังของดินที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาได้จากผลการทดสอบ Drop Cone Penetrometer Test เช่น ที่ระยะห่างจากผนังหลุมน้อย สารละลายซึมผ่านได้มาก ทำให้ได้ระยะจมของเข็มน้อย เป็นต้น จึงเป็นที่มาของการออกแบบการทดลองที่สารละลายต่างชนิดกัน และที่ปริมาณสารละลายที่แทนที่ช่องว่างของเม็ดดินที่ปริมาณต่างกัน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ส่วนประกอบอุปกรณ์ใช้ในการทดสอบ

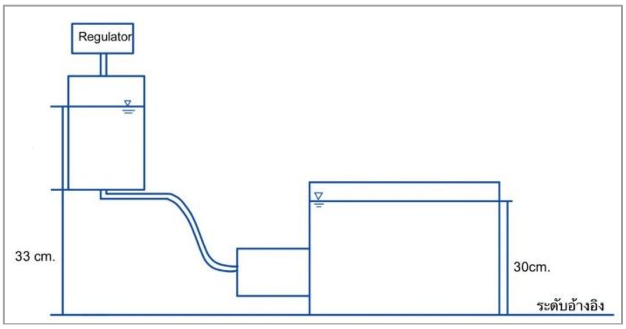
3.1.1. กล่องพลาสติกกมีขนาดกว้าง 48 ซม. ยาว 64 ซม. สูง 35 ซม. พร้อมทั้งเจาะรูด้านข้างของกล่องเป็นหน้าตัดวงกลม 1 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ด้านในกล่องเขียนระดับความสูงไว้เพื่อบอกระดับน้ำภายในกล่องในขั้นตอนการทดสอบ

3.1.2. ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6 นิ้ว มีความยาว 18 ซม.สำหรับบรรจุทรายตัวอย่าง ประกบติดกับฝาครอบท่อพีวีซีสำหรับท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6 นิ้ว เจาะรูที่ฝาเพื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์สร้างแรงดัน

3.1.3 อุปกรณ์สร้างแรงดัน สำหรับใส่น้ำเพื่อใช้ในการปรับเพิ่ม – ลดความดันและปรับระดับความสูงน้ำ

3.2 การประกอบอุปกรณ์

การทดสอบจะต้องประกอบทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน คือนำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6 นิ้วซึ่งประกบติดด้วยฝาครอบท่อพีวีซีมาต่อเข้ากับด้านข้างของกล่องพลาสติกในตำแหน่งรูเจาะและเชื่อมต่อกันด้วยกาวเพื่อป้องกันน้ำรั่วซึม



รูปที่ 2 การประกอบอุปกรณ์ทดสอบ

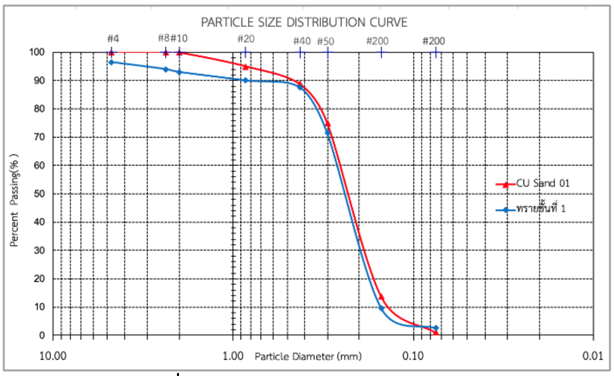
3.3 การเตรียมทราย

เตรียมทรายสำหรับทดสอบโดยใช้วิธี Grain Size Analysis (ASTM D422 63) เพื่อให้มีการกระจายของขนาดเม็ดดินใกล้เคียงกับตัวอย่างทรายชั้นที่ 1 กรุงเทพฯ ที่เก็บขึ้นมาจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสถานีวังบูรพา (กฤติน, 2561) โดยมีลักษณะการกระจายของขนาดเม็ดดินตามเส้นสีน้ำเงิน

ทดลองนำทรายมีขนาดเป็นช่วงจำนวน 4 ช่วงขนาด มาผสมกันอัตราส่วนของทรายที่ใช้ในการผสมใกล้เคียงทรายตัวอย่างชั้นที่ 1 กรุงเทพฯ เป็นดังตารางที่ 1 และมีลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินตามเส้นสีแดง

ตารางที่ 1 ขนาดและอัตราส่วนของทรายที่ใช้ในการผสม

ขนาดของทรายที่ใช้ในการผสม	อัตราส่วนที่ใช้ต่อทรายทั้งหมด
0.84 - 2.38 มม.	5%
0.4 - 0.84 มม.	5%
0.07 - 0.25 มม.	80%
0.075 มม. (ฝุ่นทราย)	10%



รูปที่ 3 การกระจายตัวของขนาดเม็ดทราย

3.4 การเตรียมสารละลาย

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ เกิดจากการนำสารละลายพอลิเมอร์ที่มีการใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยมีส่วนประกอบเป็นเบนโทไนท์ 12 กรัม, พอลิเมอร์ 0.4 กรัม ต่อน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำมาปรับลดปริมาณพอลิเมอร์ลง และนำนาโนพอลิเมอร์เข้ามาแทนที่บางส่วน

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมสารละลาย

ชนิด สารละลาย	เบนโทไนท์ (Bentonite)	พอลิเมอร์ (Polymer)	นาโนพอลิเมอร์ (Nano polymer)	น้ำ
	กรัม	กรัม	กรัม	ลบ.ซม.
1	12	0.4	-	1000
2	12	0.2	0.16	1000

การผสมเบนโทไนท์กับน้ำและทิ้งไว้อย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์สามารถแตกตัวได้ทั้งหมดและสามารถพองตัวได้อย่างเต็มที่ หลังจากผสมเบนโทไนท์เสร็จแล้วจึงค่อยเติมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์ลงไป ผสมให้เข้ากัน และทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ก็จะสามารถนำไปผสมทรายสำหรับทดสอบได้

3.5 การเตรียมทรายผสมสารละลาย

3.5.1. ตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่เป็น 80% จะเตรียมโดยการนำทรายปริมาณ 6,200 กรัม และสารละลายปริมาณ 1,240 ลบ. ซม.

3.5.2 ตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่เป็น 40% จะเตรียมโดยการนำทรายปริมาณ 6,200 กรัมและใช้สารละลายและน้ำในอัตราส่วน 1:1 โดยเป็นสารละลายปริมาณ 620 ลบ.ซม.และน้ำปริมาณ 620 ลบ.ซม.

3..5.3 ตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่เป็น 0% จะเตรียมโดยการนำทรายปริมาณ 6,200 กรัมและน้ำเป็นปริมาณ 1,240 ลบ.ซม.

3.6 ขั้นตอนการทดสอบ

3.6.1. เมื่อผสมทรายและสารละลายเข้ากันแล้ว นำทรายผสมสารละลายใส่ในส่วนท่อในแนวตั้ง และบดอัดให้แน่น ทำซ้ำจนตัวอย่างทรายผสมสารละลายมีปริมาณพอดีกับขอบท่อด้านบน จากนั้นใช้แผ่นพลาสติกใสกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ววางลงบนทรายด้านบนและปิดรอบแผ่นพลาสติกใสกับตัวกล่องด้วยเทปกาว

3.6.2. นำอุปกรณ์ทดสอบตั้งกลับมาให้ท่อวางตัวในแนวนอนดังเดิมและต่อสายจากอุปกรณ์สร้างแรงดันน้ำเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ

3..6.3. เติมน้ำใส่อุปกรณ์ทดสอบโดยให้ระดับน้ำอยู่สูงกว่าระดับขอบท่อด้านบน กำหนดให้ระดับน้ำก่อนการทดสอบอยู่ที่ระดับ 30 ซม. จากระดับอ้างอิง

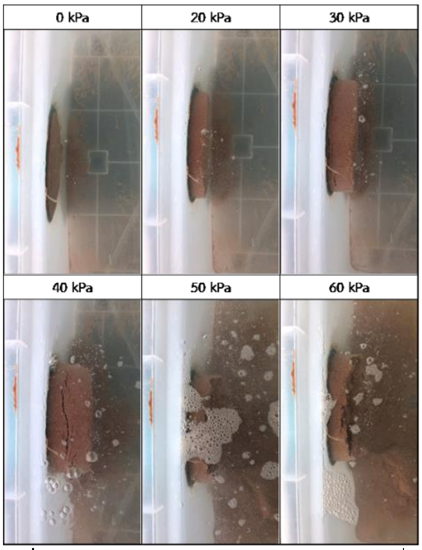
3.6.4. บันทึกระดับน้ำที่อุปกรณ์สร้างแรงดัน ก่อนเริ่มทำการทดสอบ

3.6.5. เริ่มการทดสอบโดยการปรับความดันที่เรกูเลเตอร์เริ่มต้นจาก 0 กิโลปาสคาลและเพิ่มเป็น 20 กิโลปาสคาลในการปรับความดันครั้งแรก (เครื่องมือวัดความดันไม่สามารถอ่านค่าความดันที่ 10 กิโลปาสคาลได้) หลังจากนั้นจะปรับความดันที่เรกูเลเตอร์เพิ่มขึ้นทีละ 10 กิโลปาสคาลจนถึงค่าความดันที่ 100 กิโลปาสคาล

3.6.6. บันทึกระดับน้ำที่อุปกรณ์สร้างแรงดันในช่วงระหว่างการปรับเพิ่มความดันที่เรกูเลเตอร์แต่ละครั้งพร้อมทั้งบันทึกความเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างทรายที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบ

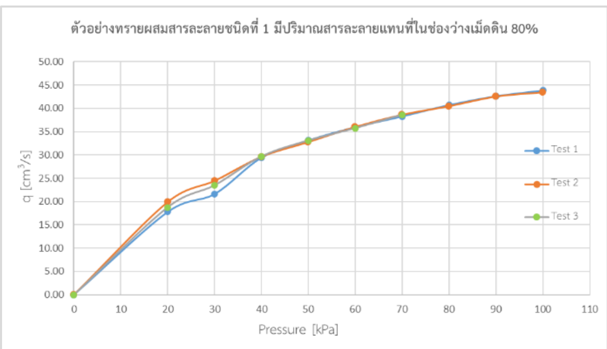
4. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 ตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%



รูปที่ 4 สภาพของตัวอย่างผสมทรายสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

จากรูปที่ 4 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% เมื่อเริ่มการทดลองตัวอย่างทรายมีพื้นผิวเรียบ จากนั้นเพิ่มความดันจากเรกูเลเตอร์ขึ้น ตัวอย่างทรายจะค่อย ๆ ถูกดันออกจากอุปกรณ์ ในช่วง 20 – 30 กิโลปาสคาล ตัวอย่างทรายจะเคลื่อนที่ออกมาอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อปรับความดันไปที่ 40 กิโลปาสคาล แรงดันจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่หลุดออกมาจากบริเวณตัวอย่างทราย และทำให้เกิดรอยแตกที่ตัวอย่างทรายขึ้นและทำให้ตัวอย่างทรายส่วนหนึ่งพังทลายลง และเมื่อปรับความดันขึ้นไปเรื่อย ๆ ตัวอย่างทรายก็จะเกิดการพังทลายต่อไป โดยลักษณะการพังของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดนี้จะมีลักษณะการพังโดยการหลุดร่อนของทรายบริเวณผิวหน้าตัดบ้างเป็นครั้งคราวตลอดการทดลองและมีการพังเป็นก้อนขนาดใหญ่หลังเกิดรอยแตกที่ตัวอย่างทราย



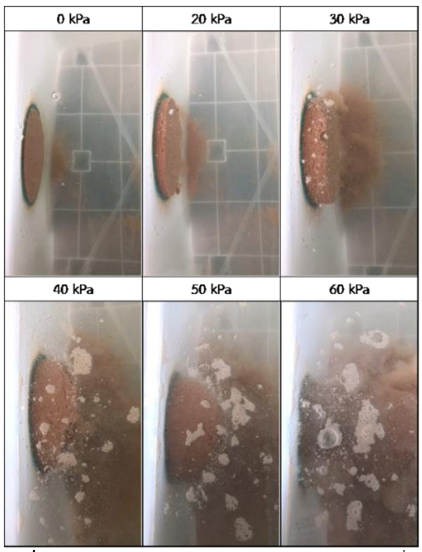
รูปที่ 5 กราฟแสดงอัตราการไหลของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ผ่านความดันไปที่ตัวอย่างทราย และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ความดันต่างๆ ความชันของกราฟจะมีค่ามากในช่วงแรก ๆ และจะเริ่มมีความเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 30 – 40 กิโลปาสคาล และหลังจากนั้นความชันจะมีค่าน้อยลงและเพิ่มขึ้นอย่างคงที่

เมื่อนำลักษณะของกราฟมาพิจารณาควบคู่กับลักษณะของตัวอย่างทรายจะพบว่า ความชันของกราฟจะมีค่ามากในช่วงแรกซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวออกของตัวอย่างทราย และช่วงต่อมาคือช่วงที่เกิดฟองอากาศ เกิดรอยแตกของตัวอย่างทราย และเกิดการพังทลาย อัตราการไหลจะเกิดความเปลี่ยนแปลงแปรปรวนไม่คงที่ และหลังจากพังทลายลง อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และเป็นระเบียบ ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าเกิดการพังทลายของตัวอย่างดินเรียบร้อยแล้วและทำให้เกิดช่องว่างที่ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านได้อย่างคงที่

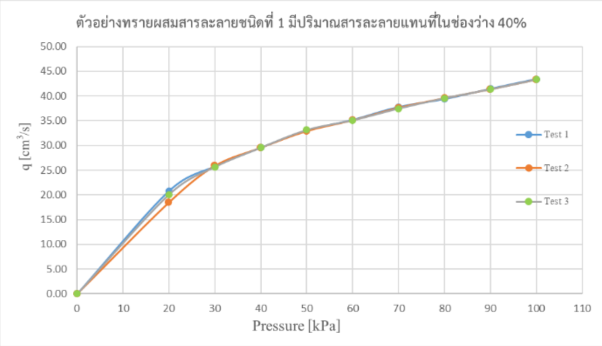
จากกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและความดัน สามารถทำการลากเส้นสัมผัสความชันสองเส้น เป็นตัวแทนอัตราการไหลก่อนการพังทลายของตัวอย่างทรายและหลังการพังทลายของตัวอย่างทราย โดยจะได้จุดตัดซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแทนจุดที่เกิดการพัง จากการพิจารณาดังกล่าวทำให้สามารถสรุปผลการทดลองของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% จะพังลงที่ผลต่างของความดันจากเรกูเลเตอร์ที่ 37, 34 และ 33 กิโลปาสคาล จากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

4.2 ตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40%



รูปที่ 6 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40%

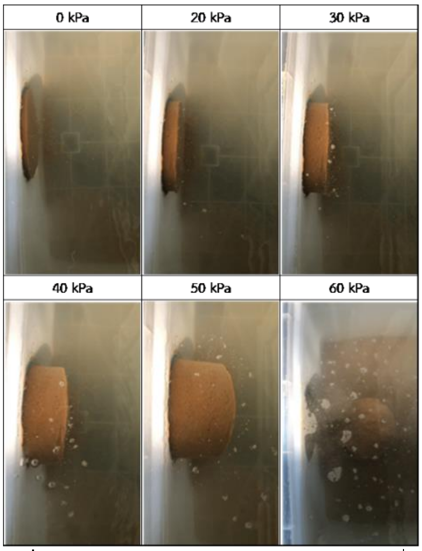
จากรูปที่ 6 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% ลักษณะของตัวอย่างทรายจะคล้ายกับตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% แต่จะเริ่มมีฟองกากาศและจะเริ่มพังที่ความดันเท่ากับ 30 กิโลปาสคาล



รูปที่ 7 กราฟแสดงอัตราการไหลของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

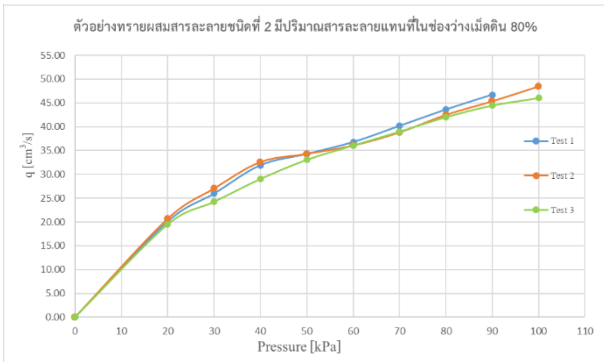
จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าในช่วง 20 -30 กิโลปาสคาล มีค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับสภาพทรายที่สังเกตได้ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและความดันของการทดลองแต่ละครั้ง สามารถสรุปผลการทดลองของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% จะพังลงที่ผลต่างของความดันจากเรกูเลเตอร์ที่ 27, 31 และ 28 กิโลปาสคาล จากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่าตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

4.3 ตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%



รูปที่ 8 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

จากรูปที่ 8 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% เมื่อเริ่มการทดลองตัวอย่างทรายมีพื้นผิวเรียบไปกับตัวผนังกล่อง จากนั้นเริ่มปรับความดันที่เรกูเลเตอร์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างทรายเริ่มเคลื่อนตัวออกจากท่อภายในอุปกรณ์ในลักษณะถูกดันออก พิจารณาตัวอย่างทรายที่ความดันเรกูเลเตอร์เป็น 30 กิโลปาสคาลจะพบว่าทรายเคลื่อนออกมาเป็นระยะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทรายที่ความดันเรกูเลเตอร์เป็น 20 กิโลปาสคาลอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 40 - 50 กิโลปาสคาลพบว่าตัวอย่างทรายมีลักษณะโน้มลงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทรายกำลังจะหลุดออกมาจาก ประกอบกับที่ความดันเรกูเลเตอร์เป็น 60 กิโลปาสคาล ตัวอย่างทรายได้เคลื่อนลงสู่พื้นกล่องพลาสติกแล้ว จากการทดลอง 3 ครั้งพบว่าลักษณะของตัวอย่างทรายที่ถูกดันออกจากท่อภายในอุปกรณ์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตลอดจนทรายหลุดออก และจึงแตกออกเมื่อตัวอย่างทรายกระทบกับพื้นกล่อง



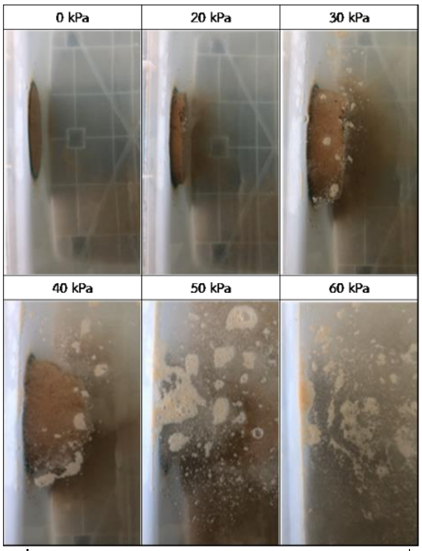
รูปที่ 9 กราฟแสดงอัตราการไหลของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำที่ดันผ่านตัวอย่างทราย จะได้เป็นความสัมพันธ์ของอัตราการไหลดังรูปที่ 9 กราฟมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำไม่คงที่เมื่อความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 20 กิโลปาสคาล ก่อนที่อัตราการไหลของน้ำจะเริ่มกลับมาคงที่เมื่อความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 50 กิโลปาสคาลและมีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำคงที่

พิจารณาลักษณะตัวอย่างกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างทรายที่ความดันต่าง ๆ พบว่าช่วงที่ตัวอย่างทรายถูกดันออกมามากในช่วงความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 30 กิโลปาสคาล กราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงคือเริ่มมีความชันของกราฟที่สูงมากขึ้น แล้วความชันจะลดลงในช่วงความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 40 กิโลปาสคาลและมีความชันคงที่จนจบการทดลอง

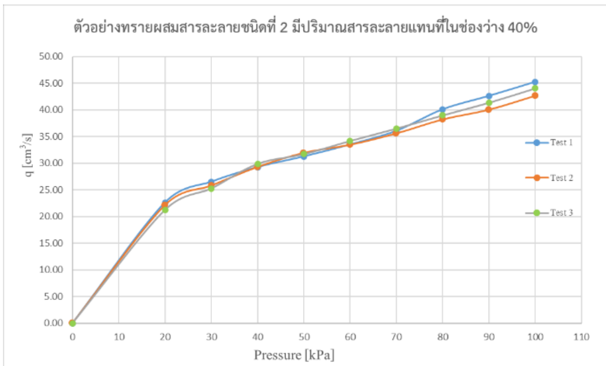
เมื่อลากเส้นสัมผัสกราฟของทั้ง 2 ช่วงความเปลี่ยนแปลงของกราฟจะได้จุดตัดซึ่งคาดว่าเป็นจุดที่ตัวอย่างทรายการเกิดการพัง สามารถสรุปผลการทดลองของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% จะพังลงที่ผลต่างของความดันจากเรกูเลเตอร์ที่ 30, 30 และ 30 กิโลปาสคาล จากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

4.4 ตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40%



รูปที่ 10 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40%

จากรูปที่ 10 สภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% คือมีช่วงที่ทรายถูกดันออกจากท่อภายในอุปกรณ์ทดสอบเป็นระยะที่มากจนสามารถเห็นได้ชัดคือเมื่อความดันที่เรกูเรเตอร์เป็น 30 กิโลปาสคาล และขณะเดียวกันก็เกิดฟองอากาศจำนวนมากออกมาจากตัวอย่างทราย ซึ่งหลังจากนั้นพบว่าเมื่อปรับความดันที่เรกูเลเตอร์เพิ่มขึ้นตัวอย่างทรายจะถูกดันออกพร้อมกับที่ส่วนปลายสุดของตัวอย่างจะค่อยๆแตกออกไปด้วย แตกต่างกับตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% ที่จะไม่มีการแตกออกของตัวอย่างทรายจนกระทั่งทรายหลุดลงพื้นกล่อง ทั้งยังพบอีกว่าเมื่อความดันที่เรกูเลเตอร์เป็น 50 กิโลปาสคาล ตัวอย่างทรายจะถูกดันจนหลุดลงพื้นกล่องแล้ว

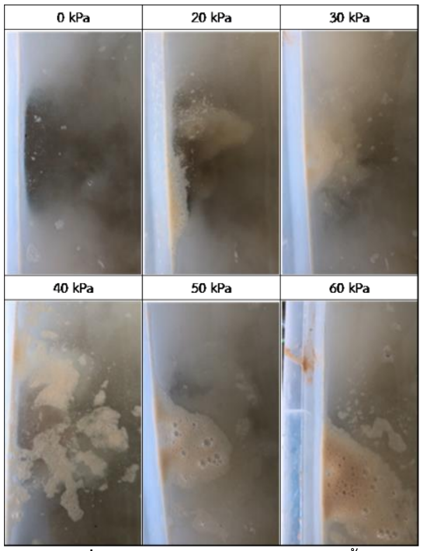


รูปที่ 11 กราฟแสดงอัตราการไหลของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40%

เมื่อพิจารณากราฟจากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าในช่วง 20 -30 กิโลปาสคาล มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเกิดขึ้น ก่อนจะกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ที่ความดันของเรกูเลเตอร์เป็น 40 กิโลปาสคาล สอดคล้องกับสภาพทรายที่สังเกตได้

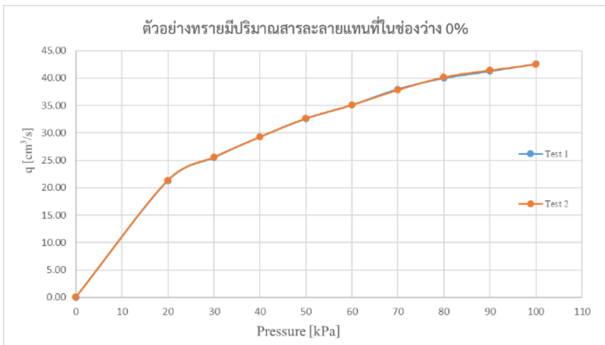
จากกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและความดันของการทดลองแต่ละครั้ง สามารถสรุปผลการทดลองของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% จะพังลงที่ผลต่างของความดันจากเรกูเลเตอร์ที่ 22, 23 และ 23 กิโลปาสคาล จากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่าตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80%

4.5 ผลการทดสอบของตัวอย่างทรายผสมน้ำ (สารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0%)



รูปที่ 12 สภาพของตัวอย่างทรายผสมน้ำ (ปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0%)

จากรูปที่ 12 สภาพของตัวอย่างทรายผสมน้ำ เป็นตัวแทนของตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0% ก่อนเริ่มการทดสอบทรายในท่อภายในอุปกรณ์ทดสอบค่อยๆ ไหลลงสู่พื้นกล่อง เมื่อปรับความดันที่เรกูเลเตอร์ให้เพิ่มขึ้น จะเห็นเพียงฝุ่นทรายลอยฟุ้งอยู่ในน้ำภายในอุปกรณ์ทดสอบ



รูปที่ 13 กราฟแสดงอัตราการไหลของตัวอย่างทรายผสมน้ำ (ปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0%)

พิจารณาสภาพของตัวอย่างทรายกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างทราย พบว่าช่วงที่ทรายเกิดการเปลี่ยนแปลงคือช่วงระหว่าง 0 - 20 กิโลปาสคาล ซึ่งตรงกับช่วงเริ่มการทดสอบที่ทรายเริ่มไหลออกจากท่อภายในอุปกรณ์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างทรายผสมน้ำจะพังลงที่ผลต่างของความดันจากเรกูเลเตอร์ที่ 0 กิโลปาสคาลทั้ง 2 ตัวอย่าง

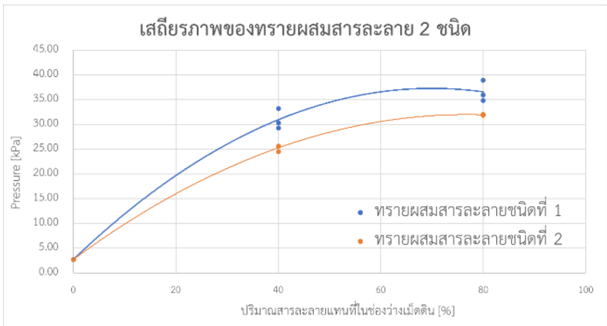
4.6 การอภิปรายผลเสถียรภาพของหลุมเจาะที่เป็นผลมาจากสารละลาย

ในขั้นตอนการปรับความดันที่เรกูเลเตอร์เพิ่มสูงขึ้น น้ำภายในอุปกรณ์สร้างแรงดันก็จะถูกดันผ่านตัวอย่างทรายผสมสารละลายด้วย ซึ่งผลของระดับน้ำภายในอุปกรณ์ทดสอบนั้นส่งผลต่อค่าผลต่างของความดันการพังของทราย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ความดันจากผลต่างของความสูง

ตารางที่ 3 ผลต่างความดันที่ตัวอย่างทรายพังจากการปรับแก้ผลจากความสูง

ตัวอย่าง	การทดสอบ	ผลต่างความดันจากกราฟขณะที่ตัวอย่างเกิดการพัง	ระดับน้ำใน Chamber	ระดับน้ำในถัง	ความดันเมื่อปรับแก้ผลต่างความสูง
		[kPa]	[cm]	[cm]	[kPa]
ทรายที่มีปริมาณสารละลายชนิดที่ 1 แทนที่ในช่องว่าง 80%	ครั้งที่ 1	37	50	30	38.96
	ครั้งที่ 2	34	49.5	30	35.91
	ครั้งที่ 3	33	49	30	34.86
ทรายที่มีปริมาณสารละลายชนิดที่ 1 แทนที่ในช่องว่าง 40%	ครั้งที่ 1	27	53	30	29.25
	ครั้งที่ 2	31	53	30	33.25
	ครั้งที่ 3	28	54	30	30.35
ทรายที่มีปริมาณสารละลายชนิดที่ 2 แทนที่ในช่องว่าง 80%	ครั้งที่ 1	30	50.5	30	32.01
	ครั้งที่ 2	30	48.5	30	31.81
	ครั้งที่ 3	30	50.5	30	32.01
ทรายที่มีปริมาณสารละลายชนิดที่ 2 แทนที่ในช่องว่าง 40%	ครั้งที่ 1	22	56	30	24.54
	ครั้งที่ 2	23	57	30	25.64
	ครั้งที่ 3	23	57	30	25.64
ทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่าง 0%	ครั้งที่ 1	0	58	30	2.74
	ครั้งที่ 2	0	58	30	2.74

จากผลต่างความดันที่ตัวอย่างทรายพังโดยผ่านการปรับแก้ผลของความสูง สามารถนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ของความดันที่ตัวอย่างทรายพังกับร้อยละของปริมาณสารละลายแทนที่ช่องว่างในเม็ดดิน โดยเลือกใช้ผลต่างความดันที่ทรายพังเมื่อมีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0% จากการทดสอบเดียวกัน และใช้ผลต่างความดันที่ทรายพังเมื่อมีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% และ 80% จากผลการทดสอบของตัวอย่างทรายผสมสารละลายแต่ละชนิด



รูปที่ 14 เสถียรภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายทั้ง 2 ชนิด

พิจารณาตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0% หรือตัวอย่างทรายผสมน้ำจะพบว่าผลต่างของความดันที่ทำให้เกิดการพังทลายของตัวอย่างทรายนั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งมีผลมาจากผลต่างของความดันที่มาจากความสูงเท่านั้น ทำให้สามารถอภิปรายได้ว่า น้ำไม่มีความสามารถในการช่วยรักษาเสถียรภาพของหลุม

เมื่อเปรียบเทียบผลต่างความดันที่ตัวอย่างทรายพังจากผลของสารละลายทั้ง 2 ชนิด จะพบตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% มีผลต่างความดันที่ทำให้เกิดการพังมากที่สุด และตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% และ 0% มีค่าลดลงตามลำดับ สามารถอภิปรายผลได้ว่า สารละลายทั้งสองชนิดเมื่อแทนที่ในช่องว่างในเม็ดดินมากขึ้นก็จะทำให้ตัวอย่างทรายมีความแข็งแรงมากขึ้น ต้องใช้ผลต่างความดันมากขึ้นเพื่อทำให้ตัวอย่างทรายเกิดการพังทลาย ทำให้สามารถสรุปได้ว่า สารละลายทั้งสองชนิดมีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

จากตารางที่ 2 สารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) มีการลดปริมาณพอลิเมอร์จากสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) ลงเหลือครึ่งหนึ่งคือ 0.4 กรัมเหลือ 0.2 กรัมต่อปริมาณน้ำที่ 1000 ลูกบาศก์มิลลิลิตร และเพิ่มนาโนพอลิเมอร์เข้าไปจำนวน 0.16 กรัม และจากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อลดปริมาณพอลิเมอร์ในสารละลายลง จะทำให้ผลต่างของความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลง เสถียรภาพของหลุมมีค่าลดลง ทำให้สามารถอภิปรายได้ว่าสารพอลิเมอร์สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่าสารนาโนพอลิเมอร์ตามสัดส่วนสารละลายที่ใช้ในการทดลองคือนาโนพอลิเมอร์ 0.16 กรัม แทนที่พอลิเมอร์ 0.2 กรัม และเมื่อพิจารณาจากสภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่ถูกดันออกจากอุปกรณ์ดังรูปที่ 8 จะพบว่าตัวอย่างทรายมีพฤติกรรมเกาะกันเป็นก้อนและมีการหลุดร่อนน้อย ทำให้สามารถอภิปรายได้ว่า สารนาโนพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายชนิดที่สองมีคุณสมบัติเพิ่มความยึดเกาะกันของอนุภาคทรายหรือเรียกได้ว่ามีคุณสมบัติในการเพิ่มค่า c (cohesion) ให้กับทราย

จากรูปที่ 14 การเปรียบเทียบการรักษาเสถียรภาพจากสาระละลายทั้ง 2 ชนิด จะพบว่าผลจากสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) มีค่ามากกว่าสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ทั้ง 2 ช่วงคือที่ปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 40% และ 80% จึงสามารถอภิปรายได้ว่าสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของของหลุมเจาะได้ดีกว่าสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์)

5. สรุปผลการศึกษา

จากการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของหลุมเจาะและการศึกษาเสถียรภาพของหลุมเจาะที่เป็นผลมาจากสารละลายจากการทดสอบตัวอย่างทรายที่ออกแบบให้มีกระจายของขนาดเม็ดดินใกล้เคียงกับทรายที่เก็บได้จากชั้นทรายที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้สารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) และสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

อุปกรณ์ทดสอบเพื่อใช้ในการศึกษาเสถียรภาพของหลุมเจาะที่ทางได้พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถนำมาใช้ประเมินความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของตัวอย่างทรายที่ผสมสารละลายพยุงหลุมเจาะต่าง ๆ ได้ และสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของตัวอย่างทรายที่มีผลมาจากสารละลายต่างชนิดกันได้ โดยค่าที่สามารถวัดได้เป็นเพียงแนวโน้มเท่านั้น

จากการศึกษาเสถียรภาพของหลุมเจาะที่เป็นผลมาจากสารละลาย เมื่อพิจารณาจากอัตราการไหลของน้ำที่ดันผ่านตัวอย่างทรายและผลต่างของความดันที่ทำให้เกิดการพังทลายพบว่า ตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 0% มีผลต่างของความดันที่ทำให้เกิด

การพังทลายของตัวอย่างทรายนั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งมีผลมาจากผลต่างของความดันที่มาจากความสูงเท่านั้น สามารถอธิบายได้ว่า น้ำไม่มีความสามารถในการช่วยรักษาเสถียรภาพของหลุม

ตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% และ 40% มีค่าผลต่างความดันที่ตัวอย่างทรายพังลดลงตามลำดับโดยผลต่างความดันของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) มีค่ามากกว่ากับตัวอย่างผสมสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์) ดังรูปที่ 14 สามารถสรุปได้ว่าสารละลายชนิดที่ 1 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์) มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของของหลุมเจาะได้ดีกว่าสารละลายชนิดที่ 2 (สารละลายเบนโทไนท์ผสมพอลิเมอร์และนาโนพอลิเมอร์)

จากการพิจารณาสภาพของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ตัวอย่างทรายมีพฤติกรรมเกาะกันเป็นก้อนและมีการหลุดร่อนน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากสารนาโนพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายชนิดที่สองมีคุณสมบัติเพิ่มความยึดเกาะกันของอนุภาคทรายหรือเรียกได้ว่ามีคุณสมบัติในการเพิ่มค่า c (cohesion) ให้กับทราย

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 อุปกรณ์ทดสอบทำจากท่อพีวีซีและกล่องพลาสติก จึงไม่สามารถจำลองความหนาแน่นของทรายตัวอย่างได้เท่ากับสภาพทรายในธรรมชาติ เนื่องจากข้อจำกัดด้านความแข็งแรงของอุปกรณ์ทดสอบและความสามารถในการบดอัด

6.2 การจำลองสภาพหลุมเจาะควรเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำให้มีทิศไหลจากกล่องพลาสติกเข้าสู่ท่อพีวีซีแทนเพื่อจำลองให้เหมือนสภาพจริงของหลุมเจาะที่แรงดันน้ำมาจากความสูงของสารละลายภายในหลุมและดันออกผ่านดินบริเวณรอบข้าง

6.3 ควรใช้อุปกรณ์ในการอ่านค่าความดันที่มีความละเอียดมากกว่า 10 kPa เพื่อให้สามารถวัดผลการทดสอบในตัวอย่างทรายที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ 0% ได้แม่นยำมากขึ้น

6.4 การพังทลายของตัวอย่างทรายจากท่อภายในอุปกรณ์ทดสอบซึ่งทำมาจากท่อพีวีซีนั้น อาจจะได้รับผลกระทบในเรื่องแรงเสียดทานระหว่างผิวท่อและตัวอย่างทราย ทำให้เกิดการที่ตัวอย่างทรายถูกดันออกจากท่อเพราะแรงเสียดทานไม่เพียงพอ สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดลองของตัวอย่างทรายผสมสารละลายชนิดที่ 2 ที่มีปริมาณสารละลายแทนที่ในช่องว่างเม็ดดิน 80% ดังรูปที่ 8 โดยสามารถแก้ไขและพัฒนาอุปกรณ์ คือ

1) เพิ่มความยาวส่วนท่อให้มีความยาวมากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างทรายและอุปกรณ์ เพื่อทำให้มีแรงเสียดทานมากขึ้น

2) ทำการออกแบบอุปกรณ์ให้บริเวณตัวอย่างทรายที่ถูกดันออกให้ตัวอย่างทรายนั้นถูกเฉือนในแนวรอยต่อทรายกับทรายแทนที่จะเป็นการเฉือนระหว่างทรายและท่อพีวีซี

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และสามารถนำไปใช้ในการทำงานในอนาคต

ขอขอบคุณ ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาส ที่สละเวลาช่วยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะของการทำปริญญานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายเบญจพล เบญจวรางกูล ที่ได้สละเวลาให้การช่วยเหลือตลอดการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ณรงค์ ทัศนนิพนธ์, บ. ซ. จ. (2543). Thai Standardization of the Construction of Wet Process Bored Piles in Line with Global Standards. *การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2543.*

[2] ณรงค์, & และคณะ. (2542). Performance of Bentonite Bored Piles Constructed in Bangkok Subsoil. *การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2542.*

[3] ณรงค์, & และคณะ. (2543). EFFECTS OF CONSTRUCTION TIME AND BENTONITE SLURRY VISCOSITY ON THE SHAFT CAPACITY OF BORED PILES. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7.*

[4] ซอว์ ซอว์ เอย์,กลม สิงโตแก้ว,ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. (2545). APPLICATION OF POLYMER-BASED SLURRY FOR WET PROCESS BORED PILES CONSTRUCTION IN MULTI-LAYERED SOIL OF BANGKOK. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8.*

[5] วุฒิชัย ชื่นหิรัญ. PERFORMANCE OF BORED POLE USING POLYMER BASE SLURRY IN BANGKOK SUBSOILS. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2551.

[6] กฤติน ศันสนะกุล. Seepage behavior and effort polymer on soils around borehole wall of bored piles. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2561.

[7] ธยานันท์ บุณยรักษ์. Behavior of Polymer Slurry for wet-process bored pile construction in bangkok subsoils. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,กรุงเทพฯ, 2544.

[8] ธัญญ์นลิน วิญญูประสิทธิ์, ย. ส., น้ำผึ้ง รุ่งเรือง (2560). “นาโนเซลลูโลส: การประยุกต์ใช้ใน อาหาร และความปลอดภัย.” วารสารพิษวิทยาไทย: 67-79.

[9] Dufresne, A. (2013). Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. The international School of Paper, Grenoble Institute of Technology (Grenoble INP).