การศึกษาการเสริมกำลังของผนังหลุมเจาะด้วยสารละลายนาโนพอลิเมอร์
The study of nanopolymer slurry for borehole wall strengthening

จิตรภณ ปรัชญาจุฑา และ วัชรวิทย์ จันทร์หอม และ อ.ดร. วีรยุทธ โกมลวิลาศ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารสูงในเขตกรุงเทพมหานครมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องก่อสร้างฐานรากเสาเข็มที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาคารสูงเหล่านี้ล้วนจำเป็นต้องก่อสร้างฐานรากโดยการใช้เสาเข็มเจาะระบบเปียก เนื่องจากไม่สามารถทำการตอกเสาเข็มลงไปในชั้นดินแข็งได้ เพราะจะทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนรบกวนอาคารข้างเคียง และที่สำคัญชั้นดินของกรุงเทพมหานครมีชั้นดินทรายแทรกอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการรักษาเสถียรภาพและเสริมกำลังของผนังหลุมเจาะด้วยสารละลาย ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทพีเอชพีเอ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอสารละลายชนิดใหม่เพื่อเสริมกำลังผนังหลุมเจาะที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย ได้แก่ สารละลายนาโนพอลิเมอร์ ซึ่งผลิตได้จากกากใยธรรมชาติ โดยผู้วิจัยได้ทำการประดิษฐ์เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการเสริมกำลังของทรายด้วยสารละลายนาโนพอลิเมอร์และทำการเปรียบเทียบกับกำลังของทรายเมื่อผสมน้ำเปล่า ผลการทดสอบพบว่าดินทรายที่ผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ มีค่ากำลังที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายผสมน้ำเปล่า

คำสำคัญ: สารละลายนาโนพอลิเมอร์, สารละลายพอลิเมอร์, ผนังหลุมเจาะ, เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง

Abstract

Nowadays, Bangkok has dramatically tended to increase construction of high-rises buildings or skyscrapers in response to concentrated population. In order to, construct the high-rise building will require longer pile and use wet-process bored piles to pile over hard soil layer to support frequently of payloads and does not disturb the surrounding area during construction, in terms of noise occurred or harmonic vibration. Hence, the wet-process bored pile is pervasively used. Regardless, the Bangkok soil layer also consists of a sand layer. For this process, a slurry serves to support buoyancy the stability of the borehole which is currently being used "PHPA Synthetic Polymer Slurry." To improve the slurry was found that an alternative type of slurry expected to demonstrate the identical ability as polymer slurry which is called "Nanopolymer", which can generate in Thailand. In doing this experiment, "Direct Shear apparatus" has been created to evaluate the strength of sand when mixed with nanopolymer slurry and compared with the strength of sand when mixed with water. As a result, indicate the strength of sand, when mixed with nanopolymer slurry, utilizes more significant strength compared to the strength of sand mixed with water. However, the self-Direct Shear apparatus shall accurately predict the strength of sand when mixing any slurry besides, receive a low accuracy parameter of the sand.

Keywords: nanopolymer slurry, polymer slurry, borehole wall, direct shear apparatus

1. บทนำ

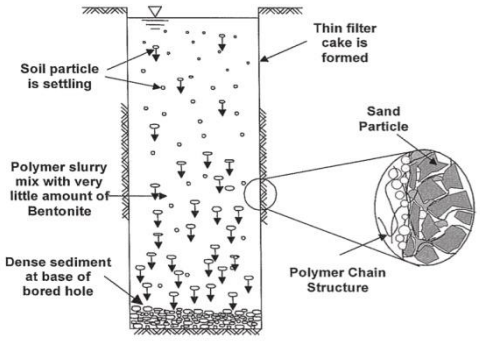
ปัจจุบันเสาเข็มเจาะระบบเปียก (Wet-Process Bored Pile) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร เนื่องจากเสาเข็มแต่ละต้นสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดถึง 2,000 ตัน สำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกนี้ จะมีสารละลายใช้ในการรักษาเสถียรภาพของผนังหลุมเจาะในอดีตที่เป็นที่นิยม ได้แก่ สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) แต่ปัจจุบันได้เปลี่ยนมาเป็นสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Slurry) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารละลายเบนโทไนท์เป็นอย่างมาก กล่าวคือทำให้กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะทั้งการรับกำลังที่ปลายเสาเข็ม และการรับกำลังด้านข้างของเสาเข็มมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้สารแขวนลอยภายในหลุมเจาะตกตะกอน จึงทำให้สารละลายพอลิเมอร์ไม่ต้องผ่านเครื่องกรองทราย (Desander) ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้มาก

อย่างไรก็ตามผงพอลิเมอร์และผงเบนโทไนท์ดังกล่าว ต้องทำการนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอสารละลายนาโนพอลิเมอร์ (Nanopolymer slurry) ที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย เพื่อช่วยลดการนำเข้าของผงพอลิเมอร์และผงเบนโทไนท์ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตจากกากใยธรรมชาติ เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณการใช้ผงพอลิเมอร์เดิมโดยการทดแทนด้วยสารละลายนาโนพอลิเมอร์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลกระทบของสารละลายนาโนพอลิเมอร์ในการเสริมกำลังของผนังหลุมเจาะด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่จากสถานการณ์โลกในปัจจุบันเกิดวิกฤตไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 ส่งผลให้ไม่สามารถดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยได้ ดังนั้นข้าพเจ้าจึงได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะขึ้น ซึ่งนำหลักการของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) มาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบดังกล่าว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมของสารละลายพอลิเมอร์ในการรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ

สารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Slurry) จะประกอบด้วยผงเบนโทไนท์ และผงพอลิเมอร์ ซึ่งเบนโทไนท์ที่ผสมลงไป จะทำให้เกิดเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ขึ้นในชั้นทราย เพื่อลดการสูญเสียของสารละลาย (Fluid Loss) ในปริมาณที่มากเกินไป ส่วนพอลิเมอร์จะเข้าไประหว่างเม็ดดินเพื่อช่วยยึดดินเข้าด้วยกัน ทำให้ดินสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวชั่วคราว อีกทั้งจะทำให้ดินเม็ดละเอียด จำพวกทรายละเอียดหรือทรายแป้งจับตัวรวมกันทำให้เกิดการตกตะกอนลงสู่ก้นหลุม (ธยานันท์, 2544) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พฤติกรรมของสารละลายพอลิเมอร์ในหลุมเจาะ (ธยานันท์, 2544)

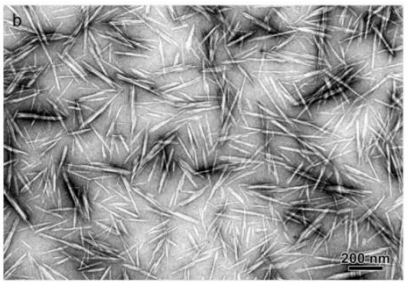
2.2 สารละลายที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ

ในปัจจุบันการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะจะใช้สารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Slurry) แทนที่การใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) เนื่องจากสามารถลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากสารละลายเบนโทไนท์ อาทิเช่น กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มดีขึ้น ลดความสิ้นเปลืองของคอนกรีตในการเผื่อระยะการตัดหัวเสาเข็ม เป็นต้น โดยสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานขุดเจาะมี 2 ประเภท (ธยานันท์, 2544) คือ

1.พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Organic Polymer)

2.พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer)

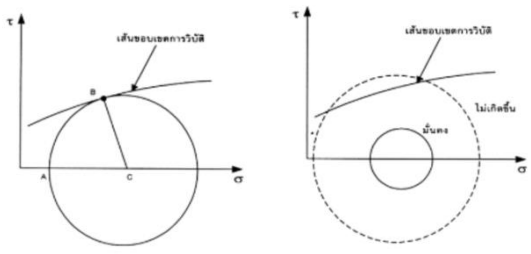
สำหรับสารละลายใหม่ที่ใช้ทดสอบในการวิจัยนี้ คือ นาโนพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีขนาดเส้นใยอยู่ในระดับนาโน สำหรับนาโนพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเป็นชนิด Nanocrystals หรือ Nanocrystalline โดยลักษณะพอลิเมอร์จะมีลักษณะรูปทรงคล้ายเข็ม (Needle shape) ตามรูปที่ 2 ซึ่งสกัดโดยใช้สารเคมีประเภทกรด เช่น กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) กรดไฮดรอคลอริก (Hydrochloric acid) เป็นต้น โดยกรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยาตรงส่วนอสัณฐานเพื่อให้คงเหลือแต่ส่วนผลึก นาโนพอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยระหว่าง 4-25 นาโนเมตร และมีความยาวเฉลี่ย 100-1000 นาโนเมตร อีกทั้งลักษณะผลึกจะมีประจุลบ จึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ซึ่งช่วยในเรื่องการป้องกันการรวมตัวกันของผลึก ทำให้ระบบมีความเสถียร (ธัญญ์นลิน วิญญประสิทธิ์และคณะ, 2560)



รูปที่ 2 รูปขยายของสารนาโนพอลิเมอร์ (Alain Dufresne, 2013)

2.3 การทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear) เพื่อหากำลังรับแรงเฉือนของดิน

การวิบัติของมวลดินมักมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับกฎการวิบัติที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (Mohr and Coulomb) ซึ่งกำหนดไว้ว่า มวลดินจะเริ่มการวิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelop) พอดีดังรูปที่ 3(ก) แต่หากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการวิบัติมวลดินก็ยังสามารถรับแรงได้ไม่วิบัติดังรูปที่ 3(ข) (รัชพล, 2557)



(ก) (ข)

รูปที่ 3 เงื่อนไขการวิบัติของมวลดินที่เสนอโดยมอร์และคูลอมบ์ (วิศิษฐ์,2540)

การทดสอบแรงเฉือนแบบตรง มีวิธีการทดสอบหลัก 2 ชนิด คือ

1.แบบควบคุมความเค้น (Stress Control) จะเป็นวิธีเพิ่มแรงเฉือนที่กระทำต่อตัวอย่างด้วยอัตราคงที่ที่ต้องการ วิธีนี้จะค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องเพิ่มอัตราแรงเฉือนครั้งละน้อยๆ และใช้การทดสอบเวลานาน

2.แบบควบคุมความเครียด (Strain Control) จะเป็นวิธีการเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราเร็วที่กำหนด แรงต้านของตัวอย่างจะวัดด้วยแหวนวัดแรง (Proving Ring) จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการ

2.4 การตรวจสอบและมาตรฐานของสารละลายที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะระบบเปียก

การตรวจสอบคุณสมบัติของสารละลายถือเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากเมื่อคุณสมบัติของสารละลายเปลี่ยนไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะทำได้ลดน้อยลง การทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในการขุดดินมีประสิทธิภาพน้อยลง รวมถึงสภาวะที่เหมาะสมกับการพัฒนากำลังของคอนกรีต และกำลังการรับน้ำหนักทั้งหมดของเสาเข็ม โดยมาตรฐานที่เป็นตัวกำหนดถึงคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ คือ มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) ซึ่งมีรายละเอียดกำหนดดังแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติของเหลวพยุงเสถียรภาพหลุมเจาะ (มาตรฐาน วสท., 2561)

คุณสมบัติที่ต้องทดสอบ	วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	API RP 13 Section	ทดสอบคุณสมบัติที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	
			เมื่อเติมลงในหลุมเจาะ	ตัวอย่างเก็บจากก้นหลุมเจาะก่อนเทคอนกรีต
Density For bentonite For polymer	Mud balance	1	 Maximum 1.10 g/ml Maximum 1.02 g/ml	 Maximum 1.15 g/ml Maximum 1.02 g/ml
Fluid loss (30 minute test) For bentonite and polymer	Low temperature test	3	 Maximum 30 ml	 Maximum 40 ml
Viscosity For bentonite For polymer	Marsh cone test	2	 30 - 45 second 40 - 90* second	 30 - 55 second 40 - 90* second
Sand content For bentonite For polymer	Sand screen	4	 Maximum 3% Maximum 1%	 Maximum 3% Maximum 1%
pH, during excavation For bentonite For polymer	Electric pH meter or lismas paper		 9.5 - 10.8 8 - 10	 9.5 – 11.7 8 - 11

*Or as recommended by manufacturer and approved by Geotechnical Engineer.

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติของสารละลายตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

การทดสอบคุณสมบัติของสารละลาย (Basic properties) ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการทดสอบความหนาแน่น (Density), ความหนืด (Viscosity), และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายนาโนพอลิเมอร์โดยมีอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 4 การทดสอบความหนืด

รูปที่ 5 การทดสอบความหนาแน่น

รูปที่ 6 การทดสอบความเป็นกรด-เบส

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสารละลายนาโนพอลิเมอร์ จะทำการทดสอบ 3 ครั้งในแต่ละคุณสมบัติ พบว่าคุณสมบัติของสารละลาย เป็นไปตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) ที่ได้กำหนดไว้ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารละลายนาโนพอลิเมอร์กับมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

Basic Properties	ขวดที่1	ขวดที่2	ขวดที่3	เฉลี่ย	มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
Density (g/cm^3)	1.01	1.01	1.01	1.01	Maximum 1.02 g/cm^3
Viscosity (s)	69.87	71.02	70.87	70.59	40-90 second
pH	9.43	9.44	9.44	9.44	pH 8-10

3.2 การออกแบบสัดส่วนและการเตรียมสารละลาย

การออกแบบสัดส่วนของสารละลาย จะเป็นการเปลี่ยนส่วนผสมจากสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยเบนไนท์ผสมกับพอลิเมอร์ เป็นสารละลายนาโนพอลิเมอร์ตัวใหม่ที่มีส่วนประกอบเป็นเบนโทไนท์ผสมกับพอลิเมอร์ และนาโนพอลิเมอร์โดยจะใช้นาโนพอลิเมอร์แทนที่ของ พอลิ-เมอร์ ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วนต่างๆของสารเหล่านี้ จะผสมโดยอ้างอิงตามราคาที่เท่ากัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำสัดส่วนสารละลายตัวใหม่นี้ คือ เบนโทไนท์ 12 กรัม : พอลิเมอร์ 0.2 กรัม : นาโนพอลิเมอร์ 0.16 กรัม : น้ำ 1000 กรัม สำหรับสูตรของสารละลายที่นำมาใช้อ้างอิงราคา คือ เบนโทไนท์ 12 กรัม : พอลิเมอร์ 0.4 กรัม : น้ำ 1000 กรัม ซึ่งเป็นสูตรที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

การเตรียมสารละลาย ก่อนทำการทดลองจะผสมสารละลายตามสูตรที่ได้ระบุไว้ข้างต้น โดยจะทำการผสมเบนโทไนท์กับน้ำ ตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์แตกตัวเต็มที่ หลังจากนั้นจึงทำการใส่พอลิเมอร์ และนาโนพอลิเมอร์ลงไปตามสัดส่วนที่กำหนด จะใช้เวลาประมาณ 30 นาทีในการเขย่า เพื่อให้พอลิเมอร์ และนาโนพอลิเมอร์ละลายในน้ำได้เต็มที่ หลังจากนั้นจึงนำไปผสมกับตัวอย่างทรายที่ได้เตรียมไว้

รูปที่ 7 สารนาโนพอลิเมอร์

รูปที่ 8 ผงเบนโทไนท์

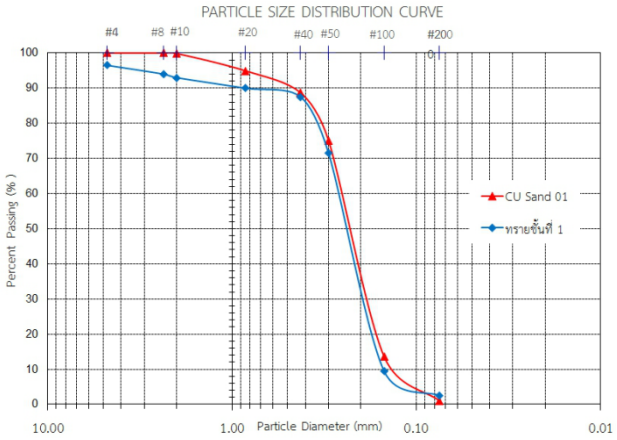
รูปที่ 9 ผงพอลิเมอร์

รูปที่ 10 สารละลายนาโนพอลิเมอร์

3.3 การออกแบบการกระจายขนาดของเม็ดดิน และการเตรียมตัวอย่างดิน

ในการทดลองนี้ จะทำการออกแบบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Soil Gradation) ให้ใกล้เคียงกับการกระจายขนาดของเม็ดดินของทรายชั้นที่1 ในกรุงเทพฯ ที่เก็บขึ้นมาจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสถานีวังบูรพา โดย กฤติน (2561)

เพื่อให้สามารถเตรียมตัวอย่างทรายได้ใกล้เคียงกับทรายชั้นที่1 กรุงเทพฯ การทดลองนี้ได้ทำการนำทราย 4 ขนาด มาผสมกันโดยใช้ทรายขนาด 0.07-0.25 มิลลิเมตร กำหนดเป็นเบอร์ 1, ทรายขนาด 0.4-0.84 มิลลิเมตร กำหนดเป็นเบอร์ 2, ทรายขนาด 0.84-2.38 มิลลิเมตร กำหนดเป็นเบอร์ 3 และฝุ่นทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร กำหนดเป็นเบอร์ 4 โดยพบว่าสัดส่วนเมื่อผสมกันแล้วใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายของขนาดเม็ดดินของทรายชั้นที่1 กรุงเทพมหานคร คือ ทรายเบอร์1 80% : ทรายเบอร์2 5% : ทรายเบอร์3 5% : ทรายเบอร์4 10% ซึ่งกำหนดสัดส่วนดังกล่าวให้เป็นชื่อ CU Sand 01 และได้ทำการ Sieve Analysis ทรายที่ผสมด้วยสัดส่วนที่กำหนด เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของขนาดเม็ดดินเมื่อผสมทรายตามสัดส่วนที่ออกแบบกับลักษณะการกระจายของขนาดเม็ดดินของทรายชั้นที่1 กรุงเทพมหานคร (กฤติน, 2561) พบว่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบ Sieve Analysis ของ CU Sand 01 และ Sieve Analysis ของตัวอย่างทรายชั้นที่1 ในกรุงเทพมหานคร

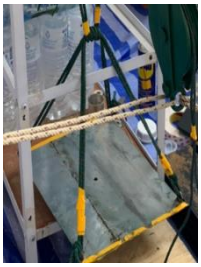
3.4 การทดสอบกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะโดยเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

การทดสอบกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะโดยเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเอง ได้ทำการทดสอบตัวอย่างทรายผสมน้ำเปล่า โดยทดสอบที่ Normal load 4 กิโลกรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง, ทดสอบที่ Normal load 7 กิโลกรัม จำนวน 9 ตัวอย่าง และทดสอบที่ Normal load 12 กิโลกรัม จำนวน 5 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างของทรายผสมน้ำทั้งหมด 17 ตัวอย่าง และได้ทำการทดสอบตัวอย่างทรายผสมสารละลายนาโนพอลิเมอร์โดยทดสอบที่ Normal load 4 กิโลกรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง, ทดสอบที่ Normal load 7 กิโลกรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง และทดสอบที่ Normal load 12 กิโลกรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างการทดสอบของทรายผสมสารละลายนาโนพอลิเมอร์ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง

3.4.1 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการประดิษฐ์

รูปที่ 12 แผ่นอะคริลิค และลูกปืนขนาด 3.96 mm

รูปที่ 13 รอก



รูปที่ 14 แผ่นเหล็กขนาด 60 cm x 60 cm

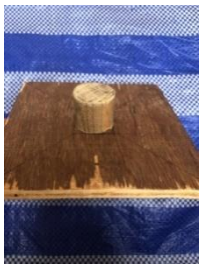
รูปที่ 15 แป้นถ่ายน้ำหนักลงทราย

รูปที่ 16 ลูกเหล็กขนาด 10 kg 4 แผ่น

รูปที่ 17 ถังน้ำขนาด 20 kg

รูปที่ 18 ถังน้ำขนาด 5 kg

รูปที่ 19 ถังน้ำขนาด 2 kg



รูปที่ 20 แป้นไม้ที่ใช้บดอัดทราย

รูปที่ 21 ระดับน้ำ

3.4.2 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

- วางแผ่นอะคริลิคทั้ง 2 แผ่นประกบติดกัน แผ่นล่างถูกยึดนิ่งไว้กับโต๊ะ ใส่ลูกปืนเพื่อป้องกันการเสียดสีของอะคริลิค ส่วนแผ่นบนจะทำการร้อยเชือกผ่านรูที่ได้เจาะไว้ โดยเชือกดังกล่าวจะไปคล้องผ่านรอกที่ถูกยึดกับเพดาน ดังแสดงตามรูปที่ 22
- นำทรายที่ผสมกับสารละลายแล้ว ใส่ลงในอะคริลิค จากนั้นวางเหล็กที่ติดกับไม้อัดทรงกระบอกซึ่งใช้เป็นแป้นกดน้ำหนักลงบนทราย แล้วจึงถ่วงด้วยแผ่นเหล็กด้านล่าง โดยน้ำหนักจากแผ่นเหล็กจะถ่ายผ่านแป้นกดทรายดังกล่าวไปยังตัวทรายที่อยู่ภายในอะครีลิค ดังแสดงตามรูปที่ 23
- การเฉือนจะถ่วงเชือกที่ร้อยกับรูอะคริลิคด้วยถังน้ำ เปิดน้ำใส่ด้วยอัตราการไหลที่คงที่ แผ่นอะคริลิคบนจะถูกดึงเฉือนไปเรื่อยๆ จนขาด จดข้อมูลต่างๆ ระหว่างการเฉือน

รูปที่ 22 Top view ของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

รูปที่ 23 Side view ของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

รูปที่ 24 แผ่นอะครีลิค และแป้นถ่ายน้ำหนักลง

รูปที่ 25 การวัดระดับน้ำของเชือกระหว่างอะคริลิคและรอก

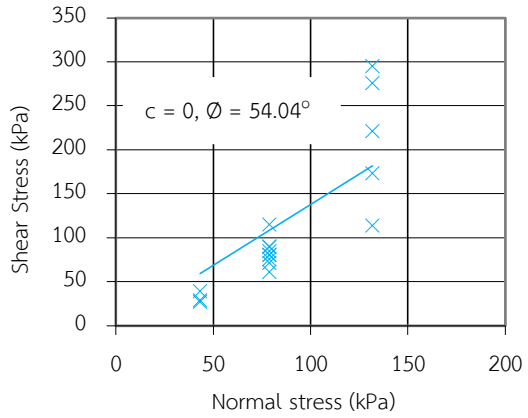
3.4.3 วิธีการทดสอบกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะโดยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

1. เตรียมสารละลายตามสัดส่วนที่กำหนดในข้อ 3.2
2. เตรียมตัวอย่างทรายตามสัดส่วนที่กำหนดในข้อ 3.3
3. ทำการผสมทรายกับสารละลายและทรายกับน้ำอย่างละสูตร ซึ่งแต่ละการผสมจะผสมในสัดส่วนที่ทำให้ดินอิ่มตัวด้วยสารละลาย (Saturated soil) หลังจากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน
4. นำทรายที่ผสมกับสารละลายที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว มาใส่ Shear box โดยจะแบ่งเป็น 3 ชั้น ซึ่งเมื่อใส่เสร็จแต่ละชั้นจะต้องบดอัดแน่น
5. ทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่น (Density) ของทราย 1.8-2.0 t/m^3 ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของทรายชั้นที่1 ในกรุงเทพฯ
6. เริ่มทำการเฉือนตัวอย่างทรายที่บดอัดดังกล่าวโดยการเปิดน้ำเติมเข้าในถังน้ำเรื่อยๆและควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่
7. ระหว่างขั้นตอนการเฉือน ทำการวัดระดับ Horizontal Displacement ของทรายที่ถูกเฉือนโดยจดค่าทุก 30 วินาที จนเฉือนเสร็จ
8. เมื่อตัวอย่างทรายถูกเฉือนเสร็จ ทำการปิดน้ำทันที ชั่งน้ำหนักถังน้ำดังกล่าวเพื่อนำไปใช้คำนวณหา อัตราการไหลของน้ำ และ Shear stress ต่อไป

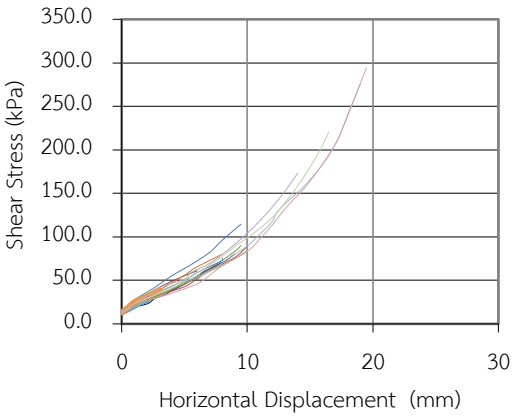
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาตัวอย่างทรายผสมน้ำเปล่า

การทดสอบตัวอย่างชนิดแรก จะเป็นการทดสอบตัวอย่างทรายผสมกับน้ำเปล่า โดยจะทำการทดสอบที่ Normal load 4 กิโลกรัม, 7 กิโลกรัม และ12 กิโลกรัม ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 26 และ 27 ดังนี้

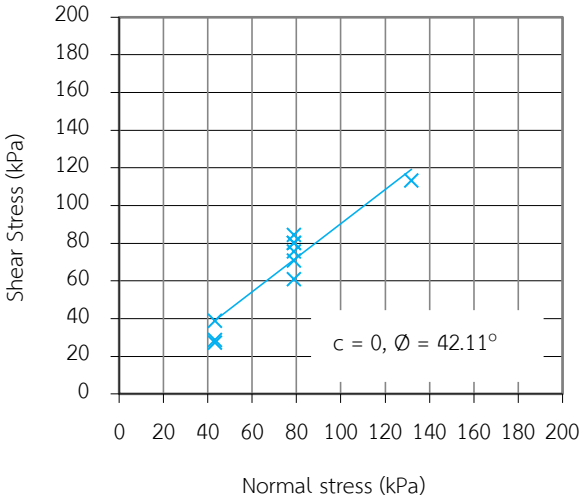


รูปที่ 26 หน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Max Shear Stress) และ หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง (Normal Stress) ของทรายผสมกับน้ำเปล่ารวมทุกการทดสอบ



รูปที่ 27 หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) กับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน (Horizontal Displacement) ของทรายผสมกับน้ำเปล่ารวมทุกการทดสอบ

จากรูปที่ 26 พบว่าได้ค่า Cohesion (c) = 0 และ Friction angle (Ø) = 54.04° ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองนี้มีค่าสูงกว่าทรายปกติ มากเกินความเป็นจริง ทั้งนี้จากการทดลองจริงพบว่าในระหว่างที่ทำการเฉือนตัวอย่างทรายนั้น ปรากฏว่าแผ่นอะคริลิคมีการติดกันบางส่วน ซึ่งสมมติฐานที่คาดว่าทำให้ได้ค่า Ø ที่มากเกินความเป็นจริงนั้นเกิดจากเหตุผลข้างต้น กล่าวคือ แรงเสียดทานระหว่างอะคริลิคทำให้ค่า Ø ที่ได้จากการทดสอบเฉือนตัวอย่างทรายมีค่าที่มากขึ้น เมื่อทำการตัดข้อมูลบางส่วนจากการทดสอบ โดยจะตัดข้อมูลจากการทดสอบที่อะคริลิคมีการสัมผัสกันในขณะทำการเฉือน จะได้ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 28

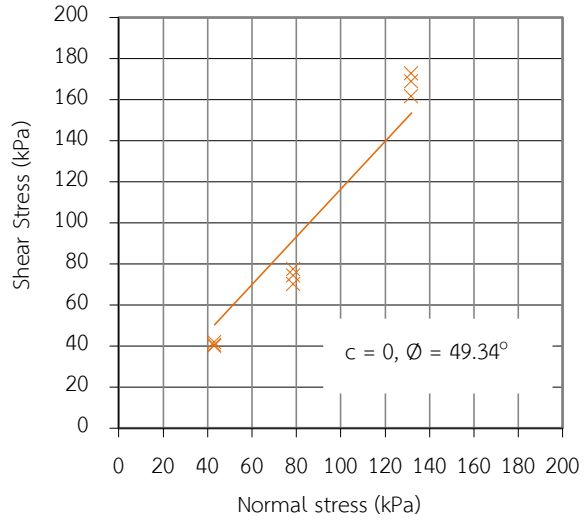


รูปที่ 28 หน่วยแรงเฉือนสูงสุด และหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งของทรายผสมกับน้ำเปล่ารวมทุกการทดสอบ หลังปรับแก้ข้อมูล

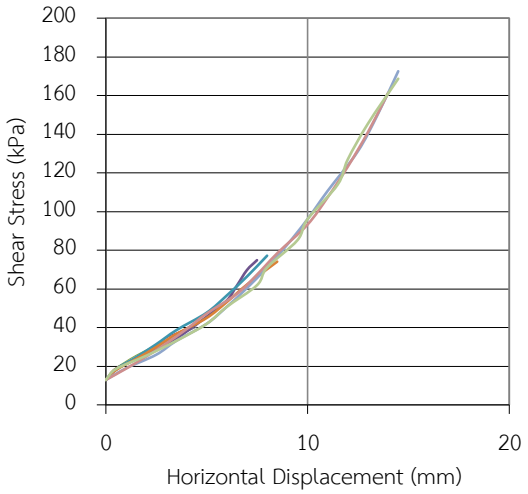
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 28 พบว่าได้ค่า c = 0 และ Ø = 42.11° ซึ่งพบว่าค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าในครั้งแรกที่ยังไม่ได้ปรับข้อมูลที่เกิดจากการติดกันของแผ่นอะคริลิคในระหว่างการเฉือนตัวอย่างทราย

4.2 ผลการศึกษาตัวอย่างทรายผสมสารละลายนาโนพอลิเมอร์

การทดสอบตัวอย่างชนิดที่สอง จะเป็นการทดสอบตัวอย่างทรายผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ โดยจะทำการทดสอบที่ Normal load 4 กิโลกรัม, 7 กิโลกรัม และ12 กิโลกรัม โดยแต่ละ Normal load จะทำทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูป 29 และ 30 ดังนี้

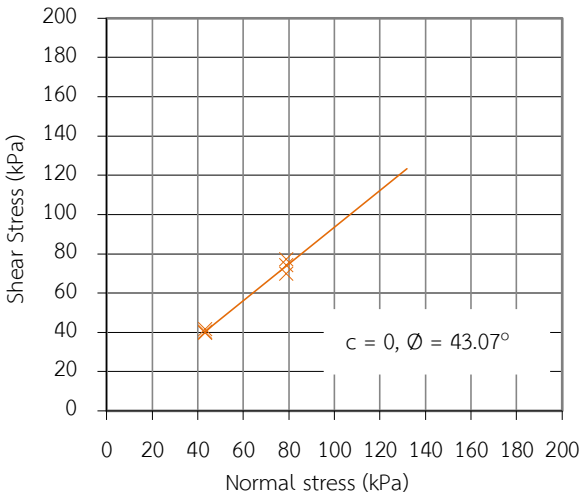


รูปที่ 29 หน่วยแรงเฉือนสูงสุด และหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งของทรายผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์รวมทุกการทดสอบ



รูปที่ 30 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนของทรายผสมกับ สารละลายนาโนพอลิเมอร์รวมทุกการทดสอบ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 29 พบว่าได้ค่า c = 0 และ Ø = 49.34° ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองนี้มีค่าสูงมากเกินปกติ ทั้งนี้จากการทดลองจริงพบว่าในระหว่างที่ทำการเฉือนตัวอย่างทรายนั้น ปรากฏว่าแผ่นอะคริลิคมีการติดกันบางส่วนเหมือนกับในกรณีของทรายผสมน้ำเปล่า ซึ่งอาจทำให้ค่า Ø ที่ได้จากการทดสอบเฉือนตัวอย่างทรายมีค่าที่มากขึ้น เมื่อทำการตัดข้อมูลบางส่วนจากการทดสอบ โดยจะตัดข้อมูลจากการทดสอบที่อะคริลิคมีการสัมผัสกันในขณะทำการเฉือน จะได้ข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ 31

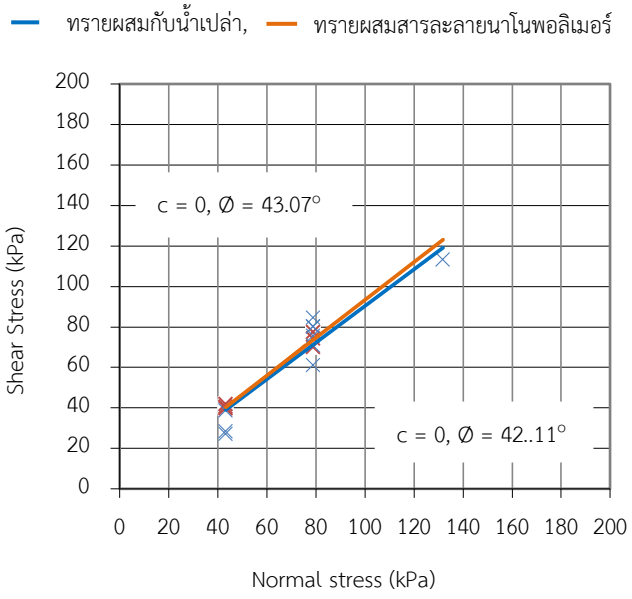


รูปที่ 31 หน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งของทรายผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์รวมทุกการทดสอบ หลังปรับแก้ข้อมูล

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 31 พบว่าได้ค่า c = 0 และ Ø = 43.07° ซึ่งพบว่าค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าในครั้งแรกที่ยังไม่ได้ปรับข้อมูลที่เกิดจากการติดกันของแผ่นอะคริลิคในระหว่างการเฉือนตัวอย่างทราย

4.3 ผลการศึกษาตัวอย่างทรายผสมน้ำ เทียบกับทรายผสมสารละลายนาโนพอลิเมอร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังของทรายระหว่างการผสมทรายกับน้ำเปล่า และกำลังของทราย เนื่องจากการผสมทรายกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ พบว่าค่า Ø ของทรายกับน้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าทรายกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 32



รูปที่ 32 หน่วยแรงเฉือนสูงสุด และ หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง ของทรายผสมกับน้ำ เปรียบเทียบกับทรายผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณารูปที่ 32 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังของทรายในการผสมระหว่างน้ำ และสารละลาย จะได้ว่าค่า Ø ของทรายเมื่อทำการผสมกับน้ำเปล่า มีค่า Ø = 42.11° ในขณะที่ Ø ของทรายเมื่อทำการผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ มีค่า Ø = 43.07° สามารถสรุปได้ว่าสารละลายนาโนพอลิเมอร์ มีคุณสมบัติที่จะช่วยเพิ่มกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะให้ดีขึ้นได้ โดยจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำเสนอโดย ธยานันท์ (2544) ซึ่งกล่าวไว้ว่าในการใช้สารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเบนโทไนท์จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของทรายที่ทดสอบโดยพีนีโตรมิเตอร์แบบพกพามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เกิดจากการที่โครงสร้างของพอลิเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างเม็ดดินทรายและเบนโทไนท์จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อีกทั้งจะไปสร้างเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) โดยพอลิเมอร์จะสามารถเพิ่มกำลังของดินทรายได้สูงขึ้นในกรณีที่ดินชนิดนั้นมีปริมาณดินเม็ดละเอียดที่มากขึ้น

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษา

ตัวอย่างทรายผสมสารละลายนาโนพอลิเมอร์ เมื่อทดสอบผ่านเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองพบว่ามีค่า Ø ที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเปล่า แต่ค่า Ø ที่ได้มีค่ามากถึง 43.07° ซึ่งเป็นค่ามากเกินความเป็นจริงของทรายชั้นที่ 1 ในกรุงเทพฯ ปกติ ที่ควรจะอยู่ในประมาณ 32°-35° (ธยานันท์, 2544) ทั้งนี้เกิดจากการที่เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองนั้นไม่ได้มาตรฐาน และมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก อาจเกิดจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ไม่ได้มาตรฐาน อาทิเช่น รอกที่ใช้เปลี่ยนแนวการดึงจากแนวราบซึ่งติดอยู่กับอะครีลิคแผ่นบน เป็นแนวดิ่งซึ่งติดอยู่กับถังน้ำที่ใช้เพิ่มน้ำหนักเพื่อการเฉือนตัวอย่างทรายมีแรงเสียดทานในตัวรอก และแผ่นอะครีลิคทั้ง 2 แผ่น ติดกันขณะทำการเฉือนในบางครั้ง ซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มแรงเสียดทาน ทำให้ค่า Ø สูงขึ้นกว่าความเป็นจริง

กล่าวโดยสรุป งานวิจัยนี้สามารถนำเสนอสารละลายนาโนพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารละลายตัวใหม่ ที่มีคุณสมบัติเพิ่มกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะ โดยสารละลายนาโนพอลิเมอร์ตัวใหม่นี้เป็นสารละลายที่สามารถผลิตขึ้นในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการนำทรายมาผสมกับสารละลายนาโนพอลิเมอร์ จากนั้นทำการเฉือนผ่านเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเอง กำลังของทรายมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการนำทรายที่ผสมกับน้ำเปล่า มาทำการเฉือนผ่านเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองเช่นกัน ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการที่โครงสร้างของพอลิเมอร์จะเข้าไปเป็นตัวประสานระหว่างเม็ดดินทราย อีกทั้งเบนโทไนท์จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และจะไปสร้างเยื่อบุทึบน้ำ (Filter Cake) ทำให้กำลังของทรายเพิ่มสูงขึ้นตามที่งานวิจัยของ ธยานันท์ (2544)

จึงสรุปได้ว่าสารละลายนาโนพอลิเมอร์สามารถเพิ่มกำลังของดินรอบผนังหลุมเจาะได้ แต่เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองนั้นมีความแม่นยำต่ำ กล่าวคือไม่สามารถทดสอบแล้วได้ค่า c และ Ø ที่แม่นยำเหมือนในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) อัตโนมัติที่ได้มาตรฐาน แม้เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองจะไม่สามารถบอกค่า c และ Ø ที่แม่นยำของทรายได้ แต่เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเองนี้ สามารถบอกถึงแนวโน้มของค่า c และ Ø ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างทรายอื่น เมื่อทำการเฉือนผ่านเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear apparatus) ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเหมือนกัน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ศันสนะกุล. ก. “พฤติกรรมการซึมผ่านและผลกระทบของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อดินโดยรอบผนังหลุมเจาะเสาเข็ม.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.

[2] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, *ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะเปียก*, พิมพ์ครั้งที่ 4, พ.ศ. 2561.

[3] บุณยรักษ์. ธ. “พฤติกรรมของสารละลายโพลิเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[4] ธัญญ์นลิน วิญญูประสิทธิ์, ยุราพร สหัสกุล และ น้ำผึ้ง รุ่งเรือง, "นาโนเซลลูโลส: การประยุกต์ใช้ใน อาหารและความปลอดภัย", *วารสารพิษวิทยาไทย*, พ.ศ.2560, หน้า 67-79.

[5] ทัศนนิพันธ์, ณ., "Thai Standardization of the Construction of Wet Process Bored Piles in Line with Global Standards", *เอกสารประกอบการประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี*, พ.ศ.2543.

[6] ณรงค์ ทัศนนิพันธ์ และ ทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์, "Performance of Bentonite Bored Piles Construction in Bangkok Subsoil", *เอกสารประกอบการประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี*, พ.ศ.2542.

[7] ซอว์ ซอว์ เอย์, ธยานันท์ บุณยรักษ์, เฉลิมพล เตชะกำธร, ณัฐชัย โปร่งมณี และ ณัฐฐพล ทัศนนิพันธ์ (บ.ก.), *ประสบการณ์งานก่อสร้างเสาเข็มเจาะ และโครงสร้างใต้ดินในประเทศไทย*, บริษัท ซีฟโก้ จำกัด (มหาชน), พ.ศ.2557.

[8] ชื่นหิรัญ, ว. “พฤติกรรมเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์เป็นสารรักษาเสถียรภาพหลุมเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[9] งามเจริญ, ก. “ฐานข้อมูลทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคของชั้น ดินกรุงเทพสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

[10] กิติพงศ์ไพโรจน์, ว. “กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[11] S.Kalia, B. S. Kaith and I.Kaur. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. 2011, pp. 179-206.

[12] Dufresne. A. “Nanocellulose: a new ageless Bionanomaterial”. The International School of Paper, Grenoble Institute of Technology (Grenoble INP), 2013.