



สมบัติความแข็งแรงของดินสเปย์จากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ : กรณีศึกษาโครงการปรับปรุงถนน
เลียบคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ

STRENGTH PROPERTIES OF SOIL SPOIL FROM THE CONSTRUCTION OF SOIL CEMENT
COLUMN: A CASE STUDY OF SUVARNABHUMI CANAL ROAD IMPROVEMENT PROJECT

ศลิษา ไชยพุท^{1*}, จิรัชญา อายวรรณ², ธนาดล กงสมบุญ³, อุบะ สิริแก้ว⁴ และ นกิบ อาแวโด⁵

^{1*}รองศาสตราจารย์, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³อาจารย์, ⁴นักศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁵ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*Corresponding author, Email: salisa.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของดินสเปย์ ซึ่งเป็นของเสียจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมโดยใช้ระบบเปียก ความแข็งแรงของดินสเปย์ศึกษาจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบทางแร่ของดินสเปย์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ ตัวอย่างดินสเปย์ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก และไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ที่ระยะเวลาการบ่ม 4 วัน 7 วัน และ 14 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงของดินสเปย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และสัมพันธ์กับระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของดินสเปย์ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก มีค่าสูงกว่าดินสเปย์ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบทางแร่ของดินสเปย์ มีรูปแบบที่แตกต่างจากองค์ประกอบทางแร่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีองค์ประกอบทางแร่คล้ายกับดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ การพัฒนาความแข็งแรงของดินสเปย์ จึงเกิดจากการสูญเสียเนื้อน้ำเนื่องมาจากการระเหยของน้ำในดิน ดังนั้นภายหลังเสร็จสิ้น การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ อาจเพียงแค่ปรับระดับของดินสเปย์ในพื้นที่ที่ทำก่อสร้าง แทนการขนย้ายเพื่อนำไปกำจัด

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์; การผสมแบบแรงดัน; การผสมโดยใช้ระบบเปียก; สเปย์; ความแข็งแรง

ABSTRACT

This research investigated the properties of soil spoil (spoil), which is the waste from the construction of soil cement column with wet process. The strength of spoil was investigated by unconfined compressive strength (UCS) test. Besides, X-Ray Diffraction (XRD) analysis was characterized and compared the mineralogical composition of spoils, Ordinary Portland Cement (OPC) and Bangkok clay. The soil-spoil samples were evaluated under wrapped and unwrapped conditions for 4-days, 7-days, and 14-days

Salisa Chaiyaput^{1*}, jiratchaya Ayawanna², Thanadol Kongsomboon³, Uba Sirikaew⁴ and Nakib Arwaedo⁵

^{1*}Associate Professor, ²Assistant Professor, ³Lecturer, ⁴Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

⁵Assistant Professor, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

curing period, respectively. The results revealed that the strength of spoil was slightly increased and correlated with the increasing of curing time. The strength of soil cement under unwrapped condition was found to be higher than the wrapped condition. In addition, the mineralogical compositions of spoil were in different form compared to OPC, but relatively similar to that of Bangkok clay. The strength developing in the soil spoil was thus attributed to the evaporation of physical water. Therefore, the soil spoil can be graded as a ground level instead of disposal after finishing.

KEYWORDS: soil cement; jet grouting; wet process; spoil; strength

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทำให้มีโครงการก่อสร้างต่าง ๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งชั้นดินในบริเวณดังกล่าวเป็นชั้นดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ ทำให้มีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง หรือที่เรียกว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Soft Bangkok clay) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก มีความลึกประมาณ 10 – 15 เมตร จากผิวดิน ถัดลงไปจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) มีความลึกตั้งแต่ 15 เมตร ลงไปจนถึงประมาณ 23 เมตร และตามด้วยชั้นทราย ตามลำดับ ปัญหาสำคัญของการก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ คือ ปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างต่าง ๆ เนื่องจากดินมีกำลังการรับแรงเฉือนต่ำ ทำให้ไม่สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างต่าง ๆ ที่วางอยู่บนดินได้

การปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ ดินซีเมนต์ [1-3] นับเป็นวิธีการพัฒนากำลังการรับแรงของชั้นดินที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว จึงมีการนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นดินในระดับลึก เรียกว่า เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column) ด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 3 – 15% โดยน้ำหนัก การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมในระบบแห้ง และการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมโดยใช้ระบบเปียก และเป็นที่ทราบกันดีว่าการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมในระบบเปียกก่อให้เกิดของเสีย ที่เรียกว่า ดินสปอยล์ หรือ สปอยล์ (Soil spoil or spoil) ไหลผ่านช่องว่างระหว่างหลุมเจาะและหัวเจาะขึ้นมาบนผิวดิน เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันในระหว่างการขุดเจาะด้วยแรงเชิงกลจากการหมุนของหัวเจาะหรือจากการฉีดน้ำแรงดันสูง เพื่อให้ชั้นดินแตกตัว เพิ่มการยึดติดของอนุภาคเม็ดดิน เพิ่มเสถียรภาพและกำลังการรับแรงของดินเหนียวอ่อน ช่วยให้ดินมีคุณสมบัติเหมาะสมและสามารถรองรับฐานรากของอาคารและน้ำหนักของโครงสร้างต่าง ๆ ที่วางอยู่บนดินได้

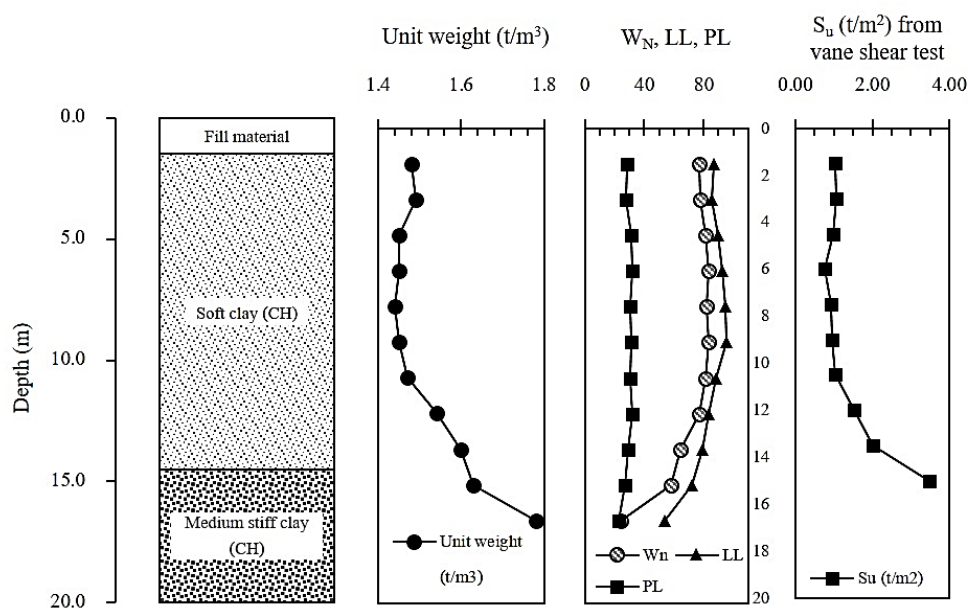
ดินสปอยล์เป็นของเสียจากกระบวนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายมอร์ต้า มีความชื้นเหลว และมีความหนาแน่นต่ำ เพราะเป็นส่วนผสมของน้ำและดินที่แตกตัวในระหว่างการหมุนของหัวเจาะ ซึ่งในปัจจุบันภายหลังเสร็จสิ้นการก่อสร้างดินสปอยล์มักถูกขนย้ายออกจากพื้นที่ที่ทำการก่อสร้าง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดินสปอยล์ที่มีความคล้ายคลึงกับมอร์ต้า ทำให้ผู้รับเหมาเกิดความกังวลว่าดินสปอยล์จะแข็งตัวคล้ายกับซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการเกิดดินสปอยล์สามารถเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ เนื่องจากดินสปอยล์ที่ไหลขึ้นมาบนผิวดินสามารถยืนยันได้ว่าไม่เกิดการอุดตันของหัวเจาะ และหากดินสปอยล์ที่ไหลขึ้นมาบนผิวดินมีปริมาณน้อยเกินไปอาจบ่งบอกถึงสาเหตุสำคัญของการยุบตัวของหลุมเจาะ ส่งผลให้ดินบริเวณข้างเคียงเกิดการเคลื่อนตัว หรืออาจส่งผลให้เกิดสาเหตุอื่น ๆ ได้อีกด้วย [4] ด้วยเหตุนี้การเกิดดินสปอยล์จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในขณะก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ แม้กระนั้นการควบคุมให้มีปริมาณดินสปอยล์เกิดขึ้นน้อยที่สุด หรือการหา

แนวทางที่เหมาะสมในการจัดการดินสอยล้อยังคงเป็นสิ่งที่ต้องการในการก่อสร้างอย่างมีคุณภาพ เพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและหลีกเลี่ยงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการนำของเสียดินสอยล้อย้อนกลับมาใช้ใหม่ [5]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติของดินสอยล้อยจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ กรณีศึกษาโครงการปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจคุณลักษณะทางกายภาพและทางแร่ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมและแนวโน้มการพัฒนาความแข็งแรงของดินสอยล้อย เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินสอยล้อยที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อไป

2. พื้นที่ที่ทำการศึกษา

ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Soil profile) ไปจนถึงระดับความลึก 17.00 เมตร ของโครงการก่อสร้างปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ ได้จากการนำตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะสำรวจไปทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถแบ่งชั้นดินของโครงการก่อสร้างออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้ ชั้นดินชั้นที่ 1 คือ ชั้นดินถม (Fill material) อยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 1.50 เมตร จากผิวดิน ชั้นดินชั้นที่ 2 คือ ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) เริ่มต้นที่ระดับความลึกประมาณ 1.50 เมตร ลงไปจนถึงระดับความลึก 14.50 เมตร จากผิวดิน และ ชั้นสุดท้ายเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium stiff clay) เป็นชั้นดินที่มีระดับความลึกมากกว่า 14.50 เมตร จากผิวดิน ดังแสดงใน รูปที่ 1 และ ตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินของโครงการก่อสร้างปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ

ตารางที่ 1 ผลการเจาะสำรวจชั้นดิน

ชั้นที่	ความลึก (เมตร)		ลักษณะชั้นดิน	กำลังต้านทานของดิน S_u (กก. / ซม. ²)
	เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	0.00	1.50	ชั้นดินถม (Fill material)	-
2	1.50	14.50	ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay, CH)	0.07 – 0.20
3	14.50	17.00	ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium stiff clay, CH)	0.35

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength (UCS) test, q_u) ของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D2166 เป็นการทดสอบโดยไม่มีแรงดันด้านข้างกระทำต่อผิวของตัวอย่างดิน การทดสอบกระทำโดยการใส่แรงตามแนวแกน (Axial load) ให้กับผิวบนและผิวล่างของตัวอย่างดิน ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง 0.5 ถึง 2% ของความสูงตัวอย่างดินก่อนที่จนตัวอย่างดินวิบัติ หรือทดสอบจนถึงค่าความเครียด (ϵ) เท่ากับ 20% จึงหยุดการทดสอบ เนื่องจากดินที่มีความเป็นพลาสติกสูงมาก จะไม่สามารถสังเกตเห็นแนวเฉือนได้

การทดสอบจะเป็นแบบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) ของดิน ดังสมการ

$$S_u = \frac{1}{2} q_u = c \quad (1)$$

เมื่อ S_u = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)

q_u = ค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength)

c = ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction analysis, XRD) เป็นวิธีวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางแร่ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่ทราบกันโดยทั่วไปทางวิศวกรรมวัสดุ ใช้เพื่อวิเคราะห์ว่าในตัวอย่างที่สนใจประกอบด้วยแร่ชนิดใด โดยอาศัยหลักการการยิงแสงเอกซเรย์พลังงานสูงเข้าไปกระทบกับระนาบผลึกซึ่งมีความจำเพาะในแร่แต่ละชนิด การกระทบของแสงเอกซเรย์บนระนาบผลึกจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงและเลี้ยวเบนเป็นมุม 2θ ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังนั้นแร่ต่างชนิดกันจะมีระนาบผลึกต่างกัน อันจะก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเอกซเรย์ ที่มุม 2θ ต่างกัน การปรากฏของมุม 2θ จากการวิเคราะห์ในตัวอย่าง สามารถแยกชนิดแร่ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง โดยนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเทียบกับมุม 2θ มาตรฐานของแร่บริสุทธิ์ ที่ได้จากการตรวจวัดโดยมาตรฐาน JCPDs (Joint committee on powder diffraction standard) ซึ่งจะเป็นรูปแบบเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด เนื่องจากแร่หรือสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ

ขนาด และประจุของอะตอม แร่หรือสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเสมือนลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำดินสพอยล์มาอบให้แห้งแล้วคให้ละเอียดจนเป็นผงโดยใช้โกรนด์บด
- 2) เติมน้ำมันสพอยล์ลงในช่องใส่ผงตัวอย่างของเครื่องตรวจวิเคราะห์ให้เต็มช่อง
- 3) ใช้แผ่นกระจกกดผงตัวอย่างในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง (Sample holder) ให้แน่นและปิดผิวหน้าให้เรียบ
- 4) นำอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างประกอบเข้าชุดแล้วนำเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์
- 5) ทำการวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางแร่ ในช่วงมุม 2 θ ระหว่าง 10 ถึง 60 องศา โดยใช้กระแสและความต่างศักย์ 30 mA และ 30 kV ตามลำดับ ในการกระตุ้นหลอดรังสี Cu-K α ในการเกิดแสงเอกซเรย์

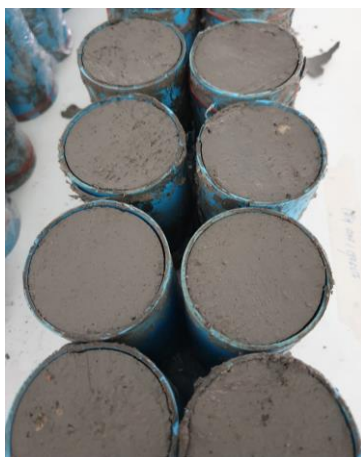
3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างที่เก็บมาจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำหนัก 175 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ 1 ลูกบาศก์เมตร) ของโครงการปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ เพื่อศึกษาสมบัติของดินสพอยล์ ผู้วิจัยจึงทดสอบเปรียบเทียบความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ ความแข็งแรงของดินสพอยล์ และความแข็งแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (จากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินของพื้นที่ที่ทำการศึกษา) โดยการเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจากตำแหน่งเดียวกัน การเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) เจาะเก็บตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Coring) ที่ระดับความลึก 9.50 – 14.40 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.25 เซนติเมตร จากการทดสอบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์มีปริมาณน้ำในดิน 94.69% – 95.08% ภายหลังเสร็จสิ้นการก่อสร้างระยะเวลา 15 วัน (ระยะเวลาการบ่ม 15 วัน) เพื่อทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดตามมาตรฐาน ASTM D2166
- 2) เก็บตัวอย่างดินสพอยล์ที่ไหลขึ้นมานบนผิวดิน ในระหว่างก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 2) ทดสอบหาปริมาณน้ำในดินสพอยล์มีค่าเท่ากับ 105.55% จากนั้นนำตัวอย่างดินสพอยล์มาบรรจุลงในแบบหล่อที่จากท่อพีวีซี (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความสูง 10.16 เซนติเมตร ด้วยความระมัดระวังไม่ให้มีโพรงอากาศเกิดขึ้นกับตัวอย่างดินสพอยล์ภายในแบบหล่อ บ่มตัวอย่างดินสพอยล์ด้วยระยะเวลา 4 วัน 7 วัน และ 14 วัน ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Wrap) และไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Unwrap) (ดังแสดงในรูปที่ 3) เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังความแข็งแรงของดินสพอยล์จากการระเหยของน้ำ และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 2 ดินสเปกซ์ของโครงการก่อสร้างปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างดินสเปกซ์ ภายใต้เงื่อนไข (ก) ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Unwrap) และ (ข) ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Wrap)

4. ผลการทดสอบ

4.1 ความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์

หลังจากเจาะเก็บตัวอย่างดินของเสาเข็มดินซีเมนต์ (อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำหนัก 175 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ 1 ลูกบาศก์เมตร) จากโครงการก่อสร้างปรับปรุงถนนเลียบริมคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ

ที่ระยะเวลาการบ่ม 15 วัน และทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยใช้การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2166 ตัวอย่างดินของเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งเป็น 2 ตัวอย่างตามระดับความลึก ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 เสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ระดับความลึก 9.50 เมตร ถึง 11.95 เมตร และ ตัวอย่างที่ 2 เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับความลึก 11.95 เมตร ถึง 14.40 เมตร ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ 1 มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 5.92 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เท่ากับ 2.96 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความเครียดวิบัติเท่ากับ 1.35% และ โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 439.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 2 พบว่ามีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเท่ากับ 4.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เท่ากับ 2.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความเครียดวิบัติเท่ากับ 1.01% และ โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 442.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

จากการทดสอบพบว่าค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเดิมที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดิน ที่มีค่าประมาณ 0.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 0.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงในดิน เพื่อการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และตามด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ซึ่งมีผลทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่ามากกว่าค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเดิม

4.2 ความแข็งแรงของดินสเปย์

ตัวอย่างดินสเปย์ที่นำมาทดสอบถูกเก็บในระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำหนัก 175 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ 1 ลูกบาศก์เมตร) ตัวอย่างดินสเปย์ถูกทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Wrap) และไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Unwrap) ที่ระยะเวลาการบ่ม 4 วัน 7 วัน และ 14 วัน ตามลำดับ

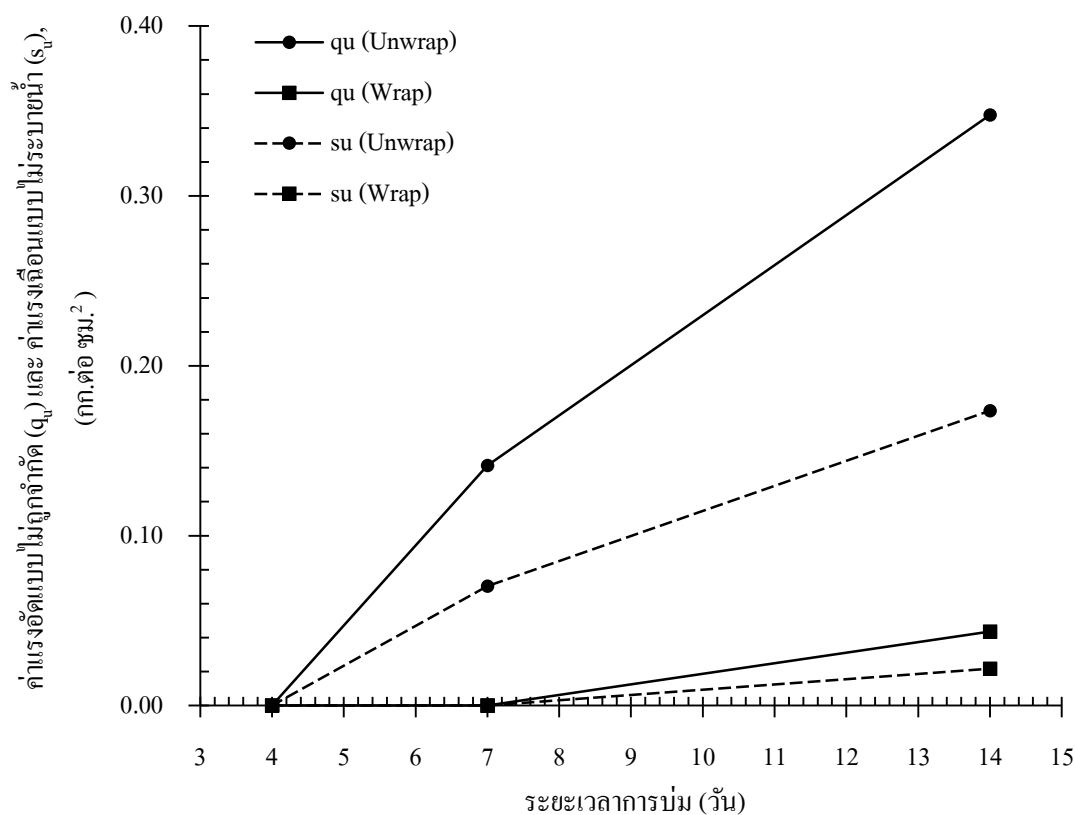
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 15 วัน

การทดสอบ	ตัวอย่าง	
	ตัวอย่างที่ 1 (9.50 - 11.95 เมตร)	ตัวอย่างที่ 2 (11.60 - 14.40 เมตร)
ค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength, q_u), กก./ซม. ² (ksc)	5.92	4.47
ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u), กก./ซม. ² (ksc)	2.96	2.23
ค่าความเครียดวิบัติ (Failure strain, e_p), %	1.35	1.01
โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E), กก./ซม. ² (ksc)	439.04	442.88
ปริมาณน้ำในดิน (w_p), %	95.08	94.69

ตารางที่ 3 และ รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินสปอยล์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า ตัวอย่างดินสปอยล์ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ที่ระยะเวลาการบ่ม 4 วัน และ 7 วัน มีลักษณะอ่อนตัว ไม่สามารถนำมาทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดได้ เมื่อระยะเวลาการบ่มดินสปอยล์ เพิ่มขึ้น เป็น 14 วัน ค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด มีค่าเท่ากับ 0.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ปริมาณน้ำในดิน 91.70%) และ ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินสปอยล์ ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

การทดสอบ	เงื่อนไข	ระยะเวลาการบ่ม		
		4 วัน	7 วัน	14 วัน
ค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (q_u), กก. ต่อ ซม. ² /	ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก	0 / -	0 / 92.55	0.04 / 91.70
ปริมาณน้ำในดิน (W_n), %	ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก	0 / -	0.14 / 76.67	0.35 / 69.07
ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u), กก.ต่อ ซม. ²	ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก	0	0	0.02
	ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก	0	0.07	0.17



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังการรับแรงของดินสปอยล์

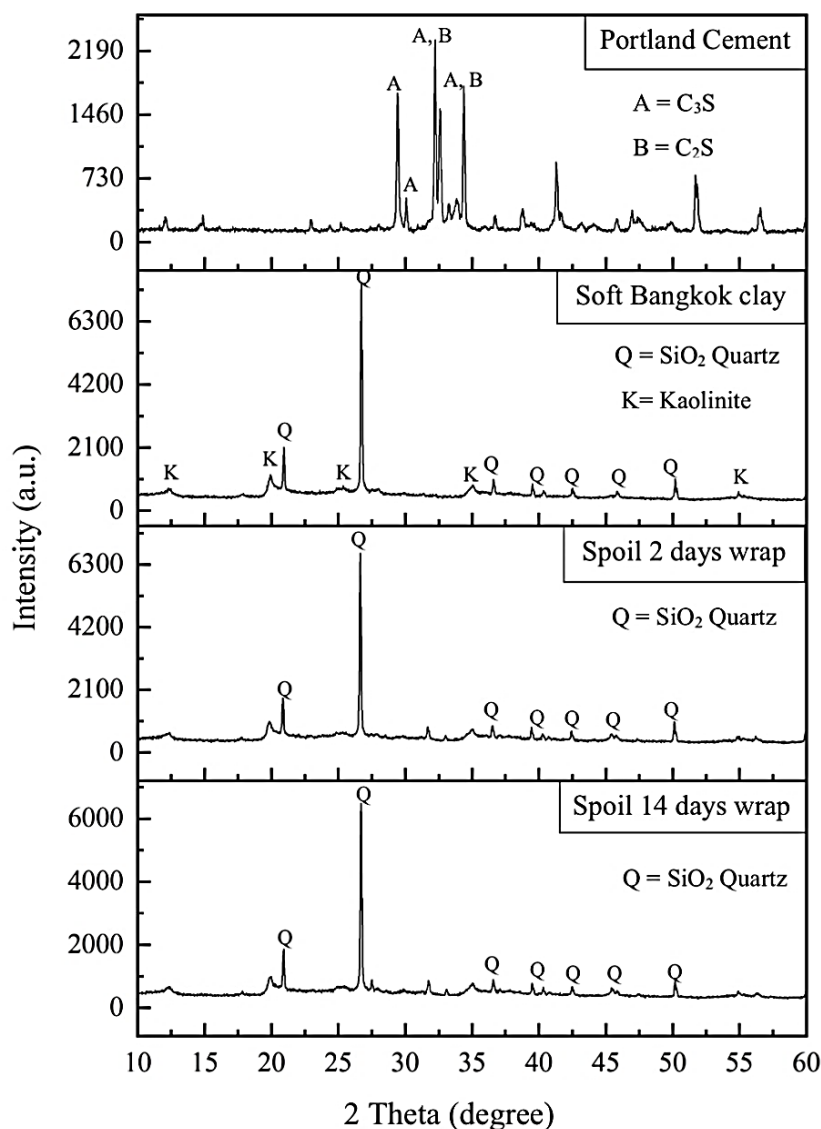
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินสเปกซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก พบว่า ตัวอย่างดินสเปกซ์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 4 วัน มีลักษณะอ่อนตัว ไม่สามารถรับแรงกดจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดได้ เช่นเดียวกับเงื่อนไขของดินสเปกซ์ที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ระยะเวลาการบ่ม 4 วัน และ 7 วัน ขณะที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และ ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ปริมาณน้ำในดิน 76.67%) และ 0.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการบ่มที่ 14 วัน มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เท่ากับ 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ปริมาณน้ำในดิน 69.07%) และ 0.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าดินสเปกซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกมีอัตราการพัฒนากำลังตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นมากกว่าดินสเปกซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการพัฒนากำลังของดินสเปกซ์อาจไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) จะเกิดขึ้นทันที หลังจากน้ำผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ และการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซีเมนต์จะทำหน้าที่ดูดน้ำออกจากเนื้อดิน ทำให้ดินแห้ง อย่างรวดเร็ว คุณสมบัติความเป็นพลาสติก (Plasticity) ของเม็ดดินลดลง และเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) แคลเซียมอลูมินไฮดรต (CAH) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอลูมินไฮดรต (CAH) มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ ช่วยให้เม็ดดินรวมตัวเป็นมวลขนาดใหญ่ ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [6]

ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) เกิดจากสารประกอบซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบในดินเหนียว เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองในปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่สามารถก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอลูมินไฮดรต (CAH) เพิ่มเติมหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากซีเมนต์ใกล้สิ้นสุดลง ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ขึ้นอยู่กับระยะเวลา เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ก็จะพัฒนามากขึ้นส่งผลให้กำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สูงขึ้นเมื่อถึงระยะเวลามานานขึ้น สอดคล้องกับข้อมูลของ Hayward Baker (2017) [7]

ยิ่งไปกว่านั้นหากพิจารณาเปรียบเทียบความแข็งแรงของดินสเปกซ์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน กับความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 15 วัน ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินสเปกซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มและไม่ได้ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2.96 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตัวอย่างที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เห็นได้ว่าค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินสเปกซ์กับค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ มีค่าต่างกันมาก ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเดิมที่ได้จากการเจาะสำรวจชั้นดิน พบว่า มีค่าประมาณ 0.07 ถึง 0.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินสเปกซ์ภายใต้การทดสอบทั้งสองเงื่อนไข

4.3 องค์ประกอบทางแร่ของดินสเปย์ล์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ที่อาจส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ของดินสเปย์ล์ โดยเปรียบเทียบองค์ประกอบทางแร่ของดินสเปย์ล์ภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ระยะเวลาการบ่มที่ 2 วัน และ 14 วัน กับองค์ประกอบทางแร่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ องค์ประกอบทางแร่ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



รูปที่ 5 XRD ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินสเปย์ล์ที่อายุการบ่ม 2 วัน และ 14 วัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินสอพอด้ที่แสดงในรูปที่ 5 พบว่าดินสอพอด้มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเลี้ยวเบนของแสงเอกซเรย์ ที่ไปปรากฏที่มุม 2θ เดียวกัน ทำให้รูปแบบของ XRD pattern ของดินสอพอด้มีความคล้ายกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ความเข้มของแสงเอกซเรย์ (Intensity) ซึ่งขึ้นกับชนิดและปริมาณของระนาบผลึกที่เป็นองค์ประกอบในดินสอพอด้และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ยังปรากฏค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนแทบจะเป็นวัสดุเดียวกัน จากรูปแบบของ XRD pattern พบองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ควอตซ์หรือซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบได้ทั่วไปในดินเหนียว ขณะที่องค์ประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและสร้างความแข็งแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้การที่องค์ประกอบทางแร่ของดินสอพอด้ ที่ระยะเวลาการบ่ม 2 วัน และ 14 วัน มีรูปแบบไม่แตกต่างกัน ยังแสดงให้เห็นว่าการบ่มที่นานขึ้น ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของดินสอพอด้ เนื่องจากไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินสอพอด้ที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ SiO_2 ในดินสอพอด้ได้ จึงทำให้ไม่สามารถพัฒนาความแข็งแรงของดินสอพอด้ได้ แม้จะทิ้งระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น และเป็นสาเหตุที่ดินสอพอด้มีค่ากำลังความแข็งแรงต่ำกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์มาก

5. สรุปผล

ภายหลังการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสม โดยใช้ระบบเปียกเสร็จสิ้น ดินสอพอด้ที่เป็นของเสียจากการก่อสร้างจะถูกกำจัดออกจากพื้นที่ก่อสร้าง งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของดินสอพอด้จากกรณีศึกษาโครงการปรับปรุงถนนเลียบคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินสอพอด้ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

- 1) ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินสอพอด้มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
- 2) รูปแบบขององค์ประกอบทางแร่ของดินสอพอด้ แตกต่างจากรูปแบบองค์ประกอบทางแร่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีองค์ประกอบทางแร่ทั้งที่ระยะเวลาการบ่ม 2 วัน และ 14 วัน คล้ายกับองค์ประกอบทางแร่ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
- 3) การพัฒนากำลังของดินสอพอด้ ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) แต่เป็นเพียงการระเหยของน้ำที่อยู่ในดินสอพอด้

ดังนั้น ดินสอพอด้ที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ อาจไม่จำเป็นต้องขนย้ายออกจากพื้นที่ที่ก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณศิริชัย เพชรมะลิ บริษัท ซอยล์กริด เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ดร.ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณจิรวัฒน์ สนวนุ่ม คุณทศพร มาปะโพธิ์ และ คุณพร จตุรกุล ที่ช่วยทดสอบความแข็งแรงของดินสอพอด้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pretorius, P. C. *Design considerations for pavements containing soil-cement base*, Ph. D. Thesis, University of California, 1970, pp. 1-210.
- [2] Ruenkrairergsa, T., and Thaweewonsodsai, A. *Stress-strain characteristics of cement treated materials under unconfined compression test*, RD.179, Road Research and Development Center, Department of Highways, 2000.
- [3] Jamsawang, P., Vottipruex, P., and Horpibusuk, S. Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(9), 04014243.
- [4] Croce, P., Flora, A., Modoni, G. *Jet Grouting: Technology, Design and Control*, (1 edition)., CRC Press, 2014.
- [5] Yoshida, H. (2012). *Recent developments in jet grouting*. In Grouting and Deep Mixing 2012, pp. 1548-1561.
- [6] Ribeiro, D., Neri, R., and Cardoso, R. Influence of water content in the UCS of soil-cement mixtures for different cement dosages. *Procedia Engineering*, 2016, 143, pp. 59-66.
- [7] Hayward Baker. *Ground improvement*, (2017), Available from: <https://www.haywardbaker.com/solutions/ground-improvement> [Accessed 5 April, 2020].