

การประเมินประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการพัฒนากำลังและ
ความแข็งแรงของดินทรายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC CEMENT IN ENHANCING STRENGTH AND STIFFNESS OF SANDY SOIL FOR GROUND IMPROVEMENT

ปณณวิช รุ่งเรือง¹ วรพจน์ เพชรเกต² ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย³ สุธี ปิยะพิพัฒน์⁴ และ
อติเทพ ศรีคงศรี⁵

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th

²นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th

^{3,4}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510, atitep.sri@kbu.ac.th

Punnawit Rungruang¹, Warapot Petchgate², Supasit Pongsivasathit³, Suthee Piyapiphat⁴
and Atitep Srikongsri⁵

¹Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th.

²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th.

^{3,4}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,

³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit
University, 60 Romklao Rd., Minburi Bangkok 10510, Thailand, atitep.sri@kbu.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของดินทรายได้แก่ ค่ากำลังกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) ของผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินทดสอบนำมาจากสถานที่ก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบวัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย ดินทดสอบถูกผสมกับปูน HC ที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ทำการบ่มตัวอย่างดินผสมที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ในการประเมินปูน HC เพื่อเป็นสารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในงานปรับปรุงคุณภาพดินจะนำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 (OPC) ภายใต้ปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ค่า q_u และ E_{50} เพิ่มขึ้นเป็นไปในทางเดียวกันของปูนทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ดีพบว่าผลทดสอบของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินผสมปูน OPC เนื่องจากองค์ประกอบของออกไซด์ที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาคแสดงถึงการพัฒนาแท่งเอทริงไคต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงระหว่างค่า q_u และ E_{50} ของปูนทั้งสองชนิดแทบไม่แตกต่างกัน หากนำข้อมูลทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และ E_{50} สามารถเขียนเป็นสมการได้แก่ $E_{50} = 78.165q_u$ ดังนั้นปูน HC สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยเฉพาะกับเทคนิคการผสมลึก ทดแทนการใช้ปูน OPC เนื่องจากปูนชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงกดอัดทิศทางเดียว, มอดูลัสซีแคนท์, การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค

ABSTRACT

This research aims to investigate the effectiveness of hydraulic cement (HC) in improving the strength and stiffness properties of sandy soil, specifically focusing on unconfined compressive strength (q_u) and the secant modulus (E_{50}), derived from the stress-strain relationship of unconfined compression tests. The soil samples used were sandy soil obtained from the construction site of a water pumping station at Ratchamnong Temple in Nong-Khai Province. These samples were mixed with HC at varying proportions of 10 %, 15%, 20%, 25%, and 30% by dry weight. The curing periods employed were 3, 7, 14, and 28 days, with a water/cement ratio of 1 : 1 . To evaluate HC as an environmentally friendly admixture for ground improvement, the test results using HC were compared with those using ordinary Portland cement (OPC) under identical cement content and curing periods. The results indicated that increasing the cement content and curing period enhanced both q_u and E_{50} for both HC and OPC, showing similar trends for both types of cement. However, the results for HC were slightly lower than those for OPC, likely due to differences in oxide composition. Scanning Electron Microscope analysis reveals that the development of Ettringite formation, resulting from the cement hydration reaction, shows significant similarity between HC and OPC as the curing period increases. Despite this, the linearly correlation between q_u and E_{50} for HC admixture was nearly identical to that for OPC admixture. From the overall results, the relationship between q_u and E_{50} can be expressed as $E_{50} = 78.165q_u$. Therefore, HC admixture can be effectively used in sustainable ground improvement, particularly in deep mixing methods, as an environmentally friendly alternative to OPC admixture.

KEYWORDS: Ground Improvement, Hydraulic cement, Unconfined compressive strength, Secant Modulus, Scanning Electron Microscope analysis

1. บทนำ

เทคนิคการทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method, DMM) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง Ministry of Transport [1] ของประเทศญี่ปุ่นเปิดเผยว่าวิธี DMM นำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี 1989 เพื่อเป็นฐานรากของโครงสร้างท่าเรือ เช่น กำแพงกันคลื่นหรือแนวป้องกันชายฝั่ง โดยใช้รูปแบบเสาแบบบล็อกและแบบผนัง และมีการเผยแพร่มาตรฐานการออกแบบในปี 1999 [2] และ 2007 [3] เทคนิคนี้ทำให้สามารถเพิ่มสมบัติ

เชิงกลของชั้นดินอ่อน The Ports and Harbours Association of Japan [4-6] ได้เผยแพร่มาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างวิธี DMM ในเวอร์ชันภาษาญี่ปุ่น ต่อมา The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan [7-9] เผยแพร่มาตรฐานในเวอร์ชันภาษาอังกฤษ วิธีการออกแบบเสาแบบกลุ่มสำหรับการปรับปรุงชั้นดินอ่อนเพื่อรองรับคันดินถูกเผยแพร่โดย Public Works Research Center [10] และมีการปรับปรุงในปี 2004 [11] วิธี DMM ยังนำมาใช้เพิ่มเติมในระบบฐานรากลึกของอาคารในประเทศญี่ปุ่น พร้อมกับมีการเสนอแนวทางการออกแบบและการควบคุมคุณภาพสำหรับดินปรับปรุงโดยวิธี DMM [12] วิธี DMM ยังสามารถนำไปใช้เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction Mitigation) [13] นอกจากนี้มีการศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวตั้งของเสาเดี่ยวรูปตัว T ในชั้นดินอ่อนโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแบบเต็มรูปแบบ [14, 15] Pongsivasathit et al [16] นำเทคนิคนี้มาเป็นโครงสร้างของเขื่อนที่ประกอบด้วยดินซีเมนต์ที่เรียงแถวเป็นลักษณะของรวงผึ้ง (Honey Comb Structure) ร่วมกับกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อใช้เป็นเขื่อนกันน้ำในบ่อขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง

โดยทั่วไปเมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับดินจับตัวกันแข็งเป็นลักษณะคล้ายเสาเข็มในชั้นดิน ทำหน้าที่เสริมความเสถียรภาพของชั้นดินและช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดิน [17-22] ความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของสารผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ปัจจุบันสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกเป็นปัญหาที่ทุกหน่วยงานต้องช่วยระดมกันแก้ไข โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตผงปูนซีเมนต์ที่เป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศโลก ดังนั้นจึงได้มีการผลิตปูนชนิดใหม่ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, HC) หรืออาจเรียกว่า ปูนซีเมนต์คอมโพสิต (Composite Cement) ที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [23] เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการแทนที่ปูนเม็ดด้วยวัสดุอื่น อย่างเช่น ยิปซัม แก้วลอย รวมไปถึงกากจากอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเหล็ก ประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ค่าการปล่อยลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ในการก่อสร้างใช้ปริมาณปูนจำนวนมาก จึงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ดีในงานปรับปรุงคุณภาพดินในประเทศไทย การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นยังไม่ใช่ที่นิยมมากนักเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ศึกษาถึงประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดิน

ตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับดินที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตัวอย่างดินที่เก็บจากโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบ วัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย เนื่องจากเป็นโครงการที่ต้องทำกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นทรายเพื่อแก้ไขการเอียงของโครงสร้างอาคารสูบน้ำที่เกิดขึ้นมากเกินจนขาดความเสถียรภาพในระหว่างการขุดลึก โดยโครงการนี้จะมีการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญด้านการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยใช้สารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

การศึกษาวิจัยนี้ใช้ดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 0-1 เมตร ที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 1 และเมื่อนำมาจำแนกชนิดดินตามวิธีระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification) พบว่าเป็นดินทรายชนิด SP (Poorly graded sand) แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทราย และปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU ดังแสดงในรูปที่ 2



(a)



(b)

รูปที่ 1 ลักษณะของดินตัวอย่างก่อนร่อน (a) และลักษณะของดินตัวอย่างหลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (b)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน	
Natural Water Content (%)	2.49
Specific Gravity, Gs	2.74
Liquid Limit, LL (%)	20.30
Plastic Limit, PL (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
Plasticity Index, PI (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100%
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	1.30%
จำแนกชนิดดินตามระบบเอกภาพ	SP



(a)



(b)

รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (a) และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (b)

ในตารางที่ 2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นได้ว่าเป็นความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณสารที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ ได้แก่ ซิลิกาและอลูมินา ที่ปูน OPC มีค่ามากกว่าปูน HC อย่างไรก็ดีพบว่าปูน HC กลับมีค่าแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่าปูน OPC ซึ่งก็มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์เช่นเดียวกัน [24, 25]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

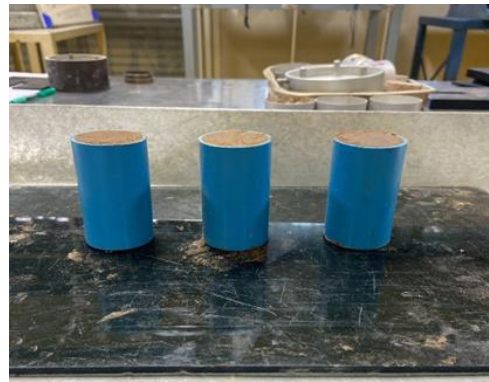
Chemical Composition	HC (%)	OPC (%)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	70.02	67.30
ซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂)	15.58	17.16
อลูมินาออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	3.44	4.02
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.95	3.06
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.09	2.39
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	5.68	4.53
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.27	0.43
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.492	0.431
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.228	0.289

2.2 การเตรียมวัสดุ

นำดินทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาผสมกับปูน HC และในทำนองเดียวกันนำดินทรายมาผสมกับปูน OPC ด้วย เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปูน HC ในอัตราส่วนที่เท่ากันได้แก่ ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินแห้ง เติมน้ำในส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1:1 สังเกตว่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในสัดส่วนที่มากจึงอาจมีบางส่วนที่เป็น น้ำอิสระ (free water) ที่ในการช่วยทำให้ส่วนผสมเข้ากันง่ายขึ้น เนื่องด้วยปริมาณที่มากจึงทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังไม่สูงหากเปรียบเทียบกับกำลังของคอนกรีตผสม จากนั้นนำส่วนผสมมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็ก เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ใส่ในแบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm. สูง 7 cm. แล้วห่อด้วยพลาสติกและเก็บในที่ลับแสงเพื่อลดการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive strength, q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ในตารางที่ 3 แสดงจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละกรณีศึกษา



(a)



(b)

รูปที่ 3 การเก็บรักษาตัวอย่าง (a) และการจัดทำตัวอย่าง (b)

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ปริมาณซีเมนต์ต่อ น้ำหนักดินแห้ง (เปอร์เซ็นต์)	อายุการบ่ม (วัน) และจำนวนตัวอย่าง							
	Hydraulic Cement				Portland Cement			
	3	7	14	28	3	7	14	28
10	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	5
20	5	5	5	5	5	5	5	5
25	5	5	5	5	5	5	5	5
30	5	5	5	5	5	5	5	5
รวม	25	25	25	25	25	25	25	25
รวมทั้งหมด	200 ตัวอย่าง							

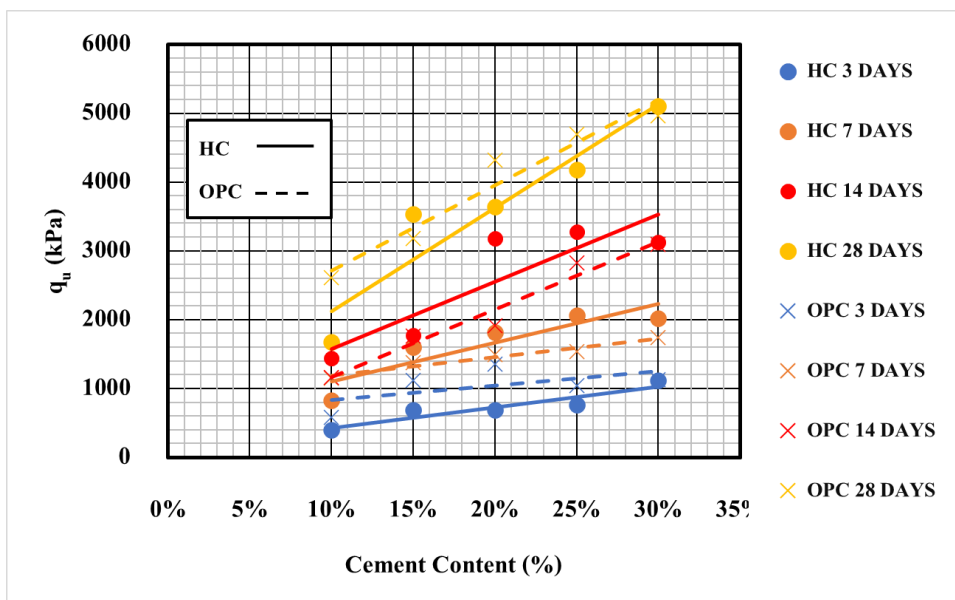
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า q_u

ในการนำเสนอข้อมูล เนื่องจากข้อมูลเป็นความเฉลี่ยและต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักของดินซีเมนต์กับอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ จึงทำการพล็อตความสัมพันธ์แบบ Regression ข้อมูล และในงานวิจัยนี้จะขอเสนอเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เนื่องจากอายุการบ่มมากที่สุดเพียงแค่ 28 วัน ค่ากำลังของดินซีเมนต์ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอยู่ โดย

ผลการศึกษาระหว่างค่า q_u เฉลี่ยกับปริมาณซีเมนต์ทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น [26] ในลักษณะของสมการกราฟเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ และค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย HC ให้แนวโน้มน้อยกว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย OPC เล็กน้อยในทุกอายุการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 10.66 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในกระบวนการผลิต HC นั้นมีการปรับลดปริมาณเม็ดปูนลง แล้วแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน [27] โดยปูน OPC แม้ว่ามีสารแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย แต่พบว่าปูน OPC มีปริมาณสารสำคัญอื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ เช่น สารซิลิกา ออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ เป็นต้น ที่สูงกว่าปูน HC ดังแสดงในตารางที่ 2 จึงทำให้กำลังความแข็งแรงของดินซีเมนต์ผสมปูน OPC มีแนวโน้มมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีผสมปูน HC ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vinoth et al [28]

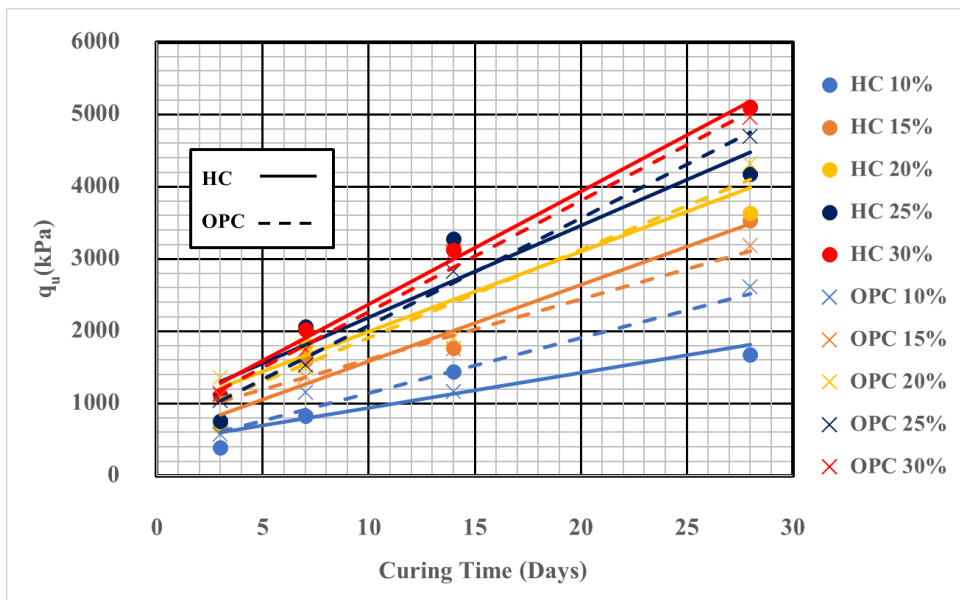


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่ผลต่อค่า q_u

จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการบ่มยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้ค่า q_u มีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) [29-30] จะค่อย ๆ พัฒนาการเกิดปฏิกิริยา

ตามอายุของการบ่มของวัสดุประสานทั้งสองชนิด (HC และ OPC) ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มการพัฒนาแปรผันตรงกับปริมาณ HC และ OPC สังเกตได้จากค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมด้วย OPC มีแนวโน้มสูงกว่าค่า q_u เฉลี่ยจากการผสมด้วย HC ในช่วงแรกของการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 21.36 แสดงถึงปฏิกิริยาในดินที่ผสมด้วย HC เกิดช้ากว่าดินที่ผสมด้วย OPC เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ดังในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าปูน OPC จะมีปริมาณของสารแคลเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่า HC แต่ในองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญของปูน OPC เช่น สารซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ เป็นต้น สูงกว่าปูน HC จึงทำให้กำลังของดินผสมปูน OPC จึงมีค่ามากกว่าการนิปูน HC อย่างไรก็ดีเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นความแตกต่างของค่า q_u ระหว่างดินที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ สังเกตจากที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 มีความแตกต่างเพียงร้อยละ 2.5 แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 30.44 ดังแสดงในรูปที่ 5



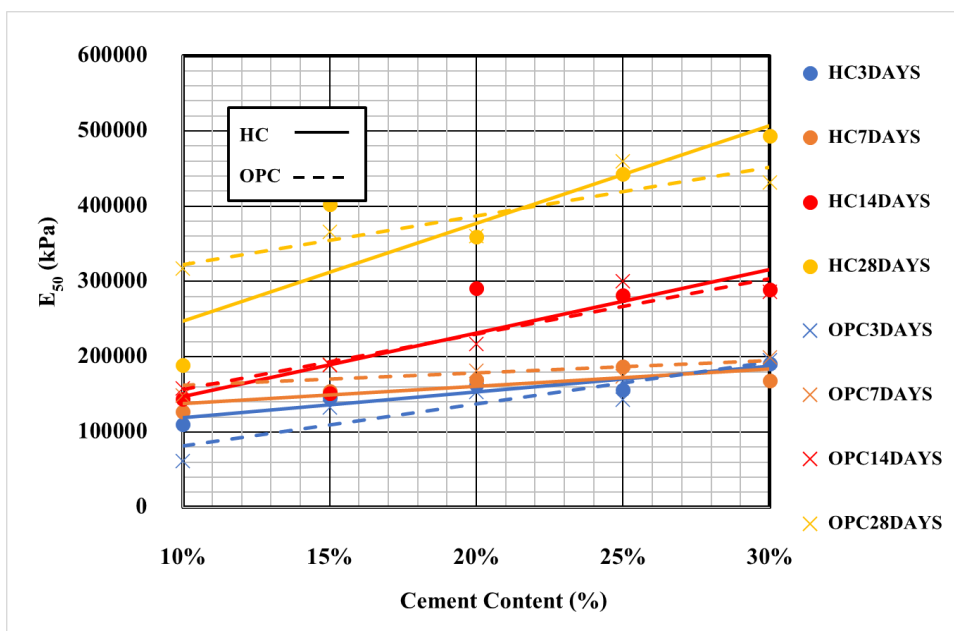
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ อายุการบ่ม

แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากปูน HC มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ที่สูงกว่าอาจทำให้จะส่งผลให้ดินซีเมนต์เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยืดยหดตัว (Volume Change) จากปฏิกิริยา Hydration หรือการสูญเสียน้ำ ดังนั้นในการบ่มดินผสมปูน HC จำเป็นต้องเตรียมในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นเพียงพอเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำอาจสามารถช่วยลดการหดตัวและการแตกร้าวของดินซีเมนต์ได้

สำหรับการศึกษานี้ยังไม่พบเห็นรอยแตกขนาดเล็กบนก้อนตัวอย่างทั้งกรณี OPC หรือ HC อาจเป็นเพราะตัวอย่างทดสอบถูกทำปมในสภาวะที่เหมาะสมมีการสูญเสียความชื้นที่น้อยจากการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่น PVC แบบใส และถูกเก็บในภาชนะที่มิดชิด ดังแสดงในรูปที่ 3

3.1.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่ผลต่อค่า E_{50}

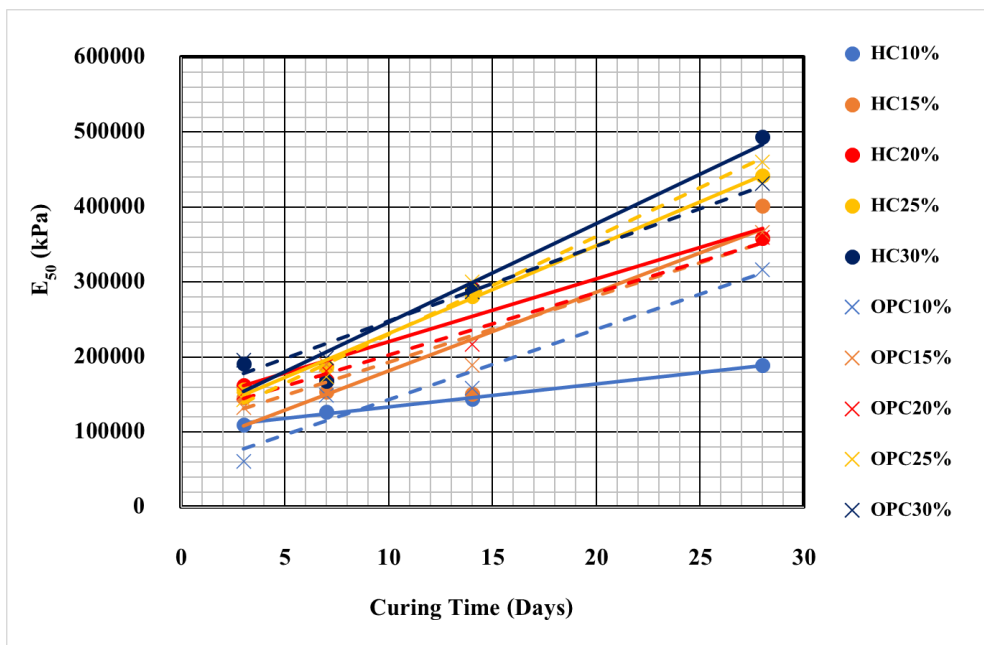
เมื่อกำหนดให้ E_{50} เป็นค่ามอดุลัสซีแคนท์ (Secant Modulus) ที่สามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้ $E_{50} = (q_u/2)/\epsilon_{50}$ โดยที่ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกนบนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่สอดคล้องกับค่าของ $q_u/2$ ที่ได้จากผลการทดสอบ จากรูปที่ 6 แสดงผลของค่าเฉลี่ย E_{50} ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของกราฟเส้นตรงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการพัฒนาของค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิดยังมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับลักษณะแนวโน้มของอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่ผลต่อค่า q_u เฉลี่ยกล่าวคือค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC เล็กน้อย อยู่เฉลี่ยร้อยละ 4.56 ทั้งนี้เนื่องจากด้วยเหตุผลในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1.1 ปูน OPC โดยรวมมีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย เช่น สารซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ ทำให้ดินผสมปูน HC มีการพัฒนาความแข็งแรงที่ช้ากว่าเล็กน้อย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.4 อิทธิพลของอายุการบ่มที่ผลต่อค่า E_{50}

จากรูปที่ 7 แสดงแนวโน้มของการพัฒนาค่าเฉลี่ย E_{50} ต่ออายุการบ่มของดินซีเมนต์มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มทำให้ค่าเฉลี่ย E_{50} เพิ่มขึ้นตาม และพบว่าค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC ในทุกอายุการบ่ม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิด แต่ปูน OPC จะมีการพัฒนาที่เร็วกว่าเฉลี่ยอยู่ร้อยละ 14.34 ยกเว้นแต่กรณีที่ผสมปูนในปริมาณสูง (ร้อยละ 30) พบว่าจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงแรกแต่พออายุการบ่มถึง 28 วัน ดินผสมปูน HC กลับมีค่าสูงกว่าอยู่ร้อยละ 4.1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในปูน HC มีสารแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่าปูน OPC (อ้างอิงตารางที่ 2) หากผสมในปริมาณที่สูงมากพอก็อาจทำให้มีการพัฒนาความแข็งแรงได้เร็วกว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น สารแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่ามีผลทำให้การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ดีขึ้นในระยะยาว [31]

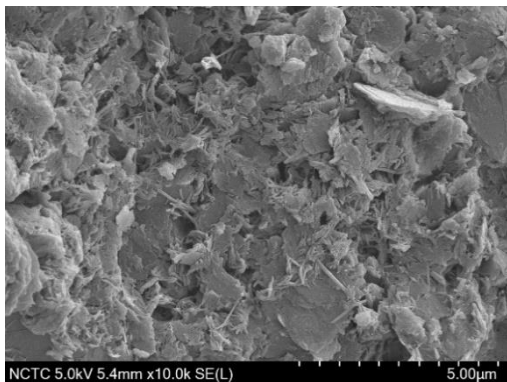


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

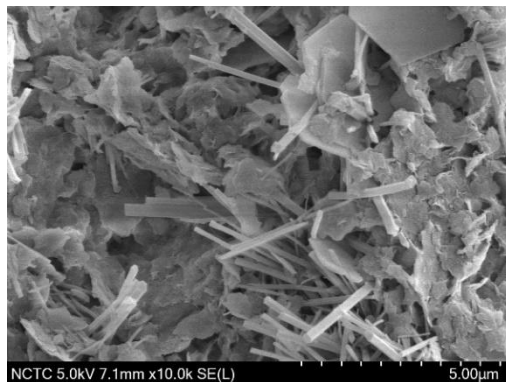
3.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM)

จากรูปที่ 8 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 25 ที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่ากรณี OPC แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่ากรณี HC อย่างมีนัยยะสำคัญแม้ว่าจะมีอายุการบ่มเพียงแค่ 3 วัน

โดยมีปริมาณแท่งผลึกคล้ายเข็มหรือแท่งเอททริงโกต์เกิดขึ้นสำหรับกรณี OPC ที่มากกว่ากรณี HC อย่างชัดเจน

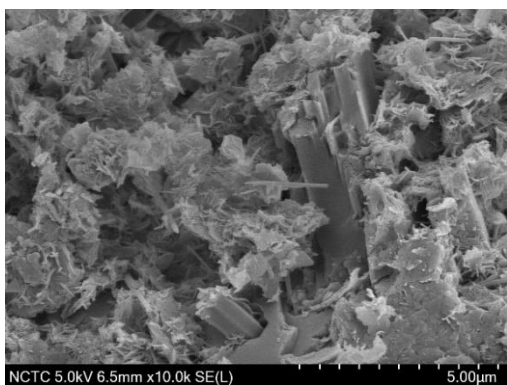


(a)

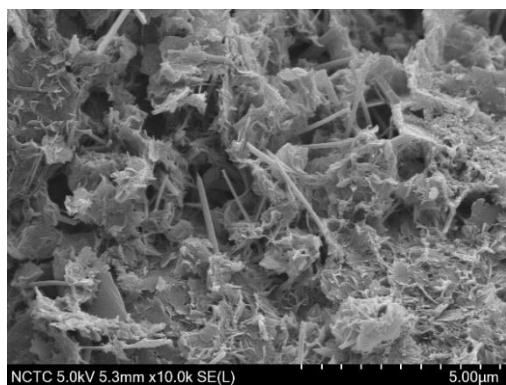


(b)

รูปที่ 8 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (b)



(a)



(b)

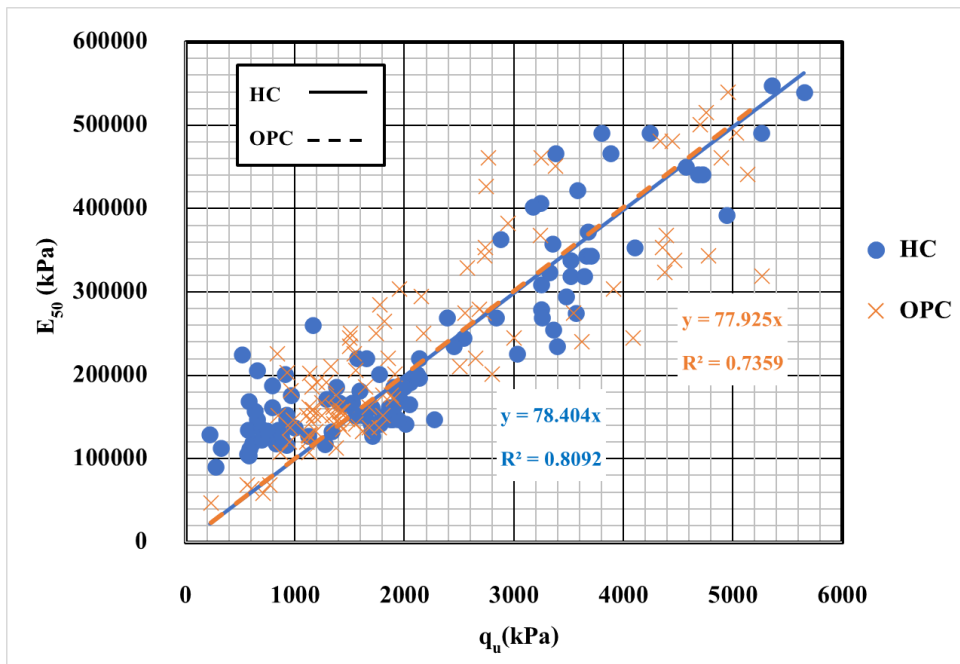
รูปที่ 9 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (b)

ในขณะที่รูปที่ 9 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 สำหรับอายุการบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมากขึ้น ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังของกรณีปูน HC มีแนวโน้มเพิ่มเมื่อระยะเวลาการบ่ม

ที่มากขึ้น ผลผลิตจากปฏิกิริยานี้ทำให้ความหนาแน่นของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น [32] จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงสูงขึ้นตามด้วยดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และค่า E_{50}

เมื่อนำผลทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10 การเพิ่มขึ้นของค่า q_u มีผลทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตาม สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ของปูนทั้ง 2 ชนิด พบว่าสมการมีความคล้ายคลึงกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกรณีผสมด้วยปูน HC สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และ Secant Modulus (E_{50})

$$E_{50} = 78.404(q_u) \quad (1)$$

จากความใกล้เคียงกันหากนำข้อมูลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้ง 2 ชนิดมาหาความสัมพันธ์ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2)

$$E_{50} = 78.165(q_u) \quad (2)$$

ซึ่งใกล้เคียงกับการวิจัยที่ผ่านมาของ Sarkar et al [33] ที่พบว่า $E_{50} = 69.32(q_u)$ ดังนั้น แนวโน้มในการทดแทนการใช้ปูน OPC ด้วยปูน HC สามารถทำได้เนื่องจากผลการศึกษาชี้แสดงให้เห็นว่า มีการพัฒนากำลังของดินทรายผสม HC สอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับดินทรายผสม OPC อย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการพัฒนา กำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ดินผสมปูน HC ให้การพัฒนากำลังที่ต่ำกว่าดินผสมด้วยปูน OPC อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของปูนทั้งสองชนิด โดยปูน OPC มีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC ยกเว้นสารแคลเซียมออกไซด์ ที่ปูน HC มีค่ามากกว่าเล็กน้อย ส่งผลทำให้มีการพัฒนากำลังของปูน HC ช้ากว่าปูน OPC

2) ผลกระทบของปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มของปูนทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกัน อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มทำให้ค่า E_{50} และ q_u เพิ่มขึ้นตาม การเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ปูนทั้งสองมีค่าความต่างของค่า E_{50} และ q_u ลดลง

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u ของปูนทั้งสองชนิดสามารถแสดงออกเป็นสมการเส้นตรงและพบว่าปูนทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำผลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้งสองชนิดมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u พบว่าสามารถแสดงออกด้วยสมการ $E_{50} = 78.165(q_u)$ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์บนชั้นดินทรายได้ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย

การใช้ปูน HC เพื่อทดแทนปูน OPC ในงานปรับปรุงคุณภาพดินแบบยั่งยืนโดยเฉพาะกับวิธีการผสมลิกสามารถทำได้ เป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศเนื่องจากในงานผสมลิกต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ซอยล์ ซีเมนต์ คอลัมน์ จำกัด และ บริษัท เกษมดีชายน แอนด์ คอนสัลแทนท์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในการทำวิจัย

References

- [1] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. London, UK: Ministry of Transport; 1989.
- [2] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1999.
- [3] Public Works Research Institute. Manual of ALicc method for ground improvement. Tsukuba, Japan: Public Works Research Institute; 2007.
- [4] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1989.
- [5] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1999.
- [6] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 2007.
- [7] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1991.
- [8] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2002.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2009.
- [10] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 1999.
- [11] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 2004.
- [12] The Building Center of Japan. Design and quality control guideline of improved ground for building. Tokyo, Japan: The Building Center of Japan; 1997.

- [13] Ministry of Construction. Design and construction manual of liquefaction prevention techniques (draft). Joint Research Report. Tokyo, Japan: Ministry of Construction; 1999.
- [14] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Xi P. Vertical bearing capacity behaviour of single T-shaped soil–cement column in soft ground: laboratory modelling, field test, and calculation. *Acta Geotechnica* 2017;12(5):1077-88.
- [15] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Jing F. Variable-diameter deep mixing column for multi-layered soft ground improvement: Laboratory modeling and field application. *Soils and Foundations* 2019;59:633-43.
- [16] Pongsivasathit S, Petchgate W, Horpibulsuk S, Piyaphipat S. Composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a dam – design, construction and performance. *Case Studies in Construction Materials* 2021;15:e00771.
- [17] Coastal Development Institute of Technology. The deep mixing method – principle, design and construction. Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers; 2002.
- [18] Coastal Development Institute of Technology. The premixing method—principle, design and construction. London, United Kingdom: UK: A.A. Balkema Publishers; 2003.
- [19] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of deep mixing method for marine works. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [20] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of premixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [21] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of light-weight geomaterial. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [22] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of pneumatic flow mixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [23] Thai Cement Manufacturers Association. Hydraulic cement. Bangkok, Thailand: Thai Cement Manufacturers Association; 2022. (In Thai)
- [24] Petry TM, Little DN. Review of stabilization of clays and expansive soil in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2002;14(6):447-60.
- [25] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj TS. Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005;131(2):187-92.

- [26] Chaiyaput S, Manandhar S, Karki S, Ayawanna j. Characteristics of cement treated soil: A case study from soft Bangkok clay and red soil of Nepal. Lowland Technology International Journal 2020;22(2):178-91.
- [27] Suwanklang P, Chachamnan S, Suksiripattanapong C. Unconfined compressive strength and indirect tensile strength of crushed rock-cement waste improved with hydraulic cement. The 27th National Convention on Civil Engineering; 2002 Aug 24-26; Chiang Rai, Thailand. (In Thai)
- [28] Vinoth G, Moon S. W, Moon J, Ku T. Early strength development cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements. Soils and Foundations 2018;58(5):1200-11.
- [29] Lambe TW, Michaels AS, Moh ZC. Improvement of soil-cement with alkali metal compounds. Highway Research Board Bulletin 1959;241:67-108.
- [30] Moh ZC. Reaction of soil minerals with cement and chemicals. Highway Research Record 1965;86:39-61.
- [31] Wang TZ, Wang CM, Zhang ZM, Huang XH. Mechanical property of cement-stabilized soil with nano-CaO and reinforcement mechanism analysis. Chemical Engineering Transactions 2016;51:1195-200.
- [32] Soeurt R, Somna R, Chalee W. Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash. Annual Concrete Conference 11; 2016 Feb 17-19; Nakhon Ratchasima, Thailand. (In Thai)
- [33] Sarkar PK, Chao KC, Wong KN, Wang M. Evaluation of index properties affecting unconfined compressive strength of jet-grouted soil columns for Bangkok soils. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement; 2022 May 18-20; Berlin, Germany.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปุ่นณวิช รุ่งเรือง นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: punnawit_r@mail.rmutt.ac.th



วราพจน์ เพชรเกตุ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: warapot_p@mail.rmutt.ac.th



ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิริสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: supasit.p@en.rmutt.ac.th



สุธี ปิยะพิพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th



อติเทพ ศรีคงศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 Email: atitap.sri@kbu.ac.th

Article History:

Received: May 23, 2024

Revised: December 6, 2024

Accepted: December 6, 2024