



การปรับปรุงพฤติกรรมหลังการวิบัติของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

จักรารุช ตันสกุล*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล

พรเกษม จงประดิษฐ์ และ วริศรา คำสอน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน: โทรศัพท์ 08-6690-1114 อีเมล: jukkrawut.tun@rmutr.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.017

รับเมื่อ 25 มกราคม 2560 ตอรับเมื่อ 10 เมษายน 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์มวลเบาด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนสำหรับใช้ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน การศึกษาจะมุ่งเน้นการปรับปรุงจุดด้อยเรื่องการแตกหักง่ายและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้วัสดุ โดยทำการทดสอบตัวอย่างแบบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามีสัดส่วนปริมาตรเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ต่างกันในส่วนร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 กับดินซีเมนต์มวลเบาที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 100, 150 และ 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างที่ใช้มีหน่วยน้ำหนัก 8, 10 และ 12 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบนี้ได้ใช้เส้นใยยาว 6 และ 12 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า การใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีนทำให้พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวและค่าความเค้นคงค้างตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยและอัตราการลดลงของการสูญเสียความเค้นหลังจุดวิบัติ นอกจากนี้ยังพบว่า อิทธิพลการเพิ่มของปริมาณและความยาวเส้นใยมีผลอย่างไม่มีนัยต่อการเพิ่มของค่ากำลังรับแรงอัด

คำสำคัญ: เส้นใยโพลีโพรพิลีน, การปรับปรุงคุณภาพดิน, ดินซีเมนต์มวลเบา, ความเค้นคงค้าง

การอ้างอิงบทความ: จักกรารุช ตันสกุล, พรเกษม จงประดิษฐ์ และ วริศรา คำสอน “การปรับปรุงพฤติกรรมหลังการวิบัติของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 37-49, ม.ค.-มี.ค. 2561.

Improvement of Post Peak Behavior of Light Weight Foam Soil with Polypropylene Fiber

Jukkrawut Tunsakul*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang KlaiKangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand

Pornkasem Jongpradist and Warisara Kumsorn

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author: Tel: 08-6690-1114, E-mail: jukkrawut.tun@rmutr.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.017

Received 25 January 2017; Accepted 10 April 2017; Published online: 17 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

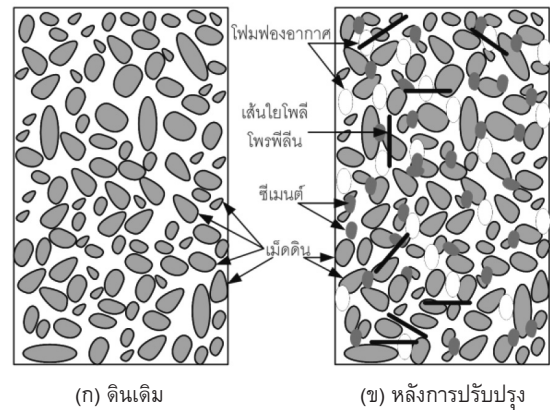
This paper presents the improvement of lightweight foam mixed soil (LFS) with polypropylene fibers in soft clay area. The study emphasizes the reducing brittle property and increasing the ductile behavior in material. A series of the unconfined compression test was conducted on LFS samples with different polypropylene fibers 0, 1, 2, 3 and 4%, cement content 100, 150 and 200 kg/m³. The unit weight of samples was set with 8, 10 and 12 kN/m³, and different fibers lengths were 6 and 12 mm. The curing time of 7 and 28 days were conducted, respectively. The results found that the adding fibers seem better performance on the deformation characteristic where the post-peak behavior could be enhanced as by increasing of the toughness and the residual strength with increasing fiber content, and the reduction rate on loss of post-peak. However, the influence of fiber content and the length of fiber has insignificant effect on the increasing the value of unconfined compressive strength.

Keywords: Polypropylene Fibers, Soil Improvement, Lightweight Soil Cement, Residual Strength

Please cite this article as: J. Tunsakul, P. Jongpradist, and W. Kumsorn, "Improvement of post peak behavior of light weight foam soil with polypropylene fiber," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 37-49, Jan.-Mar. 2018 (in Thai).

1. บทนำ

จากปัญหาเรื่องการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางโดยเฉพาะเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 2–20 เมตร กอปรกับดินเหนียวอ่อนมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างข้างเคียง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนก่อนการก่อสร้างหรือปรับปรุงระบบสาธารณูปโภค เพื่อป้องกันปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นตามมา การเพิ่มประสิทธิภาพของการรับกำลังของดินเดิมหรือลดการทรุดตัวอาจจะทำได้โดยการใส่วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) การบดอัด (Compaction) การสูบน้ำออกจากดินเหนียว (Dewatering) รวมทั้งการผสมปูนซีเมนต์ ซึ่งวิธีผสมปูนซีเมนต์นั้น นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาผลกระทบจากการปรับปรุงดินเหนียวด้วยซีเมนต์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ [1]–[5] นอกเหนือจากแนวความคิดปรับปรุงดินเดิมให้รับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ยังมีอีกแนวคิดที่ลดน้ำหนักบรรทุกกับดินเดิมลง จึงมีการนำเทคโนโลยีวัสดุมวลเบามาใช้ก่อสร้าง เทคโนโลยีวัสดุมวลเบา นั้นยังสามารถเพิ่มเสถียรภาพของดิน ลดการทรุดตัวของโครงสร้าง ลดแรงดันของดินซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการทรุดตัว ดังนั้นการใช้ดินซีเมนต์มวลเบาจึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินซีเมนต์มวลเบาได้มีการให้ความสำคัญเรื่องการเพิ่มเสถียรภาพของดินโดยการทำวัสดุที่มีความแข็งแรงขึ้นและน้ำหนักเบา [6]–[10] โดยการผสมปูนซีเมนต์และโฟม (ฟองอากาศ) จึงทำให้วัสดุผสมนี้มีความเปราะ (Brittleness) ที่สูงซึ่งเป็นข้อด้อยของวัสดุผสมนี้ คุณสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) โดยที่โครงสร้างไม่พังแบบทันทีทันใด ยังคงสามารถรับแรงได้ถึงแม้ผ่านการรับแรงจนถึงค่ารับแรงสูงสุดแล้วเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรพิจารณาเพื่อมั่นใจถึงเสถียรภาพต่ออุบัติเหตุจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมหรือแรงที่ไม่คาดคิดในกระบวนการก่อสร้าง หรือแม้กระทั่งเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การใช้เส้นใยสังเคราะห์สามารถเพิ่มความสามารถในการเพิ่มความเหนียวได้ โดยเฉพาะเส้นใยโพลีโพรพิลีนซึ่งมีค่าต้านทาน



รูปที่ 1 ภาพเชิงแนวคิดแสดงส่วนประกอบของตัวอย่าง

แรงดึงที่สูง ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านแรงดัด (Flexural Strength) [5], [11] และการต้านทานแรงอัด (Peak Compressive Strength) [6], [12] ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนร่วมกับดินซีเมนต์มวลเบาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของความเหนียวลดความเปราะ ซึ่งจะส่งผลให้การออกแบบก่อสร้างปลอดภัยและช่วยลดงบประมาณในการซ่อมบำรุงอีกด้วย

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุหลักในการทดลอง ได้แก่ ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ โฟมฟองอากาศและเส้นใยโพลีโพรพิลีน ซึ่งแต่ละส่วนถูกคาดหวังเพื่อทำหน้าที่ดังนี้ การผสมปูนซีเมนต์เพื่อให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงขึ้น ผสมโฟมฟองอากาศเพื่อให้น้ำหนักเบา และใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีนเพื่อลดความเปราะและเพิ่มความเหนียว ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวได้แสดงเป็นภาพเชิงแนวคิดแสดงในรูปที่ 1

2.1 วัสดุในงานวิจัย

2.1.1 ดินเหนียว

ดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพมหานคร ที่ความลึก 3–5 เมตร ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง ดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.67 ชัดจำกัดความเหลว (L.L.) 68.80 ชัดจำกัดพลาสติก (P.L.) 56.18 และดัชนีความเหนียว (P.I.) 12.62



(ก) เส้นใยโพลีโพรพิลีนจากโรงงาน (ก่อนตัด)



(ข) เส้นใยโพลีโพรพิลีนก่อนการผสม (หลังตัด)

รูปที่ 2 ลักษณะเส้นใยโพลีโพรพิลีน

2.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C4A) ซึ่งปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14

2.1.3 โฟม

ในการผลิตโฟม ได้ใช้โฟมฟองอากาศที่เกิดจากการใช้น้ำยาเคมีผสมน้ำสะอาด ด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำยาเคมีกับน้ำ 1 : 19 [12] โดยวิธีการเตรียมโฟมฟองอากาศได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

2.1.4 เส้นใยโพลีโพรพิลีน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนจากผู้ผลิตที่ยาว 58 มิลลิเมตร [รูปที่ 2 (ก)] ซึ่งในการทดลองได้มีการเตรียมตัวอย่างเส้นใยยาว 6 และ 12 มิลลิเมตร [รูปที่ 2 (ข)] เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวเส้นใย โดยสัดส่วนปริมาตร

ที่ร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยที่คุณสมบัติของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เลือกใช้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยโพลีโพรพิลีน [5]

ความถ่วงจำเพาะ	0.91
รูปร่าง	Fully crimped
ความยาว (มิลลิเมตร)	58
หน้าตัด (มิลลิเมตร)	Rect.1.0 x 0.5
อัตราส่วนรูปร่าง (l/d)	52
แรงดึง (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)	450

2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 วิธีเตรียมดินเหนียว

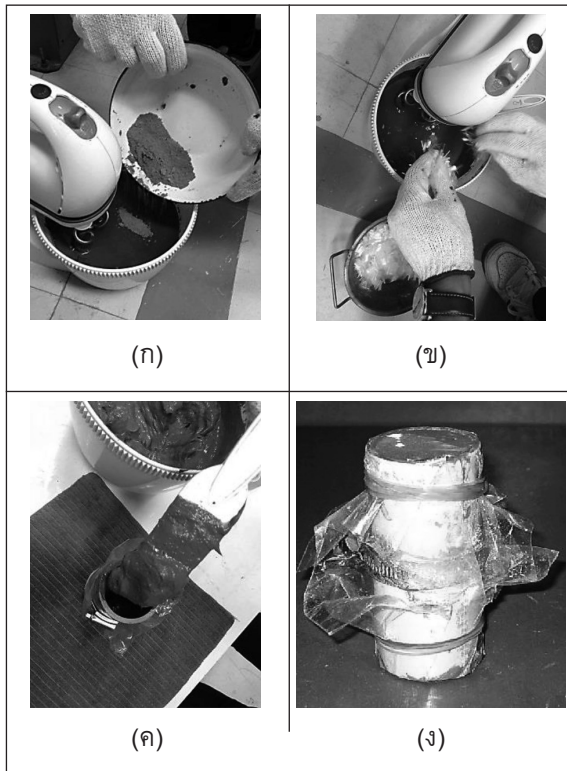
ก่อนเริ่มดำเนินการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบดินเหนียวอ่อนจะต้องถูกตีควน (Remolding) จนมีลักษณะเป็นน้ำโคลน ในการตีควนจะเพิ่มปริมาณน้ำจนมีค่าปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 300

2.2.2 วิธีการเตรียมโฟม

ขั้นตอนการเตรียมโฟมจะเริ่มจากการผสมน้ำยาเคมีกับน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วน 1 : 19 [12] หลังจากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวเทลงในเครื่องทำโฟมโดยเครื่องทำโฟมจะมีการอัดแรงดันที่ 600 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร เพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักของโฟมที่ 0.5 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร [7]

2.2.3 วิธีการผสมตัวอย่าง

การผสมตัวอย่างเริ่มต้นโดยการชั่งน้ำหนักของดินและปูนซีเมนต์ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ นำมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ในขณะที่ผสมส่วนผสมข้างต้นให้เข้ากันโดยเครื่องผสมประมาณ 6 นาที โฟมจะถูกเตรียมและผสมเข้าไปด้วยกับส่วนผสมข้างต้นจนเนื้อโฟมเข้ากันดีกับส่วนผสมข้างต้น เมื่อทุกอย่างผสมเข้ากันดีแล้วเส้นใยโพลีโพรพิลีนจะถูกผสมในขั้นตอนสุดท้าย [รูปที่ 3 (ข)] อย่างไรก็ตามก่อนการผสมหรือเตรียมตัวอย่างทุกครั้ง ค่าหน่วยน้ำหนักของโฟมและตัวอย่างจะถูกตรวจสอบก่อนผสมทุกครั้ง หลังจากส่วนผสมทุกอย่างเข้ากันดีแล้ว ก็จะนำใส่แบบหล่อตัวอย่างดังรูปที่ 3 (ค) ซึ่งเป็นแบบหล่อ PVC ที่มี



รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมตัวอย่าง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 ซม. สูง 10 ซม. แบบหล่อตัวอย่างได้ใช้ถุงพลาสติกห่อหุ้มตัวอย่างเพื่อควบคุมปริมาณความชื้นดังแสดงในรูปที่ 3 (ง) ในการบรรจุตัวอย่างลงแบบหล่อจะมีการควบคุมหน่วยน้ำหนักตามค่าที่ตั้งไว้ เมื่อครบระยะเวลาบ่ม ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบหล่อแล้วนำไปทดสอบ

2.2.4 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดและแผนการทดสอบ

หลังจากตัวอย่างได้บ่มเรียบร้อยแล้วจะถูกนำออกมาจากแบบโดยได้รับการบรควนน้อยที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของหน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และความยาวของเส้นใย รวมถึงระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ดังสรุปได้ในตารางที่ 2



รูปที่ 4 ตัวอย่างหลังจากถอดแบบหล่อ

ในงานวิจัยนี้การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดนั้นจะใช้เครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกนโดยใช้ความเร็วในการกดที่ร้อยละ 1.14 ของความสูงตัวอย่าง/นาที [13]

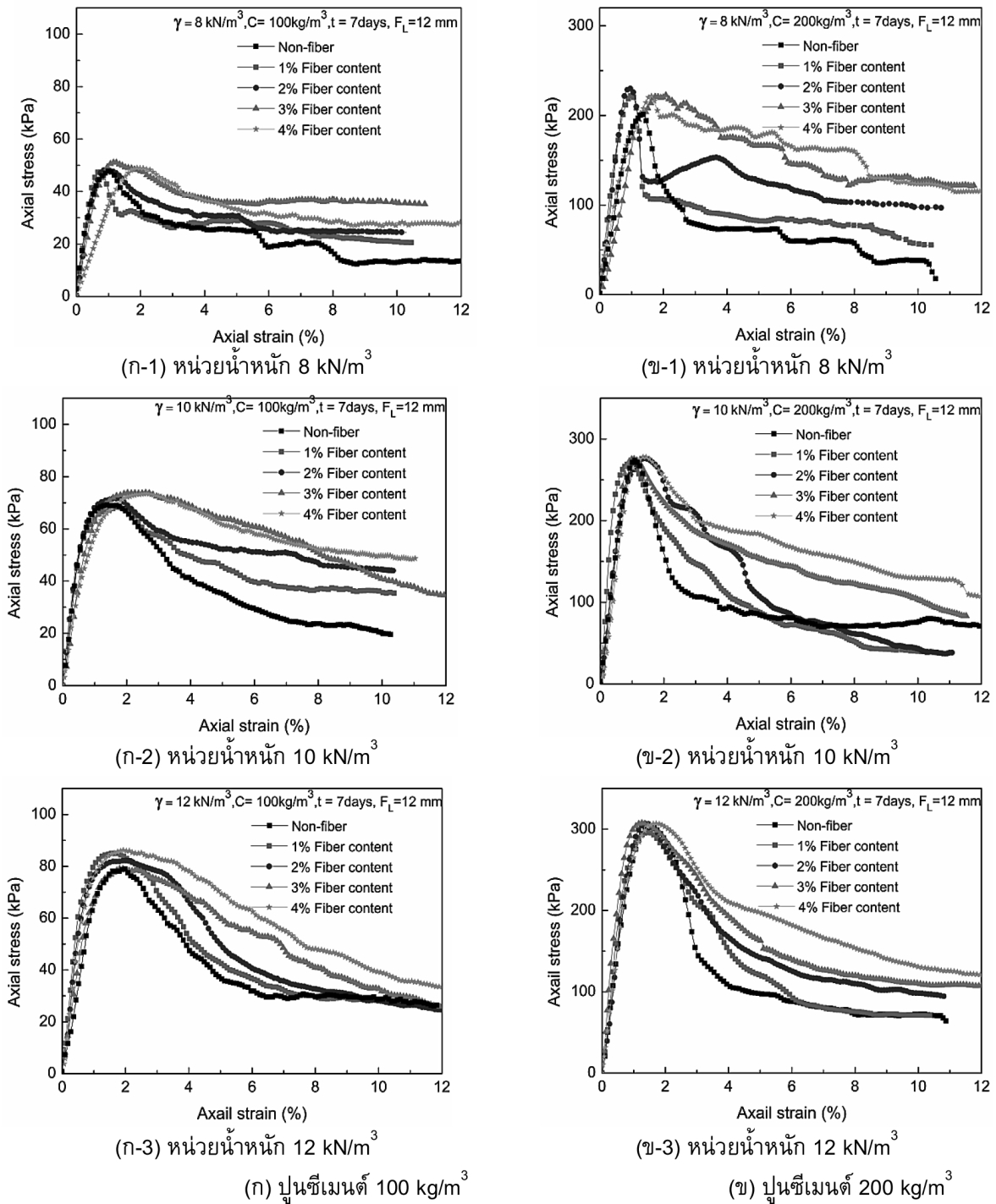
ตารางที่ 2 แผนการทดสอบ

หน่วยน้ำหนัก	ปริมาณปูนซีเมนต์	ปริมาณเส้นใย	ความยาวเส้นใย	เวลาบ่ม
(kN/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(mm)	(Days)
8	100,150,200	1,2,3,4	6, 12	7, 28
10	100,150,200	1,2,3,4	6, 12	7, 28
12	100,150,200	1,2,3,4	6, 12	7, 28

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 พฤติกรรมของความเค้นและความเครียด

ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดได้แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปเป็นตัวอย่างผลการทดสอบที่มีการแปรเปลี่ยนปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 ตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 8, 10 และ 12 kN/m³ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 100 และ 200 kg/m³ ความยาวของเส้นใย 12 มิลลิเมตร และระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน ตามลำดับ จากรูปที่ 5 พบว่าค่าความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดจนถึงจุดที่มีความเค้น



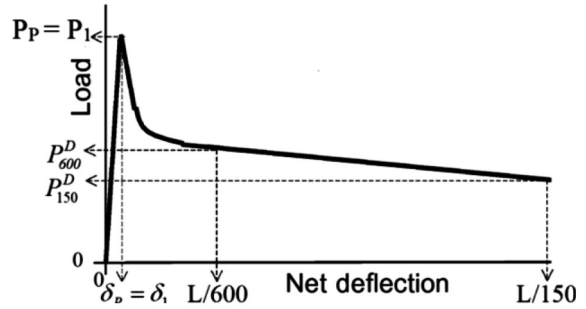
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนยาว 12 มิลลิเมตร ระยะบ่มที่ 7 วัน

สูงสุดหลังจากนั้นทุกกรณีศึกษาจะมีลักษณะความเค้นลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเครียด (Softening Curve) โดยที่ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วงความเครียดร้อยละ 0.5-2 หลังจากนั้นความเค้นจะมีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดในแนวแกน ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากกรณีที่ไม่มีการใส่เส้นใย นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจะมีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.5 เท่าของความเค้นสูงสุดที่ความเครียดประมาณร้อยละ 3 ซึ่งพอที่จะบ่งชี้ว่าตัวอย่างมีความเปราะ อย่างไรก็ตามถึงแม้ตัวอย่างจะถูกผสมเส้นใยเข้าไปในช่วงร้อยละ 1-2 พฤติกรรมการลดลงของความเค้นแบบทันทีทันใด (Sharp Softening) ยังคงปรากฏอยู่ดังแสดงในรูปที่ 5 อย่างไรก็ตาม กรณีที่มีการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 3-4 พบว่าลักษณะของความเค้นที่ลดลงอย่างทันทีทันใดได้ถูกปรับปรุงให้มีความเหนียวที่มากขึ้น กล่าวคืออัตราการลดลงของค่าความเค้นมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดอย่างชัดเจนซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่ไม่ใส่เส้นใยในช่วงร้อยละ 1-2

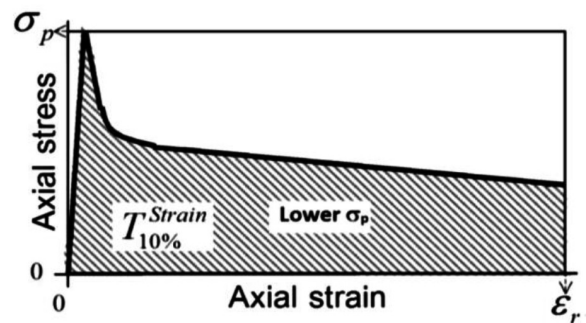
โดยปกติแล้วความสามารถในการดูดซับพลังงานเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สามารถบรรเทาความเสียหายที่เกิดจากน้ำหนักรวดศาสตร์ ดังนั้นเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของปริมาณเส้นใยต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน (ความเหนียว) ของดินซีเมนต์มวลเบาแนวความคิดของอัตราส่วนการดัดเทียบเท่า (Equivalent Flexural Strength Ratio, $R_{T,150}^D$) ได้ถูกประยุกต์มาเพื่อแสดงประสิทธิภาพในการเพิ่มความเหนียวในครั้งนี้ โดยปกติค่า $R_{T,150}^D$ เป็นค่าที่แสดงลักษณะความเหนียวของตัวอย่างโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟระหว่างน้ำหนักรวดที่ระยะแอนตัวสุทธิตั้งแต่เริ่มการทดสอบถึงจุดสุดท้ายของการทดสอบซึ่งจะเป็นค่าความเครียดที่ร้อยละ 10 จะนิยามว่า ความเครียดคงค้าง (Residual Strain, ϵ_r) ซึ่งจะถูกเปรียบเทียบให้เหมือนกับค่า $L/150$ ในการทดสอบแรงดัด (ASTM C 1609-10) ดังแสดงในรูปที่ 6

จาก ASTM C 1609-10 ได้นิยามค่าของอัตราส่วนการดัดเทียบเท่าดังแสดงในสมการที่ (1)

$$R_{T,150}^D = \frac{T_{150}^D}{P_1(L/150)} \times 100\% \quad (1)$$



รูปที่ 6 น้ำหนักกับระยะแอนตัวสุทธิต่อการทดสอบแรงดัด (ASTM C1609-10)



รูปที่ 7 สมมุติฐานของอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่า $R_{T,10\%}^{Strain}$

เมื่อ P_1 คือค่ากำลังสูงสุดตอนแรกซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวแทน σ_p ในรูปที่ 7 $L/150$ คือการแอนตัวสุดท้ายของการทดสอบได้ใช้ตัวแทนค่าความเครียดคงค้างในรูปที่ 7 และ T_{150}^D คือพื้นที่ใต้กราฟของกราฟน้ำหนักกับระยะแอนตัวสุทธิตั้งแต่เริ่มการทดสอบถึงจุดสุดท้ายของการทดสอบหรือที่การแอนตัวที่ $L/150$ ซึ่งในการแสดงผลในครั้งนี้ได้ใช้พื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่เริ่มการทดสอบถึงจุดสุดท้ายที่ค่าความเครียดคงค้างเช่นเดียวกัน

ด้วยแนวความคิดดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อแสดงคุณสมบัติทางด้านความเหนียวของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโดยใช้ตัวแทนคือค่า อัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่า (Equivalent Ductility Ratio, $R_{T,10\%}^{Strain}$) ซึ่งได้แสดงในสมการที่ (2)

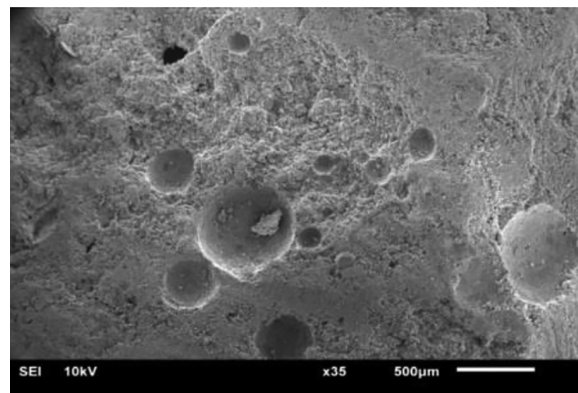
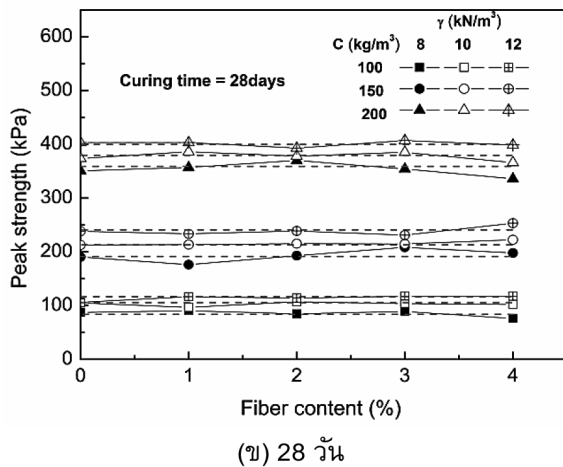
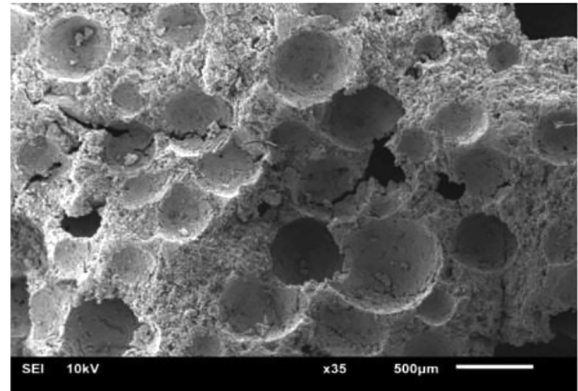
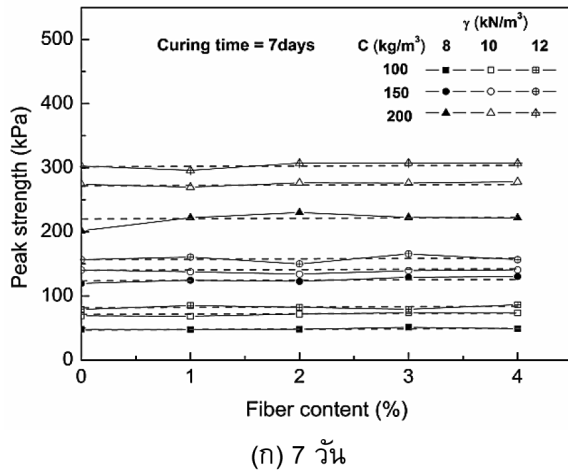
$$R_{T,10\%}^{Strain} = \frac{T_{10\%}^{Strain}}{\sigma_p \times 10} \times 100\% \quad (2)$$

ค่าอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่าชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางด้านความเหนียวของดินซีเมนต์มวลเบาภายใต้การให้แรงในแนวแกนจนถึงค่าความเครียดที่ร้อยละ 10 ได้แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นตัวแทนพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าความเค้นและความเครียด จากค่าในตารางที่ 3 จะเห็นว่า กรณีไม่ใส่เส้นใย $R_{7,10\%}^{Strain}$ มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์และเวลาการบ่มแต่จะมีค่า $R_{7,10\%}^{Strain}$ ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนัก นอกจากนี้ได้สังเกตพบว่าในกรณีที่ใส่เส้นใย ค่าอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่าน้อยที่สุดจะแสดงให้เห็นเมื่อตัวอย่างมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงและค่าหน่วยน้ำหนักน้อย ($C = 200 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความเปราะของตัวอย่างและมีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับดินซีเมนต์ที่ไม่ดี

เนื่องจากตัวอย่างมีช่องว่างที่มาก อย่างไรก็ตามการใส่เส้นใยสามารถปรับปรุงให้วัสดุมีความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่า นอกจากนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยทำให้อัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสูงสุดของอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่าเกือบทุกกรณี จะแสดงให้เห็นที่ตัวอย่างมีการใส่เส้นใยร้อยละ 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงและค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำ การใส่เส้นใยที่ร้อยละ 4 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านความเหนียวอย่างมาก โดยสังเกตจากค่าอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ใส่เส้นใย โดยในตารางที่ 3 ยังได้สรุปร้อยละการเพิ่มเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใส่เส้นใยในทุกกรณี

ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนความเหนียวเทียบเท่า

Curing Time (days)	Density (kN/m ³)	Cement Content (kg/m ³)	Equivalent Ductility Ratio (%)					Percent Increase (%)			
			Fiber Content (%)					Fiber Content (%)			
			0	1	2	3	4	1	2	3	4
7	8	100	51.12	57.26	62.79	74.54	67.36	12.02	22.84	45.82	31.78
		150	43.93	60.58	65.34	70.92	67.28	55.63	48.75	61.45	53.16
		200	38.93	42.48	54.85	69.51	73.87	9.13	40.90	78.58	89.78
	10	100	55.32	67.85	74.30	79.01	79.16	22.65	34.30	42.82	43.08
		150	47.56	54.06	59.62	63.61	78.21	13.67	25.35	33.75	64.44
		200	39.00	41.50	47.37	57.69	63.98	6.40	21.45	47.91	64.04
	12	100	54.91	57.10	62.88	70.04	73.39	3.99	14.51	27.55	33.65
		150	55.73	60.34	66.52	64.88	70.13	8.28	19.37	16.42	25.84
		200	42.90	48.20	52.48	58.17	64.04	12.36	22.33	35.58	49.27
28	8	100	34.79	50.35	60.54	64.35	61.23	44.70	73.99	84.94	75.99
		150	37.40	53.74	53.55	63.46	56.50	43.68	43.19	69.68	51.08
		200	31.08	41.78	56.35	63.25	77.43	34.41	81.30	103.50	149.14
	10	100	38.32	59.18	58.41	67.70	73.76	54.44	52.44	76.67	92.50
		150	48.91	54.17	59.24	67.69	66.88	10.77	21.12	38.40	36.75
		200	41.12	46.65	53.92	54.83	61.61	13.43	31.12	33.33	49.83
	12	100	50.10	51.91	56.19	61.52	62.09	3.62	12.17	22.80	23.94
		150	52.89	56.01	55.29	60.67	59.79	5.89	4.54	14.70	13.05
		200	40.46	45.49	54.12	53.75	60.03	12.43	33.77	32.85	48.37



รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนต่อค่ากำลังสูงสุดที่หน่วยน้ำหนักต่างกันของระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

3.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ

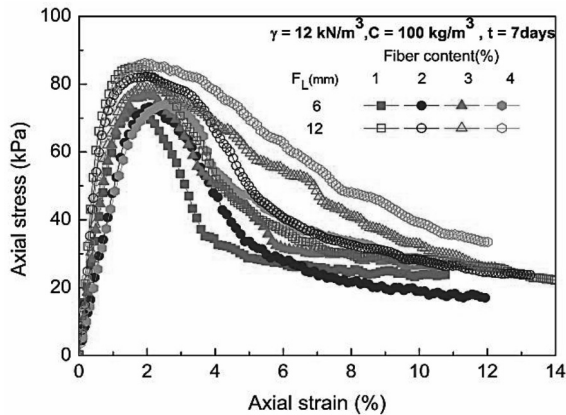
ในงานวิจัยนี้ได้มีการแปรเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เพื่อการเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวต่อการรับกำลังสูงสุด ความเค้นคงค้าง และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (ความเหนียว) ของตัวอย่าง

3.2.1 การรับกำลังสูงสุด

ในหัวข้อนี้ได้แสดงตัวอย่างผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนยาว 12 มิลลิเมตร ผลการศึกษาได้แสดงเป็น

รูปที่ 9 โครงสร้างระดับไมโครของตัวอย่างหน่วยน้ำหนัก 8 kN/m³ และ 12 kN/m³

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยที่หน่วยน้ำหนักที่ 8, 10 และ 12 kN/m³ ของที่ระยะบ่มที่ 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าค่ากำลังการรับแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่ม ซึ่งอิทธิพลของหน่วยน้ำหนักได้ส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลงจะสังเกตได้จากรูปที่ 9 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นรูปจากการวิเคราะห์ SEM จากรูปที่ 9 ได้แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบโครงสร้างระดับไมโคร ของตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนัก 8 kN/m³ และ 12 kN/m³ ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่หน่วยน้ำหนัก 8 kN/m³ มีลักษณะของช่องว่างมากกว่าตัวอย่างที่หน่วยน้ำหนัก



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีพรพิลีนที่มีความยาว 6 และ 12 มิลลิเมตร

12 kN/m³ นอกจากนั้นจากรูปที่ 8 จะเห็นได้ชัดเจนว่าอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ได้ส่งผลต่อแรงยึดเกาะ (Cementation) อย่างมากซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8]–[10] สำหรับอิทธิพลของปริมาณเส้นใยในการศึกษาในครั้งนี้พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในดินซีเมนต์มวลเบา ซึ่งจากผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม่ส่งผลต่อค่ากำลังการรับแรงอัดสูงสุด

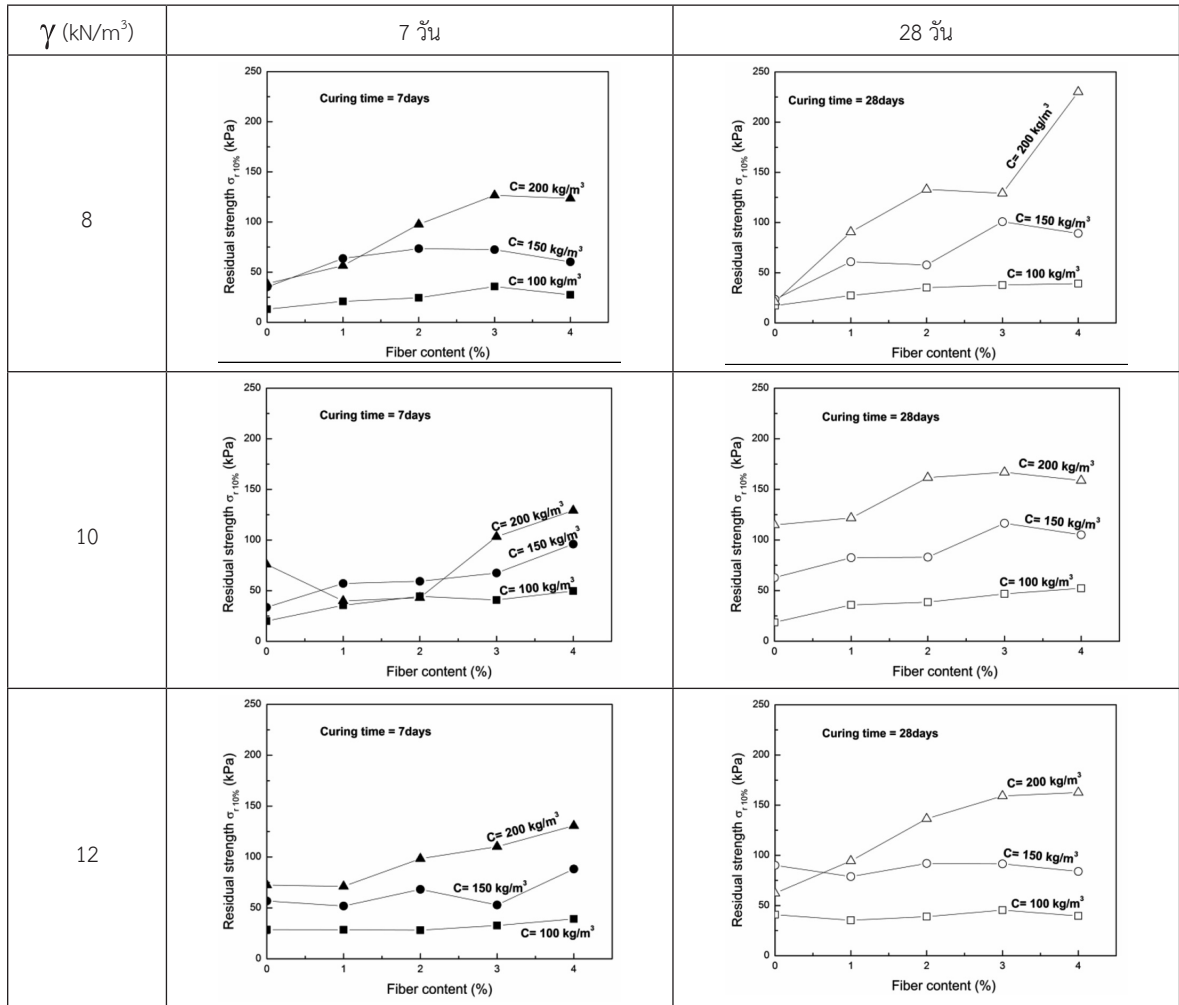
โดยปกติตามหลักการพื้นฐานของการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใส่เส้นใย เส้นใยที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยและดิน [14] ซึ่งวัสดุดินซีเมนต์มวลเบาที่มีน้ำหนักที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากมีจำนวนช่องว่าง (Void Ratio) จำนวนมากซึ่งแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 2.2–3.3 [7], [15] ดังนั้นระหว่างการรับน้ำหนักพฤติกรรมการเกิดแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยและดินนั้นค่อนข้างเกิดได้ยาก นอกจากนั้นในการศึกษาในครั้งนี้ความยาวของเส้นใยที่ 6 และ 12 มิลลิเมตร ถูกใช้ในการผสมตัวอย่างจากการใช้เส้นใยที่มีความยาวต่างกัน ตัวอย่างผลการทดสอบที่หน่วยน้ำหนัก 12 kN/m³ ปูนซีเมนต์ 100 kg/m³ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ถูกใช้ในการแสดงผลในรูปที่ 10

จากผลการทดสอบที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันพบว่ากรณีที่เส้นใยที่ยาว 12 มิลลิเมตร จะมีค่าความเค้นสูงสุดมากกว่ากรณีเส้นใยที่ยาว 6 มิลลิเมตรเล็กน้อย ซึ่งเชื่อได้ว่าเส้นใยที่ยาว 12 มิลลิเมตร ทำให้สามารถเกิดแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยและดินได้มากกว่า

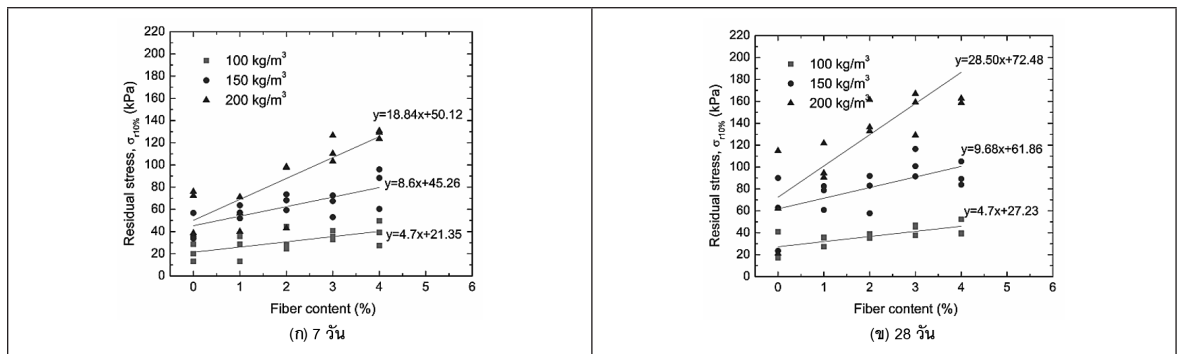
3.2.2 การรับกำลังค้ำ

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ถึงแม้วัสดุจะวิบัติไปแล้วแต่ยังคงรับกำลังได้คือความเค้นค้ำ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในการที่จะใช้เป็นตัวดูดซับแรงดันแผ่นดินไหว ในการศึกษาครั้งนี้ความเครียดที่ร้อยละ 10 จะถูกนิยามว่าความเครียดค้ำ (ϵ_c) ดังนั้นค่าความเค้นค้ำจะถูกอ่านจากค่าความเครียดค้ำที่ร้อยละ 10 ค่าของความเค้นค้ำได้ถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นค้ำกับปริมาณเส้นใยที่หน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์และเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ค่าความเค้นค้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่ม นอกจากนี้ค่าความเค้นค้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยด้วย ค่าความเค้นค้ำมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงการเพิ่มค่าปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 3–4 ค่าความเค้นค้ำมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเส้นใยที่ไม่มีปริมาณเส้นใย ตามผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยสามารถช่วยควบคุมอัตราการกระจายพลังงาน (Energy Release) ดังนั้นการใส่เส้นใยสามารถรับน้ำหนักกระทำได้อีกหลังจากที่รับน้ำหนักสูงสุดไปแล้ว [5]

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยและดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ค่าความเค้นค้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [11] สำหรับอิทธิพลของหน่วยน้ำหนักต่อค่าความเค้นค้ำพบว่า เมื่อค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นค้ำค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นที่ไม่ชัดเจนเพื่อเป็นการแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อค่าความเค้นค้ำ ในรูปแบบสมการทำนายค่าความเค้นค้ำของแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่างกันของที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่ายังมีการกระจายตัวของข้อมูล



รูปที่ 11 อธิพลของปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีนยาว 12 มิลลิเมตรต่อค่าความเค้นคงค้างที่หน่วยน้ำหนักต่างกันของระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน



รูปที่ 12 ตัวอย่างสมการทำนายค่ากำลังอัดคงค้างคงค้างจากปริมาณเส้นใยที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ของระยะบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

ในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของหน่วยน้ำหนักที่ต่างไปแต่อย่างไรก็ตามข้อมูลดังกล่าวมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นคงค้างที่ชัดเจน เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ใช้เป็นตัวแทนในรูปที่ 12 (ก) และ (ข) ตามลำดับจากการสังเกตอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความชันของกราฟทั้งอายุการบ่ม ที่ 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความชันอยู่ในช่วง 2–3 เท่า

5. สรุป

บทความนี้ได้ทำการปรับปรุงดินซีเมนต์มวลเบาให้มีคุณสมบัติที่เหนียวมากขึ้นโดยการใส่เส้นใยสังเคราะห์ชนิดโพลีโพรพิลีน โดยในการศึกษาได้ทำการศึกษาโดยการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ หน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยและเวลาในการบ่ม ได้ทำการทดสอบภายใต้การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ซึ่งจากผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพดังนี้

1. ลักษณะการเสียรูปของดินซีเมนต์มวลเบาที่ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีลักษณะที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นคงค้างและอัตราการลดลงของค่าความเค้นจะมีค่าที่ค่อยๆ ลดลงเมื่อค่าความเครียดเพิ่มขึ้น ดังนั้นพฤติกรรมแบบเปราะของดินซีเมนต์มวลเบาสามารถแก้ปัญหาได้โดยการใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีน

2. ดินซีเมนต์มวลเบาใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีนจะแสดงประสิทธิภาพด้านความเหนียวออกมามากที่สุดเมื่อหน่วยน้ำหนักมีค่าน้อยที่ปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าสูง

3. ค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดยังคงขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของการผสมตัวอย่างเช่น หน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่ม ซึ่งมาจากแรงยึดเกาะที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเส้นใยโพลีโพรพิลีน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการ

ตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 6111) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Porbaha, “State of the art in deep mixing technology, Part I. Basic concepts and overview,” *Ground Improvement*, vol. 2, pp. 81–92, 1998.
- [2] A. Porbaha, H. Tanaka, and M. Kobayashi, “State of the art in deep mixing technology, Part II. Applications,” *Ground Improvement*, vol. 2, pp. 125–139, 1998.
- [3] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T.S. Nagaraj, “Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams’ law as a basis,” *Geotechnique*, vol. 53, no. 4, pp. 439–444, 2003.
- [4] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T. S. Nagaraj, “Clay–water/cement ratio identity of cement admixed soft clay,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 2, pp. 187–192, 2005.
- [5] P. Sukontasukkul and P. Jamsawang, “Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column,” *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 201–205, 2012.
- [6] C. Teerawattanasuk, P. Voottipruex, and S. Inthapichai, “Strength characteristic of foam cement admixed clay,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 2, 2014 (in Thai).
- [7] Y. Hayashi, “Mechanical properties of air-cement-treated soils,” *Ground Improvement*, vol. 6, no. 1, pp. 69–78, 2002.
- [8] S. Jitprasert, “Unconfined compression strength



- of air-cement treated soil,” M. S. thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut’s university of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2005.
- [9] T. Sittibun, “Strength and one-dimensional-deformation behaviors of air cement treated soil, M.S. thesis, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2007.
- [10] A. Songprom, “Small strain behavior of air-cement treated soil,” M. S. thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2011.
- [11] P. Jamsawang, P. Voottipruex, and S. Inthapichai, “Improvement of the bending stress of polypropylene fiber-reinforced compacted cement sand,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 1, 2014 (in Thai).
- [12] HGS Research Consortium, “High grade soil (HGS) - Foam mixed stabilized soil method,” Public work research institute (PWRI), Japan, 2005.
- [13] G. A. Lorenzo, “Fundamentals of cement-admixed clay in deep mixing and its behavior as foundation of reinforced embankment on subsiding soft clay ground,” Doctoral of Engineering thesis, Asian Institute of Technology, Pathum Thani, Thailand, 2005.
- [14] A. S. Muntohar, “Influence of plastic waste fibers on the strength of lime-rice husk ash stabilized clay soil,” *Civil Engineering Dimension*, vol. 11, no. 1, pp. 32–40, 2009.
- [15] J. Yajima, S. Maruo, and S. Ogawa, “Influence of foam volume ratio on mechanical properties in light-weight soil,” *Journal of Geotechnical Engineering*, no. 511/IE-30, pp. 173–180, 1995.

