

การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์มวลเบาเสริมเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ สำหรับวัสดุถมคอสะพาน

Engineering properties investigation of lightweight cement soil incorporating steel fibers from waste tires for application as a bridge approach filled material

กฤษฎา ศิริบุญ^{1,*} รัชศิริ สุขรักษ์² พานิช วุฒิพฤษ³ อธิพิพล มีผล⁴ ศิริพัฒน์ มณีแก้ว⁵ และ ชินกฤต อุ่นใจ⁶

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: FeeKSP@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์มวลเบาด้วยเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel waste fiber, SW) สำหรับใช้เป็นวัสดุถมคอสะพานในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน โดยทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติด้านการรับแรงอัดของดินซีเมนต์มวลเบาด้วยเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ ได้แก่ การทดสอบตัวอย่างแบบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด กำหนดค่าหน่วยน้ำหนักดินซีเมนต์มวลเบา 6, 8 และ 10 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สัดส่วนเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ร้อยละ 1, 2, และ 3 และปริมาณปูนซีเมนต์ 150, 200 และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ทำให้พฤติกรรมด้านกำลังและการเสียรูปของซีเมนต์มวลเบาดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวและค่าความเค้นคงค้างตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยและอัตราการลดลงของการสูญเสียความเค้นหลังจุดวิกฤติ

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์มวลเบา, เส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์, ดินเหนียวอ่อน

Abstract

This study presents an approach to improving the properties of lightweight cemented soil for use as an embankment material at bridge approaches in soft clay areas by incorporating steel waste fiber (SW) recycled from used tires. The objective is to enhance the material's strength and ductility. The unconfined compressive strength (UCS) is carried out. Key parameters were varied, including the unit weight of the lightweight cemented soil (6, 8, and 10 kN/m³), steel fiber content (1%, 2%, and 3% by weight), and cement content (150, 200, and 250 kg/m³), with curing periods of 7 and 28 days. The results demonstrate that the addition of SW fibres significantly improves the deformation behaviour of the material, particularly in terms of increased toughness and residual strength after peak load. Furthermore, incorporating fibers effectively reduces the post-peak stress loss, indicating enhanced ductility and crack resistance. These findings suggest that the developed material has strong

potential for structural applications, especially as a lightweight backfill material for bridge approaches in soft ground conditions.

Keywords: lightweight cemented soil, steel fibers from waste tires, soft clay

1. คำนำ

ปัจจุบัน การก่อสร้างถนนในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยมักก่อสร้างบนชั้นดินเดิมซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อน ทำให้ต้องขุดหน้าดินออกและถมด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม [1] วัสดุเหล่านี้มักมีน้ำหนักมาก จึงก่อให้เกิดแรงกดบนชั้นดินเดิม ส่งผลให้เกิดการทรุดตัว โดยเฉพาะบริเวณคอสะพานหรือตอม่อในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน ซึ่งมักเกิดการทรุดไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของผู้ใช้เส้นทาง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาวัสดุทดแทนที่มีน้ำหนักเบาแต่ยังคงความแข็งแรง เพื่อลดผลกระทบจากการทรุดตัวและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษาการใช้วัสดุมวลเบา เช่น ดินซีเมนต์มวลเบา (Lightweight Cemented Soil) เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานถมคันทางอย่างต่อเนื่องและแพร่หลาย [2-6] โดยวัสดุชนิดนี้มีข้อได้เปรียบด้านน้ำหนักเบาและให้กำลังรับแรงอัดที่เพียงพอต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ดินซีเมนต์มวลเบาอาจมีลักษณะเชิงกลที่เปราะ (brittle behavior) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการรับแรงในระยะยาว เพื่อเพิ่มความเหนียว (toughness) และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ จึงมีการนำเส้นใยเสริมแรงประเภทต่าง ๆ [2-3] มาผสมในกระบวนการผลิต เพื่อช่วยกระจายแรงดึงภายในและลดความรุนแรงของการแตกร้าว ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวและการเสียรูปเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยเหล็กจากเศษยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) เพื่อเพิ่มสมบัติการรับแรงอัดของวัสดุดินซีเมนต์มวลเบา โดยพิจารณาปัจจัยหลายประการ ได้แก่ หน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์มวลเบาที่ระดับ 6, 8 และ 10 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สัดส่วนของเส้นใย SW ที่ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ระดับ 150, 200 และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การทดสอบกำลังรับแรงอัดถูกดำเนินการที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน เพื่อประเมินผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ต่อคุณสมบัติเชิงกลและหาสัดส่วนที่เหมาะสมของ SW สำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุ ดินซีเมนต์มวลเบาอย่างมีประสิทธิภาพวัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุ

2.1.1 ดินเหนียว

ดินที่นำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษานี้ เป็นดินเหนียวอ่อนจากพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึกประมาณ 3-5 เมตร โดยดินดังกล่าวมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนตะกอนทะเล ซึ่งพบในบริเวณภาคกลางของประเทศไทย เป็นดินที่มีความแข็งแรงต่ำ และเกิดการทรุดตัวสูง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการต่างๆ เช่น ดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใย

2.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักของ Tricalcium Silicate, Dicalcium Silicate, Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminoferrite ซึ่งปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14

2.1.3 โฟม

โฟมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลิตจากการใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งได้จากการผสมน้ำยาเคมีกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:19 โดยปริมาตร [1] เพื่อสร้างฟองอากาศที่มีความสม่ำเสมอสำหรับผสมในกระบวนการผลิตดินซีเมนต์มวลเบา รายละเอียดขั้นตอนการเตรียมโฟมจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

2.1.4 เส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel waste fiber, SW)

ในการศึกษานี้ ได้ใช้เส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) ซึ่งมีความยาวในช่วง 1 ถึง 4 เซนติเมตร โดยมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 2.5 เซนติเมตร ขณะที่ตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ซึ่งให้อัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นใยต่อขนาดตัวอย่างประมาณ 1:2 อัตราส่วนดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [7] ซึ่งรายงานว่าอัตราส่วน 1:2 สามารถใช้ในการทดสอบได้อย่างเหมาะสม โดยไม่เกิดผลกระทบจากขอบ (boundary effect) ที่ชัดเจน ใดๆก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าเส้นใยที่มีความยาวมากกว่า เช่น 3-4 เซนติเมตร มีแนวโน้มที่จะช่วยเสริมแรงและเพิ่มความต้านทานได้มากกว่าเส้นใยที่สั้นกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าในกรณีที่ใช้เส้นใยยาวกว่าเฉลี่ยอาจช่วยพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุได้มากขึ้นในบางกรณี โดยกำหนดปริมาณ SW ผสมในวัสดุดินซีเมนต์มวลเบาที่สัดส่วนร้อยละ 0, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมทั้งหมด เพื่อประเมินผลกระทบของปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel waste fiber)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ก่อนเริ่มดำเนินการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ ต้องมีการตีควนดินเหนียวอ่อนจนมีลักษณะเป็นน้ำโคลนและมีความเข้ากัน จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณน้ำจนกระทั่งตัวดินมีปริมาณน้ำอยู่ที่ 300 เปอร์เซนต์



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์มวลเบา

2.2.1 วิธีการเตรียมโฟม

ขั้นตอนการเตรียมโฟมเริ่มจากการผสมน้ำยาเคมีเพื่อสร้างฟองอากาศกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:19 โดยปริมาตร จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้เข้าสู่กระบวนการตีฟองด้วยเครื่องผลิตโฟม (foam generator) จนได้เนื้อโฟมที่มีลักษณะละเอียดและสม่ำเสมอ พร้อมสำหรับใช้ผสมในกระบวนการผลิตดินซีเมนต์มวลเบา

2.2.2 วิธีการผสมตัวอย่าง

กระบวนการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักของดินและปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ จากนั้นนำมาผสมให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ ระหว่างขั้นตอนการผสม โฟมที่เตรียมไว้ล่วงหน้าจะถูกเติมเข้าไปในส่วนผสม เพื่อให้วัสดุเกิดความฟูและมีความหนาแน่นตามที่ต้องการ เมื่อส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีแล้ว จึงเติมเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผสม ทั้งนี้ ก่อนการเตรียมตัวอย่างแต่ละครั้ง จะตรวจสอบค่าหน่วยน้ำหนักของโฟมและส่วนผสมเพื่อให้แน่ใจว่าค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เมื่อการผสมเสร็จสมบูรณ์ จะนำวัสดุที่ได้บรรจุลงในแบบหล่อดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้แบบหล่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร และความสูง 10 เซนติเมตร โดยภายในแบบหล่อจะบุด้วยพลาสติกเพื่อควบคุมความชื้นของตัวอย่างระหว่างการบ่ม นอกจากนี้ การบรรจุตัวอย่างจะควบคุมค่าหน่วยน้ำหนักให้ตรงตามค่าที่ออกแบบไว้ หลังจากครบระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบหล่อและนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามลำดับ

2.2.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของหน่วยน้ำหนักต่อสมบัติเชิงกลของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใย โดยมุ่งเน้นการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength: UCS) ภายใต้การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) และระยะเวลาการบ่ม โดยรายละเอียดของชุดตัวอย่างทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินการทดสอบดินซีเมนต์มวลเบา

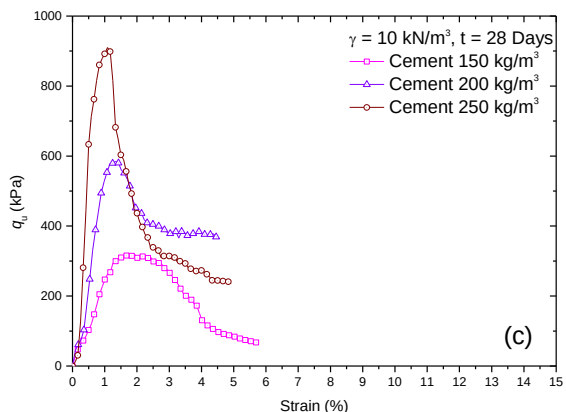
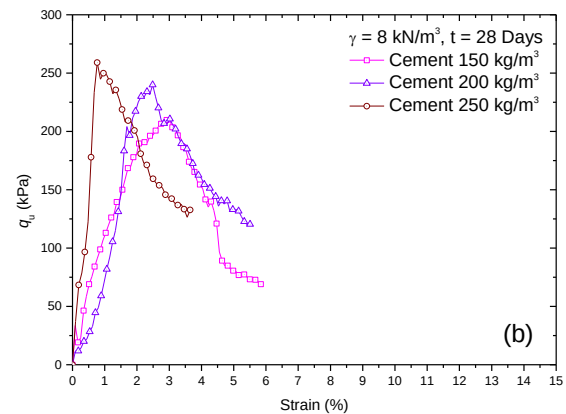
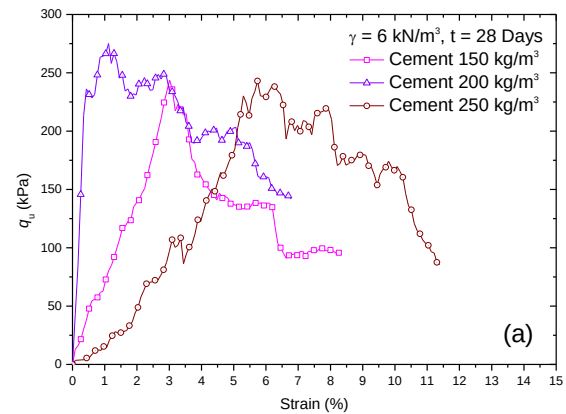
หน่วยน้ำหนัก (kN/m ³)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	ปริมาณเส้นใย SW (%)	ระยะ เวลาบ่ม (Days)
6	150, 200, 250	3, 5, 7	28
8	150, 200, 250	3, 5, 7	28
10	150, 200, 250	3, 5, 7	28

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ไม่ได้มีการเสริมเส้นใย

ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) ASTM D-2166-98 ที่ได้แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยมีการกำหนดให้ตัวอย่างทดสอบมีหน่วยน้ำหนักที่แตกต่างกัน รวมถึงใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อที่จะหาอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และหน่วยน้ำหนักต่อดินซีเมนต์มวลเบา

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test: UCS) ของวัสดุดินซีเมนต์มวลเบาในกรณีที่ ไม่ได้เสริมเส้นใยเหล็ก โดยผลการทดสอบแสดงในรูปของความเค้น (q) เทียบกับความเครียด (strain) หลังจากบ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน จากรูป 3(a) พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด 6 kN/m³ ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ 200 kg/m³ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 230 kPa ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ 150 และ 250 kg/m³ และกราฟแสดงพฤติกรรมที่มีความผันผวนหลังถึงจุดสูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) จากรูป 3(b) ซึ่งแสดงผลทดสอบกรณีหน่วยน้ำหนัก 8 kN/m³ พบว่าค่ากำลังอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ โดยวัสดุที่ใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ ให้ค่า peak strength สูงสุด และเกิดพฤติกรรมแบบ strain-softening ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุยังคงมีพฤติกรรมเปราะแม้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูป 3(c) แสดงผลทดสอบกรณีหน่วยน้ำหนัก 10 kN/m³ พบว่าค่ากำลังอัดสูงสุดของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ ซึ่งให้ค่า UCS สูงกว่า 300 kPa และแสดงพฤติกรรมแบบ peak ชัดเจนก่อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งยืนยันถึงความเปราะของวัสดุภายใต้ความหนาแน่นสูง ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ในปริมาณต่ำกว่ายังคงมีความหนาแน่นสูง ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ในปริมาณต่ำกว่ายังคงมีความหนาแน่นต่ำกว่า และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหลังจุดสูงสุดไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของซีเมนต์สูง



รูปที่ 3 ผลทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกรณีไม่เสริมเส้นใย

3.2 พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใย

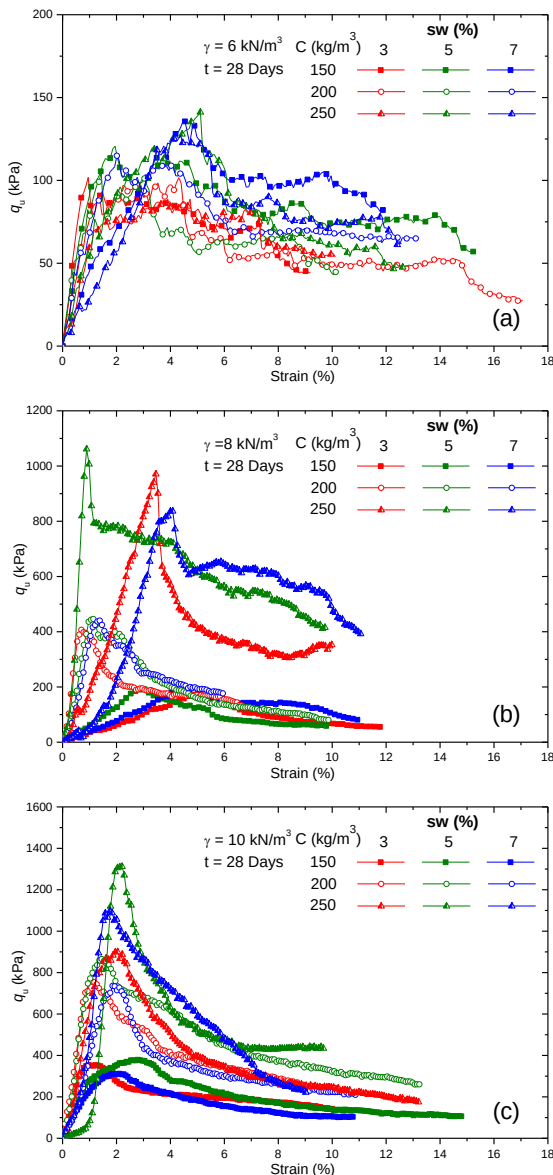
รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test: UCS) ของวัสดุดินซีเมนต์มวลเบาในกรณีที่เสริมเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) โดยทดสอบหลังจากบ่มวัสดุเป็นเวลา 28 วัน

ในรูป 4(a) ซึ่งเป็นผลการทดสอบกรณีหน่วยน้ำหนัก 6 kN/m³ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์และเส้นใย โดยเฉพาะเมื่อใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ ร่วมกับ SW 5% พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 180–190 kPa และยังสามารถคงค่าความต้านทานได้ดีเมื่อเกิดการเสียรูปมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเส้นใยช่วยลดการแตกร้าวทันทีหลัง peak strength และช่วยเพิ่มความ

เหนียวของวัสดุ (toughness) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมเส้นใยในรูปที่ 3

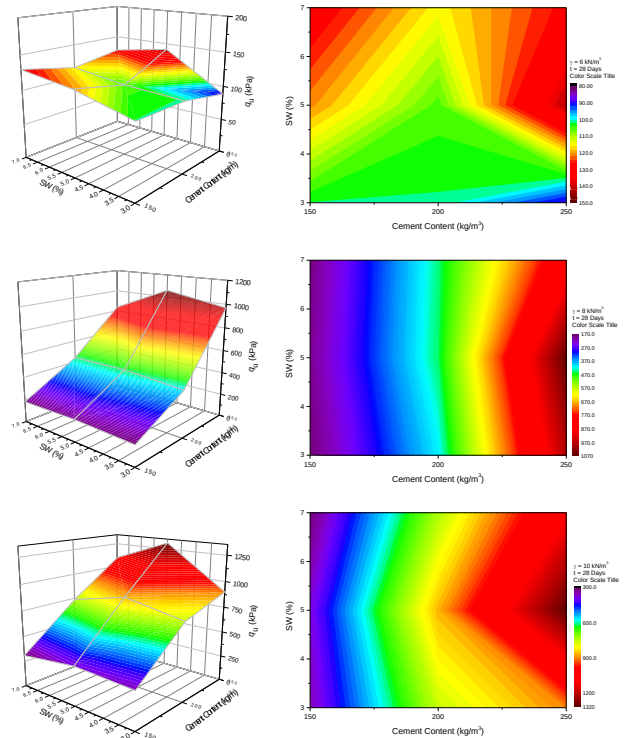
รูปที่ 4(b) แสดงผลการทดสอบกรณีหน่วยน้ำหนัก 8 kN/m³ พบว่าเส้นใย SW ส่งผลต่อการเพิ่มค่า peak strength ได้อย่างชัดเจนในทุกระดับของปริมาณซีเมนต์ โดยวัสดุที่ใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ และเสริม SW 5% ให้ค่า q_u สูงสุดเกือบ 1,000 kPa และสามารถคงแรงต้านได้อย่างต่อเนื่องหลังผ่านจุดสูงสุด แสดงถึงพฤติกรรมการเสียรูปแบบเหนียว (ductile behavior) ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

รูปที่ 4(c) แสดงผลการทดสอบกรณีหน่วยน้ำหนัก 10 kN/m³ พบว่าการเสริมเส้นใย SW ส่งผลให้วัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ และ SW 5% สามารถรับแรงได้สูงกว่า 1,000 kPa และกราฟมีลักษณะการลดลงของแรงที่ช้ากว่ากรณีที่ไม่เสริมเส้นใยอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [7] สะท้อนให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยช่วยเพิ่มความเหนียวและลดความเปราะของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 ผลทดสอบกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัดกรณีที่ใช้เสริมเส้นใย SW

3.3 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ



รูปที่ 5 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์ ปริมาณเส้นใยเหล็ก เหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber, SWF) และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS) ของดินซีเมนต์มวลเบาในรูปแบบกราฟ contour แบบสามมิติ โดยแยกค่าหน่วยน้ำหนักแก้วที่แตกต่างกัน จากภาพบน พบว่าในกรณีที่น้ำหนักหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด 6 kN/m³ ค่า UCS สูงสุดประมาณ 190–200 kPa (เฉลี่ยแดง) เกิดขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์อยู่ที่ระดับปานกลาง (ประมาณ 200–225 kg/m³) และปริมาณเส้นใยมากกว่า 5% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากเกินไป ค่า UCS มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอหรือเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (microcrack) ในโครงสร้างของวัสดุ

ในกรณีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 8 kN/m³ พบว่าค่า UCS เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในช่วง 200–250 kg/m³ ขณะที่การเพิ่มปริมาณ SW ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ UCS อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยในปริมาณมากเกินไปอาจไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มเติม โดยปริมาณ SW ที่เหมาะสมเท่ากับ 5% ภาพล่างแสดงผลการทดสอบของวัสดุที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 10 kN/m³ พบว่า UCS สูงที่สุดในชุดการทดสอบ (มากกว่า 220 kPa) เกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ในระดับสูง (225–250 kg/m³) ร่วมกับ SW 5% ลักษณะของผิวกราฟในแต่ละภาพมีจุดสูงสุดชัดเจน (peak zone) สะท้อนถึงค่าผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุสำหรับการพัฒนาความแข็งแรง

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์มวลเบา ขณะที่การเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์มีบทบาทในการเสริมแรงให้กับวัสดุ แต่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม (5%) หากใช้มากเกินไปอาจทำให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ และส่งผลเสีย

ต่อโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยภาพรวม แสดงให้เห็นถึงลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear relationship) ระหว่างปัจจัยผสมที่ใช้และความแข็งแรงที่ได้รับ ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบส่วนผสมอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการในการใช้งานเป็นวัสดุถมคอสะพานในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน

4. บทสรุป

บทความนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์มวลเบาให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยผสมเส้นใยเหล็กเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ (Steel Waste Fiber: SW) เพื่อใช้เป็นวัสดุถมคอสะพาน ซึ่งจำเป็นต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรงและสามารถในการต้านทานการแตกร้าว การทดลองได้แปรเปลี่ยนพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ หนว้น้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเส้นใย และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินซีเมนต์มวลเบาที่ไม่เสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และหนว้น้ำหนักการบดอัด โดยปริมาณซีเมนต์ 250 kg/m³ ร่วมกับหนว้น้ำหนักการบดอัดสูงสุดให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดมากกว่า 300 kPa อย่างไรก็ตาม วัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ โดยเกิดจุดสูงสุดของแรงก่อนลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของวัสดุในการเสียรูปภายหลังการรับแรงสูงสุดวัสดุผสมที่มีหนว้น้ำหนักต่ำและปริมาณปูนซีเมนต์สูง แสดงสมรรถนะด้านความเหนียวได้ดีที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขดังกล่าวเหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ
2. การเสริมเส้นใยเหล็กในดินซีเมนต์มวลเบาทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกระดับของปริมาณซีเมนต์และหนว้น้ำหนักการบดอัด โดยเฉพาะเมื่อใช้ซีเมนต์ 250 kg/m³ ร่วมกับเส้นใย 5% ซึ่งให้ค่าความต้านทานสูงกว่า 1,000 kPa และช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ ลดความเปราะ และคงแรงต้านหลังจุดสูงสุดได้ดีกว่ากรณีที่ไม่เสริมเส้นใย
3. ค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์มวลเบาได้รับอิทธิพลหลักจากปริมาณซีเมนต์ ขณะที่การเสริมเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม (ประมาณ 5%) โดยส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 225–250 kg/m³ และเส้นใย 5% ให้ค่าความต้านทานสูงสุดในทุกระดับความหนาแน่นของวัสดุ ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมและความแข็งแรงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จึงควรออกแบบส่วนผสมอย่างเหมาะสมเพื่อให้วัสดุมีสมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นวัสดุถมในพื้นที่ดินอ่อน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่คอยช่วยเหลือในระหว่างการทำโครงการทดสอบและคอยให้คำแนะนำ งานวิจัยนี้แล้วเสร็จ รวมถึงบุคลากรในภาควิชาที่คอยให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ เสมอมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรวธ ตันสกุล, พรเกษม จงประดิษฐ์ และ วริศรา คำสอน (2561). การปรับปรุงพฤติกรรมหลังการวิบัติของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1,
- [2] ขวัญจิรา หมั่นบำรุงศาสนา, พานิช วิพุกษ์, อธิพล มีผล และ ศิริพัฒน์ มณีแก้ว (2565). สมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กจากยางรถยนต์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 มิถุนายน 2565
- [3] Nengdong Jiang, A., Zhi Ge, A., Zhiyuan Wang, B., Tianming Gao, A., Hongzhi Zhang, A., Yifeng Ling, A. and Branko Savija, C. (2024). Size effect on compressive strength of foamed concrete: Experimental and numerical studies. *Materials & Design volume 240*, April 2024, 112841
- [4] Mingpeng Liu, A., Hongbo Zhang, A., Bin Lv, B., Cong Du, A., and Jianzhu Wang A. (2024). Investigation on the yield and failure criterion of foamed concrete. *Journal of Building Engineering 84* (2024) 108604
- [5] Asad Zia, A,B., Pu Zhang, A. and Ivan Holly B. (2023). Long-term performance of concrete reinforced with scrap tire steel fibers in hybrid and non-hybrid forms: Experimental behavior and practical applications. *Construction and Building Materials 409* (2023) 134011
- [6] Sadik Alper Yildizel, A., Yasin Onuralp Ozkılıç, B,C., and Ali Yavuz, B. (2024). Optimization of waste tyre steel fiber and rubber added foam concretes using Taguchi method and artificial neural networks. *Structures 61* (2024) 106098
- [7] Yazici, M.F., Keskin, S.N. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: Effects of Fiber Length and Fiber Content. *Arab J Sci Eng 49*, 13593–13611 (2024).
- [8] ASTM D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil
- [9] มาตรฐานถนนคันทาง มทข. 220-2545, หน้า23 – 27