

การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและสติฟเนสในแบบจำลองดินของดินทรายผสมเศษยาง รถยนต์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Calibration of Strength and Stiffness Parameters on Soil Model of Sand-Tyre Crumb Mixtures by FEM

พูลพงษ์ พงษ์วิทยพานุ^{1,*}, อุกฤษฏ์ พรปรีดาวรรณ¹ และ ดาราพร ผุสิงห์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ทุ่งสุขลา ศรีราชา ชลบุรี 20230

Pulpong Pongvithayapanu^{1,*}, Ukrit Pornpreedawan¹ and Daraporn Phusing¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus,

Thung Sukhla, Sri Racha, Chonburi, 20230, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pulpong@eng.src.ku.ac.th

Received: Sep 04, 2021; Revised: Nov 12, 2021; Accepted: Nov 15, 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสติฟเนสในแบบจำลองดินมอร์ – คูลอมบ์ (MC) และแบบจำลองดินฮาร์ดเดนนิ่ง (HS) ของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบอ้างอิงแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความแข็งแรง กำลังรับแรงเฉือน ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินของตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และผลการเปรียบเทียบตัวแปรสรุปได้ว่า แบบจำลอง MC สามารถจำลองพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนเบื้องต้นของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ได้ แต่แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงและแม่นยำมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้เป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในการจำลองปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในงานทางวิศวกรรมโยธาในประเทศไทย เนื่องจากเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบเป็นเศษยางรถยนต์ที่หาซื้อได้ง่ายจากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าในประเทศไทย

คำสำคัญ: ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์, ตัวแปรกำลังและสติฟเนส, แบบจำลองฮาร์ดเดนนิ่ง, วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Abstract

This study uses the Finite Element Method (FEM) to calibrate strength and stiffness parameters on the Mohr-Coulomb (MC) and Hardening soil (HS) models of various percentages of sand-tyre crumb combinations, with reference to laboratory Consolidated Drained (CD) triaxial test results. The laboratory findings show that as the percentage of tyre crumb in sand increases, the stiffness, strength, and internal friction angle of the sand-tyre crumb mixture decreases. The calibration of strength and stiffness parameters reveals that the MC soil model is capable of simulating the basic shear strength behavior of a sand-tyre crumb mixture, while the HS soil model is capable of simulating non-linear stress-strain behavior. Because the sample of tyre crumb used in this study is a recycled by-product from a local recycling plant in Thailand, this calibration

of strength and stiffness parameters on soil model will benefit in applying the sand-tyre crumb mixture for numerous civil engineering applications in Thailand.

Keywords: Sand-tyre crumb mixture, Stiffness and strength parameters, Hardening soil model, FEM

1. บทนำ

เพื่อสนับสนุนนโยบายการก่อสร้างอย่างยั่งยืนจึงได้มีแนวคิดในการนำเศษยางรถยนต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่มีมาอย่างต่อเนื่องในหลายทศวรรษที่ผ่านมา แทนการใช้สื่อย่างรถยนต์เป็นเพียงวัสดุถมที่ (Landfills) โดยหนึ่งในวิธีการกำจัดยางรถยนต์ที่นิยมที่สุดวิธีหนึ่งคือการนำยางรถยนต์เหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่โดยการรีไซเคิลยางรถยนต์ด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เช่น การเปลี่ยนยางรถยนต์ให้กลายเป็นเศษยางรถยนต์ (Tyre Crumb) ขนาดเล็กพร้อมกำจัดสิ่งปนเปื้อน (เหล็กหรือไฟเบอร์) ทั้งนี้ส่วนหนึ่งของการย่อยและคัดแยกเศษยางรถยนต์ในแต่ละท้องถิ่นขึ้นอยู่กับเศษยางเหลือใช้และผลิตภัณฑ์ยางต้นกำเนิด เช่น เศษยาง (Scrap Rubber) ยางรถยนต์เก่า (Used Tyre) ครีบกาง ยางตกเกรด เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของเศษยางเหลือใช้ที่ถูกกระบวนการย่อยและคัดแยกมีขนาดแตกต่างกันออกไป ในประเทศไทยเศษยางรถยนต์เหล่านี้จะผ่านกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องจักรหรือเครื่องบดชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้เศษยางมีขนาดเล็กลงตั้งแต่ขนาดประมาณ $\frac{1}{4}$ นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร) ถึง 100 เมช (Mesh) หรือ 0.15 มิลลิเมตร และถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [1]

ในทางวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มีงานวิจัยมากมายที่ได้แสดงให้เห็นถึงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมรวมถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ในห้องปฏิบัติการ [2] ใช้เศษยางรถยนต์ขนาด 0.09–4.5 มิลลิเมตร ผสมในดินทราย Ottawa และทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม เช่น ความคละกั้นของวัสดุผสม ความถ่วงจำเพาะ อัตราส่วนช่องว่าง ความหนาแน่น ค่าความซึมผ่านได้ของน้ำและการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำพบว่าวัสดุผสมดังกล่าวสามารถใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบา (Lightweight

Fill Material) ได้ดี และงานวิจัยหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษยางรถยนต์ในดินทรายจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ลดลง [3–7] อย่างไรก็ตามหลายงานวิจัยก็แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้น [8], [9] อย่างไรก็ตามแม้ว่าคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางวิศวกรรม แต่คุณสมบัติประการอื่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็ทำให้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีประโยชน์ในการนำไปใช้งานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธาเช่นกัน เช่น คุณสมบัติในการยุบอัดตัวสูง น้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนเพื่อป้องกันความร้อน รวมถึงมีความคงทนที่ดีในระยะยาวหากเปรียบเทียบกับวัสดุธรณีประเภทอื่น [10]

การประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์มีรายงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ได้้นำเศษยางรถยนต์มาใช้เป็นวัสดุผสมในดินทรายเพื่อใช้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น ใช้เป็นวัสดุถมในคันดินหรืองานทาง ใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบา (Lightweight Fill Materials) หลังกำแพงกันดินหรือตอม่อสะพาน ใช้สำหรับการระบายน้ำเสียในพื้นที่ถมกองขยะหรือใช้ในการเสริมแรงในลาดดิน เป็นต้น [11] [12] ได้นำเสนอการใช้วัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์ถมเหนือที่จะสามารถลดความเค้น รวมถึงการตั้งของท่อและลดการทรุดตัวที่ผิวดินได้อย่างมีนัยสำคัญ [11], [13] และ [14] ศึกษาวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุถมน้ำหนักเบาหลังกำแพงกันดิน พบว่าการนำดินทรายผสมกับเศษยางรถยนต์สามารถลดค่าน้ำหนักได้ค่อนข้างมากทำให้แรงดันดินทางด้านข้าง รวมถึงการเคลื่อนตัวตามแนวราบของโครงสร้างกำแพงกันดินลดน้อยลง [15] สรุปถึงการใช้งานวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์ในงานทางวิศวกรรมปฐพีจากงานวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน (ปี ค.ศ. 2017)

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจุบันความพยายามที่จะนำวัสดุผสมระหว่างดินทรายและเศษยางรถยนต์มาใช้ในงานวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมีหลากหลายมากขึ้นตามลำดับ ประกอบกับปัจจุบันการวิเคราะห์และการออกแบบด้านวิศวกรรมปฐพีและฐานรากมีความซับซ้อนรวมถึงวัสดุที่ใช้ทดแทนดินตามธรรมชาติมีลักษณะและพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่แตกต่างกันไป การวิเคราะห์ด้วยวิธีดั้งเดิมหรือการใช้ทฤษฎีในการจำลองพฤติกรรมดินอย่างง่ายอาจไม่สามารถทำให้การออกแบบหรือการแก้ปัญหาดังกล่าวเป็นไปได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แม้ว่านักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการทดสอบแบบเต็มรูปแบบ (Full Scale Test) หรือแม้แต่การทดสอบแบบจำลอง (Model Test) ซึ่งอาจต้องใช้ทรัพยากรพื้นที่ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่สูงมากและไม่มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนตัวแปรเพื่อแก้ไขปัญหาในหลากหลายรูปแบบหรือสถานการณ์ ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มาช่วยในการออกแบบและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างแพร่หลายเพื่อช่วยศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุผสมที่มีความซับซ้อนทั้งในพฤติกรรมของวัสดุผสมหรือแม้แต่พฤติกรรมที่วัสดุผสมกระทำกับโครงสร้างข้างเคียงก็ตาม และในการวิเคราะห์ FEM แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Model) ถือเป็นหัวใจสำคัญที่สุดประการหนึ่งที่จะจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักหรือแรงที่มากกระทำกับวัสดุได้อย่างถูกต้อง

จากอดีตแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่ออธิบายพฤติกรรมของดินหรือวัสดุผสมจากแรงกระทำทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ โดยแบบจำลองพฤติกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาตั้งแต่อดีตได้แก่ แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MC) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นและอาศัยเพียงตัวแปรกำลังในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินหรือวัสดุผสม เช่น ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ เป็นต้น มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นและมีการตอบสนองต่อแรงกระทำในแต่ละขั้นที่

แตกต่างกันออกไปทำให้แบบจำลอง MC มีข้อจำกัดและไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้นของวัสดุผสม ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุขั้นสูงอื่น ๆ เช่น แบบจำลองไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Model) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (Hardening Soil Model, HS) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิงแบบความเครียดต่ำ (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness, HSmall) และแบบจำลองโมดิฟายแคมเคลย์ (Modified Cam-Clay Model, MCC) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุขั้นสูงดังกล่าวต้องอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวทั้งตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสซึ่งมีความยากและซับซ้อน ในการวิเคราะห์ทั้งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการตรวจวัดในสนาม

วิธีที่เป็นที่นิยมและน่าเชื่อถือในการหาค่าตัวแปรดังกล่าว ได้แก่ การปรับเทียบตัวแปรกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น จากผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer Test) เป็นต้น การปรับเทียบ (Calibration) ค่าตัวแปรของแบบจำลองดินและวัสดุต่าง ๆ ได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง [13], [3] และ [14] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลองไฮเพอร์โบลิกกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของเศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ [16] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลอง MC และแบบจำลองอิลาสติกไม่เชิงเส้น-พลาสติกฮาร์ดเคนนิง (แบบจำลอง Nova และแบบจำลอง Vermeer) กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายเพื่อการออกแบบกำแพงกันดินโดยใช้ FEM [17] ปรับเทียบค่าตัวแปรของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำและกับผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ [18] ปรับเทียบค่าตัวแปรสตีเฟนสของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดแรงดันดินด้านข้างในสนามของดินก่อกำเนิด (Residual Soil) บริเวณพื้นที่หมวดหิน Kenny Hill ประเทศมาเลเซีย [19] ปรับเทียบตัวแปรที่เกี่ยวข้องของแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

และการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน บริเวณพื้นที่อ่าวเชินเจิ้น ประเทศจีน [20] เปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในสของแบบจำลอง MC และ HS กับการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายประเทศแอลจีเรีย และ [21] เปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในสของแบบจำลอง MC และแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำและการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของดินเหนียวประเทศมาเลเซีย

งานวิจัยนี้เสนอการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติในแบบจำลองดินแบบแบบอีลาสโตพลาสติก (Elasto-Plastic Soil Model) ได้แก่ แบบจำลอง MC และแบบจำลอง HS กับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนผสมและความเค้นโอบรัดต่าง ๆ ด้วยวิธี FEM โดยผลการเปรียบเทียบจะทำให้ทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองดินเพื่อใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์กับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา เช่น การวิเคราะห์คันดินถม (Embankment) การวิเคราะห์กำแพงกันดิน เป็นต้น โดยเศษยางรถยนต์ที่ทดสอบเป็นเศษยางรถยนต์ที่หาได้จากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าที่สามารถหาซื้อได้ง่ายทั่วไปตามท้องตลาดในประเทศไทย

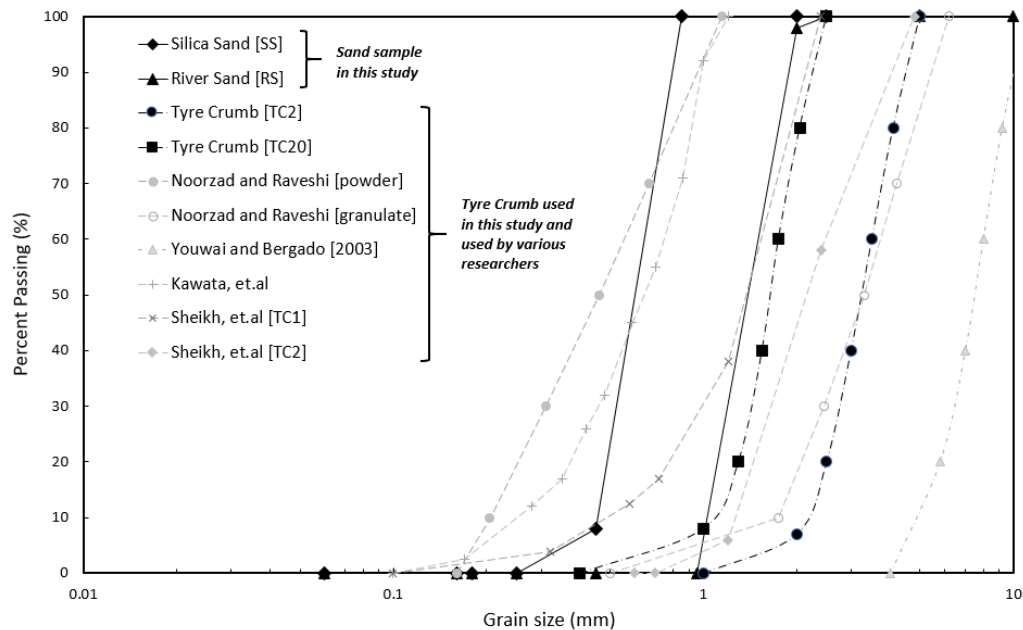
2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.1. วัสดุในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ดินทรายซิลิกา (Silica Sand, SS) เป็นดินทรายที่ใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นในสนามตามมาตรฐาน ASTM D1556/1556M กระจายตัวสม่ำเสมอและมีลักษณะเม็ดดินมนกลมรอบด้านและกลมมาก (Well-Round and High Sphericity) 2) ดินทรายแม่น้ำ (River Sand, RS) เป็นดินทรายสำหรับใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปในจังหวัดชลบุรี

กระจายตัวสม่ำเสมอ ลักษณะเม็ดดินมีเหลี่ยมมน (Sub-Angular) และ 3) เศษยางรถยนต์มีลักษณะเป็นผงยาง (Tyre Crumb, TC) ที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอได้มาจากการบดย่อยและผลิตจากกระบวนการบดยางรถยนต์ใช้แล้วสามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เป็นส่วนผสมในการทำรีเคลมนำไปเป็นส่วนผสมทำพื้นรองเท้า แผ่นยางปูพื้นรถยนต์ ปูพื้นสนามฟุตบอล เป็นต้น หากมีการใช้เป็นวัสดุผสมเพื่อทดแทนวัสดุตามธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องกังวลในเรื่องของการแปรรูปและคัดแยกที่อาจเป็นอุปสรรคในการเลือกใช้ทางปฏิบัติ เหตุผลสำคัญประการหนึ่งในการเลือกใช้เศษยางรถยนต์ชนิดนี้เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายทั่วไปในท้องตลาดซึ่งผลิตโดยโรงงานภายในประเทศและสามารถเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้เป็นวัสดุผสมรีไซเคิลในงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศจะใช้เศษยางรถยนต์ขนาดใหญ่เป็นส่วนผสมที่มีขนาดประมาณ 10–300 มิลลิเมตร [6]

รูปที่ 1 แสดงกราฟการกระจายตัวของดินทรายและเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เศษยางรถยนต์ขนาดต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรในการทดสอบ โดยดินทราย SS และดินทราย RS มีขนาด D50 เท่ากับ 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรตามลำดับ เศษยางรถยนต์ขนาด 2 mesh (TC2) และ 20 mesh (TC20) มีขนาด D50 เท่ากับ 3.1 และ 1.7 มิลลิเมตรตามลำดับ **ตารางที่ 1** แสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ เช่น การจำแนกดินตามระบบเอกภาพ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและต่ำสุด ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุดและสูงสุด เป็นต้น ดินทรายจะถูกผสมกับเศษยางรถยนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (โดยน้ำหนักของดินทรายแห้ง) ได้แก่ ดินทราย SS ผสมกับ TC2 และ TC20 ในอัตราส่วน 10, 20 และ 25% และดินทราย RS ผสมกับ TC2 และ TC20 ในอัตราส่วน 10, 20 และ 25%



รูปที่ 1 แสดงกราฟการกระจายตัวของดินทรายและเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

2.2.การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

ตัวอย่างดินทรายแห้งและส่วนผสมเศษยางรถยนต์ถูกทดสอบด้วยเครื่องมือแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ทดสอบภายใต้เงื่อนไขการยุบอัดตัวคายน้ำแบบระบายน้ำระหว่างการทดสอบ (Consolidated Drained test, CD) โดยในขั้นตอนการยุบอัดตัวคายน้ำเป็นแบบความเค้นกอดอัดเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation Pressure) ที่ 50 และ 150 กิโลปาสกาล (kPa) โดยตัวอย่างดินทรายแห้งหรือตัวอย่างดินทรายแห้งส่วนผสมยางรถยนต์ (TC2 และ TC20) จะถูกเตรียมให้มีความหนาแน่นทางกายภาพแบบแน่น (Dense) หรือมีค่าดัชนีความหนาแน่น (Density Index, I_D) เท่ากับประมาณ 0.65–0.85 โดยตัวอย่างดินทรายส่วนผสมยางรถยนต์จะถูกเตรียมในแบบ (Former) และบดอัดตัวอย่างด้วยไม้ตอกกดอัดขนาดเล็ก (Tamper) เพื่อลดอัตราส่วนช่องว่างในดินและ

ให้ตัวอย่างดินมีความหนาแน่นทางกายภาพแบบแน่น ร่วมกับการใช้เทคนิคการดูดอากาศจากตัวอย่างทดสอบให้มีความดันติดลบประมาณ 10–20 kPa โดยการเตรียมตัวอย่างดินทรายที่มีการผสมเศษยางรถยนต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ตัวอย่างดินที่จะทดสอบมีความอ่อนตัวมากทำให้การเตรียมตัวอย่างต้องเป็นไปด้วยความระมัดระวัง ก่อนเริ่มการทดสอบการกดอัดและในขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่างดินตลอดการทดสอบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อัตราการเงื่อนไขตัวอย่างดินที่ 0.1 มิลลิเมตร/นาที่ จนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการวิบัติหรือที่ความเครียดตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 30% ในกรณีการทดสอบดินทรายส่วนผสมยางรถยนต์ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกบันทึกลงเป็นไฟล์เอกสารและสามารถนำไปวิเคราะห์ รวมถึงการสร้างกราฟต่าง ๆ ได้ต่อไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายส่วนผสมยางรถยนต์

คุณสมบัติพื้นฐาน	Unified Classification	D_{50} (mm)	G_s	$\rho_{d(max)}$ (g/cm^3)	e_{min}	$\rho_{d(min)}$ (g/cm^3)	e_{max}
Silica Sand (SS)	SP	0.5	2.64	1.748	0.510	1.551	0.702
River Sand (RS)	SP	1.5	2.61	1.580	0.652	1.437	0.816
Tyre Crumb 2 mesh (TC2)	SP	3.1	1.06	-	-	-	-
Tyre Crumb 20 mesh (TC20)	SP	1.7	1.08	-	-	-	-

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินทราย เศษยางรถยนต์และดินทรายผสมเศษยางรถยนต์(ต่อ)

คุณสมบัติพื้นฐาน	Unified Classification	D ₅₀ (mm)	G _s	ρ _{d(max)} (g/cm ³)	e _{min}	ρ _{d(min)} (g/cm ³)	e _{max}
SS + TC2 10%	-	-	2.31	1.582	0.462	1.314	0.760
SS + TC2 20%	-	-	2.05	1.413	0.448	1.141	0.792
SS + TC2 25%	-	-	1.91	1.335	0.429	1.058	0.804
SS + TC20 10%	-	-	2.40	1.553	0.547	1.258	0.910
SS + TC20 20%	-	-	2.11	1.346	0.564	1.042	1.019
SS + TC20 25%	-	-	1.97	1.277	0.539	0.990	0.986
RS + TC2 10%	-	-	2.31	1.338	0.679	1.294	0.970
RS + TC2 20%	-	-	2.06	1.136	0.809	1.093	0.880
RS + TC2 25%	-	-	1.94	1.035	0.878	0.989	0.965
RS + TC20 10%	-	-	2.32	1.422	0.633	1.173	0.980
RS + TC20 20%	-	-	2.10	1.242	0.694	1.006	1.092
RS + TC20 25%	-	-	1.92	1.180	0.629	0.920	1.089

3. การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

3.1.แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จำลองผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Plaxis แบบ 2 มิติในเวอร์ชัน Connect edition ในส่วนของ SoilTest ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในโปรแกรม Plaxis ที่สามารถจำลองผลการทดสอบของการทดสอบพื้นฐานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ได้หลากหลายการทดสอบโดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองดิน (Soil Model) ขึ้นมาทั้งหมด ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการได้โดยการเปรียบเทียบพฤติกรรมหรือผลการทดสอบตัวอย่างดินที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการกับตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองดินที่สนใจได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ตัวอย่างของการทดสอบพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์ที่สามารถจำลองได้ในส่วนของ SoilTest เช่น การทดสอบแบบแรงอัดสามแกนทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer) การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test, DSS) ทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ เป็นต้น [22]

3.2.แบบจำลองดิน

แบบจำลองดินที่สามารถประยุกต์ใช้ได้โปรแกรม Plaxis 2D มีอยู่หลากหลายแบบจำลอง [23] ตั้งแต่แบบจำลองดินแบบยืดหยุ่นอย่างง่าย เช่น แบบจำลองยืดหยุ่นเส้นตรง (Linear Elastic Model, LE) เป็นต้นแบบจำลองดินแบบอีลาสโตพลาสติก เช่น แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Model, MC) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (Hardening Soil Model, HS) แบบจำลองฮาร์ดเคนนิงแบบความเครียดต่ำ (Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness, HSmall) เป็นต้น แบบจำลองดินในสภาวะวิกฤติ เช่น แบบจำลองโมดิฟายเคมเคลย์ (Modified Cam-Clay Model, MCC) เป็นต้น แบบจำลองขั้นสูงที่สามารถจำลองพฤติกรรมการเกิดภาวะดินเหลว (Liquefaction) ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบปฐพีพลศาสตร์ เช่น UBC3D-PLM model เป็นต้น

เป็นที่ทราบกันว่า วัสดุทางวิศวกรรมโดยทั่วไปมีพฤติกรรมในการรับแรงกระทำในลักษณะของแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Model) แบบอีลาสโตพลาสติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน

แบบอิลาสโตพลาสติก 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของมอร์-คูลอมป์ (MC) และแบบจำลองฮาร์ดเคนนิง (HS) ในการศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทรายและผสมทรายกรวดจนกระทั่งผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนของแบบจำลองดินทั้ง 2 แบบจำลอง

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองดิน MC เป็นแบบจำลองดินที่เป็นที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมพลาสติกของดินโดยใช้ค่าตัวแปรกำลัง 3 ตัวแปร (ตัวแปรพลาสติก) ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (ϕ) ค่ามุมขยายตัวระหว่างเม็ดดิน (ψ) รวมถึงค่าแรงเชื่อมแน่น (c) เป็นต้น ค่าตัวแปรสตีเฟนอีก 2 ตัวแปร (ตัวแปรอิลาสติก) ได้แก่ ค่าโมดูลัสของยัง (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พื้นผิวแรง (Load Surface) ในแบบจำลองดิน MC จะไม่เกิดการพัฒนาระหว่างการให้แรง (Loading) ซึ่งแบบจำลองดิน MC ถือเป็นแบบจำลองพฤติกรรมดินลำดับที่หนึ่ง ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ที่สนใจเพียงการวิบัติของมวลดินและจะถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมของดินด้วยวิธี FEM ในลำดับแรก ๆ เนื่องจากใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์น้อยและตัวแปรไม่มีความซับซ้อน

สำหรับแบบจำลองดิน HS ถือเป็นแบบจำลองดินขั้นสูงที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินชนิดต่าง ๆ ได้ดีทั้งดินอ่อนและดินแข็งมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองดิน MC โดยเมื่อมวลดินถูกความเค้นเบี่ยงเบน (q) กระทำ ความแข็งแรงหรือสตีเฟนของมวลดินจะลดลงในขณะที่ความเครียดแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ โดยไม่สามารถคืนตัวกลับไปเหมือนเดิมได้อีกต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และความเครียดตามแนวแกน (ϵ_1) จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งในช่วงต้นของการทดสอบหรือที่ความเครียดตามแนวแกนยังมีค่าไม่สูงมากแบบจำลองดินที่สามารถอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้ถูกนำเสนอในครั้งแรกโดย Kondner (1963) และถูกพัฒนาจน

เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายว่าแบบจำลองดินไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic Model) นำเสนอ โดย Duncan และ Chang (1970) อ้างใน [22] แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดิน HS ได้เข้ามาแทนที่แบบจำลองดินไฮเปอร์โบลิกจากเหตุผลหลายประการ เช่น มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพลาสติกแทนทฤษฎีอิลาสติก มีการพิจารณาถึงค่าการขยายตัวของมวลดิน และมีการพิจารณาพื้นผิวการปิดกรอบ (Cap Yield Surface) โดยลักษณะพื้นฐานที่สำคัญที่มีการพิจารณาในแบบจำลองดิน HS มีดังนี้

1. ความแข็งแรงของมวลดินผันแปรกับความเค้น (Stress Dependent Stiffness): ตัวแปร m
2. ความเครียดแบบพลาสติกจากความเค้นเบี่ยงเบนปฐมภูมิ: ตัวแปร E_{50}^{ref}
3. ความเครียดแบบพลาสติกจากแรงกดอัดปฐมภูมิ: ตัวแปร E_{oed}^{ref}
4. ความแข็งแรงช่วงการถอนแรงและการให้แรงกลับแบบยืดหยุ่น: ตัวแปร E_{ur}^{ref} และ ν'_{ur}
5. สภาวะพังทลายตามแบบจำลองดิน MC: ตัวแปร ϕ , ψ และ c หรือ ϕ' , ψ' และ c'

สรุปได้ว่าในแบบจำลอง HS จะมีตัวแปรที่จำเป็นในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสิ้น 11 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 3 ตัวแปร (ϕ , ψ และ C) ตัวแปรสตีเฟน 4 ตัวแปร (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , K_{oed} และ R_f) ตัวแปรขั้นสูงอีก 4 ตัวแปร (p^{ref} , ν'_{ur} , E_{ur}^{ref} และ m) โดย K_{oed} หรือ K_0^{nc} คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง, R_f คือ อัตราส่วนการพังทลาย และ p^{ref} คือ ค่าความเค้นอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 100 kN/m^2

อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบบจำลองดิน HS จะมีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมของดินได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินในสภาพความเป็นจริงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดินนี้ก็ยังมีความจำกัดที่สำคัญหลายประการ [23] เช่น ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการอ่อนตัว (Softening) ของมวลดินเนื่องจากสภาวะการขยายตัว (Dilatancy) รวมถึงผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์หลูว์รอนหรือแยกตัว (Debonding) ภายในอนุภาคเม็ดดิน เป็นต้น

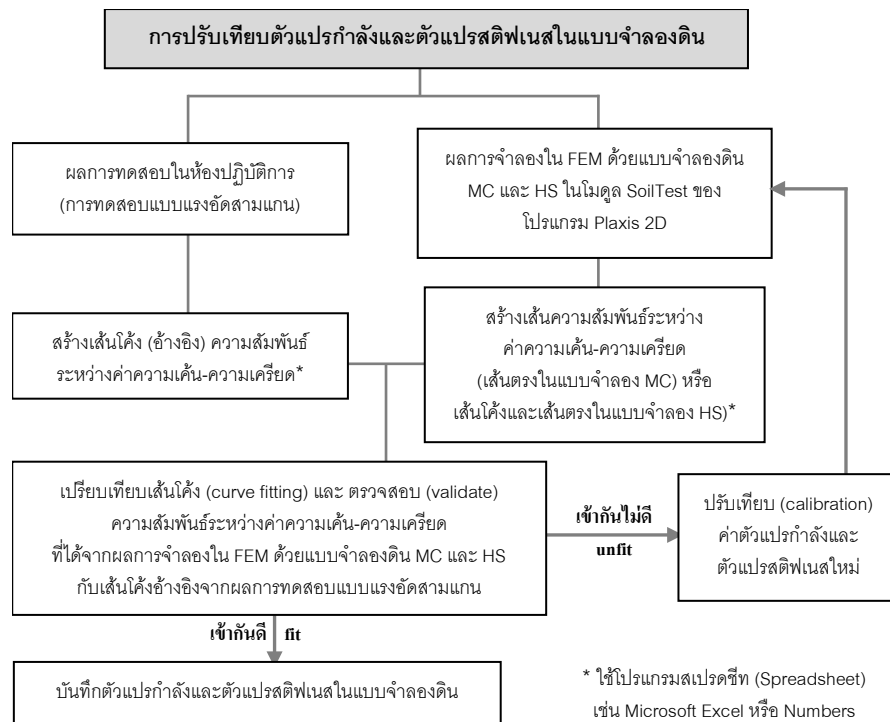
4. วิธีการเปรียบเทียบการจำลองผลการทดสอบในแบบจำลองดินกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

ในช่วงแรกของทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก ทฤษฎีต่าง ๆ ได้ถูกนำเสนอด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design) โดยสนใจเพียงกำลังรับแรงเฉือนของมวลดินในสภาวะวิบัติหรือที่ช่วงระดับความเครียดสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธามีความซับซ้อนรวมถึงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนรูปหรือการทรุดตัวของมวลดินที่รองรับโครงสร้างต่าง ๆ มากขึ้น โดยแม้ว่าโครงสร้างอาจยังไม่เกิดการวิบัติ แต่การใช้งานในโครงสร้างเหล่านั้นอาจไม่ปลอดภัยหรือไม่อาจใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ วิธีสถานะขีดจำกัด (Limit State Design) จึงได้ถูกนำเสนอในเวลาต่อมา โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตั้งแต่ความเครียดในระดับต่ำ ปานกลางจนถึงระดับสูง [24] ซึ่งจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินช่วงก่อนการวิบัติจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาบางปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์

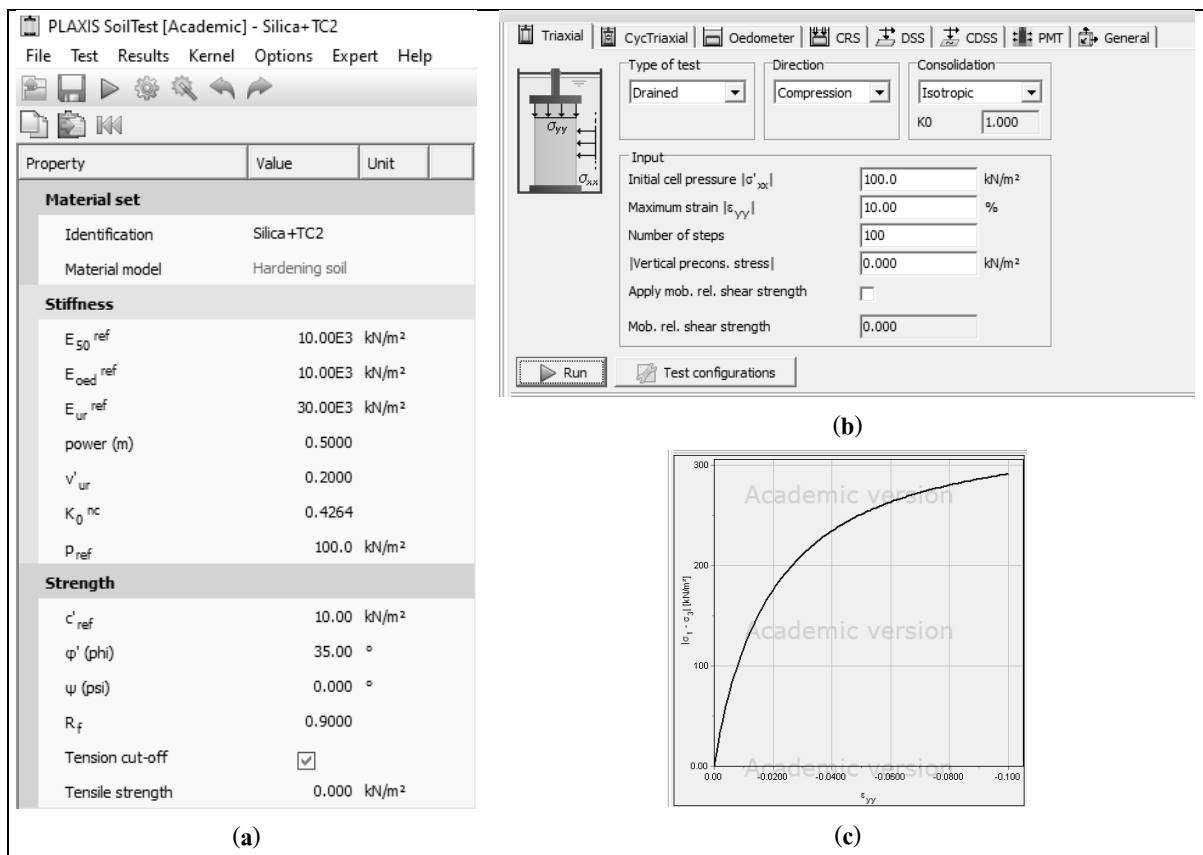
การทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงแรกสามารถทดสอบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของดินโดยการใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด หรือ Stress-Strain Curve ในการอธิบายพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ในการรับแรงเฉือนที่กระทำกับมวลดินตั้งแต่ที่ระดับความเครียดต่ำ ปานกลางไปจนกระทั่งที่ความเครียดสูง อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมา การจำลองพฤติกรรมของดินดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี FEM โดยการใช้แบบจำลองดินแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 ซึ่งทำให้เกิดความสะดวก ประหยัดเวลาและสามารถนำแบบจำลองดินไปประยุกต์ใช้ได้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานรากทั้งปัญหาอย่างง่ายและปัญหาที่มีความซับซ้อนด้วยวิธี FEM ได้เป็นอย่างดี

การปรับเทียบ (Calibration) ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเฟนสกระทำโดยการใช้วิธีแบบดั้งเดิมโดยการสร้าง

เส้นกราฟอ้างอิงซึ่งคือเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนหรือ $q - \varepsilon_1$ ของผลการทดสอบดินทรายแห้ง (SS และ RS) และดินทรายแห้งผสมเศษยางรถยนต์ (SS + TC และ RS + TC) ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จากผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสเปรดชีท (Spreadsheet) เช่น Microsoft Excel หรือ Numbers ใน Mac OS จากนั้นนำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ทั้งแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล (Module) SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบในรูปกราฟเดียวกันกับเส้นกราฟอ้างอิงข้างต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบ (Validate) เส้นโค้ง (ในกรณีของแบบจำลอง HS) หรือเส้นตรง (ในกรณีของแบบจำลอง MC) กับเส้นโค้งอ้างอิง หากเส้นกราฟทั้งสองเข้ากันดี (Fit) ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเฟนสในโมดูล SoilTest ถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธี FEM ได้ต่อไป อย่างไรก็ตามหากเส้นกราฟทั้งสองเข้ากันไม่ดี (Unfit) กล่าวคือ หากเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากแบบจำลองดินในโมดูล SoilTest ประมาณค่าความสัมพันธ์มากเกินไป (Overestimation) หรือต่ำเกินไป (Underestimation) กับค่าจากเส้นโค้งอ้างอิง เช่น มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงที่สุดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป มีค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ชันมากเกินไปหรือน้อยเกินไป ความโค้งของเส้นกราฟมากเกินไปหรือน้อยเกินไป (ในกรณีของแบบจำลอง HS) เป็นต้น ต้องมีการปรับเทียบหรือเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเฟนสในแบบจำลองดินในโมดูล SoilTest ใหม่ และทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบผลการจำลองกับเส้นโค้งอ้างอิงจนกว่าเส้นกราฟจะเข้ากันดี **รูปที่ 2** แสดงขั้นตอนการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเฟนสในแบบจำลองดินด้วยวิธี FEM และ **รูปที่ 3** แสดงตัวอย่างการจำลองด้วยวิธี FEM ในโมดูล SoilTest จากโปรแกรม Plaxis 2D (a) การใส่ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีฟเฟนสในแบบจำลองดิน HS (b) การใส่ค่าสถานะเริ่มต้นของการจำลองรวมถึงรูปแบบในการทดสอบและ (c) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ จากแบบจำลองดิน



รูปที่ 2 ขั้นตอนการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสติเฟนในแบบจำลองดินด้วยวิธี FEM



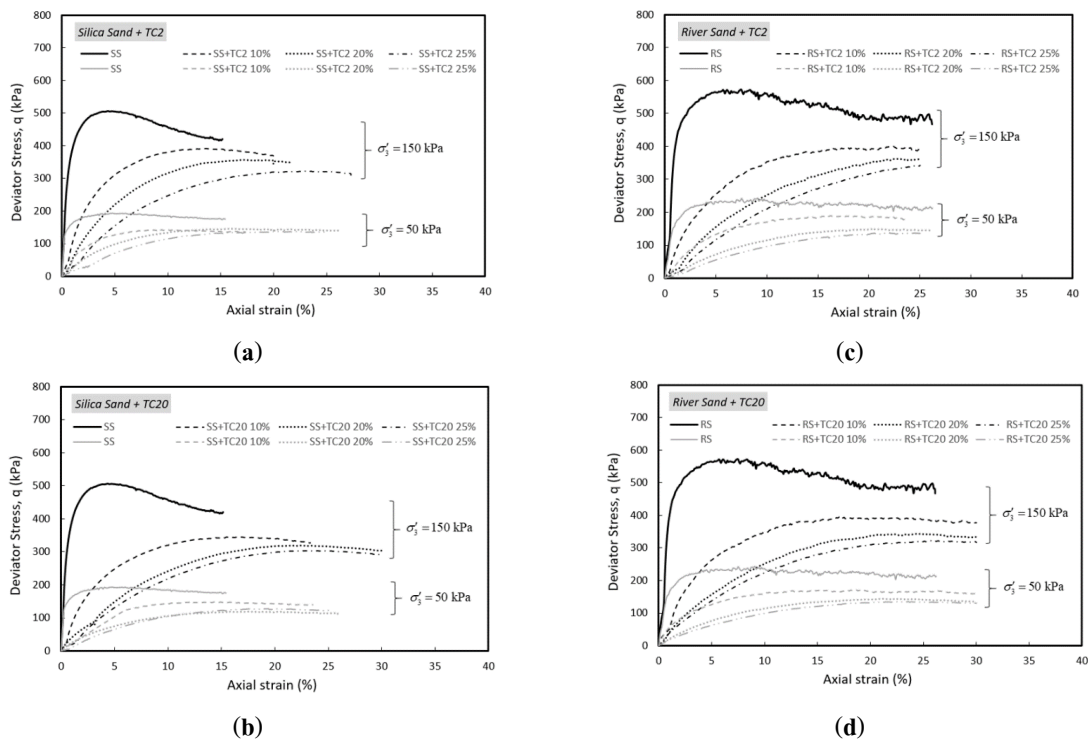
รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการจำลองด้วยวิธี FEM ในโมดูล SoilTest จากโปรแกรม Plaxis 2D (a) การใส่ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสติเฟนในแบบจำลองดิน HS (b) การใส่ค่าสภาวะเริ่มต้นของการจำลองรวมถึงรูปแบบในการทดสอบและ (c) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเครียดตามแนวแกนจากแบบจำลองดิน

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1. การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

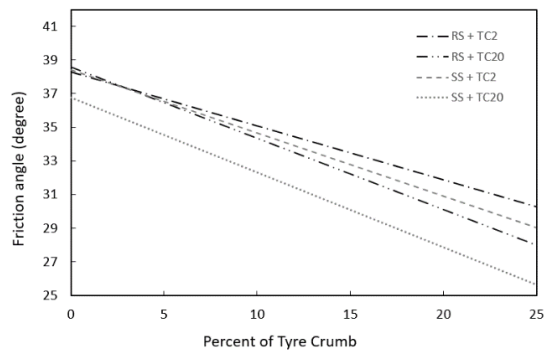
ผลการทดสอบตัวอย่างดินทราย SS และ RS และตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ขนาด 2 mesh (TC2) และขนาด 20 mesh (TC20) ที่ความเค้นโอบริต 50 kPa และ 150 kPa ที่สถานะแน่นจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำจำนวน 28 ตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทั้งดินทราย SS และ RS ที่ไม่ผสมเศษยางรถยนต์มีความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ มีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นและหลังจากค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด ดินทรายทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมของสภาวะความอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นโอบริตที่มากขึ้น ในดินทราย SS ที่ลักษณะของเม็ดดินกลมมนค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (q_{max}) มีค่าน้อยกว่าดินทราย RS ที่มีรูปร่างลักษณะเม็ดดินแบบเหลี่ยมมุม อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในดินทรายทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ทั้งค่าความแข็งแรง (Stiffness) และกำลังในการรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) จะลดลงตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กำลังในการรับแรงเฉือนสุดท้าย (Ultimate Shear

Strength) (ในช่วงความเครียดตามแนวแกนสูง) มีแนวโน้มที่เข้าใกล้กันและไม่ต่างกันมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าความเค้นโอบริตต่ำ รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวแปรกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength Parameters) ได้แก่ ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (ϕ') ด้วยวิธีการวาดวงกลมมอร์ตามทฤษฎีการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criterion) แสดงให้เห็นว่าค่า ϕ' มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทั้งดินทราย SS และ RS ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับหลายงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เศษยางรถยนต์ขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าดินทรายชนิดเดียวกัน อัตราส่วนผสมเท่ากัน รวมถึงความเค้นโอบริตที่เท่ากัน ดินทรายที่ผสมเศษยางรถยนต์ที่มีขนาดที่เล็กกว่าจะทำให้ค่า ϕ' ลดลงมากกว่า ข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งพบว่าในดินทรายบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผสมเศษยางรถยนต์ เม็ดดินที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมจะมีค่า ϕ' ที่มากกว่าเม็ดดินที่มีลักษณะมนกลมซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคเม็ดดิน หรือ Interparticle Force ที่เกิดขึ้นมีมากกว่า แต่เมื่อผสมเศษยางรถยนต์เข้าไปในดินทรายเหล่านั้นค่า ϕ' ของดินทรายทั้งสองชนิดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4 ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนที่ความเค้นโอบริต 50 kPa และ 150 kPa

(a) ดินทราย SS + TC2 (b) ดินทราย SS + TC20 (c) ดินทราย RS + TC2 และ (d) ดินทราย RS + TC20



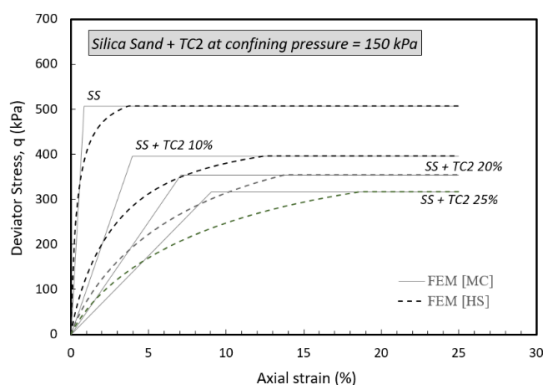
รูปที่ 5 มุมเสียดทานภายในของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ (TC2 และ TC 20)

ค่า ϕ' และค่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินประสิทธิผล (Effective Cohesion, c') ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนตามทฤษฎีการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์นี้จะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงเบื้องต้นสำหรับการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในหัวข้อถัดไป

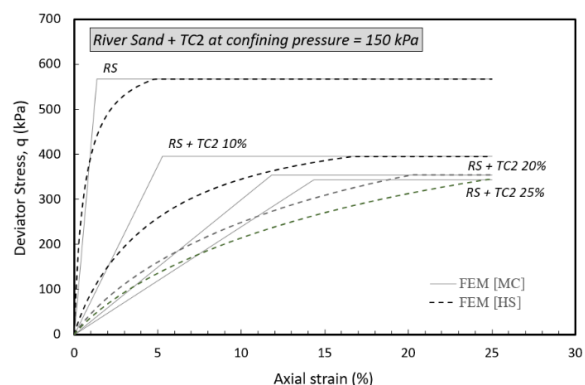
5.2. การปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์

การปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ใช้ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการเป็นเส้นโค้งอ้างอิงเพื่อปรับเทียบและตรวจสอบค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดินทั้งสองด้วยวิธี FEM โดยใช้ขั้นตอนการปรับเทียบแสดงดังรูปที่ 2 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วจากผลการปรับเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ของ

ทั้งดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมกรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบอ้างอิงจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างดินทรายมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้นหรือเส้นโค้งพาราโบลา แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรมดังกล่าวได้ใกล้เคียงอย่างค่อนข้างแม่นยำ สังเกตได้จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D จากแบบจำลองดิน HS มีลักษณะเส้นโค้งที่เข้ากันได้พอดีกับผลการทดสอบอ้างอิงในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าแบบจำลองดิน HS ไม่สามารถอธิบายอธิบายพฤติกรรมกรับแรงเฉือนหลังดินเกิดการรับแรงเฉือนสูงสุดกรณีเกิดพฤติกรรมสภาวะความอ่อนตัวของความเครียด (Strain Softening) ได้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี [23] รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $q - \varepsilon_1$ ที่ได้จากการจำลองใน FEM ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนอ้างอิงที่ความเค้นโอบรัด 150 kPa ของ (a) ดินทราย SS และ (b) ดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



(a)



(b)

รูปที่ 6 ตัวอย่างผลการจำลอง FEM ของแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D ที่ความเค้นโอบรัด 150 kPa ของ (a) ดินทราย SS และ (b) ดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ในส่วนของแบบจำลองดิน MC จะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์มีความสอดคล้องกับค่าตัวแปรกำลังที่ได้จากแบบจำลองดิน HS แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพื้นฐานของแบบจำลองดิน MC มีลักษณะเชิงเส้นโดยสมบูรณ์ทำให้ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินในช่วงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้นได้ดีเท่ากับแบบจำลองดิน HS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินทรายผสมเศษยางรถยนต์

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสังเกตเห็นได้ว่า ในแบบจำลอง HS ตัวแปรที่มีค่าคงที่แม้ว่าความเค้นโอบรัดและปริมาณเศษยางรถยนต์ที่ผสมในดินทรายจะเปลี่ยนไปเท่าใดก็

ตาม ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 2 ตัวแปร คือ $\psi' = 0$ และ $c'_{ref} = 10$ kN/m² ตัวแปรขั้นสูง 2 ตัวแปร คือ $p^{ref} = 100$ kN/m² และ $v'_{ur} = 0.2$ และตัวแปรสตีเฟนส์ที่มีค่าเท่ากัน ได้แก่ $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ ในแบบจำลอง MC ได้แก่ ตัวแปรกำลัง 2 ตัวแปร คือ $\psi' = 0$ และ $c'_{ref} = 10$ kN/m² ตัวแปรสตีเฟนส์ 1 ตัวแปร คือ $v'_{ur} = 0.3$ โดยในช่วงการจำลองด้วย FEM ในช่วงท้ายซึ่งเป็นช่วงการแสดงถึงกำลังในการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบจำลองดิน HS จะมีผลการจำลองสอดคล้องกับแบบจำลองดิน MC ผลการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ด้วยวิธี FEM แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนส์ในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทราย SS, RS และดินทราย SS และ RS ผสมกับเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนและความเค้นโอบรัดต่าง ๆ

Sand/Parameters			$\sigma'_3 = 50$ kN/m ²				$\sigma'_3 = 150$ kN/m ²			
			TC2				TC2			
			0%	10%	20%	25%	0%	10%	20%	25%
Strength parameters (HS)										
SS	$\phi' (\phi')$	degree	37	31	31	30	37.5	33	31	29
	R_f		0.94	0.78	0.68	0.6	0.91	0.85	0.7	0.72
RS	$\phi' (\phi')$	degree	41	36	31.5	30	39.5	33	31	30.5
	R_f		0.91	0.81	0.65	0.5	0.89	0.81	0.62	0.62
Strength parameters (MC)										
SS	$\phi' (\phi')$	degree	37	31	31	30	37.5	33	31	29
RS	$\phi' (\phi')$	degree	41	36	31.5	30	39.5	33	31	30.5
Stiffness parameters (HS)										
SS	E_{50}^{ref}	kN/m ²	59,000	5,000	2,200	1,500	60,000	10,000	5,000	3,500
	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	177,000	15,000	6,600	4,500	180,000	30,000	15,000	10,500
	Power (m)		0.65	0.1	0.1	0.1	0.7	0.1	0.15	0.12
	K_0^{nc}		0.398	0.485	0.485	0.500	0.391	0.455	0.485	0.515
RS	E_{50}^{ref}	kN/m ²	40,000	4,000	1,800	1,300	42,000	6,300	3,000	2,400
	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	120,000	12,000	5,400	3,900	126,000	18,900	9,000	7,200
	Power (m)		0.85	0.1	0.12	0.12	0.85	0.12	0.12	0.1
	K_0^{nc}		0.343	0.412	0.477	0.500	0.363	0.455	0.485	0.492

ตารางที่ 2 ตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสันในแบบจำลองดิน HS และ MC ของดินทราย SS, RS และดินทราย SS และ RS ผสมกับเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนและความเค้นโอบริตต่าง ๆ (ต่อ)

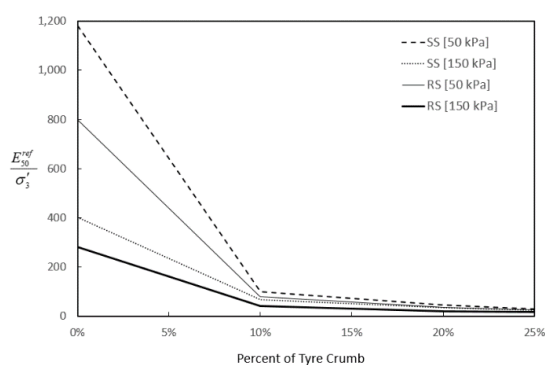
Sand/Parameters	$\sigma'_3 = 50 \text{ kN/m}^2$				$\sigma'_3 = 150 \text{ kN/m}^2$			
	TC2				TC2			
	0%	10%	20%	25%	0%	10%	20%	25%
Stiffness parameters (MC)								
SS E' kN/m ²	59,000	5,000	2,200	1,500	60,000	10,000	5,000	3,500
RS E' kN/m ²	25,000	4,000	1,800	1,300	42,000	7,500	3,000	2,400

หมายเหตุ: - แบบจำลองดิน HS ตัวแปรกำลังที่มีค่าคงที่ คือ $c'_{ref} = 10 \text{ kN/m}^2$, $\psi' = 0^\circ$ ตัวแปรสตีเฟนสันที่มีค่าคงที่ คือ $p_{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$ และ $\nu'_{ur} = 0.2$ และตัวแปรสตีเฟนสันที่มีค่าเท่ากัน คือ $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$
 - แบบจำลองดิน MC ตัวแปรกำลังที่มีค่าคงที่ คือ $c'_{ref} = 10 \text{ kN/m}^2$, $\psi' = 0^\circ$ และ ตัวแปรสตีเฟนสันที่มีค่าคงที่ คือ $\nu' = 0.3$

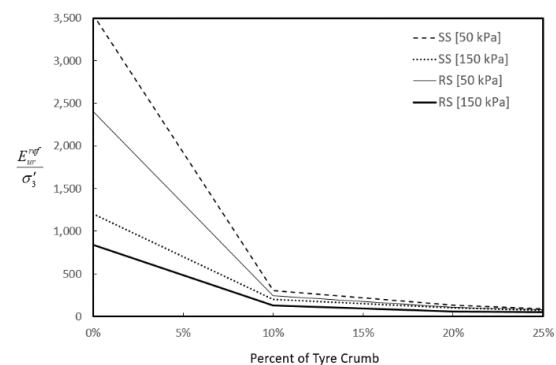
รูปที่ 7 แสดงค่าออร์มอลไลซ์ (Normalized) ตัวแปรสตีเฟนสันกับค่าความเค้นโอบริต ได้แก่ E_{50}^{ref} / σ'_3 และ E_{ur}^{ref} / σ'_3 ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลองดิน HS ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R_f และ ค่า K_0^{nc} ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้น และในส่วนของตัวแปรสตีเฟนสัน (Power, m) จะลดลงอย่างมากเมื่อเศษยางรถยนต์ถูกผสมลงในดินทรายแม้ในปริมาณไม่มากโดยมีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกับค่าตัวแปรสตีเฟนสัน E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} ในขณะที่หากปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 10% ขึ้นไปจะไม่ทำให้ค่า E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} เปลี่ยนแปลงมากนัก

รูปที่ 8 แสดงค่าตัวแปรกำลัง (R_f) และตัวแปรสตีเฟนสัน

(Power, m และ K_0^{nc}) ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลองดิน HS ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R_f และ ค่า K_0^{nc} ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับในลักษณะเชิงเส้นตรงเมื่อปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้น และในส่วนของตัวแปรสตีเฟนสัน (Power, m) จะลดลงอย่างมากเมื่อเศษยางรถยนต์ถูกผสมลงในดินทรายแม้ในปริมาณไม่มากโดยมีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกับค่าตัวแปรสตีเฟนสัน E_{50}^{ref} และ E_{ur}^{ref} ในขณะที่หากปริมาณเศษยางรถยนต์เพิ่มขึ้นจาก 10% ค่าตัวแปร Power (m) จะมีค่าค่อนข้างคงที่

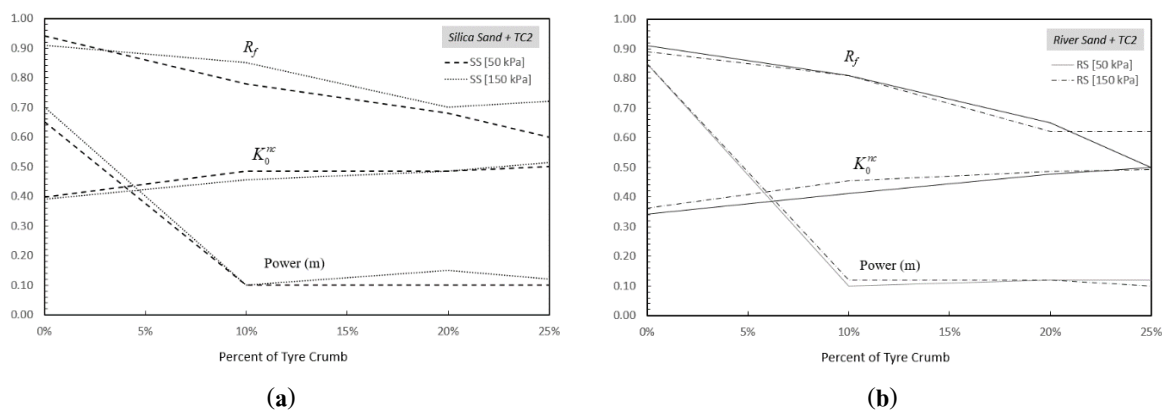


(a)



(b)

รูปที่ 7 ค่าออร์มอลไลซ์ (Normalized) ตัวแปรสตีเฟนสันกับค่าความเค้นโอบริตของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) E_{50}^{ref} / σ'_3 (b) E_{ur}^{ref} / σ'_3 ในแบบจำลองดิน HS



รูปที่ 8 ค่าตัวแปรกำลัง (R_f) และตัวแปรสตีเฟนส (Power, m และ K_0^{nc}) ของดินทราย SS และ RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) ดินทราย SS (b) ดินทราย RS ในแบบจำลองดิน HS

ในแบบจำลองดิน MC ค่าตัวแปรกำลังของทั้งดินทราย SS และดินทราย RS ผสมเศษยางรถยนต์ TC2 ที่ค่าอัตราส่วนต่าง ๆ จะมีค่าเท่ากับในแบบจำลองดิน HS ในขณะที่ตัวแปรสตีเฟนส (E') จะมีค่าลดลงเมื่อประมาณเศษยางรถยนต์ในดินทรายเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการลดลงของตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน HS

6. สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวอย่างดินทรายและตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์ทั้งสองชนิด ได้แก่ ดินทราย SS ดินทราย SS + TC2 ดินทราย RS และดินทราย RS + TC2 ในการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (การทดสอบอ้างอิง) และการเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสจากผลการทดสอบอ้างอิงข้างต้นด้วยการจำลอง FEM ทั้งแบบจำลองดิน MC และ HS ในโมดูล SoilTest ของโปรแกรม Plaxis 2D สรุปได้ว่า

1. ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนพบว่า ค่าความแข็งแรง กำลังรับแรงเฉือน ค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินของตัวอย่างดินทรายผสมเศษยางรถยนต์จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยในดินทรายบริสุทธิ์ (ไม่มีส่วนผสมยางรถยนต์) ทั้งตัวอย่างดินทราย SS และ RS เมื่อบีบอัดจะมีพฤติกรรมหรือสถานะอ่อนตัวของความเครียดเกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเค้นโอบรัดมีค่าสูง (150 kPa)

2. ผลการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนของดินทรายชนิดเดียวกันในอัตราส่วนผสมเศษยางรถยนต์รวมถึงความเค้นโอบรัดที่เท่ากัน เศษยางรถยนต์ขนาดเล็กกว่า (TC20 ขนาดเล็กกว่า TC2) จะทำให้ค่า ϕ' ลดลงมากกว่า

3. ในดินทรายบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ผสมเศษยางรถยนต์เม็ดดินที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมจะมีค่า ϕ' ที่มากกว่าเม็ดดินที่มีลักษณะมนกลมซึ่งเป็นผลจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่เกิดขึ้นมีมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อผสมเศษยางรถยนต์เข้าไปในดินทราย ค่า ϕ' ของดินทรายทั้งสองชนิดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4. การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน HS พบว่า แบบจำลองดิน HS สามารถจำลองพฤติกรรม การรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงและแม่นยำกับผลการทดสอบอ้างอิงจากการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ตัวอย่างดินทรายมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดิน HS ไม่สามารถอธิบายอธิบายพฤติกรรม การรับแรงเฉือนหลังตัวอย่างดินทรายดินทรายบริสุทธิ์เกิดการรับแรงเฉือนสูงสุดกรณีเกิดพฤติกรรมสภาวะความอ่อนตัวของความเครียดได้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีได้กล่าวไว้

5. การเปรียบเทียบตัวแปรกำลังและตัวแปรสตีเฟนสในแบบจำลองดิน MC พบว่า ค่าตัวแปรกำลังของดินทรายทั้งสองชนิดที่ผสมเศษยางรถยนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าเท่ากับในแบบจำลองดิน HS ในขณะที่ตัวแปรสตีเฟน

จะมีค่าลดลงเมื่อประมาณเศษยางรถยนต์ในดินทรายเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการลดลงของตัวแปรสถิติในแบบจำลองดิน HS

6. ค่าตัวแปรกำลังและตัวแปรสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบที่ถูกต้องแล้ว สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองดินในโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและฐานรากในการประยุกต์ใช้ดินทรายผสมเศษยางรถยนต์กับงานทางวิศวกรรมโยธา เช่น การวิเคราะห์คันดินถม การวิเคราะห์กำแพงกันดิน วัสดุถมหน้าหนักเบาในงานทาง เป็นต้น โดยเศษยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นเศษยางรถยนต์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายเป็นจำนวนมากจากโรงงานรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าตามท้องตลาดในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Rubber Recycling Technology*, Research and Development Centre for Thai Rubber Industry, Oct 18, 2021. [Online]. Available: http://rubber.oie.go.th/box/Article/19951/1_rubberpowder.pdf
- [2] E. Masad, R. Taha, C. Ho and T. Papagiannakis, "Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 297–304, 1996, doi: 10.1520/GTJ10355J.
- [3] S. Youwai and D. T. Bergado, "Strength and Deformation Characteristics of Shredded Rubber Tire-Sand Mixtures," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, pp. 254–264, 2003, doi: 10.1139/t02-104.
- [4] S. Kawata, M. Hyodo, P. Orense, S. Yamada and H. Hazarika, "Undrained and Drained Shear Behaviour of Sand and Tire Chips Composite Material," in *Proc. of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials-Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japan, 2007, pp. 277–283.
- [5] M. Neaz Sheikh, M. S. Mashiri, J. S. Vinod and H. H. Tsang, "Shear and Compressibility Behavior of Sand-Tire Crumb Mixtures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 10, pp. 1366–1374, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000696.
- [6] R. Noorzad and M. Raveshi, "Mechanical Behavior of Waste Tire Crumbs-Sand Mixtures Determined by Triaxial Tests," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 35, pp. 1793–1802, 2017, doi: 10.1007/s10706-017-0209-9.
- [7] P. Pongvithayapanu, "Direct Shear Behaviour of Sand-Tyre Crumb Mixtures," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, pp. 1–14, 2021, doi: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.005.
- [8] T. Edil and P. Bosscher, "Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 453–464, 1994, doi: 10.1520/GTJ10306J.
- [9] G. V. Rao and R. K. Dutta, "Compressibility and Strength Behaviour of Sand-Tyre Chip Mixtures," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 24, pp. 711–724, 2006, doi: 10.1007/s10706-004-4006-x.
- [10] A. H. J. Al-Rkaby, "Strength and Deformation of Sand-Tire Rubber Mixtures (STRM): An Experimental Study," *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 41, no. 2, pp. 74–80, 2019, doi: 10.2478/sgem-2019-0007.
- [11] S. B. Reddy and A. M. Krishna, "Recycled Tire Chips Mixed with Sand as Lightweight Backfill Material in Retaining Wall Applications: An Experimental Investigation," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 31, 2015, doi: 10.1007/s40891-015-0036-0.
- [12] S. N. Moghaddas Tafreshi, Gh. Tavakoli Mehrjardi and A. R. Dawson, "Buried Pipes in Rubber-Soil Backfilled Trenches under Cyclic Loading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, pp. 1346–1356, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000710, 2012

- [13] J. H. Lee, R. Salgado, A. Bernal, and C. W. Lovell "Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 132–141, 1999, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:2(132).
- [14] S. Youwai and D. T. Bergado, "Numerical Analysis of Reinforced Wall Using Rubber Tire Chips-Sand Mixtures as Backfill Material," *Computers and Geotechnics*, vol 31, pp. 103–114, 2004, doi: 10.1016/j.compgeo.2004.01.008.
- [15] S. B. Reddy, A. M. Krishna and K. R. Reddy "Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications," *Indian Geotechnical Journal*, vol 48, pp. 251–266, 2018, doi: 10.1007/s40098-017-0273-3, 2018.
- [16] P. Horatiu and B. Loretta, "Using Finite Element Method in Geotechnical Design, Soil Constitutive Laws and Calibration of the Parameters: Retaining wall case study," *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics Journal*, vol 5, pp. 177–186, 2010.
- [17] C. Surarak, S. Likitlersuang, D. Wanatowski, A. Balasubramaniam, E. Oh and H. Guan, "Stiffness and Strength Parameters for Hardening Soil Model of Soft and Stiff Bangkok Clays," *Soils and Foundations*, vol. 52, no. 4, pp. 682–697, 2012, doi: 10.1016/j.sandf.2012.07.009.
- [18] G. Darvintharen, M. A. M. Ismail, M. F. M. Zaki and M. H. Z. Abidin, "Calibration of Stiffness Parameters for Hardening Soil Model in Residual Soil from Kenny Hill Formation" *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, vol. 67, pp. 119–125, doi: 10.7186/bgsm67201915.
- [19] F. Yanbin, H. Siyue, Z. Sizhan and Y. Yong, "Parameter Analysis on Hardening Soil Model of Soft Soil for Foundation Pits Based on Shear Rates in Shenzhen Bay, China," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1155/2020/7810918.
- [20] S. Fergani, K. A. A. Mokhtar, L. Djerbal, P. Pizette, N. - E. Abriak and A. Nechnech., "FEM Simulations of Granular Matter Behaviour under Triaxial Tests," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol 39, pp. 991–1008, 2021, doi: 10.1007/s10706-020-01540-x.
- [21] S. Saleh, N. Z. M. Yunus, K. Ahmad and K. N. M. Said, "Numerical Simulation with Hardening Soil Model Parameters of Marine Clay Obtained from Conventional Tests," *SN Applied Sciences*, vol. 3, 2021, Art. no. 156, doi: 10.1007/s42452-020-04115-w.
- [22] Bentley Systems Inc., Exton, PA, USA. *Plaxis 2D Reference Manual-Plaxis CONNECT Edition V21.00*. 2020. Accessed: Dec. 01, 2020. [Online]. Available: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_02_2D00_Reference_2D00_2D.pdf
- [23] Bentley Systems, Inc., Exton, PA, USA. *Plaxis 2D Material Models Manual-Plaxis CONNECT Edition V21.00*. 2020. Accessed: Dec. 01, 2020. [Online]. Available: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS2DCE_2D00_V21.00_2D00_03_2D00_Material_2D00_Models.pdf
- [24] S. Yimsiri, "Undrained Strength-Deformation Characteristics of Bangkok Clay under General Stress Condition," Dept. of Civ. Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, Final Report, 2014.