



คุณลักษณะกำลังต้านทานแรงเฉือนของทรายที่เพิ่มแรงยึดเกาะด้วยยางพารา
SHEAR STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE NATURAL RUBBER BONDED SAND

อรุณ ลูกจันทร์ อาศิส อัยรักษ์ สมมาตร สวัสดิ์ และจัญญ์ สมบูรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ต.บ่อยาง อ.เมืองสงขลา จ.สงขลา 90000

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมด้านต้านทานแรงเฉือนของดินทรายที่เพิ่มแรงยึดเกาะด้วยยางพารา โดยการผสมตัวอย่างทรายกับยางพารา ในปริมาณต่างกัน 5 อัตราส่วน ประกอบด้วย ยางพาราร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของทรายแห้ง ชุดทดสอบแรงเฉือน โดยตรงถูกใช้ในการศึกษาผลของปริมาณยางพาราต่อค่ากำลังเฉือน และพฤติกรรมไคเลชันของตัวอย่างทรายผสมยางพารา รวมถึงตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมขณะรับแรงเฉือนของตัวอย่างทรายเปลี่ยนรูปแบบเป็นวัสดุเหนียว ผลวิเคราะห์จาก SEM แสดงให้เห็นการแทนที่ช่องว่างด้วยอนุภาคของยางพาราในรูปแบบของการเคลือบและการยึดติดกันระหว่างเม็ดทราย ระดับการปรับปรุงของค่าอัตราส่วนความเค้นและพารามิเตอร์กำลังเฉือนที่เป็นฟังก์ชันกับปริมาณยางพาราที่เปลี่ยนไป บ่งชี้ว่ายางพาราสามารถช่วยปรับปรุงกำลังเฉือนของทรายได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ทราย, ยางพารา, ความเชื่อมแน่น, อัตราส่วนความเค้น, ไคเลชัน

ABSTRACT

This paper investigates the shear strength characteristics of the natural rubber (NR) bonded sand. The sand-natural rubber (SNR) mixtures were prepared by adding five different NR contents namely 5, 10, 15, 20 and 30% by weight of dry sand. Direct shear apparatus was employed to investigate the effect of the NR content on shear strength and dilation behavior of the SNR specimens. In addition, scanning electron microscopy (SEM) analysis was conducted to observe the microscale direct interaction between sand particle and NR. The obtained results demonstrated that the shear strength behaviors of sand become ductile materials with adding the NR content. Result from the SEM analysis reveals that the voids between sand particles are filled by the NR which sand particles are coated and bonded together with the NR. Degree of improvement of the stress ratio and shear strength parameter that is a function of the NR content indicated that the NR effectively improves the shear strength of sand.

KEYWORDS: Sand, Natural rubber, Cohesion, Stress ratio, Dilation

1. บทนำ

การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) ของดินภายใต้ทฤษฎี Mohr- Coulomb นั้นได้มาจากแรงเสียดทาน (Friction) ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และการขัดลึ่อกัน (Interlocking) ระหว่างเม็ดดินเพื่อต้านทานการเปลี่ยนรูปของดิน สำหรับดินชนิดไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soils) ค่ากำลังเฉือนจะได้มาจากแรงเสียดทาน และการขัดลึ่อกันเป็นหลัก โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ มุมของแรงเสียดทานภายใน (Angle of internal friction, ϕ) ซึ่งคำนวณจากความชันของกราฟความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) และความเค้นตั้งฉาก (Normal stress, σ_n) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) และการทดสอบแรงอัด 3 แกน (Triaxial test) เป็นต้น นอกจากนี้ ในกรณีที่เป็นทรายแน่นหรือแน่นปานกลาง การประเมินกำลังเฉือนของดินควรพิจารณาพฤติกรรมไดเลชั่น (Dilation) ร่วมด้วย พฤติกรรมไดเลชั่นเป็นพฤติกรรมที่พบเฉพาะในทรายแน่นหรือดินเหนียวอัดตัวเกิน นั่นคือ เมื่อดินถูกเฉือนจนถึงจุดวิกฤติจะพบว่าปริมาตรของดินมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากอนุภาคของดินที่ถูกอัดแน่นเกิดการพองตัวออก จากนั้นความต้านทานแรงเฉือนจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ ขณะเดียวกันปริมาตรของดินก็เริ่มคงที่เช่นกันจนเข้าสู่ภาวะวิกฤต พฤติกรรมการพองตัวนี้อธิบายได้ด้วยค่ามุมไดเลชั่น (Dilation angle, ψ) โดยสามารถคำนวณค่ามุมไดเลชั่นได้จากสมการที่ (1) และจากทฤษฎีความสัมพันธ์ความเค้น-ไดเลชั่น (Stress-dilation theory) ค่าอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, SR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [1]

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{dz}{dh} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\phi * + \psi) \quad (2)$$

เมื่อ dz และ dh คือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวราบ ตามลำดับ; $\phi*$ คือ มุมของแรงเสียดทานภายในที่จุดสูงสุด (Peak) หรือจุดประลัย (Ultimate)

การเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายนั้นสามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างทรายผสมกับวัสดุอื่นที่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน (Cementation) ที่ดี เช่น ปูนซีเมนต์ บิทูเมน (Bitumen) เถ้าลอย (Fly ash) ปูนขาว (Lime) และพอลิเมอร์ (Polymers) เป็นต้น จากการรวบรวมงานวิจัยในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา พบว่า มีการศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนของทรายเสริมแรงยึดเกาะด้วยการใช้วัสดุพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง เช่น พอลิเมอร์ชีวภาพ (Bio-polymers) [2-6] และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) [7-12] เป็นต้น ผลการศึกษาส่วนใหญ่บ่งชี้ว่า วัสดุพอลิเมอร์ช่วยให้ค่าความเชื่อมแน่น และค่า Stiffness ของทรายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber) หรือยางพาราจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่ง มีอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.1- 1.0 ไมครอน ลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลมมีคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น ได้แก่ มีความยืดหยุ่น ทนต่อแรงดึงสูง ทนต่อการสึกกร่อน ซึ่งเป็นผลมาจากโครงข่ายที่เกิดจากเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โมเลกุล และมีโครงสร้างเคมีแบบ ซิส-1, 4-โพลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene) ผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นดิบรมควัน ยางแท่ง หรือยางเครพ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติอาจเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกความร้อนหรือตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดไม่มีขั้ว ดังนั้น

จึงมีการตัดแปรยางธรรมชาติผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของยางพาราโดยการลดน้ำหนักของโมเลกุลซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเตรียมวัสดุติดสำหรับสารยึดติด (Adhesive) ตัวเชื่อมประสาน (Sealant) หรือสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ (Pre-polymer) [13] บทความนี้ มุ่งเน้นศึกษาคุณลักษณะกำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างทรายที่มีการเพิ่มแรงยึดเกาะด้วยการผสมยางธรรมชาติ (Natural rubber) ผ่านการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ในห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี (Geotechnical engineering) เช่น การวิบัติของลาดดิน (Slope failure) การเกิดทรายไหล (Liquefaction) หรืองานวิศวกรรมทาง เป็นต้น

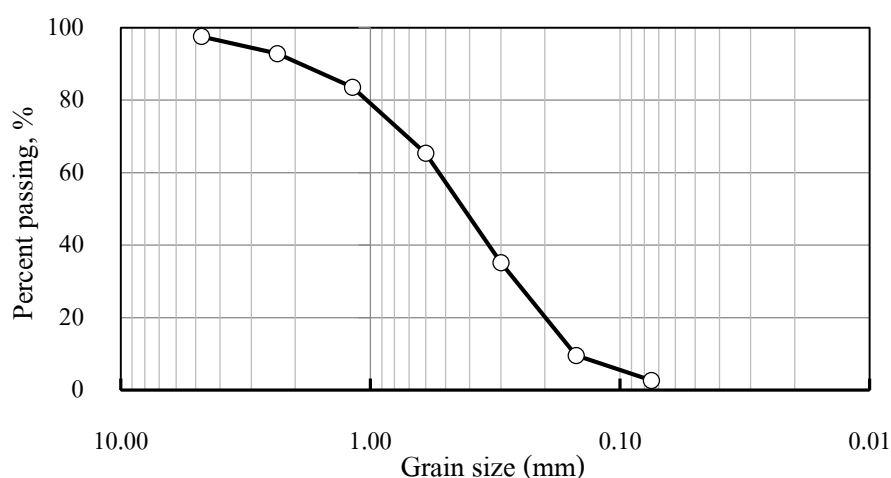
2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ทราย และยางพาราเหลว (Liquid natural rubber) ในที่นี้จะใช้คำว่า “ยางพารา” ตลอดทั้งบทความเพื่อความกระชับ รูปที่ 1a แสดงตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 รูปที่ 1b แสดงกราฟการกระจายตัวของเม็ดทรายที่ได้จากการทดสอบหาขนาดเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ขนาดของเม็ดดินกระจายตัวระหว่าง 0.075 mm ถึง 4.75 mm ประกอบด้วย $D_{60}=0.52$ mm, $D_{30}=0.27$ mm, $D_{10}=0.16$ mm, $D_{50}=0.42$ mm ผลการจำแนกชนิดดินโดยวิธี USCS ตามมาตรฐาน ASTM D421-85 จัดเป็นดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded sand, SP) ผลการทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) พบว่า มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุด (ρ_{dmax}) เท่ากับ 1.768 g/cm^3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุด (ρ_{dmin}) เท่ากับ 1.399 g/cm^3 อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายสูงสุด (e_{max}) เท่ากับ 0.894 และอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดทรายต่ำสุด (e_{min}) เท่ากับ 0.499 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4253 และ D4254 [14-15] ตามลำดับ ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษา



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) ตัวอย่างทรายที่ใช้ทดสอบ (b) กราฟการกระจายตัวของเม็ดทราย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของทรายที่ใช้ศึกษา

ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	e_{min}	e_{max}	D_{50} (mm)	C_u	C_c	G_s
1.399	1.768	0.499	0.894	0.42	3.25	0.88	2.64

2.2 การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบ

กำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างทรายผสมยางพารา (Sand- natural rubber, SNR) ศึกษาโดยการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM 3080 [16] การเตรียมตัวอย่างทำโดยการผสมยางพาราจำนวน 5 อัตราส่วน จำนวนอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วยยางพารา 5%, 10%, 15%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักของทรายแห้ง จากนั้นบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องทดสอบเป็นเวลา 7 วัน, 14 วัน, และ 28 วัน [5-10] รวมตัวอย่างที่ทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 45 ตัวอย่าง ทำการทดสอบแรงเฉือนแบบควบคุมความเครียด (Strain control) ด้วยอัตราเฉือน 1 มิลลิเมตร/นาที ภายใต้อัตราความเค้นตั้งฉาก (Normal stress, σ_v) จำนวน 3 ชุด ได้แก่ 81.75 kPa, 163.50 kPa, และ 327 kPa ตามลำดับ โดยในขณะทำการทดสอบจะทำการอ่านค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบและแนวดิ่ง (Horizontal and vertical displacement) จากนั้นทำการเขียนตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการเคลื่อนที่ประมาณ 15% ของความกว้างตัวอย่าง รูปที่ 2 แสดงชุดทดสอบแรงเฉือนโดยตรง และตัวอย่าง SNR ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ



(a)



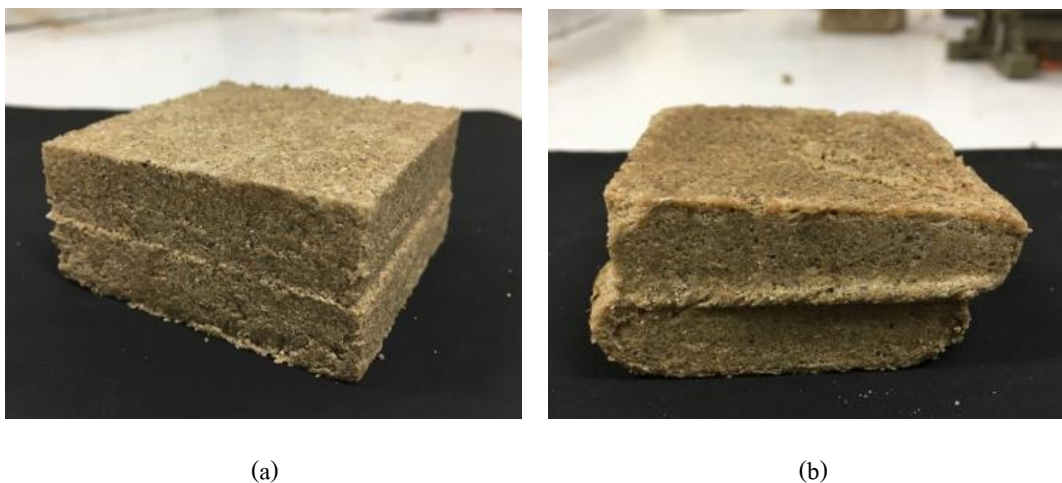
(b)

รูปที่ 2 (a) ชุดทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (b) ตัวอย่างทรายผสมยางพารา (Sand-natural rubber, SNR)

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงวิศวกรรมของตัวอย่างดิน SNR จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง สามารถพิจารณาออกเป็น 4 ประเด็น ประกอบด้วย (1) กำลังต้านทานแรงเฉือน (2) พฤติกรรมไคเลชั่น (Dilation) และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volumetric change) (3) การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron

microscope, SEM) และ (4) ระดับการปรับปรุงกำลังเฉือน (Degree of improvement of shear strength) รูปที่ 3a และ 3b แสดงลักษณะของตัวอย่างหลังการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงสำหรับตัวอย่างที่อัตราส่วน SNR 5% และ SNR 20% ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะตัวอย่างหลังทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (a) SNR-5 และ (b) SNR-20

3.1 กำลังต้านทานแรงเฉือน

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นมีข้อพิจารณาที่สำคัญก็คือ ความเค้นเฉือนและความเครียดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างดินนั้นมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform distributed) กล่าวคือ ดินบริเวณขอบจะเกิดความเค้นเฉือนและความเครียดไม่เท่ากับดินบริเวณกลาง Shear box จึงเป็นการยากที่จะหาพื้นที่ของตัวอย่างที่วิบัติ (Failure surface) ที่แน่นอนได้ ดังนั้น โดยทั่วไปจะไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดได้ อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนของดินระหว่างการทดสอบแบบ Simple shear กับ Direct shear พบว่า พารามิเตอร์กำลังเฉือนที่ได้ทั้ง 2 วิธี นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ สามารถใช้ผลทดสอบแรงเฉือนโดยตรงอธิบายพฤติกรรมของดินระหว่างรับแรงเฉือนในรูปแบบของความเค้นเฉือนและความเครียดได้ [17-19] การศึกษานี้ ผลการทดสอบตัวอย่างดิน SNR สามารถอธิบายพฤติกรรมการรับแรงเฉือนได้ดังนี้

3.1.1 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress) และการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical displacement) กับการเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal displacement) ของตัวอย่าง SNR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากับ 327 kPa ที่อายุการบ่มตัวอย่าง 28 วัน พบว่า ตัวอย่างทรายล้วน (SNR-0) แสดงพฤติกรรมของทรายแน่น (Dense sand) อย่างชัดเจน นั่นคือ เมื่อตัวอย่างดินถูกเฉือนจนถึงจุดสูงสุด (Peak) ความต้านทานการรับแรงเฉือนจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่และเข้าสู่สภาวะวิกฤติ (Critical state) ในขณะที่ตัวอย่างทรายผสมขี้เถ้า (SNR) นั้นจะแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว (Ductile materials) นั่นคือ พฤติกรรมผสมระหว่างดินทรายกับพอลิเมอร์ จากผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของตัวอย่าง SNR ออกเป็น 2

รูปแบบ ได้แก่ พฤติกรรมอีลาสติก (Elastic behavior) และพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก (Elasto-plastic behavior) โดยสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 4 ขอบเขต (Region) ดังแสดงในรูปที่ 4 [18] ประกอบด้วย

Region A – พฤติกรรมกึ่งอีลาสติก (Quasi-elastic behavior) เป็นช่วงที่ดินตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนจนถึงจุดคราก (Yield strength) การเคลื่อนที่แนวราบของดินจะเป็นสัดส่วนกับความเค้นเฉือน โดยตัวอย่าง SNR จะมีการยุบตัว (Contraction) อย่างรวดเร็ว และดินเกิดการเคลื่อนที่ในช่วงนี้ประมาณ 0.50 มิลลิเมตร

Region B- พฤติกรรมพลาสติกสมบูรณ์แบบ (Perfectly plastic behavior after yielding) เป็นช่วงที่ดินมีค่ากำลังเฉือนคงที่ ในขณะที่การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง การยุบตัวของดินเริ่มคงที่และเกิดการเคลื่อนที่ในช่วงนี้ประมาณ 1.50 มิลลิเมตร

Region C- พฤติกรรมแข็งตัว (Hardening behavior) เป็นช่วงที่ดินแสดงพฤติกรรมเพิ่มความแข็งตัวด้วยความเครียด อธิบายได้จากความต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากจุดครากในช่วง Region B จนถึงจุด Ultimate อย่างมีนัยสำคัญ เช่น ค่าความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 และ 5 เท่า สำหรับตัวอย่าง SNR-15 และ SNR-20 ตามลำดับ เป็นต้น ในช่วงนี้ดินจะเริ่มเกิดการบวมตัว (Expansion) มีการเคลื่อนที่ตามแนวราบประมาณ 4.00 มิลลิเมตร โดยการเคลื่อนที่ของดินจะช้ากว่าในช่วงอีลาสติก

Region D- พฤติกรรมพลาสติกสมบูรณ์แบบหลังแข็งตัว (Perfectly plastic behavior after hardening) เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากแข็งตัว โดยความต้านทานแรงเฉือนของดินเริ่มมีค่าคงที่จนกระทั่งวิบัติหรือเข้าสู่สภาวะวิกฤติ (Critical state)

กล่าวสรุปพฤติกรรมในภาพรวมได้ว่า พฤติกรรมอีลาสติก ได้แก่ Region A และพฤติกรรมอีลาสโตพลาสติก ประกอบด้วย Region B, C, และ D ตามลำดับ

3.1.2 พารามิเตอร์กำลังเฉือน

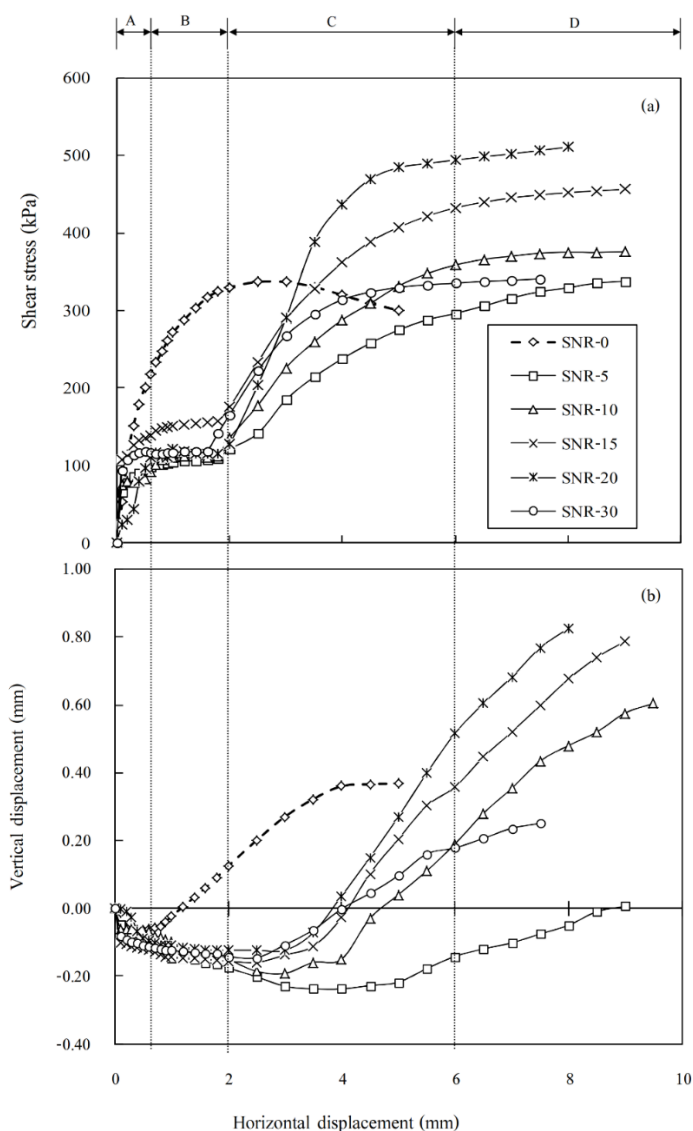
การวิบัติของดินจำพวกทรายนั้น โดยทั่วไปสามารถอธิบายความต้านทานแรงเฉือนได้ทั้งในรูปแบบของกำลังเฉือนสูงสุด (Peak strength) และกำลังเฉือนประลัย (Ultimate strength) ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวอย่าง SNR ที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง พบว่า แสดงรูปแบบกำลังเฉือนประลัย และจะถูกใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์กำลังเฉือนในการศึกษานี้ รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ความเค้นเฉือน (Shear stress) กับความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ของตัวอย่าง SNR ในที่อัตราส่วนต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์กำลังเฉือน (Shear strength parameter) ที่อายุการบ่ม 7 วัน, 14 วัน, และ 28 วัน ประกอบด้วย ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และมุมเสียดทานภายในที่จุดประลัย (Ultimate internal friction angle, ϕ_u)

รูปที่ 6 เป็นกราฟที่แสดงการพัฒนาความเชื่อมแน่นที่แปรผันตามอายุการบ่มและอัตราส่วนการผสมยางพารา พบว่า ในทุกอัตราส่วนที่ผสม ค่าความเชื่อมแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่ม สามารถแบ่งการพัฒนาความเชื่อมแน่นได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก วันเริ่มผสมถึง 14 วัน โดยช่วงนี้แนวโน้มของการเพิ่มความเชื่อมแน่นอย่างชัดเจน และช่วงที่ 2 หลังจาก 14 วันเป็นต้นไป ค่าความเชื่อมแน่นมีแนวโน้มคงที่ วิเคราะห์ได้ว่า หลังจากตัวอย่างมีอายุประมาณ 14 วัน ยางพาราจะเริ่มคงสภาพ ส่งผลให้ความสามารถในการเกาะยึดอนุภาคของเม็ดทรายเพิ่มขึ้น

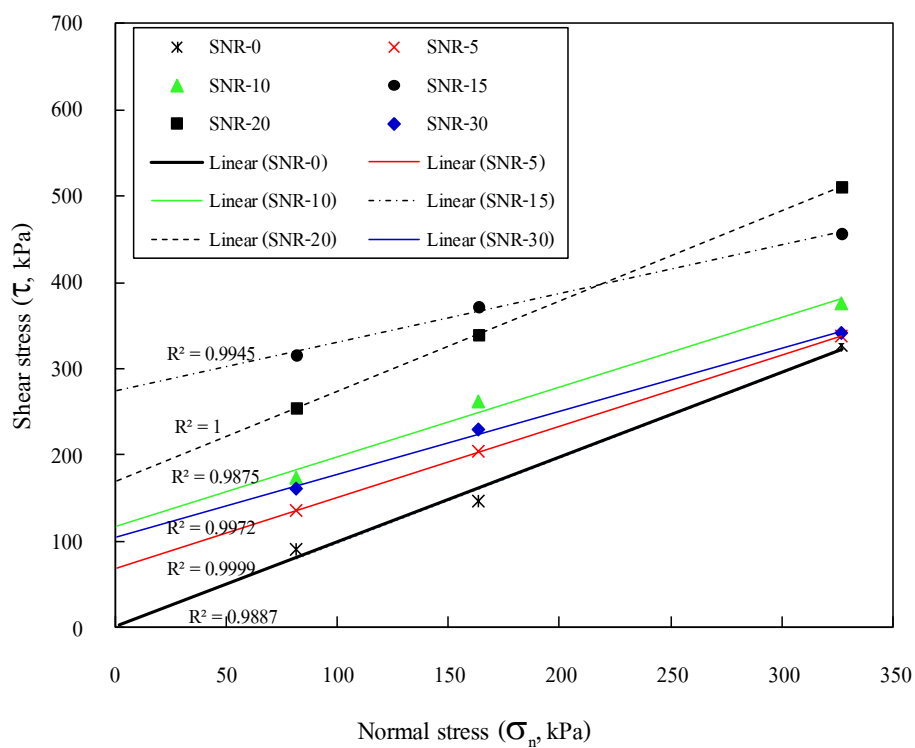
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์กำลังเหนือนที่ได้จากการทดสอบแรงเหนือนโดยตรง

Curing time (Day)	Cohesion, c (kPa)						Internal friction angle, ϕ_u°					
	Natural rubber content (%)						Natural rubber content (%)					
	0	5	10	15	20	30	0	5	10	15	20	30
7	0	0.10	69.88	118.46	70.26	10.01	45.78*	46.92	42.83	40.75	43.28	44.29
14		66.38	112.35	262.37	148.48	60.86		42.85	42.71	36.30	40.60	43.45
28		67.90	116.21	273.94	168.31	104.14		39.60	38.95	35.50	42.34	36.09

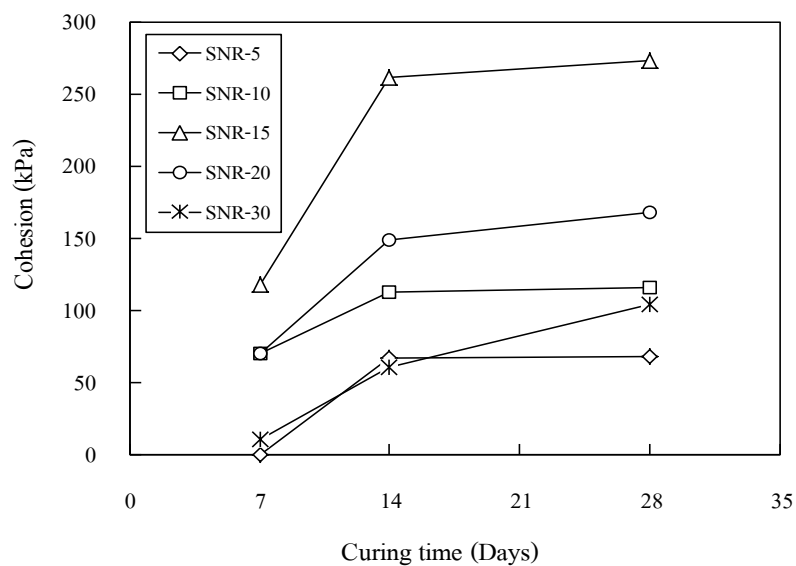
* Peak internal friction angle (ϕ_p)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แนวราบกับ (a) ความเค้นเฉือนและ (b) การเคลื่อนที่แนวตั้งภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากับ 327 kPa ที่อายุการบ่มตัวอย่าง 28 วัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress) กับความเค้นตั้งฉาก (Normal stress)



รูปที่ 6 ค่าความเชื่อมแน่นที่แปรผันตามอายุการบ่มและอัตราส่วนผสมขางพารา

3.2 พฤติกรรมโมดูลัส

การศึกษานี้สามารถอธิบายพฤติกรรมโมดูลัสได้จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 7 เมื่อรูปที่ 7a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, SR) กับการเคลื่อนที่แนวราบ และรูปที่ 7b ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัส (ψ) กับการเคลื่อนที่แนวราบที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการต้านแรงเฉือนในช่วงอีลาสติกและอีลาสโตพลาสติก จากรูปที่ 7b แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มพฤติกรรมโมดูลัส พบว่า ตัวอย่างดิน SNR จะขยุตัว (มุม ψ เป็นลบ) ในช่วง Region A จนถึง Region B จากนั้นเมื่อดินอัดแน่นแล้วจะเริ่มเกิดการพองตัว (มุม ψ เป็นบวก) จนถึงช่วง Region C โดยช่วงนี้ค่ามุม ψ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเมื่อเริ่มเข้าสู่ช่วง Region D แล้วจะลดลงเมื่อดินวิบัติ พิจารณาตำแหน่งที่อัตราส่วนความเค้นสูงสุด (SR_{max}) ซึ่งสัมพันธ์กับค่ามุมโมดูลัสสูงสุด (ψ_{max}) พบว่า ตัวอย่างทรายล้วน (SNR-0) มีค่า SR_{max} ประมาณ 1.00 และค่า ψ_{max} เท่ากับ 10 องศา กรณีตัวอย่างดิน SNR พบว่า ค่า SR_{max} ประมาณ 1.00 จะพบในตัวอย่าง SNR-5 และ SNR-30 ในทางกลับกันค่า SR_{max} ที่มีค่ามากกว่า 1.00 จะเกิดขึ้นในตัวอย่าง SNR-10, SNR-15, และ SNR-20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.15, 1.35, และ 1.50 ตามลำดับ กล่าวคือ ที่ปริมาณยางพารา 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนักของทรายแห้ง อัตราส่วนความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 15%, 35%, และ 50% ตามลำดับ ส่วนค่า ψ_{max} มีค่าเท่ากับ 3, 7, 9, 11, และ 5 องศา สำหรับตัวอย่าง SNR-5, SNR-10, SNR-15, SNR-20 และ SNR-30 ตามลำดับ จากพฤติกรรมโมดูลัสที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนความเค้นข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายที่เกิดจากการผสมด้วยยางพาราได้อย่างชัดเจน

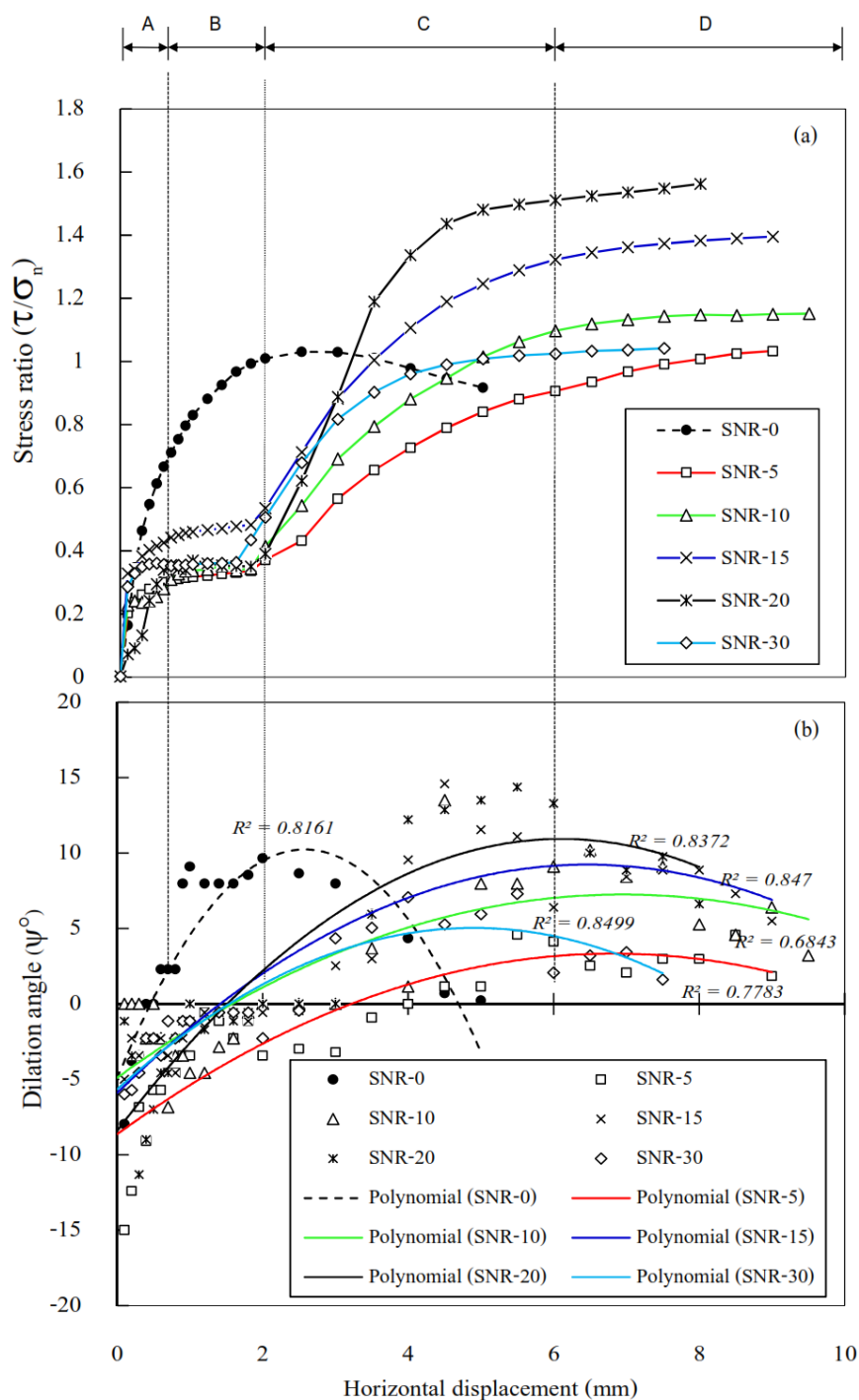
3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาการกระจายอนุภาคของยางพารา และลักษณะการยึดเกาะระหว่างเม็ดทราย รูปที่ 8a ถึง 8d และรูปที่ 8e ถึง 8h แสดงภาพขยายโครงสร้างจุลภาคสำหรับตัวอย่าง SNR-15 และ SNR-20 ที่สเกล 1 mm, 500 μ m, 300 μ m, และ 400 μ m ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเม็ดทรายที่ใช้ทดสอบเป็นแบบเหลี่ยม (Angularity) ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดทรายบางส่วนถูกแทนที่ด้วยอนุภาคของยางพารา โดยเม็ดทรายจะถูกเคลือบ (Coated) จนเกิดการเชื่อมยึดแน่น (Bonded) ระหว่างเม็ดทราย

3.4 ระดับการปรับปรุงกำลังเฉือน

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน SNR ข้างต้น สามารถแสดงความแปรผันของปริมาณยางพารา (Natural rubber content, NRC) กับพารามิเตอร์ที่แสดงถึงพฤติกรรมและความสามารถต้านทานแรงเฉือนของดิน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (Bulk density) ความเชื่อมแน่น (Cohesion) อัตราส่วนโมดูลัสสูงสุดต่อมุมเสียดทานภายในสูงสุด (ψ_{max}/ϕ_u) และอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio, SR) ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 4 ชุด ข้างต้น มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันในลักษณะของระฆังคว่ำ อธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณ NRC เพิ่มขึ้นจะทำให้การเชื่อมยึดระหว่างเม็ดดินมากขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 9b) เม็ดทรายเรียงตัวกันแน่นขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (รูปที่ 9a) ในขณะเดียวกัน แรงเสียดทานและการยึดล็อกกันระหว่างเม็ดดินซึ่งอธิบายด้วย ψ_{max}/ϕ_u (รูปที่ 9c) และอัตราส่วนความเค้น (SR) ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 9d) ในทางกลับกัน เมื่อเพิ่ม NRC ในปริมาณมากเกินไปจะเป็นการไปดันเม็ดทรายให้ขยับวางตัวในลักษณะหลวม ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่น แรงเสียดทาน รวมถึงการยึดล็อกกันระหว่างเม็ดทรายลดลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 9 สามารถกำหนดปริมาณยางพาราที่เหมาะสม (Optimum natural rubber content, ONC) เท่ากับร้อยละ 18 ของน้ำหนักทรายแห้ง ระดับการ

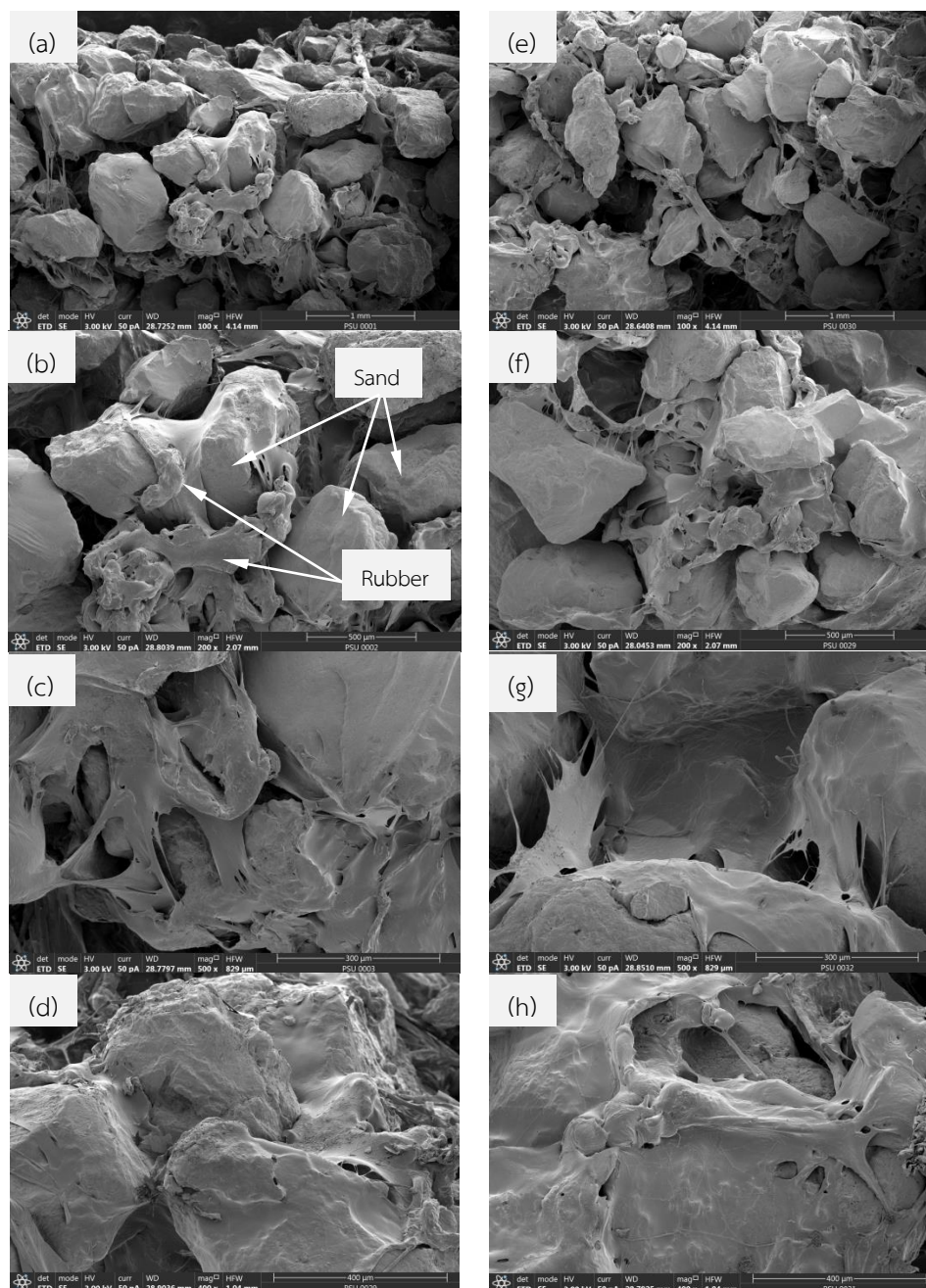
ปรับปรุงกำลังเฉือนประเมินได้จากพารามิเตอร์ที่ปริมาณ ONC เทียบกับตัวอย่างทรายล้วน (SNR-0) ดังแสดงในตารางที่ 3 สรุปได้ว่า ค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 215 kPa อัตราส่วน ψ_{max}/ϕ_u อัตราส่วนความเค้น และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 24%, 50%, และ 2.5% ตามลำดับ



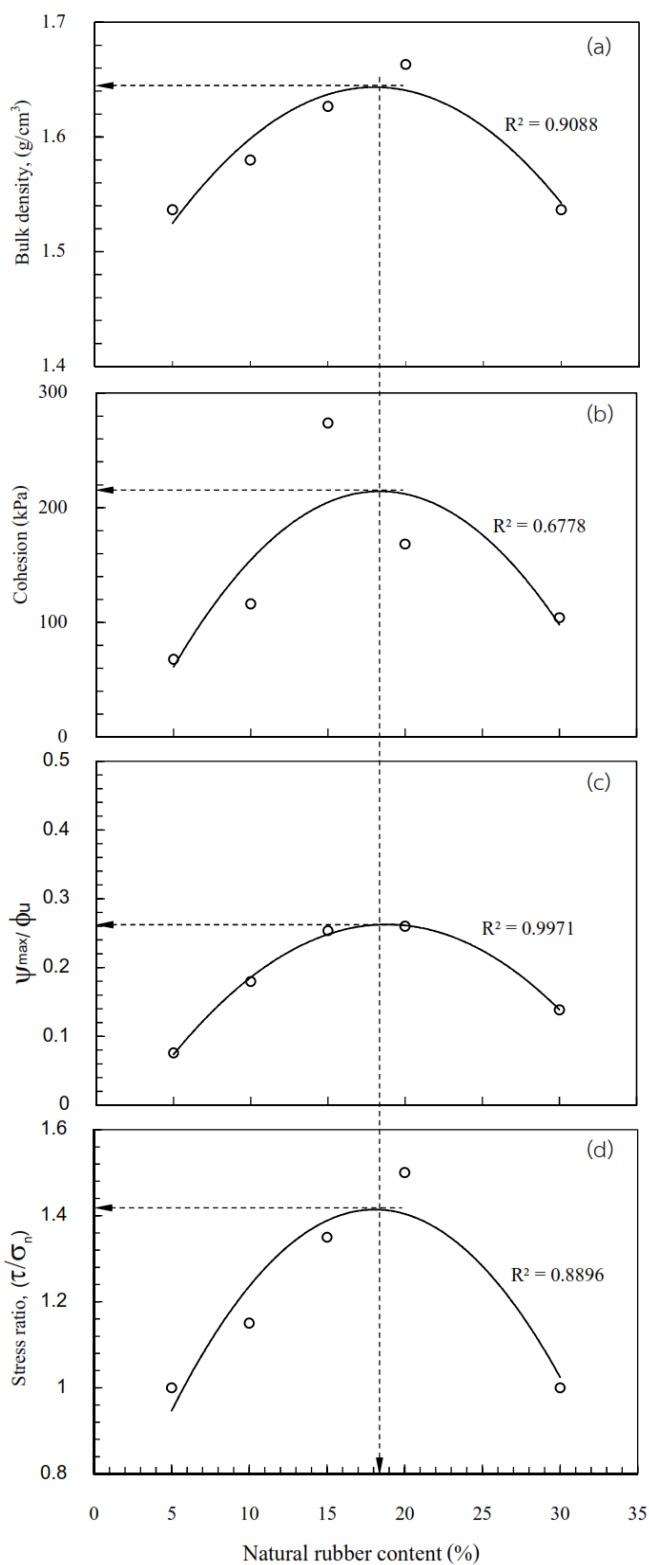
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แนวราบกับ (a) อัตราส่วนความเค้นและ (b) มุมไคเลชั่น ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเท่ากับ 327 kPa ที่อายุการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

ตารางที่ 3 ปริมาณยางพาราที่เหมาะสม (ONC) และพารามิเตอร์ที่ได้จากการประเมิน

Sample	ONC (%)	Cohesion (kPa)	$\psi_{\max}/\phi_u$	Stress ratio, SR	Bulk density (g/cm ³)
SNR-0	-	-	0.21	1.00	1.60
SNR-18	18	215	0.26	1.50	1.64



รูปที่ 8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสำหรับตัวอย่าง (a - d) SNR-15 และ (e - h) SNR-20



รูปที่ 9 ปริมาณยางพาราที่สัมพันธ์กับค่า (a) ความหนาแน่น (b) ความเชื่อมแน่น (c) อัตราส่วน ϕ_{max}/ϕ_u และ (d) อัตราส่วนความเค้นของตัวอย่าง SNR

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของตัวอย่างทรายผสมยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20, และ 30 ของน้ำหนักทรายแห้ง ผ่านการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.1 รูปแบบการรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน SNR มีพฤติกรรมของวัสดุผสม (Composite materials) ระหว่างดินทรายกับวัสดุพอลิเมอร์ สามารถแบ่งพฤติกรรมได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ พฤติกรรมกึ่งออสติก พลาสติกสมบูรณ์แบบ แข็งตัวและ พลาสติกสมบูรณ์แบบหลังแข็งตัว ตามลำดับ

4.2 ผลของการบ่มตัวอย่างดิน SNR พบว่า มีอัตราการเพิ่มกำลังเฉือนในช่วง 14 วันแรก จากนั้นกำลังเฉือนมีแนวโน้มคงที่หลังจาก 14 วัน ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นชัดเจนว่ามีการแทนที่ช่องว่างด้วยอนุภาคของยางพาราในลักษณะการเชื่อมยึดระหว่างอนุภาคของทราย เมื่อวิเคราะห์จากพารามิเตอร์กำลังเฉือนที่ได้ สรุปได้ว่า ยางพาราช่วยทำให้ความสามารถในการเกาะยึดอนุภาคของเม็ดทรายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

4.3 ภายใต้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและพฤติกรรมไคเลชั่น พบว่า ปริมาณยางพาราที่ร้อยละ 10, 15, และ 20 ของน้ำหนักทรายแห้ง อัตราส่วนความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงพฤติกรรมแข็งตัว (Hardening) ประมาณ 15%, 35%, และ 50% ตามลำดับ ส่วนค่า ψ_{max} มีค่าเท่ากับ 3, 7, 9, 11, และ 5 องศา สำหรับตัวอย่าง SNR-5, SNR-10, SNR-15, SNR-20 และ SNR-30 ตามลำดับ จากพฤติกรรมไคเลชั่นที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนความเค้นข้างดัน แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของแรงยึดเกาะและการยึดล๊อคกันระหว่างเม็ดทรายที่เกิดจากการผสมด้วยยางพาราได้อย่างชัดเจน

4.4 จากพารามิเตอร์กำลังเฉือนที่ประเมินได้ พบว่า ค่าความเชื่อมแน่น อัตราส่วนความเค้น และอัตราส่วน ψ_{max}/ϕ_u จะเป็นฟังก์ชันกับปริมาณยางพาราที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ปริมาณยางพารามากเกินไป โดยสามารถกำหนดปริมาณยางพาราที่เหมาะสมได้เท่ากับ 18% ของน้ำหนักทรายแห้ง ระดับการปรับปรุงกำลังเฉือน มีค่าเท่ากับ 215 kPa, 24%, และ 50% สำหรับค่าความเชื่อมแน่น อัตราส่วนความเค้น และอัตราส่วน ψ_{max}/ϕ_u ตามลำดับ

4.5 ความต้านทานกำลังเฉือนที่ได้จากการศึกษานี้ อยู่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแบบแห้งเท่านั้น ดังนั้น ควรศึกษาในสภาวะแบบแช่น้ำและพิจารณาผลต่อกำลังเฉือนเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มเติม รวมถึงควรทำการทดสอบด้วยวิธีอื่น เช่น การทดสอบแรงอัด 3 แกน การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดิน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Likitlersuang, S. *Soil mechanics: Plasticity and critical state theory*, 1st Ed, Chula Press, Bangkok, 2010
- [2] Khatami, H. and O' Kelly, B. Improving mechanical properties of sand using biopolymers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(8), pp. 1402–1406.
- [3] Chang, I., Im, J. and Cho, G.C. Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(10), pp. 1658–1670.
- [4] Chang, I., and Cho, G.C. Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil, *Geomechanics and Engineering*, 2014, 7(6), pp. 633–647.
- [5] Chang, I., Im, J., Prasidhi, A.K. and Cho, G.C., 2015, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 2015, 74, pp. 65–72.
- [6] Guo, L. *Investigation of soil stabilization using biopolymers*, Msc. Thesis, Iowa State University, Iowa, 2014.

-
- [7] Naeini, S.A. and Ghorbanalizadeh, M. Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer, *Journal of Applied Sciences*, 2010, 10, pp. 2839–2846.
- [8] Zandieh, A.R. and Yasrobi, S.S. Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28, pp. 139–145.
- [9] Rezaeimalek, S., Nasouri, A., Huang, J., Bin-Shafique, S. and Gilazghi, S.T. Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 4(2), pp. 145–155.
- [10] Garcia, N.F., Valdes, J.R. and Cortes, D.D. Strength characteristics of polymer-bonded sands, *Geotechnique Letter*, 2010, 5(3), pp. 212–216.
- [11] Rezaeimalek, S., Huang, J. and Bin-Shafique, S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization, *Construction and Building Materials*, 2017, 146, pp. 210–220.
- [12] Liu, J., Feng, Q., Wang, Y., Bai, Y., Wei, J. and Song, Z. The effect of polymer-fiber stabilization on the unconfined compressive strength and shear strength of sand, *Advances and Materials Science and Engineering*, 2017, Article ID 2370763, 9 p. doi:10.1155/2017/2370763.
- [13] Kongparakul, S. Natural rubber modification technology and its application, *Khon Kaen University Science Journal*, 2013, 41 (3), pp. 567–581.
- [14] ASTM D4253-16. *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [15] ASTM D4254-16. *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2016.
- [16] ASTM D3080-94. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2011.
- [17] Scarpetti, G. and Wood D.M. Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests. In: *Conference on deformation and failure of granular materials*, Delft, 31 August–3 September, 1982, pp. 473–484.
- [18] Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S. Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear, *Geotechnique*, 1997, 47(4), pp. 769–790.
- [19] Szypcio, Z. Stress-dilatancy for soils. Part III: Experimental validation for the biaxial conditions, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2017, 39(1), pp. 73–80.