

กำลังรับแรงเฉือนและค่าความหนาแน่นแห้งของทรายบดอัด Shear Strength and Dry Density of Compacted Sand

สมชาย ประยงค์พันธ์^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^{1*}E-mail: fengscpp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงเฉือนของทรายเมื่อถูกบดอัดด้วยค่าพลังงานการบดอัดที่แตกต่างกัน การศึกษาเริ่มจากการบดอัดทรายกลุ่ม SP ตามวิธีของ Proctor แบบมาตรฐานหรือ Standard Proctor โดยมีการใช้ค่าพลังงานในการบดอัดที่แตกต่างกันคือใช้ปริมาณพลังงานที่ 100 %, 75 %, 50 %, และ 25 % ของพลังงานตามวิธี Proctor ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นแบบแห้งที่มากที่สุด หรือ Maximum Dry Density และค่าปริมาณความชื้นหรือ Optimum Water Content ในแต่ละค่าพลังงาน จากนั้นตัวอย่างทรายบดอัดถูกนำไปทดสอบหาลักษณะกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง หรือ Direct Shear Test ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นแบบแห้งของทรายและปริมาณความชื้นจากการทดสอบไม่มีความสัมพันธ์กับพลังงานในการบดอัดแบบมีนัยยะสำคัญ ทรายที่มีขนาดละเอียดหลังจากการบดอัดยังคงแสดงพฤติกรรมในด้านกำลังแบบทรายหลวม เมื่อใช้พลังงานในการบดอัดที่มากกว่า 75 % ของการบดโดยวิธี Proctor กำลังรับแรงเฉือนของทรายสอดคล้องกับทฤษฎีของ Mohr-Coulomb

การทดสอบคุณสมบัติของทรายบดอัด โดยการทดสอบหาความหนาแน่นแบบแห้ง อาจจะไม่สามารถใช้ควบคุมคุณภาพของการบดอัดทรายที่มีการกระจายขนาดที่ไม่ดีได้ เนื่องจากมุมเสียดทานภายในของทรายบดอัดจากการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 18 ถึง 37 องศา โดยค่าดังกล่าวไม่แสดงความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นสูงสุดแบบแห้งที่ได้จากการทดสอบซึ่งมีค่าในช่วง 1628 ถึง 1650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรอย่างมีนัยยะสำคัญ

คำสำคัญ : ทรายบดอัด ความหนาแน่น กำลังรับแรงเฉือน พลังงานในการบดอัด

* Corresponding author, e-mail: fengscpp@ku.ac.th

Submission date: January 27, 2021/ Acceptance date: April 30, 2021/ Published date: May 11, 2021

Abstract

The objective of this article studies the relation of dry density and shear strength of compacted sand. The compaction with variation of compacted energy is performed to poorly graded sand samples, SP. The compaction method for this study conform to Standard Proctor test. The variation of compaction energy, ranged from 25 to 100 % of Proctor energy, is transferred to sand samples to obtain maximum dry density and optimum moisture content at each compaction energy. Compacted sand is then prepared in a shear box of direct shear test to determine the shear strength. The testing results reveal that maximum dry density and optimum moisture content of compacted poorly graded sand are not dominant to the compaction energy. After compaction, poorly graded sand still exhibits the stress-strain behavior of loose state sand. The application of compaction energy of more than 75 % of Standard Proctor energy result the shear strength of sand conforming to Mohr-Coulomb theory.

Control testing of compacted poorly graded sand using dry density may not investigate the quality of compaction work. The internal of friction angle from compacted sand sampling are in between 18 to 37 degree which are not relate to maximum dry unit weight from testing at the same energy. For all cases of compaction energy in this study, the maximum dry density varies from 1628 to 1650 kilograms per cubic meter.

Keywords: Compacted Sand, Density, Shear Strength, Compaction Energy

1. ที่มาและความสำคัญ

การใช้วัสดุทางธรรมชาติ เช่น ดิน หิน หรือทราย มาเป็นวัสดุก่อสร้างจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำมาใช้งาน เนื่องจากกระบวนการขนย้าย การแทนที่ลงในพื้นที่ก่อสร้างทำให้วัสดุธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิม ถึงแม้คุณสมบัติด้านกายภาพหรือ Physical Properties เช่น ขนาดเม็ดดิน การกระจายขนาดของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะ จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมหรือ Engineering Properties เช่น ความหนาแน่น การไหลซึมของน้ำ และ กำลังรับแรงเฉือนจะเปลี่ยนแปลงไป การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้การบดอัดดิน (Compaction) เป็นวิธีที่มีการนำไปปฏิบัติโดยทั่วไป เนื่องจากทำงานง่าย ประหยัด และมีประสิทธิภาพ ทั้งยังช่วยลดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างในงานต่าง ๆ ภายในอนาคตลดการไหลซึมของน้ำ เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินได้ สามารถประยุกต์ใช้ดิน ทราย หรือหิน ที่เป็นวัสดุก่อสร้าง ลักษณะงานที่เห็นได้ชัดเจนคือ งานถนน หรืองานเขื่อนกักเก็บน้ำ หรือ เขื่อนกันตลิ่งแม่น้ำ เป็นต้น

การบดอัดดินจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินสูงขึ้น และลดช่องว่างที่มีอากาศหรือน้ำแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน กำลังของดินมีค่ามากขึ้นเนื่องจากเม็ดดินอยู่ชิดกัน แรงเสียดทานซึ่งเป็นพื้นฐานของกำลังรับ

แรงของดินมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ค่าความหนาแน่นของดินจะมีค่าสูงที่สุดก็ต่อเมื่อได้รับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมภายใต้พลังงานในการบดอัดค่าหนึ่ง R.R.Proctor กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแบบแห้งของดินที่บดอัดในห้องปฏิบัติการที่เป็นที่ยอมรับ และนิยมใช้เป็นวิธีทดสอบแบบมาตรฐานในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว

ความสามารถในการต้านทานต่อแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินหรือ Friction Angle และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหรือ Cohesion ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามน้ำหนักที่กดกระทำตั้งฉากกับระนาบแรงเฉือน และพื้นที่รับแรงเฉือนหรือผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นผลจากการบดอัดดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพระหว่างก่อสร้าง โดยทั่วไปการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการบดอัดดินในสนาม อาจไม่สามารถบดอัดให้มีค่าความหนาแน่นได้มากที่สุดตามต้องการได้ด้วยเหตุผลหลายประการ ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการที่ให้ค่าของความหนาแน่นแบบแห้งที่มีความสัมพันธ์กับความชื้น และกำลังรับแรงเฉือนของดินจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติด้านกำลังของดินบดอัด และเมื่อมีการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้คุณสมบัติด้านกำลังของดินมีความแตกต่างกันไปด้วย ผลของการศึกษานี้จะสามารถใช้คาดการณ์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของดินที่ได้รับจากการบดอัดดินด้วยพลังงานที่แตกต่างกันกับกำลังรับแรงเฉือน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในงานทางวิศวกรรมต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงเฉือนของดิน เมื่อดินถูกบดอัดด้วยค่าพลังงานการบดอัดที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีการบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธีของ Proctor

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา [3] ให้คำนิยาม หินเป็น วัตถุที่เป็นเศษหิน เศษแร่ขนาดเล็กมีลักษณะร่วน ซุยไม่เกาะกัน ส่วนใหญ่ ประกอบด้วยแร่ควอตซ์หรือหินบะซอลต์ และอาจมีแร่อื่นปนอยู่เล็กน้อย แต่อาจพบแร่ชนิดอื่นผสมมากบ้างน้อยบ้าง เช่น เฟลด์สปาร์ ฮีมาไทต์ ยิปซัม หรืออาจเป็นหินที่มีขนาดเล็ก เท้าทราย เช่น หินดินดาน หินทราย หินเชิร์ต เป็นต้น คุณสมบัติทางกายภาพของทรายโดยทั่วไปอธิบายไว้ว่า ทรายคือหินแข็งที่แตกแยก ออกมาจากก้อนหินใหญ่ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เองตามธรรมชาติ ทรายมีขนาดระหว่าง 1/12 นิ้ว (2.11 เซนติเมตร) ถึง 1/400 นิ้ว (0.0063 เซนติเมตร) ถ้ามีขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทรายจะประกอบด้วย แร่ควอตซ์หรือหินบะซอลต์ ทรายแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ทรายบก และทรายแม่น้ำ ทรายนิยมนำมาใช้ในการปรับถมระดับเพื่อการก่อสร้างเนื่องจากการทำงานที่ง่ายและสะดวกในการปรับปรุงร่างของทรายถมให้เข้ากับรูปร่างของงานที่ต้องการและทำให้แน่นด้วยการบดอัดโดยเครื่องจักรได้ไม่ยาก

การบดอัดดินเป็นวิธีปรับปรุงคุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรมให้ดีขึ้น วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าไม่มี

อยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อนุของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว R.R. Proctor ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไป จุดประสงค์ของการบดอัดดินก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของมวลดิน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์หลายประการคือ ลดการทรุดตัวของดิน เพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินและปรับปรุงเสถียรภาพความลาดชัน ปรับปรุงกำลังต้านทานน้ำหนักรถของพาหนะในชั้นพื้นทาง ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร เช่น สาเหตุจากการบวมตัวและการหดตัวของดิน และลดการซึมผ่านของน้ำในดิน พื้นฐานการบดอัดดิน ได้ถูกสร้างขึ้นโดย R.R. Proctor ในปี 1930 โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (Proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test หรือ Compaction Test ซึ่งมีวิธีการทดสอบ 2 แบบคือ การบดอัดแบบมาตรฐาน เรียกว่า Standard Proctor และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เรียกว่า Modified Proctor

แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน หรือเรียกว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนอาศัยหลักการพื้นฐานของความเสียดทานระหว่างวัตถุกับวัตถุบริเวณผิวสัมผัส ที่แปรผันกับหน่วยแรงกดที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัสนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากระหว่างเม็ดดิน ถูกสมมุติให้เป็นสมการเส้นตรงที่เรียกว่าสมการของ Mohr-Coulomb แสดงได้ดังนี้

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

โดย τ = หน่วยแรงเฉือน

c = แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่น (Cohesion)

σ = หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน

ϕ = มุมเสียดทาน (Friction Angle)

ค่าของ c และ ϕ คือค่าพารามิเตอร์ด้านกำลัง หรือ Strength Parameter ของดิน ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ถือเป็นค่าคงที่สำหรับดินแต่ละชนิดภายใต้สภาวะหนึ่ง ซึ่งจะนำไปใช้ได้กับดินนั้นที่อยู่ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยข้อมูลค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินบางชนิด

ลักษณะของดิน	แรงยึดเหนี่ยว (กก/ซม ²)	มุมเสียดทาน (องศา)	หมายเหตุ
Soft Bangkok Clay	0.05 - 0.15	0 - 10	กรณีไม่ระบายน้ำ
Soft Bangkhen Clay	0.06 - 0.013	0 - 22	กรณีไม่ระบายน้ำ
Ottawa Sand	0.00	25 - 40	ขึ้นกับความแน่นของดิน
Gravel	0.00	35 - 50	ขึ้นกับความแน่นของดิน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การหาขนาดเม็ดดินและการกระจายขนาด

ตัวอย่างดินจากแหล่งวัสดุถูกนำมาหาขนาดและการกระจายขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง หรือ Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C316 และหาความถ่วงจำเพาะ หรือ Specific Gravity ตามมาตรฐาน ASTM D972 พร้อมทั้งคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อจำแนกดินออกตามวิธีของ Unified Soil Classification หรือ USCS

4.2 การทดสอบการบดอัดดินโดยวิธี Proctor แบบมาตรฐาน

นำตัวอย่างดินจากข้อ 1) ทำการบดอัดตามวิธีของ Proctor แบบมาตรฐาน หรือ Standard Proctor Test ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D698 โดยในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานในการบดอัดจากที่ใช้ในการทดสอบแบบมาตรฐาน ลงครวละ 25% ของพลังงานที่ใช้ จำนวน 4 ค่าระดับพลังงาน คือ 100, 75, 50 และ 25% ตามลำดับ จากนั้นบันทึกค่าความหนาแน่นและความชื้นในการบดอัด

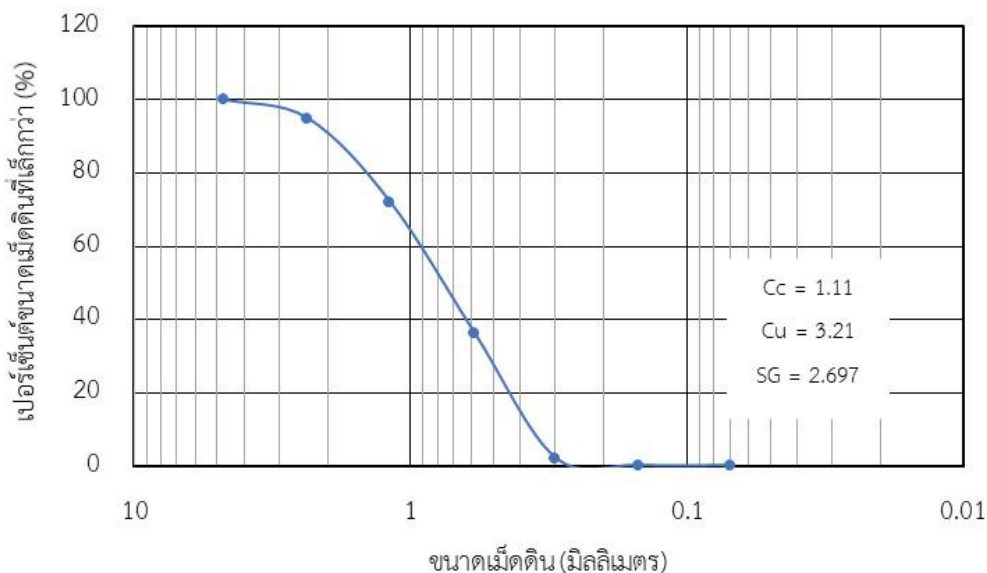
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินตัวอย่างจากข้อ 2)

ตัวอย่างดินจากข้อ 1) ถูกนำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยวิธีทดสอบแบบแรงเฉือนโดยตรงหรือ Direct Shear Test แบบระบายน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D3080 ภายใต้อัตราความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Proctor แบบมาตรฐาน ทุกค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับพลังงานในการบดอัด ดังแสดงในข้อ 2) สำหรับหน่วยแรงกดทับหรือ Confining Pressure ที่ใช้ในการทดสอบ กำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 0.25, 0.50 และ 1.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงค่าของตัวแปรด้านกำลังของดิน หรือ Strength Parameter ของตัวอย่างดินที่ความแน่นต่าง ๆ

5. ผลและวิจารณ์

5.1 ขนาดเม็ดดินและการกระจายขนาดของเม็ดดิน

ตัวอย่างดินเมื่อนำมาทดสอบหาขนาดเม็ดดินและการกระจายขนาด โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C316 และทดสอบหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D972 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขนาดเม็ดดินและการกระจายขนาด

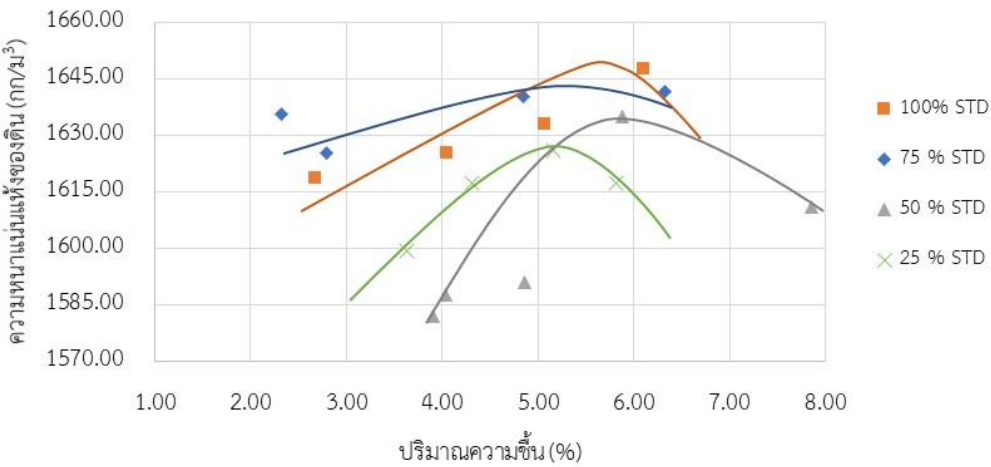
จากผลของการทดสอบในภาพที่ 1 เมื่อนำมาจำแนกชนิดของดินตามวิธีของ Unified Soil Classification System หรือ USCS ผลที่ได้ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็น ทราย (Sand) ที่มีค่าการกระจายขนาดไม่ดีหรือ Poorly Grade หรือ SP ขนาดใหญ่ที่สุดของเม็ดดินมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36 และ 4.76 มิลลิเมตร มีขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดของดินมวลละเอียด มีเพียง 0.01% ของมวลดินทั้งหมดที่นำมาทดสอบ จากคุณสมบัติของดินดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุถมคันทาง ประเภททราย ของกรมทางหลวง (กรมทางหลวง, 2532) และ กรมทางหลวงชนบท (กรมทางหลวงชนบท, 2545)

5.2 ผลการทดสอบโดยวิธีการบดอัดโดยวิธีมาตรฐาน

ทรายที่จำแนกได้เป็นกลุ่ม SP ถูกนำมาบดอัดด้วยวิธี Proctor แบบมาตรฐาน เพื่อหาคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของดินแบบแห้ง และค่าปริมาณความชื้นที่สัมพันธ์กัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบหาความแน่นของดินตัวอย่างด้วยพลังงานของการบดอัดที่แตกต่างกัน เริ่มต้นที่ 100% ของพลังงานที่ใช้ตามมาตรฐานวิธีทดสอบของ Proctor และตามมาตรฐาน ASTM D689 จากนั้นลดค่าพลังงานลงคราวละ 25 % จนเหลือค่าพลังงานที่ใช้ในการบดอัดลงเหลือเท่ากับ 25% ของพลังงานที่ใช้ตามมาตรฐาน ผลของการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการบดอัดโดยวิธี Proctor แบบมาตรฐาน

สัดส่วนพลังงานของ การบดอัด	คุณสมบัติของดินบดอัดตามวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน	
	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_d^{max})	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC)
(%)	(กก/ม ³)	(%)
100	1650	5.70
75	1643	5.30
50	1635	5.90
25	1628	5.20



รูปที่ 2 โค้งการบดอัดจากการทดสอบการบดอัดโดยวิธี Proctor แบบมาตรฐาน

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 2 และรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดหรือ Maximum Dry Density ของทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ดี มีค่าอยู่ในช่วง 1628 ถึง 1650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แปรตามค่าพลังงานการบดอัดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีความหนาแน่นแบบแห้งของทรายมีค่าลดลงตามค่าพลังงานบดอัดที่ลดลงในอัตรา 0.29 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อเปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการบดอัดที่ลดลง และข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดปริมาณของพลังงานในการบดอัดลง 75 % หรือเหลือพลังงานในการบดอัดที่ 25 % ของพลังงานการบดอัดทดสอบตามมาตรฐานการบดอัด ความหนาแน่นแบบแห้งของทรายลดลงเท่ากับ 22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือประมาณ 1.33 % ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นสูงสุดแบบแห้งของทรายที่มีการกระจายขนาดละเอียด ไม่แสดงความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานของการบดอัดอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดของเม็ดดินของตัวอย่างทรายที่นำมา

ทดสอบมีการกระจายขนาดในช่วงที่ไม่กว้าง คือมีค่าอยู่ในช่วง 0.30 ถึง 5.00 มิลลิเมตร โดยประมาณซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นดินในกลุ่มที่มีขนาดเม็ดเดียว หรือ Uniform Graded Soil ขนาดเม็ดดินที่ใกล้เคียงกันนี้ส่งผลให้ระดับของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของการบดอัดไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของดินแห้ง เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

สำหรับปริมาณความชื้นหรือ Water Content ของตำแหน่งที่ตัวอย่างดินมีความหนาแน่นแบบแห้งสูงสุด ที่เรียกว่า Optimum Moisture Content หรือ OMC ผลการทดสอบพบว่าค่าอยู่ในช่วง 5.20 ถึง 5.29 % และพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งในส่วน of พลังงานการบดอัดที่ดินได้รับและค่าความหนาแน่นของดินแบบแห้งที่มากที่สุดในแต่ละค่าพลังงานการบดอัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เม็ดดินของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบจัดอยู่ในกลุ่มของดินขนาดเดียว ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากค่าของพลังงานการบดอัดที่ได้รับ ในเบื้องต้นจากผลของการทดสอบการบดอัดดินที่กระทำกับตัวอย่างทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ดี กลุ่ม SP พบว่า ค่าพลังงานของการบดอัดที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของดินบดอัด ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของความหนาแน่นแบบแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่จุด OMC

5.3 ผลการทดสอบกำลังของทรายบดอัดโดยวิธีทดสอบแบบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

ตัวอย่างทราย และผลของการทดสอบการบดอัดโดยวิธี Proctor แบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ถูกนำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ความหนาแน่นแห้งของดินสูงสุด ที่ความชื้นของการบดอัดที่เหมาะสมและที่พลังงานของการบดอัดที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 25 ถึง 100% ของพลังงานที่ใช้ในการทดสอบแบบมาตรฐานของ Proctor โดยขณะทดสอบกำหนดให้พฤติกรรมระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงเป็นแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) และระบายน้ำ (Drained) โดยมีค่าหน่วยแรงกดที่ตั้งฉากกับตัวอย่างดินในขณะทดสอบที่ 2.50, 5.00 และ 10.00 ตันต่อตารางเมตร โดยผลการทดสอบที่แสดงความสัมพันธ์ในส่วน of หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) และการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Deformation) แสดงไว้ในภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยวิธีทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง แสดงให้เห็นในทุกค่าพลังงานการบดอัดว่า ทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ดี เมื่อนำมาบดอัดทรายยังแสดงพฤติกรรมเป็นทรายหลวมพิจารณาได้จากการที่ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบไม่แสดงตำแหน่งจุดยอดของหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ที่ชัดเจนก่อนที่จะหน่วยแรงเฉือนจะลดลงมาอยู่ระดับหน่วยแรงเฉือนคงเหลือ (Residual Strength) เมื่อมีการเคลื่อนตัวในแนวราบมากขึ้น ซึ่งพฤติกรรมของความสัมพันธ์ในลักษณะนี้พบเห็นได้ในทรายหลวม แต่จะไม่พบในทรายแน่น

นอกจากนี้พฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบ ของตัวอย่างทรายแสดงให้เห็นว่า ที่พลังงานบดอัด 75 และ 100% ของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธี Proctor หน่วยแรงเฉือนของทรายที่หน่วยแรงกดทับมากกว่า 5.00 ตันต่อตารางเมตร จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาเทียบกับหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากการใช้หน่วยแรงกดทับที่น้อยกว่า ในขณะที่เมื่อใช้พลังงานบดอัด 25 และ 50% ของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธี Proctor การเปลี่ยนแปลงของ

หน่วยแรงเฉือนจากการทดสอบแบบแรงเฉือนแบบโดยตรงไม่แสดงความสัมพันธ์อย่างชัดเจนต่อหน่วยแรงกดทับที่กระทำกับมวลดิน ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ใช้พลังงานบดอัดน้อย เมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง อาจเกิดการขยายตัวของตัวอย่างทรายในแนวดิ่ง เม็ดทรายอาจเกิดการเคลื่อนที่ระหว่างเม็ดทรายด้วยกัน ทั้งนี้เนื่องจากการบดอัดที่พลังงานต่ำไม่ก่อให้เกิดการขัดกัน (Interlocking) ของเม็ดทรายที่มากพอที่จะแสดงพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือนที่แปรผันโดยตรงกับหน่วยแรงกดในลักษณะเดียวกับการบดอัดที่พลังงานสูงกว่า พลังงานที่ตัวอย่างทรายได้รับจากการเฉือนตัวอย่างคาดว่าจะถูกนำไปใช้เพื่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของทรายจึงทำให้ไม่แสดงพฤติกรรมที่มีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงกด

นอกจากนี้เมื่อนำค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ทดสอบได้มาหาความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักกดทับจะพบว่า เมื่อใช้พลังงานในการบดอัด 75 และ 100% ของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธี Proctor ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงกดทับมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นโดยมีจุดตัดที่จุดกำเนิด (Origin) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Mohr-Coulomb สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น โดยพิจารณาได้จากภาพที่ 4 เมื่อพลังงานในการบดอัดต่ำกว่า 75% ของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธี Proctor ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงกดทับ จะแสดงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับทฤษฎีของ Mohr-Coulomb น้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเรื่องของการใช้พลังงานไปเพื่อการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคของทราย มากกว่าจะใช้เพื่อเอาชนะการขัดกันของอนุภาค จากภาพที่ 4 เรายังสามารถหาคุณสมบัติของทรายบดอัดที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรด้านกำลัง ในที่นี้คือค่ามุมเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) หรือมุม ϕ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงกดทับและมุมเสียดทานภายในของตัวอย่างทราย

หน่วยแรงกด (กก/ซม ²)	หน่วยแรงเฉือน (กก/ซม ²)			
	% ของการบดอัดตามวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน			
	100	75	50	25
0.248	0.22	0.22	0.17	0.26
0.496	0.39	0.27	0.24	0.51
0.992	0.75	0.63	0.51	0.55
มุมเสียดทาน (องศา)	37.37	32.08	27.35	18.97

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า มุมเสียดทานภายในของการทดสอบหน่วยแรงเฉือนแบบแรงเฉือนโดยตรงของตัวอย่างทรายบดอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 18 ถึง 37 องศาโดยประมาณ ที่เปอร์เซ็นต์ของการบดอัด 25 ถึง 100% ของการบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธีของ Proctor ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแบบแห้งที่สูงที่สุดของตัวอย่างทรายในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1628 ถึง 1650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่เปอร์เซ็นต์ของการบดอัดแบบมาตรฐานในช่วงเดียวกัน พบว่าในช่วงพลังงานการบดอัดที่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของมุมเสียดทานภายในแสดงนัยยะสำคัญกับค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการบดอัดมากกว่าค่าความหนาแน่นแบบแห้งของตัวอย่างทรายชนิดเดียวกัน

6. สรุปผล

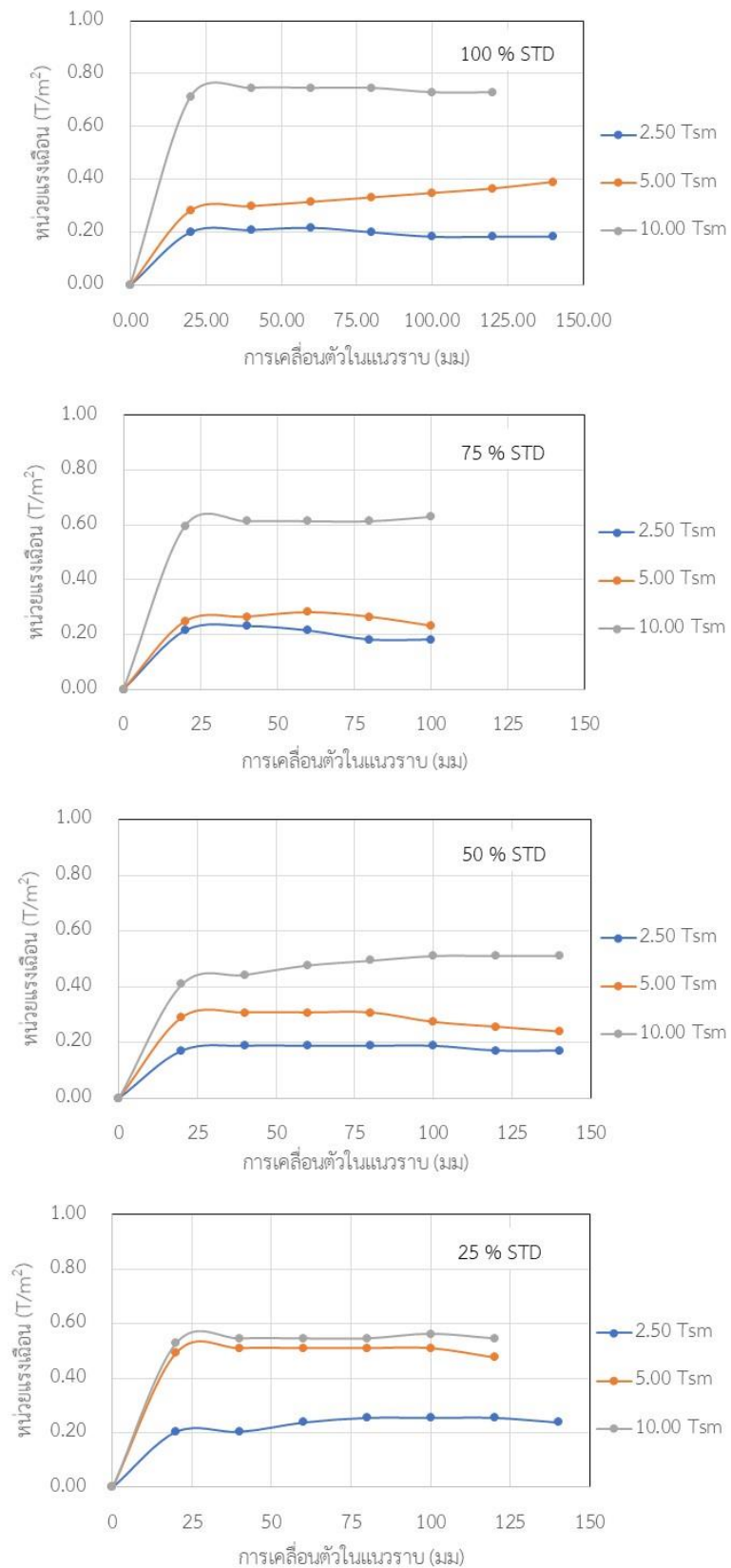
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแบบแห้งของการบดอัดดินตามวิธี Proctor แบบมาตรฐานและค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ของตัวอย่างทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ตี หรือ SP มีข้อสรุปสำคัญ ๆ ดังนี้

6.1 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ตี มีค่าอยู่ในช่วง 1628 ถึง 1650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แปรตามค่าพลังงานการบดอัดที่เปลี่ยนแปลงไปจาก 25 ถึง 100 % ของพลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธี Proctor โดยมีความหนาแน่นแบบแห้งของทรายมีค่าลดลงตามค่าพลังงานบดอัดที่ลดลงในอัตรา 0.29 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อเปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการบดอัดที่ลดลง หรือกล่าวได้ว่าความหนาแน่นแบบแห้งที่เปลี่ยนแปลงไปดังกล่าวไม่มีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการบดอัด

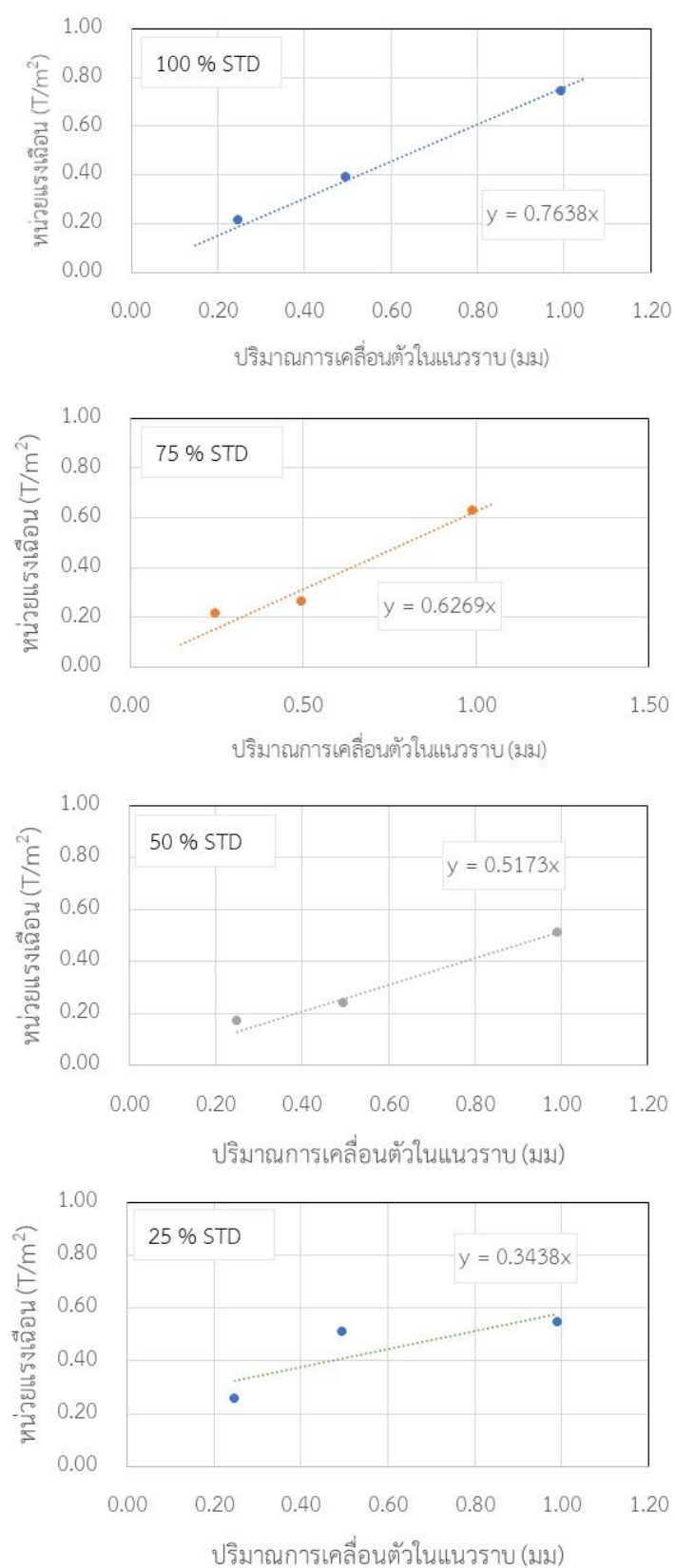
6.2 ปริมาณความชื้นในดินในขณะที่ยังมีความหนาแน่นแบบแห้งสูงสุด ที่เรียกว่า Optimum Moisture Content หรือ OMC ผลการทดสอบพบว่าค่าอยู่ในช่วง 5.20 ถึง 5.29 % ไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งในส่วนของการพลังงานการบดอัดที่ดินได้รับและค่าความหนาแน่นของดินแบบแห้งที่มากที่สุดในแต่ละค่าพลังงานการบดอัด

6.3 ทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ตี เมื่อนำมาบดอัดด้วยวิธี Proctor ทรายยังแสดงพฤติกรรมเป็นทรายหลวม นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงที่หน่วยแรงกดตั้งฉากใด ๆ พบว่าเฉพาะที่พลังงานการบดอัดมากกว่า 75 % ของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานขนาดของหน่วยแรงเฉือนที่ได้รับจากการทดสอบสอดคล้องกับทฤษฎีของ Mohr-Coulomb

6.4 มุมเสียดทานภายในของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรงของตัวอย่างทรายบดอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 18 ถึง 37 องศาโดยประมาณ ที่เปอร์เซ็นต์ของพลังงานในการบดอัด 25 ถึง 100% ของการบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธีของ Proctor



รูปที่ 3 หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวแนวราบของทรายที่พลังงานบดอัด 25 – 100%



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง

6.5 ในช่วงพลังงานการบดอัดที่เปลี่ยนแปลงจาก 25 ถึง 100% ของการบดอัดแบบมาตรฐานตามวิธีของ Proctor การเปลี่ยนแปลงของมุมเสียดทานภายในแสดงนัยยะสำคัญกับค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการบดอัดมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นแบบแห้งของตัวอย่างทรายชนิดเดียวกัน ดังนั้นสำหรับทรายที่มีการกระจายขนาดไม่ดี การควบคุมการบดอัดด้วยการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแบบแห้งจะไม่ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงเฉือนของทรายที่ได้รับ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรชวัล กล้าเอม, กิตติพิชญ์ ปัทมะกลางคุล และ ธนพล เกิดปิ่น (2562) การศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนและค่าความหนาแน่นแห้งของทรายบดอัด, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] วรากร ไม้เรียง, ประทีป ดวงเดือน และ จิรพัฒน์ โชติกไกร (2525) ปฐพีกลศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ (พิมพ์ครั้งที่ 1) กรุงเทพมหานคร, ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์ สืบค้นจาก: <https://ebook.lib.ku.ac.th/>
- [3] พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน (2558) , กองวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน, กรุงเทพมหานคร