

**ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน
และกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์และทราย**
**Relationship of Shear Strength with Modulus of Rupture for
Soft Clay mixed by Cement and Sand**

สุธี ปิยะพิพัฒน์¹

suthee.p@en.rmutt.ac.th¹

บทคัดย่อ

ผลกระทบของการผสมทรายในดินซีเมนต์ได้ถูกตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยการทดสอบแรงกดแกนเดียว การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยูบอว์ตัตว-ไม่ระบายน้ำ และการทดสอบแรงดัดด้วยวิธีกีดกันสองจุดจากการแบ่งกันออกเป็นสามส่วนเท่า ๆ กัน ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบได้แก่ดินเหนียวกรุงเทพฯ ส่วนทรายที่ใช้ได้แก่ ทรายจากจังหวัดกาญจนบุรีที่มีขนาดของเม็ดทรายผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 สำหรับซีเมนต์ที่ผสมเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้ เริ่มจากนำตัวอย่างดินเหนียวมาผสมกับทรายในปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40% ของน้ำหนักดินเหนียวแห้งตามลำดับ จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปผสมกับซีเมนต์ที่ปริมาณ 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม แล้วนำไปบรรจุในมอลด์ทดสอบ 2 แบบ ได้แก่ 1) มอลด์ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 7 เซนติเมตร สำหรับเป็นตัวอย่างทดสอบแรงกดแกนเดียว และการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยูบอว์ตัตว-ไม่ระบายน้ำ 2) มอลด์รูปคานที่มีขนาด 7.5×7.5×35 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับใช้ทดสอบหาค่าแรงดัด ใช้อายุการบ่ม 28 วัน ได้ผลดังนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสม ทำให้ค่าแรงกดอัดแกนเดียว ค่าองศาความเสียดทานภายใน และโมดูลัสการแตกร้าวสูงขึ้นตาม และความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบของทั้งสามการทดสอบกับปริมาณที่ผสมเพิ่มได้ถูกนำเสนอ

คำสำคัญ : ดินซีเมนต์, การทดสอบแรงเฉือนแบบยูบอว์ตัตว-ไม่ระบายน้ำ, โมดูลัสการแตกร้าว

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

The effect of sand mixed with soil cement has been investigated by laboratory tests as the unconfined compression test, the consolidated-undrained test and the third-point loading test. The soil sample is Bangkok clay and the sand used is Kanjanaburi sand, passing through sieve No. 4 but retained on sieve No. 10. The cement used is a portland cement type 1. For the procedures of specimen preparation, firstly the clay sample was mixed by sand of 0, 10, 20, 30 and 40% by dry weight of clay respectively. Then the aggregate as clay-sand mixer was mixed with cement of 10, 15 and 20% by dry weight. The water content of aggregate was adjusted to higher than the liquid limit of aggregate about 5%. Then the aggregate was mixed by cement and put it into 2 kinds of mould as 1) the cylinder mould with a diameter of 3.5 cm and a high of 7 cm for the unconfined compression test and the CU test and 2) the beam mould with the size of 7.5'7.5'35 cm³ for the third point loading test. The curing day used is 28 days. As results, the higher amount of sand, the higher unconfined compressive strength (q_u), angle of internal friction and modulus of rupture. The relationships among the results of 3 types of testing with the quantity of sand mixed were demonstrated.

Keywords : soil cement, CU test, modulus of rupture.

1 บทนำ

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียว ด้วยการใส่ซีเมนต์เข้าไปผสมกับชั้นดินเหนียว เพื่อให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับดินเหนียว จับตัวกันเป็นลักษณะแท่งทรงกระบอกในชั้นดิน หรือที่เรียกว่า เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในประเทศไทย [1,2] กลุ่มของเสาเข็มดินซีเมนต์ ทำหน้าที่ลดการทรุดตัว และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุง [3, 4] จากการ

ศึกษาของ Chai et al. [5] และ Pongsivasathit et al. [6] พบว่าในกรณีที่เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating soil-cement column) มีค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus, E_{50}) สูงขึ้น ยิ่งทำให้สามารถลดการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวได้มากขึ้น

แนวความคิดในการเพิ่มค่า E_{50} ของดินซีเมนต์ ด้วยการใส่ทรายเข้าไปผสมในชั้นดินเหนียวอ่อนก่อน แล้วจากนั้นจึงทำการผสมซีเมนต์เข้าไป ซึ่งวิธีนี้เป็นการลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ลง

ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลงอีกด้วย เป็นสิ่งที่นักศึกษาอยู่ ดังนั้นโครงงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของทรายอยู่ไม่เกินร้อยละ 50 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนของซีเมนต์และทรายต่าง ๆ เพื่อดูผลกระทบของทรายที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม และใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในกรณีชั้นดินเหนียวอ่อนมีทรายผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 50 และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ชั้นสูงในงานวิศวกรรมต่อไป

2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

สำหรับดินเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ความลึก 4 – 5 เมตร บริเวณโบกเทศบาลนา เก็บตัวอย่างดินแบบถูกรบกวน (Undisturbed sample) มีคุณสมบัติเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างทรายแม่น้ำจากอำเภอนาทม จ.น่าน จังหวัดกาญจนบุรี ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 10

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

คุณสมบัติของดินทางกายภาพ	
Natural Water Content (%)	56.73
Specific Gravity, Gs	2.69
Liquid Limit, LL (%)	40.00
Plastic Limit, PL (%)	25.48
Plastic Index, PI (%)	14.52

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์เริ่มจากนำดินเหนียวมาผสมกับทราย จากนั้นเติมน้ำในส่วนผสมให้มีปริมาณความชื้น มากกว่าค่าพิกัดความเหลว (Liquid limit) ของส่วนผสมประมาณ 5% เพื่อให้ง่ายต่อการผสม จากนั้นทำการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1 : 1 แล้วนำซีเมนต์เพสต์ที่ได้ผสมเข้ากับส่วนผสมของดินเหนียวปนทรายที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องผสมคอนกรีตให้เข้ากัน ในตารางที่ 2 แสดงถึงปริมาณซีเมนต์และทรายสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว นำไปบรรจุใส่ในแบบหล่อเตรียมตัวอย่าง 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้แก่ แบบคานขนาด $7.5 \times 7.5 \times 35 \text{ cm}^3$ สำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดด้วยวิธี Third point loading test และแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm สูง 7 cm เพื่อทดสอบหาค่าแรงกดแกนเดียว และทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ (CU test) จากนั้นเมื่อดินซีเมนต์เริ่มจับตัวจึงถอดออกจากแบบหล่อเตรียมตัวอย่าง แล้วนำมาห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสแบบบางเพื่อป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกไป บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบจำนวนตัวอย่างการทดสอบในแต่ละกรณีถูกแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนของปริมาณทรายและซีเมนต์ในกรณีต่าง ๆ

กรณี	ส่วนผสมในดินเหนียว		ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนัก ดินเหนียวแห้ง +ทราย)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ		
	ปริมาณทราย (% ของน้ำหนัก ดินเหนียวแห้ง)	ปริมาณน้ำ (% ของน้ำหนัก ดินเหนียวแห้ง+ทราย)		Unconfined compression test	CU test	Third-point loading test
1	0	45.00	10	5	2	3
			15	5	2	3
			20	5	2	3
2	10	37.6	10	5	2	3
			15	5	2	3
			20	5	2	3
3	20	35.20	10	5	2	3
			15	5	2	3
			20	5	2	3
4	30	33.06	10	5	2	3
			15	5	2	3
			20	5	2	3
5	40	31.35	10	5	2	3
			15	5	2	3
			20	5	2	3

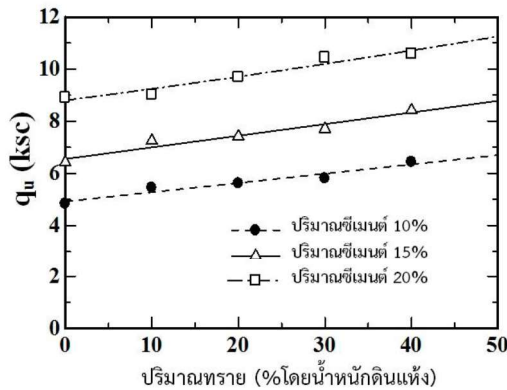


รูปที่ 1 การจัดทำตัวอย่างการทดสอบ

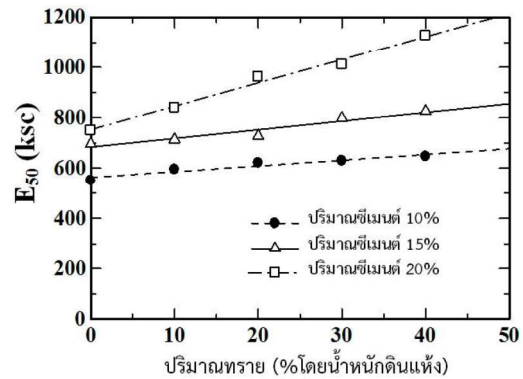
3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าแรงกด แกนเดียว

สำหรับการทดสอบแรงกดแกนเดียว
เพื่อหาค่า q_u ของดินเหนียวผสมซีเมนต์และ
ทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ อ้างอิงตามมาตรฐาน
ASTM D 2166 นำผลทดสอบที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย
ได้ผลทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณทรายที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า q_u

จากผลการทดสอบ พบว่าค่า q_u มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม อย่างมีนัยสำคัญ และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณทรายเป็นลักษณะสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2 การเพิ่มปริมาณทรายซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบที่ผสมลงไป ในดินเหนียว เม็ดของทรายสามารถช่วยให้ความสามารถในการรับแรงของดินซีเมนต์ดีขึ้น เกิดการส่งถ่ายแรงระหว่างเม็ดดินดีขึ้นกว่ากรณีดินเม็ดละเอียดหรือดินเหนียวเพียงอย่างเดียว เพราะปกติดินทรายนั้นสามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าดินเหนียวอยู่แล้ว

3.1.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า E_{50}

พบว่าค่า E_{50} มีแนวโน้มที่คล้ายกันกับค่า q_u การเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} มีผลเนื่องจากทรายที่ใส่ผสมเพิ่มลงไป ในดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 20% พบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} สูงที่สุด

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน

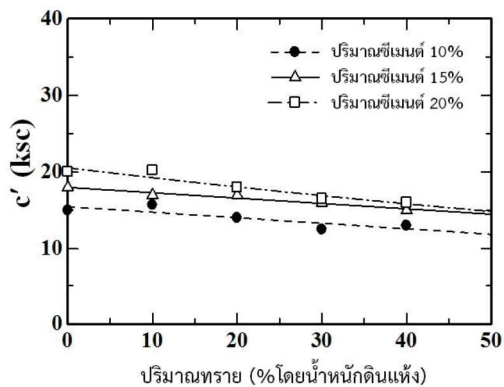
การศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ใช้วิธีทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ หรือ CU test ตามมาตรฐาน ASTM D 4767-95 ดังแสดงในรูปที่ 4 กำหนดให้มีค่าความดันรอบด้าน (Confining pressure) ที่ 150, 250 และ 350 กิโลปาสคาล ตามลำดับ เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการยุบอัดตัวคายน้ำ จากนั้นทำการกดตัวอย่างจนวิบัติ นำค่าหน่วยแรงตามแนวแกนสูงสุด (Maximum deviator stress) ที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 การทดสอบแบบ CU test

3.2.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะ

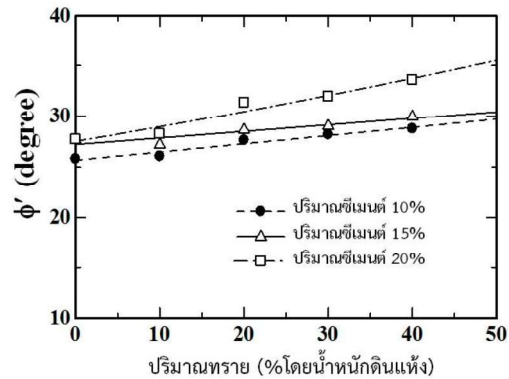
ผลการวิเคราะห์ถูกแสดงในรูปที่ 5 พบว่าปริมาณทรายมีอิทธิพลต่อค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') น้อย ปริมาณทรายที่ผสมในส่วนผสมทำให้ค่า c' มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่า c' ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่นำมาผสมมากกว่าจากการเติมทรายเข้ามาในส่วนผสม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

3.2.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายใน

จากรูปที่ 6 พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสมมีผลทำให้ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากทรายมีส่วนทำให้แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนผสมซีเมนต์อยู่แล้ว เมื่อนำมาผสมซีเมนต์ยิ่งทำให้มีแนวโน้มของแรงเสียดทานภายในสูงขึ้นในขณะที่ดินซีเมนต์ถูกเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และปริมาณทรายเป็นลักษณะของสมการเชิงเส้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า มุมเสียดทานภายใน (ϕ') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

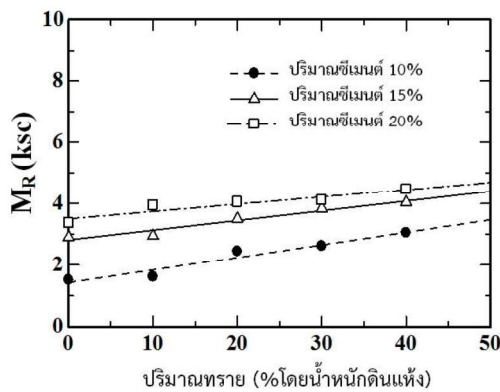
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดัด

การทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อหากำลังรับแรงดัด ใช้วิธีทดสอบแบบ Third point loading ตามมาตรฐาน ASTM D 1635 ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่ากำลังรับแรงดัดถูกคำนวณอยู่ในเทอมของค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, M_R) ค่า M_R ที่สูงกว่า แสดงว่ามีความสามารถในการรับแรงดัดที่มากกว่า



รูปที่ 7 การทดสอบแรงดัดแบบ Third point loading

ปริมาณทรายที่ใส่เพิ่มมีอิทธิพลต่อค่า M_R ดังแสดงในรูปที่ 8 ค่า M_R มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณทรายเข้ามาผสมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเติมทรายเข้าไปทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น การจับตัวของซีเมนต์กับมวลรวมดีขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้น มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และปริมาณทรายเป็นลักษณะเชิงเส้น นอกจากนี้ค่า M_R เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ ศุภสิทธิ์ [7]

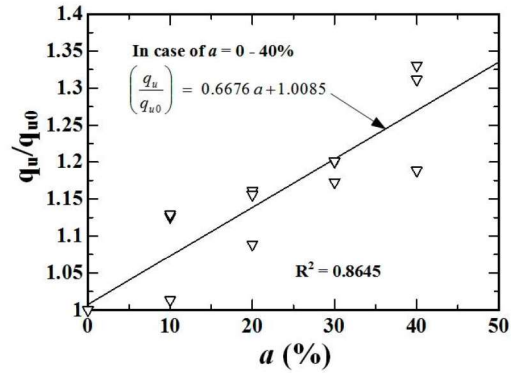


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสการแตกร้าว (M_R) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u , E_{50} และปริมาณทราย

ถ้ากำหนดให้ค่า q_{u0} และ q_u คือค่าแรงกดแกนเดียวในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสมและมีทรายผสมตามลำดับ และให้ค่า a คือปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง จากนั้นนำมาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ a ได้ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.8645$ สามารถเขียนเป็นรูปสมการดังนี้



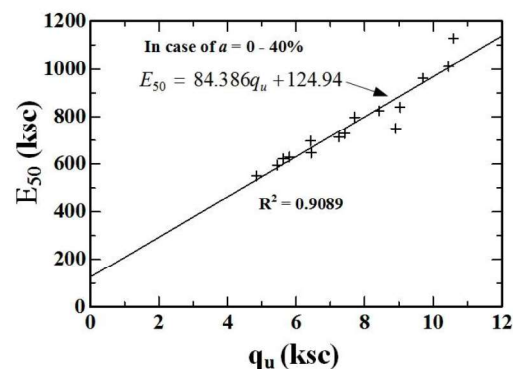
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ a

$$\left(\frac{q_u}{q_{u0}}\right) = 0.6676 a + 1.0085 \quad (1)$$

เมื่อค่า a มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 40 %

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายระหว่าง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้งในปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ถูกแสดงในรูปที่ 10 ความสัมพันธ์เป็นแบบสมการเชิงเส้น ดังแสดงด้วยสมการที่ 2 มีค่า $R^2 = 0.9089$ แสดงให้เห็นว่า ค่า q_u เพิ่มทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตาม ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{50} = 84.386q_u + 124.94 \quad (2)$$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย

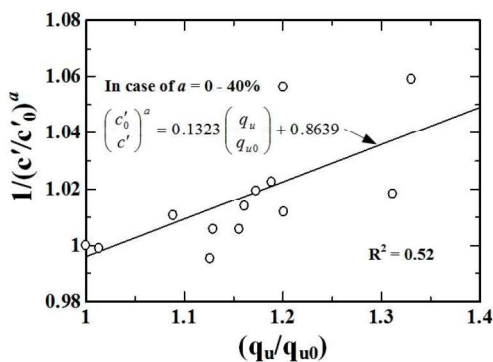
ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.1 กำหนดให้ ค่า c'_0 และ c' คือค่าแรงยึดเกาะในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสม และมีทรายผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ สามารถเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$ ได้ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.52$ มีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{c'_0}{c'}\right)^a = 0.1323\left(\frac{q_u}{q_{u0}}\right) + 0.8639 \quad (3)$$

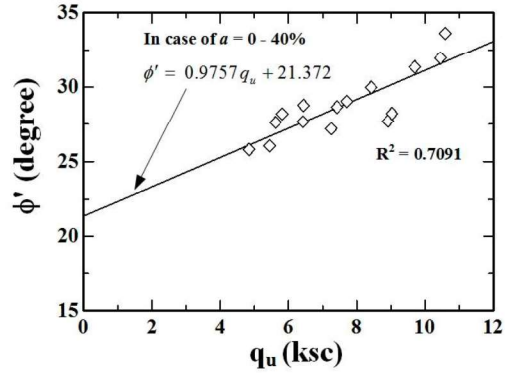
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u

ในรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u พบว่ามีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.7091$ การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ทำให้ค่า ϕ' เพิ่มขึ้นตามเป็นลักษณะสมการเชิงเส้น มีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ดังนี้

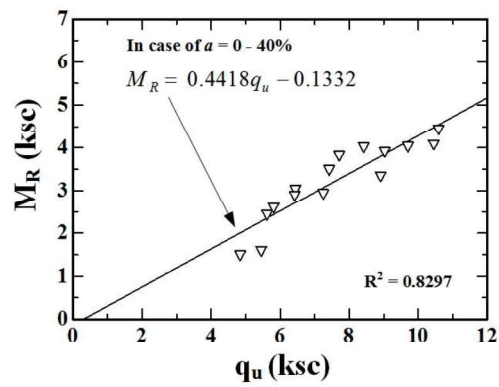
$$\phi' = 0.9757q_u + 21.372 \quad (4)$$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายในปริมาณ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ถูกแสดงในรูปที่ 13 มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.8297$ การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ส่งผลให้ค่า M_R สูงขึ้นตาม และสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$M_R = 0.4418q_u - 0.1332 \quad (5)$$

5 สรุปผลการศึกษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มปริมาณทรายในดินเหนียวที่ผสมซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ มีผลสรุปดังนี้

1) ปริมาณทรายในส่วนผสมของดินซีเมนต์มีผลทำให้ค่า q_u , σ' และ M_R เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับค่า c' เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2) ค่า E_{50} , σ' และ M_R มีความสัมพันธ์กับค่า q_u เป็นแบบสมการเชิงเส้น

3) สมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย เพื่อใช้ในการหาค่า q_u และ c' ของดินซีเมนต์ที่มีทรายผสมอยู่ เมื่อทราบค่า q_u ของดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายเพิ่มหรือค่า q_{u0} สำหรับกรณีมีทรายผสมอยู่ในปริมาณไม่เกิน 40 % โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ได้ถูกนำเสนอขึ้นมา

6 กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การศึกษาการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นพื้นทางผสมซีเมนต์ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ.โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Broms, B. B., and Boman, P. O., 1979. "Lime column a new foundation method". *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT4), pp. 539-556.
- [2] Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., 1994. *Improvement Techniques of Soft Ground in subsiding and Lowland Environment*. Balkema, Rotterdam, 222 p.
- [3] Taguchi T, Hino T, Suzuki M and Yamamoto T (2007) Consideration on applying of unconfined compressive strength evaluation of soil-cement column cured under stress to Saga lowland. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Human Security and Environmental Preservation*, Bangkok, Thailand, pp. 659-667.
- [4] Igaya Y, Hino T and Chai JC (2010) Behavior of trial embankments and the results of environmental monitoring for the Ariake sea coastal road project. *Proceedings of the 7th International Symposium on Lowland Technology*, Saga, Japan, 2010, 260-271.
- [5] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T. and Hino, T., 2009. "Settlement prediction for soft ground improved by columns". *Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers. UK*. Vol. 162.

- [6] Pongsivasathit, S., Chai, J. C. and Ding W. (2012). "Consolidation settlement of floating-column-improved soft clayey deposit". Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers, UK, Vol. 166, pp. 44-58.
- [7] ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิริสวัสดิ์, "การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์และปูนขาว", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2543, หน้า 152-156.