



คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสภาพแช่้ำ

จากการทดสอบแบบแรงอัดไม่มีขอบเขตจำกัดและแบบแรงเฉือนตรง

MACHANICAL PROPPERTIES OF CEMENT STABILIZED SOIL IN SUBMERGED CONDITION FROM UNCONFINED COMPRESSION AND DIRECT SHEAR TESTS

ศิริศักดิ์ จินดาพล (Sirisak Jindapon)¹

สยาม ยิ้มศิริ (Siam Yimsiri)²

สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์ (Suttisak Soralump)¹

อภินิติ โชติสังกาส (Apiniti Jotisangasa)¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างดินเหนียวจากบริเวณภาคเหนือตอนล่างมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในปริมาณต่างๆคือ 0%, 2%, 5%, 8%, และ 10%; ที่ความชื้นในการบดอัดต่างๆคือ OMC-6%, OMC-3%, OMC, OMC+3% และ, OMC+6%; และที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆคือ 0, 7, 14, และ 28 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่ผสมปูนซีเมนต์แล้ว โดยการทดสอบแบบแรงอัดไม่มีขอบเขตจำกัดและการทดสอบแบบแรงเฉือนตรง เพื่อทราบถึงผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวต่อคุณสมบัติของดินทางด้าน strength และ stiffness โดยการศึกษาจะเน้นความสนใจไปที่คุณสมบัติในสภาพแช่้ำของดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเนื่องจากเป็นสภาวะที่ตรงกับสภาพจริงในสนามซึ่งดินนี้ได้ถูกใช้เป็นตัวก่อสร้างของคันทางรถไฟซึ่งจะถูกแช่้ำในช่วงฤดูฝน

ABSTRACT : In this study, the strength and stiffness properties of cement stabilized soil is investigated through unconfined compression and direct shear tests. The clay is collected from Pichit province and is stabilized with cement at various conditions, i.e. various cement contents of 0%, 2%, 5%, 8%, and 10%; various molding water contents of OMC-6%, OMC-3%, OMC, OMC+3%, and OMC+6%; and various curing times of 0, 7, 14, and 28 days. The properties of the soil in submerged condition is of interest for this study because it is consistent with the actual field situation where the soil was utilized as a construction material for a railway embankment which is subjected to inundation during rainy season.

KEYWORDS : Cement stabilization, Unconfined compression test, Direct shear test, Submerged condition, Clay

1. บทนำ

จากการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟในแถบจังหวัดภาคเหนือตอนล่าง [1] พบว่าคันทางรถไฟในบริเวณดังกล่าวมีปัญหาการเคลื่อนตัวทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของราง ซึ่งนำไปสู่การโคลงตัวของรถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณดังกล่าวและไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางและอาจเกิดอุบัติเหตุได้ อีกทั้งคันทางในบริเวณดังกล่าวยังต้องการการบำรุงรักษามาก เนื่องจากดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟซึ่งเป็นดินเหนียวในท้องถิ่นนั้น สูญเสียกำลังอย่างมากเมื่อถูกแช่น้ำ โดยสภาวะที่ดินคันทางต้องแช่อยู่ในน้ำนั้นเป็นสิ่งที่ต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝน โดยในบางปีน้ำจะท่วมดินคันทางจนถึงระดับรางรถไฟ (รูปที่ 1) การแก้ปัญหานี้ อาจทำได้โดยการเปลี่ยนดินคันทางให้เป็นดินที่ดีขึ้น โดยควรจะเป็นดินทรายแน่น แต่การจะได้ดินทรายนั้นต้องทำการขนส่งมาจากแหล่งที่อยู่ห่างไกลออกไปซึ่งอาจมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่าย



รูปที่ 1 สภาพน้ำท่วมคันทางรถไฟหลักเสาโทรเลขที่ 309/2

ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังกล่าวโดยการผสมปูนซีเมนต์จากการทดสอบ CBR [2] อย่างไรก็ตามค่า CBR ที่ได้เป็น index properties ของดินซึ่งไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เช่น Factor of Safety หรือ deformation ได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติทาง strength และ stiffness ของดินดังกล่าวเมื่อถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์

2. คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ศึกษา

ดินที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากหลักเสาโทรเลขที่ 331/3 ทางทิศใต้ของสถานีรถไฟหัวดง จังหวัดพิจิตร ดินดังกล่าวมีค่า Liquid Limit ~60, ค่า Plastic Limit ~20 และค่า moisture content ~20 โดยสามารถจำแนกตาม

USCS ได้เป็น CH (highly plastic clay) และจำแนกตาม AASHTO ได้เป็น A-7-6 (clay with poor compressibility and high plasticity, fair to poor bearing capacity as subgrade soil, very high shrinkage and swelling, and poor permeability) และตาม The American Railway Engineering Association (AREA) Manual for Railway Engineering (1997) ได้จำแนกดินชนิด CH เป็น “bad subgrade which exhibit very bad mud pumping action when subject to loading” [1] ดินชนิดนี้มีค่า activity = 0.67 และตาม NAVFAC DM-7.1 สามารถจำแนกดินชนิดนี้เป็น very high potential of volume change ดินดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นดินกระจายตัวเล็กน้อย [2] และยังได้มีการศึกษาผลกระทบของปูนซีเมนต์ต่อค่าพิกัดอัตราเบอร์กและพฤติกรรมการบดอัดของดินนี้แล้ว [2]

3. วิธีการทดสอบ

ในการศึกษานี้จะทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการบดอัดแบบ static compaction เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นตรงกับผลจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified Proctor compaction test: ASTM D 1557, AASHTO T-180) ตามผลการทดสอบที่ได้ดำเนินการไปแล้ว [2] โดยจะกระทำโดยเตรียมดิน, ปูนซีเมนต์, และน้ำที่มีน้ำหนักตามที่ต้องการไว้แล้วบดอัดลงในแบบด้วยแม่แรง โดยการบดอัดของแต่ละตัวอย่างจะกระทำเสร็จสิ้นภายในเวลา 2 ชม. จึงไม่มีผลกระทบของ delay compaction [3]

ดินที่ทดลองจะถูกผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ลงไปร้อยละ 0, 2, 5, 8 และ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยจะพิจารณาที่ปริมาณความชื้นในการบดอัด 5 จุดด้วยกัน คือ ที่ Optimum Moisture Content (OMC), ด้านเปียก 2 จุด (OMC+3%, OMC+6%) และด้านแห้ง 2 จุด (OMC-3%, OMC-6%) จากนั้นจึงนำไปบ่มโดยการมดุงพลาสติกไว้อย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำเป็นเวลา 0, 7, 14, และ 28 วัน ก่อนจะนำไปแช่น้ำ 4 วัน (soaking process) จากนั้นจึงนำไปทดสอบ (i) การทดสอบแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (unconfined compression test: ASTM D 2166) เพื่อหาค่า unconfined compressive strength (UCS) และค่า Young's modulus (E) และ (ii) การทดสอบแรงเฉือนตรง (direct shear test: ASTM D3080) แบบ CD-Test (consolidated-drained) เพื่อหาค่า cohesion (c') และ friction angle (ϕ') โดยแผนการทดลองได้สรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการทดลอง

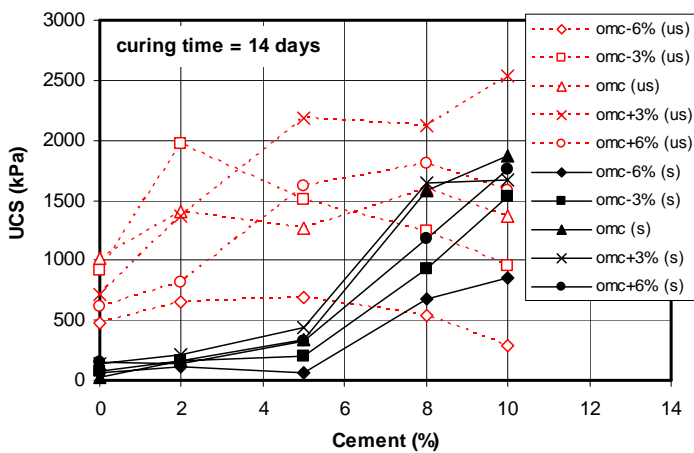
Studied variables	Cement content: 0%, 2%, 5%, 8%, 10%
	Molding water content: OMC-6%, OMC-3%, OMC, OMC+3%, OMC+6%
	Curing time: 0, 7, 14, 28 days
Interested properties	Unconfined compression test: UCS, E
	Direct shear test: c' , ϕ'

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 การทดสอบแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด

4.1.1 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า UCS

ตัวอย่างผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า unconfined compressive strength สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 14 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ผลการทดลองแสดงว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีผลต่อค่า UCS (soaked) มากกว่า โดยค่า UCS (soaked) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยจะมีความเด่นชัดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8% ค่า UCS (soaked) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า UCS (unsoaked)



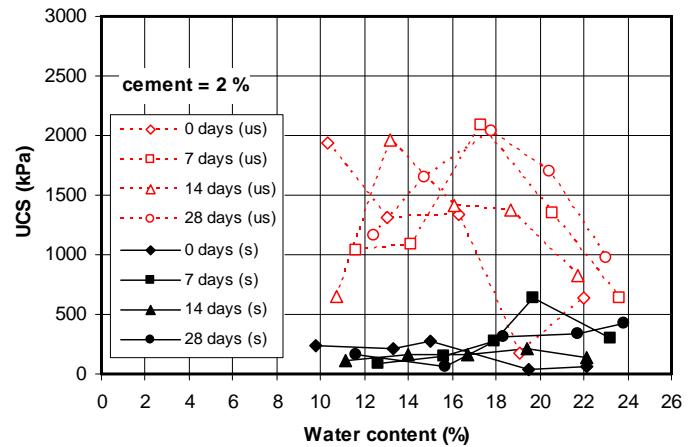
รูปที่ 2 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า UCS

4.1.2 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า UCS

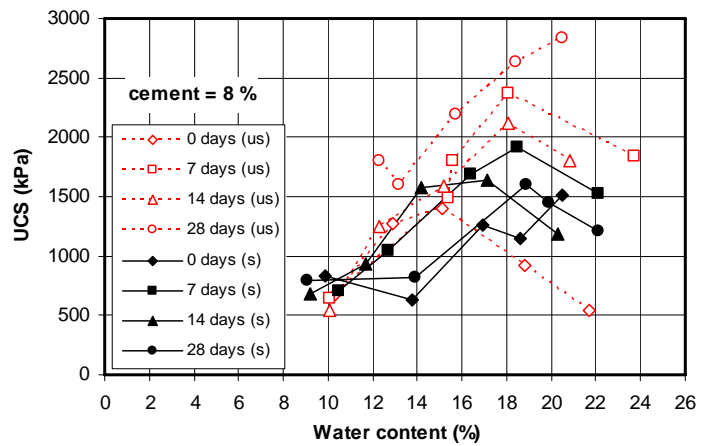
รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดที่ต่อค่า UCS เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมน้อย ซึ่งพบว่าที่ความชื้นประมาณ OMC จะได้ค่า UCS (unsoaked) มากที่สุด และค่า UCS (soaked) จะมีค่าต่ำกว่า UCS (unsoaked) มาก รูปที่ 4 แสดงผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดที่ต่อค่า UCS เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมมาก ซึ่งแสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 8% ค่า UCS (soaked) จะมีค่า

ใกล้เคียงกับค่า UCS (unsoaked) โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ความชื้นประมาณ

OMC+2%



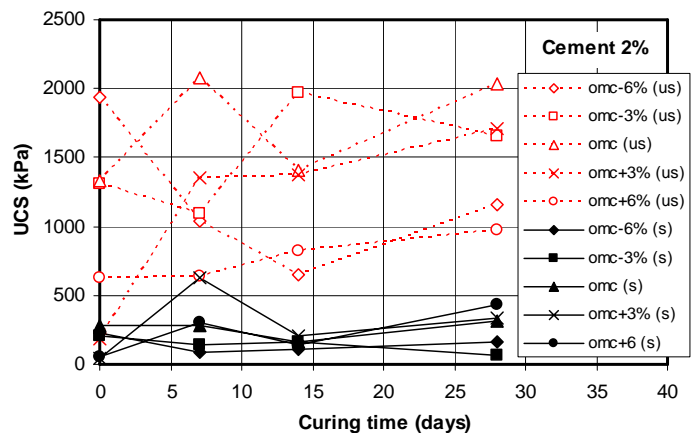
รูปที่ 3 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า UCS ที่ปริมาณซีเมนต์ต่ำ



รูปที่ 4 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า UCS ที่ปริมาณซีเมนต์สูง

4.1.3 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า UCS

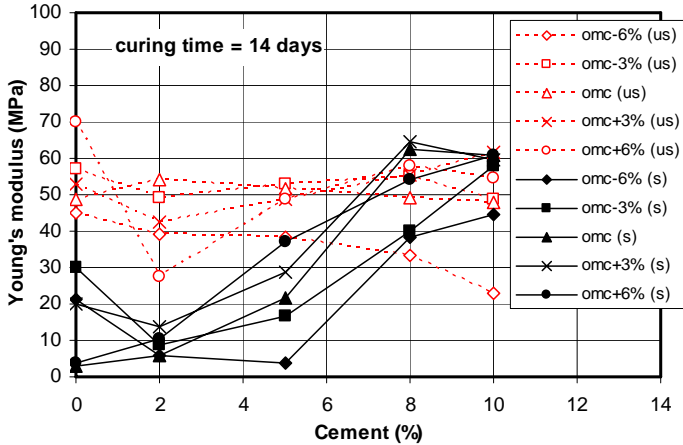
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า UCS เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 2% ผลการทดลองไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนักจึงไม่สามารถสรุปผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า UCS ได้ในตอนนี้



รูปที่ 5 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า UCS

4.1.4 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า E

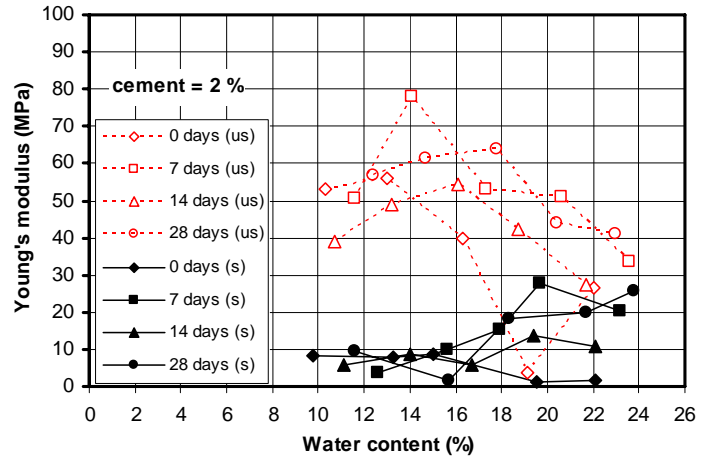
ตัวอย่างผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า Young's modulus สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 14 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ผลการทดลองแสดงว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า E (unsoaked) แต่จะมีผลต่อค่า E (soaked) โดยค่า E (soaked) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมมากกว่าหรือเท่ากับ 8% ค่า E (soaked) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า E (unsoaked)



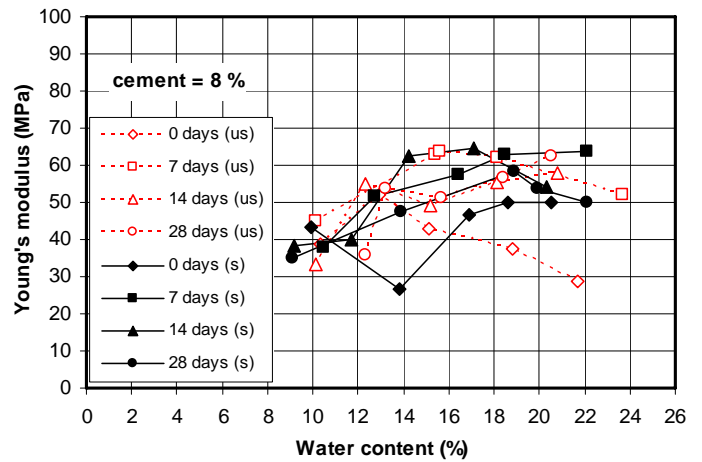
รูปที่ 6 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า Young's modulus

4.1.5 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า E

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดที่ต่อค่า Young's modulus เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมน้อย ซึ่งพบว่าที่ความชื้นประมาณ OMC จะได้ค่า E (unsoaked) มากที่สุด ในขณะที่ E (soaked) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่า E (soaked) จะมีค่าต่ำกว่า E (unsoaked) มาก รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดที่ต่อค่า Young's modulus เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมมาก ซึ่งแสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 8% ค่า E (soaked) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า E (unsoaked) โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ความชื้นประมาณ OMC



รูปที่ 7 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า Young's modulus เมื่อผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณต่ำ



รูปที่ 8 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า Young's modulus เมื่อผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง

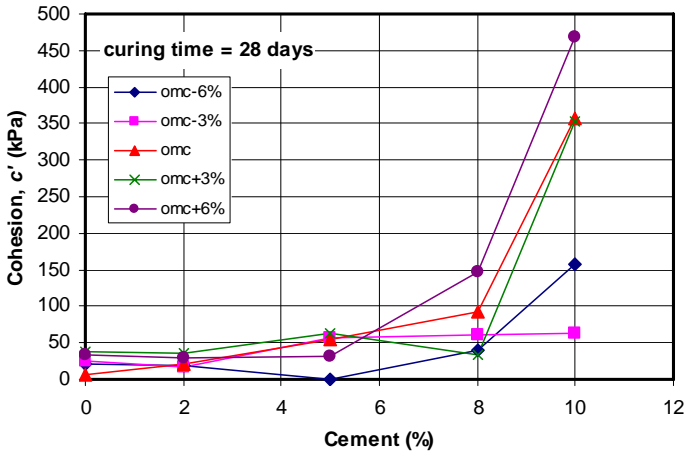
4.1.6 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า E

ผลการทดลองไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนักจึงไม่สามารถสรุปผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า E ได้ในตอนนี

4.2 การทดสอบแบบแรงเฉือนตรง

4.2.1 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า c'

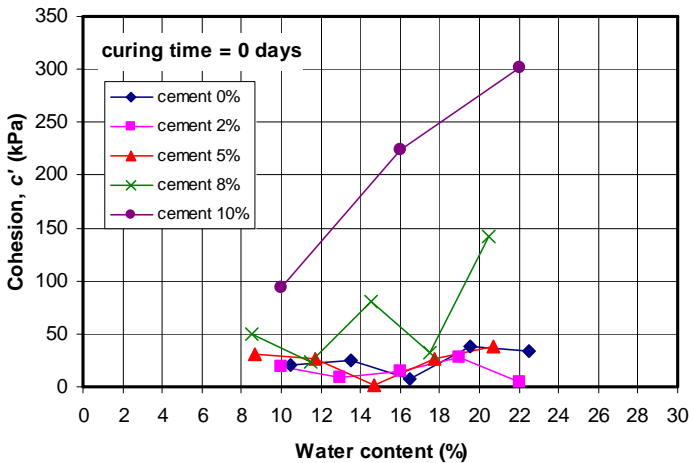
ตัวอย่างผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า cohesion สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2% จะไม่มีผลต่อค่า c' แต่เมื่อผสมปูนซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 5% ค่า c' จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะเห็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า c' ที่ชัดเจนมากเมื่อมีปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมากกว่าหรือเท่ากับ 8%



รูปที่ 9 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า cohesion

4.2.2 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า c'

ตัวอย่างผลของปริมาณความชื้นบดอัดต่อค่า cohesion สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 0 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ผลกระทบของปริมาณความชื้นบดอัดต่อค่า c' จะไม่ชัดเจนนัก แต่เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 8% ค่า c' จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความชื้นในการบดอัดมากขึ้น และสำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ค่า c' เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นในการบดอัดมากขึ้น



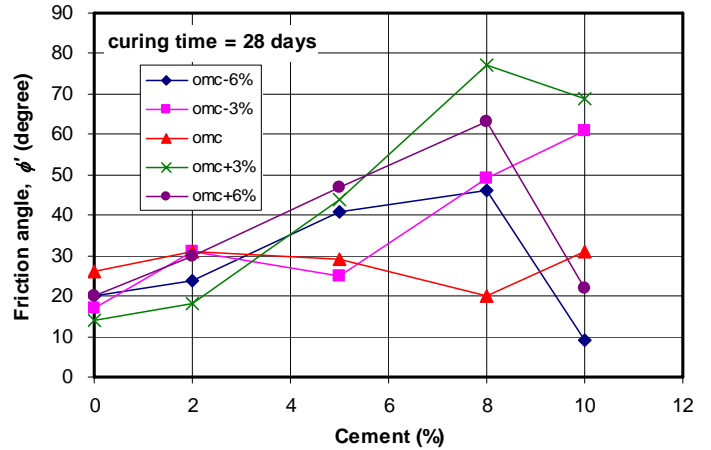
รูปที่ 10 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า cohesion

4.2.3 ผลของระยะเวลาบ่มกับค่า c'

ผลการทดลองไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนักจึงไม่สามารถสรุปผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า c' ได้ในตอนนี้

4.2.4 ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อค่า ϕ'

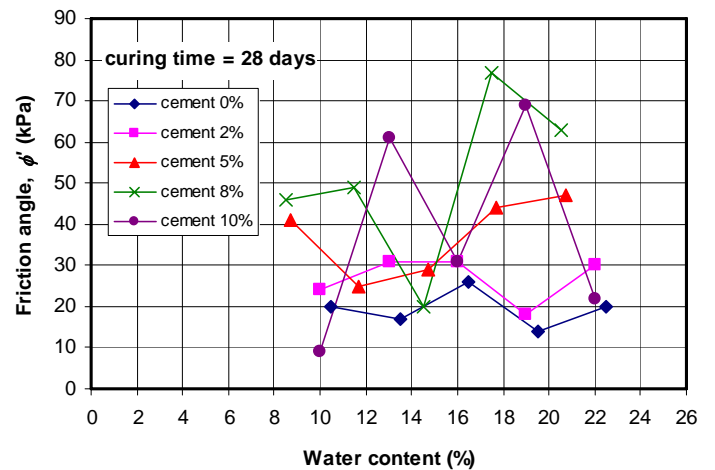
ตัวอย่างผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า friction angle สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า ϕ' ของดินผสมซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 8% ค่า ϕ' จึงจะมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 11 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า friction angle

4.2.5 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า ϕ'

ตัวอย่างผลของปริมาณความชื้นบดอัดต่อค่า friction angle สำหรับกรณีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 12 ผลการทดลองไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนักจึงไม่สามารถสรุปผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า ϕ' ได้ในตอนนี้



รูปที่ 12 ผลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อค่า friction angle

4.2.6 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า ϕ'

ผลการทดลองไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนนักจึงไม่สามารถสรุปผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า ϕ' ได้ในตอนนี้

5. DISCUSSIONS

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปสภาพที่ดีที่สุดสำหรับคุณสมบัติต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2 และสามารถสรุปสภาพที่ดีที่สุดสำหรับคุณสมบัติโดยรวมได้ดังนี้ cement content ที่ 8% หรือ 10%, water content ระหว่าง OMC และ OMC+3%, และ curing time ระหว่าง 7 และ 14 วัน

ตารางที่ 2 สรุปสภาพที่เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติต่างๆ

คุณสมบัติ	ตัวแปร	สภาพที่เหมาะสม
UCS (soaked)	Cement	8% หรือ 10%
	Water content	OMC+2%
	Curing time	—
E (soaked)	Cement	8% หรือ 10%
	Water content	OMC
	Curing time	—
c'	Cement	8% หรือ 10%
	Water content	Large
	Curing time	—
ϕ'	Cement	8% หรือ 10%
	Water content	—
	Curing time	—
CBR (soaked) [2]	Cement	8% หรือ 10%
	Water content	OMC+3%
	Curing time	—
Swell [2]	Curing time	7–14 days

โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าดินผสมปูนซีเมนต์นี้มีพฤติกรรม 2 แบบ ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ดังนี้

1. คุณสมบัติแบบ frictional material

เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 8% ดินผสมปูนซีเมนต์จะมีคุณสมบัติแบบ frictional material คือ strength จะขึ้นอยู่กับทั้ง c' และ ϕ' (e.g. Mohr-Coulomb หรือ Drucker-Prager) และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า c' และ ϕ' ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น จนกระทั่งดินผสมปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติแบบ frictional material ที่ดีที่สุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 8%

2. คุณสมบัติแบบ non-frictional material

เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 8% ดินผสมปูนซีเมนต์จะมีคุณสมบัติแบบ non-frictional material คือ strength จะขึ้นอยู่กับค่า c' เป็นส่วนใหญ่ (e.g.

Tresca หรือ Von Mises) และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า c' จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า ϕ' จะลดลง อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ได้เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ไปถึง 10% เท่านั้น

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะสามารถสรุปได้ว่า สภาพที่ดีที่สุดสำหรับคุณสมบัติโดยรวมของดินดังกล่าวเมื่อถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์เป็นดังนี้ cement content ที่ 8% หรือ 10%, water content ระหว่าง OMC และ OMC+3%, และ curing time ระหว่าง 7 และ 14 วัน

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของดินผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 8% และ 10% จะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 8% ดินผสมปูนซีเมนต์จะมีคุณสมบัติแบบ frictional material ในขณะที่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ดินผสมปูนซีเมนต์จะมีคุณสมบัติแบบ non-frictional material ดังนั้นการจะพิจารณาว่าคุณสมบัติแบบใดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการก่อสร้างคันดินกว่ากัน จะต้องพิจารณา Factor of Safety และ deformation ที่จะได้จากการคำนวณที่ละเอียดยิ่งขึ้น (เช่น finite element) ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 20/2550, ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณ ญัฐพล วงษ์วาร และ ศิษณุ คุณทอง ที่ได้ดำเนินการทดลองบางส่วน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สยาม ชัมศิริ และ รุเชียร เผ่าชัยยังยืน (2004) การศึกษาการเคลื่อนตัวของคันดินทางรถไฟในบริเวณภาคเหนือตอนล่าง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เล่มที่ 2, หน้า GTE 40 - GTE 45.
- [2] ศิริศักดิ์ จินดาพล และคณะ (2006) การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแห้งน้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, GTE 042.
- [3] Ingles O. G. and Metcalf, J. B. (1972), Soil Stabilization, Butterworths.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standard.
- [5] American Railway Engineering Association (AREA)-Manual for Railway Engineering (1997).
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard.
- [7] U.S. Dept. of the Navy (1982), Soil Mechanics, NAVFAC DM-7.1.