

การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว

Cement and Lime Stabilization of Soil in Submerged Condition

ศิริศักดิ์ จินดาพล¹ (Sirisak Jindapon) สยาม ยิ้มศิริ² (Siam Yimsiri)

สุทธิศักดิ์ สรลัมพ์¹ (Suttisak Soralump) สันชัย มิตรเอม¹ (Sanchai Mitaim)

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ : การก่อสร้างคันดินทางรถไฟในภาคเหนือตอนล่างนั้นจะใช้ดินเหนียวในบริเวณแนวเส้นทางซึ่งดินนี้จะเสถียรมากเมื่อถูกแช่น้ำและเป็นสภาวะที่ต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝนทำให้แนวรางรถไฟเกิดการเคลื่อนตัวและต้องมีการบำรุงรักษาคันทางอยู่บ่อยครั้ง และยังทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังกล่าวด้วยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยจะศึกษาค่า CBR (soaked) และการบวมตัวหลังแช่น้ำของดินที่ถูกปรับปรุงแล้วหลังจากถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ ที่ความชื้นในการบดอัดต่างๆ และที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ การศึกษานี้จะเน้นความสนใจไปที่คุณสมบัติในสภาพแช่น้ำของดินที่ถูกปรับปรุงแล้วเนื่องจากเป็นสภาวะที่ตรงกับสภาพจริงในสนาม

ABSTRACT: From the preliminary investigation of the railway embankment condition in the northern of Thailand, it was found that the embankment was built from local clayey soil, which loses its strength considerably in submerged condition. This submerged condition is encountered every year during rainy season, some years are more severe than other. This leads to excessive track irregularity, low riding comfort, and low allowable train speed. Therefore, this research studies the possible countermeasure against this problem by cement/lime stabilization of the embankment soil. The soaked CBR and swelling after soaking of stabilized soil at various cement/lime content, molding water content, and curing time are investigated in the laboratory. The study is concentrated on the submerged condition of the studied soil, which is consistent with the in-situ condition

KEYWORDS: cement/lime stabilization, embankment, CBR, swelling, submerged condition

1. บทนำ

จากการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟในแถบจังหวัดภาคเหนือตอนล่าง (สยาม และ รุธีธร, 2004) พบว่าคันทางรถไฟในบริเวณดังกล่าวมีปัญหาการเคลื่อนตัวทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของราง ซึ่งนำไปสู่การโคลงตัวของรถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณดังกล่าวและไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางและอาจเกิดอุบัติเหตุได้ อีกทั้งคันทางในบริเวณดังกล่าวยังต้องการการบำรุงรักษามาก เนื่องจากดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟซึ่งเป็นดินเหนียวในท้องถิ่นนั้น สูญเสียกำลัง

อย่างมากเมื่อถูกแช่น้ำ โดยสภาวะที่ดินคันทางต้องแช่อยู่ในน้ำนั้น เป็นสิ่งที่ต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝน โดยในบางปีน้ำจะท่วมดินคันทางจนถึงระดับรางรถไฟ (รูปที่ 1) การแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการเปลี่ยนดินคันทางให้เป็นดินที่ดีขึ้น โดยควรจะเป็นดินทรายแน่น แต่การจะได้ดินทรายนั้นต้องทำการขนส่งมาจากแหล่งที่อยู่ห่างไกลออกไป จึงทำให้มีการคิดถึงความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณภาพดินในท้องถิ่นโดยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว เพื่อจะให้มีความเหมาะสม



รูปที่ 1 สภาพน้ำท่วมคันทางรถไฟหลักเสาโทรเลขที่ 309/2

2. คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ศึกษา

ดินที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากหลักเสาโทรเลขที่ 331/3 ทางทิศใต้ของสถานีรถไฟหัวดวงจังหวัดพิจิตร สยาม และ รุธีธร (2004) ได้รายงานว่าดินดังกล่าวมีค่า 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” การทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน พบว่าการทดสอบ crumb test ให้ผลการจำแนกเป็น Grade 3 (มีปฏิกริยาพอประมาณ) การทดสอบ pinhole test ให้ผลเป็น ND4 (intermediate soils) และการทดสอบ double hydrometer test ให้ดีกรีการกระจายตัวเท่ากับ 10.81% ซึ่งแสดงว่าดินดังกล่าวมีคุณสมบัติกระจายตัวเล็กน้อย ดินชนิดนี้มีค่า activity = 0.67 และตาม NAVFAC DM-7.1 สามารถจำแนกดินชนิดนี้เป็น very high potential of volume change ซึ่งคุณสมบัตินี้ น่าจะก่อปัญหาเมื่อดินอยู่ในสภาพแช่น้ำ ฉะนั้นการปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวน่าจะช่วยลดปัญหาการบวมตัวภายใต้สภาวะแช่น้ำลงได้และยังน่าจะช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของดินอีกด้วย

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การศึกษาผลของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติทางกายภาพ

ในการศึกษาจะผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวลงในดินร้อยละ 0, 2, 5, 8 และ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง และศึกษาผลกระทบต่อค่าพิกัดอัตราเบอร์กและ compaction curve ที่ได้จากการบดอัดแบบสูงกว่า

มาตรฐาน (modified Proctor compaction test: ASTM D 1557, AASHTO T-180) โดยการบดอัดของแต่ละตัวอย่างจะกระทำเสร็จสิ้นภายในเวลา 2 ชม. เพื่อป้องกันผลกระทบของ delay compaction (Ingles & Metcalf, 1972)

3.2 การศึกษาผลของสารผสมเพิ่มต่อค่า CBR และ swelling

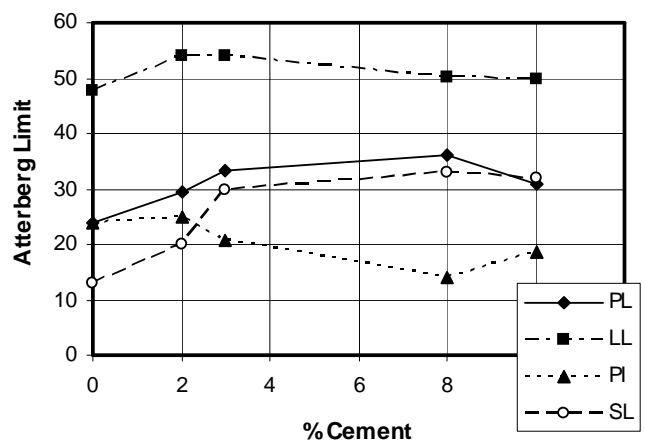
ดินที่ผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในสัดส่วนต่างๆแล้วจะถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยจะพิจารณาที่ปริมาณความชื้นในการบดอัด 5 จุดด้วยกัน คือ ที่ Optimum Moisture Content (OMC), ด้านเปียก 2 จุด (OMC+3%, OMC+6%) และด้านแห้ง 2 จุด (OMC-3%, OMC-6%) จากนั้นจึงนำไปบ่มโดยการมดุงพลาสติกไว้อย่างมิดชิดป้องกันการสูญเสียน้ำความชื้นเป็นเวลา 0, 7, 14, และ 28 วัน ก่อนจะนำไปแช่น้ำ 4 วัน (soaking process) จากนั้นจึงนำไปทดสอบเพื่อหาค่า CBR (soaked) (California Bearing Ratio: ASTM D 1883) และค่าการบวมตัว (swelling) ระหว่างการแช่น้ำ ในบางกรณีจะมีการทดสอบค่า CBR (unsoaked) ซึ่งจะทำให้การทดสอบหลังการบ่มเสร็จโดยไม่มีแช่น้ำ 4 วัน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ผลของสารผสมเพิ่มต่อค่าพิกัดอัตราเบอร์ก

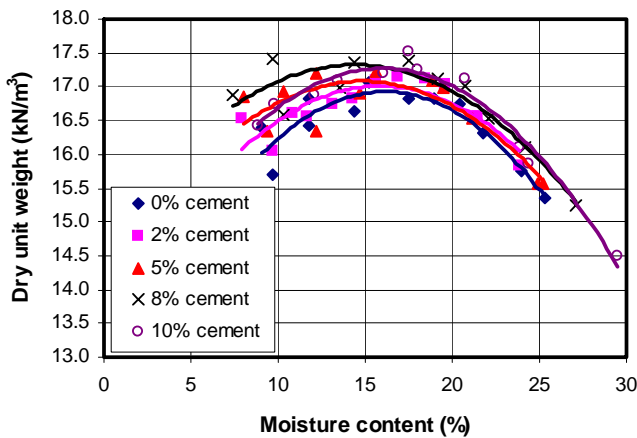
ผลการทดลองแสดงว่าปริมาณสารผสมเพิ่ม (ปูนซีเมนต์และปูนขาว) ไม่มีผลต่อ Liquid Limit แต่จะทำให้ Plastic Limit มีค่าเพิ่มขึ้น (จึงเป็นผลให้ Plasticity Index มีค่าลดลง) และ ค่า Shrinkage Limit มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับผลของผู้วิจัยอื่น เช่น Hausmann (1990) ตัวอย่างผลการทดลองของดินผสมปูนซีเมนต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อพิกัดอัตราเบอร์ก

4.1.2 ผลของสารผสมเพิ่มต่อพฤติกรรมการบดอัดของดิน

รูปที่ 3 แสดงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อพฤติกรรมการบดอัด ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight) จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content) จะค่อนข้างคงที่ รูปที่ 4 แสดงผลของปริมาณปูนขาวต่อพฤติกรรมการบดอัด ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะลดลงในขณะที่ค่าความชื้นที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับผลของผู้วิจัยอื่น เช่น Hausmann (1990)

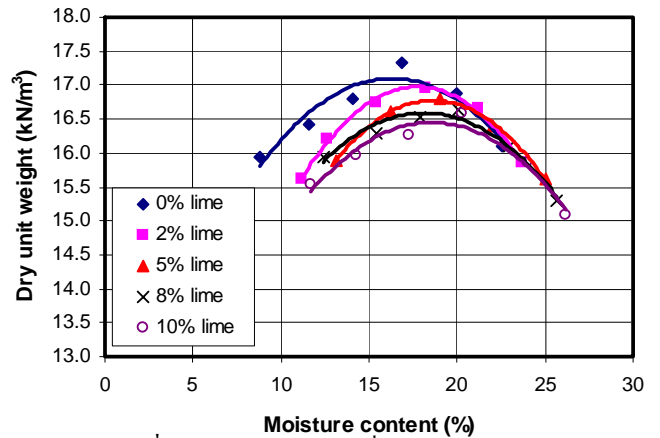


รูปที่ 3 Compaction curve ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ

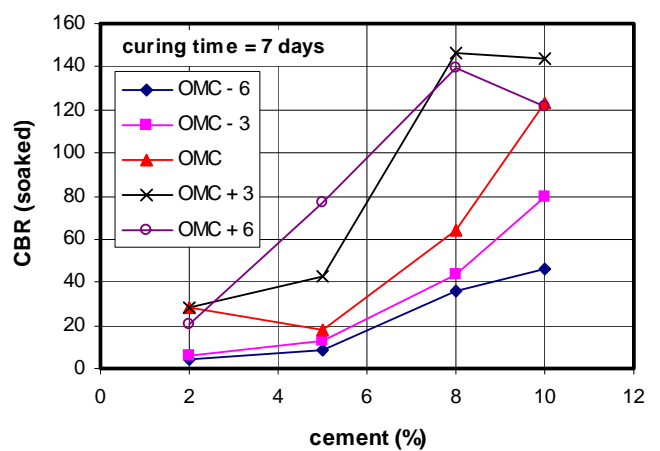
4.2 ผลของสารผสมเพิ่มต่อค่า CBR (soaked)

4.2.1 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่มต่อค่า CBR (soaked)

ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มเพิ่มขึ้นค่า CBR (soaked) ก็จะเพิ่มขึ้น และผลของปริมาณสารผสมเพิ่มต่อค่า CBR (soaked) นี้จะชัดเจนมากขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ถูกบดอัดด้วยความชื้นที่ลดลง ซึ่งจะมีสัดส่วนของการเพิ่มขึ้นของค่า CBR (soaked) ที่มากกว่า อย่างไรก็ตามสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นั้น ค่า CBR (soaked) จะมีค่าคงที่เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากกว่า 8% ตัวอย่างผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า CBR (soaked) สำหรับระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



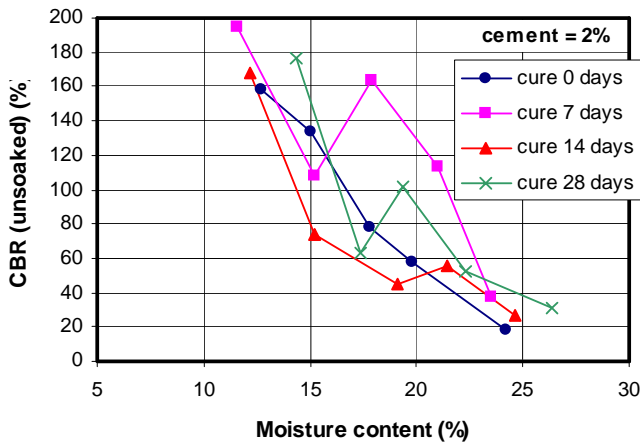
รูปที่ 4 Compaction Curve ที่ปริมาณปูนขาวต่างๆ



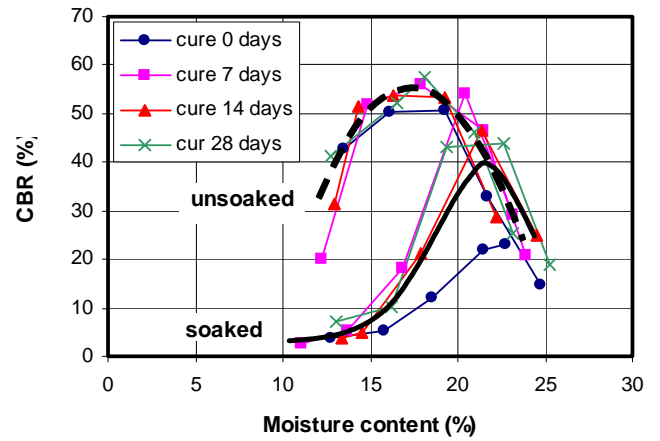
รูปที่ 5 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่า CBR (soaked)

4.2.2 ผลของความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต่อค่า CBR (soaked)

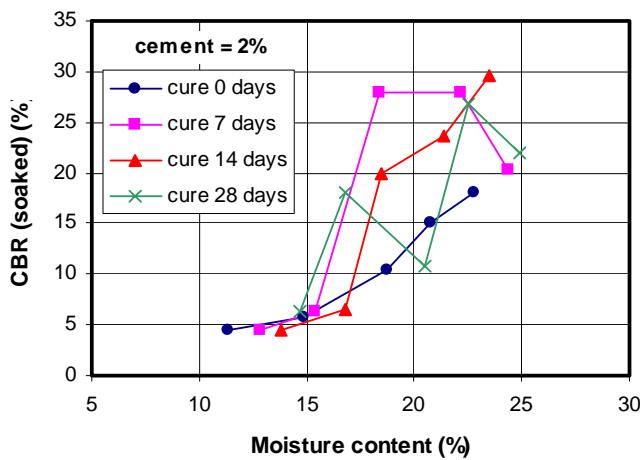
สำหรับปูนซีเมนต์ผลการทดลองแสดงว่าค่า CBR (unsoaked) จะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างมีความชื้นในการบดอัดมากขึ้น (รูปที่ 6) แต่ค่า CBR (soaked) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างมีความชื้นในการบดอัดมากขึ้น (รูปที่ 7) และนอกจากนั้นจากผลการทดลองในรูปที่ 8 ยังพบว่าที่ cement content สูงๆ (10%) ค่า CBR (soaked) จะมีค่าคงที่ที่ความชื้น OMC+3% และ OMC+6% สำหรับปูนขาวผลการทดลองแสดงว่าค่า CBR (soaked) จะต่ำกว่า CBR (unsoaked) เมื่อปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 5% (โดยเฉพาะด้านแห้ง) (รูปที่ 9) เมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่า 5% กราฟความสัมพันธ์ของ CBR-moisture content ของทั้งสภาพ soaked และ unsoaked จะใกล้เคียงกัน โดยจะเป็นรูปประฆังคว่ำและมีจุดยอดอยู่ที่ความชื้นสูงกว่าความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย (ประมาณ 3%) (รูปที่ 10)



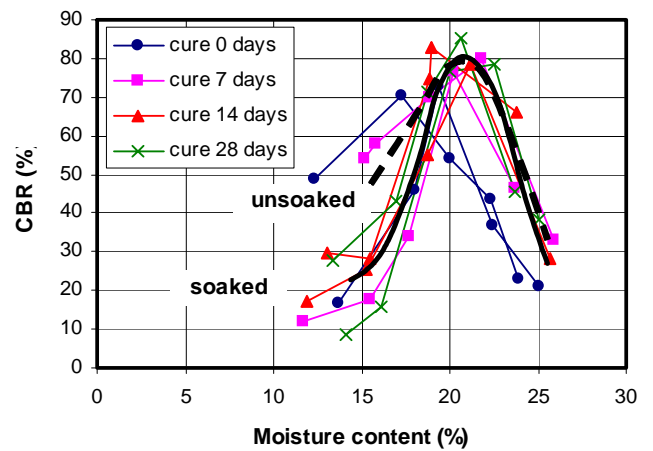
รูปที่ 6 ผลของปริมาณความชื้นต่อค่า CBR (unsoaked) ของดินผสมปูนซีเมนต์



รูปที่ 9 ผลของปริมาณความชื้นต่อค่า CBR ของดินผสมปูนขาว 2%



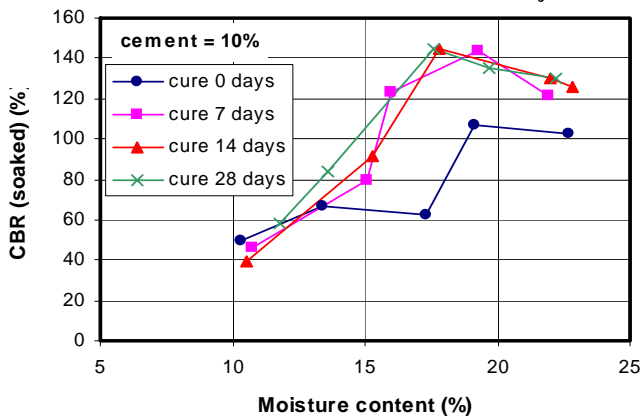
รูปที่ 7 ผลของปริมาณความชื้นต่อค่า CBR (soaked) ของดินผสมปูนซีเมนต์



รูปที่ 10 ผลของปริมาณความชื้นต่อค่า CBR ของดินผสมปูนขาว 8%

4.2.3 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่า CBR (soaked)

ผลการทดลองแสดงว่าค่า CBR (soaked) ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดกับระยะเวลาการบ่มสำหรับดินที่ผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว จึงอาจสรุปได้ว่าระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อค่า CBR (soaked) ตัวอย่างผลการทดสอบ CBR (soaked) ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ ของดินที่มี lime content = 10% ได้แสดงในรูปที่ 11

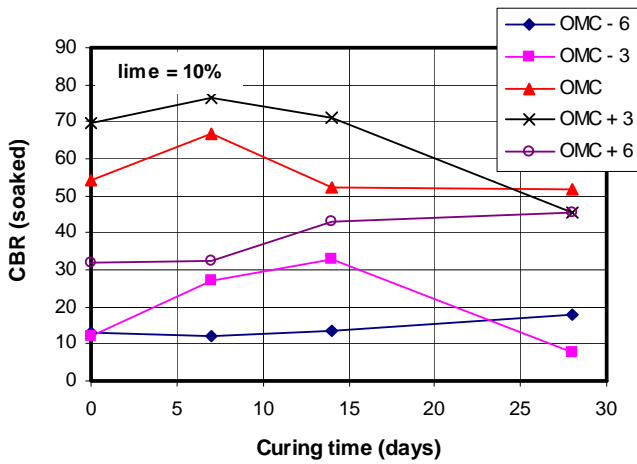


รูปที่ 8 ผลของปริมาณความชื้นต่อค่า CBR (soaked) ของดินผสมปูนซีเมนต์ 10%

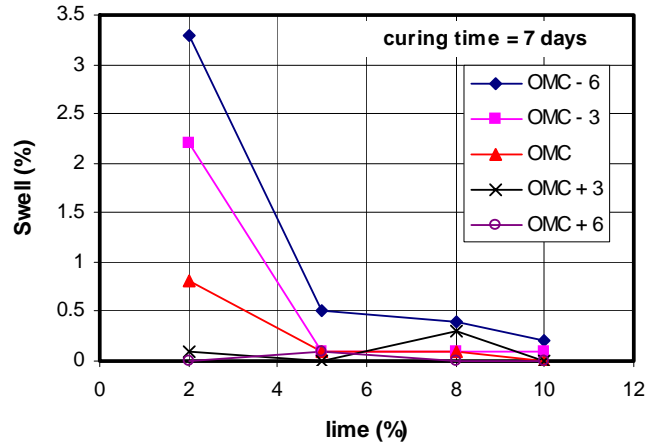
4.3 ผลของสารผสมเพิ่มต่อการบวมตัว

4.3.1 ผลของปริมาณสารผสมเพิ่มต่อการบวมตัว

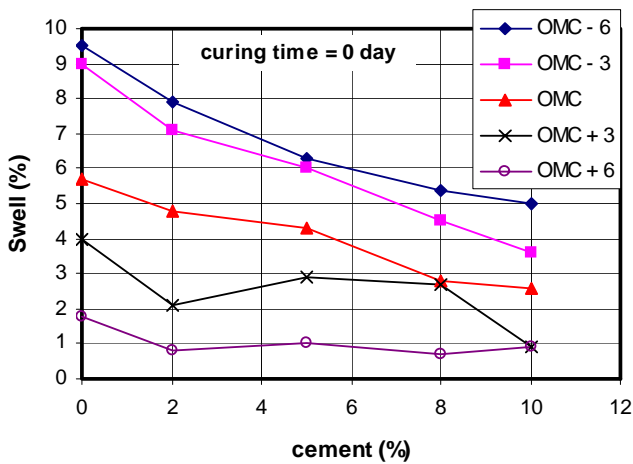
ผลการทดลองแสดงว่ายิ่งปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวหลังแช่น้ำก็จะยิ่งลดลง โดยผลกระทบนี้จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในการบดอัดมีค่าน้อยกว่า OMC ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าการบวมตัวมากอยู่แล้ว (รูปที่ 12) ผลการทดลองสำหรับปูนขาวก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่จะพบว่าค่าการบวมตัวจะลดลงอย่างมากจนกระทั่งมีปริมาณปูนขาว = 5% หลังจากนั้นการบวมตัวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 13)



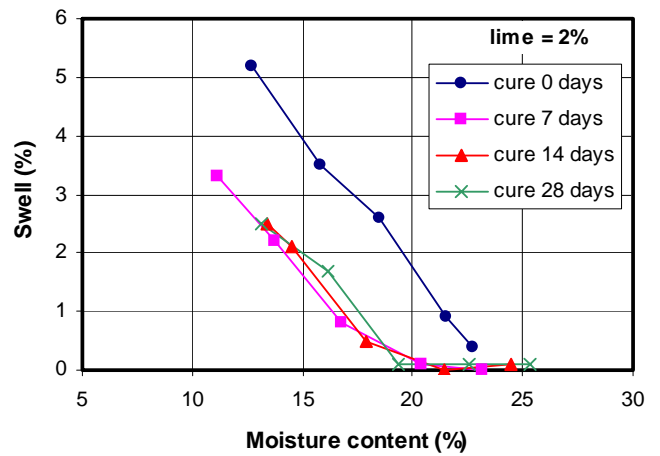
รูปที่ 11 ผลของระยะเวลาบ่มต่อ CBR (soaked) ของดินที่ผสมปูนขาว 10%



รูปที่ 13 ผลของปริมาณปูนขาวต่อการบวมตัวที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 12 ผลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อการบวมตัวที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน



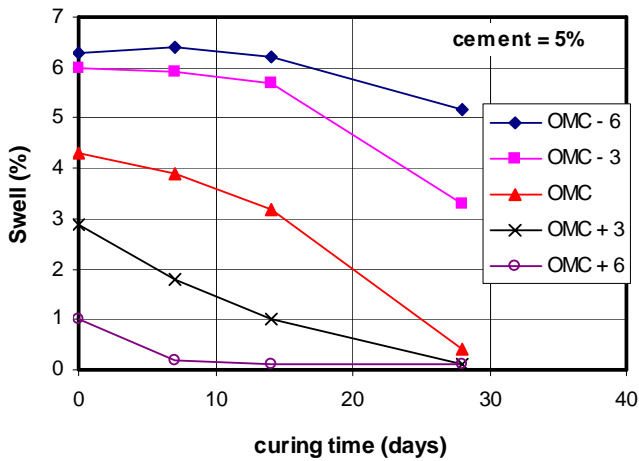
รูปที่ 14 ผลของปริมาณความชื้นต่อการบวมตัวของดินผสมปูนขาว 2%

4.3.2 ผลของความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต่อค่าการบวมตัว

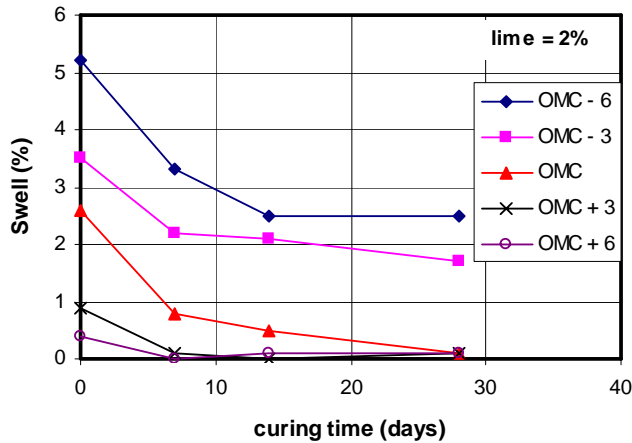
ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อตัวอย่างมีความชื้นในการบดอัดมากขึ้น การบวมตัวก็จะลดลง เพราะที่ปริมาณความชื้นน้อยๆ เมื่อนำดินไปแช่น้ำจะมีการดูดซึมน้ำมากทำให้มีการบวมตัวมากและเมื่อดินมีปริมาณความชื้นที่สูงอยู่แล้ว เมื่อนำดินไปแช่น้ำดินก็จะดูดซึมน้ำน้อย ทำให้มีการบวมตัวน้อย ซึ่งนี่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ CBR (soaked) ของดินที่มีความชื้นในการบดอัดต่ำมีค่าน้อยกว่า เพราะ swelling ทำให้น้ำถูกดูดเข้าไปในดินและทำให้ดินอ่อนแอลง ตัวอย่างผลการทดสอบการบวมตัวของตัวอย่างที่มี lime content = 2% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 14

4.3.3 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่าการบวมตัว

ผลการทดลองสำหรับดินที่ผสมปูนซีเมนต์แสดงว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นค่าการบวมตัวมีแนวโน้มที่ลดลงตามลำดับ และผลกระทบนี้ก็จะยิ่งชัดเจนมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในการบดอัดมีค่าน้อยกว่า OMC ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าการบวมตัวมากอยู่แล้ว (รูปที่ 15) ผลการทดลองสำหรับปูนขาวก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แต่จะพบว่าค่าการบวมตัวจะลดลงจนกระทั่งระยะเวลาการบ่ม = 14 วัน หลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 16)



รูปที่ 15 ผลระยะเวลาการบ่มต่อการบวมตัวของดินผสมปูนซีเมนต์ 5%



รูปที่ 16 ผลระยะเวลาการบ่มต่อการบวมตัวของดินผสมปูนขาว 2%

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองข้างต้นจะสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มจะทำให้ค่า CBR (soaked) เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารผสมเพิ่มจะทำให้ปฏิกิริยากับดินทำให้โครงสร้างของดินมีการยึดเหนี่ยวที่ดีขึ้นเป็นผลให้มีการบวมตัวน้อยลงเมื่อถูกแช่น้ำ ซึ่งผลดังกล่าวจะเห็นชัดเจนขึ้นสำหรับดินที่ถูกบดอัดด้วยความชื้นที่ลดลง เนื่องจากดินดังกล่าวมีการบวมตัวมากอยู่แล้วจึงทำให้ผลกระทบของสารผสมเพิ่มมีมาก อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงว่าปริมาณสารผสมเพิ่ม (ทั้งปูนซีเมนต์และปูนขาว) ที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณ 8%
- เมื่อเพิ่มความชื้นในการบดอัด ดินที่ผสมปูนซีเมนต์จะมีค่า CBR (unsoaked) ลดลง ส่วนดินที่ผสมปูนขาวจะมีค่า CBR (unsoaked) มากที่สุดที่ประมาณ OMC ซึ่งผลการทดลองนี้ จะตรงกับความเข้าใจของวิศวกรทั่วไปอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความชื้นในการบดอัด ดินที่ผสมปูนซีเมนต์จะมีค่า CBR (soaked) เพิ่มขึ้น (จนถึงประมาณ OMC+6%) ส่วน

ดินที่ผสมปูนขาวจะมีค่า CBR (soaked) มากที่สุดที่ประมาณ OMC+3% ซึ่งอาจจะขัดกับความเข้าใจโดยทั่วไปที่ว่าดินน่าจะแข็งแรงที่สุดเมื่อถูกบดอัดที่ OMC ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อความชื้นในการบดอัดมีค่าน้อยดินจะมีการบวมตัวมากขึ้นทำให้ค่า CBR (soaked) ต่ำกว่า CBR (unsoaked) อย่างมาก แต่เมื่อความชื้นในการบดอัดมีค่ามากขึ้น ดินจะมีการบวมตัวน้อยลงทำให้ความแตกต่างระหว่างค่า CBR (soaked) และ CBR (unsoaked) น้อยลง โดยสารผสมเพิ่มทำหน้าที่ลดความแตกต่างนี้อีกทางด้วย จากผลการทดลองอาจจะสรุปได้ว่าค่าความชื้นในการบดอัดที่เหมาะสมควรจะประมาณ OMC+3%

3. ผลการทดลองแสดงว่าระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อค่า CBR (soaked) ซึ่งขัดกับผลการทดลองที่ว่าระยะเวลาการบ่มทำให้การบวมตัวลดลง ความไม่สอดคล้องกันนี้น่าจะมาจากความไม่แน่นอนในการทดสอบ CBR เช่น การควบคุมความชื้นและความหนาแน่นแห้งระหว่างตัวอย่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบกัน อย่างไรก็ตามจากผลของการบวมตัวน่าจะสรุปได้ว่าระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมควรจะประมาณ 7-14 วัน

โดยสรุปข้อควรคำนึงหลักของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวในสภาพเช่นนี้จะเป็นการบวมตัวเมื่อแช่น้ำ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกำลังของดิน การลดการบวมตัวจะทำได้ด้วยการเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มให้เพียงพอ ทำการบดอัดที่ความชื้นสูงกว่า OMC และมีระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม จากผลการทดลองยังพบว่าการผสมด้วยปูนซีเมนต์จะให้ค่า CBR มากกว่าปูนขาว ซึ่งผลของงานวิจัยนี้พร้อมทั้งการศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้าน strength และ stiffness เพิ่มเติมจะช่วยให้การพิจารณาการแก้ไขปัญหาของคันทางรถไฟต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ พงศกร นวลศรีนำ, วุฒิพงษ์ ศิริปัญญาโชติ, บุญฤทธิ์ สุพงษ์, และ วิวัธน์ วัฒนสงวน ที่ได้ดำเนินการทดลองส่วนใหญ่

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สยาม ชัมศิริ และ รุเชียร เผ่าชัยยังขึ้น (2004) การศึกษาการเคลื่อนตัวของคันดินทางรถไฟในบริเวณภาคเหนือตอนล่าง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เล่มที่ 2, หน้า GTE 40 - GTE 45.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standard.
- [3] American Railway Engineering Association (AREA)-Manual for Railway Engineering (1997)
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard.

[5] Hausmann, M. R. (1990), Engineering Principles of Ground
Modification, McGraw-Hill

[6] Ingles O. G. and Metcalf, J. B. (1972), Soil Stabilization, Butterworths

[7] U.S. Dept. of the Navy (1982), Soil Mechanics, NAVFAC DM-7.1

8. สถานที่ติดต่อ

[1] หมอดิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา