

ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์

CONSOLIDATION AND PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF CEMENTED CLAYS

รุ่งลาวัลย์ ราชัน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

โทร 02-988-3655 ต่อ 183 โทรสาร 02-944-4040

E-Mail: runglawa@mut.ac.th

สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทร 044-22-4322 โทรสาร 044-22-4420

E-Mail: suksun@ccs.sut.ac.th

บทคัดย่อ

การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนโดยเทคนิคการผสมลึกเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย การคำนวณการเสียรูปและการทรุดตัวของโครงสร้างบนดินที่ได้รับการปรับปรุงนี้ จำเป็นต้องอาศัยผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบนี้กินเวลานานและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นถ้ากราฟการอัดตัวคายน้ำสามารถสร้างขึ้นในเวลาอันสั้น จะมีประโยชน์อย่างยิ่งทั้งแง่ของการตรวจสอบผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ และการออกแบบเบื้องต้นหรือการแก้ไขแบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ จากการศึกษาพบว่า เส้นการอัดตัวทั่วไปซึ่งสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่และดินเหนียวซีเมนต์ทำให้ความต้องการดังกล่าวสัมฤทธิ์ผล

Abstract

The improvement of soft clay by the deep mixing technique is extensively used in Thailand. The estimation of the deformation and settlement of structures on this improved ground needs the consolidation test results. This test is time consuming and easily mistaken. Thus it would be useful if the consolidation curves can be generated within a short period. It would help not only to verify the laboratory test results but also to make a preliminary design or to modify the design in case that there is the change in the cement content. From this investigation, it has been

found that the Generalized Compression Line (GCL), which is introduced based from the test results of remolded and cemented clays can meet the requirement.

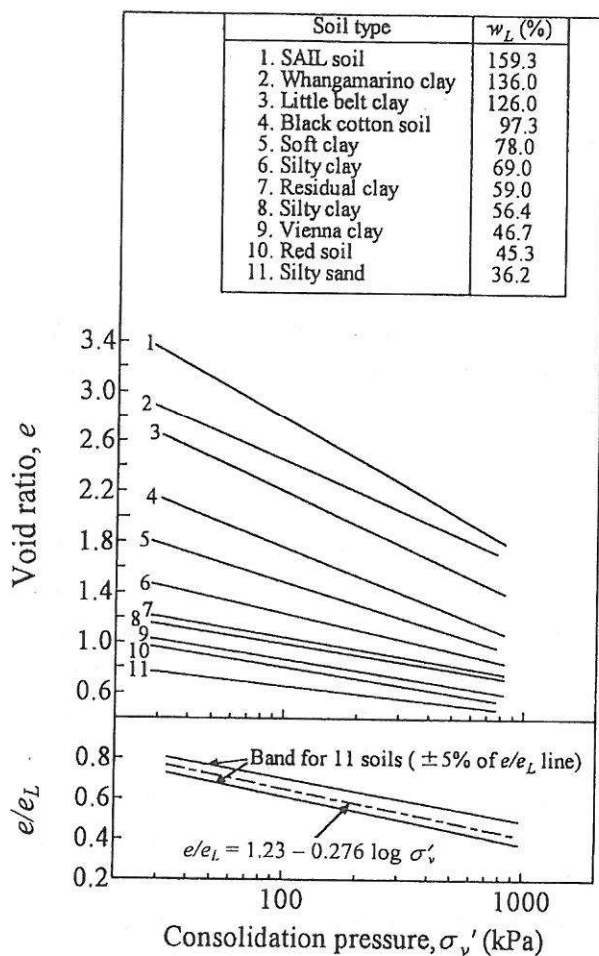
1. บทนำ

การศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของดินเหนียวซีเมนต์ ได้มีผู้ศึกษามากมาย อาทิเช่น Kamon and Bergado [1]; Kamaluddin and Balasubramaniam [2]; Uddin et al. [3]; Horpibulsuk [4]; Horpibulsuk et al. [5-7] และ Horpibulsuk and Rachan [8] ขณะที่การศึกษาพฤติกรรม การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์มีอยู่จำกัด ซึ่งพฤติกรรมนี้มีความสำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์การเสียรูป

Nagaraj and Srinivasa Murthy [9] ได้ทำการศึกษารูปการอัดตัวของดินเหนียวปั้นใหม่ และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและลือกการบีบของความเค้นในแนวตั้งเป็นเส้นตรงที่มีความชันที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ากราฟการอัดตัวคายน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว ดังเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L และ $\log \sigma'_v$ ของดินทุกชนิด เป็นเส้นเดียวกันและมีลักษณะเป็นเส้นตรง เส้นตรงนี้เรียกว่าเส้นสถานะเนื้อแท้ (Intrinsic State Line, ISL) และมีสมการดังนี้

$$\frac{e}{e_L} = 1.23 - 0.276 \log \sigma'_v \quad (1)$$

เมื่อ e คืออัตราส่วนโพรง e_L คืออัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว σ'_v คือความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง เส้นสถานะเนื้อเหนียวได้นำมาใช้ในการจำแนกสถานะของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยสุขสันต์และรุ่งลาวัลย์ [10] ในงานประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8 สุขสันต์และรุ่งลาวัลย์ [10] พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ระดับความลึก 2 - 12 เมตร มีสถานะของความเค้น (Stress state) อยู่เหนือเส้นสถานะเนื้อเหนียว และสรุปว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Naturally cemented clay)



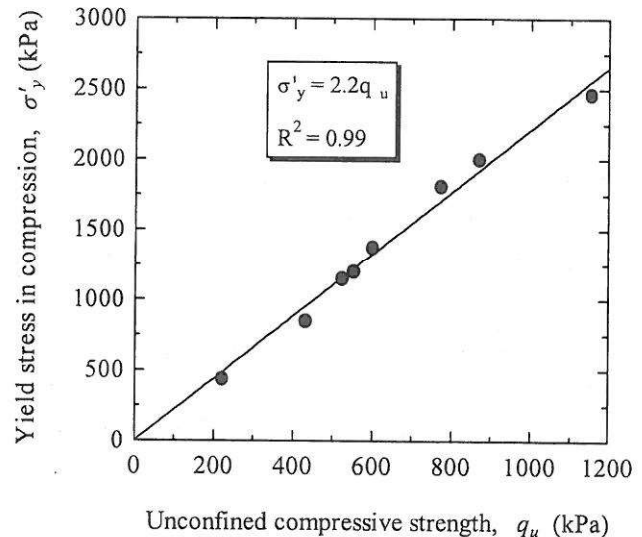
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและลอการิทึมของความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งสำหรับดินเหนียวชนิดต่างๆ

เนื่องด้วยอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานที่เกิดจากการก่อตัวของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดินเหนียวซีเมนต์สามารถเสถียรที่ปริมาณความชื้นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (ดินเหนียวปั้นใหม่) ที่ความเค้นในแนวตั้งเท่ากัน และมีค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) และ

กำลังต้านแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) สูง เนื่องจากความเค้นที่จุดครากและกำลังต้านแรงอัดแบบไร้ขอบเขตขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน ดังนั้น เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่จุดครากและกำลังต้านแรงอัดแกนเดียว Horpibulsuk [4] แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2 ความสัมพันธ์นี้แสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\sigma'_y = 2.2q_u \quad (2)$$

เมื่อ σ'_y คือความเค้นที่จุดคราก และ q_u คือกำลังต้านแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่จุดครากและกำลังต้านแรงอัดแกนเดียว

2. ดินตัวอย่างและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การศึกษาลักษณะพฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวซีเมนต์ และการทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ ในส่วนแรก ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ และดินเหนียวอะริเอเคะ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกเก็บขึ้นที่ความลึก 2 เมตรจากผิวดิน จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology) ดินเหนียวนี้มีปริมาณความชื้นประมาณ 76 ถึง 84 เปอร์เซ็นต์ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 103 และ 43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 ตัวอย่างดินเหนียวอะริเอเคะเก็บจากระดับความลึก 2 เมตรจากผิวดิน ที่เมืองสากะ ประเทศญี่ปุ่น ดินเหนียวตัวอย่างนี้มีปริมาณ

ความชื้นธรรมชาติประมาณ 110 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ชัดจำกัดเหลวและพิกัดเหลวเท่ากับ 120 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ในการทดสอบ ปริมาณความชื้นของดินทั้งสองถูกเปลี่ยนแปลงโดยการเติมน้ำ และผึ่งอากาศให้ได้ดัชนีสภาพเหลว (Liquidity index) ระหว่าง 1.0 ถึง 3.0 การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นนี้เพื่อจำลองสภาพในสนามซึ่งปริมาณความชื้นอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำเสาเข็มซีเมนต์แบบเปียก (Wet process) หรือเนื่องจากการฉีดน้ำปูน (Jet grouting) หลังจากได้ปริมาณความชื้นตามต้องการแล้ว ทำการผสมดินเหนียวกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ประเภทหนึ่ง ด้วยปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ในการผสมจะทำการผสมด้วยเครื่องผสมดินเป็นเวลา 10 นาที [4 และ 11] ต่อจากนั้น นำดินซีเมนต์ใส่ในวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ การเตรียมตัวอย่างจะต้องทำให้เสร็จภายในเวลา 45 นาที เพื่อป้องกันการแข็งตัวของซีเมนต์ ตัวอย่างจะถูกห่ออย่างดีด้วยแผ่นพลาสติกห่ออาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นที่มีอุณหภูมิประมาณ 21 องศา เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ในระหว่างการทดสอบ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านสามารถหาได้ดังนี้

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (3)$$

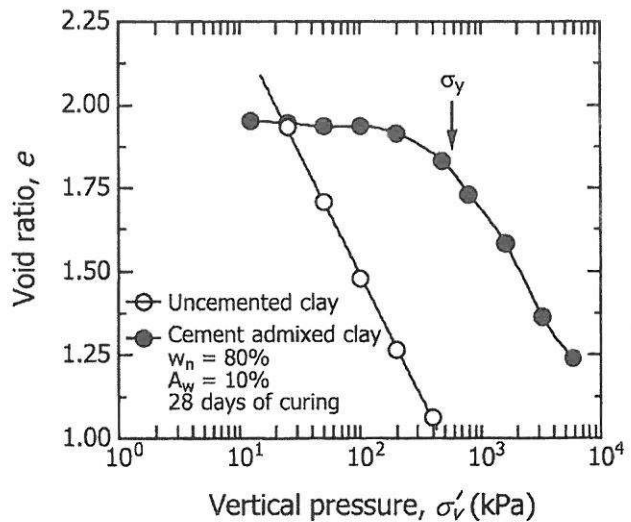
เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability) c_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) m_v คือสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume change) และ γ_w คือความหนาแน่นของน้ำ

ในส่วนที่สอง ผลทดสอบที่นำเสนอในส่วนที่หนึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ และหาสมการสากลทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของการนำใช้สมการสากลในการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าว ผู้เขียนได้ทำนายการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวโตเกียว (Tokyo clay) และดินเหนียวอะริเอะ (Ariake clay) ซึ่งเป็นผลทดสอบของ Terashi et al. [12] และ Yamadera [13] ตามลำดับ

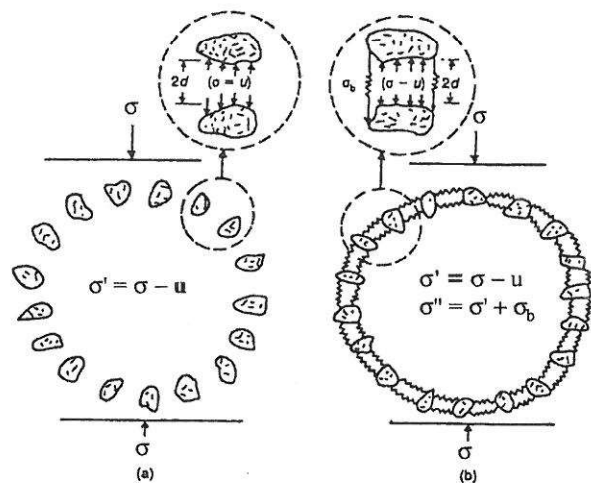
3. ผลทดสอบและการวิเคราะห์

รูปที่ 3 แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการอัดตัวมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (Pre-yield state) เนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงหลังจุดคราก (Post-yield state) ที่สถานะนี้ ดัชนีการอัดตัว (Compression index, C_c) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ยัง

สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูงๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (ดินเหนียวปั้นใหม่)



รูปที่ 3 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของดินเหนียว (a) ไร้พันธะเชื่อมประสาน (b) พันธะเชื่อมประสาน

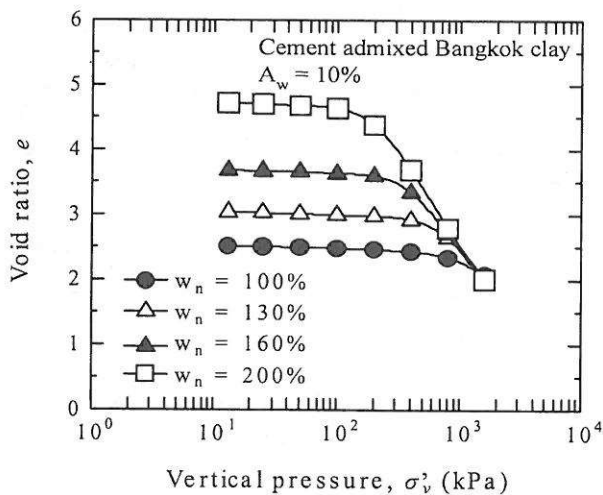
เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงบทบาทของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม ผู้เขียนขอเสนอไดอะแกรมโครงสร้างของดินเหนียว [15 และ 16] ดังแสดงในรูปที่ 4 จากไดอะแกรมดังกล่าว เราสามารถอธิบายได้ว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวด้วยน้ำขึ้นอยู่กับความเค้นประสิทธิผลเพียงอย่างเดียว [14] ในขณะที่สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ ต้องมี

การดัดแปลงหลักการความเค้นประสิทธิผลเพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะทางวิศวกรรมได้ สุขสันต์และรุ่งลาวัลย์ [15] Horpibulsuk and Rachan [8] และ Horpibulsuk et al. [16] อธิบายว่าที่อัตราส่วนโพรงค่าหนึ่ง กำลังต้านทานการอัดตัวของดินเหนียวซีเมนต์เป็นผลรวมของความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากดินไร้พันธะเชื่อมประสานและความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสานดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma'' = \sigma' + \sigma_b \quad (4)$$

เมื่อ σ'' คือความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวซีเมนต์ σ' คือความเค้นประสิทธิผลของดินไร้พันธะเชื่อมประสาน และ σ_b คือความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน สมการที่เสนอนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายกราฟการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ [10]

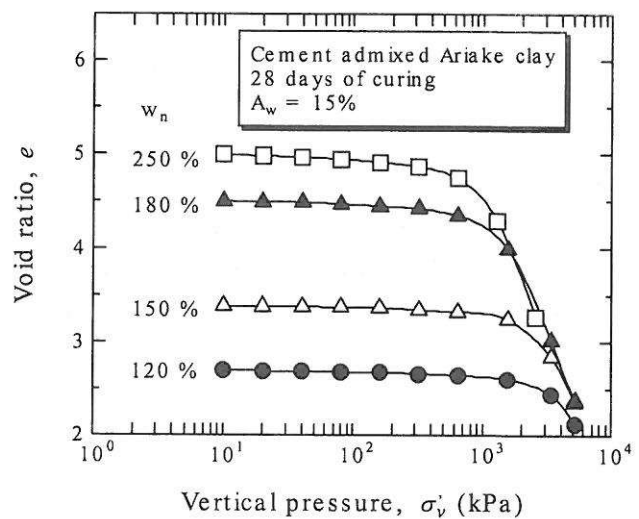
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อลักษณะการอัดตัวของน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 10% และที่ปริมาณความชื้นต่างๆ เริ่มจาก 100% ถึง 200% จะเห็นได้ว่าลักษณะการอัดตัวของน้ำในช่วงหลังจุดครากมีความคล้ายกันมากสำหรับดินซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากัน โดยไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเริ่มต้น นอกจากนี้ ผู้เขียนยังพบปรากฏการณ์ที่เหมือนกันนี้ สำหรับดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6



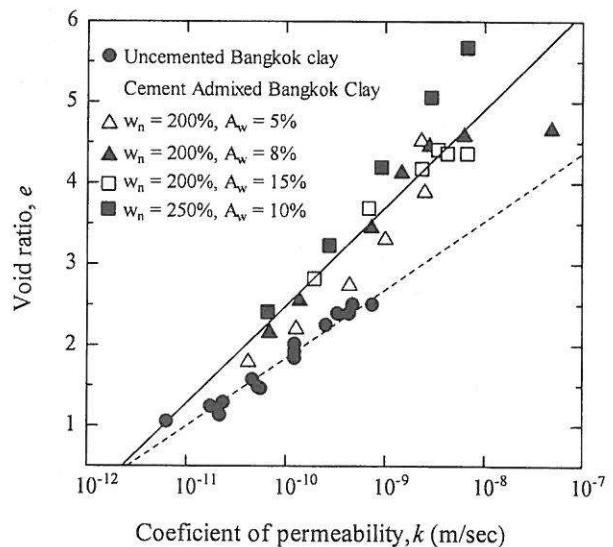
รูปที่ 5 ลักษณะการอัดตัวของน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ บ่ม 28 วัน

รูปที่ 7 แสดงผลทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวกรุงเทพฯซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าพันธะเชื่อม

ประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า ดังนั้นการปรับปรุงดินอ่อนด้วยซีเมนต์นอกจากจะเป็นการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนและลดการทรุดตัวแล้ว ยังเป็นการลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บ่มน้ำ เช่นงานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut-off wall เป็นต้น



รูปที่ 6 ลักษณะการอัดตัวของน้ำของดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ บ่ม 28 วัน



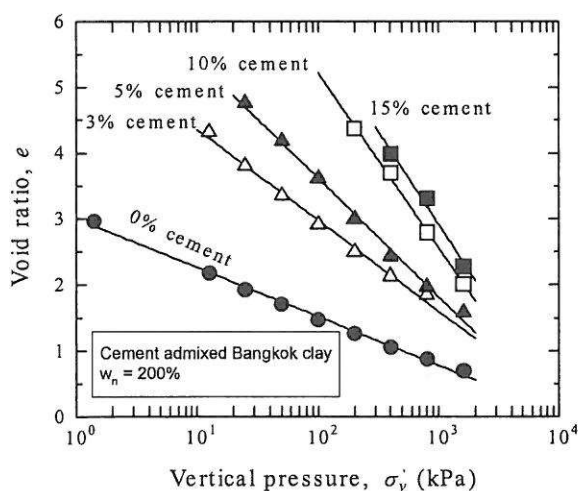
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์

4. การทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ

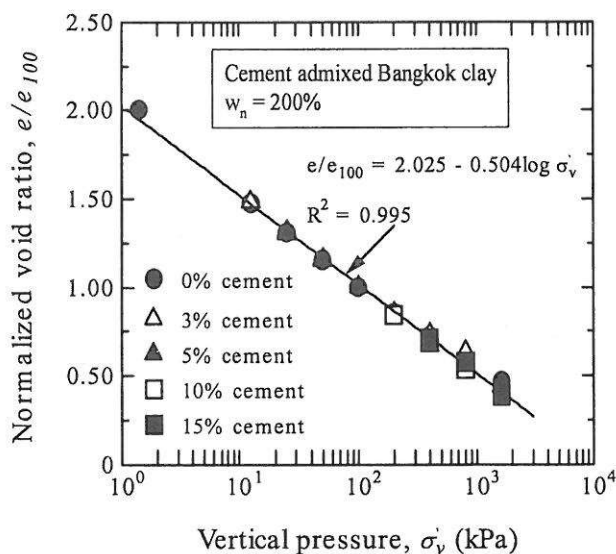
จากผลการทดสอบเป็นที่น่าสนใจว่าลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ที่สภาวะหลังจุดครากจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยไม่แปรผันตามปริมาณความชื้นในดิน และที่สถานะนี้ การอัดตัวคายน้ำมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 8 ดังนั้น ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Nagaraj and Srinivasa Murthy [9] น่าจะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม จุดจำกัดเหลวของดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลาเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น ผู้เขียนจึงได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง (e/e_{100}) กับค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_v) เมื่อ e_{100} คืออัตราส่วนโพรงที่ความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์นี้เป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพสำหรับดินซีเมนต์ทุกปริมาณซีเมนต์ ผู้เขียนตั้งชื่อความสัมพันธ์นี้ว่าเส้นการอัดตัวทั่วไป (Generalized Compression Line, GCL) และมีสมการดังนี้

$$\frac{e}{e_{100}} = 2.025 - 0.504 \log \sigma'_v \quad (5)$$

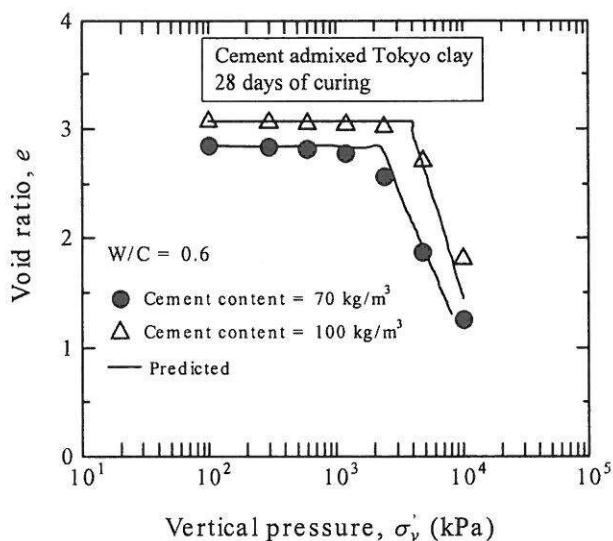
จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่ต้องการในการสร้างเส้นการอัดตัวทั่วไปมีเพียงแค่อัตราส่วนโพรงที่ความเค้นในแนวตั้งเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล (e_{100}) ค่านี้สามารถคำนวณหาได้จากค่ากำลังต้านแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Strength, q_u) โดยอาศัยสมการที่ 2



รูปที่ 8 ลักษณะการอัดตัวคายน้ำที่สภาวะหลังจุดครากของดินเหนียวกรุงเทพฯไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์



รูปที่ 9 เส้นการอัดตัวทั่วไปของดินเหนียวที่ไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์



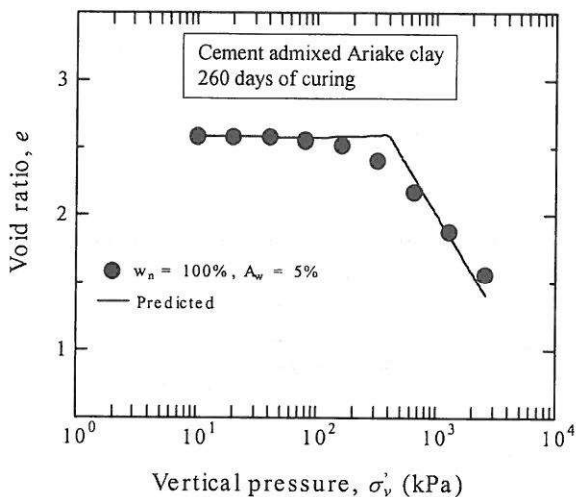
รูปที่ 9 ($e, \log \sigma'_v$) สำหรับดินเหนียวโตเกียวผสมซีเมนต์

การประมาณ e_{100} และการทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำสามารถกระทำได้ดังนี้

1. หาค่ากำลังต้านแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Strength, q_u) และอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Void Ratio, e_0)
2. จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่จุดครากและกำลังต้านแรงอัดแกนเดียว (สมการที่ 2) คำนวณหาค่าความเค้นจุดคราก

3. อาศัยเส้นการอัดตัวทั่วไป (สมการที่ 5) คำนวณหาค่าอัตราส่วนโพรงที่ความเค้นในแนวดิ่งเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล (e_{100}) โดยการแทนค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้นและความเค้นที่จุดคราก
4. วาดเส้นการอัดตัวคายน้ำ ($e, \log \sigma'_v$) ที่สภาวะหลังจุดคราก
5. สมมุติว่าไม่มีการอัดตัวที่สภาวะก่อนจุดครากลากเส้นตรงขนานแนวนอนจากอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (e_0) ถึงเส้นอัดตัวคายน้ำที่สภาวะหลังจุดคราก

การทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำแสดงดังรูปที่ 9 และ 10 สำหรับดินเหนียวโคเกีย และดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์ ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟการอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 10 ($e, \log \sigma'_v$) สำหรับดินเหนียวอะริเอเคผสมซีเมนต์

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ นอกจากนี้ยังเสนอวิธีการทำนายลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์ บทสรุปที่สำคัญแสดงเป็นข้อๆ ดังนี้

- 1) สำหรับดินเหนียวซีเมนต์ ลักษณะการอัดตัวที่สภาวะหลังจุดครากถูกควบคุมโดยปริมาณซีเมนต์ โดยไม่แปรผันตามปริมาณความชื้นในดิน
- 2) พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากัน ดินซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน
- 3) เส้นการอัดตัวทั่วไป (Generalized Compression Line, GCL) สร้างขึ้นจากข้อมูลการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ เส้นการอัดตัวทั่วไปนี้มีประโยชน์ในการใช้ทำนาย

กราฟการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น และปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้อย่างทันทีหลังสิ้นสุดการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Kamon, and D.T. Bergado, "Ground improvement techniques", Proc. 9th Asian Regional Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., Bangkok. Vol.2, 1992, pp.526-546.
- [2] M. Kamaluddin and A.S. Balasubramaniam, "Overconsolidated behavior of cement treated soft clay", Proc. 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Thailand, 1995, pp. 407-412.
- [3] K. Uddin, A.S. Balasubramaniam and D.T. Bergado, "Engineering behavior of cement treated Bangkok soft clay", Geotechnical Engineering Journal. Vol.28, 1997, pp.89-119.
- [4] S. Horpibulsuk, Analysis and Assessment of Engineering Behavior of Cement Stabilized clays, Ph.D. Dissertation. Saga University. Saga. Japan, 2001, 427p.
- [5] S. Horpibulsuk, N. Miura, and K. Nishida, "Factors influencing field strength of soil-cement column" Proc. Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology. Bangkok. Thailand, 2000, pp. 623-634.
- [6] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T.S. Nagaraj, "Analysis and assessment of strength development in cement admixed clays" Proc. Int. Conf. on Civil Engineering. Indian Institute of Science. India, Vol.2, 2001, pp.156-163.
- [7] S. Horpibulsuk, N. Miura, T.S. Nagaraj, and H. Koga, "Improvement of soft marine clays by deep mixing technique" Proc. 11th Int. Conf. on Offshore and Polar Engineering, Kitakyushu, Japan, May, 2002, pp.584.
- [8] S. Horpibulsuk, and R. Rachan, "Strength development in cement admixed clays at high water content", Proc. International Symposium on Soft Ground Improvement and Geosynthetic Applications, King Mongkut's University of Technology, Bangkok, Thailand, 2002, pp.232-250.
- [9] T.S. Nagaraj, and B.R. Srinivasa Murthy, "A critical reappraisal of compression index equations", Geotechnique, Vol.36, No.1, 1986, pp. 27-32.

- [10] สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน "การจำแนกสถานะและลักษณะการอัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพ" งานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8 พ.ศ. 2545 หน้า GTE 399-404.
- [11] N. Miura, S. Horpibulsuk, and T.S. Nagaraj, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content" *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, 2001: 33-45.
- [12] M. Terashi, H. Tanaka, T. Mitsumoto, Y. Niidome, and S. Honma, Fundamental properties of lime and cement treated soils (2nd report), Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 19, No. 1, 1979 pp.33-62 (in Japanese).
- [13] A. Yamadera, *Microstructural Study on Geotechnical Characteristics of Marine Clays*. Ph.D. Dissertation, Saga University, Saga, Japan, 1999.
- [14] K. Terzaghi, "The shear resistance of saturated soil and the angle between the plane of shear", Proc. 1st of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, 1936, pp 54-56.
- [15] สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน "การวิเคราะห์ลักษณะการวิศวกรรมของดินเหนียวพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ" (2546) วารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 10 ฉบับที่ 2.
- [16] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T.S. Nagaraj, "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis", *Geotechnique*, Vol 53, 2003, pp.439-444.

