



พฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวรวมตัวต่ำปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปั้นใหม่
COMPRESSION BEHAVIOR OF REMOLDED CEMENT-STABILIZED
LOW SWELLING CLAY

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม

อาจารย์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Corresponding author, E-Mail: narongdet.y.s@bru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติและคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวรวมตัวต่ำผสมซีเมนต์ปั้นใหม่ ดินเหนียวตัวอย่างเป็นดินเหนียวพลาสติกชนิดต่ำถูกนำมาผสมซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 2 ถึง 6 ของน้ำหนักดินแห้ง และนำมาปั้นใหม่ ภายหลังจากอายุบ่มครบ 28 วัน จากนั้นจึงนำมาทดสอบหาค่าดัชนีคุณสมบัติและการอัดตัวคาน้ำหนึ่งมิติ (1D) พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์มากขึ้น อิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ส่งผลกระทบบให้ พิกัดเหลว และสภาพความเป็นพลาสติกของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม ความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มลดลงสวนทางกับพิกัดพลาสติกที่มีค่าสูงขึ้น ภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน อัตราส่วน โพรงและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำของดินซีเมนต์ปั้นใหม่มีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนีการอัดตัวมีแนวโน้มสัมพันธ์กันเชิงเส้นกับน้ำหนักกดทับ และมีค่ามากขึ้นภายใต้น้ำหนักกดทับเดียวกัน ในช่วงการปรับปรุงดินถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในช่วงแรกของการปรับปรุงดิน สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [10] ไม่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวรวมตัวต่ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ จากผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำของดินทั้งหมด บทความนี้ได้ปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ทั่วไปที่เหมาะสมกับดินเหนียวที่มีลักษณะการรวมตัวที่หลากหลาย ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการใช้ทำนายเส้นกราฟการอัดตัวของดินเหนียวทั่วไปในสภาวะปั้นใหม่สำหรับวัสดุกันซึมดินเหนียวในพื้นที่ฝั่งกลบขยะ

คำสำคัญ: พฤติกรรมการอัดตัว; การอัดตัวเนื้อแท้; ดินเหนียวปั้นใหม่; ดัชนีอัตราส่วน โพรง

ABSTRACT

The article presents the effect of cement on the index and compressive properties of remolded cement-stabilized low swelling clay. The clay sample was low plasticity clay mixed with cement at a cement content of 2 % to 6 % by weight of dry soil. The cement-stabilized low swelling clay was remolded at a curing time of 28 days. Its Index properties and 1-D consolidation were investigated. Cement content affected on index properties and compressibility properties of soil samples. The liquid limit and plastic limit of the soil sample tended to decrease with an increase in cement content. The void ratio and coefficient of consolidation of remolded cement-stabilized low swelling clay increased at particular vertical stress. For particular vertical stress, the compression index

increased at optimum cement contents and has linear relationship with cement content. At the beginning, the coefficient of volume change and coefficient of permeability of the soil sample increased with an increase in cement content. The coefficient of permeability proposed by Nagaraj et al. [10] was not suitable for cement-stabilized low swelling clay. According to all consolidation test results, this paper modified the normalized equation with various swelling clay characteristics, which is useful for predicting the consolidation of other remolded clays for clay liner material in a waste landfill.

KEYWORDS: compression behavior; intrinsic compression; remolded clay; void index

1. คำนำ

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย การใช้ซีเมนต์ปรับปรุงดินเหนียวอ่อนส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและการยุบอัดตัวลดลง เนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) เช่นเดียวกับดินที่มีพันธะเชื่อมประสานที่เกิดตามธรรมชาติ (Naturally structured clay) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติเป็นใหม่ อันได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) ความสามารถยุบอัดตัว (Compressibility) และความซึมน้ำของดิน (Permeability) มีความสำคัญยิ่งต่อการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประเมินการทรุดตัวและอัตราการซึมผ่านน้ำของดินนั้น จำเป็นต้องใช้ตัวแปรการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation parameter) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งมักทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม (Conventional oedometer test) โดยวิธีการเพิ่มน้ำหนักกดทับและเปลี่ยนน้ำหนักครั้งต่อไปเมื่อเวลาผ่านไปทุก ๆ 24 ชั่วโมง ในการทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ 1 สัปดาห์ จากข้อจำกัดในเรื่องของเวลาที่ยาวนานในการทดสอบ นักวิจัยหลายท่าน [2-7] จึงได้ศึกษาและพยายามสร้างความสัมพันธ์ทั่วไป (Normalization) ของการอัดตัวคายน้ำเพื่อลดความยุ่งยากและซับซ้อนในการประมาณค่าตัวแปรการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติเป็นใหม่ และพบว่าอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวสามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ทั่วไปการอัดตัวคายน้ำได้ เนื่องจากพิกัดเหลวเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดินชนิดนั้น ๆ ที่สะท้อนผลเนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีที่มีอยู่ในดิน ทั้งนี้ Nagaraj และคณะ [8] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ทั่วไปของเส้นสถานะเนื้อแท้ (Intrinsic State Line, ISL) โดยอาศัยอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ดังสมการที่ 1

$$\frac{e}{e_L} = 1.230 - 0.276 \log \sigma'_v \quad (1)$$

โดยที่ e คือ อัตราส่วนโพรง e_L คือ อัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว และ σ'_v คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง จากนั้น ในปี 1990 Burland [2] ได้ศึกษาลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเช่นกัน และได้นำเสนอสมการทั่วไปการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติเป็นใหม่หรือเส้นการอัดตัวเนื้อแท้ (Intrinsic Compression Line, ICL) ดังสมการที่ 2

$$I_v = 0.015 \log \sigma_v'^3 - 1.285 \log \sigma_v' + 2.45 \quad (2)$$

โดยที่ I_v คือ ดัชนีอัตราส่วนโพรง (Void Index) ดังสมการที่ 3

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (3)$$

โดยที่ e_{100}^* คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 100 kPa และ C_c^* คือดัชนีการอัดตัวเนื้อแท้ (Intrinsic Compression Index) โดย e_{100}^* และ C_c^* สามารถประมาณได้ด้วยการสร้างความสัมพันธ์กับ e_L ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$e_{100}^* = 0.016e_L^3 - 0.089e_L^2 + 0.679e_L + 0.190 \quad (4)$$

$$C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^* = 0.256e_L - 0.04 \quad (5)$$

โดยที่ e_{1000}^* คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 1000 kPa

อย่างไรก็ตาม Horpibulsuk และคณะ [9] ระบุว่าความสัมพันธ์ทั่วไปของ ISL และ ICL ที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] และ Burland [2] ใช้ทำนายได้แม่นยำเฉพาะดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวต่ำเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เองจึงได้ปรับปรุงดัชนีอัตราส่วนโพรงขึ้นมาใหม่ให้ครอบคลุมดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวที่หลากหลายขึ้น และได้นิยามชื่อใหม่ คือ ดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุง (Modified Void Index, I_v') ดังสมการที่ 6

$$I_v' = \frac{e - e_{50}^*}{e_{50}^* - e_{1000}^*} \quad (6)$$

โดยที่ e_{50}^* คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 50 kPa สมการความสัมพันธ์ระหว่าง I_v' และ $\log \sigma_v'$ ดังสมการที่ 7

$$I_v' = 0.029 \log \sigma_v'^3 - 0.112 \log \sigma_v'^2 - 0.733 \log \sigma_v' + 1.427 \quad (7)$$

ในทำนองเดียวกันค่า e_{50}^* และ $e_{50}^* - e_{1000}^*$ สามารถประมาณได้โดยสร้างความสัมพันธ์กับ e_L ดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งสมการดังกล่าวจะให้ความแม่นยำในช่วง e_L มีค่าระหว่าง 1.44 ถึง 3.45 เท่านั้น

$$e_{50}^* = 0.125e_L^3 - 0.727e_L^2 + 2.265e_L - 1.059 \quad (8)$$

$$e_{50}^* - e_{1000}^* = 0.203e_L^3 - 1.185e_L^2 + 2.864e_L - 1.889 \quad (9)$$

นอกจากสมการความสัมพันธ์สำหรับใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำค้างได้นำเสนอมาแล้วข้างต้น ในปี 1993 Nagaraj และคณะ [10] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดิน (Coefficient of permeability) และได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L และ $\log k$ ดังสมการที่ 10

$$\frac{e}{e_L} = 2.162 + 0.195 \log k \quad (10)$$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดิน

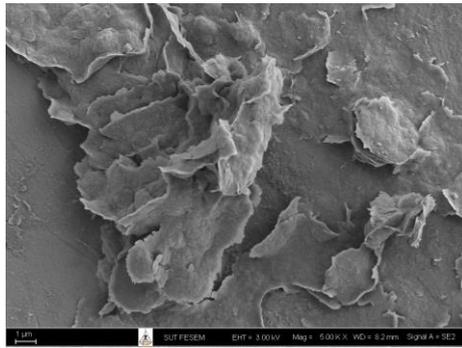
ถึงแม้ว่าสมการจากการเทียบปรับ (Calibration) สำหรับใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินในอดีตที่ผ่านมาจะสร้างจากข้อมูลผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ของดินที่หลากหลาย แต่ยังไม่มีการยืนยันได้ว่าสมการดังกล่าวจะนำมาใช้กับดินเหนียววมตัวต่ำที่ผ่านการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางวิศวกรรมของดินด้วยซีเมนต์ในสถานะบั้นใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้เอง บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติ และคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ โดยมุ่งเน้นเทียบปรับสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวที่หลากหลายยิ่งขึ้น หากความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลไม่เป็นไปตามหลักการหรือแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต บทความนี้จะนำเสนอสมการเทียบปรับดังกล่าวขึ้นมาใหม่

2. การเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบ

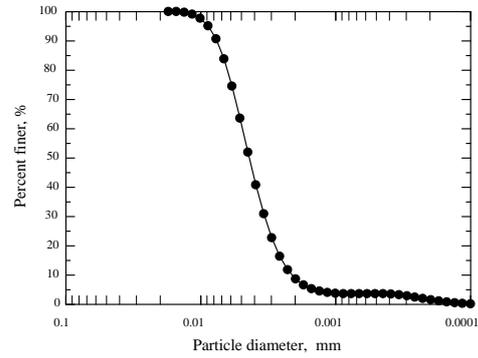
ดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบเก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 7 ถึง 8 เมตรจากผิวดิน ณ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ผลการทดสอบรายละเอียดพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ รวมทั้งคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างและซีเมนต์ ดังรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ตามลำดับ จากการศึกษาพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของดินแสดงให้เห็นลักษณะของเนื้อดินเป็นผลึกแผ่นบางและการจัดเรียงตัวแบบ Face to face โดยเป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed structure) ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนในน้ำจืด ดังรูปที่ 1 a) ทั้งนี้ดินตัวอย่างจัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตามการจำแนกดินในระบบเอกภาพ (USCS) และเป็นดินเหนียววมตัวต่ำ (Low swelling clay) เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free swell ratio, FSR) ตามวิธีการจำแนกดินของ Prakash and Sridharan [11] ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ 11 และการทดสอบดังรูปที่ 2

$$FSR = \frac{v_d}{v_k} \quad (11)$$

เมื่อ v_d และ v_k คือ ปริมาตรของดินขนาดเล็กกว่า 425 mm จำนวน 10 กรัม ที่ตกตะกอนพร้อมทั้งบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetra chloride, CCl_4) ตามลำดับ



a)

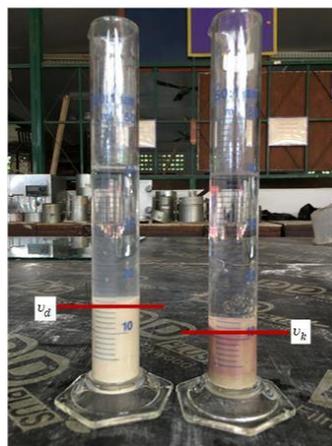


b)

รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค และกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างและซีเมนต์

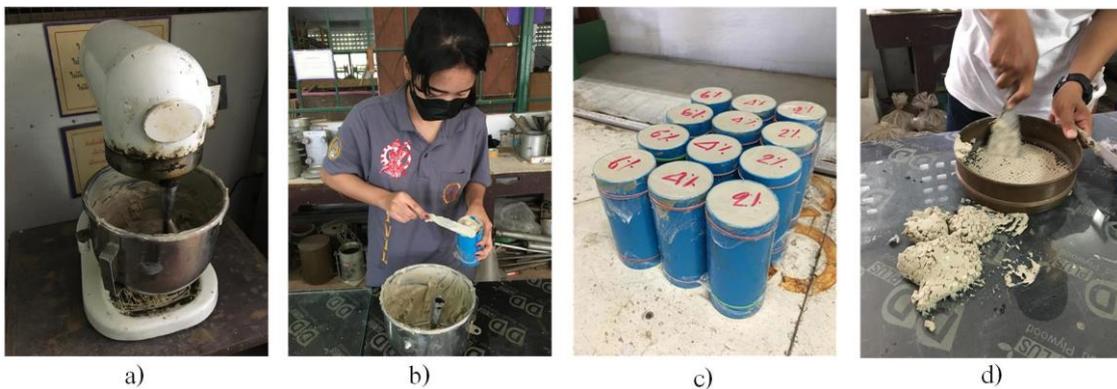
Basic properties	Soil sample	Cement
Specific gravity, G_s	2.60	3.15
Liquid Limit, LL (%)	48	-
Plastic Limit, PL (%)	21	-
Plasticity Index, PI (%)	27	-
FSR	1.36	-
Silt (%)	91	-
Clay (%)	9	-



รูปที่ 2 การทดสอบอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (FSR)

ตัวอย่างดินเหนียวดังกล่าวถูกนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ปูนอินทรีเพชร) ปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างถูกปรับให้มีค่าดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index, LI) เท่ากับ 2.0 ก่อนผสมกับซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม (Cement content, A_w) อยู่ระหว่างร้อยละ 2 ถึง 6 ของน้ำหนักดินแห้ง เมื่อผสมดินตัวอย่างกับซีเมนต์เข้ากันดีด้วยเครื่องกวน ดังรูปที่ 3 a) แล้วจึงบรรจุดินซีเมนต์ลงในแบบหล่อท่อพีวีซี (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว และห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Wrap) แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 3 b) และ 3 c) ตามลำดับ เมื่อครบอายุบ่มตามกำหนดนำก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์มาทำลายพันธะเชื่อมประสานหรือทำการบิ่นใหม่ โดยการทำก้อนตัวอย่างให้แตกออกจนมีขนาดเล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังรูปที่ 3 d) และนำเข้าเครื่องกวนตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลวเท่ากับ 1.0 [1] จากนั้นนำตัวอย่างที่บิ่นใหม่ของแต่ละส่วนผสมทดสอบหาคะแนนคุณสมบัติและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ พิกัดอัตราเบอร์ก (Atterberg's limits) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) รวมทั้งทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติตามมาตรฐาน ASTM D 2435 [12] ดังตารางสรุปสัดส่วนผสม วิธีการทดสอบ และเงื่อนไขต่าง ๆ ตารางที่ 2



รูปที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสม วิธีการทดสอบ และเงื่อนไขต่าง ๆ

ประเภทตัวอย่าง	สัญลักษณ์	อายุบ่ม	การทดสอบ
ดินที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์	A_w 0%	-	Atterberg's limits, Specific gravity, Free Swell Ratio, Consolidation test และศึกษารายละเอียดพื้นผิวโครงสร้างจุลภาครวมทั้งขนาดอนุภาคของดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์
ดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 ของน้ำหนักดินแห้ง	A_w 2%	28 วัน	Atterberg's limits, Specific gravity และ Consolidation test
ดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 4 ของน้ำหนักดินแห้ง	A_w 4%		
ดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 6 ของน้ำหนักดินแห้ง	A_w 6%		

3. ผลการวิจัย

3.1 ดัชนีคุณสมบัติของดินเหนียวรวมตัวต่ำปรับปรุงด้วยซีเมนต์

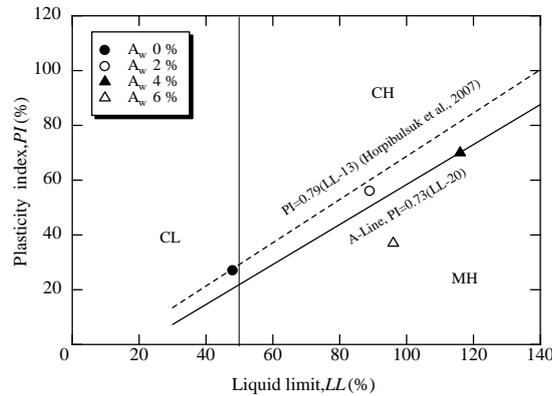
จากผลการทดสอบดัชนีคุณสมบัติของดินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ พบว่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ (A_w 0% ถึง A_w 2%) ภายหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นยังส่งผลให้ค่าพิกัดเหลว (LL) และพิกัดพลาสติก (PL) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้พิกัดเหลวจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ถึงปริมาณเหมาะสม (A_w 4%) การเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะพิกัดเหลว และพิกัดพลาสติกส่งผลให้ดัชนีสภาพความเป็นพลาสติก (PI) และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว (e_L) เปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 3 จึงอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างของดินซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของดัชนีคุณสมบัติของดินตัวอย่างนั้นเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปอซโซลานิก (Pozzolanic) ของดินซีเมนต์ [13] ที่ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแคลเซียมไอออนของดินซีเมนต์ และผลของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับแร่อลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) ที่มีอยู่ในแผ่นของอนุภาคดินเหนียว (Clay platelet) [14-17]

ตารางที่ 3 อิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติของดินเหนียวรวมตัวต่ำ

Sample	G_s	LL (%)	PL (%)	PI (%)	* e_L
A_w 0%	2.60	48	21	27	1.251
A_w 2%	2.65	89	32	56	2.349
A_w 4%	2.63	116	45	71	3.040
A_w 6%	2.61	96	60	37	2.509

หมายเหตุ: * $e_L = (LL)(G_s)$

นอกจากนี้ เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเหลว กับดัชนีสภาพพลาสติกของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าสภาพความเป็นพลาสติกของดินซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม โดยเปลี่ยนจากดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) เป็นดินเหนียวมีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (CH) รวมทั้งความสัมพันธ์จะอยู่ระหว่างเส้น A-Line กับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ [18] อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น (A_w 6%) ความสัมพันธ์ดังกล่าวกลับอยู่ใต้เส้น A-Line ดังรูปที่ 4 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นพลาสติกของดินนั้นเป็นผลจากการรวมตัวกันของอนุภาคดินซีเมนต์เป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น [19] ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของดิน (ขนาดของเม็ดดิน) เปลี่ยนไปจากเดิมอย่างสิ้นเชิง โดยเปลี่ยนจากดินเหนียวเป็นดินตะกอนที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (MH)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง LL กับ PI

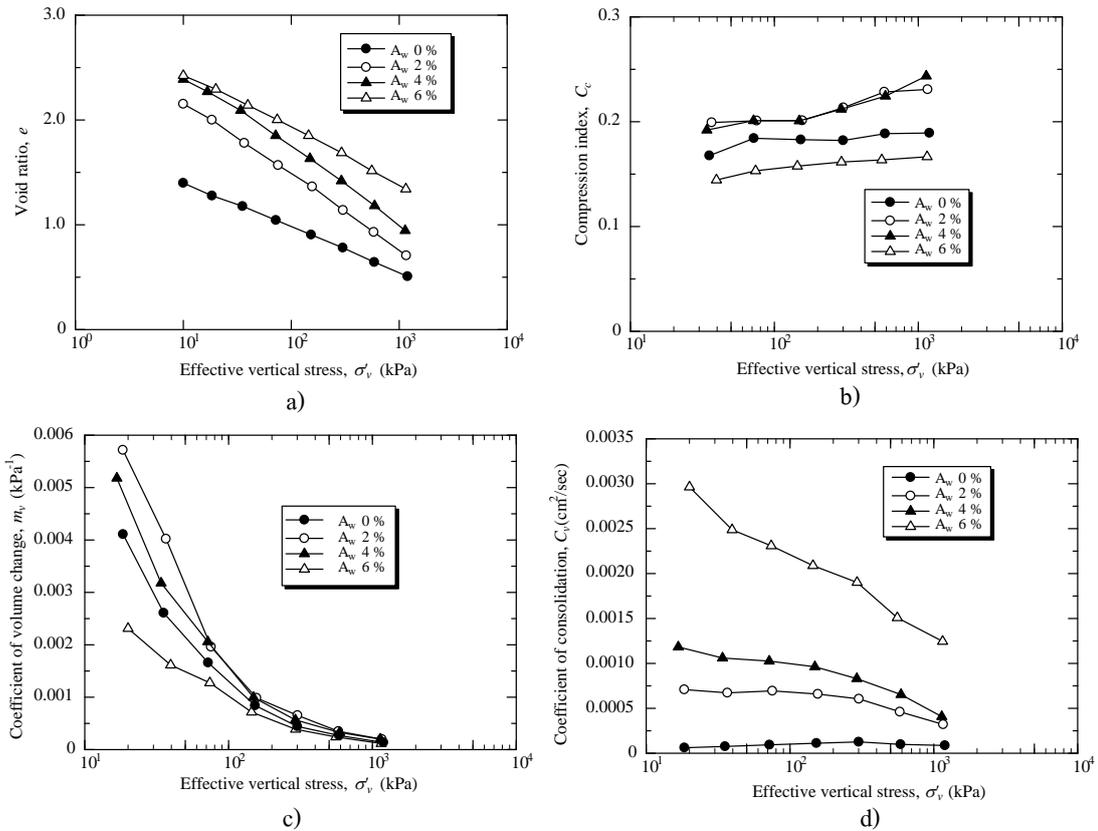
3.2 คุณสมบัติการยุบตัวของดินเหนียวรวมตัวต่ำปรับปรุงด้วยซีเมนต์บั้นใหม่

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง e และ $\log \sigma'_v$ ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 a) พบว่าภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน อัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์บั้นใหม่มีค่าสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ รวมทั้งเสถียรอยู่ได้ภายใต้อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้นของอนุภาคดินซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์สูงขึ้นตาม ตลอดจนการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนนี้ยังคงอยู่และไม่สลายไปแม้จะผ่านการบั้นใหม่และให้พลังงานในการบดขยี้ที่ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลวแล้วก็ตาม ด้วยเหตุนี้เองดินซีเมนต์บั้นใหม่จึงเสถียรอยู่ได้ภายใต้อัตราส่วนโพรงที่สูงกว่าสถานะเนื้อแท้และสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม

รูปที่ 5 b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_c และ $\log \sigma'_v$ จากกราฟพบว่าภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน ดัชนีการอัดตัวมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นถึงปริมาณเหมาะสม ภายหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น รวมทั้ง ดัชนีการอัดตัวของดินตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยตรงและสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2 และ 4 จะแสดงการเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันอย่างมาก

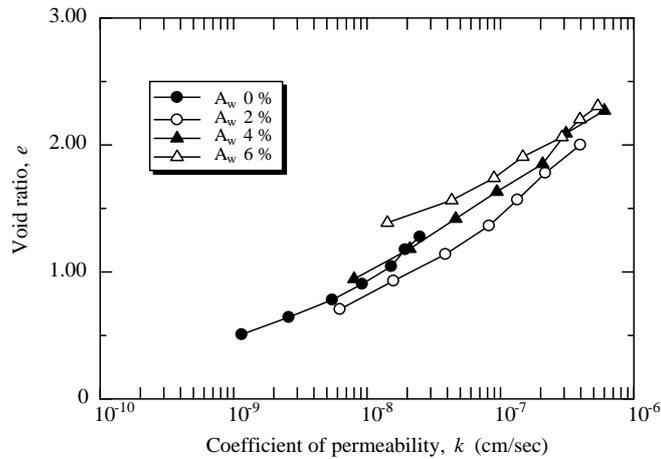
รูปที่ 5 c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m_v และ $\log \sigma'_v$ พบว่าสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินตัวอย่างทั้งหมดมีค่าลดลง และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากขึ้นต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ (A_w 0% ถึง A_w 2%) ภายหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 5 d) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_v และ $\log \sigma'_v$ พบว่าสัมพันธ์การอัดตัวคายน้ำของดินทั้งหมดมีค่าลดลงต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับ รวมทั้งภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากันสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดิน ซึ่งเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน บางส่วนที่ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุวาระหว่างแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) กับชั้นประจุกระจายตัว (Diffusion double layer) ของอนุภาคดิน รวมทั้งผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในแผ่นของอนุภาคดินเหนียว [13-17, 19] ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวส่งผลให้เกิดการลดบางลงของชั้นประจุกระจายตัวของดินที่มีอยู่เดิม ทำให้น้ำไหลผ่านช่องว่างภายในกลุ่มก้อนของดินได้สะดวกยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้เองภายใต้ น้ำหนักกดทับที่เท่ากันค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจึงมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ $\log \sigma'_v$, C_c กับ $\log \sigma'_v$, m_v กับ $\log \sigma'_v$ และ C_v กับ $\log \sigma'_v$

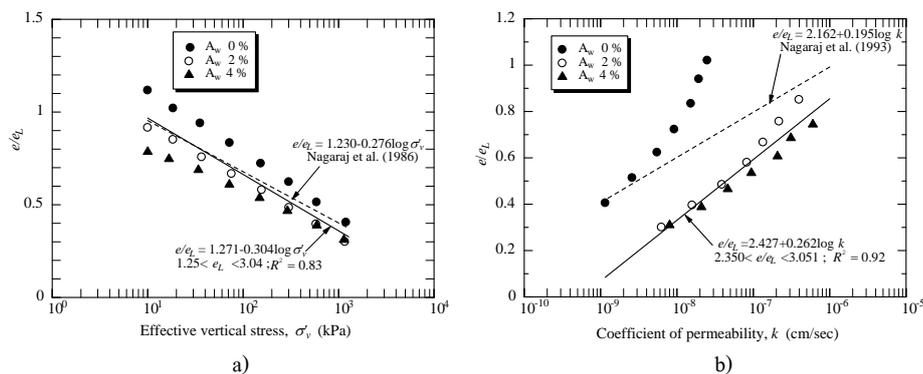
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง e และ $\log k$ ของดินตัวอย่าง ดังรูปที่ 6 พบว่าภายใต้อัตราส่วน โพรงที่เท่ากัน ความซึมผ่าน น้ำของดินมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการปรับปรุงจากดินไม่ผสมซีเมนต์เป็นดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 ภายหลังจากนั้นจะมีค่าลดน้อยลงต่อการเพิ่มสูงยิ่งขึ้นของปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง m_v และ $\log \sigma'_v$ ดังรูปที่ 5 c) สาเหตุการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำในช่วงแรกของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและพอซโซลานิกของดินซีเมนต์ที่ทำให้อนุภาคดินรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและช่องว่างระหว่างเม็ดดินใหญ่ขึ้น [19] ทำให้น้ำไหลผ่านช่องว่างภายในกลุ่มของมวลดินได้สะดวกขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำสูงขึ้นตาม ภายหลังจากนั้นเมื่อปริมาณซีเมนต์มากยิ่งขึ้น ผลที่ตามมาของปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ช่องว่างที่มีอยู่เดิมถูกเติมเต็มด้วยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมี จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินมีค่าลดลงในที่สุด อย่างไรก็ตาม การที่กราฟความสัมพันธ์ e และ $\log k$ ของดินตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์และผสมซีเมนต์ร้อยละ 4 มีแนวโน้มใกล้เคียงกันนั้น อาจเป็นไปได้ว่าลักษณะโครงสร้างของดินทั้งสองประเภทมีลักษณะเหมือนกัน จึงทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่สุดในที่สุด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ $\log k$

3.3 สถานะเนื้อแท้ (Intrinsic state)

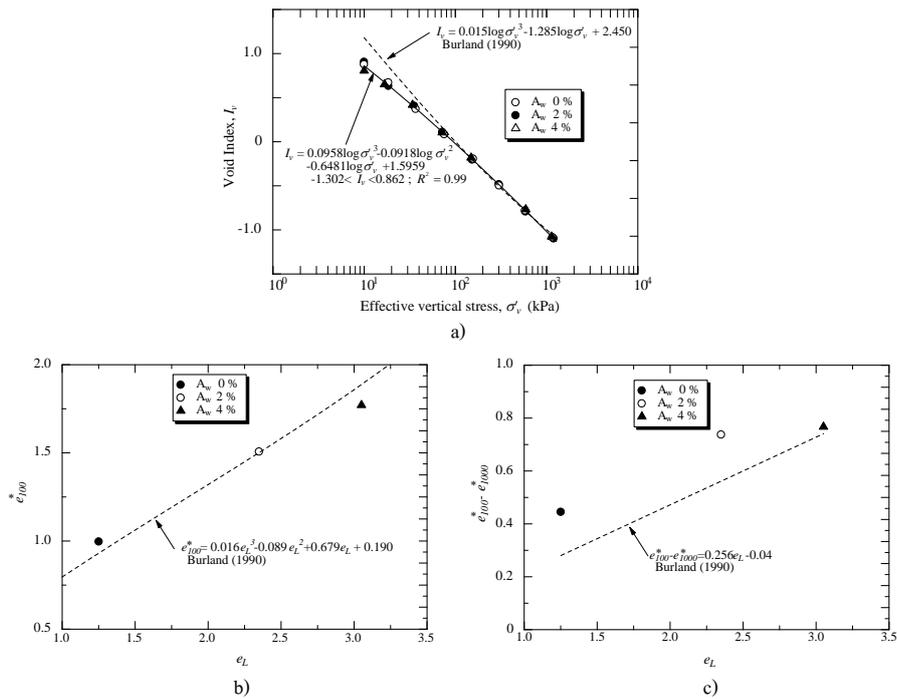
จากผลทดสอบคุณสมบัติการอัดตัวคาน้ำดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L กับ $\log \sigma'_v$ ของดินตัวอย่างที่มีสภาพความเป็นพลาสติกอยู่เหนือเส้น A-Line ดังรูปที่ 4 พบว่าเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลจากผลการทดสอบของดินทั้งหมดมีความใกล้เคียงกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงน้ำหนักรีดทับน้อย ๆ ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันอย่างมาก ดังรูปที่ 7 a) อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L กับ $\log k$ ของดินซีเมนต์จะอยู่ต่ำกว่ากราฟจากการทำนายด้วยสมการของ Nagaraj และคณะ [10] ดังรูปที่ 7 b) จึงอาจกล่าวได้ว่า สมการเส้นสถานะเนื้อแท้ที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] เหมาะที่จะนำไปทำนายกราฟการอัดตัวคาน้ำของดินเหนียววมตัวต่ำที่ผสมและไม่ผสมซีเมนต์บั้นใหม่ในช่วงน้ำหนักรีดทับน้อย ๆ ส่วนสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L กับ $\log k$ ของดินที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [10] ไม่เหมาะนำมาใช้กับดินเหนียววมตัวต่ำผสมซีเมนต์



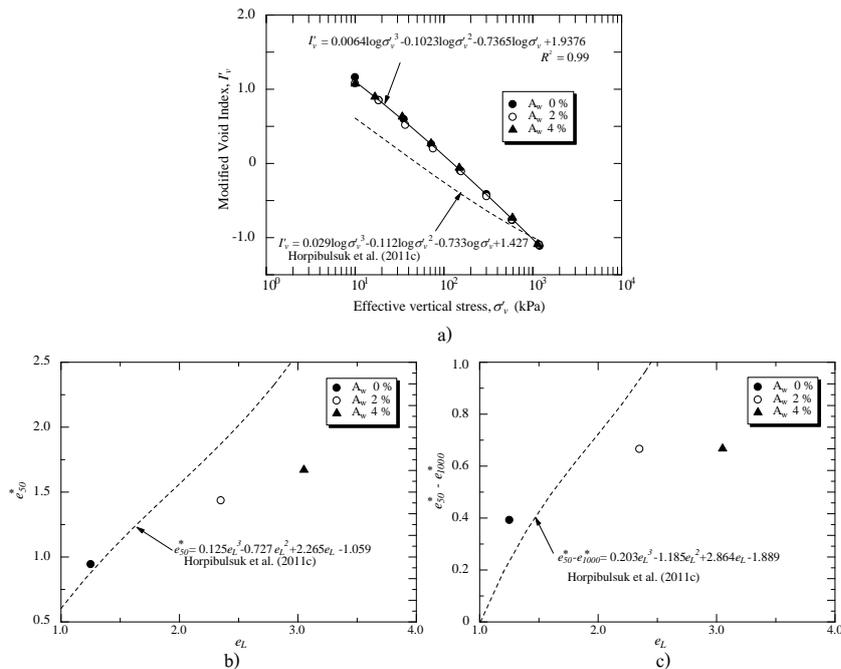
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง e/e_L กับ $\log \sigma'_v$ และ e/e_L กับ $\log k$

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง I_v กับ $\log \sigma'_v$ ของดินตัวอย่าง จากสมการที่เสนอโดย Burland [2] พบว่าสมการดังกล่าวสามารถทำนายพฤติกรรมของการอัดตัวคาน้ำของดินทั้งหมดได้อย่างแม่นยำในช่วงน้ำหนักรีดทับตั้งแต่ 100 kPa เป็นต้นไป ดังรูปที่ 8

a) รวมทั้ง ความสัมพันธ์ระหว่าง e_L กับ e_{100}^* ที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการทำนาย แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง e_L กับ $e_{100}^* - e_{1000}^*$ อยู่เหนือกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยสมการของ Burland [2] ดังรูปที่ 8 b) และ 8 c) ตามลำดับ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับสมการที่นำเสนอโดย Horpibulsuk และคณะ [9] พบว่าผลการทดสอบของดินตัวอย่างมีแนวโน้มแตกต่างกับเส้นกราฟจากการทำนายด้วยสมการของ Horpibulsuk และคณะ [9] ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง I_v กับ $\log \sigma'_v$, e_L กับ e_{100}^* และ e_L กับ $e_{100}^* - e_{1000}^*$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง I_v' กับ $\log \sigma'_v$, e_L กับ e_{50}^* และ e_L กับ $e_{50}^* - e_{1000}^*$

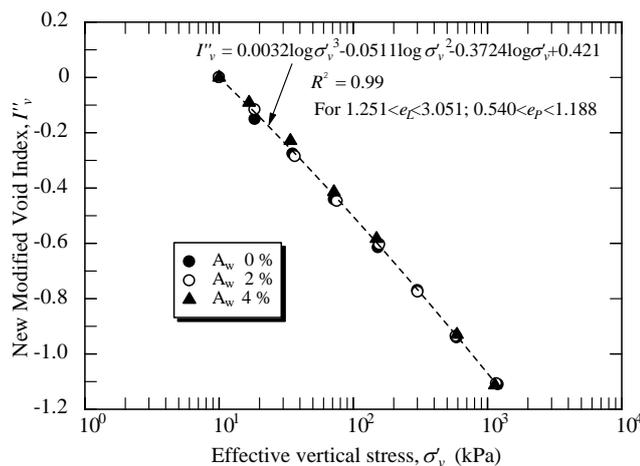
จากปัญหาข้างต้น บทความนี้พยายามสร้างสมการการอัดตัวคายน้ำ ด้วยการปรับปรุงสมการที่เสนอโดย Burland [2] และ Horpibulsuk และคณะ [9] โดยนำเสนอตัวแปรดัชนีอัตราส่วนโพรงปรับปรุงใหม่ (New Modified Void Index, I_v'') ซึ่งมีนิยาม ดังสมการที่ 12 ได้ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง I_v'' กับ $\log \sigma_v'$ ที่เทียบปรับขึ้นมาใหม่ ดังสมการที่ 13 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

$$I_v'' = \frac{e - e_{10}^*}{e_{10}^* - e_{800}^*} \quad (12)$$

โดยที่ e_{10}^* คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 10 kPa และ e_{800}^* คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 800 kPa

$$I_v'' = 0.0032 \log \sigma_v'^3 - 0.0511 \log \sigma_v'^2 - 0.3724 \log \sigma_v' + 0.421 \quad (13)$$

สำหรับช่วง $1.251 \leq e_L \leq 3.051; 0.540 \leq e_p \leq 1.188$



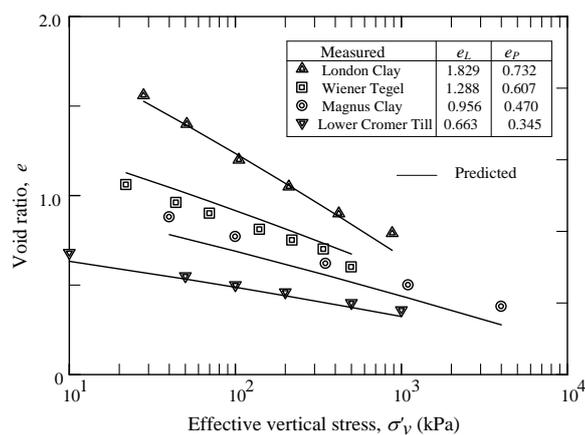
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง I_v'' กับ $\log \sigma_v'$

บทความนี้จะนำเสนอเทคนิคใหม่ในการประมาณค่า e_{10}^* และ e_{800}^* โดยการประมาณค่าของ e_{10}^* นั้นจะอาศัยความสัมพันธ์ทั่วไปเสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] เนื่องจากสมการดังกล่าวให้ความแม่นยำสูงในช่วงน้ำหนักรีดทับน้อย ๆ ดังสมการที่ 14 ส่วน e_{800}^* จะอาศัยความรู้พื้นฐานจากผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาที่พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่พิกัดเหลวมีค่าประมาณ 1.7 kPa ซึ่งสัมพันธ์กับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Effective vertical stress) ของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวปกติประมาณ 6.3 kPa รวมทั้ง กำลังต้านทานแรงเฉือนที่พิกัดพลาสติกจะมีค่าประมาณ 100 ถึง 150 เท่าของกำลังต้านทานแรงเฉือนที่พิกัดเหลว [20, 21] ด้วยเหตุนี้เอง ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งที่พิกัดพลาสติกจึงน่าจะมีค่าประมาณ 100 ถึง 150 เท่าของความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งที่พิกัดเหลวเช่นกัน ซึ่งมีค่าประมาณ 800 kPa (125 เท่า หรือ $125 \times 6.3 \approx 800$) ดังนั้น e_{800}^* จึงประมาณค่าได้โดยอาศัยอัตราส่วนโพรงที่พิกัดพลาสติก ดังสมการที่ 15

$$e_{10}^* = 0.954(e_L) \tag{14}$$

$$e_{800}^* = (PL)(G_s) \tag{15}$$

เมื่อนำสมการดัชนีอัตราส่วนโพรงที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ ร่วมกับสมการทำนายค่า e_{10}^* และ e_{800}^* ไปทำนายการอัดตัวคายน้ำของดิน London Clay, Wiener Tegel, Magnus Clay และ Lomer Cromer Till ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวต่างกันตั้งแต่ 0.663 ถึง 1.829 และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดพลาสติกตั้งแต่ 0.345 ถึง 0.732 [2] พบว่าสมการดังกล่าวสามารถทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำได้ใกล้เคียงกับผลจากการวัดจริงอย่างมาก ดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า สมการทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่นี้มีประโยชน์อย่างมาก ในการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประมาณค่าดัชนีการอัดตัวจากกราฟการอัดตัวคายน้ำที่ทำนายได้ สำหรับการประมาณค่าการทรุดตัว เพื่อประเมินความหนาของดินเหนียวชั้นกันซึมของระบบฝังกลบขยะจากน้ำหนักกดทับของวัสดุที่อยู่ด้านบนของชั้นกันซึม ที่กำหนดเกณฑ์ชั้นต่ำไว้ไม่น้อยกว่า 0.60 เมตร [22]



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์การอัดตัวคายน้ำจากการทำนายและการวัดจริง

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติและคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินเหนียวววมตัวต่ำในสภาวะปั่นใหม่พบว่า เมื่อผสมซีเมนต์กับดินเหนียวววมตัวต่ำจะก่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดิน ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินซีเมนต์สูงขึ้น รวมทั้งเกิดการลดลงของความหนาชั้นประจุกระจายตัว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันบางส่วนที่ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุวกระหว่างแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) กับชั้นประจุกระจายตัวของอนุภาคดินเหนียว และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในแผ่นของอนุภาคดินเหนียว ซึ่งสรุปประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรงของการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ ส่วนพิกัดเหลว และสภาพความเป็นพลาสติกของดินตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นถึงปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ส่วนทางกับพิกัดพลาสติกที่มีค่ามากขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้น

2) ภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน ดินซีเมนต์ปั้นใหม่สามารถเสถียรอยู่ได้ภายใต้อัตราส่วน โพรงที่สูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ รวมทั้งดัชนีการอัดตัวมีแนวโน้มสัมพันธ์กันเชิงเส้นกับน้ำหนักกดทับและมีค่ามากขึ้นภายใต้น้ำหนักกดทับเดียวกันในช่วงของการปรับปรุงดินถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม ส่วนสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านน้ำของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในช่วงแรกของการปรับปรุงดิน นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักกดทับมากขึ้น

3) กราฟการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานสามารถทำนายโดยอาศัยสมการดัชนีอัตราส่วน โพรงปรับปรุงใหม่ (I_p^*) ร่วมกับสมการทำนาย e_{10}^* จากสมการความสัมพันธ์ทั่วไปที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] และ e_{800}^* เทียบได้จากอัตราส่วน โพรงที่พิกัดพลาสติกที่ปรับเทียบขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับใช้เป็นเครื่องมือประเมินการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวในระบบฝังกลบขยะ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ทั่วไปดังกล่าวจะให้ความแม่นยำในช่วงอัตราส่วน โพรงที่พิกัดเหลวของดินตั้งแต่ 1.251 ถึง 3.051 และอัตราส่วน โพรงที่พิกัดพลาสติกตั้งแต่ 0.540 ถึง 1.188 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง e/e_L กับ $\log k$ ที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [10] ไม่เหมาะนำมาใช้กับดินเหนียวรวมตัวต่ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Butterfield, R. and Baligh, F. A new evaluation of loading cycles in an oedometer. *Geotechnique*. 1996, 46, pp 547-553.
- [2] Burland, J. B. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique*. 1990, 40 (3), pp 329-378.
- [3] Mitchell, J.K. *Fundamentals of soil behavior*, New York: John Wiley & Sons Inc. 1996.
- [4] Nagaraj, T.S., Srinivasa Murthy, B.R., Vasala, A. and Joshi, R.C. Analysis of compressibility of sensitive clays. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 1990, 116 (GT1), pp. 105-118.
- [5] Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. and Narasimha Raju, P. S. R. Compressibility behavior of soft cemented soil. *Geotechnique*. 1998, 48 (2), pp 281-287.
- [6] Nagaraj, T.S. and Miura, N. *Soft clay behavior: Analysis and assessment*. Balkema, Rotterdam, 2001, 315.
- [7] Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K. and Katkan, W. Assessment of engineering properties of Bangkok Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (2), pp. 173-187.
- [8] Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthy, B.R. A critical reappraisal of compression index equations. *Geotechnique*, 1986, 36 (1), pp. 27- 32.
- [9] Horpibulsuk, S., Yangsukkasem, N., Chinkulkijniwat, A. And Du, Y.J. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and Bentonite. *Journal of Applied Clay Science*, 2011c, 52, pp. 150-159.
- [10] Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. and Narasimha Raju, P. S. R. Stress state - Permeability relationships for fine-grained soil. *Geotechnique*, 1993, 43 (2), pp. 333-336.

- [11] Prakash, K. And Sridharan, A. Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soil. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 27(2), pp. 220–225.
- [12] ASTM International. *ASTM D 2435/D2435M-11-Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*, 2011.
- [13] Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S. Soft ground improvement in lowland and other environments, *ASCE*, New York. 1996.
- [14] Herzog, A. and Mitchell J. K. Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. *In Highway Research Record 36, HRB, National Research Council*, Washington, D.C., 1963, pp. 146-171.
- [15] Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S. Soft ground improvement in lowland and other environments, *ASCE*, New York, 1996.
- [16] Schaefer, V. R., Abramson, L. W., Drumheller, J. C., and Sharp, K. D. Ground improvement, ground reinforcement and ground treatment: Developments 1987 to 1997. *ASCE Geotech. Special Publication, GSP*, 1997, pp. 69.
- [17] Prusinski, J. R., and Bhattacharja, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, TRB*, National Research Council, Washington, D.C., 1999, No. 1652, pp. 215 – 227.
- [18] Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajoin, K. and Katkan, W. Assessment of engineering properties of Bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (2), pp. 173-187.
- [19] Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M. and Lee, F.H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2004, 130(7), pp. 696–706.
- [20] Wroth, C. and Wood, D. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soil. *Canadian Geotechnique Journal*, 1978, 15 (2), pp. 137-145.
- [21] Sharma, B. and Bora, P. Plastic limit liquid limit and undrained shear strength of soil-reappraisal. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental engineering*, 2003, 129 (8), pp. 774-777.
- [22] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. *เกณฑ์มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน*. กรุงเทพฯ ฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2542.

