



บทความวิจัย

## พฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวบวมตัวสูงปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปั้นใหม่

### Compression behavior of remolded cement-stabilized high swelling clay

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม<sup>1\*</sup> เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงค์<sup>2</sup> สุदारัตน์ ปิ่นะภา<sup>1</sup> จิระยุทธ สืบสุข<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

Narongdet Yangsukkasem<sup>1\*</sup> Cherdsak Suksiripattanapong<sup>2</sup> Sudarat Peenapa<sup>1</sup> Jirayut Suebsuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

\* Corresponding author.

E-mail: narongdet.ys@bru.ac.th; Telephone: 08 6871 6570

วันที่รับบทความ -30 มีนาคม 2564; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 21 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 9 มิถุนายน 2564

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติ และคุณสมบัติการยุบตัวของดินเหนียวบวมตัวสูงผสมซีเมนต์ปั้นใหม่ สำหรับวัสดุกันซึมดินเหนียวในพื้นที่ฝังกลบขยะ ดินเหนียวตัวอย่างเป็นดินเหนียวพลาสติกชนิดที่ 4 ซึ่งถูกนำมาผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 50 ของน้ำหนักดินแห้ง และนำมาปั้นใหม่หลังจากอายุบ่มครบ 28 วัน จากนั้นจึงนำมาทดสอบหาค่าดัชนีคุณสมบัติและการอัดตัวของดินเหนียวชนิดนี้ พบว่าปริมาณซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อดัชนีคุณสมบัติของดินตัวอย่าง ความถ่วงจำเพาะ อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ พิกัดเหลว และสภาพความเป็นพลาสติกของดินตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน อัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์ปั้นใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ( $A_w20\%$ ) จากนั้นอัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์ปั้นใหม่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์สูงขึ้น เนื่องจากผลึกเกลือที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความหนาของชั้นประจุกระจายตัวลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวของดินเหนียว และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของซีเมนต์ สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] ไม่เหมาะนำมาใช้กับดินเหนียวบวมตัวสูงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จากผลการทดสอบการอัดตัวของดินทั้งหมด บทความนี้ได้ปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ทั่วไปที่เหมาะสมกับดินเหนียวที่มีลักษณะการบวมตัวที่หลากหลาย ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการใช้ทำนายเส้นกราฟการอัดตัวของดินเหนียวทั่วไป และดินเหนียวผสมซีเมนต์ปั้นใหม่

#### คำสำคัญ

พฤติกรรมการอัดตัว การอัดตัวเนื้อแท้ ดินเหนียวปั้นใหม่ ดัชนีอัตราส่วนโพรง

#### Abstract

The article presents the effect of cement on the index and compression properties of remolded cement-stabilized high swelling clay for clay liner material in a waste landfill. The clay sample was high plasticity clay mixed with cement at a cement content of 10 % to 50 % by weight of dry soil. The cement-stabilized high swelling clay was remolded at a curing time of 28 days. Index properties and 1-D consolidation were investigated. Cement content affected on index properties of soil samples. Specific gravity, free swelling ratio, liquid limit, and plastic limit of the soil sample tended to decrease with an increase in cement content. The void ratio of remolded cement-stabilized high swelling clay increased

at particular vertical stress as the cement content increased until the optimum cement content ( $A_w20\%$ ). Then the void ratio of remolded cement-stabilized high swelling clay decreased as the cement content increased. This is because the products obtained from hydration and pozzolanic reactions increase resulted in a decrease in the thickness of the diffuse double layer. The coefficient of compressibility and permeability of the soil sample increased with an increase in cement content. This is because soil particles flocculate, resulting from hydration and pozzolanic reactions of cement. The coefficient of permeability proposed by Nagaraj et al. [8] was not suitable for both high swelling clay and cement-stabilized high 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 and remolded cement-stabilized clays.

## Keywords

compression behavior; intrinsic compression; remolded clay; void index

## 1. คำนำ

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย การใช้ซีเมนต์ปรับปรุงดินเหนียวอ่อนส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น และการยุบอัดตัวลดลงเนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งโครงสร้างของดินซีเมนต์เหล่านี้อาจเกิดความเสียหายจากปัจจัยต่าง ๆ จนสูญเสียความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) ทั้งนี้ดินซีเมนต์ที่สูญเสียความสามารถในการใช้งานหรือดินซีเมนต์เดิมดังกล่าวนับว่าเป็นวัสดุคุณภาพดีเนื่องจากดินได้ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้านการบวมตัว (Swelling) และหดตัว (Shrinkage) ในเบื้องต้นแล้ว แนวทางหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากดินซีเมนต์เดิมนี้ สามารถกระทำได้โดยการแปรสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในงานระบบฝังกลบขยะ (Landfill) อีกครั้ง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในสถานที่ก่อสร้างแล้ว ยังเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นการลดการนำเข้าสู่วัฏจักรจากธรรมชาติในอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกทาง การที่จะนำดินซีเมนต์ประเภทนี้กลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะเพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึม (liner) นั้น จำเป็นอย่างยิ่งต้องใช้ตัวแปร (Parameter) สำหรับประเมินการทรุดตัว และอัตราการซึมผ่านน้ำของดินจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งมักทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบดั้งเดิม (Conventional oedometer test) โดยวิธีการเพิ่มน้ำหนักกดทับและเปลี่ยนน้ำหนักครั้งต่อไปเมื่อเวลาผ่านไปทุก ๆ 24 ชั่วโมง โดยการ

ทดสอบในแต่ละครั้งต้องใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ 1 สัปดาห์จากข้อจำกัดในเรื่องของเวลาที่ยาวนานในการทดสอบ นักวิจัยหลายท่าน [1-6] จึงได้ศึกษาและพยายามสร้างความสัมพันธ์ทั่วไป (Normalization) ของการอัดตัวคายน้ำเพื่อลดความยุ่งยากและซับซ้อนในการประมาณค่าตัวแปรการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติปั้นใหม่ และพบว่าอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวสามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ทั่วไปการอัดตัวคายน้ำได้ เนื่องจากพิกัดเหลวเป็นคุณสมบัติเฉพาะของดินชนิดนั้น ๆ ที่สะท้อนผลเนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีที่มีอยู่ในดิน

Nagaraj และคณะ [7] 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  $\sigma'_v$  คือ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง

จากนั้น ในปี 1993 Nagaraj และคณะ [8] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดิน (Coefficient of permeability) และได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$  ดังสมการที่ 2

$$\frac{e}{e_L} = 2.162 + 0.195 \log k \quad (2)$$

โดยที่  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดิน

Burland [1] ได้ศึกษาลักษณะการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเช่นกัน และได้นำเสนอสมการทั่วไปการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติบั้นใหม่หรือเส้นการอัดตัวเนื้อแท้ (Intrinsic Compression Line, ICL) ดังสมการที่ 3

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

โดยที่  $I_v$  คือ ดัชนีอัตราส่วนโพรง (Void Index) ดังสมการที่ 4

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (4)$$

โดยที่  $e_{100}^*$  คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 100 kPa และ  $C_c^*$  คือดัชนีการอัดตัวเนื้อแท้ (Intrinsic Compression Index) โดย  $e_{100}^*$  และ  $C_c^*$  สามารถประมาณได้ด้วยการสร้างความสัมพันธ์กับ  $e_L$  ดังสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

$$e_{100}^* = 0.016e_L^3 - 0.089e_L^2 + 0.679e_L + 0.190 \quad (5)$$

$$C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^* = 0.256e_L - 0.04 \quad (6)$$

โดยที่  $e_{1000}^*$  คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 1000 kPa

Horpibulsuk และคณะ [9] ระบุว่าความสัมพันธ์ทั่วไปของ ISL และ ICL ที่เสนอโดย Burland [1] และ Nagaraj และคณะ [7] ใช้ทำนายได้แม่นยำเฉพาะดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวต่ำเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เองจึงได้ปรับปรุงดัชนีอัตราส่วนโพรงขึ้นมาใหม่ให้ครอบคลุมดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวที่หลากหลายขึ้น และได้นิยามชื่อใหม่ คือ ดัชนี

อัตราส่วนโพรงปรับปรุง (Modified Void Index,  $I_v'$ ) ดังสมการที่ 7

$$I_v' = \frac{e - e_{50}^*}{e_{50}^* - e_{1000}^*} \quad (7)$$

โดยที่  $e_{50}^*$  คือ อัตราส่วนโพรงเนื้อแท้ที่ความเค้นประสิทธิผล 50 kPa สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_v'$  และ  $\log \sigma_v'$  ดังสมการที่ 8

$$I_v' = 0.029 \log \sigma_v'^3 - 0.112 \log \sigma_v'^2 - 0.733 \log \sigma_v' + 1.427 \quad (8)$$

ในทำนองเดียวกันค่า  $e_{50}^*$  และ  $e_{50}^* - e_{1000}^*$  สามารถประมาณได้โดยสร้างความสัมพันธ์กับ  $e_L$  ดังสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ สมการดังกล่าวจะให้ความแม่นยำในช่วง  $e_L$  มีค่าระหว่าง 1.44 ถึง 3.45 เท่านั้น

$$e_{50}^* = 0.125e_L^3 - 0.727e_L^2 + 2.265e_L - 1.059 \quad (9)$$

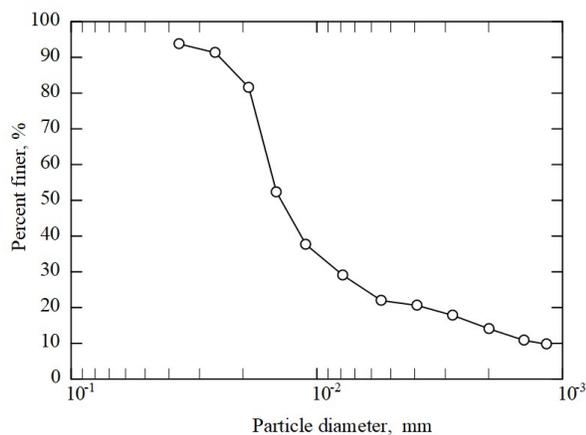
$$e_{50}^* - e_{1000}^* = 0.203e_L^3 - 1.185e_L^2 + 2.864e_L - 1.889 \quad (10)$$

ถึงแม้ว่า สมการจากการเทียบปรับ (Calibration) สำหรับใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ และสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านน้ำในอดีตที่ผ่านมาจะสร้างจากข้อมูลผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินที่หลากหลาย แต่ยังไม่มีการยืนยันได้ว่าสมการดังกล่าวจะนำมาใช้กับดินเหนียววมตัวสูงผสมซีเมนต์ในสถานะบั้นใหม่ได้ ด้วยเหตุนี้เอง บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติ และการยุบอัดตัวของดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากดินซีเมนต์เดิมด้วยการปรับใช้เป็นดินเหนียวกันซึมในระบบฝังกลบขยะอีกครั้ง โดยมุ่งเน้นเทียบปรับสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำและสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินเหนียวที่มีพฤติกรรมการบวมตัวที่หลากหลายยิ่งขึ้น หากความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลไม่เป็นไป

ตามหลักการหรือแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต บทความนี้จะนำเสนอสมการเทียบปรับดังกล่าวขึ้นมาใหม่ เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับประเมินคุณสมบัติการอัดตัวของน้ำของดินเหนียวววมตัวสูงปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปั้นใหม่ได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของดินตัวอย่าง



รูปที่ 2 กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน

## 2. วิธีการทดสอบ

ดินที่นำมาทดสอบในครั้งนี้เป็นดินเบนโทไนท์เกรดการค้า (Commercial grade) ภายใต้ชื่อทางการค้า “Mac-Gel” ของบริษัท Thai Nippon Chemical Industry เนื้อดินมีลักษณะเป็นดินเม็ดละเอียดสีแดงอมน้ำตาล ดังรูปที่ 1 ดินตัวอย่างประกอบด้วยอนุภาคดินตะกอน (Silt) 86 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคดินเหนียว (Clay) 14 เปอร์เซ็นต์ ดังกราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ดังรูปที่ 2 ตัวอย่างดินเหนียวดังกล่าวถูกนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภท 1 (ปูนอินทรีเพชร) ที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างถูกปรับให้มีค่าดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index,  $LI$ ) เท่ากับ 2.0 ก่อนผสมกับซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม (Cement content,  $A_w$ ) อยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 ของน้ำหนักดินแห้ง เมื่อผสมดินตัวอย่างกับซีเมนต์เข้ากันดีด้วยเครื่องกวนแล้วจึงเทลงในแบบหล่อและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มตามกำหนดจึงนำก้อนตัวอย่างมาทำการปั้นใหม่โดยการทำก้อนตัวอย่างให้แตกออกจนมีขนาดเล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วจึงนำเข้าเครื่องกวนตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลวเท่ากับ 1.0 [10] จากนั้นนำตัวอย่างที่ปั้นใหม่ของแต่ละส่วนผสมทดสอบหาดัชนีคุณสมบัติ ได้แก่ พิกัดอัตรเบอร์ก (Atterberg's limits) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity,  $G_s$ ) และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free Swell Ratio,  $FSR$ ) ทดสอบตามวิธีของ Prakash และ Sridharan [11] รวมทั้งทดสอบการอัดตัวของน้ำแบบหนึ่งมิติตามมาตรฐาน ASTM D 2435 [12] ดินตัวอย่างจัดเป็นดินเหนียวววมตัวสูง (High swelling clay) ตามวิธีการจำแนกดินของ Prakash และ Sridharan [11] และเป็นดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ตามการจำแนกดินในระบบเอกภาพ (USCS)

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 ดัชนีคุณสมบัติของดินเหนียวววมตัวสูงปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปั้นใหม่

คุณสมบัติพื้นฐานของดินทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ ดังตารางที่ 1 พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ และความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินซีเมนต์ปั้นใหม่มีค่าลดลงสวนทางกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ ซึ่งลดลงประมาณร้อยละ 83 ถึง 23 สำหรับปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 0 ถึง 50 ทั้งนี้การลดลงของค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระและความถ่วงจำเพาะของดินตัวอย่าง เนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแคลเซียมไอออนของดินซีเมนต์ และผลของปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับแร่อลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) ที่มีอยู่ในแผ่นของอนุภาคดินเหนียว (Clay platelet) [13-16] นอกจากนี้ ปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นยังส่งผลให้พิกัด

เหลวและดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index,  $PI$ ) มีแนวโน้มลดลง โดยพิกัดเหลวมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 45 ถึง 84 สำหรับปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 0 ถึง 50 ในทางตรงกันข้าม พิกัดพลาสติกกลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องกับการเพิ่มของปริมาณซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้เองอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลว ( $e_L$ ) จึงเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 1 จึงอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างของดินซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ดัชนีคุณสมบัติของดินเหนียวววมตัวสูงปรับปรุงด้วยซีเมนต์ป่นใหม่

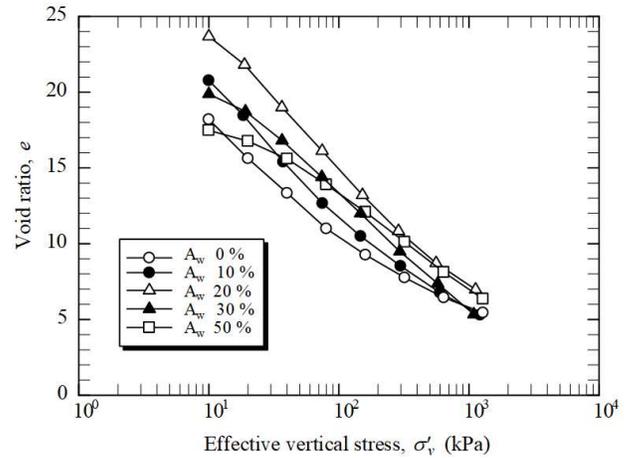
Sample	FSR	$G_s$	LL (%)	PL (%)	PI (%)	** $e_L$
* $A_w$ 0%	5.78	2.94	510	53	451	14.99
$A_w$ 10%	5.45	2.80	467	58	409	13.08
$A_w$ 20%	4.81	2.74	627	95	532	17.18
$A_w$ 30%	1.82	2.42	532	147	385	12.87
$A_w$ 50%	1.00	2.25	282	211	71	6.35

หมายเหตุ; \*  $A_w$  0% คือ ดินที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ และ \*\*  $e_L = (LL)(G_s)$

### 3.2 การยุบอัดตัวของดินเหนียวววมตัวสูงปรับปรุงด้วยซีเมนต์ป่นใหม่

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log \sigma'_v$  ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3 พบว่าภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากับอัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์ป่นใหม่มีค่าสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ เนื่องจากอนุภาคดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ [17] ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์สูงขึ้นตาม ตลอดจนการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนนี้ยังคงอยู่และไม่สลายไปแม้จะผ่านการป่นใหม่และให้พลังงานในการบดย่อยที่ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลวแล้วก็ตาม ด้วยเหตุนี้เอง ดินซีเมนต์ป่นใหม่จึงเสถียรอยู่ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงกว่าสภาวะเนื้อแท้ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบยังพบอีกว่า ภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากับอัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์ป่นใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ จนกระทั่งปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ( $A_w$  20%) จากนั้นจะมีค่าลดลงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ใน

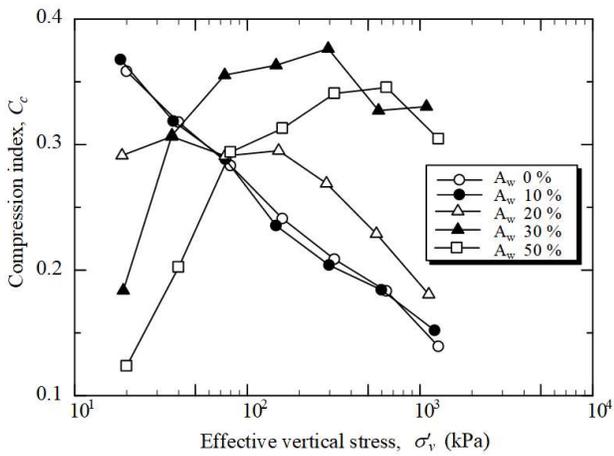
ส่วนผสม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอลิโซลานิกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความหนาของชั้นประจุกระจายตัวลดลง [18, 19]



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log \sigma'_v$

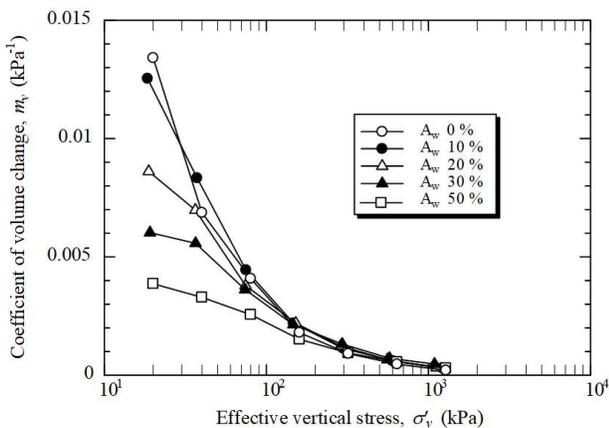
### 3.3 ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ ) สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ( $m_v$ ) สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ( $C_v$ ) และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดิน ( $k$ )

ในทำนองเดียวกัน เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  และ  $\log \sigma'_v$  ของดินตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4 พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าและเท่ากับร้อยละ 20 ดัชนีการอัดตัวของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับ ตรงกันข้ามกับดินที่มีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมตั้งแต่ร้อยละ 30 ดัชนีการอัดตัวของดินตัวอย่างกลับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามน้ำหนักกดทับที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเบนโทไนท์ถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นประจุกระจายตัว (Diffuse double layer) ดังนั้นเมื่อน้ำหนักกดทับมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงต้านการยุบอัดตัวเนื่องจากอิทธิพลของชั้นประจุกระจายตัวจากการถูกบีบอัดด้วยน้ำหนักกดทับ [20] ด้วยเหตุนี้เอง ในช่วงของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จนกระทั่งถึงปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ดัชนีการอัดตัวจึงมีค่าน้อยลงภายใต้ น้ำหนักกดทับที่มากขึ้น แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์มากกว่าปริมาณเหมาะสมความหนาของชั้นประจุกระจายตัวจะบางลงอย่างมาก จึงส่งผลให้ดัชนีการอัดตัวของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยตรงกับน้ำหนักที่กดทับที่มากขึ้นในที่สุด



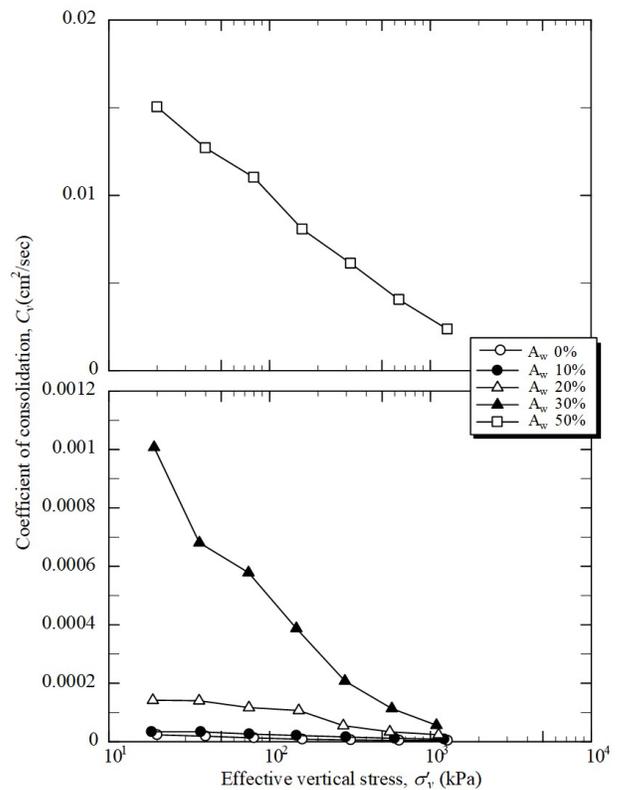
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  และ  $\log \sigma'_v$

อย่างไรก็ตาม เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $m_v$  และ  $\log \sigma'_v$  ของดินตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ พบว่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินตัวอย่างทั้งหมดมีค่าลดลงกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกกดทับ รวมทั้งภายใต้ น้ำหนักกกดทับที่เท่ากันสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงน้ำหนักกกดทับน้อย และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อน้ำหนักกกดทับสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งประมาณ 2 kPa ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงจาก  $0.0134 \text{ kPa}^{-1}$  เป็น  $0.0039 \text{ kPa}^{-1}$  ในช่วงของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จากร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 50 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $m_v$  และ  $\log \sigma'_v$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_c$  และ  $\log \sigma'_v$  ของดินตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างลดลงกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกกดทับสำหรับทุกอัตราส่วนผสม รวมทั้งภายใต้ น้ำหนักกกดทับเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดินตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดิน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก ส่งผลให้น้ำไหลผ่านช่องว่างภายในกลุ่มก้อนของดินได้สะดวกขึ้น ด้วยเหตุนี้เองสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำจึงมีค่าสูงขึ้น

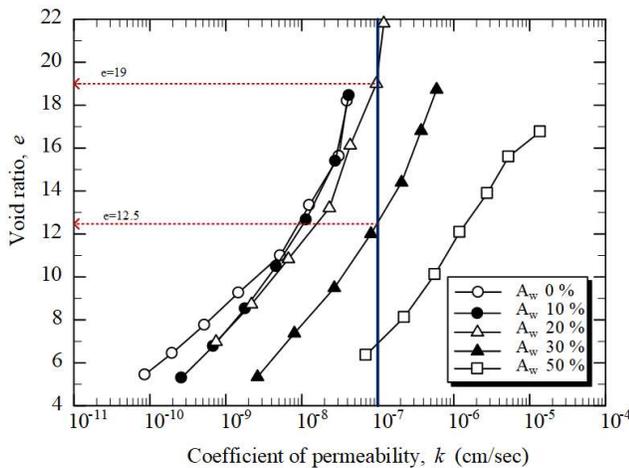


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_v$  และ  $\log \sigma'_v$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log k$  ของดินตัวอย่าง ดังรูปที่ 7 พบว่าภายใต้ อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น เช่น ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 14 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $1.257 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$  เป็น  $2.768 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  ในช่วงของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จากร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 50 สาเหตุการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำนั้น เป็นผลมาจากการลดลงของความ

หนาชั้นประจุกระจายตัวจากอิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก ส่งผลให้ความที่บน้ำของดินลดน้อยลง ด้วยเหตุนี้เองสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำจึงมีค่าสูงขึ้นโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม จากกราฟยังพบอีกว่าความสัมพันธ์  $e$  และ  $\log k$  ของตัวอย่างดินที่ปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าร้อยละ 20 มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์อาจเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไม่มาก จึงส่งผลให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการนำดินเหนียวบวมตัวสูงทั้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 30 ไปประยุกต์ใช้ใหม่เป็นวัสดุก่อสร้างดินเหนียวกันซึมของระบบฝังกลบขยะแบบถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) อันได้แก่ ชั้นดินคันทาง (Embankment) ชั้นดินเหนียวกันซึม (Clay liner) และชั้นดินเหนียวกันซึมสำหรับฝังกลบ ทั้งนี้จำเป็นต้องอย่างยิ่งต้องควบคุมกระบวนการบดอัดดินในระหว่างก่อสร้างให้ได้อัตราส่วนโพรงไม่เกิน 19 สำหรับดินที่ผสมซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 และอัตราส่วนโพรงไม่เกิน 12.5 สำหรับดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 30 เพื่อให้สัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านน้ำของดินผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไม่เกิน  $10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที [21] ดังรูปที่ 7

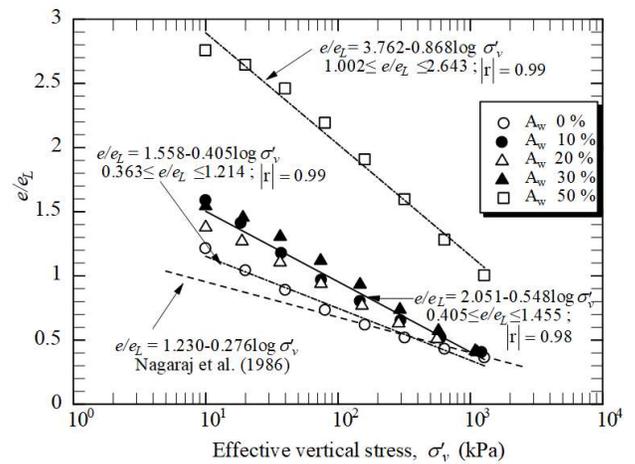


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log k$

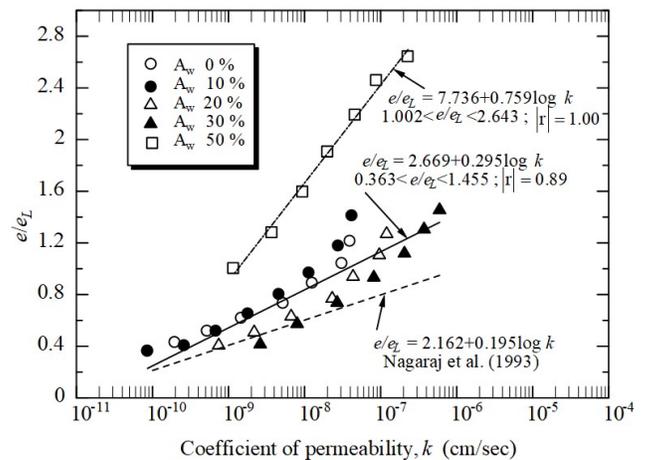
### 3.4 เส้นสถานะเนื้อแท้ (ISL) และความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง $e/e_L$ และ $\log k$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log \sigma'_v$  ของดินตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 8 พบว่าข้อมูลผลการทดสอบ

ของดินทั้งหมดอยู่เหนือกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [7] จึงอาจกล่าวได้ว่าสมการเส้นสถานะเนื้อแท้ของ Nagaraj และคณะ [7] ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำของดินบวมตัวสูงที่ผสมซีเมนต์และไม่ผสมซีเมนต์ในสภาวะปั้นใหม่ เนื่องจากดินดังกล่าวมีอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Horpibulsuk และคณะ [9] ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$  ของดินตัวอย่างของทุกอัตราส่วนผสมอยู่เหนือกราฟจากการทำนายด้วยสมการที่เสนอโดย Nagaraj และคณะ [8] ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log \sigma'_v$



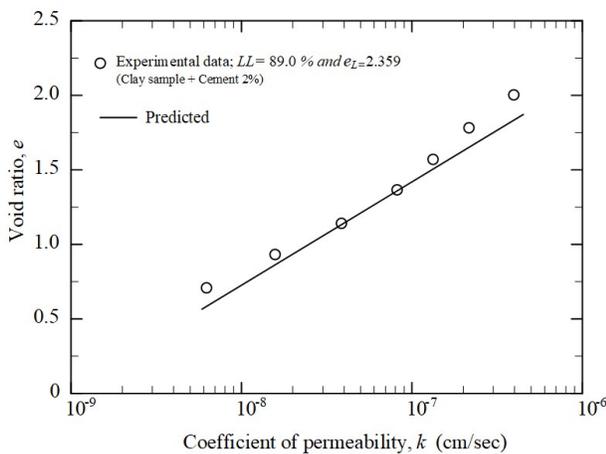
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$

จากรูปที่ 9 ได้ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$  ของดินที่ผสมซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 30 ดังสมการที่ 11

$$\frac{e}{e_L} = 2.669 + 0.295 \log k \quad (11)$$

สำหรับช่วง  $0.363 \leq e/e_L \leq 1.455; |r| = 0.89$

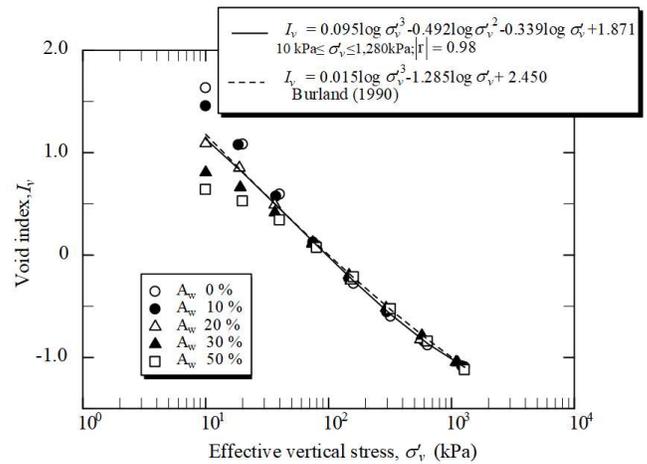
เมื่อนำสมการที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ไปทำนายผลจากการวัดจริงของดินเหนียวที่เก็บจากบ่ออิมภายในเขตอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ และผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ร้อยละ 2 แล้ว ซึ่งดินซีเมนต์ดังกล่าวมีค่าพิกิตเหลวเท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนโพรงที่พิกิตเหลวเท่ากับ 2.359 พบว่า สมการดังกล่าวสามารถทำนายกราฟความสัมพันธ์ได้ใกล้เคียงกับผลจากการวัดจริงอย่างมาก ดังรูปที่ 10 จึงอาจกล่าวได้ว่า สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$  ที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่นี้ มีประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการประมาณค่าอัตราส่วนโพรงที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานดินเหนียวชั้นกั้นซึมของระบบฝังกลบขยะแบบถูกหลักสุขาภิบาล ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวกับดินเหนียวผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนของซีเมนต์ที่หลากหลายระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวจะให้ความแม่นยำในช่วงของอัตราส่วนโพรงที่พิกิตเหลวอยู่ระหว่าง 12.87 ถึง 17.18 เท่านั้น



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  และ  $\log k$  จากการทำนายและการวัดจริง

### 3.5 เส้นการอัดตัวเนื้อแท้ (ICL)

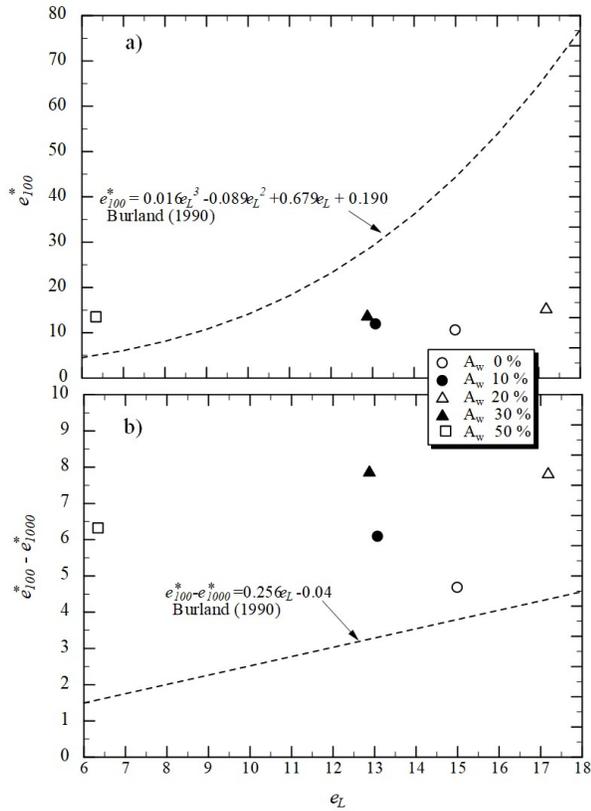
ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_v$  และ  $\log \sigma'_v$  ของดินตัวอย่างและเปรียบเทียบข้อมูลกับสมการที่นำเสนอโดย Burland [1] ดังรูปที่ 11 พบว่าสมการที่เสนอโดย Burland [1] สามารถทำนายผลการทดสอบได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินทั้งหมดอย่างมาก ดังรูปที่ 11 อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่าง  $e_L$  กับ  $e_{100}^*$  และ  $e_{100}^* - e_{1000}^*$  ของดินตัวอย่างมีแนวโน้มไม่ใกล้เคียงกับกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการของ Burland [1] ดังรูปที่ 12



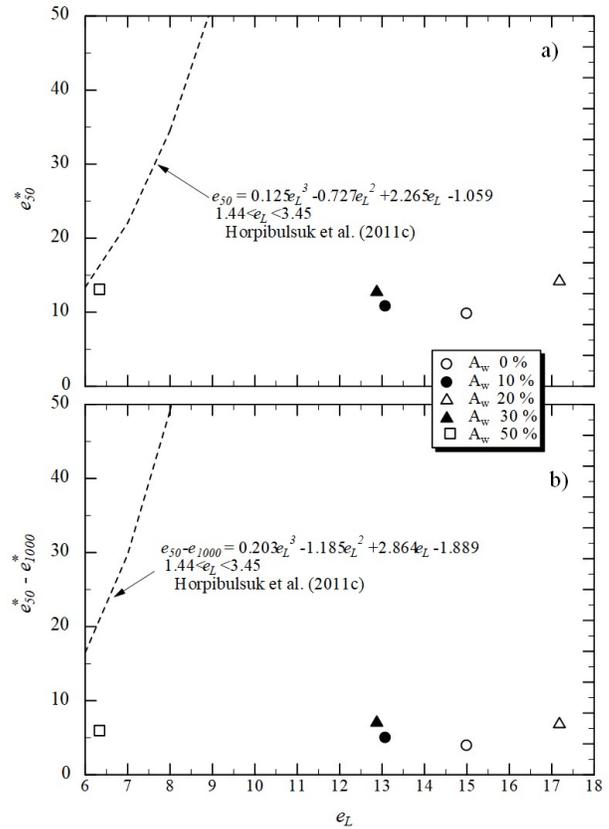
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $I_v$  และ  $\log \sigma'_v$

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับสมการที่นำเสนอโดย Horpibulsuk และคณะ [9] พบว่าผลการทดสอบของดินตัวอย่างของทุกอัตราส่วนผสมอยู่เหนือและไม่ใกล้เคียงกับเส้นกราฟจากการทำนายด้วยสมการของ Horpibulsuk และคณะ [9] ดังรูปที่ 13 และ 14

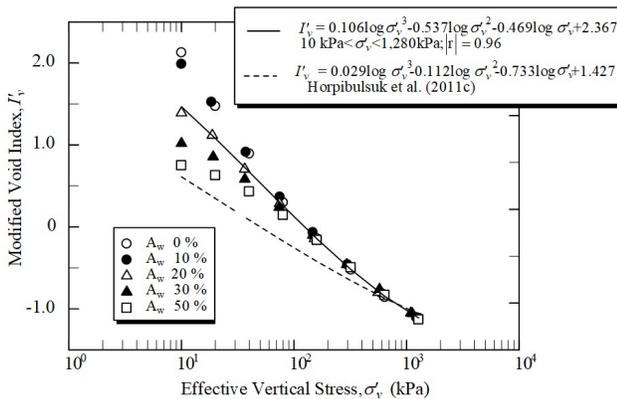
จากปัญหาข้างต้น บทความนี้พยายามสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $e_L$  กับ  $e_{100}^*$  และ  $e_{100}^* - e_{1000}^*$  ขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะกับดินที่มีอัตราส่วนโพรงที่พิกิตเหลวที่หลากหลายยิ่งขึ้น โดยการปรับปรุงสมการที่เสนอโดย Burland [1] ด้วยข้อมูลจากผลการทดสอบของดินไม่ผสมซีเมนต์ ร่วมกับดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 รวมทั้งข้อมูลจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ดังตารางที่ 2 ได้ ดังรูปที่ 15 และสมการที่เทียบปรับขึ้นมาใหม่ ดังสมการที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 a) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{100}^*$  และ  $e_L$  b) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{100}^* - e_{1000}^*$  และ  $e_L$



รูปที่ 14 a) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{50}^*$  และ  $e_L$  b) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{50}^* - e_{1000}^*$  และ  $e_L$



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $I'_v$  และ  $\log \sigma'_v$

$$e_{100}^* = -0.0009e_L^3 + 0.0387e_L^2 + 0.4394e_L + 0.2198 \quad (12)$$

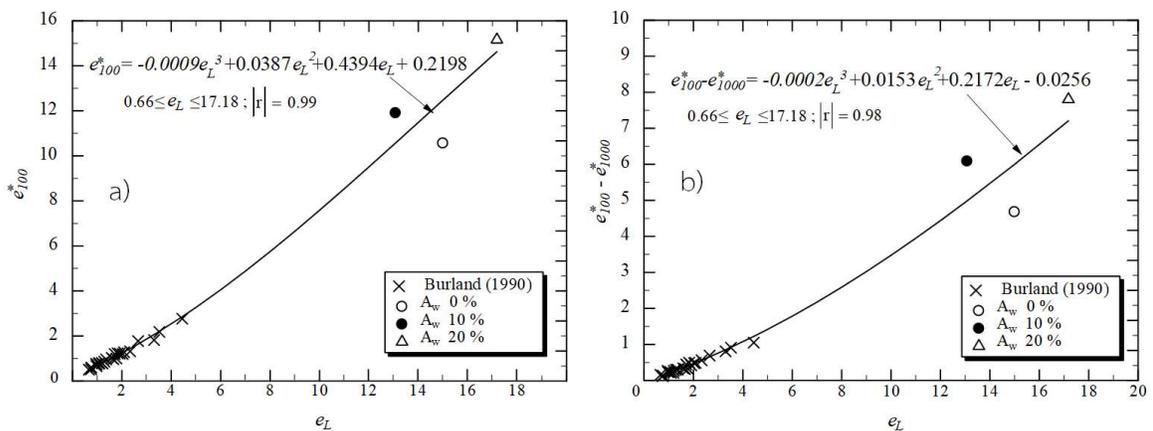
$$e_{100}^* - e_{1000}^* = -0.0002e_L^3 + 0.0153e_L^2 + 0.2172e_L - 0.0256 \quad (13)$$

สำหรับช่วง  $0.66 \leq e_L \leq 17.18$ ;  $|r| = 0.98$

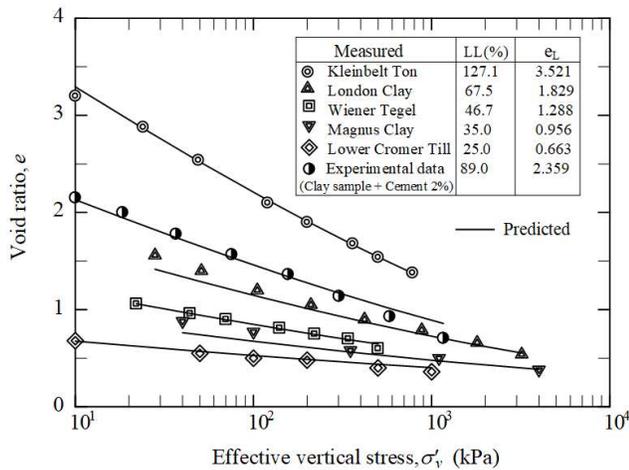
ในการทำงานเดียวกัน เมื่อนำสมการดัชนีอัตราส่วนโพรงที่เสนอโดย Burland [1] ร่วมกับสมการ 12 และ 13 ไปทำนายการอัดตัวคายนํ้าจากการวัดจริงของดิน Kleinbelt Ton, London Clay, Wiener Tegel, Magnus Clay, Lower Cromer Till [1] และดินเหนียวที่เกิดจากบ่อเี่ยมภายในจังหวัดบุรีรัมย์ผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวต่างกันตั้งแต่ 0.663 ถึง 3.521 พบว่าสมการดังกล่าวสามารถทำนายกราฟการอัดตัวคายนํ้าได้ใกล้เคียงกับผลจากการวัดจริงเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่า สมการทำนายกราฟการอัดตัวคายนํ้าที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่นี้มีประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประมาณค่าดัชนีการอัดตัวจากกราฟการอัดตัวคายนํ้าที่ทำนายได้ สำหรับการประมาณการทรุดตัว เพื่อประเมินความหนาของดินเหนียวชั้นกันซึมของระบบฝังกลบขยะแบบถูกหลักสุขาภิบาลจากนํ้าหนักกดทับของวัสดุที่อยู่ด้านบนของชั้นกันซึม ที่กำหนดเกณฑ์ชั้นนํ้าต่ำไว้น้อยกว่า 0.60 เมตร [21]

ตารางที่ 2 ข้อมูลจากการวัดจริงของงานวิจัยในอดีต [1]

Soil	LL, %	PL, %	$G_s$	$e_L$	$e_{100}^*$	$C_c^*$	Reference
Lower Cromer Till	25	13	2.65	0.663	0.503	0.154	Gens (1982)
Boulder clay	28	14	2.69	0.753	0.52	0.12	Skempton (1944)
Silty clay	28	20	2.72	0.762	0.603	0.136	Ramiah (1959)
Magnus Clay	35	17.2	2.73	0.956	0.76	0.27	Jardine (1985)
Grangemouth	35	21	2.78	0.973	0.659	0.229	Burland (1990)
Ton V	36	18	2.71	0.976	0.74	0.25	Skempton (1944)
Weald clay	39	19	2.73	1.065	0.77	0.24	Skempton (1944)
Boston blue clay	39	23	2.78	1.084	0.80	0.21	Skempton (1944)
Red soil	45.3	22	2.667	1.208	0.785	0.27	Nagaraj et al.(1986)
River Severn alluvium	46	25	2.59	1.191	0.80	0.21	Skempton (1944)
Wiener Tegel	46.7	22	2.76	1.288	0.859	0.297	Hvorslev (1937)
Oxford clay	53	27	2.57	1.362	0.96	0.30	Skempton (1944)
Ton IV	58	26	2.85	1.653	0.97	0.32	Skempton (1944)
Residual clay	58	27	2.74	1.589	1.024	0.337	Ramiah (1959)
London Clay	62.3	24.3	2.73	1.707	1.200	0.446	Jardine (1985)
Belfast estuarine clay	67	30	2.66	1.782	1.00	0.32	Skempton (1944)
London Clay	67.5	26.5	2.71	1.829	1.227	0.494	Som (1968)
Ganges delta clay	69	28	2.77	1.911	1.22	0.42	Skempton (1944)
Gosport clay	76	29	2.67	2.029	1.20	0.48	Skempton (1944)
Argile plastique	128	31	2.58	3.302	1.82	0.81	Skempton (1944)
Whangamarino clay	136	61	2.78	3.74	2.44	0.797	Newland & Allely (1956)
Sail	159	46	2.826	4.443	2.769	1.05	Nagaraj และคณะ(1986)



รูปที่ 15 a) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{100}^*$  และ  $e_L$ , b) ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $e_{100}^* - e_{1000}^*$  และ  $e_L$



รูปที่ 16 เปรียบเทียบการอัดตัวคายน้ำจากการทำนายและการวัดจริง

#### 4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของซีเมนต์ต่อดัชนีคุณสมบัติและคุณสมบัติการยุบตัวของดินเหนียวบวมตัวสูงในสภาวะปั้นใหม่ สำหรับชั้นวัสดุกันซึมดินเหนียวในพื้นที่ฝังกลบขยะสามารถสรุปประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) เมื่อปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนการบวมตัวอิสระและความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลง ส่วนทางกับพิกัดพลาสติกที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตลอดจนพิกัดเหลวมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นส่งผลต่อสภาพความเป็นพลาสติก และอัตราส่วนโพรงที่พิกัดเหลวมเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานิกของดินซีเมนต์

2) สมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ และสมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนทางกับสมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงที่มีค่าลดลงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ นอกจากนี้ ดัชนีการอัดตัวมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักกดทับ สำหรับดินผสมซีเมนต์น้อยกว่าและเท่ากับปริมาณซีเมนต์เหมาะสมซึ่งตรงกันข้ามกับดินที่ผสมซีเมนต์มากกว่าปริมาณเหมาะสม รวมทั้ง ภายใต้น้ำหนักกดทับที่เท่ากัน อัตราส่วนโพรงของดินซีเมนต์ปั้นใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่กระทั่งถึงปริมาณซีเมนต์เหมาะสม

3) กราฟการอัดตัวคายน้ำและสมประสิทธิ์ความซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินซีเมนต์ปั้นใหม่สามารถทำนายโดยใช้สมการดัชนีอัตราส่วนโพรง ( $I_p$ ) ของ

Burland [1] ร่วมกับสมการทำนาย  $e_{100}^*$  และ  $e_{100}^* - e_{1000}^*$  เทียบกับ  $e_L$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $e/e_L$  และ  $\log k$  ที่เทียบปรับขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับประเมินการทรุดตัวและความซึมผ่านน้ำของดินเหนียวชั้นกันซึมในระบบฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกสุขาภิบาล

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Burland JB. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique*. 1990; 40(3): 329-378.ข
- [2] Mitchell JK. *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Willey & Sons Inc.; 1996.
- [3] Nagaraj TS, Murthy BRS, Vasala A, Joshi RC. Analysis of compressibility of sensitive clays. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 1990; 116(GT1): 105-118.
- [4] Nagaraj TS, Pandian NS, Raju PSRN. Compressibility behavior of soft cemented soil. *Geotechnique*. 1998; 48(2): 281-287.
- [5] Nagaraj TS, Miura N. *Soft Clay Behavior: Analysis and Assessment*. Balkema, Rotterdam. 2001; 315.
- [6] Horpibulsuk S, Shibuya S, Fuenkajorn K, Katkan W. Assessment of engineering properties of Bangkok Clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 2007; 44(2): 173-187.
- [7] Nagaraj TS, Srinivasa Murthy BR. A critical reappraisal of compression index equations. *Geotechnique*. 1986; 36(1): 27-32.
- [8] Nagaraj TS, Pandian NS, Raju PSRN. Stress state - permeability relationships for fine-grained soil. *Geotechnique*. 1993; 43(2): 333-336.
- [9] Horpibulsuk S, Yangsukkasem N, Chinkulkijniwat A, Du YJ. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with

- kaolinite and Bentonite. *Journal of Applied Clay Science*. 2011c; 52: 150–159.
- [10] Butterfield R, Baligh F. A new evaluation of loading cycles in an oedometer. *Geotechnique*. 1996; 46: 547-553.
- [11] Prakash K, Sridharan A. Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soil. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*. 2004; 27 (2): 220-225.
- [12] ASTM International. *ASTM D D2435/D2435M-11-Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. 2011.
- [13] Herzog A, Mitchell JK. Reactions accompanying stabilization of clay with cement. *Highway Research Record 36, HRB*. National Research Council, Washington, D.C. 1963; 146-171.
- [14] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*. ASCE, New York. 1996.
- [15] Schaefer VR, Abramson LW, Drumheller JC, Sharp KD. *Ground improvement, ground reinforcement and ground treatment: Developments 1987 to 1997*. ASCE Geotech. Special Publication. 1997; 69.
- [16] Prusinski, JR, Bhattacharja S. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, TRB*. National Research Council, Washington D. C. 1999; No. 1652; 215–227.
- [17] Chew SH, Kamruzzaman AHM, Lee FH. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 2004; 130(7): 696–706.
- [18] Sridharan A, Rao SM, Murthy NS. Compressibility behavior of homoionized bentonites. *Geotechnique*. 1986a; 36(4): 551-564.
- [19] Sridharan A, Rao SM, Murthy NS. Liquid limit of montmorillonite soils. *Geotechnical Testing Journal AST*. 1986b; 9(3): 156-159.
- [20] Sridharan A, Murthy NS, Prakash K. Rectangular hyperbola method for consolidation analysis. *Geotechnique*. 1987; 37(3): 355-368.
- [21] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. *เกณฑ์มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน*. กรุงเทพฯ ฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว; 2542.