

ผลกระทบของน้ำเกลือต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ ของดินเหนียวปั้นใหม่

Effect of Saline Water on Consolidation Behavior of Reconstituted Clay

Received : September 14, 2023

Revised : November 9, 2023

Accepted : November 10, 2023

อนิรุทธิ์ สุขแสน, วศ.ม. (Aniroot Suksan, M.Eng)^{1*}

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: ศึกษาผลกระทบของน้ำเกลือที่มีต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

วิธีการวิจัย: สารละลายน้ำเกลือที่มีส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำกลั่น ใช้สำหรับเป็นของเหลวรูพรอง (Pore-Fluid) กำหนดให้มีความเข้มข้นเท่าของน้ำเกลือเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 โมล ดินเหนียวถูกนำมาปั้นใหม่โดยผสมกับสารละลายเกลือตามความเข้มข้นที่กำหนด การทดสอบหาค่าพิกัดอัตราเบอร์กและการทดสอบการอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติใช้เพื่อประเมินผลกระทบของน้ำเกลือและความเข้มข้น ความชื้นเริ่มต้นสำหรับทดสอบการอัดตัวคายน้ำมีค่าประมาณ 1.5-2 เท่าของความชื้นที่ขีดจำกัดเหลว

ผลการวิจัย: ผลการทดสอบพบว่าขีดจำกัดเหลวของดินมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำเกลือมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ขีดจำกัดพลาสติกมีค่าคงที่ ดินเหนียวที่ใช้ น้ำเกลือเป็นของเหลวรูพรองมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (C_c) สูงขึ้นกว่าดินเหนียวที่ใช้ น้ำกลั่นเป็นของเหลวรูพรอง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลเป็นเส้นตรง ดัชนีการอัดตัวคายน้ำ (C_c) ของดินเหนียวมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นน้ำเกลือ นอกจากนี้ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นน้ำเกลือ การ Normalization ด้วยอัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลวพบ ว่าดินเหนียวที่มีน้ำเกลือเป็นของเหลวรูพรองมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่เป็นเอกลักษณ์ทุกความเข้มข้นน้ำเกลือ

คำสำคัญ: การอัดตัวคายน้ำ, ดินเหนียวปั้นใหม่, น้ำเกลือ, สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

¹อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา

(Lecturer at Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima, Province)

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding author)

Email: Aniroot_suk@vu.ac.th

Abstract

Objective: This study presents the evaluation of the effect of saline concentration on the consolidation behavior of reconstituted clay in Nakhon Ratchasima Province.

Methods: The saline water was the sodium chloride (NaCl) solution at 0.5, 1.0, and 1.5 M, used as pore fluid. The clay was reconstituted by mixing with distilled water and saline water at the anticipated concentrations. The 1-D consolidation test and soil consistency limit were performed to evaluate the effect of saline water. The initial water content for consolidation samples was desired at 1.5-2.0 times their liquid limit.

Results: The result showed that the increase in the concentration of saline water caused the decrease of liquid limit while the concentration of saline water had a marginal effect on the plastic limit. The coefficient of consolidation (C_v) increased when saline water was as pore fluid. The linear relationship was found in the void ratio versus the logarithm of effective vertical stress. The compression index (C_c) decreased with increasing saline water concentration. The permeability increases with the increased concentration of saline water compared to the same void ratios. The normalization by the void ratio at the liquid limit indicated that all clay with saline water as a pore fluid fit a unique permeability relationship

Keywords: Consolidation, Reconstituted Clay, Saline Water, Coefficient of Permeability

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวเป็นข้อมูลที่สำคัญที่วิศวกรให้ความสำคัญเนื่องจากสัมพันธ์กับการซึมผ่านของดินเม็ดละเอียดมีค่าน้อย ทันทึที่มีความเค้นภายนอกกระทำต่อมวลดินจะก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ที่มีความดันสูงกว่าความดันน้ำสถิต (Hydrostatic Pressure) ซึ่งความดันน้ำส่วนเกินนี้จะต้องใช้ระยะเวลาในการระบายออกเพื่อให้เกิดภาวะสมดุลในโครงสร้างดิน ขณะที่ความดันน้ำส่วนเกินที่อยู่ในรูพรองของดินระบายออกทำให้เกิดการทรุดตัว ระยะเวลาการทรุดตัวดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นหรืออาจเกิดขึ้นในระยะเวลาหลายปีขึ้นอยู่กับ

ระดับความเค้นและคุณสมบัติของดิน การทำนายการทรุดและระยะเวลาทรุดตัวของดินเหนียวสามารถประเมินโดยการทดสอบอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวในห้องปฏิบัติการ

อย่างไรก็ตามเนื่องจากระยะเวลาในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำเป็นการทดสอบที่ต้องใช้เวลานาน นักวิจัยในอดีตได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานของดินเม็ดละเอียดและคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำ การศึกษาในอดีตจำนวนมากได้นำเสนอสมการทำนายพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำโดยอาศัยเพียงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว เช่น ชีตจำกัดเหลว ชีตจำกัดพลาสติก ชีตจำกัดหดตัว หรือดัชนีความเป็นพลาสติก เป็นต้น (Jayalekshmi & Elamathi, 2020)

การศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าในอดีตยังมีการพิจารณาถึงผลกระทบของปฏิกิริยาร่วมทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical Interaction) เนื่องจากเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอออนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยยะกับระยะห่างระหว่างโครงสร้างดินเหนียว (Mitchell, 1993) ผลกระทบของชนิดของเหลวและระดับความเข้มข้นของเหลวในรูพรongที่หลากหลายชนิดได้ถูกนำเสนอโดยงานศึกษาในอดีต

Ajmera and Tiwari (2012) นำเสนอผลการทดสอบการอัดตัวคายนํ้า 1 มิติสำหรับดิน 39 ชนิด โดยมีนํ้ากลั่นและนํ้าเกลือความเข้มข้น 0.5 โมล เป็นของเหลวรูพรong ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดัชนีการอัดตัวลดลง 10 % เมื่อใช้นํ้าเกลือของเหลวรูพรongสำหรับดินเหนียวที่มีส่วนประกอบหลักเป็นอิลไลต์และเคโอลิไนต์ ในขณะที่เดียวกันดินที่มีส่วนประกอบหลักเป็นมอนโมลิโอไนต์ นํ้าเกลือทำให้ดัชนีการอัดตัวลดลงสูงถึง 77 % นอกจากนี้ จะพบว่าการทำนายดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวที่ใช้นํ้าเกลือเป็นของเหลวรูพรongโดยใช้ขีดจำกัดเหลวให้ผลที่ดีกว่าการใช้คุณสมบัติพื้นฐานอื่นในการทำนาย

Di Maio et al. (2004) ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นและชนิดของส่วนประกอบของเหลวรูพรongสำหรับดินเหนียว 4 ชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเหลวรูพรongทำให้การอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวลดลง ผลการศึกษาที่คล้ายกันนี้ถูกนำเสนอโดย Dafalla (2021) ซึ่งได้ทำการศึกษาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1.5 โมล ที่มีต่อพฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าของดินทรายปนดินเหนียว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการทรุดตัวมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มีค่า

เพิ่มขึ้น ในขณะที่การทรุดตัวของตัวอย่างที่ทดสอบกับโซเดียมคลอไรด์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการอัดตัวของทั้งสองตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเทียบผลการทดสอบจากตัวอย่างที่ใช้นํ้ากลั่นในการทดลอง

จังหวัดนครราชสีมาตั้งอยู่ที่พื้นที่ทางธรณีวิทยาที่เรียกว่าแอ่งโคราช (Korat Basin) มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ ในพื้นที่ของแอ่งโคราชมียุคหินมหาสารคาม (Maha sarakham Formation) ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มหินเกลือ (Rock Salt) อันเป็นสาเหตุหลักทำให้นํ้าใต้ดินมีการปนเปื้อนของเกลือซึ่งในอดีตมีการทำอุตสาหกรรมเกลือในพื้นที่แอ่งโคราชอย่างกว้างขวาง (อัมพรศักดิ์ วรรณโกมล & บัญญัติ ธีระกุลสถิต, 2018) แผนที่การกระจายตัวดินเค็มในจังหวัดนครราชสีมาได้ถูกนำเสนอโดย Shrestha et al. (2021) ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของดินเค็ม (Salinity Soil) ในพื้นที่ตอนบนของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมาซึ่งเป็นเขตพื้นที่ที่พบการกระจายตัวของดินเค็มสูงบริเวณศึกษาดังกล่าวครอบคลุมพื้นที่ 769 ตารางกิโลเมตร ประกอบไปด้วยพื้นที่บางส่วนของอำเภอเมืองนครราชสีมา อำเภอด่านขุนทด อำเภอพระทองคำ อำเภอโนนไทย และอำเภอขามทะเลสอ

การกระจายตัวของชั้นเกลือที่อยู่ทั่วบริเวณพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาและผลกระทบของชนิดและความเข้มข้นของเหลวรูพรongต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวที่เสนอโดยงานวิจัยในอดีตดังที่กล่าวไปข้างต้นจึงเป็นเหตุผลให้เกิดการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากอิทธิพลของนํ้าเกลืออาจส่งผลให้ดินในพื้นที่และโดยเฉพาะอย่างยิ่งดินจากพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่ถูกไปใช้เป็นวัสดุดินถมมีพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าที่อาจแตกต่างออกไปดินเหนียวที่ไม่มีการ

ปนเปื้อนของน้ำเกลือ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็น การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นน้ำเกลือต่อ คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมการอัดตัวของ ดินเหนียวที่มีพลาสติกต่ำที่ได้จากเขตพื้นที่ จังหวัดนครราชสีมา เพื่อขยายความรู้ความเข้าใจ ในพฤติกรรมอัดตัวของดินเหนียวมากยิ่งขึ้น อันจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นให้แก่วิศวกรได้นำไป พิจารณาออกแบบที่มีความเชื่อมั่นมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำเกลือและ ความเข้มข้นต่อพฤติกรรมการอัดตัวของดิน เหนียวปั้นใหม่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

3. ขอบเขตการวิจัย

ดินเหนียวในงานวิจัยนี้เป็นดินที่ได้จาก อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา โดยมีความ ถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 มีปริมาณความชื้นที่พิกัด เหลว พิกัดพลาสติกและดัชนีพลาสติกเท่ากับ 50 %, 20 % และ 30 % ตามลำดับ มีส่วนประกอบของ ส่วนละเอียดเท่ากับ 84 % และทรายเท่ากับ 16 % เมื่อจำแนกดินเหนียวด้วยระบบเอกภพ (Unified Soil Classification System, USCS) พบว่าเป็น ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Clay with Low Plasticity, CL) น้ำเกลือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีความ เข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 โมล

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ดินเหนียวที่ได้จากบ่อยืมจะถูกนำมาอบแห้ง จากนั้นจะถูกย่อยขนาดให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้ ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 40 (ขนาดรูเปิด 0.40 มม.) เพื่อคัดขนาดเม็ดดินที่ใหญ่กว่าตะแกรงออก ดินเหนียวจะถูกนำมาผสมน้ำเกลือที่ความเข้มข้น ตามที่กำหนดไว้ผสมจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว และ นำไปทดสอบพิกัดอัตราเพอร์กตามมาตรฐาน ASTM D4318 การทดสอบอัดตัวของน้ำจะทำการ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2435 ตัวอย่างดิน เหนียวจะถูกอบด้วยเตาอบที่ให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และทุบด้วยค้อนยางเพื่อให้มีขนาด เล็กลง จากนั้นคัดขนาดดินด้วยตะแกรงเบอร์ 40 เช่นเดียวกับวิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบ พิกัดอัตราเพอร์ก ดินเหนียวที่ร้อนผ่านตะแกรงจะ นำไปผสมด้วยน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นและปริมาณ ตามที่กำหนดไว้เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 3 วัน เพื่อให้ น้ำเกลือและดินเหนียวผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่าง ทัวถึง ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีค่าเป็นประมาณ 2 เท่าของความชื้นที่ขีดจำกัดเหลว และปริมาณดิน เหนียวแห้งสำหรับการทดสอบมีน้ำหนักประมาณ 60-70 กรัม จากนั้นส่วนผสมดินเหนียวและน้ำเกลือ จะนำมาเทใส่วงแหวนอัดตัวคาน้ำประเภทจำกัด การเคลื่อนที่ (Fixed Ring) ที่มีความสูงเท่ากับ 20 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 75 มม. ด้านบน และล่างของวงแหวนอัดตัวคาน้ำถูกประกบด้วย หินพรุน เพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของน้ำเกลือลดลง ขณะทดสอบ น้ำเกลือรอบข้างวงแหวนอัดตัวคาน้ำ จะมีความเข้มข้นเท่ากับของเหลวในตัวอย่าง ความเค้นในแนวตั้งเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 กิโลปาสกาล เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างได้สิ้นสุด กระบวนการอัดตัวคาน้ำขั้นแรก (Primary Consolidation)

ระยะเวลาทดสอบดินตัวอย่างไม่น้อยกว่า 24 ชม. ต่อหนึ่งค่าความเค้น และความเค้นกดทับค่าต่อมา จะมีค่าเป็นสองเท่าของความเค้นในแนวดิ่งก่อนหน้านี้ ความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งที่ใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งจะใช้ 6-7 ค่า

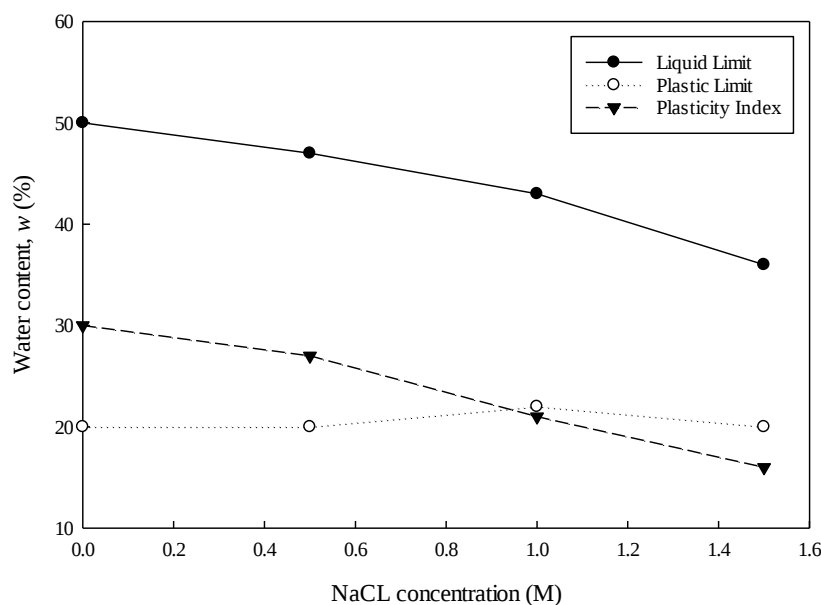
5. ผลการทดสอบ

5.1. ผลของความเข้มข้นน้ำเกลือต่อ พิกัดอัตราเทอร์เบอร์ก

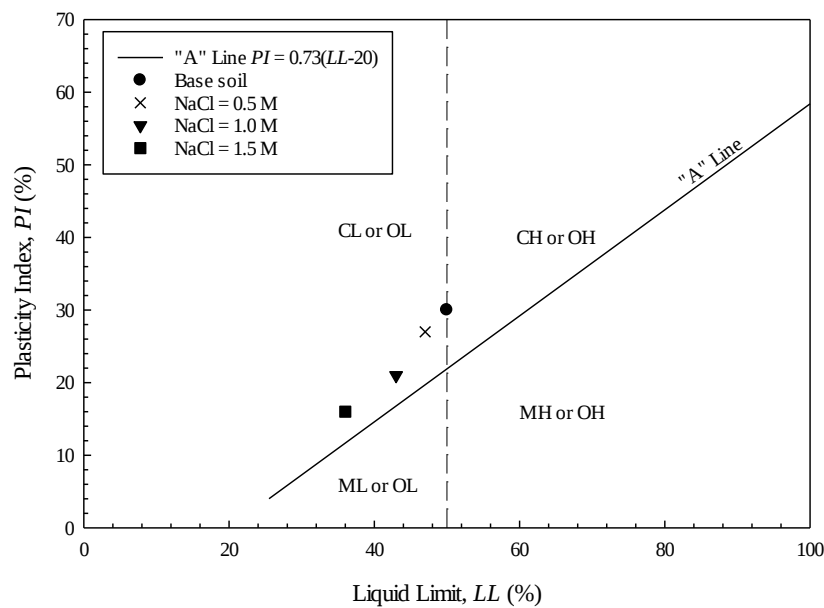
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเกลือที่มีต่อพิกัดอัตราเทอร์เบอร์กดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปพบว่าเมื่อน้ำเกลือมีความเข้มข้นมากขึ้น พิกัดเหลวของดินเหนียวจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 1.5 โมล ในขณะที่พิกัดพลาสติกมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเกลือ

ดังนั้นดัชนีความเป็นพลาสติกจึงมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณความเข้มข้นน้ำเกลือไปด้วยการลดลงของพิกัดเหลวเมื่อความเข้มข้นเกลือสูงขึ้นอาจเป็นผลเนื่องจากผลต่างระหว่างแรงดึงดูด (Attractive Force) แรงผลัก (Repulsive Force) มีค่าสูงขึ้น ทำให้อนุภาคของดินเหนียวที่มีลักษณะเป็นชั้นแบน มีระยะห่างกันน้อยลงและทำให้พื้นที่ผิวลดลงด้วย จึงทำให้ความต้องการน้ำที่จะทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพของเหลวมีค่าลดลง (Yatkong, & Dennis, 1987) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพิกัดพลาสติกของดินเหนียวไม่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาร่วมทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าขีดจำกัดเหลวและความ เป็นพลาสติกของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นเกลือเพิ่มสูงขึ้น แต่สถานะของดินเหนียวยังคงอยู่บนเส้น A-Line ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นน้ำเกลือและปริมาณความชื้นที่พิกัดอัตราเทอร์เบอร์ก

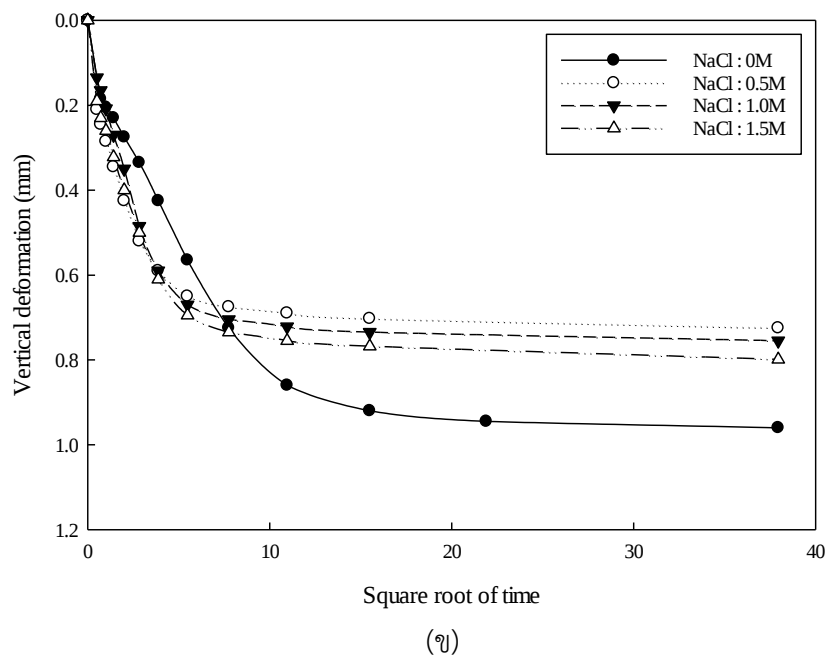
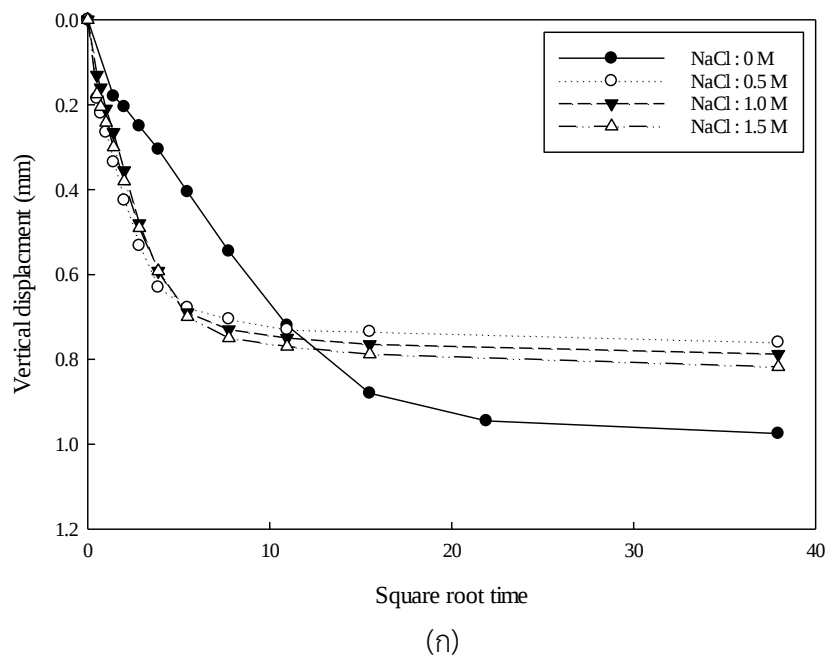


รูปที่ 2 พิกัดเหลวและดัชนีพลาสติกของดินเหนียว

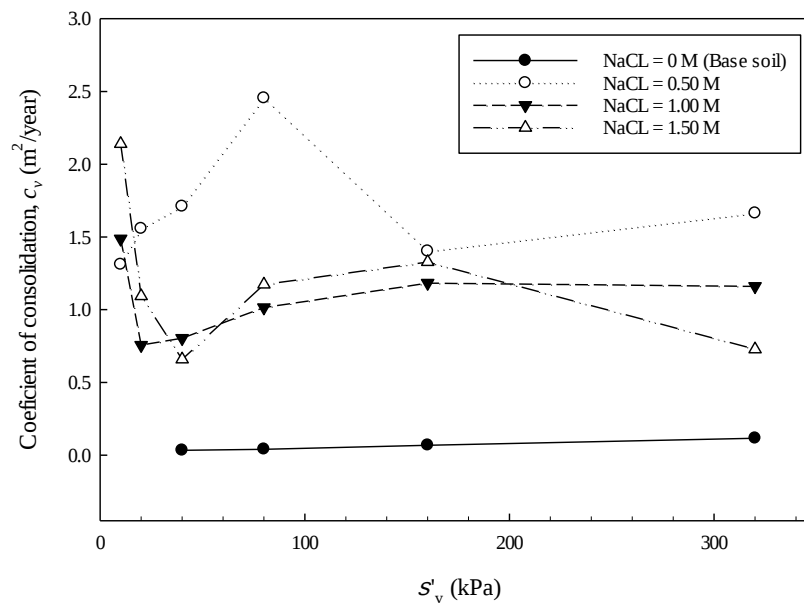
5.2 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวเทียบกับรากที่สองของเวลาสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผลเท่ากับ 80-160 กิโลปาสกาลและ 160-320 กิโลปาสกาลแสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปพบว่าที่ความเค้นในแนวตั้งเท่ากัน การทรุดตัวของดินเหนียวที่มีน้ำเกลือเป็นของเหลวรูพรอง มีการเสียรูปในแนวตั้งช่วงแรกเร็วกว่าตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่น การเสียรูปรวมเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำขึ้นแรกที่เวลา 24 ชม. มีค่าน้อยกว่าดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่น แนวโน้มดังกล่าวสามารถพบได้ในทุกระดับความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผล ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v) ที่คำนวณโดยวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root Time Method) และความเค้นประสิทธิผลแสดงดังรูปที่ 4

จากรูปเมื่อพิจารณาที่ความเค้นประสิทธิผลเท่ากัน ดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวรูพรองมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำที่ร้อยละ 90 (t_{90}) มีค่าสูงมาก ในทางตรงข้ามสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ทุกความเข้มข้นเกลือมีค่าสูงกว่าดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวรูพรอง ซึ่งหมายถึงอัตราการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวที่มีน้ำเกลือเป็นของเหลวรูพรองมีค่าสูงกว่า (ระยะเวลาการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดเร็วกว่าดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่น) ความเข้มข้นน้ำเกลือมีผลต่อสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำเพียงเล็กน้อย โดยที่ตัวอย่างดินเหนียวที่ทุกความเข้มข้นน้ำเกลือมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำค่อนข้างใกล้เคียงกัน ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้นี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่จะอธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความการทรุดตัวในแนวดิ่งเทียบกับรากที่สองของเวลา สำหรับตัวอย่างดินที่ความเข้มข้นเกลือต่าง ๆ (ก) ความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 160 กิโลปาสคาล (ข) ความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 320 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำและความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง (e) และล้อยคกาลิทึมของความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยไม่แสดงความเค้นครากภายใต้ความเค้นที่ทดสอบ เนื่องจากโครงสร้างของดินเหนียวปั้นใหม่ (Remolded Clay) พันธะเชื่อมประสานของดินเหนียวถูกทำลายจากการเตรียมตัวอย่าง ดัชนีการอัดตัว (Compression Index, C_c) นิยามจากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นประสิทธิผล รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการอัดตัวและความเข้มข้นของน้ำเกลือ จากรูปพบว่าดินเหนียวที่ใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวในรูโพรง มีดัชนีการอัดตัวมีค่าสูงที่สุด ($C_c=0.61$) ในขณะที่ดินเหนียวที่ใช้น้ำเกลือเป็นของเหลวรูโพรง ดัชนีการอัดตัวที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 M, 1.0 M และ 1.5 M มีค่าเท่ากับ 0.428, 0.418 และ

0.412 ตามลำดับ ดัชนีการอัดตัวเมื่อน้ำเกลือเป็นของเหลวรูโพรงในศึกษาครั้งนี้มีค่าลดลงประมาณ 29-32 % สูงกว่าผลการศึกษาที่เสนอโดย Ajmera and Tiwari (2012) ที่ระบุว่าดัชนีการอัดตัวของดินเหนียวที่มีส่วนประกอบหลักเป็นอิลไลต์และเคโอลิไนต์มีค่าดัชนีการอัดตัวลดลงประมาณ 10% เมื่อมีความเข้มข้นสารละลายน้ำเกลือเท่ากับ 0.5 โมล นอกจากนี้ผลการทดลองการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเบนโทไนท์ รายงานโดย Horpibulsuk et al. (2011) พบว่าดินเหนียวเบนโทไนท์ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นแร่ดินเหนียวโมลโมลิโอไนท์ มีการความสามารถต้านทานความเค้นอัดตัวคายน้ำลดลง ($e-\log \sigma'_v$ ขยับไปทางซ้ายมือมากขึ้น) เมื่อมีความเข้มข้นของไอออนและประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นในแนวดิ่งสัมพันธ์อื่นนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเกลือแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียวอีกด้วย

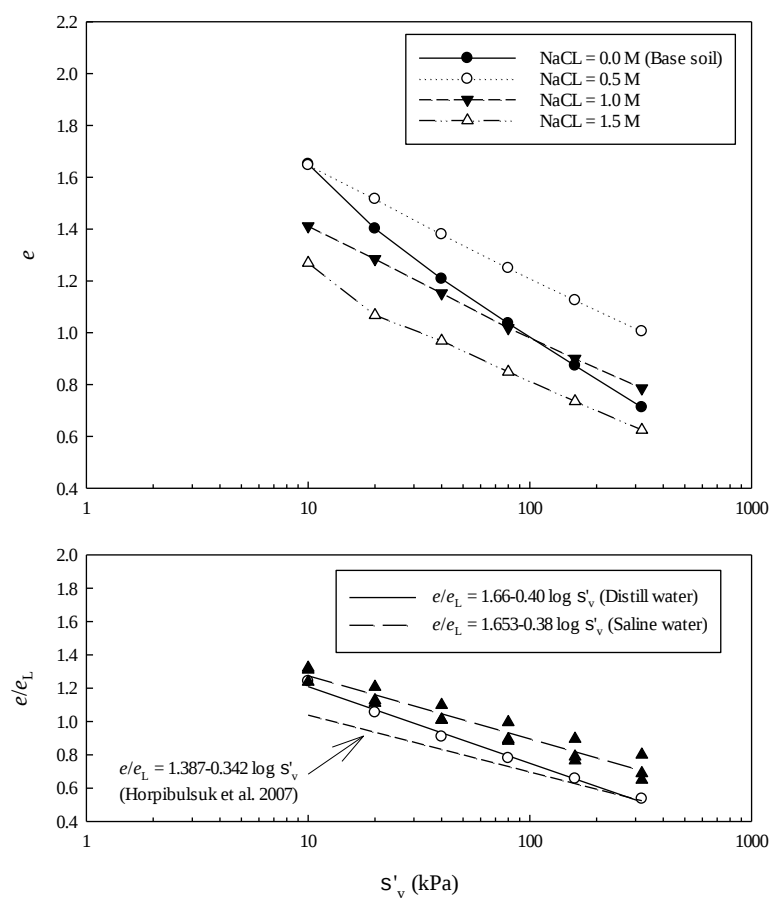
เนื่องจากอัตราส่วนโพรงของดินเหนียวที่
ขีดจำกัดเหลว ($e_L = wGs$) ดินเหนียวทุกชนิดจะมี
คุณลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์และควบคุมการ
เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเหนียว ความสัมพันธ์
ระหว่าง $e - \log \sigma'_v$ จึงถูกนำมาทำการ Normalization
ด้วยอัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว (รูปที่ 5) พบว่า
ดินเหนียวที่มีน้ำกลั่นเป็นของเหลวรูโพรง สมการ
ความสัมพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$e/e_L = 1.66 - 0.40 \log \sigma'_v \quad (1)$$

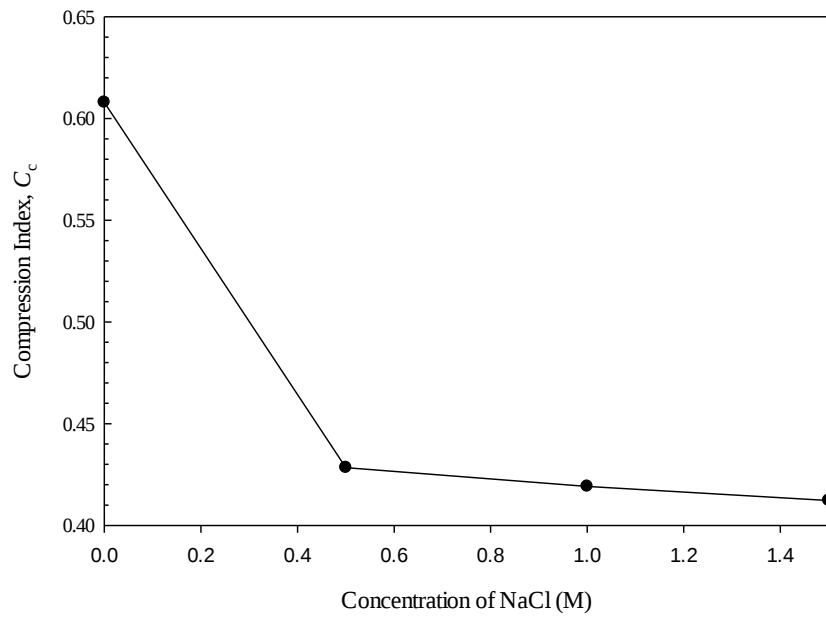
และดินเหนียวที่มีน้ำเกลือเป็นของเหลวรูโพรงทั้ง 3
ความเข้มข้นมีค่าดังนี้

$$e/e_L = 1.63 - 0.38 \log \sigma'_v \quad (2)$$

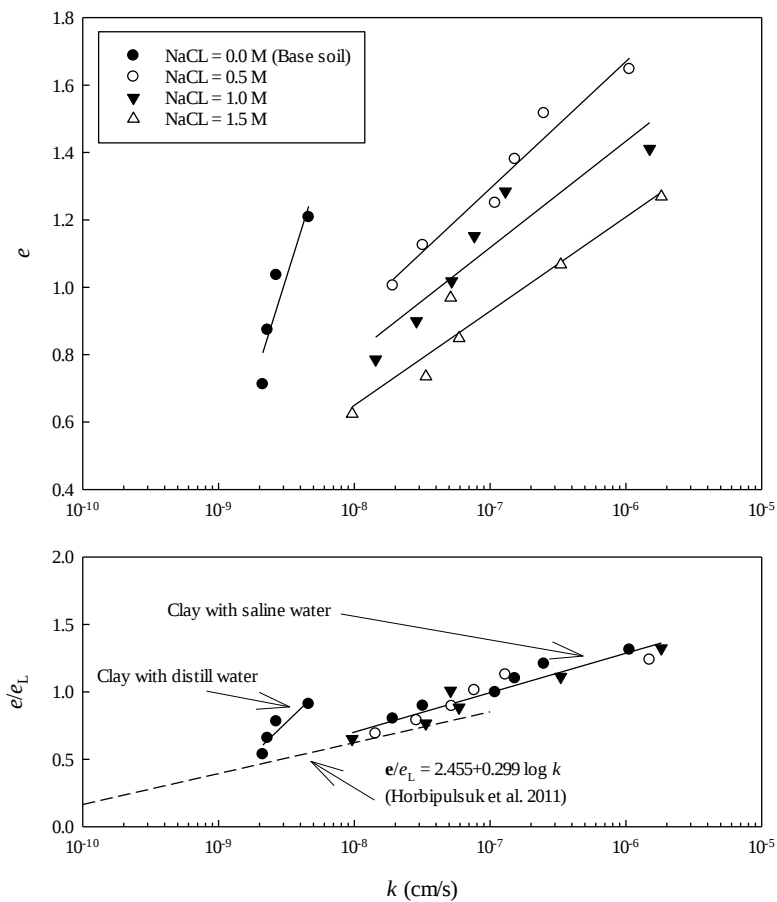
จากรูปจะเห็นว่าสมการทั้งสองสูงกว่าสมการของ
ดินเหนียวกรุงเทพที่เสนอโดย (Horpibulsuk et
al., 2007)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผล



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการอัดตัวและความเข้มข้นเกลือ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยวิธี (X-Ray Deflection, XRD) ที่นำเสนอโดย Ohtsubo et al. (2000) นั้นระบุว่ามีส่วนประกอบหลักของดินเหนียวกรุงเทพฯ เป็นมอนมอลิโนไนท์ 54%-57% และตามด้วยเคโอลิไนต์และไมกา ในขณะที่ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้จากอำเภอด่านเกวียน จังหวัดนครราชสีมา มีส่วนประกอบหลักเป็นควอร์ตและตามด้วยมอนมอลิโนไนท์และเคโอลิไนต์ (Onlamee, 2023; Patumtip & Sarunya, 2011) ซึ่งอาจเป็นเหตุผลให้เส้นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 มีค่าแตกต่างจากดินเหนียวกรุงเทพฯ

สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability, k) ในการศึกษาครั้งนี้คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนําดังสมการที่ 3

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

โดยที่ k คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, C_v คือสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้า, m_v คือโมดูลัสการอัดตัว, γ_w คือหน่วยน้ำหนักของนํ้า รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ระดับอัตราส่วนโพรงเท่ากันสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเกลือ โดยเป็นที่น่าสนใจได้ว่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับดินเหนียวที่ใช้นํ้าเกลือเป็นของเหลวรูโพรงมีลักษณะคล้ายกันทั้ง 3 ความเข้มข้น และแตกต่างจากดินเหนียวที่ใช้นํ้ากลั่นเป็นของเหลวรูโพรง

อัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว (e_L) ถูกนำมาทำการ Normalization ดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูปพบว่า ดินเหนียวที่มีนํ้าเกลือทั้ง 3 ความเข้มข้นนั้นมีความสัมพันธ์ที่มีเอกภาพซึ่งหมายความว่าแม้ความเข้มข้นเกลือจะมีค่าเพิ่มขึ้นการจัดเรียงรูโพรงภายในยังคงเหมือนเดิม ในขณะที่ดินเหนียวที่มนํ้ากลั่นเป็นของเหลวรูโพรงมีจัดเรียงรูโพรงภายในที่แตกต่างออกไปอย่างชัดเจน Horpibulsuk et al. (2011) ได้เสนอสมการ Generalization ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากดินเหนียวหลากหลายชนิด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 7 เช่นกัน จากรูปแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของสมการดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้เล็กน้อย ทั้งนี้ที่อัตราส่วน $e/e_L = 1$ หมายถึงที่อัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว ดินเหนียวที่มีนํ้าเกลือเป็นของเหลวรูโพรงมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านประมาณ 10^{-7} cm/s ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nagaraj et al. (1993) ที่ระบุว่าดินเหนียวทุกชนิดจะมีอัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลวประมาณ 10^{-7} cm/s เป็นที่น่าสนใจว่าดินเหนียวโคราชที่ใช้นํ้ากลั่นเป็นของเหลวรูโพรง สัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่อัตราส่วนโพรงขีดจำกัดเหลวมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับดินเหนียวทั่วไปซึ่งอาจเป็นผลมาจากส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวของดินเหนียวโคราชมีส่วนประกอบหลักแตกต่างออกไป

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวโคราช เมื่อใช้นํ้าเกลือเป็นของเหลวรูโพรง จะทำให้การจัดเรียงโครงสร้างภายในเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ระยะห่างระหว่างโครงสร้างดินลดลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยยะสำคัญต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้า มีค่าเพิ่มขึ้น และกระบวนการอัดตัวคายนํ้าสิ้นสุดเร็วขึ้น

6. สรุป

การศึกษานี้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของเหลวในรูพรุนดินเหนียวต่อพฤติกรรม การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่ น้ำกลั่น และน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่าถูกนำมาใช้เป็นของเหลวรูพรุน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นน้ำเกลือทำ ชิดจำกัดเหลวมีค่าลดลง ในขณะที่ชิดจำกัด พลาสติกมีค่าใกล้เคียงกัน ดินเหนียวที่ใช้ น้ำเกลือ เป็นของเหลวรูพรุนมีอัตราการทรุดตัวคายน้ำเร็วกว่า ดินเหนียวที่ใช้ น้ำกลั่น ดัชนีการอัดตัวของดินที่มี น้ำเกลือเป็นของเหลวรูพรุนมีค่าน้อยกว่าดินเหนียวที่ ใช้ น้ำกลั่นและมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความ เข้มข้นน้ำเกลือเล็กน้อย ที่ระดับอัตราส่วนโพรงที่ เท่ากัน สมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่มีน้ำเกลือ เป็นของเหลวรูพรุนจะมีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่ เพิ่มขึ้น การ Normalization ด้วยอัตราส่วนโพรง ที่ชิดจำกัดเหลวแสดงให้เห็นว่าดินเหนียวที่ใช้ น้ำเกลือทุกระดับความเข้มข้นมีการจัดเรียง โครงสร้างเหมือนกัน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ อัตรา การทรุดตัวคายน้ำของดินที่มีน้ำเกลือเป็นของเหลว รูพรุนทุกความเข้มข้นสูงกว่าดินเหนียวที่ใช้ น้ำกลั่น ประโยชน์ของงานวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า แม้ว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดนครราชสีมา มีการ ปนเปื้อนหรือการมีน้ำเกลืออยู่ในชั้นใต้ดิน แต่ก็ทำ ให้อัตราการทรุดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวลดลง

7. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ขอขอบคุณ นายสมปอง ลอยหา นายวิศรุต พิลาศรี และนายต่อลาภ ทัพไชย นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย วงษ์ชวลิตกุลที่ช่วยดำเนินการทดสอบที่สำคัญใน การศึกษานี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Ajmera, B. and Tiwari, B. (2012) Consolidation Characteristics of Soft Clays with Saline Water as a Pore Fluid, *Geotechnical Special Publication 225*, 1223-1232, DOI: 10.1061/9780784412121.126.
2. Dafalla, M. (2021). Effect of Fluid Chemistry on the Consolidation and Hydraulic Conductivity of Sand-Clay Liners. *Sustainability*, 13(20), 11213. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11213>
3. Di Maio, C., Santoli, L., & Schiavone, P. (2004). Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of Materials*, 36(5), 435-451. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(03\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(03)00070-X)

4. Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K., & Katkan, W. (2007). Assessment of engineering properties of Bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(2), 173-187. doi:10.1139/t06-101
5. Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., & Du, Y. J. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science*, 52(1), 150-159. doi:https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.02.014
6. Jayalekshmi, S., & Elamathi, V. (2020). A Review on Correlations for Consolidation Characteristics of Various Soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1), 012007. doi:10.1088/1757-899X/1006/1/012007
7. Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*: Wiley.
8. Nagaraj, T. S., Pandian, N. S., & Raju, P. S. R. N. (1993). Stress state-permeability relationships for fine-grained soils. *Géotechnique*, 43(2), 333-336. doi:10.1680/geot.1993.43.2.333
9. Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T., & Bergado, D. T. (2000). Mineralogy and Chemistry, and Their Correlation with the Geotechnical Index Properties of Bangkok Clay: Comparison with Ariake Clay. *Soils and Foundations*, 40(1), 11-21. doi:https://doi.org/10.3208/sandf.40.11
10. Onlamee, K.-i. (2023). Development of a Mixture of Dan Kwian Clay Body and Dong Ma Fai Coffee Grounds to Create a Ceramic Filter for Dong Ma Fai Coffee Drip. *The journal of Industrial Technology*, 19(2). doi: 10.14416/j.ind.tech.2023.08.005
11. Patumtip, S., & Sarunya, P. (2011). *Field Study in Clay Mineral Composition of Traditional Ceramic Pottery in the Northeast of Thailand*. Paper presented at The International Conference on Sustainable Community Development, Khon-khean, Thailand.
12. Shrestha, R. P., Qasim, S., & Bachri, S. (2021). Investigating remote sensing properties for soil salinity mapping: A case study in Korat province of Thailand. *Environmental Challenges*, 5, 100290. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100290

13. Yatk Wong A. Ho, & Dennis E. Pufahl.
(1987). *The Effects of Brine Contamination on the Properties of Fine Grained Soils*. Paper presented at the Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, Ann Arbor, Michigan, United States
14. อัมพรรค์ วรรณโกมล, & บัญญัติ ธีระกุลสถิต.
(2018). การศึกษาและจัดทำแผนที่แสดงระดับความเสี่ยงจากการทรุดตัวของแผ่นดินในเขตพื้นที่ผลิตเกลือสินเธาว์ของจังหวัดนครราชสีมาโดยใช้ข้อมูลจากระบบเรดาร์แบบช่องเปิดเสมือนและธรณีฟิสิกส์. Retrieved from นครราชสีมา: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/7839/2/Fulltext.pdf>