การปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวด้วยวิธีทางกลและวิธีทางเคมี

MECHANICAL AND CHEMICAL IMPROVEMENT OF DISPERSIVE CLAY

ธงชัย บุญกลึง (Thongchai Boonklung)[1]

พลอนันต์ สดโคกกรวด (Polanan Sodkokkruad)[2]

พรพจน์ ตันเส็ง (Pornpot Tanseng)[3]

[1]ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี thongchai_ce@hotmail.com

[2]นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี pornpot@sut.ac.th

บทคัดย่อ: ในบทความนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบการปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวที่พบในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยวิธีบดอัดและวิธีการบดอัดโดยผสมปูนขาวชนิดแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณการผสมที่ต่ำ ในการวิจัยได้เลือกแหล่งดินที่มีการกระจายตัวสูงมาทดสอบ pinhole และนำดินมาบดอัดด้วยวิธีมาตรฐานจากนั้นทดสอบการกระจายตัวด้วยวิธี pinhole กับตัวอย่างดินบดอัดที่ปริมาณน้ำในดินต่างกัน และตรวจสอบปริมาณตะกอนที่ไหลออกมากับน้ำ จากนั้นทดสอบบดอัดดินโดยผสมปูนขาวลงในปริมาณ 0.5, 1.0, 3.0 เปอร์เซ็นต์และทำการทดสอบการกระจายตัวด้วยวิธี pinhole ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดินโดยใช้วิธีการบดอัดอย่างเดียวจะไม่สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ ส่วนการปรับปรุงดินด้วยวิธีการบดอัดดินผสมปูนขาวจะทำให้ดินไม่กระจายตัว โดยปริมาณปูนขาวที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์จะเริ่มลดการกระจายตัวของดินได้ และการทดสอบกับคันดินบดอัดในสนามพบว่าจะต้องใช้ปูนขาวไม่ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ดินจึงจะไม่กระจายตัว งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าการบดอัดเพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ และการผสมปูนขาวลงในดินเพียงเล็กน้อยจะทำให้ดินไม่กระจายตัว

ABSTRACT: This paper presents the study of improving dispersive clay found in Suranaree University of Technology. Standard compaction and Standard compaction with small amount of lime are used. In the research, highly dispersive clay samples are verified with pinhole test. The soil samples are compacted without lime added and compacted with lime added. The lime percentage used is 0.5, 1.0, 3.0. The results shows that the compaction alone can not reduce dispersivity of soil samples. The sediment eroded from the test reduced at the optimum water content. For the compaction with lime, the results shows that at 0.5 pecent of lime by weight can reduce dispersivity of sample.

KEYWORDS : Dispersive clay, Lime stabilization, Pinhole test, Soil erosion

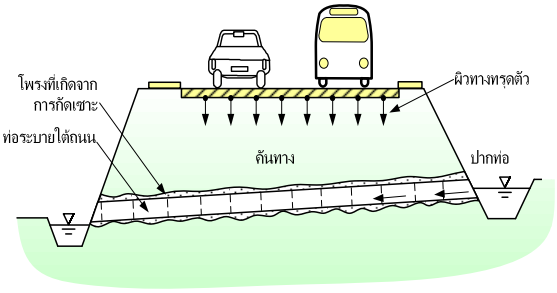
1. บทนำ

ในบทความนี้เป็นการศึกษาปัญหาการถูกกัดเซาะของคันดินในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งคันดินหลายจุดจะเกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรง จนทำให้ดินพังทลายลงมาหรือถูกกัดเซาะเป็นร่องและโพรงดังภาพที่ 1 ในบางพื้นที่ได้แก้ไขปัญหาการกัดเซาะที่เกิดขึ้นโดยการถมดินกลับและบดอัด แต่เมื่อถึงฤดูฝนคันดินก็ถูกกัดเซาะจนเกิดเป็นร่องอีก และเมื่อเวลาผ่านไปหลายปีร่องก็ขยายใหญ่ขึ้นจนสูญเสียทัศนียภาพไปเหมือนก่อน

ซ่อมแซม คันดินที่ถูกกัดเซาะนั้นพบว่าเกิดเป็นร่องขนาดใหญ่ ในบางจุดที่มีท่อลอดผ่านคันดินมักจะเกิดการทรุดตัวของผิวทาง จนเป็นแอ่งให้น้ำขังและทำให้ผิวทางเกิดการชำรุดแตกร้าวดังภาพที่ 2 เนื่องจากการกัดเซาะของน้ำกับดินรอบท่อ ซึ่งสมมุติฐานของการกัดเซาะดินรอบท่อมีแนวการวิเคราะห์คล้ายคลึงกับปัญหาการเจาะอุโมงค์โดยใช้เครื่องเจาะอุโมงค์โดย [1] (ภาพที่ 3) ปัญหาอีกประการหนึ่งของการกัดเซาะได้ดินที่ถูกกัดเซาะนั้นส่วนใหญ่จะเป็นดินเม็ดละเอียดจะถูกพัดพาและไปตกตะกอนอุดตันรางและท่อระบายน้ำ และตะกอนเม็ดละเอียดจะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นานทำให้น้ำขุ่นเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดปัญหากับระบบนิเวศน์ใต้น้ำ

ภาพที่ 1 คันดินที่ถูกกัดเซาะอย่างรุนแรงในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการทรุดตัวของผิวถนนบริเวณที่มีท่อระบายน้ำลอดผ่าน



ภาพที่ 3 สมมุติฐานการทรุดตัวของผิวทางเนื่องจากดินรอบท่อถูกกัดเซาะโดยน้ำ [1]

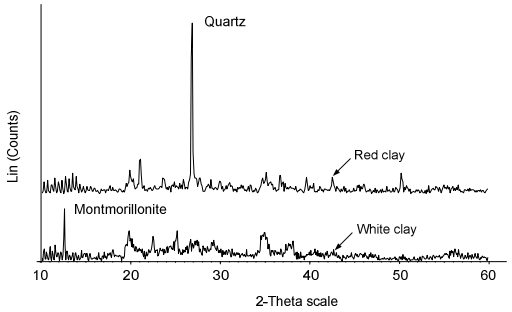
จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น คณะวิจัยจึงได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหา โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการบดอัดด้วยวิธีทางกล และการบดอัดด้วยวิธีทางกลโดยใช้การปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีร่วมด้วย เนื่องจากการกระจายตัวของดินนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากดินมีโซเดียมอยู่ในดินเป็นปริมาณมากดังนั้นถ้าต้องการลดการกระจายตัวของดินจะต้องใช้สารที่มีแรงดึงดูดสูงกว่าแคลเซียมและสามารถเข้าไปแทนที่แคลเซียมในดินได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปูนขาวชนิด Calcium Oxide, CaO ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาหินปูน ซึ่งน่าจะใช้ปรับปรุงดินกระจายตัวได้

อนึ่งในการปฏิบัติงานกับ CaO นั้นจะต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากเมื่อ CaO ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

2. ข้อมูลดินกระจายตัวในพื้นที่วิจัย

การทดสอบคุณสมบัติของดินในเบื้องต้นพบว่าดินในบางบริเวณของมหาวิทยาลัย เป็นดินเหนียวแข็งปานกลางที่มีสีแดง และมีระดับการกระจายตัว (Dispersive Clay) เป็น D1 ตามมาตรฐาน ASTM D4647 (ซึ่งเป็นการทดสอบดินกระจายตัวด้วยวิธี pinhole) แสดงว่าดินมีคุณสมบัติแตกตัวง่ายเมื่อมีน้ำไหลผ่านหรือเมื่ออยู่ในสภาพแช่น้ำ มีค่า Activity เป็น 0.99 มีกำลังรับแรงเฉือนเมื่ออิ่มตัวเป็น 7.0 ตันต่อตารางเมตร

การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินเหนียวกระจายด้วยวิธี X-ray diffraction ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4 พบว่าดินเหนียวกระจายตัวนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นควอทซ์



ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction ดินเหนียวสีแดงจะมีองค์ประกอบหลักเป็นควอทซ์ [2]

คุณสมบัติทางเคมีของดินพื้นที่วิจัยในงานวิจัยแสดงดัง

ตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าดินในแหล่งวิจัยเป็นดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนได้ของไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) เท่ากับ 20 me/100g ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณของไอออนของเกลือทั้งหมดที่มีอยู่ในดินแล้วจัดว่าเป็นดินที่มีโอกาสที่จะเป็นดินกระจายตัว

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณประจุบวกในดิน

ตัวอย่างดิน	ปริมาณแคทไอออน (ppm)			
	Ca++	Na+	Mg++	K+
ดินเหนียวสีแดง	33.05	6.69	7.83	0.77

3. อิทธิผลของตัวกลางในการกัดเซาะ

การถูกกัดเซาะของคันดินโดยน้ำในสภาพธรรมชาติมักจะเกิดจากน้ำฝนเป็นตัวกลาง ดังนั้นในการวิจัยจึงได้เลือกใช้น้ำฝนซึ่งได้กักเก็บไว้ในช่วงฤดูฝน โดยได้ตรวจสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำฝนที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับน้ำกลั่น น้ำประปา และแหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ผลดังตารางที่ 2

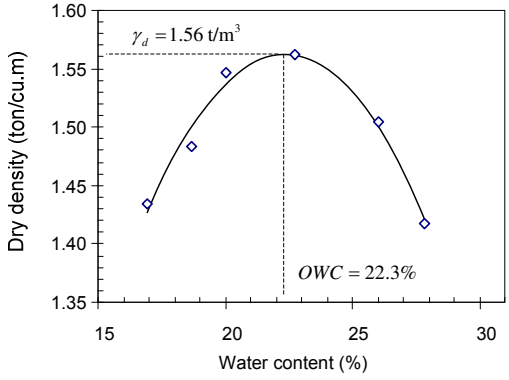
ตารางที่ 2 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำแต่ละชนิด

แหล่งน้ำ	ความนำไฟฟ้า (microsiemen/cm)
น้ำฝน	5.31
น้ำกลั่น	0.35
น้ำประปา	95.9

สาเหตุที่เลือกตรวจสอบความนำไฟฟ้าของตัวกลางกัดเซาะเนื่องจากเป็นวิธีตรวจสอบสิ่งเจือปนที่เป็นไอออนในน้ำอย่างง่าย ไม่จำเป็นจะต้องทำการวิเคราะห์ทางเคมีที่ยุ่งยาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำฝนนั้นมีความนำไฟฟ้าต่ำใกล้เคียงกับน้ำกลั่น ในการวิจัยนี้ได้ใช้น้ำกลั่นสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และได้เลือกใช้น้ำฝนในการทดสอบในแปลงทดลองในสนามเนื่องจากต้องการจำลองการกัดเซาะโดยใช้ตัวกลางการกัดเซาะให้ตรงกับสภาพในธรรมชาติมากที่สุด

4. การปรับปรุงดินกระจายตัวด้วยวิธีการบดอัด

ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวกระจายตัวได้ทดลองใช้วิธีทางกลเพียงอย่างเดียวโดยการบดอัดดินด้วยวิธีแบบมาตรฐาน (ใช้มาตรฐาน ASTM D-698) เพื่อหาปริมาณน้ำเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งพบว่าดินมีปริมาณน้ำเหมาะสมเท่ากับ 22.3 เปอร์เซ็นต์และความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.56 ตันต่อลูกบาศก์เมตร



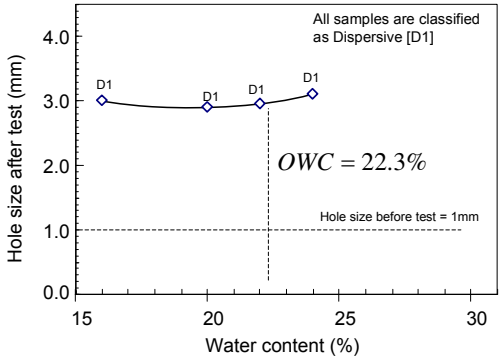
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบการบดอัดดินกระจายตัวด้วยวิธีมาตรฐาน

ขั้นตอนถัดมาได้ทดสอบการกระจายตัวดินที่บดอัดด้วยวิธี Pinhole test (ASTM D4647) ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้ทำการบดอัดตัวอย่างใหม่โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบการบดอัดที่ได้ทำไว้ล่วงหน้าดังแสดงใน

ภาพที่ 5 ในการทดสอบนอกจากจะจำแนกการกระจายตัวของดินตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานแล้ว ยังได้ตรวจสอบความหนาแน่นของน้ำที่ไหลผ่านรูที่ได้เจาะไว้ จากนั้นผ่าตัวอย่างออกเพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่น้ำไหลผ่านแสดงดัง

ภาพที่ 6 โดยที่รูที่เจาะไว้ในดินเริ่มต้นมีขนาด 1 มิลลิเมตร

ภาพที่ 6 การผ่าตัวอย่างออกเพื่อตรวจสอบขนาดของรูเจาะ



ภาพที่ 7 ขนาดของรูหลังสิ้นสุดการทดสอบ โดยขนาดของรูที่เจาะไว้เริ่มต้นมีขนาด 1 มิลลิเมตร

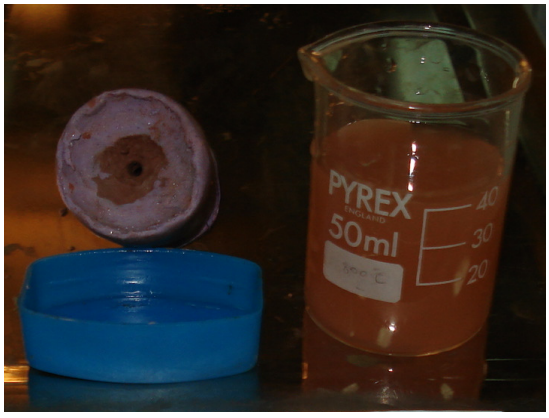
ขนาดของรูที่น้ำไหลผ่านหลังจากสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยปริมาณน้ำต่างกันแสดงดัง

ภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างจะมีการกระจายตัวจำแนกเป็นแบบ D1 และมีขนาดของรูเจาะขยายขึ้นจาก 1 มิลลิเมตรเป็น 3 มิลลิเมตร โดยขนาดของรูเจาะที่น้ำไหลผ่านแล้วจะไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำที่ใช้บดอัดแต่มีแนวโน้มว่าการบดอัดทางด้านแห้งจะให้ขนาดรูเจาะเล็กลงเล็กน้อย

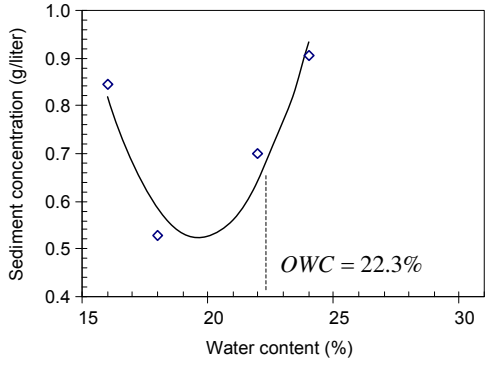
เมื่อพิจารณาจากความขุ่นของน้ำที่ไหลผ่านรูเจาะจะพบว่ามีความขุ่นมากเนื่องจากมีปริมาณตะกอนปนออกมากับน้ำในปริมาณมากดัง

ภาพที่ 8 ซึ่งเมื่อนำน้ำที่ได้จากการทดสอบมาหาปริมาณตะกอนแห้งและคำนวณเป็นความหนาแน่นของน้ำตะกอนที่ปริมาณน้ำที่ใช้บดอัดแต่ละค่าจะได้กราฟดัง

ภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านออกจากเครื่องมือทดสอบ Pinhole ซึ่งความขุ่นมาก และจำแนกดินได้เป็น D1



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด

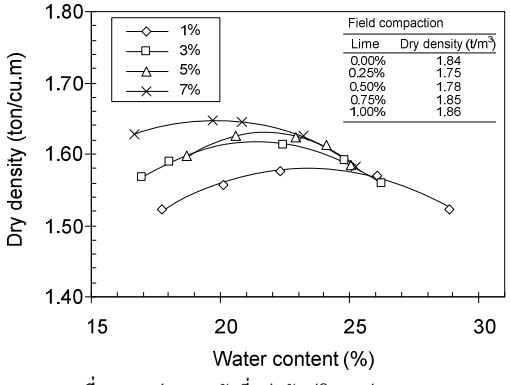
จาก

ภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของน้ำที่ไหลผ่านรูเจาะจะน้อยที่สุดเมื่อใช้ปริมาณน้ำในการบดอัดเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการบดอัดทางด้านแห้ง

จากผลการทดสอบพบว่าที่การบดอัดดินโดยใช้ปริมาณน้ำเหมาะสมซึ่งทำให้ดินแน่นที่สุดนั้นไม่สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณตะกอนและความขุ่นของตะกอนที่ไหลออกมากับน้ำและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ขยายเพิ่มขึ้นเนื่องจากการถูกกัดเซาะ

5. การปรับปรุงด้วยวิธีบดอัดโดยผสมปูนขาวชนิด Calcium oxide

เนื่องจากการบดอัดด้วยวิธีมาตรฐานโดยไม่ใช้วิธีการปรับปรุงทางเคมีร่วมด้วยจะไม่สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวด้วยปูนขาวชนิด Calcium Oxide, CaO โดยจะใช้ปริมาณการผสมที่ 0.5, 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นบดอัดดินด้วยวิธีมาตรฐานทันทีหลังจากผสมดินกับปูนเสร็จ ผลการทดสอบการบดอัดแสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ผสมและปริมาณน้ำเหมาะสมจะลดลง เมื่อบดอัดดินเสร็จจะนำดินตัวอย่างไปทดสอบ Pinhole โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสม CaO ด้วยปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปจะสามารถลดการกระจายตัวของดินได้ โดยขนาดของรูเจาะจะเท่ากับ 1 มิลลิเมตรซึ่งไม่มีการขยายขนาดเนื่องจากการถูกกัดเซาะ และดินตัวอย่างจะไม่มีตะกอนไหลออกมากับน้ำซึ่งทำให้จำแนกดินที่ปรับปรุงด้วย CaO เป็นชนิด ND2 และ ND3 ซึ่งเป็นดินที่ไม่กระจายตัว



ภาพที่ 10 กราฟการบดอัดที่แปรผันปริมาณปูนขาว CaO

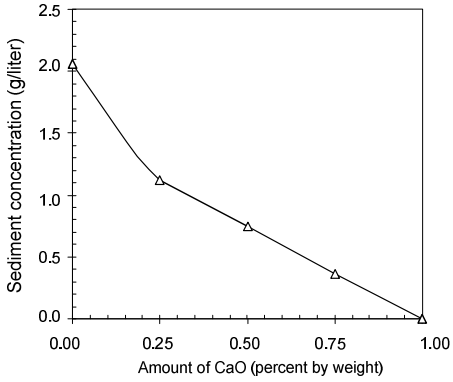
6. การทดสอบกับสภาพการบดอัดในสนาม

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการคณะวิจัยจึงได้ขยายผลการทดสอบออกไปสู่การทดสอบในสนาม โดยได้ทำการสร้างคันดินโดยการบดอัดดินที่ความลาดชัน 1:1 โดยใช้ดินกระจายตัวแหล่งเดียวกับดินที่ใช้ทดสอบก่อนหน้านี้ การบดอัดจะใช้วิธีบดอัดตัวอย่างโดยตบกระแทกดินที่วางอยู่บนคันทราย การบดอัดจะถูกควบคุมโดยการทดสอบความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดแล้ว ซึ่งดินที่บดอัดในสนามจะมีความหนาแน่นแห้งสูงกว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการดังแสดงในภาพที่ 10

ในการทดสอบจะใช้น้ำฝนซึ่งได้เก็บไว้ในภาชนะที่สะอาด และก่อนทำการทดสอบจะตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเพื่อยืนยันว่าน้ำที่ใช้ไม่มีการปนเปื้อนที่จะทำให้การทดสอบมีตัวแปรเพิ่มขึ้น ในการทดสอบใช้ส่วนผสมของ CaO เท่ากับ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยการบดอัดจะผสมน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ เมื่อบดอัดดินจนได้ความแน่นที่ต้องการแล้วจะเซาะร่องบนคันดินเพื่อให้น้ำไหลผ่านโดยร่องเป็นครึ่งวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร ในการจำลองการไหลผ่านของน้ำเป็นการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ โดยยกแหล่งจ่ายน้ำสูงกว่าระดับปล่อยเท่ากับ 50 มิลลิเมตร (ภาพที่ 11)โดยจะปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างเป็นปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และเก็บน้ำที่ไหลผ่านคันดินเพื่อสังเกตสีของน้ำ และนำไปหาปริมาณตะกอนที่เจือปนอยู่ในน้ำ

ภาพที่ 11 แปลงทดสอบการปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวด้วยปูนขาวที่ความชัน 1:1

ภาพที่ 12 แสดงปริมาณตะกอนที่วัดได้เมื่อดินไหลผ่านร่องที่เซาะไว้บนคันดิน จากกราฟพบว่าปริมาณตะกอนที่ไหลผ่านออกมากับน้ำลดลงเมื่อใช้ปริมาณปูนขาว CaO เพิ่มขึ้นและจะไม่มีตะกอนไหลออกมากับน้ำที่ปริมาณปูน 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณตะกอนที่ลดลงนี้สังเกตได้จากความขุ่นของน้ำ ซึ่งมีความขุ่นมากดังภาพที่ 13 และตะกอนที่มีความขุ่นน้อยดังภาพที่ 14



ภาพที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณตะกอนกับปริมาณ CaO

ภาพที่ 13 ปริมาณตะกอนหลังการทดสอบโดยผสม CaO 0 เปอร์เซ็นต์: จะเห็นได้ว่าน้ำตะกอนมีความขุ่นมาก

ภาพที่ 14 ปริมาณตะกอนหลังการทดสอบโดยผสม CaO 0.75 เปอร์เซ็นต์: จะเห็นได้ว่าน้ำตะกอนมีความขุ่นลดลง

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- การปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวด้วยการบดอัดแบบมาตรฐานไม่สามารถลดการกระจายตัวของดินเหนียวกระจายตัวได้ทำให้ดินยังคงถูกกัดเซาะอย่างรุนแรงเหมือนกับดินที่ไม่ได้บดอัด
- การปรับปรุงดินเหนียวกระจายตัวด้วยการบดอัดในห้องปฏิบัติการโดยผสมปูนขาว CaO ด้วยปริมาณอย่างน้อย 0.5 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดการกระจายตัวของดินได้ แต่เมื่อทดสอบกับแปลงดินบดอัดในสนามพบว่า จะต้องใช้การบดอัดร่วมกับการใช้ปูนขาว CaO อย่างน้อย 1 เปอร์เซ็นต์ดินจึงจะหยุดกระจายตัวและจะไม่ถูกกัดเซาะอีก
- การปรับปรุงดินด้วยปูนขาวด้วย CaO จะเกิดผลทันทีเมื่อ CaO ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำ ซึ่งเมื่อทิ้งไว้จะทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้นซึ่งจะได้ทำการศึกษาและนำเสนอในโอกาสต่อไป
- งานวิจัยต่อไปจะศึกษาถึงการคงทนของปูนขาวต่อการชะล้างเนื่องจากน้ำฝน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้ความสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ บริษัทยูไนเต็ด ปูนขาว จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ปูนขาว Calcium Oxide เพื่อใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณ นายสันติพงษ์ อ้อยกลาง และนายปิยะ เชื้อคำฮด ที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

[1] พรพจน์ ตันเส็ง, นงลักษณ์ แก้วนิล, วารินทร์ ผาพรม, สมัชญ์ จันทรสาขา, และ อภิรัตน์ วิจิตรโชติ (2551), การประมาณการทรุดตัวของผิวทางเนื่องจากดินรอบท่อลอดถูกกัดเซาะ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, พัทยา

[2] พรพจน์ ตันเส็ง (2549), คุณสมบัติทางกายภาพและการบวมตัวของดินเหนียวบวมตัวที่เกิดตามธรรมชาติ, การปรับปรุงคุณภาพดินและการใช้แผ่นใยสังเคราะห์ ครั้งที่ 6, กรุงเทพ