

ผลกระทบของสารเบนโทไนท์ต่อค่าการซึมผ่านของดินทรายผสมซีเมนต์

EFFECT OF BENTONITE ADMIXTURE ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SANDY SOIL MIXED BY CEMENT

สุธี ปิยะพิพัฒน์¹, ศุภสิทธิ พงศ์ศิระสถิตย์² และ กำธรเกียรติ มุสิกเกตุ³

^{1, 2, 3}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹suthee.p@en.rmutt.ac.th, ²supasit.p@en.rmutt.ac.th, ³kamtornkiat.m@en.rmutt.ac.th

Suthee Piyaphipat ¹, Supasit Pongsivasathit² Kamtornkiat Musiket³

^{1, 2, 3}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhornnayok Rd, Thanyaburi Amphur, Pathumthani Province 12110, Thailand,

¹suthee.p@en.rmutt.ac.th, ²supasit.p@en.rmutt.ac.th, ³kamtornkiat.m@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์อย่างต่อเนื่องในชั้นดินด้วยเทคโนโลยีเครื่องจักรกลผสมในชั้นดินเป็นวิธีที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในวิศวกรรมการก่อสร้าง เพื่อวัตถุประสงค์ในการเป็นโครงสร้างรองรับการขุดลึกและใช้ในการควบคุมระดับน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชั้นดินที่เป็นดินทรายเพื่อเป็นโครงสร้างที่บั่นน้ำได้เนื่องจากมีค่าซึมผ่านของน้ำที่สูงเกินไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีที่จะลดการซึมผ่านของน้ำในชั้นดินทรายที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์โดยใช้สารเบนโทไนท์ผสมเพิ่ม ผลกระทบของสารเบนโทไนท์ต่อค่าการซึมผ่านของน้ำในดินทรายผสมซีเมนต์จะถูกตรวจสอบ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของสารเบนโทไนท์ในดินทรายผสมซีเมนต์ทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลผลการทดสอบ สมการในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำได้ถูกนำเสนอซึ่งเป็นฟังก์ชันชี้กำลังของปริมาณซีเมนต์และปริมาณสารเบนโทไนท์ ตรวจสอบความถูกต้องของสมการด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ สรุปได้ว่าสามารถใช้สมการที่นำเสนอเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์เพื่อใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินที่บั่นน้ำได้

คำสำคัญ: กำแพงกันดินที่บั่นน้ำ, ค่าการซึมผ่านของน้ำ, การปรับปรุงคุณภาพดิน

ABSTRACT

The method of constructing the continuous soil-cement walls into the soil deposit using mechanical soil-mixing technology has been used widely in the engineering practice for the purposes of excavation support and ground water control. However this method cannot be employed into the sand deposit for the purposes of waterproof structure due to high water seepage. Thus, this research aimed to discover the method to reduce the water seepage of stabilized sandy soil by adding a bentonite admixture. The effects of bentonite on the hydraulic conductivity of stabilized sandy soil have been examined. It has been confirmed that the increase of bentonite reduced the hydraulic conductivity of stabilized sandy soil significantly. Based on the testing results, the explicit equation for estimating the hydraulic conductivity has been proposed as an exponential function of cement content (C) and bentonite content (B). The validity of the method has been checked using the experimental results. The proposed method can be used to estimate the hydraulic conductivity of sandy soil mixed cement and bentonite for the purpose of waterproof retaining wall design.

KEYWORDS: waterproof retaining wall, hydraulic conductivity, ground improvement

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้น้ำปูนซีเมนต์ ด้วยการฉีดอัดด้วยแรงดันสูง ปั่นผสมเข้ากับดินในที่ผสมลึกลงไปในใต้ดิน เพื่อให้ดินทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นลักษณะแท่งทรงกระบอกดินซีเมนต์ในชั้นดิน หรือเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่เรียกว่าวิธีผสมลึก (Deep Mixing Method) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วภูมิภาค [1-3] มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมความแข็งแรงของชั้นดินเพื่อรองรับน้ำหนักจากคันดินถม [4, 5] เนื่องจากซีเมนต์มีคุณสมบัติในการทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์อย่างมา [6-16] เสาเข็มดินซีเมนต์ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านเทคนิคธรณีได้หลายประเภท เช่น ใช้เป็นโครงสร้างเพื่อป้องกันการเกิดการวิบัติของดินที่มีลักษณะลาดชัน (Slope Failure) ใช้ป้องกันการเกิด Heaving และลดความยาวของเสาเข็มพืดในการขุดลึก เพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดันด้านข้างของโครงสร้าง อีกทั้งยังสามารถทำเป็นกำแพงกันดินเพื่อป้องกันน้ำในกรณีก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน [17, 18] ซึ่งโดยทั่วไปค่าการซึมผ่านของน้ำในเสาเข็มดินซีเมนต์ มักมีค่ามากกว่าดินที่อยู่บริเวณรอบๆ ดินซีเมนต์เล็กน้อย [19, 20] ดังนั้นในกรณีที่ประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เรียงชิดติดกัน เป็นลักษณะกำแพงกันดินซีเมนต์ ในชั้นดินทรายเพื่อป้องกันน้ำในกรณีก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน แม้ว่าการผสมซีเมนต์ในชั้นดินทรายมีผลทำให้ค่า

การซึมผ่านของน้ำในดินทรายมีค่าลดลง [21-24] อย่างไรก็ตามถ้ามีความต้องการใช้ดินทรายผสมซีเมนต์เป็นแนวกำแพงกันน้ำ ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ที่สูงมากเพื่อให้บีบน้ำ

แนวความคิดในการใช้สารผสมเพิ่ม ได้แก่ สารเบนโทไนท์ (Bentonite) ซึ่งจัดเป็นหินแก้วภูเขาไฟที่แปรเปลี่ยนเบื้องต้นไปเป็นเนื้อดินเมื่อถูกแช่น้ำ อยู่ในกลุ่มแร่สมิคไทท์ (Smectite) หรือมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) เป็นองค์ประกอบหลัก มีโครงสร้างเป็นผลึกตาข่ายที่มี ขนาดอนุภาคเล็กละเอียดมาก มีคุณสมบัติการดูดซับน้ำที่ดี สามารถดูดน้ำไว้ได้มากซึ่งเป็นผลให้ดินนี้มีลักษณะขยายตัว (Swell Ability) สูง 5-20 เท่าของปริมาตรดินแห้งหรือเกิดการพองตัวบวมเมื่ออุ้มน้ำไว้ได้มาก ๆ นำมาผสมเพิ่มในสัดส่วนที่เหมาะสมลงในดินทรายผสมซีเมนต์ เพื่อให้สารเบนโทไนท์อุดช่องว่างในดินซีเมนต์ เป็นผลทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำในดินทรายผสมซีเมนต์ลดลง [25-27]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในดินทรายผสมซีเมนต์ และสารเบนโทไนท์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารเบนโทไนท์และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability, k) นอกจากนี้ค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์ได้ถูกตรวจสอบเพื่อดูความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สารเบนโทไนท์ในดินทรายผสมซีเมนต์สำหรับเป็นกำแพงกันน้ำ เป็นประโยชน์สำหรับผู้ออกแบบ สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบที่ปลอดภัยและเหมาะสมต่อไป

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับดินที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ดินทราย มาทดสอบหาค่าการซึมผ่านด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant head test) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D2434-68 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability, k) เท่ากับ 2.53 m/day ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงน้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย จากนั้นได้นำทำการวิเคราะห์หาขนาดการกระจายตัวของดินทราย ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถจำแนกดินทรายได้ว่าเป็นดินกลุ่ม A-1-b สำหรับ AASHTO และเป็นดินกลุ่ม SP สำหรับวิธี Unified Soil Classification โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.47 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.76 t/m³ และมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 16.23 ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับตารางที่ 1 เป็นการแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมอื่นๆ ของตัวอย่างดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (ต่อ)

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
Coefficient of Curvature, C_c	0.69
Maximum Dry Density, MDD (t/m^3)	1.76
Optimum Moisture Content, OMC (%)	16.23

3. การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่าง นำดินทรายมาอบให้แห้งในตู้อบด้วยอุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินทรายแห้งมาผสมกับน้ำเพื่อให้ดินทรายมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 15 เพื่อให้ดินทรายมีลักษณะเป็นของเหลว คล้ายกับขั้นตอนในการทำการผสมลึก (Deep mixing method) ในขั้นตอนการทำการสร้างดินด้วยการฉีดน้ำนั่นเอง จากนั้นเตรียมน้ำปูนซีเมนต์ด้วยการผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักดินแห้งเข้ากับน้ำ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 1:1 [19, 20] เมื่อได้น้ำปูนซีเมนต์จึงทำการผสมกับตัวอย่างทรายที่เตรียมไว้ข้างต้น ผสมให้เข้ากันดีแล้วจึงนำมาบรรจุลงในโมลด์ทรงกระบอกขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ความสูง 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งไว้จนกระทั่งตัวอย่างเริ่มจับตัวเป็นก้อน แล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อถึงอายุการบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างมาทำการทดสอบแรงกดอัดในทิศทางเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 อัตราความเร็วในการกดตัวอย่าง 1 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกผลที่ได้แล้วนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับความเครียด



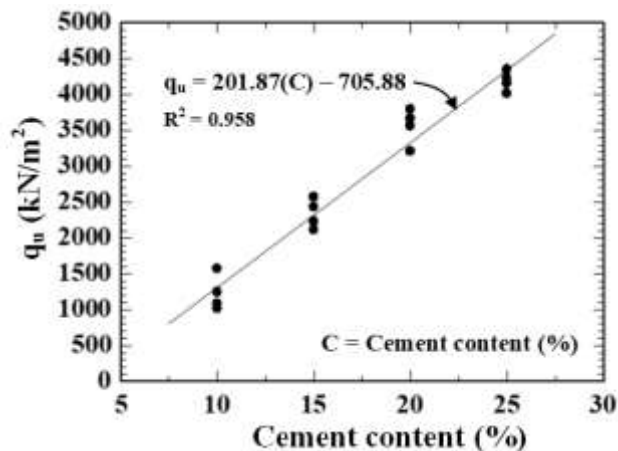
รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่าง



รูปที่ 4 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน

4. ผลการทดสอบของดินทรายผสมซีเมนต์

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของซีเมนต์ที่มีต่อค่า q_u ของดินทราย พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ทำให้ค่า q_u เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะมาจากปริมาณตัวเชื่อมประสาน (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และ (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ที่ได้จากปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันขึ้นอยู่กับการปริมาณซีเมนต์ที่ผสมเป็นหลัก ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเชื่อมยึดเม็ดดินทรายเข้าด้วยกัน ทำให้มีค่า q_u ที่เพิ่มขึ้น ดังรายงานของนักวิจัยหลายท่าน [6-16]

รูปที่ 5 ค่า q_u ของดินทรายผสมซีเมนต์

งานวิจัยนี้กำหนดให้ ค่า q_u อยู่ในช่วง 400 kPa ถึง 1000 kPa ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์โดยทั่วไป [1-9] ถ้าค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวเท่ากับ 1000 kPa

ดินทรายนี้ต้องใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 9.69 และถ้าค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวเท่ากับ 400 kPa ต้องใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5.93 ดังนั้นเมื่อต้องการผสมสารผสมเพิ่ม ได้แก่ สารโซเดียมเบนโทไนท์ลงไปในทรายซีเมนต์ จึงจำเป็นต้องกำหนดปริมาณซีเมนต์ให้มีค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากการผสมสารเบนโทไนท์มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งแรงของดินทรายผสมซีเมนต์ลดลงนั่นเอง ในการวิจัยนี้กำหนดให้ต้องใช้ค่าปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 13 และ 7 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวเท่ากับ 1918.43 kPa และ 707.21 kPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าที่ออกแบบไว้อย่างเห็นได้ชัด

จากนั้นนำดินทรายผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนเดียวกันกับการทดสอบแรงกดอัดในทิศทางเดียว ใช้อายุการบ่มเดียวกันคือ 28 วัน มาหาค่าการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่าง ด้วยวิธีการทดสอบแบบความดันแปรผัน (Falling head test) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยตัวอย่างดินจะถูกบ่มในโมลด์ทดสอบแบบที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ที่ฐานของโมลด์ตัวอย่างมีรูที่สามารถระบายน้ำออกจากตัวอย่างได้ ส่วนที่ด้านบนของกระบอกตัวอย่างจะติดกับท่อแก้ว (Standpipe) ที่ทราบเส้นผ่าศูนย์กลาง เมื่อเริ่มทำการทดสอบ จะเติมน้ำที่ทำการกำจัดฟองอากาศ (De-aired water) เรียบร้อยแล้ว ปล่อยให้ไหลผ่านตัวอย่าง บันทึกความสูงของน้ำในท่อแก้ว ที่ช่วงเวลาต่างๆ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยใช้ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างจากเดิม คำนวณผลหาค่า k เฉลี่ย

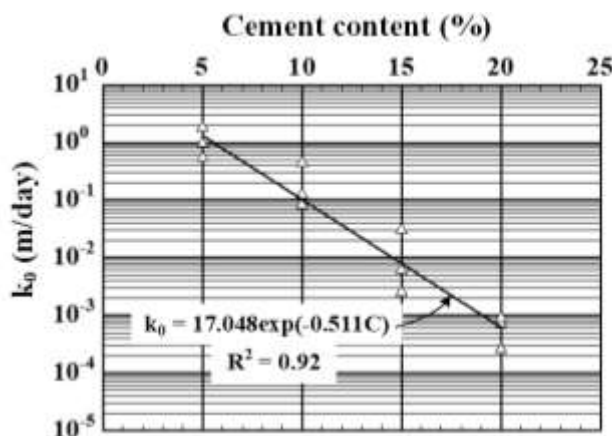


รูปที่ 6 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบความดันแปรผัน

ทดสอบ 3 ครั้งต่อ 1 กรณีศึกษา โดยในแต่ละครั้งจะเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแก้ว ได้แก่ 5 mm, 9 mm และ 12.5 mm จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยมาใช้ ตรวจสอบผลกระทบของซีเมนต์ที่มีผลต่อค่าการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างดินทราย ได้ผลทดสอบ ดังรูปที่ 7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์มีผลทำให้น้ำสามารถผ่านได้ช้าลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเป็นฟังก์ชันชี้กำลังของปริมาณซีเมนต์ ดังสมการต่อไปนี้

$$k_0 = 17.048e^{-(0.511C)} \quad (1)$$

กำหนดให้ k_0 คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ของดินซีเมนต์ผสมซีเมนต์ และ C คือร้อยละของปริมาณซีเมนต์ต่อน้ำหนักดินแห้ง แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการผสมซีเมนต์มากกว่า ร้อยละ 25 ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะที่บดน้ำ ไม่สามารถทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ ซึ่งกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องใส่สารเบนโทไนท์เพิ่มเพื่อลดค่าการซึมผ่านของน้ำอีก



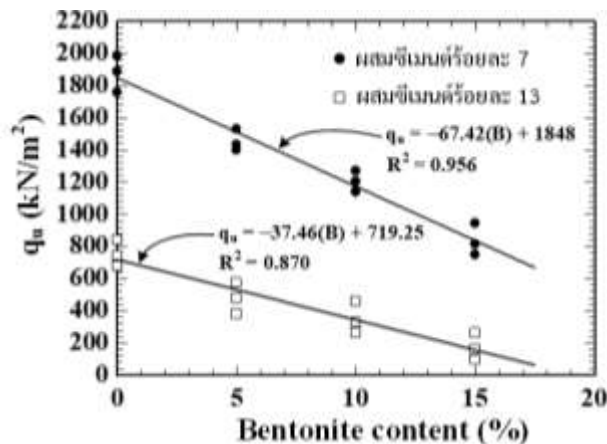
รูปที่ 7 ค่า k_0 ของดินทรายผสมซีเมนต์

5. อิทธิพลของสารเบนโทไนท์

5.1 ค่า q_u ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารโซเดียมเบนโทไนท์

ถ้ากำหนดให้ B คือร้อยละของปริมาณสารโซเดียมเบนโทไนท์ ในการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดให้ค่า B เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม จากนั้นเตรียมตัวอย่างทดสอบ โดยนำสารโซเดียมเบนโทไนท์ที่เตรียมไว้ผสมเข้ากับน้ำที่ใช้สำหรับผสมซีเมนต์เสียก่อน แล้วจึงนำส่วนผสมที่ได้ไปผสมเข้ากับตัวอย่างดินทรายที่เตรียมไว้ในลำดับต่อไป บรรจุตัวอย่างลงในแบบหล่อแบบตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างเริ่มแข็งตัวให้นำออกจากแบบหล่อตัวอย่าง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบอายุการบ่มจึงนำตัวอย่างมาทดสอบต่อไป

เมื่อครบอายุการบ่ม 28 วัน นำมาทดสอบเพื่อหาค่า q_u พบว่า ตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ร้อยละ 7 และ 13 ของน้ำหนักดินแห้ง ที่ผสมสารเบนโทไนท์ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ ค่า q_u ลดลงเมื่อมีปริมาณสารเบนโทไนท์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในทุกอัตราส่วนผสม โดยมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะสมการเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสารเบนโทไนท์ที่ผสมเพิ่มในดินทราย ซึ่งก็คือแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่งนั่นเอง ที่ทำให้องศาความเสียดทานภายในของดินทรายมีค่าลดลง เป็นผลทำให้กำลังรับกดอัดทิศทางเดียวลดลงนั่นเอง

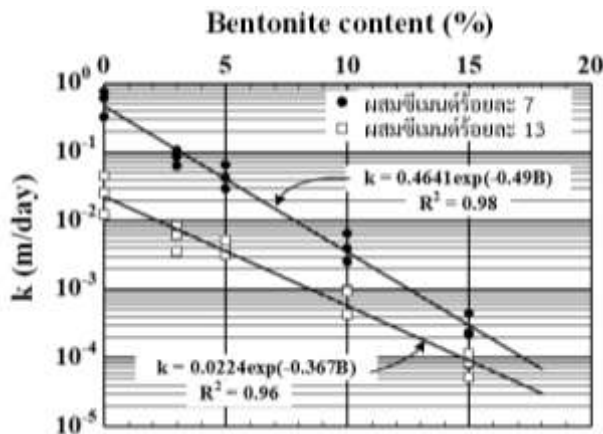


รูปที่ 8 ค่า q_u ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์

สำหรับดินทรายที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 7 และ 13 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณสารโซเดียมเบนโทไนท์มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.52 และ 12.58 ตามลำดับ พบว่าค่า q_u จะเท่ากับ 400 kPa และ 1000 kPa ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดไว้ตั้งแต่ตอนแรก

5.2 ค่า k ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารโซเดียมเบนโทไนท์

สำหรับผลทดสอบค่า k ของดินซีเมนต์ผสมสารโซเดียมเบนโทไนท์ที่ปริมาณร้อยละ 0, 3, 5, 10 และ 15 ถูกแสดงในรูปที่ 9 พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเบนโทไนท์ในดินทรายผสมซีเมนต์ มีผลทำให้ค่าการซึมผ่านของน้ำในดินน้อยลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และ B เป็นแบบฟังก์ชันชี้กำลัง (Exponential function) ที่มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.96-0.98 นอกจากนี้ ดินทรายผสมซีเมนต์และเบนโทไนท์ที่มีปริมาณซีเมนต์สูงกว่า มีผลทำให้ค่า k น้อยกว่าในทุกอัตราส่วนผสม ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณซีเมนต์ที่เสตที่สูงกว่า สามารถเข้าไปอุดช่องว่างในดินได้มากกว่า ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ยากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 9 ค่า k ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์

6. การประมาณค่าการซึมผ่านของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์

6.1 สมการประมาณค่า k และ q_u

อ้างอิงจากผลการทดสอบจากหัวข้อที่ผ่านมา นำมาหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน และค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์ ในอัตราส่วนต่างๆ ได้ถูกนำเสนอต่อไปนี้

สำหรับค่า q_u พบว่า

$$q_u = 6(B)(1 - C) + 202(C) - 706 \quad (2)$$

เมื่อ C คือ ค่าร้อยละของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมเทียบกับน้ำหนักดินแห้ง (สำหรับกรณี C อยู่ในช่วงร้อยละ 5-25)

B คือ ค่าร้อยละของปริมาณสารเบนโทไนท์ที่ใช้ผสมเทียบกับน้ำหนักซีเมนต์ (สำหรับกรณี B อยู่ในช่วงร้อยละ 0-15)

ค่า q_u ที่คำนวณได้อยู่ในหน่วยของ kPa

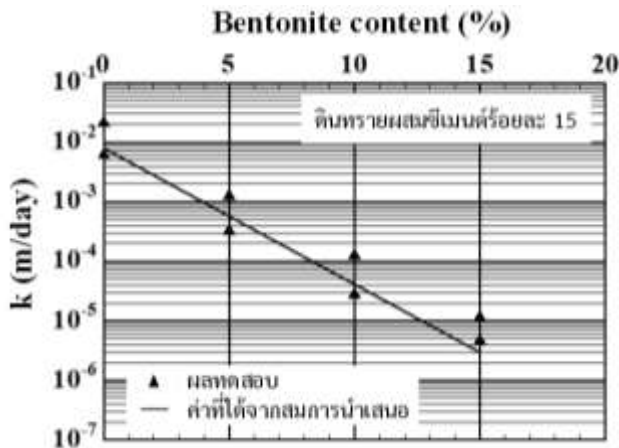
สำหรับค่า k พบว่า

$$k = k_0 e^{-(0.227+0.02C)B} \quad (3)$$

เมื่อ k_0 คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินทรายผสมซีเมนต์ (ไม่ผสมสารเบนโทไนท์) หาได้จากสมการที่ 1

6.2 เปรียบเทียบผลทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการนำเสนอ

ผลการประมาณค่าการซึมผ่านที่ได้จากสมการที่ 3 จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของดินทรายผสมซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยจะทำการเพิ่มสารเบนโทไนด์ลงไปให้อัตราส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0-15 ของน้ำหนักซีเมนต์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการนำเสนอ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการนำเสนอ

จากรูปที่ 10 เป็นผลการเปรียบเทียบค่า k ในกรณีที่ค่า C เท่ากับร้อยละ 15 ที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการที่นำเสนอ พบว่า ถึงแม้ผลการทดสอบที่ได้ค่อนข้างกระจาย อันเนื่องมาจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและปริมาณน้ำบางส่วนไหลออกจากตัวอย่างตามรอยต่อซึ่งไม่สามารถควบคุมได้จึง ทำให้ค่า k บางค่ามีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการนำเสนอ แต่การประมาณค่าด้วยสมการนำเสนอมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสมการนำเสนอสามารถใช้เพื่อประมาณค่าการซึมผ่านของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินทรายให้มีความทึบน้ำ สามารถใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเป็นกำแพงกันน้ำถาวรสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ด้วยการปรับปรุงคุณภาพการซึมผ่านของน้ำในดินด้วยสารเบนโทไนด์ สำหรับกรณีผสมซีเมนต์ในชั้นดินทรายตั้งแต่ร้อยละ 5-25 เท่านั้น จากผลทดสอบและวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ พบว่าการเพิ่มของซีเมนต์ ทำให้ค่า q_u ดินทรายผสมซีเมนต์ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่า k_0 ของดินทรายผสมซีเมนต์กลับมีค่าลดลงอย่างก้าวหน้า หลังการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ C เป็นลักษณะฟังก์ชันชี้กำลัง

2) การผสมสารเบนโทไนท์เพิ่ม ทำให้ค่า q_u และ k ของดินทรายผสมซีเมนต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า k ลดลงก้าวหน้า โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ B เป็นลักษณะฟังก์ชันชี้กำลัง

3) อ้างอิงจากผลการทดสอบ สมการการหาค่า k ของดินทรายผสมซีเมนต์และสารเบนโทไนท์ ได้ถูกนำเสนอ เมื่อนำผลการทดสอบในกรณีผสมซีเมนต์ร้อยละ 15 มาเปรียบเทียบกับ พบว่าค่า k ที่ได้จากสมการนำเสนอและจากการทดสอบมีค่าใกล้เคียง สามารถนำสมการไปใช้ในการประมาณค่า k ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมสารเบนโทไนท์สำหรับใช้ในก่อสร้างทางวิศวกรรมเพื่อเป็นกำแพงกันน้ำซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2562 (วช.) และบริษัทเกษมดีชาวด์แอนด์คอนซัลแทนท์จำกัดที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิค จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

References

- [1] Broms BB, Boman P. Lime column a new foundation method. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 1979;105(GT4):539-56.
- [2] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. Soft ground improvement in lowland and other environments. New York: ASCE; 1996.
- [3] Shen SL, Miura N, Koga H. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation. Canadian Geotechnical Journal 2003;40(2):293-307.
- [4] Okumura T. Deep lime mixing method of stabilization for marine clay. 5th Asian Regional Conf on SMFE; 1975. p. 69-75.
- [5] Terashi M. Engineering properties of lime-treated marine soils and DMM Method. Proc of the 6th Asian Regional Conf on SMFE; 1979. p. 191-4.

- [6] Miura N, Horpibulsuk S, Nagaraj TS. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and Foundations* 2001;41(5):33-45.
- [7] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj TS. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. *Geotechnique* 2003;53(4):439-44.
- [8] Horpibulsuk S, Bergado DT, Lorenzo GA. Compressibility of cement admixed clays at high water content. *Geotechnique* 2004;54(2):151-4.
- [9] Horpibulsuk S, Miura N, Koga H, Nagaraj TS. Analysis of strength development in deep mixing – A field study. *Ground Improvement* 2004;8(2):59-68.
- [10] Horpibulsuk S, Miura N, Bergado D. Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 2004;130(10):1096-105.
- [11] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj TS. Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005; 131(2):187-92.
- [12] Horpibulsuk S, Katkan W, Sirilerdwattana W, Rachan R. Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: Laboratory and field study. *Soils and Foundations* 2006;46(3):351-66.
- [13] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Construction and Building Materials* 2011; 25(4):1521-31.
- [14] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddeepong A, Chinkulkijniwat A. Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations. *Soils and Foundations* 2011;51(2):239-51.
- [15] Horpibulsuk S, Chinkulkijniwat A, Cholphatsorn A, Suebsuk J, Liu MD. Consolidation behavior of soil cement column improved ground. *Computers and Geotechnics* 2012; 43:37-50.
- [16] Wu HN, Shen SL, Ma L, Yin ZY, Horpibulsuk S. Evaluation of the strength increase of marine clay under staged embankment loading: a case study. *Marine Georesources & Geotechnology* 2015;33(6):532-41.

- [17] Broms B. Lime stabilized columns. 5th Asian Reg Conf on SMFE; 1975. p. 227-234.
- [18] Terashi M, Tanaka H. Ground improved by deep mixing method. Proc. of the 10th Int. Conf. on SMFE; 1981. p. 777-80.
- [19] Pongsivasathit S, Chai JC, Ding WQ. Consolidation settlement of floating – column - improved soft clayey deposit. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement 2013;166.1:44-58.
- [20] Pongsivasathit S, Voottipruex P, Chai JC. Settlement-time curve calculation of soil-cement column and slab improved soft clay deposit, International Association of Lowland Technology (ISSN 1344-9656) 2017;19(2).
- [21] Schwarz LG, Chirumalla M. Effect of injection pressure on permeability and strength of microfine cement grouted sand. Grouting for ground improvement: Innovative concepts and applications 2007;1-15.
- [22] Mollamahmutoglu M, Avci E. Effectiveness of microfine Portland cement grouting on the strength and permeability of medium to fine sands. Periodica Polytechnica Civil Engineering 2015;59(3):319-26.
- [23] Markou IN, Droudakis AI. Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted sands. Geotechnical and Geological Engineering 2013;31(4):1041-58.
- [24] Avci E, Mollamahmutoglu M. Permeability Characteristics of Superfine Cement-Grouted Sand. ACI Materials Journal 2017;114(1):21-8.
- [25] Ryan CR, Day SR. Soil-cement-bentonite slurry walls. Deep Foundations: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance 2002: 713-27.
- [26] Consoli NC, Heineck KS, Carraro, JAH. Portland cement stabilization of soil–bentonite for vertical cutoff walls against diesel oil contaminant. Geotechnical and Geological Engineering 2010;28(4):361-71.
- [27] Morandini TLC, Leite AL. Characterization, Hydraulic Conductivity and Compatibility of Mixtures of Tropical Soil and Bentonite for Barrier Usage Purpose. Soils and Rocks 2012;35(3):267-78.

ประวัติผู้เขียนบทความ

สุธี ปิยะพิพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th



ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัะสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: supasit.p@en.rmutt.ac.th



กำธรเกียรติ มุสิเกต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: kamtornkiat.m@en.rmutt.ac.th

Article History:

Received: November 20, 2019

Revised: April 24, 2020

Accepted: April 25, 2020