

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดคละแตกต่างกัน

สยาม แกมขุนทด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พานิช วุฒิพฤษ* และ สันชัย อินทพิชัย

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พิทยา แจ่มสว่าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 3247 อีเมล: pnv@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 18 มิถุนายน 2557 ตอรับเมื่อ 2 ธันวาคม 2557

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังจากจังหวัดกาญจนบุรี โดยนำดินเดิมมาคัดแยกขนาด แล้วนำมาผสมใหม่เกิดเป็นดินจำพวก SW, SP, SC และ CL ตามระบบเอกภาพ (USCS) จากนั้นนำมาบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน ภายหลังจากการบดอัดนำมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแบบความดันคงที่ จากการทดสอบพบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังได้แก่ ขนาดคละของดิน ปริมาณดินเหนียวและพลังงานในการบดอัด จากผลการวิจัยพบว่าดินลูกรังบดอัดที่มีขนาดคละดี มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าดินลูกรังที่มีขนาดคละไม่ดี และดินลูกรังที่ผ่านการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าลูกรังที่บดอัดแบบมาตรฐาน เนื่องจากมีอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่า จากการทำนายสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน พบว่าตัวแปรที่ส่งผลให้การทำนายแม่นยำที่สุดคือขนาดประสิทธิผลของเม็ดดิน และอัตราส่วนช่องว่าง ซึ่งให้ค่าคงที่ 26.3759 และให้ค่า $R^2 = 0.9025$

คำสำคัญ: ดินลูกรัง สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ขนาดคละของดิน

การอ้างอิงบทความ: สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤษ, สันชัย อินทพิชัย และ พิทยา แจ่มสว่าง, “ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดคละแตกต่างกัน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 11-19, ม.ค. - เม.ย. 2558. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.002>



Factors Affecting Permeability of Lateritic Soils with Different Gradations

Sayam Kamkhuntod

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Panich Voottipruex* and Sunchai Inthapichai

Associate Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Pitthaya Jamsawang

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2287-9638, E-mail: pnv@kmutnb.ac.th

Received 18 June 2014; Accepted 2 December 2014

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.12.002 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study factors affecting the permeability coefficient of lateritic soil from Kanchanaburi. The original soil was sieved and blended to form 4 types of soil namely: SW, SP, SC, and CL as classified by Unified Soil Classification System (USCS). The soils were then, compacted according to standard proctor and modified proctor test methods and constant head permeability tests on the compacted soils were conducted. It was found that the factors affecting permeability coefficient (k) included gradation, clay content and compaction energy. The test results revealed that the well graded compacted soil exhibited lower k than the poorly grade compacted soil. Moreover, the modified proctor compacted soil exhibited low k value compared to the standard proctor compacted soil. That is to say, the more the energy applied, the less the void content remained. Besides, it was found that the prediction of k value depends on the effective diameter of soil particle (d_{10}) and void ratio (e). The constant value in the predicted equation is 26.3759 with R^2 at 0.9025.

Keywords: Lateritic Soil, Permeability Coefficient, Soil Classification

Please cite this article as: S. Kamkhuntod, P. Voottipruex, S. Inthapichai and P. Jamsawang, "Factors Affecting Permeability of Lateritic Soils with Different Gradations," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-19, Jan. - Apr. 2015 (in Thai). <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.12.002>

1. บทนำ

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (k) เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำดินไปใช้ทางวิศวกรรม เช่น นำมาก่อสร้างเขื่อน ถนน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ดินมวลละเอียดที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ เพราะหากน้ำสามารถซึมผ่านได้โดยง่าย อาจนำพามวลดินออกไปจนกระทั่งคันดินสูญเสียความมั่นคงไปได้ สำหรับกรณีที่นำดินมาใช้เป็นดินถมหลังกำแพงกันดินหรือใช้เป็นทางระบายน้ำในแกนเขื่อนเพื่อลดความดันน้ำ ดินประเภทนี้จะต้องมีค่า k สูงกว่าในกรณีแรก ดังนั้นค่า k จึงเป็นคุณสมบัติสำคัญของดินที่ต้องคำนึงเมื่อนำดินมาใช้เชิงวิศวกรรม

การทดสอบความสามารถการซึมผ่านของน้ำในดินชนิดต่างๆ สามารถดำเนินการได้เร็วหรือช้าแตกต่างกันตามลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดิน หากเป็นดินเม็ดหยาบ การทดสอบกระทำได้รวดเร็วเพราะดินมีช่องโพรงต่อเนื่องขนาดใหญ่ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย แต่หากดินเป็นดินเม็ดละเอียดเช่นตะกอนทรายหรือดินเหนียวหรือดินที่มีมวลละเอียดปะปนอยู่มาก การทดสอบเพื่อหาค่า k กระทำได้ยาก ใช้เวลานาน และหากมีการบดอัดดินทำให้ช่องว่างในดินอัดลดลงและขาดความต่อเนื่อง การทดสอบจะกระทำได้ยากยิ่งขึ้นและใช้เวลานาน

นักวิจัยจำนวนมากได้ทดสอบความสามารถการซึมผ่านของดินบดอัดจำพวกทรายแล้วสร้างสมการความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่าง เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ช่วยประหยัดเวลาในการทดสอบโดย Seelheim [1] กล่าวว่าไว้ว่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงดินยกกำลังสอง นักวิจัยหลายคน [2]-[4] ได้เสนอสมการเพื่อทำนายความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดิน (k) ของวัสดุที่มีโพรงพรุน โดยสามารถทำนายค่า k ได้ด้วยความสัมพันธ์ซึ่งได้มาจากการทดลอง แบบจำลองคาพิลลารี แบบจำลองทางสถิติและทฤษฎีทางชลศาสตร์

ในปัจจุบันมีผู้นิยมนำสมการของ Hazen [5] และแผนภาพของ Naval Facilities Engineering Command

[6] มาทำนายความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินอัดตัว ทั้งนี้เพราะใช้ง่ายกว่าสมการของ Kozeny-Carman สมการของ Hazen เชื่อถือได้สำหรับดินที่อยู่ในสภาพหลวมที่มีค่าความพรุนเข้าใกล้ค่าสูงสุด โดย Chapuis and Aubertin [4] ได้แสดงสร้างสมการขึ้นใหม่โดยนำมารวมกับสมการของ Kozeny-Carman ซึ่งสามารถนำไปใช้กับดินที่มีอัตราส่วนช่องว่างต่างกัน ส่วนแผนภาพของ NAVFAC ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านว่าเป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของเม็ดดิน (d_{10}) และอัตราส่วนช่องว่าง (e) ของดิน จากการศึกษาของ Chapuis [7] พบว่าแผนภาพของ NAVFAC สามารถอธิบายได้ด้วยสมการชั้นเดียว ความสามารถของสมการที่ขยายจากสมการของ Hazen และ NAVFAC คือสมการที่ประเมินโดยเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านที่ได้จากการทดลองตัวอย่างทรายและกรวดที่ทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านแบบผนังแข็ง (Rigid Wall Permeameters) ซึ่งในที่สุดได้มีผู้นำเสนอสมการซึ่งอาศัยข้อมูลผลการทดลองห้องปฏิบัติการซึ่งทำนายได้แม่นยำกว่า งานวิจัยเรื่องนี้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดซึ่งนำมาจากอำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี โดยศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เช่น พลังงานในการบดอัด อัตราส่วนช่องว่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของเม็ดดิน (d_{10})

1.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรัง

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ดินประเภทนี้เป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานาน ประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิภาคที่มีสภาพเหมาะสมต่อการเกิดดินลูกรัง กล่าวคือมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นมีฤดูร้อนและฤดูฝนสลับกันเป็นระยะเวลาค่อนข้างยาวนาน ทำให้สามารถพบดินลูกรังได้ในทุกภาคของประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่

เกิดจากหินต้นกำเนิด เช่น หินทราย หินบะซอลท์ และ หินดินดาน ดินลูกรังที่พบในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทตามกรรมวิธีการเกิดดังนี้ [8]

ดินลูกรังชั้นต้น (Primary Lateritic Soils) หมายถึง ดินลูกรังซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ และเกิดอยู่กับที่เหนือหินเดิม มีเหล็กที่เป็นส่วนประกอบได้จากแร่จำพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมที่มีอยู่ในหินชั้นล่างที่อยู่ลึกลงไป และเคลื่อนย้ายขึ้นมาสะสมมากขึ้นในชั้นดิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในแต่ละฤดู น้ำฝนซึ่งมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์ต่างๆ ละลายอยู่จะออกซิไดซ์ธาตุจำพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมในดินกลายเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งมีสีแดง ลูกรังประเภทนี้ที่พบในประเทศไทยมักเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นของหินเดิม โดยพบว่าค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก มีค่าสูงสุดในชั้นดินลูกรังและลดลงตามความลึกจนถึงชั้นหินเดิมที่ผุพัง โดยปกติส่วนในสุดของเม็ดดินลูกรังเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ที่มีความแข็งต่ำกว่าผิวนอกซึ่งเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งมีความแข็ง ทั้งนี้ความหนาของเหล็กออกไซด์จะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพแวดล้อม

ดินลูกรังชั้นสอง (Secondary Lateritic Soils) หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดขึ้น โดยเคลื่อนย้ายมาจากหินเดิม เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านจะทำให้เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในดินแข็งตัวขึ้น โดยทั่วไปดินลูกรังประเภทนี้จะไม่แบ่งเป็นชั้นเหล็กออกไซด์สีแดงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณต่างกัน ขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินที่ทับถม เหล็กออกไซด์ในดินลูกรังชั้นที่สองนี้อยู่กระจัดกระจายมากกว่าดินลูกรังชั้นต้น มักเกิดล้อมรอบกรวดหรือชิ้นส่วนของหินที่แตกหักทำให้ดินลูกรังชั้นสองนี้มีขนาดเม็ดใหญ่ มีความแข็งที่แตกต่างกัน และแสดงชั้นของเฮมาไทต์ไลโมไนต์ และดินเหนียวเด่นชัดกว่าดินลูกรังชั้นต้น ขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กของดินลูกรังชั้นสองมีค่าต่ำกว่าดินลูกรังชั้นต้น

2. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability Test, ASTM D2434)

การทดสอบ Compaction Test จะได้ค่าความหนาแน่น



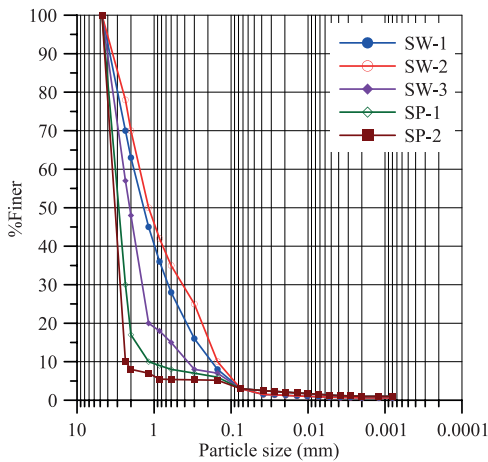
รูปที่ 1 การทดลองการหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดิน

แห่งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินลูกรังแต่ละตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ค่านี้ในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน นำแบบบดอัดตัวอย่างที่บดอัดแล้วมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบระดับน้ำคงที่ ทดลองโดยปรับความดันให้ได้ความดันที่ต้องการโดยใช้เข็มเป็นตัวควบคุมความดัน หลังจากนั้นเปิดวาล์วน้ำให้ไหลผ่านโมลตัวอย่าง รอจนกระทั่งอัตราการไหลคงที่แล้วเริ่มวัดอัตราการไหลพร้อมจับเวลา โดยที่ความดันเดียวกันจะทำการทดลอง 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงความดันทั้งหมด 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 1 แสดงการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน

ดินตัวอย่างจากจังหวัดกาญจนบุรีถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกขนาดคละ แล้วผสมขึ้นใหม่ เกิดเป็นลูกรังที่มีการกระจายขนาดคละแตกต่างกันดังตารางที่ 1 โดยสามารถจำแนกได้เป็นดินทรายที่มีขนาดคละดี ประกอบด้วย SW-1, SW-2, SW-3 และดินทรายขนาดคละไม่ดี SP-1 และ SP-2 ดินกลุ่มนี้มีปริมาณดินตะกอนทรายเท่ากันคือ 3% แต่มีขนาดคละต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2 กราฟการกระจายขนาดของลูกรังซึ่งจำแนกเป็นทรายนตะกอนทราย ประกอบด้วย SM-1, SM-2, SM-3 และ



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของเม็ดดินประเภท SW และ SP

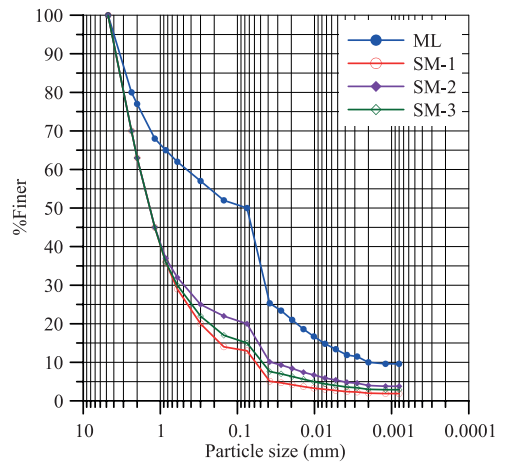
ดินตะกอนทราย ML ดินกลุ่มนี้จะมีปริมาณดินตะกอนทรายแตกต่างกันแต่มีปริมาณดินขนาดต่างๆ ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติการกระจายตัวของดินลูกรังบดอัดที่ขนาดคละต่างๆ

ชนิดดิน	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	F ₂₀₀ (%)
SW-1	0.18	0.65	1.85	10.28	1.27	3
SW-2	0.15	0.42	1.58	10.53	0.74	3
SW-3	0.35	1.51	2.51	7.17	2.60	3
SP-1	1.32	2.21	3.00	2.27	1.23	3
SP-2	2.41	2.85	3.65	1.51	0.92	3
SM-1	0.075	0.65	1.85	24.67	3.05	10
SM-2	0.038	0.50	1.85	48.68	3.56	20
SM-3	0.07	0.60	1.85	26.43	2.78	15
ML	0.002	0.042	0.45	225	1.96	50

เมื่อ

- D₁₀ คือขนาดของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงร้อยละ 10
- D₃₀ คือขนาดของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงร้อยละ 30
- D₆₀ คือขนาดของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงร้อยละ 60
- C_u คือสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของเม็ดดิน (Coefficient of Uniformity)
- C_c คือสัมประสิทธิ์ความโค้งของเม็ดดิน (Coefficient of Curvature)
- F₂₀₀ คือปริมาณร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเม็ดดินประเภท ML และ SM

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ดินแต่ละกลุ่มมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดแตกต่างกัน

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน

ก่อนการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินลูกรัง จะต้องนำดินตัวอย่างมาทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน รวมถึงคำนวณอัตราส่วนช่องว่างก่อนการทดลอง ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและอัตราส่วนช่องว่าง

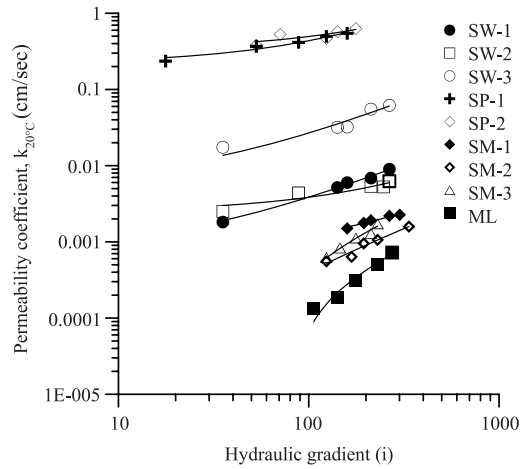
Soil Type	Maximum Dry Density (kN/m ³)		Optimum Moisture Content (%)		Void Ratio (e)	
	Standard	Modified	Standard	Modified	Standard	Modified
SW-1	18.42	19.78	10.40	8.40	0.41	0.31
SW-2	18.81	19.45	10.50	8.00	0.41	0.25
SW-3	18.28	19.40	11.40	9.70	0.42	0.34
SP-1	17.39	19.60	9.60	6.50	0.50	0.33
SP-2	17.19	19.42	7.60	6.50	0.46	0.43
SM-1	19.10	20.60	10.00	8.80	0.36	0.26
SM-2	18.90	20.28	9.70	9.00	0.32	0.27
SM-3	19.60	20.38	10.20	8.70	0.33	0.27
ML	19.20	20.55	9.00	6.90	0.29	0.28

3.3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัด

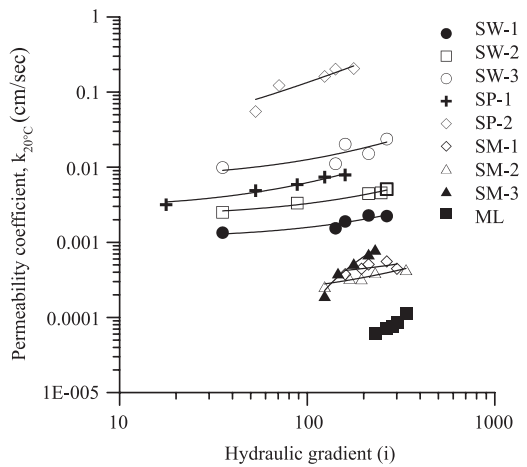
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัด ($k_{20^{\circ}\text{C}}$) ได้มาจากการชันของกราฟสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินจะแปรผันโดยตรงกับความชันทางชลศาสตร์

ถ้าความชันทางชลศาสตร์ยิ่งมากจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและความชันทางชลศาสตร์ต่างกันนั้นคือขนาดคละของเม็ดดินและวิธีการบดอัดเนื่องจากทำให้อัตราส่วนช่องว่างต่างกัน จากรูปที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดได้ดังนี้

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความลาดชันทางชลศาสตร์ของดินลูกรังบดอัดซึ่งจำแนกอยู่ในกลุ่มดินทราย พบว่าลูกรังที่จำแนกเป็นทรายที่มีขนาดคละดีมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าลูกรังที่จำแนกเป็นทรายที่มีขนาดคละไม่ดี เนื่องจากทรายที่มีขนาดคละดีทำให้เม็ดดินสามารถเรียงตัวกันแน่น ทำให้อัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่าทรายขนาดคละไม่ดี ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังจำพวกทรายขนาดคละดีมีค่าต่ำกว่าดินลูกรังจำพวกทรายขนาดคละไม่ดี ในการบดอัดแบบมาตรฐาน เมื่อความชันทางชลศาสตร์เท่ากับ 25 ดิน SP-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าดิน SW-1 ประมาณ 9 เท่า เมื่อความชันทางชลศาสตร์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 160 ดิน SP-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านไหลสูงกว่าดิน SW-1 ประมาณ 10 เท่าในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลูกรังจำพวกทราย SW-1, SW-2 และ SW-3 ลดต่ำลงมากใกล้เคียงกันและต้องใช้ความชันทางชลศาสตร์สูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานถึง 75 เท่า น้ำจึงเริ่มซึมผ่านได้ แต่เมื่อพิจารณาดิน SP-2 เมื่อความชันทางชลศาสตร์เท่ากับ 90 ดิน SP-2 มีค่าสัมประสิทธิ์



(ก) การบดอัดแบบมาตรฐาน



(ข) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันทางชลศาสตร์กับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัด

การซึมผ่านสูงกว่าดิน SW-1 ประมาณ 10 เท่า เมื่อความชันทางชลศาสตร์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 300 ดิน SP-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าดิน SW-1 ประมาณ 10 เท่า

สำหรับดินที่มีดินตะกอนทรายปะปนอยู่ในปริมาณที่มากได้แก่ดินจำพวก ML และ SM จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำมาก โดยที่ความชันทางชลศาสตร์ 230 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ระหว่าง 0.00005-0.0006 เมตร

ต่อวินาที ที่ความชันทางชลศาสตร์ 340 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ระหว่าง 0.0001 - 0.0016 เมตรต่อวินาที ดินลูกรังที่มีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าดินลูกรังที่มีการบดอัดแบบมาตรฐาน เนื่องจากผลของอัตราส่วนช่องว่างในดินที่มีน้อยกว่า ดังตารางที่ 3 ซึ่งสรุปค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ ($k_{20^{\circ}\text{C}}$) คำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2)

$$k = \frac{Q}{Ait} = \frac{QL}{Ath} \quad (1)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านมวลดิน

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

t = เวลาของน้ำที่ไหลซึมผ่านของน้ำในดิน

h = ระดับน้ำในช่วงความยาวการไหลซึม

L = ความยาวของตัวอย่างดิน

i = ความชันทางชลศาสตร์

ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำที่มีต่อค่า k ของดินที่อุณหภูมิ 20°C หาได้จาก

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = k_T \frac{\mu_{T^{\circ}\text{C}}}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}} \quad (2)$$

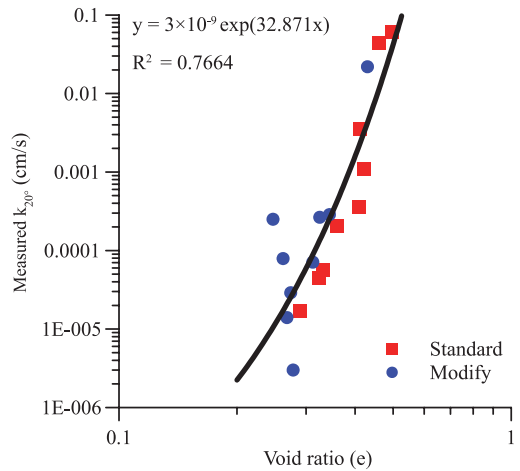
เมื่อ $k_{20^{\circ}\text{C}}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ได้ที่อุณหภูมิ 20°C

k_T = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ได้ที่อุณหภูมิ T°C

$\mu_{T^{\circ}\text{C}}$ = ความหนืดของน้ำ ที่อุณหภูมิ T°C

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแต่ละชนิด

Soil Type	Void Ratio (e)		Permeability Coefficient $k_{20^{\circ}\text{C}} \times 10^{-6}$ (cm/sec)	
	Standard	Modified	Standard	Modified
SW-1	0.410	0.312	356	71
SW-2	0.412	0.247	3490	250
SW-3	0.421	0.344	1080	287
SP-1	0.497	0.325	59900	265
SP-2	0.460	0.430	44700	21900
SM-1	0.359	0.262	205	79
SM-2	0.323	0.268	45	14
SM-3	0.332	0.274	56	29
ML	0.289	0.278	17	3



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินและอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

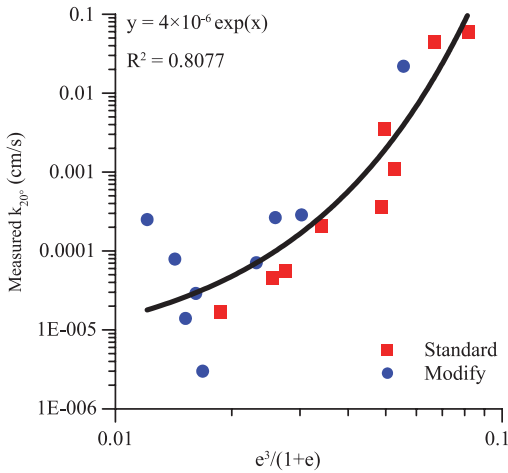
4. การหาสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัด

4.1 การทำนายโดยใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่างเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนช่องว่างในมวลดินลูกรังบดอัด พบว่าเมื่ออัตราส่วนช่องว่างในดินเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในมวลดินสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากช่องโพรงในดินมีขนาดใหญ่ขึ้น การไหลของน้ำในดินย่อมสะดวกมากขึ้น ดังนั้นสมการที่ได้คือ

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = 3 \times 10^{-9} \exp(32.871e) \quad (3)$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.7664$ ซึ่งมีค่าน้อยเกินไปแสดงถึงสมการที่ได้อัตราส่วนช่องว่างเพียงอย่างเดียวให้ความแม่นยำที่ต่ำเกินไป ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนอัตราส่วนช่องว่าง e ให้อยู่ในรูปของค่า $e^3/(1+e)$ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับค่า $e^3/(1+e)$ พบว่าเมื่อค่า $e^3/(1+e)$ เพิ่มสูงขึ้นจะ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินและค่า $e^3/(1+e)$ ของตัวอย่างดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำในมวลดินสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสมการที่ได้คือ

$$k_{20^\circ c} = 4 \times 10^{-6} \exp(124.34e^3 / (1+e)) \quad (4)$$

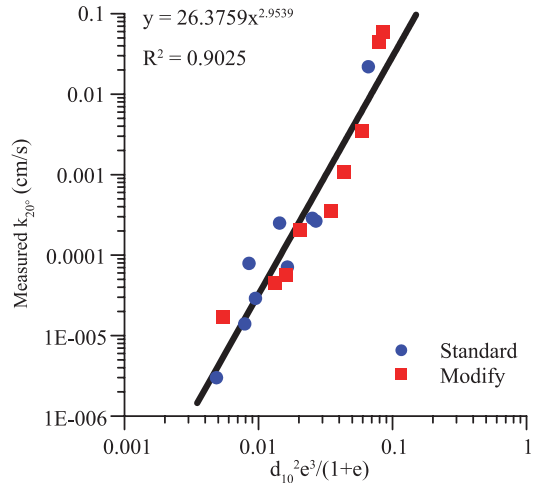
โดยมีค่า $R^2 = 0.8077$ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าสมการที่ (3) จึงให้ความแม่นยำที่สูงกว่า

4.2 การทำนายโดยใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่างและขนาดละของเม็ดดิน

การทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำโดยใช้อัตราส่วนช่องว่างเพียงอย่างเดียวถือว่ามีความแม่นยำที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นขนาดละของเม็ดดินอาจเป็นตัวเป็นหนึ่งส่งผล ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า d_{10} มาใช้ทำนายร่วมกับกับค่า $e^3/(1+e)$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 สมการที่ได้คือ

$$k_{20^\circ c} = 26.3759(d_{10}^2 e^3 / (1+e))^{2.9539} \quad (5)$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.9025$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการ (3) และ (4) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สมการที่ (3) สามารถใช้ทำนาย



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินและค่า $d_{10}^2 e^3/(1+e)$ ของตัวอย่างดินทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดได้เป็นอย่างดี

5. สรุป

ดินลูกรังบดอัดที่มีขนาดละเอียดกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินต่ำกว่าดินลูกรังบดอัดที่มีขนาดละเอียด โดยดินลูกรังที่มีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินต่ำกว่าดินลูกรังที่ได้รับการบดอัดแบบมาตรฐานเนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างที่ต่างกัน และการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดต้องคำนึงถึงค่า Effective Size และค่าอัตราส่วนช่องว่าง ซึ่งทำนายค่าได้อย่างแม่นยำโดยมีสมการดังนี้

$$k_{20^\circ c} = 26.3759(d_{10}^2 e^3 / (1+e))^{2.9539}$$

โดยมีค่า $R^2 = 0.9025$

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ผู้สนับสนุน



ทุนวิจัยประจำปีการศึกษา 2556 ขอขอบคุณภาควิชา
ครุศาสตร์โยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ผู้เอื้อเฟื้อสถานที่
อุปกรณ์ เครื่องมือ ขอขอบคุณ นักศึกษา เจ้าหน้าที่ ผู้มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกคนที่มีส่วนร่วมให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Seelhem, Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens, Zeitschrift für analytische Chemie, 19, 1880, pp. 387-402.
- [2] M. Mbonimpa, M. Aubertin, R.P. Chapuis, and B. Bussiere, "Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 20, pp. 235-259, 2002.
- [3] M. Aubertin, M. Mbonimpa, B. Bussiere, and R.P. Chapuis, "A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, pp. 1104-1122, 2003.
- [4] R.P. Chapuis and M. Aubertin, "On the Use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, pp. 616-628, 2003.
- [5] A. Hazen, Discussion of "Dams on sand formations," by A.C. Koenig, Transactions of American Society of Civil Engineers, 73: pp.199-203, 1911.
- [6] NAVFAC, Soil mechanics, foundations, and earth structures, Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) design manual DM7. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 1974.
- [7] R.P. Chapuis, "Permeability tests in rigid wall permeameters: determining the degree of saturation, its evolution and influence on test results," *Geotechnical Journal*, vol. 39, pp.417-439, 2004.
- [8] M. Medhi, Hongnoi, "Effects of Method of Preparation on the Compaction and Strength Characteristics of Lateritic Soils," Master thesis No.256, Asian Institute of Technology, 1969.