

การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัด Prediction of Permeability Coefficient of Compacted Lateritic Soils

สยาม อุ่นมงคลมิตร^{1*} อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต² และ พิทยา แจ่มสว่าง³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: siam_aunmongkonmit@hotmail.com

บทคัดย่อ

เป้าหมายของงานวิจัยชิ้นนี้ทำเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าการซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดและเพื่อสร้างสมการสำหรับการใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ใช้น้ำดินลูกรังจาก 3 แหล่งซึ่งได้มาจากภาคกลาง, ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เริ่มด้วยการทดสอบหาขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังได้รับการบดอัดด้วยพลังงานที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้ง ระดับพลังงานต่างๆ จากนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนั้นดำเนินการโดยใช้วิธีความดันคงที่ในโมลทดสอบแบบผนังแข็ง สุดท้ายข้อมูลทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์โดยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุเพื่อสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลูกรังบดอัด ซึ่งพบว่าตัวแปรการกระจายตัวของเม็ดดิน, ปริมาณดินเม็ดละเอียด, ความหนาแน่นแห้งและอัตราส่วนช่องว่างของดินลูกรังบดอัดนั้นล้วนส่งผลโดยตรงต่อการซึมผ่านซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 7.89×10^{-9} ถึง 2.16×10^{-5} ซม./วินาที สุดท้ายสมการการทำนายซึ่งสร้างขึ้นจากตัวแปรหลัก 5 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลูกรังบดอัด ได้แก่ ปริมาณดินเม็ดละเอียด, ตัวแปรด้านขนาดผล, อัตราส่วนช่องว่าง, ระดับพลังงานบดอัดและความหนาแน่นแห้งส่งผลให้สมการมีความแม่นยำสูง $R^2 \geq 0.99$
คำสำคัญ: ดินลูกรังบดอัด, ระดับพลังงานในการบดอัด, การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน, การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

Abstract

Objectives of this research are to study parameters affecting permeability of compacted lateritic soils, and to create equations for predicting their permeability coefficients. Three sources of the laterite soils were obtained from central, northern and northeast Thailand. Grain size distribution of the soil samples were performed before and after compaction. Five degrees of compaction energy were used to generate various dry densities of the compacted samples based on five international compaction standards. The determination of permeability

coefficient was then performed using a rigid-wall permeameter constant head. Finally, all data were analyzed by multiple linear regression to generate the prediction equations of permeability coefficients of compacted laterite soils. Grain size distribution, fine content, density and void ratio of compacted lateritic soils directly affected the permeability coefficients, which ranged between 7.89×10^{-9} and 2.16×10^{-5} cm/sec. The prediction equations, which were created based on five main parameters affecting permeability coefficients of compacted lateritic soils, including fine content, effective size, void ratio, compaction energy and dry density provided a high accuracy with $R^2 \geq 0.99$.

Keywords: Compacted lateritic soil, Degree of compaction, Grain size distribution, Prediction of permeability coefficient

1. คำนำ

ดินลูกรังถือเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ซึ่งประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิภาคที่มีสภาพเหมาะสมต่อการเกิดดินลูกรังซึ่งโดยทั่วไปความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.65-3.46 โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กออกไซด์ (ปริมาณเหล็กออกไซด์จะแปรผันตรงกับค่าความถ่วงจำเพาะ) และค่าความเป็นพลาสติกจะขึ้นอยู่กับปริมาณดินเหนียว ซึ่งมีค่าไม่แน่นอนเพราะเกิดจากกระบวนการ Laterization (Laterization หมายถึง ขบวนการทางเคมี-กายภาพของดินและหินเกิดการเปลี่ยนแปลงจนกลายเป็นลูกรัง) กล่าวคือ ถ้ามีการชะล้างและเกิดกระบวนการ Laterization สูงจะส่งผลให้ค่าความเป็นพลาสติกลดลง สาเหตุที่ดินลูกรังถูกนำมาใช้ด้านการก่อสร้างอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถหาได้ง่าย, ราคาไม่แพงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงหลังจากทำการบดอัดซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา อาทิ เช่น ถนน, กำแพงกันดิน, งานเขื่อนหรือใช้เป็นฐานรากเพื่อรับน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างแต่เนื่องด้วยดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างภายในมวลดินที่สามารถเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินถือเป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง

ต้องพิจารณา เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำส่งผลโดยตรงต่อแรงดันน้ำภายในมวลดิน, อัตราการทรุดตัวของชั้นดินจากน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในขณะที่ก่อสร้างหรือหลังก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์(ขณะใช้งาน) โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินนั้นจะใช้เวลานานรวมถึงหากมีการบดอัดดินจะส่งผลให้ช่องว่างในดินลดลงและขาดความต่อเนื่องจึงทำให้การทดสอบเป็นไปได้ยากและใช้เวลานานมากยิ่งขึ้น ที่ผ่านมามีการศึกษาดังกล่าวถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินจากคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดดิน [13], [15], [16], [19], [24], [28] และ [30] การซึมผ่านน้ำในมวลดินนั้นอาศัยตัวแปรหลักคือ ความพรุนหรือช่องว่างที่เชื่อมต่อกันภายในมวลดิน ซึ่งแต่เดิมนั้นมีศึกษาและพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างภายในมวลดิน ยกกำลังสอง [17] หลังจากนั้นนักวิจัยอีกมากมายศึกษาพัฒนาการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพื่อต้องการให้เกิดความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงสามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำได้กับดินหลากหลายประเภทจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นสาเหตุให้งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาตัวแปรหรือคุณสมบัติที่ส่งผลโดยตรงและสามารถนำมาใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดแต่ละภูมิภาคในประเทศไทยซึ่งเป็นการวิจัยที่ศึกษาต่อยอดมาจากงานวิจัยของ S. Kamkhuntod และคณะ [26] ซึ่งทำการศึกษาดัชนีที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดละเอียดต่างกัน โดยพบว่าตัวแปรที่ส่งผลให้การทำนายมีความแม่นยำที่สุดคือ ขนาดประสิทธิผลของเม็ดดินและอัตราส่วนช่องว่างจึงส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้มีเป้าหมายในการศึกษาเพิ่มเติมถึงตัวแปรอื่นๆที่จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดในประเทศไทย อันได้แก่ ตัวแปรจากขนาดและปริมาณดินละเอียดของดินลูกรัง รวมไปถึงอิทธิพลที่ได้รับจากการบดอัด ณ พลังงานที่แตกต่างกันจึงถือว่า พลังงานในการบดอัด เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่จะถูกนำมาพิจารณา จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เพื่อคาดหวังว่างานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ที่สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบหรือศึกษาไปในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ดินลูกรังจาก 3 ภูมิภาคในประเทศไทย ได้แก่ ภาคกลาง จากจังหวัดสระบุรี, ภาคเหนือจากจังหวัดน่านและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากจังหวัดนครราชสีมา มีคุณสมบัติตามตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติ	ภาคกลาง	ภาคเหนือ	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
G _s	2.77	2.66	2.78
W _n (%)	9	16	15
LL (%)	30.8	56.8	35.7

PL (%)	16.0	27.2	14.7
D ₁₀ (mm.)	0.0008	-	0.0005
D ₃₀ (mm.)	0.126	0.0011	0.29
D ₅₀ (mm.)	1.483	0.07	3
D ₆₀ (mm.)	3.452	1.5	4.2
C _u	4157	-	8400
C _c	6	-	40
Gravel (%)	33	31	36
Sand (%)	39	19	42
Fines (%)	28	51	22
Classify USCS	Clayey sand with gravel (SC)	Gravelly fat clay with sand (CH)	Clayey sand with gravel (SC)

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.2.1 การทดสอบหาค่าขนาดคละ

การหาขนาดคละของดินลูกรังจากทั้ง 3 ภูมิภาคนั้นจะทำตามมาตรฐานของ ASTM D422 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ดินลูกรังที่ผ่านตะแกรงขนาด ¾ นิ้ว หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด 19 มิลลิเมตร จากนั้นทำการหาขนาดคละด้วยวิธีตะแกรงร่อนและวิธีตกตะกอนแล้วค่อยนำมาจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) รวมไปถึงการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าขีดจำกัดความชื้นเหลวตามมาตรฐานของ ASTM D854, ASTM D4318 และ ASTM D427 ตามลำดับ

2.2.2 การทดสอบบดอัด

ในส่วนของการบดอัดนี้จะทำการบดอัดในระดับพลังงานที่แตกต่างกัน 5 พลังงาน (โดยจะเรียงจากพลังงานต่ำไปสูง) ได้แก่ 1. การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduce Standard compaction), 2. การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard compaction), 3. การบดอัดแบบ W.A.S (West African Standard), 4. การบดอัดแบบต่ำกว่าวิธีดัดแปลง (Reduce Modified compaction) และสุดท้าย 5. การบดอัดดัดแปลง (Modified compaction) ดังตารางที่ 2.

ตารางที่ 2. ระดับพลังงานบดอัดในแต่ละมาตรฐาน

วิธีการทดสอบ	จำนวนชั้น	จำนวนครั้งต่อชั้น	พลังงาน (kN-m/m ³)	อัตราส่วนของพลังงาน
1	3	34	358.85	0.61
2	3	56	591.05	1
3	5	22	1,053.21	1.78
4	3	56	1,608.54	2.72
5	5	56	2,680.89	4.54

2.2.3 การทดสอบการซึมผ่านน้ำในดินบดอัด

เริ่มต้นด้วยการทดสอบบดอัดดินตัวอย่าง ณ พลังงานต่างๆด้วยปริมาณความชื้นเหมาะสมของแต่ละพลังงาน แล้วนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24

ชั่วโมง ให้ตัวอย่างมวลดินอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจาก ฟองอากาศภายในมวลดินที่อาจจะส่งผลให้น้ำไหลผ่านไปได้ยากมากขึ้น หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำโดยใช้โบลบทดสอบแบบผนังแข็ง (Rigid-wall permeameter) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ด้วยวิธีความดันคงที่ตามมาตรฐาน ASTM D5856 ซึ่งจะทำการทดสอบโดยค่อยๆเพิ่มแรงดันข้างและรอให้น้ำเริ่มไหลซึมผ่านมวลดินคงที่แล้วค่อยๆทำการทดสอบ ซึ่งจะทำการทั้งหมด 3 ครั้งต่อแรงดันหนึ่งค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ยและทำการค่อยๆเพิ่มแรงดันแล้วรอให้แรงดันคงที่ เป็นจำนวนทั้งหมด 5 ค่าแรงดันต่อหนึ่งตัวอย่างทดสอบ ท้ายที่สุดคำนวณหาค่าการซึมผ่านน้ำในดินบดอัดเฉลี่ยจากสมการที่ (1)

$$k = \frac{QL\gamma_w}{APt} \quad (1)$$

โดยที่ Q = ปริมาณน้ำจากการทดสอบ (cm.³)

L = ความยาวตัวอย่างดิน (cm.)

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน (cm.²)

P = แรงดันที่ใช้ (kPa)

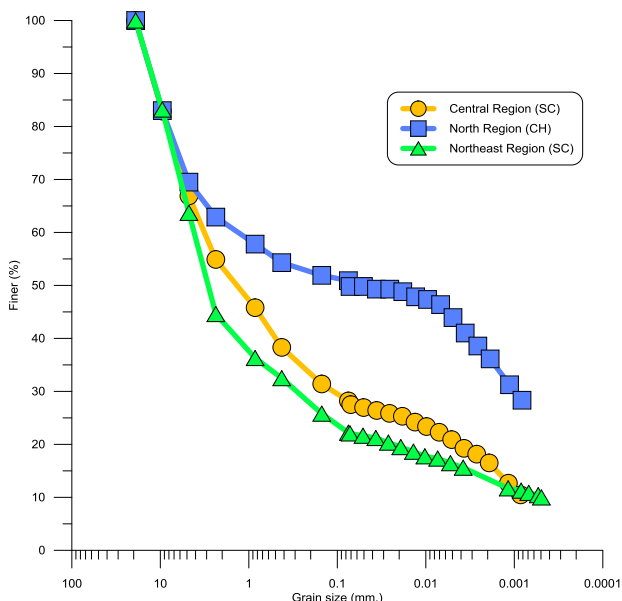
t = เวลาในการทดสอบ (second)

γ_w = หน่วยน้ำหนักน้ำ (N/m³)

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ขนาดคละและการบดอัดของดินลูกรัง

ขนาดคละของดินลูกรังก่อนได้รับการบดอัดจะแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งหลังจากได้รับการบดอัดแล้วนั้นจะส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเม็ดดินเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 1 ขนาดคละของดินลูกรังก่อนได้รับการบดอัด

ตารางที่ 3. ขนาดคละของดินลูกรังหลังได้รับการบดอัด

ตัวอย่างดิน	พลังงานบดอัด (kN-m/m ³)	คุณสมบัติ		
		d ₁₀ (mm.)	d ₅₀ (mm.)	Fines (%)
ภาคกลาง	358.85	0.0006	0.4672	41.2
	591.05	0.0008	0.311	42.7
	1,053.21	0.0005	0.1672	47.6
	1,608.54	0.0006	0.0635	49.9
	2,680.89	0.0005	0.0317	51.3
ภาคเหนือ	358.85	-	0.0048	59.2
	591.05	-	0.002	71.2
	1,053.21	-	0.0018	71.6
	1,608.54	-	0.0017	73.7
	2,680.89	-	0.0016	76.8
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	358.85	0.0005	2	23.8
	591.05	-	1.4	26.3
	1,053.21	-	0.9	27.9
	1,608.54	-	0.43	29.6
	2,680.89	-	0.25	33.9

ผลการทดสอบหลังการบดอัดในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าหลังจากได้รับพลังงานบดอัดจะส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเม็ดดินเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ตัวแปรด้านขนาดคละ, ปริมาณดินเม็ดละเอียด ซึ่งแต่เดิมนั้นงานวิจัยที่ศึกษาการทำนายค่าการซึมผ่านของ [18] จะให้ความสำคัญกับตัวแปร ขนาดเม็ด-ดินประสิทธิผล (d₁₀) แต่เนื่องจากตัวอย่างดินลูกรังในงานวิจัยนี้ไม่สามารถหาค่า d₁₀ หลังจากการทดสอบด้านการบดอัดได้เพราะดินลูกรังมีปริมาณดินเม็ดละเอียดที่สูงมากขึ้นตามพลังงานบดอัด จึงเป็นเหตุให้เลือกตัวแปร ขนาดคละเฉลี่ยกึ่งกลาง (d₅₀) และ ปริมาณดินเม็ดละเอียด (Fines content, F₂₀₀) เข้ามาร่วมพิจารณาเพิ่มเติม

ตารางที่ 4. คุณสมบัติของดินลูกรังหลังได้รับการบดอัด

ตัวอย่างดิน	พลังงานบดอัด (kN-m/m ³)	คุณสมบัติ		
		ρ _d (g/cm ³)	OMC (%)	Void ratio
ภาคกลาง	358.85	1.78	15	0.58
	591.05	1.83	15	0.49
	1,053.21	1.90	11	0.47
	1,608.54	1.97	11	0.43
	2,680.89	2.01	9	0.43
ภาคเหนือ	358.85	1.74	23	0.53
	591.05	1.81	21	0.47
	1,053.21	1.84	17	0.45
	1,608.54	1.86	16	0.42
	2,680.89	1.88	14	0.41
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	358.85	1.66	21	0.67
	591.05	1.71	18	0.63
	1,053.21	1.77	15	0.57
	1,608.54	1.84	13	0.51
	2,680.89	1.86	12	0.49

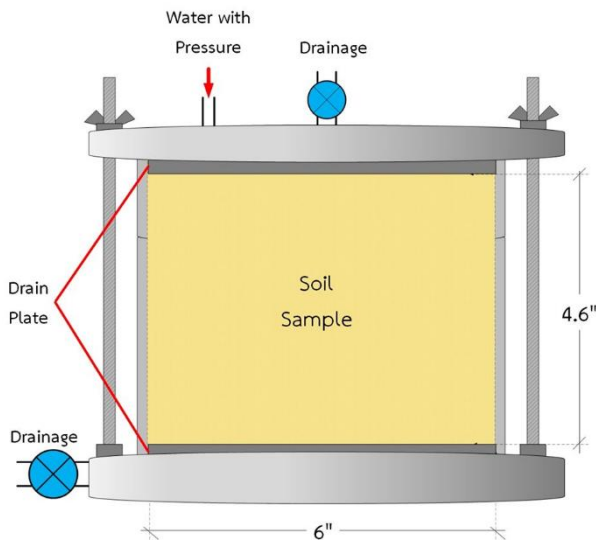
รวมไปถึงค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นแต่จะแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนช่องว่างจากพลังงานบดอัดที่ได้รับ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการซึมผ่าน กล่าวคือ ยิ่งอัตราส่วนช่องว่างต่ำลงจะยิ่งส่งผลให้เส้นทางการไหลของน้ำลดลงและเป็นไปได้ยากมากยิ่งขึ้น

3.2 การซึมผ่านของน้ำในดินบดอัด

ส่วนต่อมาเป็นผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดในแต่ละระดับพลังงานจะแสดงในตารางที่ 5.

ตารางที่ 5. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินลูกรังหลังได้รับการบดอัด

ตัวอย่างดิน	พลังงานบดอัด (kJ-m/m ³)	คุณสมบัติ	
		Permeability (cm/sec)	Void ratio
ภาคกลาง	358.85	2.16×10^{-5}	0.52
	591.05	1.68×10^{-5}	0.47
	1,053.21	4.68×10^{-6}	0.45
	1,608.54	6.96×10^{-7}	0.40
	2,680.89	1.71×10^{-7}	0.36
ภาคเหนือ	358.85	7.27×10^{-7}	0.60
	591.05	2.31×10^{-8}	0.54
	1,053.21	1.38×10^{-8}	0.51
	1,608.54	8.98×10^{-9}	0.49
	2,680.89	7.89×10^{-9}	0.46
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	358.85	2.33×10^{-7}	0.70
	591.05	1.92×10^{-7}	0.63
	1,053.21	1.66×10^{-7}	0.58
	1,608.54	1.6×10^{-7}	0.54
	2,680.89	1.53×10^{-7}	0.52



รูปที่ 2. อุปกรณ์โมลที่ใช้ทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำในดินลูกรังบดอัด

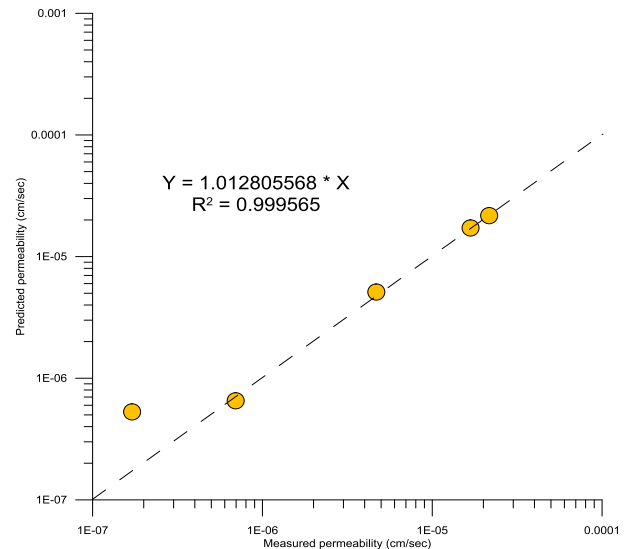
หลังจากนั้นนำตัวแปรที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์และสร้างสมการที่ใช้ทำนายค่าการซึมผ่าน ได้แก่ ภาคกลาง, ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังสมการที่ (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

$$k_{20^\circ C} = 0.0000472 - (0.0166D_{10}) - (0.00000384F_{200}) + (0.0000781\rho_d) \quad (2)$$

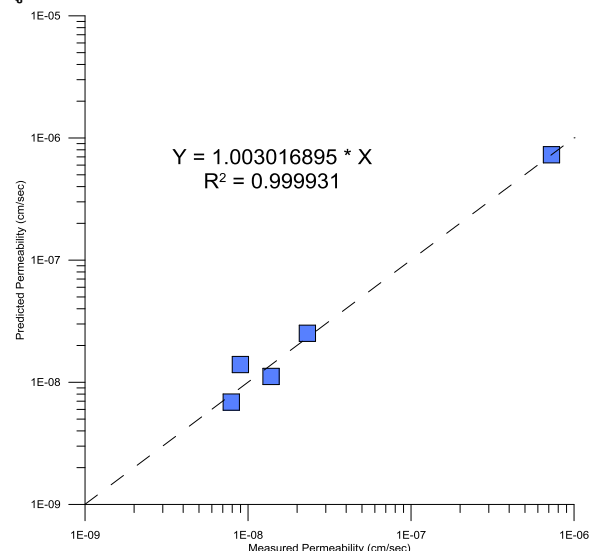
$$k_{20^\circ C} = 8.25 \times 10^{-7} + (0.000254D_{50}) - (6.84 \times 10^{-9}F_{200}) - (1.52 \times 10^{-6}e) \quad (3)$$

$$k_{20^\circ C} = 2.68 \times 10^{-8} + (5.04 \times 10^{-7}e) - (6.61 \times 10^{-9}F_{200}) + (3.340 \times 10^{-11}E) \quad (4)$$

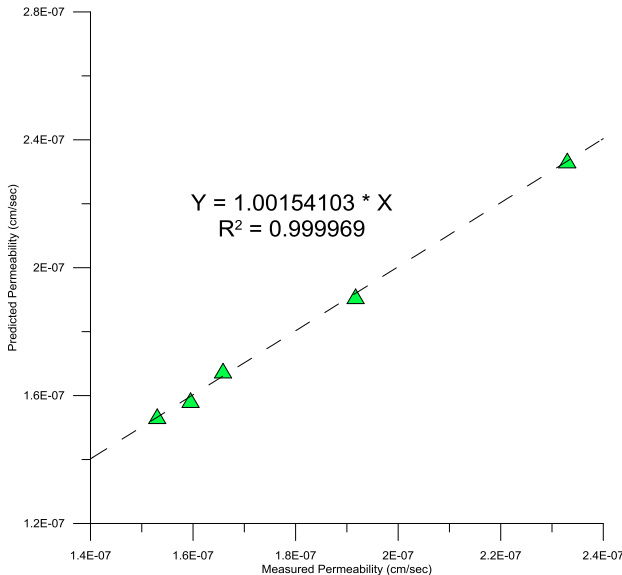
โดยที่ D_{10} คือ ขนาดเม็ดดินประสิทธิผล, D_{50} คือ ขนาดคละเฉลี่ยกึ่งกลาง, F_{200} คือ ปริมาณดินเม็ดละเอียด, ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้ง, e คือ อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio), E คือ พลังงานบดอัด



รูปที่ 3. เปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการของดินภาคกลาง



รูปที่ 4. เปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการของดินภาคเหนือ



รูปที่ 5. เปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการของดินภาค- ตะวันออกเฉียงเหนือ

จากการทดสอบพบว่าค่าการซึมผ่านของตัวอย่างดินลูกรังบดอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 7.89×10^{-9} ถึง 2.16×10^{-5} ซม./วินาที และพบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากสมการที่ใช้ทำนายค่าการซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดทั้ง 3 ภูมิภาคนั้นแสดงให้เห็นว่าสมการทั้ง 3 สมการ มีความน่าเชื่อถือมากเพียงพอที่จะใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในดินลูกรังบดอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ สังเกตได้จากรูปที่ 3, 4 และ 5 ค่าการซึมผ่านของตัวอย่างดินภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือนั้นอยู่ในช่วงค่าทั่วไปของดินลูกรังบดอัด ซึ่งมีค่า 10^{-3} - 10^{-8} แต่ภาคเหนือนั้นมีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่ามาก โดยที่ค่าการซึมผ่านของดินลูกรังจากภาคเหนือจะมีค่าต่ำสุดจะอยู่ที่ 7.89×10^{-9} เนื่องจากดินลูกรังจากภาคเหนือนั้นมีปริมาณดินเม็ดละเอียดที่สูงกว่าดินจากแหล่งอื่นๆจนสามารถจำแนกได้ว่าเป็น ดินเหนียว ซึ่งจะมีค่าการซึมผ่านอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-9} สำหรับดินเหนียวบดอัด

4. สรุปผล

ในการศึกษางานวิจัยชิ้นนี้พบว่าตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อดินทั้ง 3 ภาคคือ ปริมาณดินเม็ดละเอียด เพราะว่าการซึมผ่าน (ส่วนใหญ่) จะเกิดในระดับ macro-pores (ขนาดมากกว่า 0.075 มม.) [19], [24] นอกจากนี้ตัวแปรด้านขนาดอนุภาคเม็ดดินนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวแปรขนาดเม็ดดินประสิทธิผลหรือ d_{10} นั้นส่งผลมากกว่า d_{50} (ค่าขนาดกึ่งกลางของขนาดผลทั้งหมด) [28] แต่ตัวอย่างดินจากภาคเหนือนั้นเนื่องจากมีดินเม็ดละเอียดเป็นจำนวนมากจึงไม่สามารถใช้ d_{10} ได้ จึงเลือกใช้ค่ากึ่งกลางของขนาดอนุภาค คือ d_{50} ในการศึกษาพิจารณา นอกจากนี้ตัวแปร อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) ที่เป็นตัวแปรหลักโดยตรงต่อการซึมผ่านอย่างที่ทราบกันดี แต่อาจจะไม่ได้สัมพันธ์กับค่าการซึมผ่านเสมอไป เนื่องจากช่องว่างในมวลดินจะมีรูตันที่ไม่เชื่อมต่อกับรูพรุนอื่นๆทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านได้ เรียกว่า dead-end pores ซึ่งเกิดจากบริเวณผิวและระหว่างชั้นของอนุภาคดินเหนียว ก่อให้เกิดพื้นที่รูพรุนที่ไม่ได้มีส่วนในการไหลของ

น้ำหรือเป็นรูน้ำซึ่งจึงไม่สามารถอาศัยตัวแปรอัตราส่วนช่องว่างได้เพียงตัวแปรเดียวในการพิจารณา [25] ในการศึกษาวิจัยนี้ตัวแปรหลักล้วนแต่ที่ได้รับอิทธิพลมาจากพลังงานบดอัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วนช่องว่าง, ความหนาแน่นและตัวแปรตามในด้านขนาดผลของดินอันได้แก่ d_{10} , d_{50} และปริมาณดินเม็ดละเอียด (Fines content, F_{200})

ซึ่งจะส่งผลให้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์และสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทำนายค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังบดอัดให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นกรณีศึกษา, เปรียบเทียบและพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM D 1557-00 (2000). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³), Annual Book of ASTM Standards.
- [2] ASTM D 422-63. (1963). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, Annual Book of ASTM Standards.
- [3] ASTM D 427-93 (1993). *Standard Test Method for Shrinkage Factor of Soil by Mercury Method*, Annual Book of ASTM Standards.
- [4] ASTM D 4318-93 (1993). *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plastic Index of Soils*, Annual Book of ASTM Standards.
- [5] ASTM D 698-00 (2000). *Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³)*, Annual Book of ASTM Standards.
- [6] ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [7] ASTM D5856-15, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [8] ASTM D854-92. (1992). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, Annual Book of ASTM Standards.
- [9] Bello Yamusa, Yamusa & Yunus, Nor & Ahmad, Kamarudin & Rahman, Norhan & Sa'ari, Radzuan. (2018). Effects of fines content on hydraulic

- conductivity and morphology of laterite soil as hydraulic barrier. E3S Web of Conferences. 34.01005.10.1051/e3sconf/20183401005.
- [10] Carman, P.C. 1937. Fluid Flow through Granular Beds. Trans.Inst.Chem. Eng. 15,150.
- [11] Carman, P.C. 1956. Flow of Gases through Porous Media. Butterworths Scientific Publications, London.
- [12] Carrier, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(11), 1054–1056. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:11(1054)
- [13] Chakraborty, D., A. Chakraborty, P. Santra, R. K. Tomar¹, R. N. Garg, R. N. Sahoo¹, S. G. Choudhury, M. Bhavanarayana and N. Kalra. 2006. Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution. Current Science, VOL. 90, NO. 11, 1527-1531.
- [14] E.M. Onur, A. Shakoor, Relationships between grain size distribution indexes and permeability of sands, Eng. Geol. Soc. Territory 3 (2015) 287–290.
- [15] E.M. Onur, Predicting the Permeability of Sandy Soils from Grain Size Distribution Masters of Science Thesis, Kent State University, 2014, p. 123.
- [16] F Hussain and Nabi. Empirical Formulae Evaluation for Hydraulic Conductivity Determination Based on Grain Size Analysis. Pyrex Journal of Research in Environmental Studies Vol 3 (3) pp. 026-032 March, 2016
- [17] F. Seelhem, Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens, Zeitschrift für analytische Chemie, 19, 1880, pp. 387-402.
- [18] Hazen, A. 1892. Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, Pub.Doc. No.34, 539-556
- [19] Karahan, G , Erşahin, S. (2016). Predicting saturated hydraulic conductivity using soil morphological properties. Eurasian Journal of Soil Science , 5 (1) , 30-38 . DOI: 10.18393/ejss.2016.1.030-038
- [20] Kozeny, J. 1927. Über Kapillare Leitung Des Wassers in Boden. Sitzungsber Akad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Kl., Abt.2a, 136, 271-306 (In German).
- [21] Osinubi, K. 'J., & Nwaiwu, C. M. (2005). Hydraulic Conductivity of Compacted Lateritic Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(8), 1034–1041.
- [22] 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.
- [23] R.P. Chapuis, “Permeability tests in rigid wall permeameters: determining the degree of saturation, its evolution and influence on test results,”
- [24] Ranaivomanana, H., Razakamanantsoa, A., & Amiri, O. (2017). Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure. International Journal of Geomechanics, 17(4), 04016107.
- [25] Ren, X., Zhao, Y., Deng, Q., Kang, J., Li, D., & Wang, D. (2016). A relation of hydraulic conductivity — void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. Engineering Geology, 213, 89-97. doi:10.1016/j.enggeo.2016.08.017
- [26] 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.
- [27] Sakulsaksri Chaiyasat, (2016) Influence of clay content on permeability of compacted lateritic soil. KKU Engineering Journal,43,1-3.
- [28] Salarashayeri AF, Siosemarde M (2012) Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. World Acad Sci Eng Technol 6(1):395–399.
- [29] SARI, H. (2017). The Effect of Some Soil Characteristics on The Hydraulic Conductivity of Soil in Tekirdağ Province. Alinteri Journal of Agriculture Science , 32 (2) , 95-103 . DOI: 10.28955/alinterizbd.347179.
- [30] Ubani, C., Ani, G. and Womiloju, T. 2018. Permeability Estimation Model from Grain Size Sieve Analysis: Data of Onshore Central Niger Delta. European Journal of Engineering Research and Science. 3, 12 (Dec. 2018), 119-125.