

ผลศึกษาเบื้องต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความซึมได้ของดินทรายแป้ง

Preliminary Study of Developing Mathematical Permeability Model for Silty Sand

ธีราพัทธ์ รุฐาธิรัญโรจน์¹ ฉัตรภูมิ วิรัตนจันทร์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี

² อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี

*Corresponding author; E-mail address: woodii888@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความซึมได้ของดินทรายแป้งในเขตอุบลราชธานี โดยใช้การทดสอบหาค่าความซึมได้แบบความดันแปรผันของดินทรายแป้งและลูกปัดขนาดต่างๆ โดยทำการแปรผันค่าความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มุ่งเน้นที่ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความซึมได้ คือ ขนาดช่องว่างประสิทธิผล ค่าอัตราส่วนช่องว่าง ค่าขนาดประสิทธิผลเม็ดดิน ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ค่า e (void ratio) d_{50} และ d_{10} มีผลอย่างมีนัยยะต่อค่าความซึมได้

คำสำคัญ: ความซึม, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ความพรุน, อัตราส่วนช่องว่างระหว่างมวล, ค่าขนาดประสิทธิผล

Abstract

The purpose of this research is to develop the mathematical model for predicting permeability of silty sand in Ubon Ratcharhani province area. The Variable Head Permeability test is performed on different size of glass beads varying density of specimens. The permeability mathematical model developed, is function of effective pore size, void ratio, effective particle size. Test result of the preliminary showed that d_{50} and d_{10} are the effective particle size and will be included in the developing model.

Keywords: permeability, void ratio, porosity, mathematical model, effective particle size, effective pore size

1. คำนำ

ค่าความซึมได้ของดินเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางปฐพีกลศาสตร์ สามารถนำไปใช้ในการหาค่าความทรุดตัว การระบายน้ำ การวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพของลาดดิน ปัญหาสิ่งแวดล้อมเช่นการปนเปื้อนของชั้นดิน การหาค่าความซึมได้ของดินสามารถทดสอบหาในห้องปฏิบัติการ

โดยวิธีการต่างๆ การทดสอบแบบความดันคงที่ การทดสอบแบบความดันแปรผัน สำหรับดินเม็ดหยาบ และเครื่องปั๊มวัดอัตราการไหล สำหรับดินเม็ดละเอียดโดยเฉพาะดินตระกูลดินเหนียว การทดสอบหาค่าความซึมได้ยังสามารถหาได้จากการทดสอบในสนามด้วยการวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดินในหลุมเจาะ การทดสอบหาค่าความซึมได้ใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน หากเป็นเม็ดหยาบ การทดสอบสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็ว เพราะดินมีช่องว่างขนาดใหญ่ต่อเนื่อง ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย แต่หากเป็นดินเม็ดละเอียดเช่นตะกอนดินทรายการทดสอบหาค่าความซึมได้จะใช้เวลาานโดยเฉพาดินเหนียว แบบจำลองเพื่อทำนายค่าความซึมได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในรอบหลายสิบปีที่ผ่านมา แต่ก็มีข้อจำกัดในการใช้และผลค่าความซึมได้ที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากในหลายๆแบบจำลอง

การศึกษาเบื้องต้นของแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าความซึมได้ของดินทรายแป้งในงานวิจัยนี้ถูกแยกออกเป็นสองส่วน กล่าวคือส่วนแรกเป็นการทดสอบหาค่าความซึมได้ของดินทรายแป้งโดยการสุ่มเก็บตัวอย่างในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี วัสดุทดสอบ ในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีความดันแปรผัน ส่วนที่สองนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา มาทดสอบโดยการแทนค่าตัวแปรของแบบจำลองนั้นๆ และนำมาเทียบค่ากับส่วนที่หนึ่ง เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมได้ของดินทรายแป้งที่มีข้อจำกัดให้น้อยที่สุด

2. ทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลและค่าความซึมได้ของดิน

มวลดินที่อิ่มตัวจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งมีน้ำแทรกอยู่ และเป็นแบบ Laminar flow ผ่านช่องคดเคี้ยวของเม็ดดิน ในขณะเดียวกันแรงดันน้ำ ก็จะเสียไปเพราะแรงเสียดทานของผิวช่องเม็ดดิน ตามกฎของดาร์ซี Darcy (1856) ที่กล่าวไว้ว่า ความเร็วของการไหลซึมของของเหลวผ่านตัวกลางพรุนจะเป็น ปฏิภาคกับไฮดรอลิกส์เกรเดียน (Hydraulic gradient) มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่าง เม็ดดิน ซึ่งน้ำสามารถที่จะไหลซึมผ่านได้ มวลดินที่น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้ง่าย เช่น แก้วดินจำพวก กรวด ทราย ส่วนมวลดินที่น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก ได้แก่ดิน ที่มี

ดินเหนียวปนอยู่ หรือดินเหนียวล้วน ถ้าน้ำ ไหลผ่านมวลดินได้ง่ายค่าสัมประสิทธิ์จะมีมาก นั่นคือดินจะมีช่องว่างมาก หรือดินอยู่ในสภาพหลวม และถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยเท่าใดก็แสดงว่าดินนั้นมีความหนาแน่นมาก

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ของดิน จะใช้ความสัมพันธ์จากสมการของ ดาร์ซี เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการทดสอบ โดยผู้ค้นพบทฤษฎีนี้คือ ดาร์ซี พบว่าอัตราการไหลของน้ำ ผ่านทราย จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดชันทางชลศาสตร์ ดังสมการที่ (1)

$$Q = kiA \quad (1)$$

i คือ ค่าไฮโดรลิกเกรเดียนต์ = $\frac{\Delta h}{\Delta l}$, A คือ พื้นที่หน้าตัดของดินที่น้ำไหลผ่านในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการไหล

2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อค่าความซึมได้

คุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อค่าความซึมผ่านได้ของดินมีอยู่หลายตัวประกอบกัน

2.2.1 โครงสร้างดิน เป็นสมบัติทางกายภาพของดิน ที่เกิดขึ้นจากการเกาะจับกันของอนุภาคที่เป็นของแข็งในดิน เกิดเป็นเม็ดดินหรือเป็นก้อนดินที่มีขนาด รูปร่าง และความคงทนแข็งแรงในการยึดตัวต่างๆ กัน เช่น เป็นก้อนกลม ก้อนเหลี่ยม เป็นแท่ง หรือเป็นแผ่นบาง

2.2.2 ลักษณะการเรียงตัว แบบแน่นและแบบหลวม มีผลต่อค่าความซึมได้ถ้าเรียงตัวแบบแน่นค่าความซึมได้จะต่ำกว่าการเรียงตัวแบบหลวม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินชนิดๆ นั้นๆ ด้วย

2.2.3 ความพรุน (n) เป็นสัดส่วนของช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ ความพรุนจะแตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ ความพรุนในชั้นหินถูกควบคุมโดยขนาด รูปร่าง และการคัดขนาดของเม็ดตะกอน ตะกอนทรายที่ได้จากการสะสมตัวของแร่ที่มีรูปร่างกลมมนและขนาดของเม็ดตะกอนใกล้เคียงกัน จะมีค่าความพรุนสูง แต่เมื่อตะกอนเหล่านี้แข็งตัวและมีสารเชื่อมประสานมาเชื่อมระหว่างเม็ดตะกอน ความพรุนก็จะลดลง หรือในชั้นทรายที่มีการคัดขนาดไม่มีเม็ดตะกอนทรายเป่งหรือดินรวมอยู่ด้วย ตะกอนขนาดเล็ก เหล่านี้จะไปแทนที่ช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ค่าความพรุนลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ในหินแข็งก็อาจมีค่าความพรุนสูงได้ หากว่าชั้นหินนั้นเกิดรอยแตกกร้าว หรือส่วนประกอบบางส่วนสามารถละลายไปกับน้ำได้

2.2.4 ความหนืด (ν) เป็นคุณสมบัติของของไหล บ่งบอกถึงความต้านทานการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นๆ ซึ่งสภาพต้านทานภายในมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง ชั้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นความหนืดคือความต้านทานของของไหลที่มีต่อการไหล เมื่อของไหลไหลเหนือผิว เรียบ แรงหนืดย้อนกลับที่กระทำกับแต่ละชั้นตามแนวของชั้นนั้น ๆ ซึ่งแรงเหล่านี้ขึ้นกับพื้นที่ของชั้น ความเร็วของชั้น และระยะทางของชั้นจากผิว

2.3 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมที่ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างแพร่หลาย ผ่านการทดสอบของดินบดอัดจำพวกทราย แล้วสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความซึมได้ โดยจะแยกตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความซึมได้ดังนี้

2.3.1 ค่าขนาดประสิทธิผลของเม็ดดินใดๆ (d_x) ส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะนิยมใช้ d_{10} ที่มีผลต่อค่าความซึมได้เช่นสมการที่ (2) ของ Hazen (1982)

$$k = C_H d_{10} \quad (2)$$

โดยที่ k คือค่าความซึมได้มีหน่วยเป็น เซนติเมตร/วินาที, C_H คือ ค่า Hazen coefficient และ d_{10} คือ ขนาดของเม็ดดินที่ดินร้อยละ 10 ของ น้ำหนักดินทั้งหมดมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และค่าของ C_H นั้นอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.5 แต่ส่วนจะนิยมใช้กัน 1.0 โดยสมการที่ (1) สามารถใช้กับดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลระหว่าง 0.01-0.30 เซนติเมตร

2.3.2 ค่าความพรุน (Porosity) ในภายหลังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เริ่มมีการพัฒนาโดยมีการนำค่าความพรุน เข้ามาในสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหาค่าความซึมได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการกล่าวอ้างถึงแพร่หลาย สมการที่ (3) ของ Kozeny-Carman (1956)

$$k = 0.083 \frac{g}{\nu} \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10} \quad (3)$$

โดยที่ k คือค่าความซึมได้มีหน่วยเป็น เซนติเมตร/วินาที, ν คือค่าความหนืดของของเหลว n คือค่าความพรุนของวัสดุทดสอบ โดยที่มีข้อจำกัดค่า d_{10} ควรมีค่าน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร

2.3.3 อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ดังเช่นสมการที่ (4) ของ Chapuis (2004)

$$k = 1.5 d_{10}^2 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \left(\frac{1+e_{\max}}{(e_{\max})^3} \right) \quad (4)$$

และมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่นๆ เพื่อใช้ในการทดสอบในการพัฒนาสูตรเชิงประจักษ์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมได้

นักวิจัย	แบบจำลอง	ข้อจำกัดการใช้งาน
Hazen (1892)	$k = C_H d_{10}$	$C_u < 5$ $0.1 < d_{10} < 3.0$
Kozeny-Carman (1956)	$k = 0.083 \frac{g}{v} \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}$	$0.5 < d_{10} < 4.0$
Terzaghi-Odong (2007)	$k = 0.0084 \frac{g}{v} \left[\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right]^2 d_{10}^2$	-
Chapuis (2004)	$k = 1.5 d_{10}^2 \frac{e^3}{1+e} \frac{1+e_{\max}}{e^3_{\max}}$	-
Slitcher (1898)	$k = 0.01 \frac{g}{v} n^{3.287} d_{10}$	$0.01 < d_{10} < 5.0$
USBR (1992)	$k = 0.0048 \frac{g}{v} (d_{20})^{0.3} (d_{10})^2$	$C_u < 5$
NAVFAC (1974)	$k = 10^{1.291e-0.6435} (d_{10})^{10^{(0.5504-0.2937e)}}$	$2 < C_u < 12$ $0.1 < d_{10} < 2.0$ $0.3 < e < 0.7$ $1.4 < \frac{d_{10}}{d_5}$
Alyamani and Sen (1993)	$k = 1300 \left[I_0 + 0.025(d_{50} - d_{10}) \right]^2$	-
Breyer (1998)	$k = 0.0006 \frac{g}{v} \log \left[\frac{500}{C_u} \right] d_{10}^2$	$0.06 < d_{10} < 0.6$ $1 < C_u < 20$

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีทุกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความซึมได้ นั้นมีข้อจำกัดในการใช้งาน และเริ่มมีตัวแปรอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น เช่น ค่าความพรุน (n) ค่าความหนืด (v) และอัตราส่วนช่องว่าง (e)

3. การทดสอบ

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Study) เพื่อนำไปสู่การทดสอบเพื่อให้นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดินทรายแป้ง ควบคุมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 7 ชนิด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุแตกต่างกันได้แก่ ดินทรายแป้งสุ่มเก็บตัวอย่างในเขตจังหวัดอุบลราชธานี ลูกทรงกลมตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 และ 6 มิลลิเมตร ลูกแก้วโรยเส้นสะท้อนแสง 2 ขนาด ตาม มอก. 543-2550

3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบหาคอนสแตนต์ของดินและวัสดุทดสอบดังนี้

- การทดสอบหาค่าความซึมได้ของดินและวัสดุทดสอบ โดยผ่านชุดทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำในดินแบบความดันแปรผันตามมาตรฐาน ASTM D2434

โดยนำผลที่วัดค่าได้มาคำนวณหาค่าความซึมได้จากสมการที่ (4)

$$k = \frac{Q}{Ait} = \frac{QL}{Ath} \quad (4)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำไหลผ่านมวลทดสอบ
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ
 t = เวลาของน้ำไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ
 h = ระดับความยาวของน้ำช่วงไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ
 L = ความยาวของตัวอย่างทดสอบ
 i = ความชันทางชลศาสตร์

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่า k ของดินที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$k_{20c} = k_t \frac{\mu_t}{\mu_{20c}} \quad (5)$$

เมื่อ k_{20c} = ค่าความซึมได้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
 k_t = ค่าความซึมได้ที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส
 μ_t = ค่าความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส

- การหาค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด ต่ำสุด และขณะทดสอบ
- การทดสอบค่าหาค่าขนาดของเม็ดดินที่คืนร้อยละใดๆ (d_x)

วิเคราะห์พารามิเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในตารางที่ 1 และนำผลทดสอบโดยการนำขนาดของดินทรายแป้งและขนาดของวัสดุทดสอบแทนค่าลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในตารางที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าความซึมได้ ก่อนนำข้อมูลทั้งหมดไปวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาจากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุตัวอย่างและหาค่าความซึมได้เบื้องต้น ผ่านวิธีความดันแปรผัน ได้ผลดังตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3

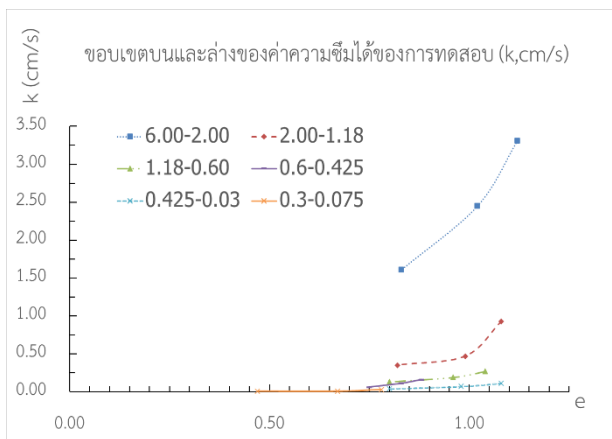
ตารางที่ 2 ค่าขนาดของเม็ดดินที่คืนร้อยละใดๆของวัสดุทดสอบ

Gradation (mm)	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{50}	d_{60}
6.00-2.00	2.20	2.40	2.60	3.10	3.30
2.00-1.18	1.25	1.30	1.38	1.63	1.70
1.18-0.60	0.64	0.69	0.74	0.84	0.90
0.600-0.425	0.43	0.45	0.47	0.50	0.51
0.425-0.300	0.32	0.33	0.34	0.35	0.37
0.300-0.075	0.09	0.10	0.12	0.16	0.18

ตารางที่ 3 ค่าความพรุน และ ค่าความซึมได้ของวัสดุทดสอบ

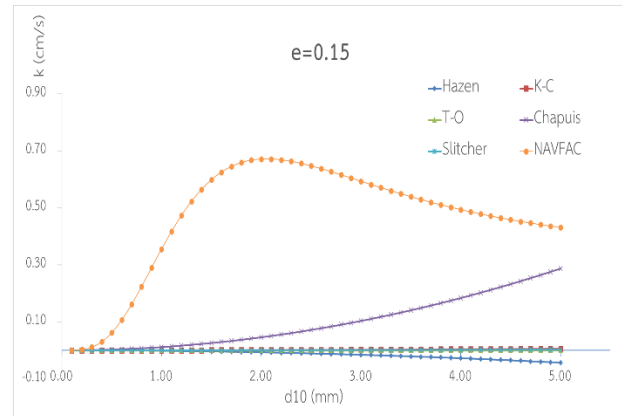
Gradation (mm)	n	e_{max}	e_{min}	e_{test}	k_{test}
6.00-2.00	2.20	2.40	2.60	3.10	3.30
2.00-1.18	1.25	1.30	1.38	1.63	1.70
1.180-0.600	0.64	0.69	0.74	0.84	0.90
0.600-0.425	0.43	0.45	0.47	0.50	0.51
0.425-0.30	0.32	0.33	0.34	0.35	0.37
0.300-0.075	0.09	0.10	0.12	0.16	0.18

จากตารางที่ 2 และ 3 สามารถนำผลไปหาค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของผลการทดสอบค่าความซึมได้เบื้องต้นได้ดังรูปที่ 1



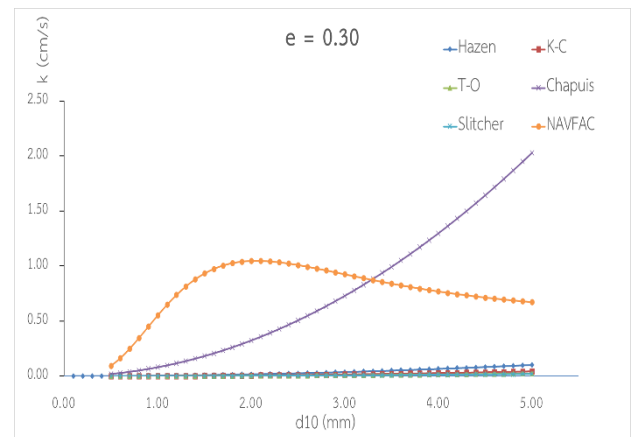
รูปที่ 1 ค่าความซึมได้จากวัสดุทดสอบทั้ง 7 ชนิดขึ้นต้น

4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในตารางที่ 1 สามารถนำค่าวิเคราะห์ขอบเขตด้วยการแปรผันค่า อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) จากค่าความหนาแน่นน้อยไปหนาแน่นมากโดยกำหนด ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) ดังนี้ 0.15 0.30 0.50 0.70 และ 0.90 และค่าขนาดประสิทธิภาพของเม็ดดินใด ๆ (d_x) ตามขอบเขตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Breyer (1998) ค่าความซึมได้ไม่ได้แปรผันค่าตามอัตราส่วนช่องว่างแต่แปรผันตามค่า C_u ของวัสดุทดสอบ



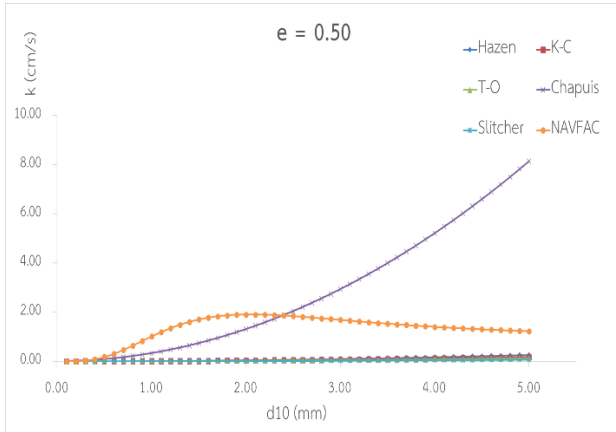
รูปที่ 2 เส้นแนวโน้มค่าความซึมได้ที่ใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.15

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนช่องว่างมีค่าน้อย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hazen (1892) เส้นสมการมีการลู่ออกเข้าสู่ค่าลบเนื่องจากเกิดจากขอบเขตของแบบจำลอง จากนั้นเพิ่มค่าอัตราส่วนช่องว่างเป็น 0.30 จะได้ค่าดังรูปที่ 3

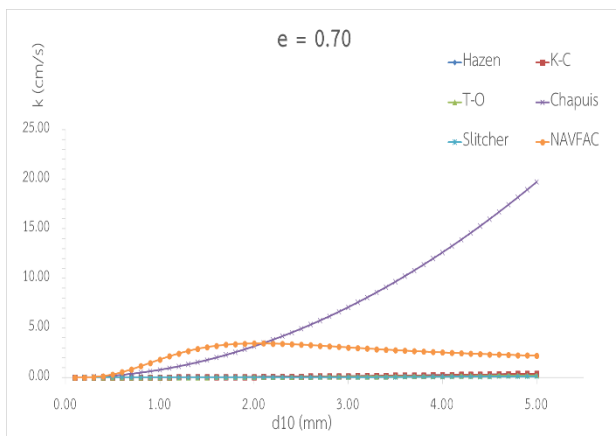


รูปที่ 3 เส้นแนวโน้มค่าความซึมได้ที่ใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.30

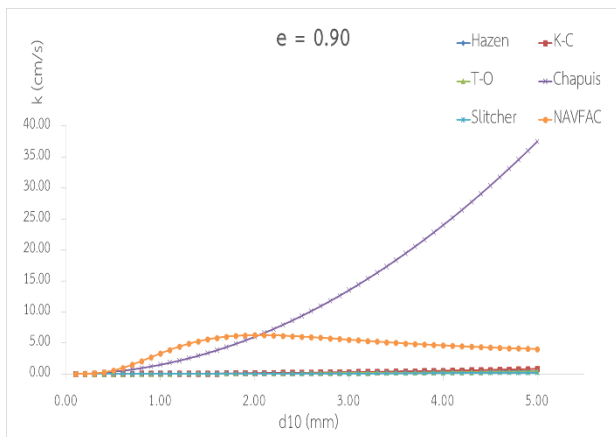
เส้นกราฟในกลุ่มล่างจากรูปที่ 3 ได้แก่ กราฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Hazen Terzaghi-Odong Slitcher และ Kresic-Breyer เริ่มมีค่าที่เกาะกลุ่มและใกล้เคียงกัน จากนั้นทำซ้ำโดยการเพิ่มอัตราส่วนช่องว่างเป็น 0.50 0.70 และ 0.90 ตามลำดับจะได้ผลดังรูปที่ 4 5 และ 6



รูปที่ 4 เส้นแนวโน้มค่าความซึมได้ที่ใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.50



รูปที่ 5 เส้นแนวโน้มค่าความซึมได้ที่ใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.70



รูปที่ 6 เส้นแนวโน้มค่าความซึมได้ที่ใช้ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.90

จะเห็นได้จากรูปทั้ง 6 หลังจากเพิ่มค่าอัตราส่วนช่องว่าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chapuis (2004) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากและไม่เกาะกลุ่มกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่น จึงจะไม่นำมาพิจารณาในแง่ของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดินทรายแป้ง จากนั้นนำผลการทดสอบมาแทนค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 4 และ 6

ตารางที่ 4 ค่าความซึมได้จากการแทนค่าผลของตัวอย่างทดสอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Gradation (mm)	Hydraulic Conductivity (k, cm/s)		
	Hazen	K-C	T-O
6.00-2.00	0.09827	0.207	0.090
2.00-1.18	0.03103	0.062	0.028
1.18-0.60	0.00795	0.015	0.007
0.600-0.425	0.00319	0.005	0.002
0.425-0.300	0.00201	0.004	0.002
0.300-0.075	0.00	0.000	0.000

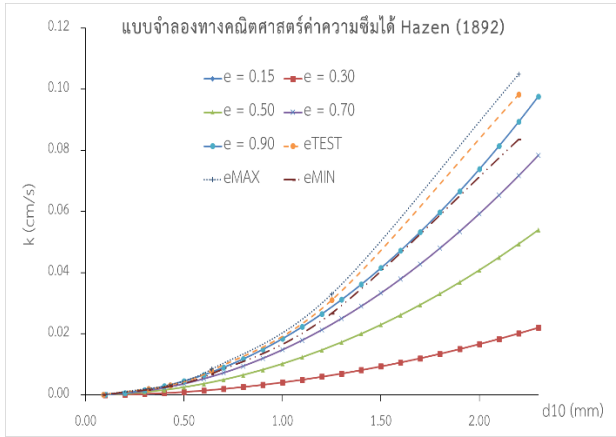
ตารางที่ 5 ค่าความซึมได้จากการแทนค่าผลของตัวอย่างทดสอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Gradation (mm)	Hydraulic Conductivity (k, cm/s)		
	Chapuis	Slitcher	NAVFAC
6.00-2.00	5.75529	0.05025	8.87150
2.00-1.18	1.88693	0.01545	6.05870
1.18-0.60	0.50297	0.00385	1.41043
0.600-0.425	0.23907	0.00135	0.28496
0.425-0.300	0.12056	0.00100	0.16079
0.300-0.075	0.00821	0.00004	0.00053

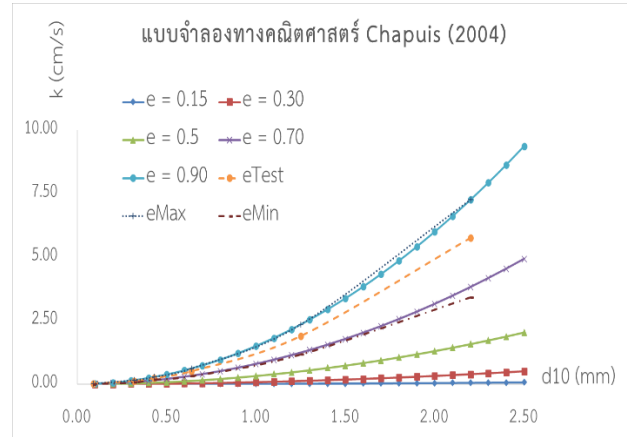
ตารางที่ 6 ค่าความซึมได้จากการแทนค่าผลของตัวอย่างทดสอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Gradation (mm)	Hydraulic Conductivity (k, cm/s)		
	USBR	A-S	Breyer
6.00-2.00	4.46000	6.16000	0.07187
2.00-1.18	1.09000	2.13000	0.02362
1.18-0.60	0.25000	0.55000	0.00615
0.600-0.425	0.09000	0.27000	0.00286
0.425-0.300	0.05000	0.14000	0.00159
0.300-0.075	0.01000	0.01000	0.00011

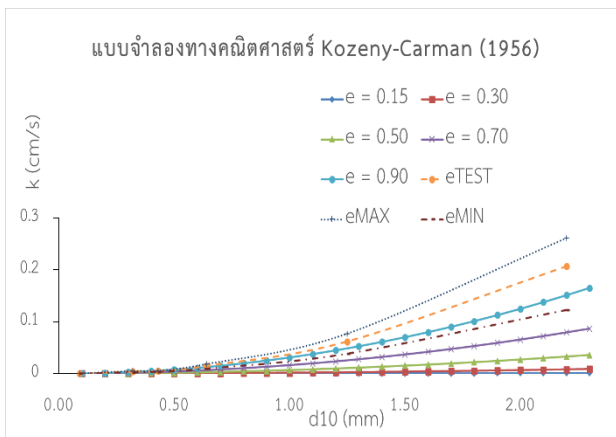
นำค่าจากตารางที่ 4 5 และ 6 ทำการวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มของการสร้างแบบจำลองผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่น ดังรูปที่ 8 9 10 11 12 และ 13



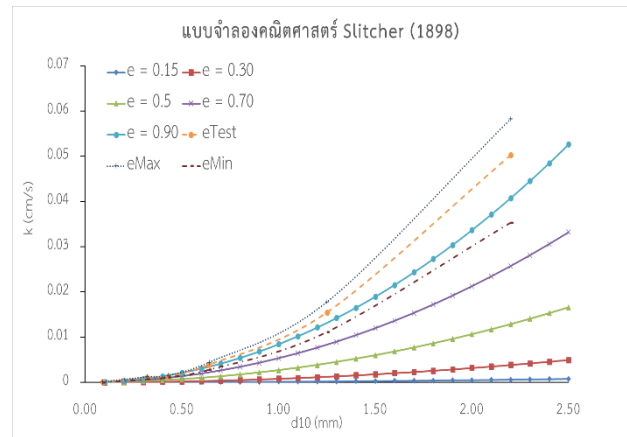
รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hazen (1892)



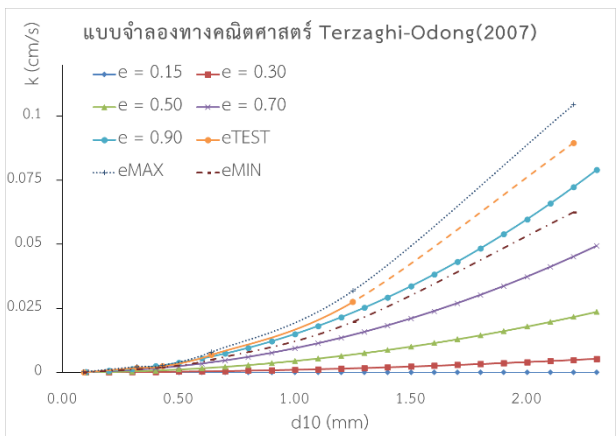
รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Chapuis (2004)



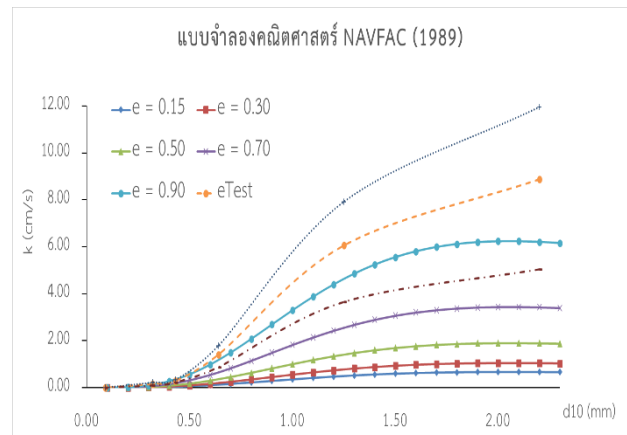
รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Kozeny-Carman (1956)



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Slitcher (2004)

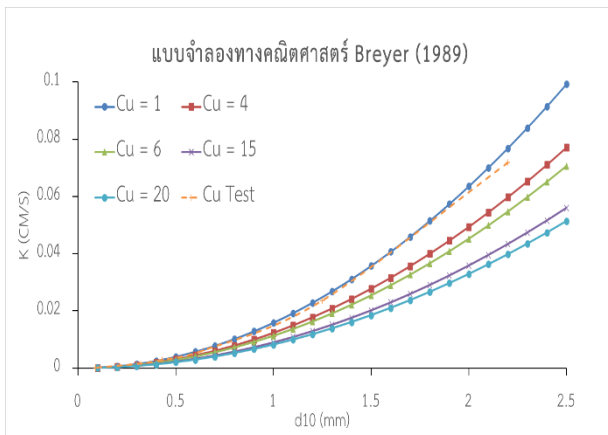


รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Terzaghi-Odong (2007)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ NAVFAC (1989)

และมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Breyer (1998) ที่ไม่ได้แปรผันโดยตรงตามอัตราส่วนช่องว่าง แต่มีขอบเขต C_u ระหว่างค่า 1 ถึง 20 จึงได้แปรผันค่าของ C_u ได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความซึมได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Breyer (1989)

5. บทสรุป

การศึกษาเบื้องต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าค่า d_{10} และค่า e มีผลต่อค่าความซึมได้แบบมีนัยยะ ซึ่งแบบจำลองที่มีตัวแปรดังกล่าวอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของในตารางที่ 1 ผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ พบว่าค่ากลุ่มของแบบจำลองที่ให้ผลสอดคล้องกับผลทดสอบจากงานวิจัยนี้คือกลุ่มในกราฟส่วนล่าง ได้แก่แบบจำลองของ Hazen (1892), Slitcher (1898), Kozeny-Carman (1927), NAVFAC (1974) และ Terzaghi-Odong (2007)

ผลการทดสอบจากการกลุ่มวัสดุตัวอย่างนำค่าที่ได้จากการทดสอบแทนค่าลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่นพบว่าค่าที่ได้ส่วนใหญ่อยู่อยู่ที่ขอบเขตของกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความซึมได้กับค่า d_{10} ซึ่งผลการทดสอบแทนค่าทำให้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่กลุ่มแบบจำลองที่ครอบคลุมค่า d_x และค่า e โดยมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองให้อยู่ใน รูป สมการที่ (6)

$$k = \beta \times e^a \times d_{50}^b \times d_{30}^c \times d_{10}^d \quad (6)$$

ค่า e (อัตราส่วนช่องว่าง) บ่งชี้ปริมาณช่องว่างของมวลดินโดยค่าความซึมได้จะแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วนช่องว่าง ส่วนขนาดของเม็ดดินจะมีผลต่อขนาดของช่องว่างของมวลดิน การจัดเรียงตัวของเม็ดดินในรูปแบบเดียวกันแม้ขนาดเม็ดดินแตกต่างกันมวลดินจะมีค่าอัตราส่วนช่องว่างเท่ากันดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าจะมีค่าความซึมได้ที่สูงกว่าเนื่องจากขนาดช่องว่างประสิทธิผลในมวลดินที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นควรรวมขนาดของเม็ดดินไว้ในแบบจำลองด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] 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., vol 34, pp 539-556

- [2] Hazen A (1911) Discussion: dams on sand foundations. Trans Am Soc Civ Eng 73:199-203
- [3] Kozeny J (1927) Über Kapillare Leitung Des Wassers in Boden. Sitzungsber Akad. Wiss.Wien Math.Naturwiss.Kl., Abt.2a, 136:271-306
- [4] Terzaghi K(1925) Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage. Deuticke, Leipzig/Vienna
- [5] Terzaghi K, Peck RB (1964) Soil mechanics in engineering practice. Wiley, New York
- [6] Odong J (2007) Evaluation of the empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain size analysis. J Am Sci 3:54-60
- [7] Chapuis RP (2004) Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Can Geotech J 41:787-795
- [8] Chapuis RP (2012) Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. Bull Eng Geol Environ 71(3):401-434
- [9] Slichter CS (1898) Theoretical investigation of the motion of ground waters. In: 19th annual report. US Geology Survey, USA
- [10] USBR (1990) Earth Manual-Part 2. US Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver
- [11] NAVFAC (Naval Facilities Engineering Command) (1974) Soil mechanics, foundations, and earth structures. Design manual DM7. US Government Printing Office, Washington, DC
- [12] Alyamani MS, Sen Z (1993) Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution curves. Groundwater 31(4):551-555
- [13] Kresic N (1998). Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling. Lewis Publishers, Florida