ลักษณะการไหลซึมผ่านของน้ำแบบสองมิติในดินและตาข่ายการไหล จากการทดสอบด้วยแบบจำลองกายภาพ

Two-Dimensional Flow Characteristics through Soil and Flow Net from Physical Model Tests

วรกมล บัวแสงจันทร์[1] ฐิติยารัตน์ นนทวงศ์[2] ธนพล สุขเอี่ยม[3] และ วรัช ก้องกิจกุล[4,*]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**Corresponding author; E-mail address: warat.kon@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองกายภาพย่อส่วนโครงสร้างดินขึ้น 2 แบบ ได้แก่ 1. งานขุดที่ป้องกันด้วยเข็มพืด และ 2. คันดินกั้นน้ำ เพื่อการศึกษาการซึมผ่านของน้ำแบบสองมิติและพัฒนาตาข่ายการไหล โดยจำลองการซึมผ่านของน้ำในดินภายใต้สภาวะคงตัว ในการทดสอบได้ทำการกำหนดค่าระดับน้ำด้านท้ายน้ำให้คงที่แต่ทำการแปรผันค่าระดับน้ำด้านเหนือน้ำให้แตกต่างกัน เพื่อให้มีอัตราการไหลและแรงดันน้ำแตกต่างกัน การทดสอบใช้ชุดท่อปลายเปิดเพื่ออ่านค่าแรงดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในดิน ซึ่งข้อมูลที่ได้ถูกนำมาสร้างแผนภาพแสดงเส้นสมศักย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ ยังได้ใช้สารย้อมสีเพื่อหาเส้นการไหลของน้ำในดินแล้วจึงได้พัฒนาตาข่ายการไหลจากเส้นสมศักย์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเส้นการไหลที่ได้จากการทดสอบ จากการคำนวณอัตราการไหลจากตาข่ายการไหลที่ได้จากการทดสอบ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การไหลแบบสองมิติด้วยโปรแกรม SEEP/W พบว่า มีความใกล้เคียงกันทั้ง 1. เส้นสมศักย์ 2. เส้นการไหล 3. ตาข่ายการไหล และ 4. อัตราการไหลของน้ำ ดังนั้นแบบจำลองย่อส่วนและผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นสื่อการสอนสำหรับนักศึกษาได้เป็นอย่างดีต่อไป

คำสำคัญ: การซึมผ่าน, เส้นสมศักย์, เส้นการไหล, ตาข่ายการไหล, แบบจำลองกายภาพ

Abstract

Seepage through soil in the field is usually two-dimensional. In order to determine the discharge and pore water pressure for the two-dimensional flow, it is common to construct a flow net first. This research developed two scaled-down physical models, which are 1) sheet pile for an excavation work and 2) dike, for studying of two-dimensional flow of water through soil and developing the flow net. The modelled two-dimensional flow was under steady state condition. In the test, the water level at the downstream side was kept constant, while the one at the upstream side was varied so that the discharge and pore water pressure are different. A number of open-standpipes were used to read the pore water pressure (u) at various locations in soil. The recorded u values were analyzed with a computer program to develop a contour of head, and thus the equipotential. Besides, the colored water was used to determine the flow line from the experiment. By combining the equipotential and flow line obtained as the above, the flow net was developed. Then, the discharge was calculated from the experimentally obtained flow net. By comparing the results with the ones analyzed by SEEP/W program, it was found that all the outcomes, i.e., 1) equipotential; 2) flow line; 3) flow net; and 4) discharge, are very similar. Thus, the two physical models developed in this research and the experimental results can be used as an educational media for students in the undergraduate level.

Keywords: Flow, Equipotential, Flow line, Flow net, Physical model

1. บทนำ

ในงานทางวิศวกรรมโยธา น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพของโครงสร้างดินมิใช่น้อย หากโครงสร้างดินมีเสถียรภาพไม่เพียงพอต่อการรับแรงกระแทกจากน้ำอาจก่อให้เกิดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สิน โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างดินจากการไหลของน้ำอาจเป็นผลของแรงยก, การไหลซึม, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน และเหตุผลอื่น จึงเป็นเหตุให้ขั้นตอนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างดินมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ปัจจุบันเครื่องมือทางวิศวกรรม อาทิ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการวิเคราะห์การซึมผ่านของน้ำได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน โดยแสดงออกมาในรูปแบบ

ของ เส้นสมศักย์ ซึ่งคือเส้นที่แสดงระดับพลังงานที่เท่ากัน กับเส้นการไหล ซึ่งทำให้เห็นช่องการไหล ทำให้ได้ภาพจำลองเส้นทางการไหลของน้ำออกมาตามทฤษฎี อย่างไรก็ตาม การเรียนการสอนระดับปริญญาตรีนักศึกษามักจะถูกกำหนดให้ใช้วิธีทางกราฟิก โดยพัฒนาการไหลสำหรับการไหลซึมผ่านของน้ำในดินแบบสองมิติขึ้นมาก่อน แล้วจึงคำนวณอัตราการไหลและค่าแรงดันน้ำจากตาข่ายการไหลอีกทีนึง ตาข่ายการไหลนี้เป็นชุดของเส้นเสมือนเป็นเส้นที่สมมติขึ้นมา จึงอาจทำให้นักศึกษาส่วนนึงไม่เข้าใจ หรือใคร่อยากรู้ว่าตาข่ายการไหลสามารถสร้างได้จากการทดลองหรือไม่ จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงมีความคิดที่จะทำแบบจำลองย่อส่วนแสดงการซึมผ่านของน้ำใต้ดิน ทั้งการทดสอบการอัตราการไหลจริงและผลที่ได้จากการทดสอบ และการวิเคราะห์ จะได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม SEEP/W ต่อไป เพื่อพัฒนาสื่อการเรียนการสอนโดยสร้างตาข่ายการไหลมาจากผลการทดสอบจริง

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 วิธีการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองแสดงการไหลของน้ำแบบสองมิตินี้ถูกติดตั้งอยู่ภายในกล่องอคริลิคใส มีการติดตั้งเครื่องปั๊มน้ำ ปั๊มจะทำการสูบน้ำจากแท็งก์น้ำเข้าไปในแบบจำลอง โดยลำเลียงน้ำผ่านท่อน้ำเข้า น้ำในแบบจำลองจะไหลซึมผ่านทราย และไหลออกไปยังท่อน้ำออกไปสู่แท็งก์น้ำ เมื่อระดับน้ำถูกปรับให้คงที่ตามกรณีที่นำมาศึกษาอันจะกล่าวต่อไป สีย้อมจะถูกฉีดเข้าไปในทรายด้วยหัวฉีด และจะสามารถสังเกตการไหลของน้ำได้ทางด้านหลังของแบบจำลอง โดยจะเห็นเป็นเส้นการไหล (Flow line) และแรงดันน้ำในแต่ละจุดจะสามารถวัดได้จากระดับน้ำในท่อยืนที่ติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าของแบบจำลอง โดยรายละเอียดและส่วนประกอบของแบบจำลองโดยรวม กรณีเข็มพืดและกรณีคันดินแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2

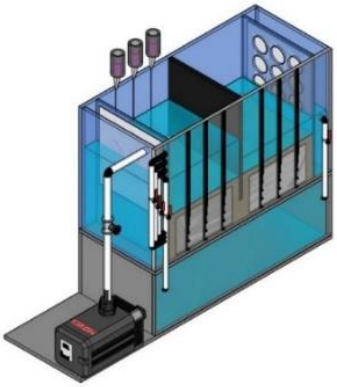
2.2 กรณีศึกษาที่นำมาพิจารณาในการทดลอง

ในการทดลองนี้ กรณีศึกษาที่นำมาพิจารณามีทั้งหมด 7 กรณี แบ่งเป็นแบบจำลองเข็มพืด 4 กรณีและแบบ จำลองคันดิน 3 กรณี โดยแบบจำลองกรณีเข็มพืดมีท่อยืนวัดค่าเฮด 30 จุดดังรูปที่ 3 และแบบจำลองกรณีคันดินมีท่อยืนวัดค่าเฮด 74 จุดดังรูปที่ 4

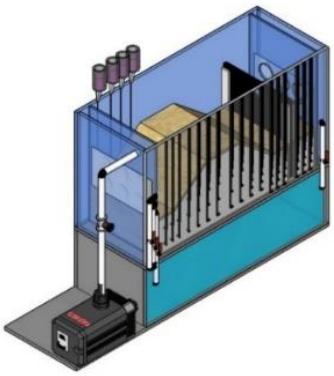
2.3 ขั้นตอนการทดลอง

2.3.1 หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในทราย

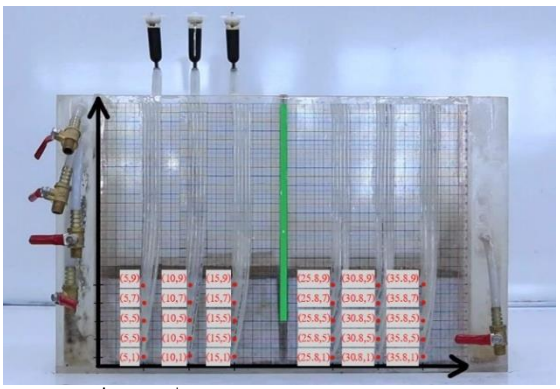
นำตัวอย่างทรายที่ใช้ในแบบจำลองมาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) โดยการทดสอบแบบเฮดคงที่ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลคุณสมบัติดินในโปรแกรม SEEP/W และใช้ในการคำนวณค่าอัตราการไหล



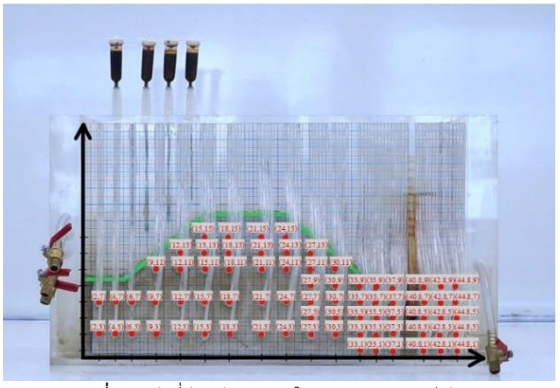
รูปที่ 1 ภาพตัวอย่างแบบจำลองกรณีเข็มพืด



รูปที่ 2 ภาพตัวอย่างแบบจำลองกรณีคันดิน



รูปที่ 3 พิกัดที่อ่านค่าเฮดรวมในแบบจำลองกรณีเข็มพืด



รูปที่ 4 พิกัดที่อ่านค่าเฮดรวมในแบบจำลองกรณีคันดิน

2.3.2 การหาระดับน้ำที่สภาวะคงที่

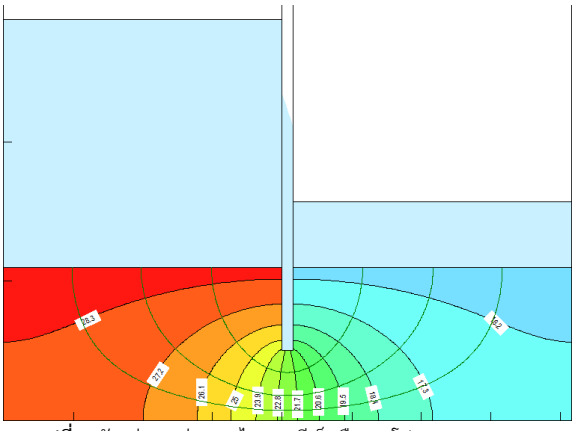
ในการทำการวิจัยครั้งนี้เป็นการหาตาข่ายการไหลในสภาวะคงที่ มีการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม SEEP/W ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาระดับน้ำในสภาวะคงที่เสียก่อน รวมทั้งทำการเก็บข้อมูลอัตราการไหลฝั่งน้ำขาออก เพื่อเป็นอัตราการไหลจริงที่สามารถวัดได้ โดยจากกรณีศึกษาที่นำมาพิจารณามีทั้งหมด 7 กรณี เมื่อนำมาหาระดับน้ำในสภาวะคงที่ของแต่ละช่วงระดับน้ำที่ได้กำหนดไว้ใน พบว่าระดับน้ำในสภาวะคงที่ของแต่ละกรณีศึกษาเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาทั้งหมดของงานวิจัย

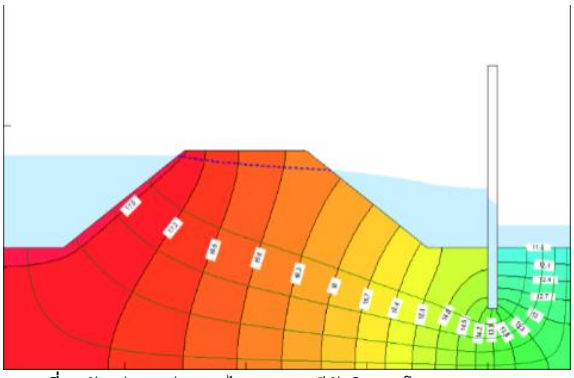
แบบจำลอง	กรณีที่	ระดับน้ำฝั่งน้ำเข้า (mm)	ระดับน้ำฝั่งน้ำออก (mm)	ชื่อการทดลอง
เขื่อนดิน	1	288	157	SP_IN288-OUT157
	2	270	152	SP_IN270-OUT152
	3	249	150	SP_IN249-OUT150
	4	229	148	SP_IN229-OUT148
คันดิน	1	175	118	EM_IN175-OUT118
	2	159	115	EM_IN159-OUT115
	3	138	114	EM_IN138-OUT114

2.3.3 ออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม SEEP/W

นำระดับน้ำในสภาวะคงที่และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้ทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SEEP/W จะได้ตาข่ายการไหลและค่าอัตราการไหลดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 และในตารางที่ 2 ได้แสดงค่าอัตราการไหลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEEP/W ของทุกกรณีศึกษา



รูปที่ 5 ตัวอย่างตาข่ายการไหลกรณีเขื่อนดินจากโปรแกรม SEEP/W



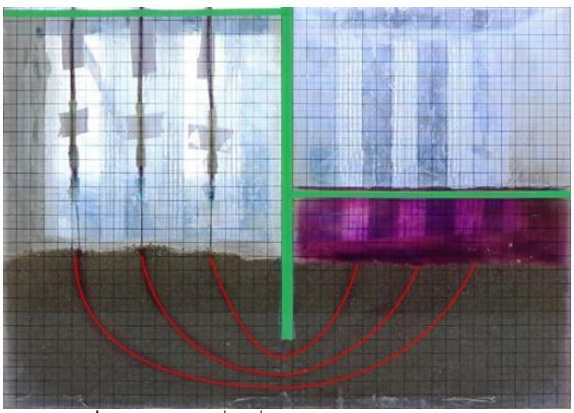
รูปที่ 6 ตัวอย่างตาข่ายการไหลของกรณีคันดินจากโปรแกรม SEEP/W

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าอัตราการไหลที่หาได้จากโปรแกรม SEEP/W

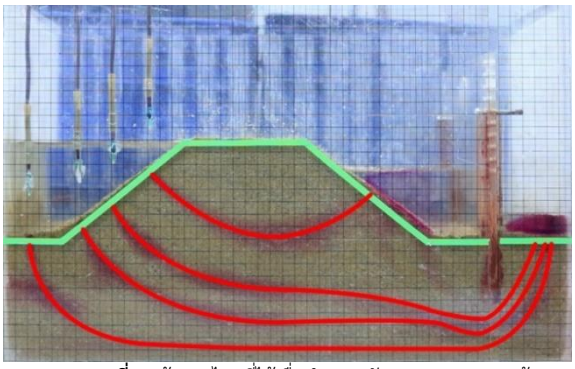
แบบจำลอง	กรณีที่	ชื่อการทดลอง	ค่า Q ที่ได้จากโปรแกรม SEEP/W (m^3/s)
เขื่อนดิน	1	SP_IN288-OUT157	0.000608
	2	SP_IN270-OUT152	0.000548
	3	SP_IN249-OUT150	0.000460
	4	SP_IN229-OUT148	0.000376
คันดิน	1	EM_IN175-OUT118	0.000383
	2	EM_IN159-OUT115	0.000293
	3	EM_IN138-OUT114	0.000160

2.3.4 เริ่มการทดสอบตามกรณีที่ได้ออกแบบไว้

ทำการจำลองการซึมผ่านทุก ๆ กรณีที่ได้แบ่งไว้ด้วยแบบ จำลองที่สร้างขึ้น บันทึกภาพเส้นการไหลที่เกิดขึ้นนำมาลากเส้นการไหลที่เกิดขึ้นจริงเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8

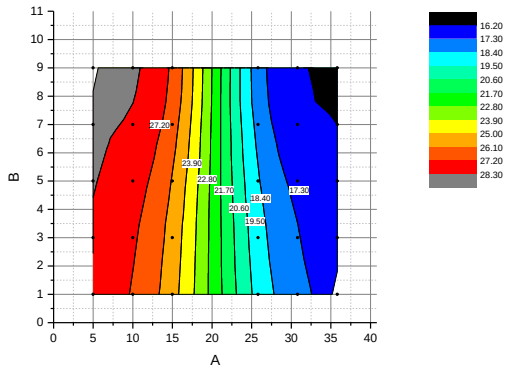


รูปที่ 7 เส้นการไหลที่ได้เมื่อทำการปรับรูปภาพและลากเส้นตามเส้นการไหลจริงกรณีเขื่อนดิน

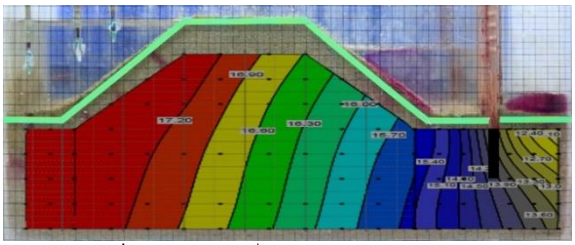


รูปที่ 8 เส้นการไหลที่ได้เมื่อทำการปรับรูปภาพและลากเส้นตามเส้นการไหลจริงกรณีคันดิน

จดค่าเฮดแต่ละจุดที่สามารถอ่านได้ เพื่อนำมาสร้างเส้นสมศักย์ด้วยโปรแกรม ORIGIN ทั้งกรณีเข็มพืดและคันดิน แต่ในกรณีคันดินต้องทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์หาค่าเฮดจุดที่ไม่สามารถอ่านค่าได้ก่อนเพื่อให้ได้เส้นสมศักย์ที่สมบูรณ์ ได้ผลดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10

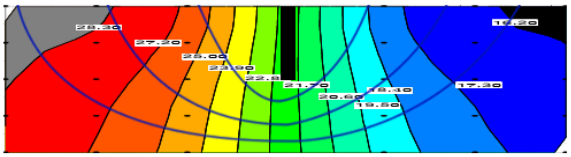


รูปที่ 9 เส้นสมศักย์ที่ได้จากโปรแกรม ORIGIN ของแบบจำลองกรณีเข็มพืด

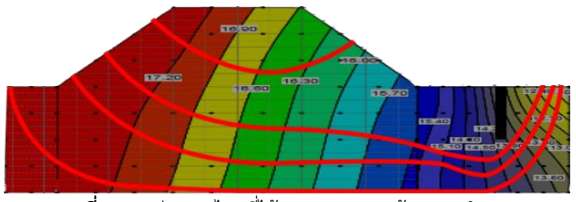


รูปที่ 10 เส้นสมศักย์ที่ได้จากโปรแกรม ORIGIN ของแบบจำลองกรณีคันดิน

จากนั้นนำเส้นการไหลที่ได้บันทึกภาพมารวมกับเส้นสมศักย์ เพื่อสร้างเป็นตาข่ายการไหลใช้ในการคำนวณ อัตราการไหล ดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 ตาข่ายการไหลที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง



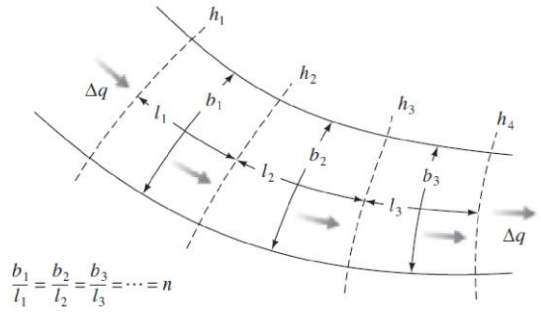
รูปที่ 12 ตาข่ายการไหลที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง

2.3.5 หาอัตราการซึมผ่านของน้ำ

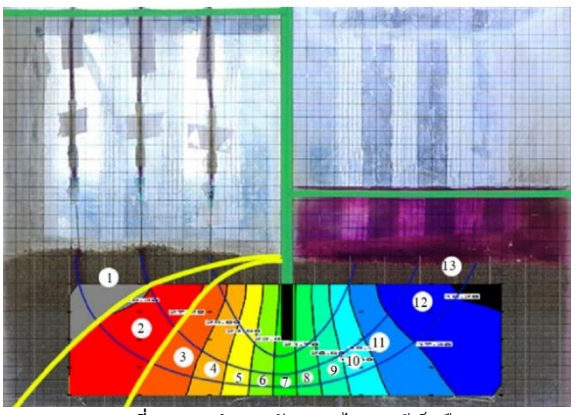
นำค่าความดันที่ทำการจดบันทึกมาวิเคราะห์เส้นชั้นความดันด้วยโปรแกรม ORIGIN และนำมารวมกับเส้นการไหลที่ได้บันทึกภาพไว้ก่อนหน้าเพื่อสร้างตาข่ายการไหล จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการซึมผ่านของน้ำดังตัวอย่างในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ด้วยสมการที่ (1)

$$q = kH\left(\frac{\sum n}{N_d}\right);\ n = \frac{b}{l} \tag{1}$$

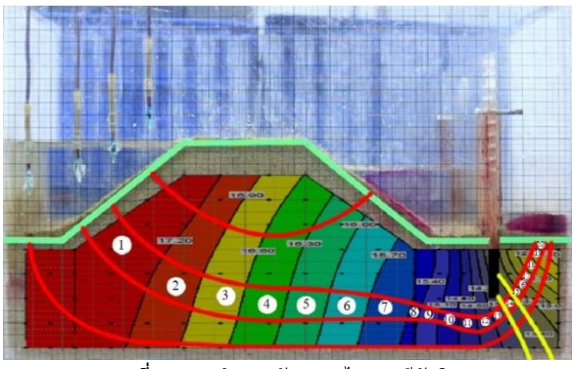
โดยที่ q คือ อัตราการซึมผ่าน, k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหล, H คือ ความต่างของเฮดความดันรวมของฝั่งต้นน้ำและฝั่งท้ายน้ำ, N_d คือ จำนวนขั้นของการลดลงของพลังงาน และ n คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การซึมผ่านช่องการไหลของน้ำในองค์ประกอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [1]



รูปที่ 14 การคำนวณอัตราการไหลกรณีเข็มพืด



รูปที่ 15 การคำนวณอัตราการไหลกรณีคันดิน

2.3.6 เปรียบเทียบค่าอัตราการไหล

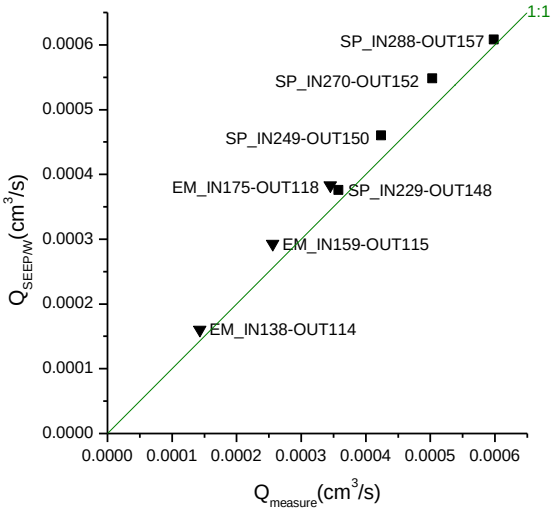
นำค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองและค่าที่ได้จากโปรแกรม SEEP/W มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลที่วัดได้จริงจากน้ำล้นฝั่งขาออก

3. ผลการวิจัย

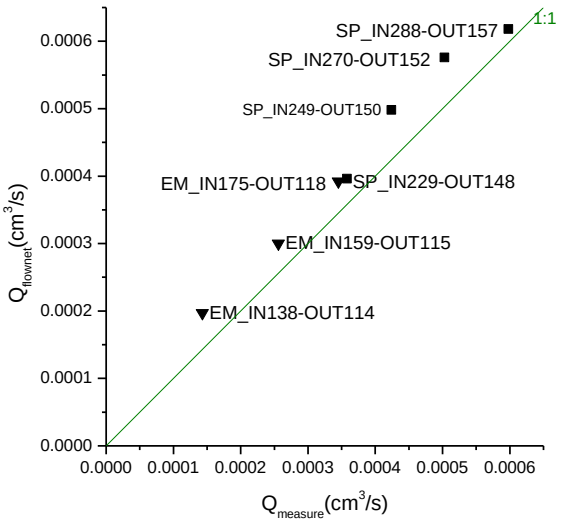
จากการทดลองสามารถสรุปค่าอัตราการไหลจากการวิเคราะห์ด้วย 1. โปรแกรม SEEP/W 2. การคำนวณจากตาข่ายการไหลที่สร้างด้วยโปรแกรม ORIGIN และ 3. จากการวัดอัตราการไหลของน้ำขาออกในแบบจำลอง มีผลดังตารางที่ 3

เมื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างอัตราการไหลที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SEEP/W เทียบกับอัตราการไหลจากการวัดอัตราการไหลของน้ำขาออกในแบบจำลอง และกราฟระหว่างอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณจากตาข่ายการไหลที่สร้างด้วยโปรแกรม ORIGIN เทียบกับอัตราการไหลจากการวัดอัตราการไหลของน้ำขาออกในแบบจำลอง ดังรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ตามลำดับ

พบว่าทั้งอัตราการไหลที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SEEP/W และอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณจากตาข่ายการไหลที่สร้างด้วยโปรแกรม ORIGIN มีค่าสูงกว่าอัตราการไหลจากการวัดอัตราการไหลของน้ำขาออกในแบบจำลองทั้ง 7 กรณีทดลอง



รูปที่ 16 กราฟระหว่าง $Q_{SEEP/W}$ กับ $Q_{measure}$



รูปที่ 17 กราฟระหว่าง $Q_{flownet}$ กับ $Q_{measure}$

ตารางที่ 3 ตารางสรุปค่าอัตราการไหล

ชื่อการทดลอง	ค่า Q ที่ได้จากโปรแกรม SEEP/W (cm^3/s)	ค่า Q ที่ได้จากการคำนวณจากตาข่ายการไหล (cm^3/s)	ค่า Q ที่วัดได้จากแบบจำลอง (cm^3/s)
SP_IN288-OUT157	0.000608	0.000618	0.000598
SP_IN270-OUT152	0.000548	0.000576	0.000503
SP_IN249-OUT150	0.000460	0.000498	0.000424
SP_IN229-OUT148	0.000376	0.000396	0.000358
EM_IN175-OUT118	0.000383	0.000392	0.000345
EM_IN159-OUT115	0.000293	0.000300	0.000256
EM_IN138-OUT114	0.000160	0.000197	0.000143

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบ การวิเคราะห์และเปรียบเทียบที่ได้ดำเนินการในการศึกษานี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พัฒนาแบบจำลอง 2 แบบ 1. เข็มพืด 2. คันดิน โดยให้น้ำไหลลอดผ่านแบบ 2 มิติ และมีอัตราการไหลที่แตกต่างกันสำเร็จ จากแบบจำลองสามารถหาเส้นการไหลได้จากการบันทึกภาพการปล่อยสารละลายเจนเชียนไวโอเลต เส้นสมศักย์ได้จากการนำค่าแรงดันที่วัดได้จากแบบจำลองมาพล็อตเป็นเส้นชั้นความดัน เมื่อนำเส้น 2 ชุดนี้มาประกอบกันจะได้ตาข่ายการไหลที่พัฒนาจากการทดสอบด้วยแบบจำลองจริง ไม่ใช่กราฟิก ดังนั้นนำมาใช้ประกอบการเรียนการสอนได้
2. ใช้ SEEP/W วิเคราะห์ปัญหาการไหล 2 มิติ ตามเงื่อนไขที่กำหนดในแบบจำลองทั้งแบบจำลองเข็มพืดและแบบจำลองคันดินได้สำเร็จ
3. ค่าเฮดรวมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในดิน เส้นการไหล เส้นสมศักย์และตาข่ายการไหล ที่วัดได้หรือพัฒนามาจากผลการทดสอบด้วยแบบจำลอง มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม SEEP/W ดังนั้นผลจากแบบจำลองมีความเที่ยงตรงสูง นอกจากนี้ค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณจากตาข่ายการไหล ค่าจากโปรแกรม SEEP/W มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเทคนิคธรณี อาจารย์ ช่างเทคนิคและพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการ ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลอง ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Braja M. Das (2007). Fundamental of Geotechnical Engineering. Third Edition, Christ Carson, United States, pp. 111-140.
[2] G.U.N.T.Gerätebau GmbH.Experiment Instructions HM 169 Drainage and Seepage Tank. Germany, pp. 1-16.