

การศึกษาการวิบัติที่เกิดจากรูโพรงของคันดินโดยแบบจำลองทางกายภาพ The study of piping failures in earthen dike by physical modeling

ณัฐพงษ์ เภาวัลย์^{1*}, วิทวัตร พันธุ์จันทร์¹,
รัฐกร ตุ่มทอง¹ และสนธิท วงษา¹

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์มหาอุทกภัยเมื่อปี 2554 ที่ผ่านมา คันดินถูกนำมาใช้ในการเป็นแนวกันน้ำท่วมกัน แต่ปัญหาที่พบคือ คันดินไม่สามารถต้านทานการพัดพาและการไหลของน้ำได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อชุมชนบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหานี้ จึงทำการศึกษาวិบัติของการวิบัติของคันดิน โดยการสร้างแบบจำลองคันดินบนพื้นฐานกฎการย่อส่วน 1 g ซึ่งจะจำลองคันดินที่เกิดรูโพรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.24 m ดินที่นำมาทดสอบเป็นดินประเภท SW-SC หรือ ดินเหนียวปนตะกอนทราย และการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการไหลสม่ำเสมอที่ 4.14 L/s, 7.79 L/s, 11.59 L/s และ 16.84 L/s ผลจากการทดสอบพบว่า ลักษณะการวิบัติของคันดินมีลักษณะการเกิดรอยแตกบริเวณฐานคันดินด้านหลัง ซึ่งเกิดจากการไหลซึมของน้ำจากนั้นแรงดันน้ำทำให้บริเวณลาดเอียงคันดินถูกกัดเซาะและเคลื่อนยุบตัวลงเมื่อน้ำไหลผ่านคันดินทำให้คันดินเกิดช่องขาดบริเวณตรงกลางคันดินและถูกกัดเซาะแผ่ขยายใหญ่ขึ้นจนมีขนาดความกว้างมากที่สุด 1.34 m เมื่อกระแสน้ำไหลผ่านเป็นระยะเวลานาน ได้กัดเซาะและพัดพาหน้าดินออกไปจนเกิดเป็นช่องขาดโดยปริมาตรของดินที่ถูกพัดพาสามารถคิดเป็นร้อยละ 51.69 ของปริมาตรดินทั้งหมด ซึ่งอัตราการไหลมีอิทธิพลต่อปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะและขนาดของช่องขาด โดยเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นขนาดของช่องขาดและปริมาตรดินที่ถูกกัดเซาะก็จะเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: อุทกภัย, การจำลองคันดิน, การวิบัติ, การซึมผ่านของน้ำ

Abstract

As a result of flooding disasters in 2011, the earthen dikes were used to create barriers protecting unflooded areas. However, later it was discovered that the earthen dikes were not able to withstand the overflow and were destroyed by the erosions causing damages to the nearby communities. Therefore, this research was conducted focusing on this problem by studying the failures of the earthen dikes from experimental models. The earthen dike model is based on 1 g scaling rule which created a hole in the earthen dikes that has diameter of 0.24 m. The soil textures that were used in the research were SW-SC (Well graded sand - Sandy clay). The experiment used water flow rate at 4.14 L/s, 7.79 L/s, 11.59 L/s and 16.84 L/s. The result of the experiment showed that the destruction of the earthen dikes was caused by the cracks, from water penetration, around the base of earthen dike. The water pressure then eroded the earthen dikes slope areas causing the collapse. As a result of the water overflow, the diameter of the hole in the earthen dike was increased to 1.34m. When water currents flew over a long period, the earthen dike was eroded and soils were transported away. The percentage of soil erosion by the water was at 51.69%. The water flow rate was the important variable that has a big impact on the volume of soil erosion and the size of piping failures of earthen dike models. The faster the flow rate, the bigger the hole and the higher percentage of soil erosion.

Keywords: floods, physical modeling of earthen dike, dike collapse, permeability

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* E-mail: cte15_nik@hotmail.com

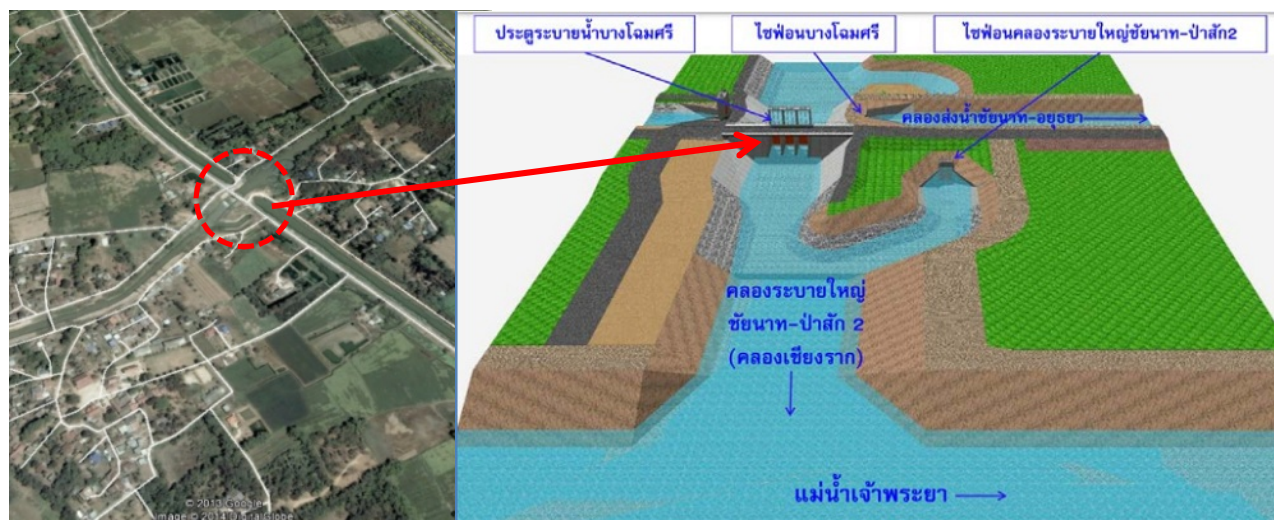
บทนำ

ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำ มักประสบปัญหาเรื่องความมั่นคงและการทรุดตัวของคันดินเสมอ จากเหตุการณ์อุทกภัยเมื่อปี 2554 หรือที่นิยมเรียกกันว่า มหาอุทกภัย เป็นอุทกภัยรุนแรงที่เกิดขึ้นระหว่างฤดูมรสุมในประเทศไทย พ.ศ. 2554 เกิดผลกระทบต่อบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาและลุ่มน้ำโขง ราษฎรได้รับผลกระทบแล้วมากกว่า 12.8 ล้านคน ธนาคารโลกประเมินมูลค่าความเสียหายสูงถึง 1.44 ล้านล้านบาท (ไทยพับลิก้า, 2554) ภัยพิบัติครั้งนี้สร้างความเสียหายมากที่สุดเป็นอันดับ 4 ของโลก ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลให้เกิดน้ำป่าไหลหลาก คันดินที่ทำหน้าที่กั้นน้ำจึงไม่สามารถต้านทานการพัฒนาและการไหลของน้ำได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อชุมชนบริเวณใกล้เคียง โดยลักษณะการพังทลายของคันดินมีลักษณะจากการไหลซึม (piping) ซึ่งเกิดจากน้ำเดินทางผ่านรอยแยกต่าง ๆ ภายในตัวคันดิน เกิดเป็นรูโพรงและขยายใหญ่ขึ้นจนทำให้คันดินพังทลาย ด้วยปัญหาดังกล่าว ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการวิบัติของคันดินที่เกิดจากการซึมผ่านของน้ำในดิน โดยการสร้างแบบจำลองทางกายภาพซึ่งเป็นการย่อขนาดจากขนาดจริงของคันดินบริเวณประตูระบายน้ำบางโฉมศรี อ.อินทร์บุรี จ.สิงห์บุรี ให้มีขนาดเล็กลงตามกฎของการย่อส่วน โดยการจำลองดังกล่าวจะมีประโยชน์คือคณะผู้วิจัยสามารถสังเกตพฤติกรรมของคันดินในแต่ละช่วงได้อย่างละเอียดและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถทำการทดสอบซ้ำได้หลายครั้ง

ระเบียบวิธีวิจัย

1. บริเวณที่ศึกษา

เนื่องจากปัญหาอุทกภัยส่งผลให้คันดินหลายที่เกิดการวิบัติ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยจะศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคันดินบริเวณประตูระบายน้ำบางโฉมศรี ตั้งอยู่ระหว่าง ต.ชีน้ำร้าย และ ต.ท่างาม อ.อินทร์บุรี จ.สิงห์บุรี เป็นประตูระบายน้ำปลายคลองระบายน้ำสายใหญ่ชัยนาท-ป่าสัก 2 ตั้งอยู่ที่ ก.ม. 27+110 ห่างจากท้ายเขื่อนเจ้าพระยาประมาณ 26 km. ซึ่งเกิดการวิบัติในช่วงอุทกภัยในปี 2554 ที่ผ่านมา โดยแสดงบริเวณที่ทำการศึกษาดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 บริเวณคันดินประตูระบายน้ำบางโฉมศรี (ที่มา: กรมชลประทาน, 2555)

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ทฤษฎีการจำลองทางกายภาพของคันดิน (Wood, 1991)

การจำลองทางกายภาพของคันดิน จะใช้การวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งจะช่วยลดและจำกัดตัวแปรที่สำคัญเพื่อใช้ในการจำลองโดยพิจารณาจากทฤษฎีพื้นฐานของกรณีศึกษา การวิเคราะห์มิติจะไม่แสดงถึงสมการสมบูรณ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกรณีศึกษาแต่จะเป็นประโยชน์ในการกำหนด

ตัวแปรที่สำคัญของกรณีศึกษานั้น ๆ เพื่อสร้างแบบจำลองทางกายภาพที่สอดคล้องกับพฤติกรรมต้นแบบโดยไม่ต้องพิจารณาเรื่องหน่วยของตัวแปรที่ทำการศึกษา ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบในห้องทดสอบภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (One-g physical modeling) และใช้ในการเตรียมตัวอย่างเขื่อนดินเพื่อใช้ในการทดสอบโดยพิจารณาทั้งตัวแปรของมาตราส่วนและคุณสมบัติของคันดินต้นแบบด้วย ดังนั้นจากตารางที่ 1 จะถูกใช้ในการกำหนด อัตราส่วนระหว่างขนาดของคันดินต้นแบบและขนาดของคันดินแบบจำลอง ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของคันดินแบบจำลองจะถูกกำหนดในเทอมของสตีเฟนสโดย ค่าความแตกต่างระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของคันดินต้นแบบและแบบจำลองจะถูกกำหนด α (อัตราส่วนระหว่างสตีเฟนสกับคันดินต้นแบบและดินจำลอง) โดยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะควบคุมพารามิเตอร์ข้างต้น ซึ่งจะทำให้ หน่วยแรง ความเค้น และความเครียดที่กระทำต่อแบบจำลองจะเป็นสัดส่วนตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรของมาตราส่วน

ปริมาณ	ตัวแปรทั่วไป	One-g physical modeling	ปริมาณ	ตัวแปรทั่วไป	One-g physical modeling
ความยาว	n_l	$1/n$	ความเครียด	$n_p n_g n_l / n_G$	$1/n^{1-\alpha}$
ความหนาแน่น	n_p	1	การเคลื่อนที่	$n_p n_g n_l^2 / n_G$	$1/n^{2-\alpha}$
ความเร่ง	n_g	1	ความหนืดของการไหลของเหลวในโพรง	n_μ	1
สตีเฟนส	n_G	$1/n^\alpha$	ความหนาแน่นของโพรงอากาศ	n_{pf}	1
ความเค้น	$n_p n_g n_l$	$1/n$	ค่าการซึมผ่านกรณีไหลแบบราบเรียบ	$n_{pf} n_g / n_\mu$	1
แรง	$n_p n_g n_l^3$	$1/n^3$	ความชันชลศาสตร์	n_p / n_{pf}	1
แรงต่อหน่วยความยาว	$n_p n_g n_l^2$	$1/n^2$	เวลา(ในการกระจาย)	$n_\mu n_l^2 / n_G$	$1/n^{2-\alpha}$

*หมายเหตุ: เมื่อ n = มิติระหว่างของคันดินต้นแบบและคันดินแบบจำลอง และ α = อัตราส่วนระหว่างสตีเฟนสกับคันดินต้นแบบและดินจำลอง

2.2 ทฤษฎีการจำลองทางชลศาสตร์ (Wood, 1991)

การสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของลำน้ำ และใช้ในการพิจารณาเบื้องต้นในการพิจารณาลักษณะโครงสร้างอาคารทางชลศาสตร์ที่จะเหมาะสมในการจัดการและบริหารน้ำ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวให้สอดคล้องกับพฤติกรรมและเงื่อนไขของต้นแบบของกรณีศึกษา โดยใช้หลักการกฎความคล้ายทางด้านชลศาสตร์ และข้อมูลทางชลศาสตร์จากสนาม กฎความคล้ายทางด้านชลศาสตร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ ความคล้ายทางด้านเรขาคณิต ความคล้ายทางด้านจลนศาสตร์ และความคล้ายทางด้านพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของชลศาสตร์ของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในกรณีน้ำไหลล้นสันเขื่อน จะใช้ค่า froude number ดังสมการที่ (1) เพื่อให้พฤติกรรมการไหลของลำน้ำต้นแบบ และลำน้ำในห้องปฏิบัติการมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้น ค่า froude number ของแบบจำลอง (F_{rm}) และของต้นแบบ (F_{rp}) ดังสมการที่ (2) และรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาของ froude's similarity แสดงดังตารางที่ 2

$$F_{rp} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^2 g}} = \frac{V_{rp}}{\sqrt{gL_{rp}}} \quad (1)$$

เมื่อ	F_{rp}	คือ Froude Number ของแบบต้นแบบ
	L	คือ มิติของความยาว (m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
	V	คือ ความเร็วของการไหล (m/s)
	g	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

$$F_{rm} = F_{pm} = \frac{V_{rm}}{\sqrt{gL_{rm}}} \quad (2)$$

เมื่อ F_{rm} คือ Froude Number ของแบบจำลอง
 L คือ ความลึกของน้ำ

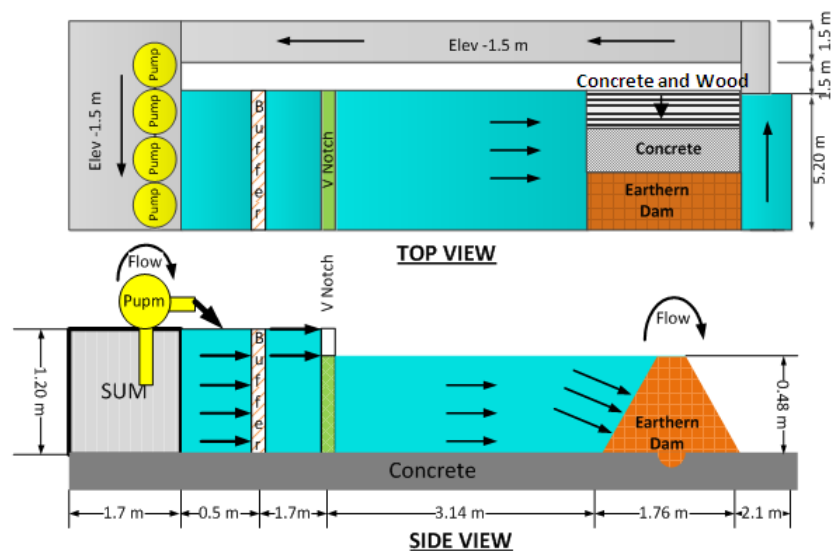
ตารางที่ 2 Froude's Similarity

คุณสมบัติทั่วไป (Characteristic)	มิติ (Dimension)	อัตราส่วน (Scale Ratio)
ความยาว	L	$1/n$
พื้นที่	L^2	$1/n^2$
เวลา	T	$1/n^{1/2}$
ความเร็ว	L / T	$1/n^{1/2}$
อัตราการไหล	L^3 / T	$1/n^{5/2}$
ความดัน	M / L^2	$1/n$
สัมประสิทธิ์ความขรุขระ	$L^{-1/3} T$	$1/n^{1/6}$

*หมายเหตุ: เมื่อ n = มิติระหว่างของคันดินต้นแบบและคันดินแบบจำลอง

3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้สร้างแปลงทดสอบเพื่อจำลองคันดิน และบ่อพักน้ำเพื่อสูบน้ำก่อนการทดสอบและปล่อยน้ำหลังการทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปภาพที่ 2 ทั้งนี้ในการสูบน้ำได้ทำการติดตั้งปั๊มบริเวณด้านหลังแปลงทดสอบจำนวน 4 ตัว



รูปภาพที่ 2 รูปด้านบนและด้านข้างของแปลงทดสอบคันดิน

ในการจำลองคันดิน ได้กำหนดอัตราส่วนของแบบจำลองโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) ซึ่งในงานวิจัยได้กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3 - 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของคันดินต้นแบบและแบบจำลอง

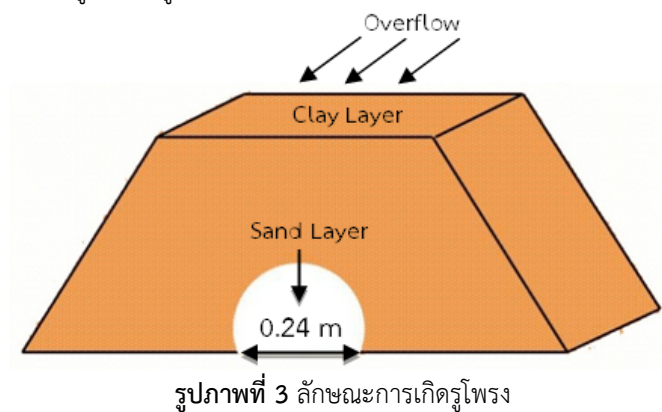
ปริมาณ	คุณสมบัติคันต้นแบบ	คุณสมบัติคันแบบจำลอง
มาตราส่วน (1:n)		1:8.5
ความสูงของคันดิน, H (m)	4.10	0.48
หน่วยน้ำหนักของคันดิน, γ (kN/m ³)	14.70	14.70
ความกว้างของคันดิน, L (m)	15.00	1.76
เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง, (m)	2.00	0.24

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของการไหลของน้ำเมื่อพิจารณาค่า Froude Number

ปริมาณ	คุณสมบัติคันต้นแบบ	คุณสมบัติคันแบบจำลอง
มาตราส่วน (1:n)		1:8.5
ความเร็ว (m/s)	1.50	0.50
ความดัน (kN/m ²)	40.22	4.73
ชนิดของท้องคลอง	ดินเหนียว	คอนกรีต

4. วิธีการดำเนินงาน

1. ทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน
2. ทำการ Calibration สำหรับ ค่าระดับความสูงของน้ำในแปลงทดสอบ กับระดับน้ำใน Piezometer.
3. ทำการ Calibration สำหรับ V-notch เพื่อกำหนดอัตราการไหล กับความสูงของระดับน้ำด้านเหนือน้ำของ V-notch
4. ทำการบดอัดคันดิน โดยจะต้องควบคุมความหนาแน่นของดินตัวอย่างตามที่ระบุไว้ในข้างต้น โดยความเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงสามารถกำหนดได้ตามตารางที่ 3 ซึ่งขั้นตอนการทำรูโพรงได้ใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.24 m ทำการแบ่งครึ่งท่อ จากนั้นใส่ทรายในท่อ PVC และขึ้นรูปคันดินตามขนาดและความหนาแน่นที่ทำการออกแบบ พร้อมทั้งท่อ PVC ออกจึงจะได้ลักษณะรูโพรงดังรูปภาพที่ 3



5. ปล่อน้ำเข้าแปลงทดสอบที่ระดับสันคันดิน ทำการแช่คันดินทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อน้ำให้ไหลผ่านสันคันดินพร้อมกับวัดความสูงของระดับด้านหน้า V-notch และระยะเวลา
6. วัดและบันทึกการเคลื่อนตัวของคันดิน และระดับน้ำใน Piezometer พร้อมจับเวลา และบันทึกภาพจนกระทั่งคันดินพัง ซึ่งทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง
7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน (ณัฐพงษ์ เภาวัลย์ และสนิท วงษา, 2557: 284; ระพีพรรณ ทามูล และสนิท วงษา, 2557: 283)

จากการเก็บตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติของดิน โดยเก็บตัวอย่าง 2 แหล่งตัวอย่าง ซึ่งดินตัวอย่างที่ 1 เป็นดินบริเวณด้านหน้าซ้ายของประตูระบายน้ำบางโฉมศรี ตามแนวคลองเชียงราก ดินตัวอย่างที่ 2 แหล่งที่ 2 เป็นดินบริเวณด้านข้างของประตูระบายน้ำบางโฉมศรี ตามแนวคลองชัยนาท-อยุธยา และดินตัวอย่างที่ 3 เป็นดินที่ใช้สำหรับการนำทำการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ โดย คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตัวอย่างแหล่งที่ 1, 2 และ ดินที่ใช้จำลองสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินตัวอย่างแหล่งที่ 1, และ ดินที่ใช้จำลอง 2

คุณสมบัติดินเชิงวิศวกรรม	ดินแหล่งที่ 1	ดินแหล่งที่ 2	ดินทดสอบ
Specific Gravity, G_s	2.68	2.71	2.87
Liquid Limit, LL%	43.00	45.00	51.00
Plastic Limit, PL%	21.00	20.53	24.00
Plastic Index, PI%	22.80	24.17	27.00
C_c	2.57	2.15	2.60
C_u	20.77	21.43	29.70
Soil Type	SW-SC	SW-SC	SW-SC

สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดิน เพื่อทราบถึงความแตกต่างในเรื่องของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดิน โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D 3080-98 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions สามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินแหล่งที่ 1, 2 และ ดินที่ใช้จำลอง

ดินตัวอย่าง	คุณสมบัติดินเชิงกำลังแรงเฉือน				
	ϕ (°)	c (kPa)	γ_t (kN/m ³)	e_o	K_o (cm/sec)
แหล่งที่ 1	33.00	3.40	14.70	0.70	1.92×10^{-9}
แหล่งที่ 2	30.00	3.40	14.70	0.70	1.65×10^{-7}
ดินที่ใช้จำลอง	17.00	17.00	14.70	0.89	8.5×10^{-8}

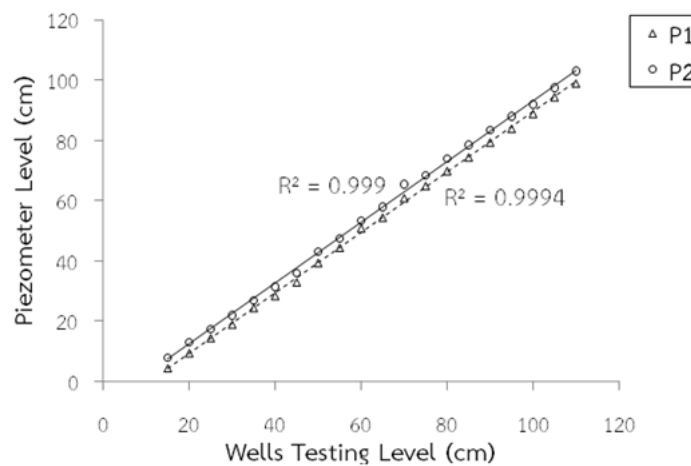
ผลการ Calibration ค่าระดับความสูงของน้ำในแปลงทดสอบกับระดับน้ำใน Piezometer (ณัฐพงษ์ เภาวัลย์ และสนิท วงษา, 2557: 284; ระพีพรรณ ทามูล และสนิท วงษา, 2557: 283)

ความสัมพันธ์ของค่าระดับความสูงของน้ำในบ่อและระดับน้ำใน Piezometer จากรูปภาพที่ 4 สามารถแสดงสมการได้ดังสมการที่ (3) และ (4) โดยตำแหน่งของ Piezometer สามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 5

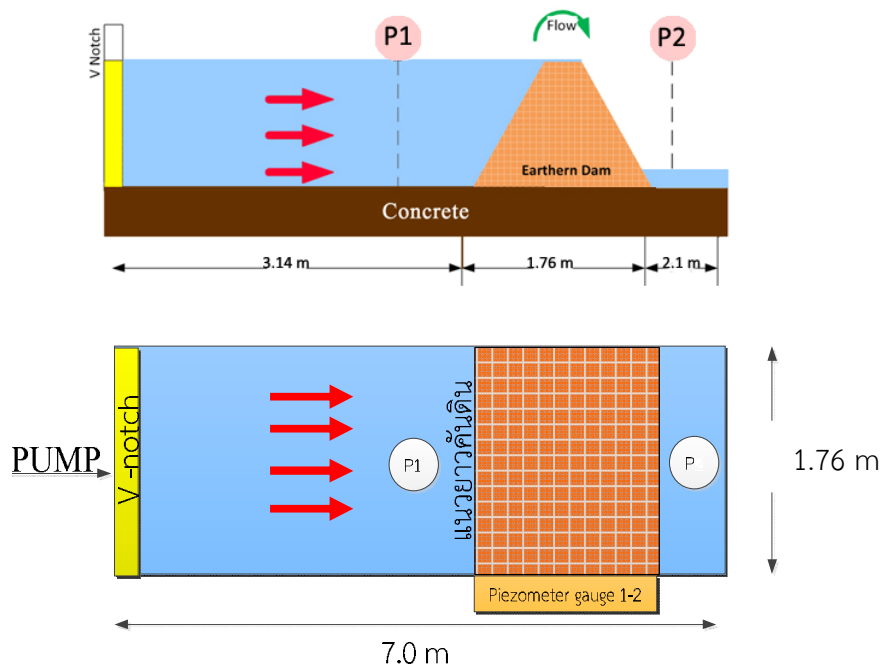
$$H = 1.002P1 - 10.633 \quad (3)$$

$$H = 1.010P2 - 7.722 \quad (4)$$

เมื่อ H คือระดับน้ำที่ต่ำที่สุดในบ่อทดสอบ (cm) และ P คือระดับน้ำใน Piezometer (cm) โดยจะเริ่มวัดได้เมื่อระดับน้ำในบ่อสูงมากกว่า 4 cm



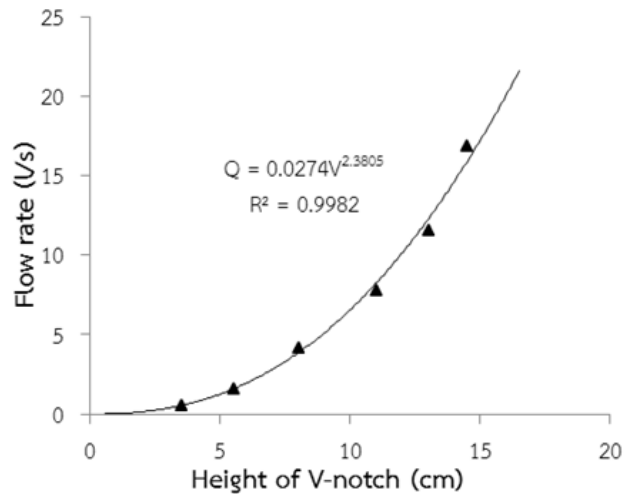
รูปภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าระดับความสูงของน้ำในแปลงทดสอบและระดับน้ำใน Piezometer



รูปภาพที่ 5 ตำแหน่ง Piezometer P1 และ P2

ผลการ Calibration สำหรับ V-notch (ณัฐพงษ์ เภาวัลย์ และสนธิท วงษา, 2557: 284; ระพีพรรณ ทามูล และสนธิท วงษา, 2557: 283)

การกำหนดอัตราการไหลของบ่อน้ำที่ใช้ทดสอบจะได้จากการอ่านค่าความสูงของ V-notch โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล, (Q) และระดับความสูงของน้ำที่ V-notch , (V)

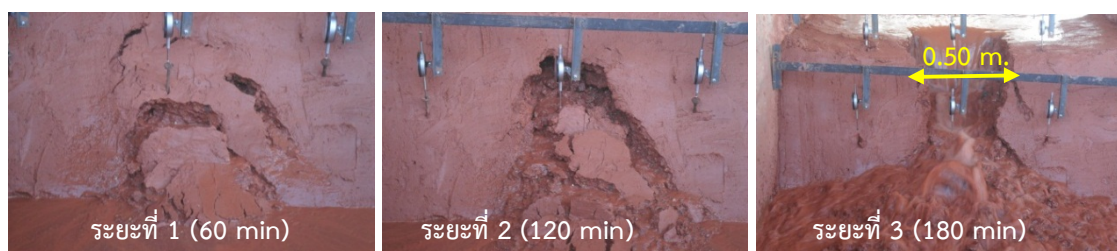
จากรูปภาพที่ 6 สามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และระดับความสูงของน้ำที่ V-notch ได้ตั้งสมการที่ (5) โดยสมการดังกล่าวมีค่า $R^2 = 0.99$ และเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$Q = 0.0274V^{2.3805} \quad (5)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (V/s)
 V = ความสูงของ V-notch (cm)

ผลการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคันดิน

จากการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคันดินกรณีที่เกิดรูโพรงตรงกลางบริเวณคันดิน โดยการจำลองคันดินบนพื้นฐานพื้นฐานหลักการย่อส่วน 1 g ซึ่งมาตราส่วนที่ใช้สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ระบุไว้ดังตารางที่ 5 และ 6 โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 V/s, 7.78 V/s, 11.59 V/s และ 16.84 V/s ซึ่งแต่ละอัตราการไหลได้ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยการทดสอบที่อัตราการไหลแตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของการไหลต่อลักษณะการวิบัติของคันดิน ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องขาดบริเวณตรงกลางคันดิน ดังแสดงในรูปภาพที่ 7-10



รูปภาพที่ 7 ลักษณะการวิบัติของคันดินที่อัตราการไหล 4.14 V/s ณ เวลาต่าง ๆ



รูปภาพที่ 8 ลักษณะการวิบัติของคันดินที่อัตราการไหล 7.78 L/s ณ เวลาต่าง ๆ

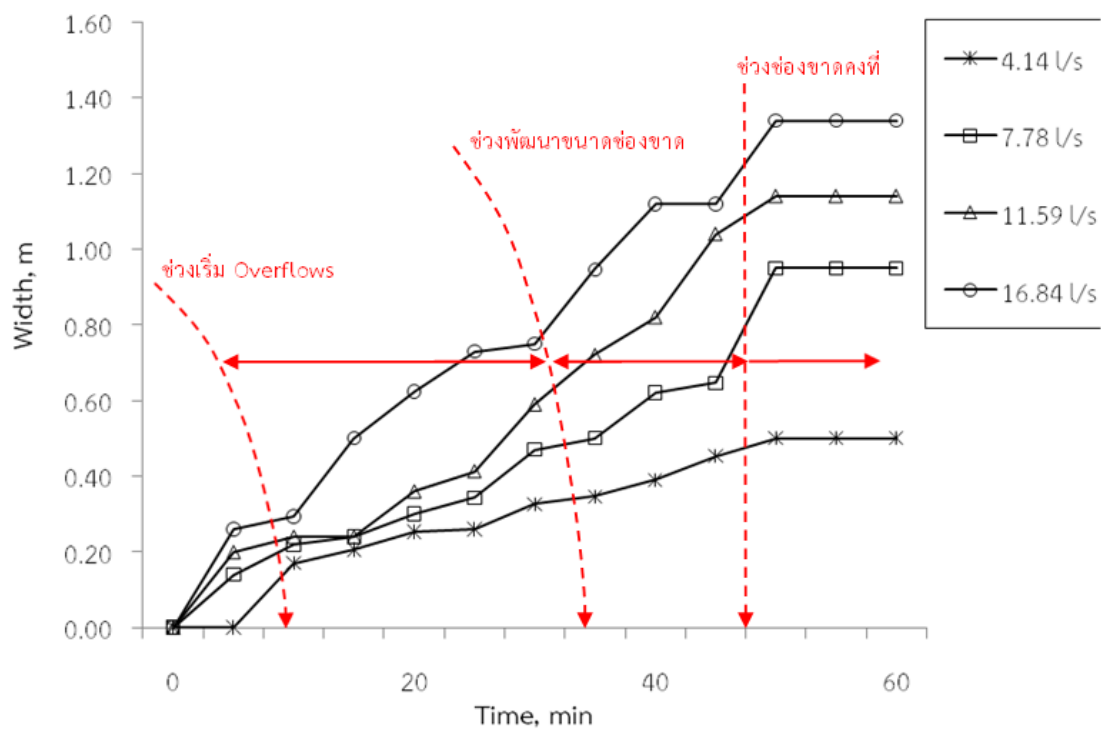


รูปภาพที่ 9 ลักษณะการวิบัติของคันดินที่อัตราการไหล 11.59 L/s ณ เวลาต่าง ๆ



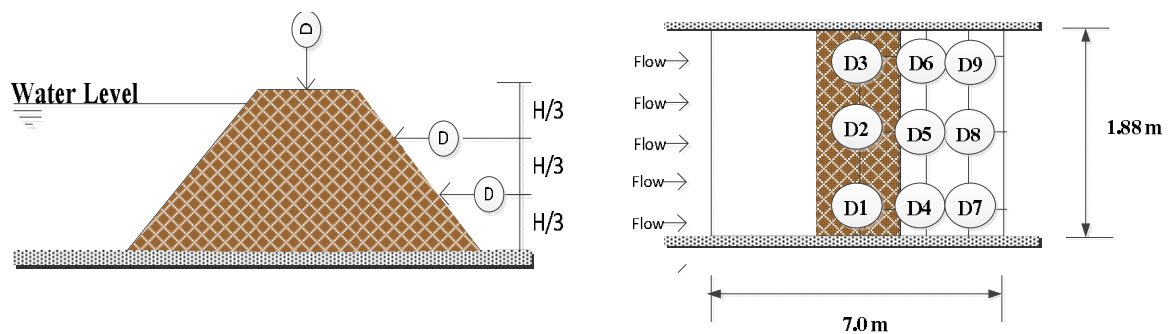
รูปภาพที่ 10 ลักษณะการวิบัติของคันดินที่อัตราการไหล 16.84 L/s ณ เวลาต่าง ๆ

ลักษณะการวิบัติของคันดิน จากรูปภาพที่ 7 – 10 จะเห็นได้ว่า ช่วงแรกหรือระยะที่ 1 หรือ 60 min แรกได้ทำการปล่อยน้ำแช่คันดินในระดับสันคันดิน เพื่อให้คันดินมีการอิ่มตัวเนื่องจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์จริง คันดินทำหน้าที่กักเก็บน้ำและรับน้ำเป็นระยะเวลานานจึงเกิดการวิบัติ จะสังเกตได้ว่า คันดินมีการไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรง ซึ่งส่งผลให้คันดินเคลื่อนยุบตัวลงเล็กน้อย และในช่วงระยะที่ 2 หรือช่วงเวลา 120 min ต่อมาของการทดสอบ ได้ทำการปล่อยน้ำในอัตราการไหลเท่าเดิม เมื่อน้ำไหลผ่านคันดินทำให้คันดินเคลื่อนยุบตัวลงมากและกระแสน้ำได้กัดเซาะคันดินจนเกิดช่องขาดบริเวณตรงกลางคันดินและแผ่ขยายใหญ่ขึ้น ในช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงของช่องขาดมีความกว้างคงที่ ซึ่งความกว้างของช่องขาดขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่ทำการทดสอบ โดยเมื่อทำการทดสอบที่อัตราการไหลสูงสุด ซึ่งในที่นี้คือ 16.84 L/s คันดินเกิดช่องขาดกว้างถึง 1.34 m ขณะเดียวกันเมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 L/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่น้อยที่สุดของการทดสอบครั้งนี้ พบว่า คันดินเกิดช่องขาดเพียง 0.50 m โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 11



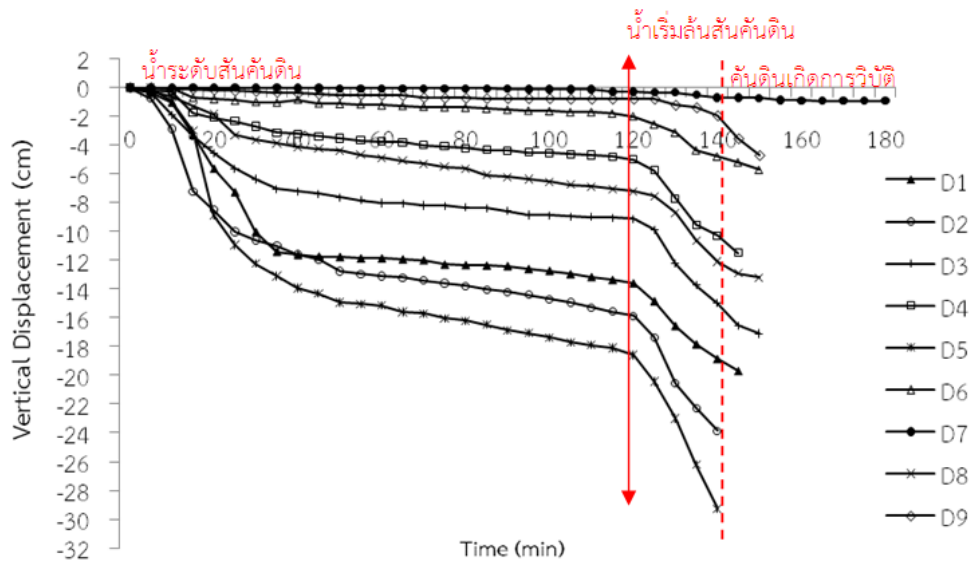
รูปภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของช่องขาดเทียบกับระยะเวลาเมื่อเกิดการไหลล้นของน้ำข้ามสันคันดิน

เพื่อหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งระหว่างคันดินกับระยะเวลาเมื่อน้ำเริ่มไหลล้นคันดิน ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการติดตั้ง Dial Gauge ทั้งหมด 9 ตำแหน่งดังแสดงในรูปภาพที่ 12 เพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดิน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดินที่อัตราการไหลต่าง ๆ ได้ดังรูปภาพที่ 13-16



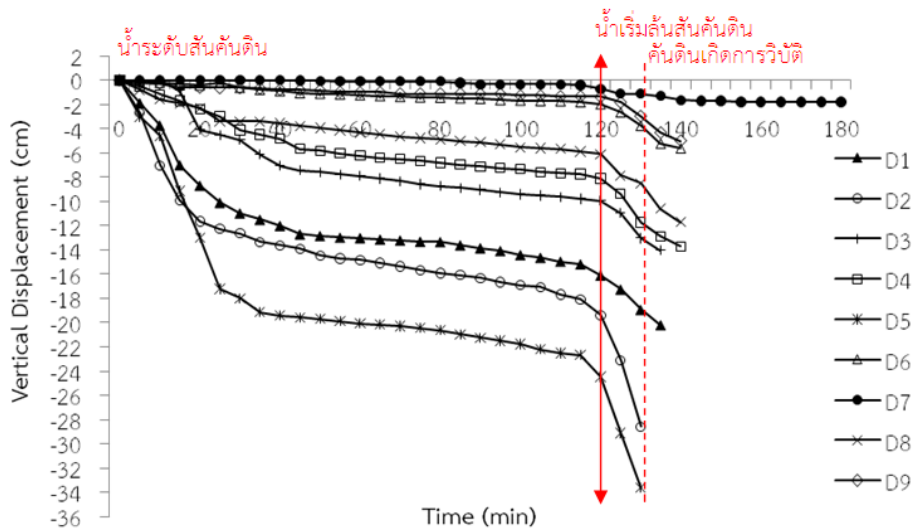
รูปภาพที่ 12 ตำแหน่งการติดตั้ง Dial Gauge

เมื่อพิจารณาจากรูปภาพที่ 13 ซึ่งเป็นการทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 L/s จะเห็นว่าคันดินมีการทรุดตัวลงเรื่อย ๆ เนื่องจากไหลซึมผ่านของน้ำผ่านรูโพรง โดยเมื่อทำการขังน้ำทิ้งไว้ก่อน 120 min และทำการปล่อยน้ำให้ไหลล้นสันคันดิน ในช่วงระยะเวลาต่อมา คันดินเกิดการทรุดตัวมากขึ้น การไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรงส่งผลให้คันดินบริเวณด้านหลังถูกกัดเซาะ จนกระทั่งเกิดการพังทลายลงที่ช่วงเวลา 135 min ของการทดสอบ โดยที่ตำแหน่ง D5 เกิดการทรุดตัวมากที่สุด ขณะที่ตำแหน่ง D7 มีการทรุดตัวเพียงเล็กน้อย



รูปภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดินที่อัตราการไหล 4.14 U/s ณ ตำแหน่ง D1-D9

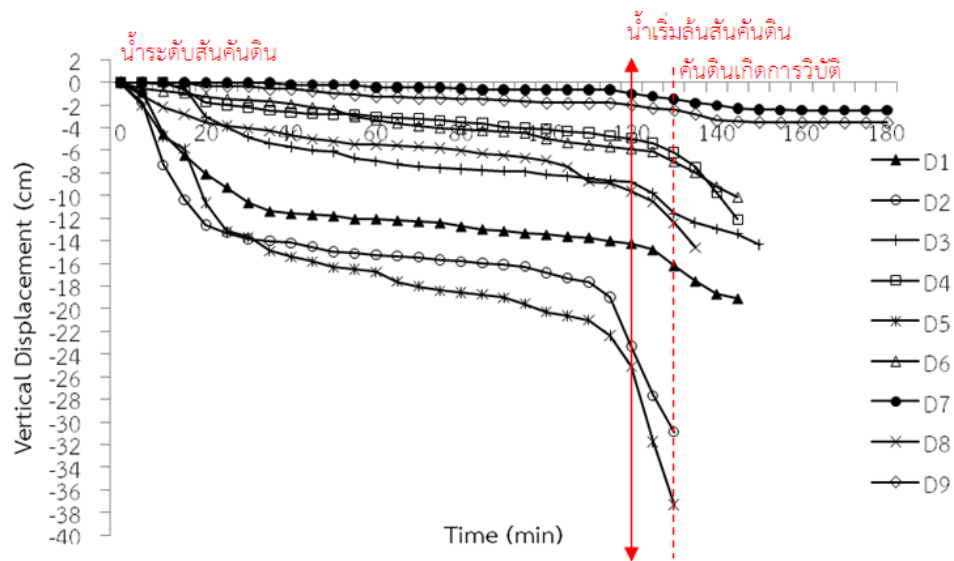
การทดสอบที่อัตราการไหล 7.78 U/s เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดิน จากรูปภาพที่ 14 จะเห็นว่า คันดินมีพฤติกรรมทรุดตัวของเช่นเดียวกับการทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 U/s เมื่อทำการปล่อยน้ำให้ไหลผ่านคันดินในช่วงเวลา 120 min ของการทดสอบ พบว่า คันดินเกิดการทรุดตัวและเกิดการพังทลายเร็วกว่าการทดสอบข้างต้น โดยคันดินเกิดการวิบัติในช่วงเวลาที่ 133 min ของการทดสอบ ซึ่งเกิดขึ้นตำแหน่งเดียวกันกับการทดสอบข้างต้น นั่นคือ ตำแหน่ง D5 ซึ่งเป็นบริเวณตรงกลางของคันดิน



รูปภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดินที่อัตราการไหล 7.78 U/s ณ ตำแหน่ง D1-D9

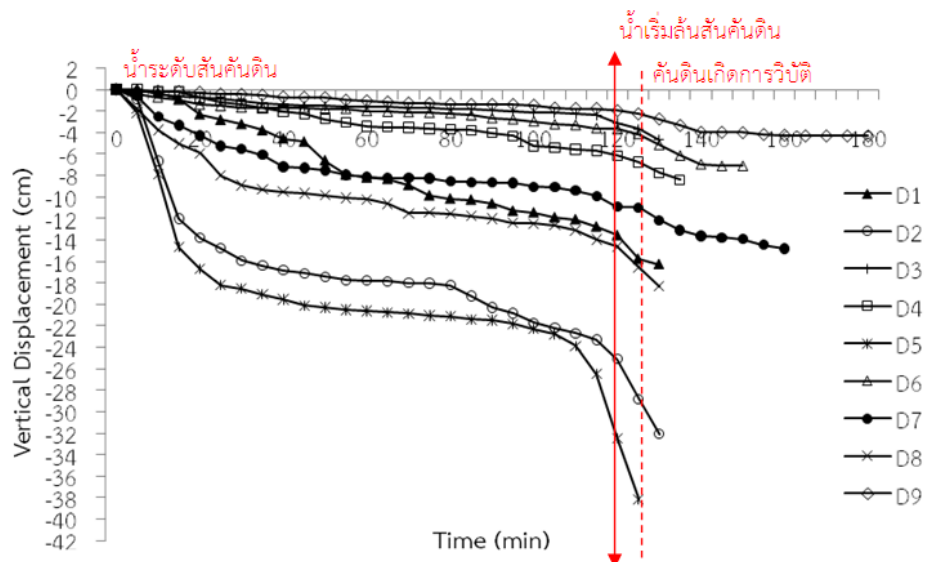
การทดสอบที่อัตราการไหล 11.59 U/s โดยพิจารณาจากรูปภาพที่ 15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดิน พบว่า การไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรงในระหว่างทำการขังน้ำเป็นระยะเวลา 120 min ส่งผลให้คันดินเกิดการทรุดตัวลงเรื่อยๆ โดยเกิดการพังทลายลงเมื่อปล่อยน้ำให้ไหลผ่านคันดินในช่วงเวลาที่ 127 min ของการทดสอบ

ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวมากที่สุดคือ ตำแหน่ง D5 อย่างไรก็ตามการวิบัติของคันที่เกิดขึ้น ยังคงเกิดขึ้นตำแหน่งเดิมและเนื่องจากการไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรงซึ่งกำหนดให้อยู่ตรงกลางคันดินเสมอ



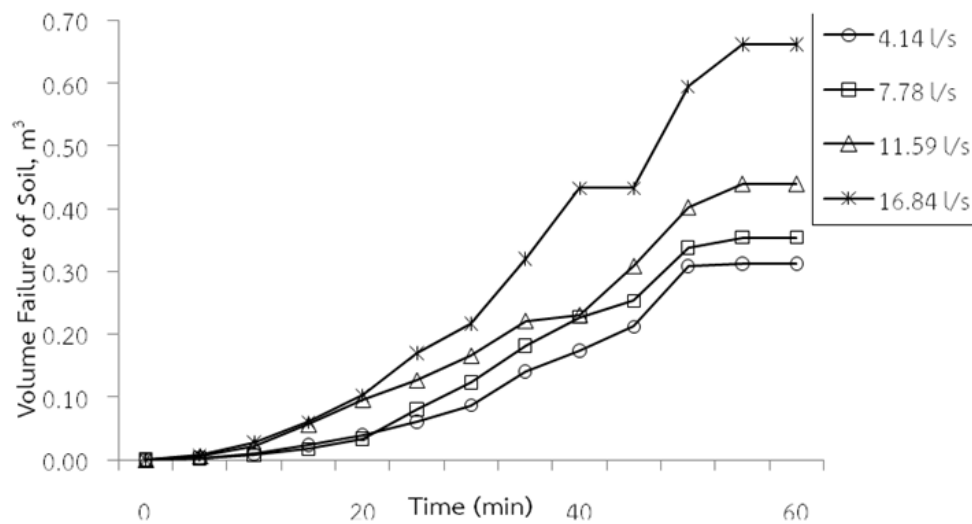
รูปภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดินที่อัตราการไหล 11.59 U/s ณ ตำแหน่ง D1-D9

การทดสอบที่อัตราการไหล 16.84 U/s จากรูปภาพที่ 16 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดิน พบว่า คันดินมีพฤติกรรมการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบข้างต้น และเมื่อน้ำไหลผ่านคันดิน คันดินเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรงบวกกับอัตราไหลของน้ำที่สูง ส่งผลให้คันดินเกิดการพังทลายโดยเร็ว ซึ่งที่ตำแหน่ง D5 เกิดการทรุดตัวมากที่สุด

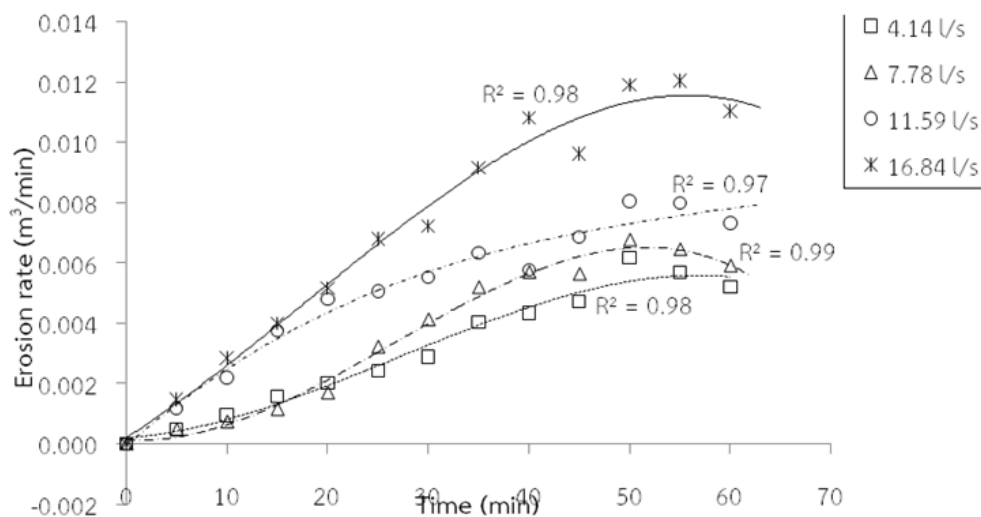


รูปภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของคันดินที่อัตราการไหล 16.84 U/s ณ ตำแหน่ง D1-D9

ลักษณะการวิบัติของคันดิน มีลักษณะเริ่มจากการไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรง จนคันดินเกิดการเคลื่อนยุบและเมื่อน้ำไหลล้นสันคันดินได้เกิดช่องแตกขนาดเล็กและขยายใหญ่ขึ้น เนื่องจากการกัดเซาะของกระแสน้ำ จากรูปภาพที่ 17 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรดินที่ถูกพัดพาเทียบกับระยะเวลาของคันดินที่ทำการทดสอบ ซึ่งคำนวณได้จากการวัดความลึกและความกว้างของช่องขาดทุก ๆ 5 cm จากนั้นนำมาขึ้นรูปสามมิติในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และคำนวณหาปริมาตรของช่องขาด จะให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการไหลผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาตรของดินถูกพัดพาด้วยกระแสน้ำมากขึ้น การทดสอบที่อัตราการไหลที่สูงที่สุดมีค่าอัตราการกัดเซาะสูงเช่นกัน



รูปภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรดินที่ถูกพัดพาเทียบกับระยะเวลา



รูปภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะของหน้าดินเทียบกับระยะเวลา

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดเซาะของคันดิน (erosion rate) เทียบกับระยะเวลาที่กระแสน้ำไหลผ่านดังรูปภาพที่ 18 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การทดสอบที่อัตราการไหลที่สูงที่สุดมีค่าอัตราการกัดเซาะสูงเช่นกัน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังที่สมการ (6) – (9) ตามลำดับอัตราการไหลน้อยไปหามาก

$$C_{1B} = -0.00000005t^3 + 0.0000041t^2 - 0.00002t - 0.00019 \quad (6)$$

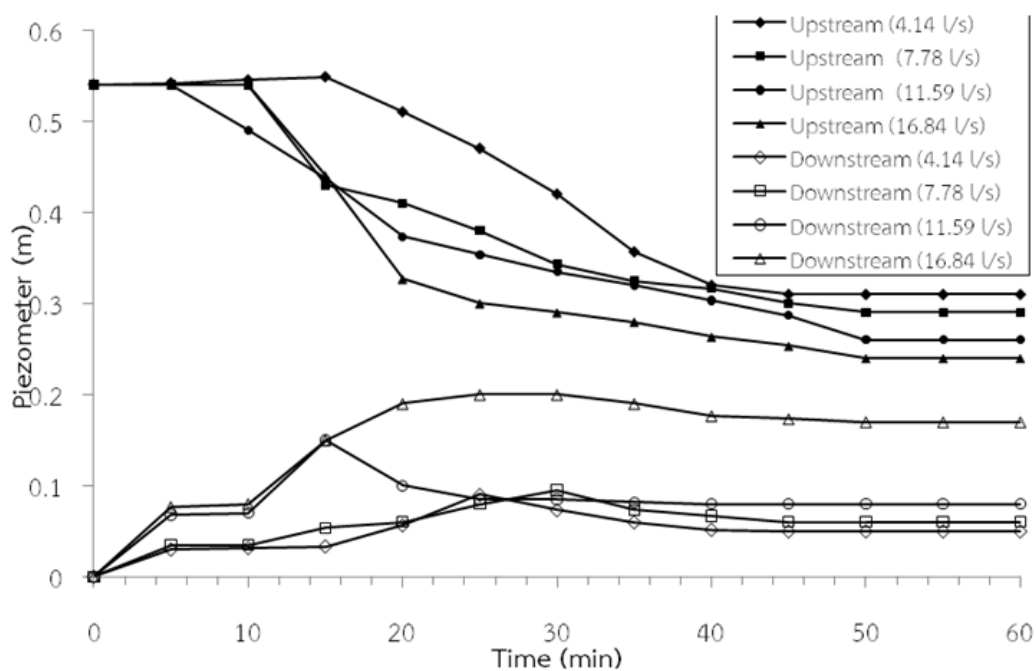
$$C_{2B} = -0.0000001t^3 + 0.0000079t^2 - 0.000019t - 0.00013 \quad (7)$$

$$C_{3B} = -0.00000002t^3 - 0.0000038t^2 + 0.00029t - 0.000057 \quad (8)$$

$$C_{4B} = -0.00000006t^3 + 0.0000033t^2 + 0.00021t + 0.0002 \quad (9)$$

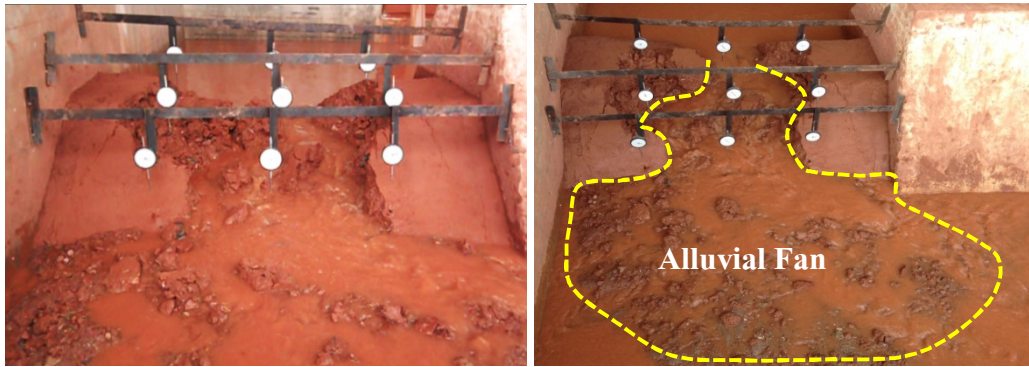
เมื่อ C = อัตราการกัดเซาะของคันดิน (erosion rate), (m^3/min)
 t = ระยะเวลากระแสน้ำไหลผ่าน, (min)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบริเวณด้านหน้าและด้านหลังคันดิน เมื่อน้ำไหลผ่านคันดินจนกระทั่งคันดินวิบัติ ดังแสดงในรูปภาพที่ 19 พบว่า ระดับน้ำบริเวณด้านหน้าคันดินมีค่าระดับน้ำลดลงในช่วงเวลาที่ 15-20 min แรกที่ทำการปล่อยน้ำให้ไหลผ่านคันดิน เนื่องจากทำการเข้าน้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 120 min ทำให้คันดินถูกกัดเซาะจากไหลซึมของน้ำผ่านรูโพรงบริเวณคันดิน เมื่อทำการปล่อยน้ำให้ผ่านคันดิน จึงทำให้คันดินเกิดการทรุดตัวจนกระทั่งเกิดช่องขาดบริเวณตรงกลาง เมื่อช่องทางการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับน้ำด้านหลังคันดินมีระดับสูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่าระดับน้ำด้านหน้าคันดินของการทดสอบที่อัตราการไหล 16.84 L/s มีการลดระดับลงมากที่สุด ขณะเดียวกันระดับน้ำด้านหลังก็สูงขึ้นตาม เนื่องจากอัตราการไหลที่สูง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 L/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดของการทดสอบครั้งนี้ จะเห็นได้ว่า ระดับน้ำบริเวณด้านหน้าคันดินของการทดสอบอัตราการไหลดังกล่าวมีระดับสูงที่สุด ซึ่งระดับน้ำด้านหลังก็มีระดับที่ต่ำมากที่สุด



รูปภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบริเวณด้านหน้าคันดินและด้านหลังคันดิน ช่วงคันดินวิบัติ

การไหลผ่านของกระแสน้ำบริเวณตรงกลางคันดิน ทำให้เกิดการกัดเซาะจนเกิดช่องขาดขนาดเล็กและได้ขยายใหญ่ขึ้น ส่งผลให้กระแสน้ำบริเวณตรงกลางคันดินไหลเชี่ยวและเกิดการกระจายตัวบริเวณท้ายน้ำ ทั้งนี้กระแสน้ำที่ไหลเชี่ยวจะได้พัดพามวลดินบริเวณดังกล่าวออกไป จนกระจายตัวแผ่คล้ายรูปพัด (alluvial fan)



รูปภาพที่ 20 ลักษณะการกระจายของเม็ดดิน

บทสรุป

การจำลองพฤติกรรมการวิบัติของคันดินกรณีที่คันดินเกิดรูโพรงบริเวณตรงกลางคันดิน จากการทดสอบสามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า ลักษณะการวิบัติของคันดินกรณีน้ำไหลผ่านรูโพรงบริเวณคันดิน มีลักษณะจากการไหลซึมผ่านของน้ำผ่านรูโพรงบริเวณคันดิน ซึ่งส่งผลให้บริเวณด้านหลังคันดินถูกกัดเซาะและเคลื่อนยุบตัวลง เมื่อน้ำไหลผ่านคันดินทำให้คันดินเกิดช่องขาดบริเวณตรงกลางคันดินและได้กัดเซาะแผ่ขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งความกว้างของช่องขาดขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่ทำการทดสอบ โดยเมื่อทำการทดสอบที่อัตราการไหลสูงสุด ซึ่งในที่นี้คือ 16.84 L/s คันดินเกิดช่องขาดกว้างถึง 1.34 m ขณะเดียวกันเมื่อทดสอบที่อัตราการไหล 4.14 L/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่น้อยที่สุดของการทดสอบครั้งนี้ พบว่า คันดินเกิดช่องขาดเพียง 0.50 m ทำให้เกิดช่องขาดบริเวณตรงกลางคันดิน เป็นผลให้ช่องทางการไหลของน้ำเพิ่มซึ่งได้กัดเซาะช่องขาดและแผ่ขยายออกเป็นวงกว้าง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรดินที่ถูกกัดเซาะเทียบกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบ พบว่า เมื่อระยะเวลาการไหลผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาตรของดินถูกพัดพาด้วยกระแสน้ำมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการทดสอบที่อัตราการไหลต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า การทดสอบที่อัตราการไหล 16.68 L/s มีปริมาตรของดินที่ถูกกัดเซาะมากที่สุด โดยสามารถคิดเป็นร้อยละ 51.69 ของปริมาตรดินทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาตรของดินที่ถูกกัดเซาะแปรผันตามอัตราการไหลที่ทำการทดสอบ โดยจะมีปริมาตรของดินที่ถูกกัดเซาะเป็นปริมาณมากเมื่ออัตราการไหลของน้ำสูง ทั้งนี้ระดับน้ำบริเวณด้านหน้าคันดินจะมีการลดลง เมื่อขนาดช่องแตกการวิบัติของคันดินเพิ่มมากขึ้น โดยคิดเป็นร้อยละ 44.44 จากระดับสันคันดิน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนตามโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยผ่านสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) และขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมชลประทาน ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษาโดยตลอดการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมชลประทาน. (2555). รายละเอียดโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการน้ำบริเวณประตูน้ำบางโฉมือ อ.อินทร์บุรี จ.สิงห์บุรี. กรุงเทพฯ: กรมชลประทาน.
- ณัฐพงษ์ เภาวัลย์ และสนธิ วงษา. (2557). การจำลองทางกายภาพของคันดินช่วงน้ำท่วม ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2557 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ. ขอนแก่น, หน้า 284.

- ไทยพับลิก้า. (2554). **วิกฤตน้ำท่วม 2554**. ค้นเมื่อ 1 เมษายน 2557 จาก <http://thaipublica.org/2011/12/world-bank-flood-damage/>
- ระพีพรรณ ทามูล และสนธิท วงษา. (2557). การจำลองกายภาพของคันดินบริเวณรอยต่อโครงสร้างประตูระบายน้ำ ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19**, วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2557 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ. ขอนแก่น, หน้า 283.
- Wood, M. (1991). **Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press.