

การเลือกขนาดหินทิ้งสำหรับการไหลแบบไหลข้ามในทางน้ำเปิด Riprap sizing for overtopping flow in open channel

ณัฐ ฮุนพงษ์สิมานนท์¹, เสรี จันทโรยธ^{1,*}
และอนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์¹

บทคัดย่อ

หินทิ้งเป็นโครงสร้างชลศาสตร์ที่นิยมใช้ในการป้องกันการกัดเซาะของโครงสร้างชลศาสตร์อื่น ๆ เช่น เขื่อนวัสดุถมคันกันน้ำ ฝาย และทางน้ำเปิด เป็นต้น การศึกษานี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อหาแนวทางในการหาขนาดของหินทิ้งที่มีการไหลข้ามโครงสร้าง ภายใต้การใช้วัสดุหินภายในประเทศที่คัดขนาดสม่ำเสมอ 4 ขนาด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 12.7, 19.1, 38.1 และ 50.8 มม. ความลาดชันของหินทิ้ง 3 ระดับคือ 2%, 5% และ 10% และแต่ละอัตราการไหลของน้ำวัดอัตราการพัดพาหินทิ้ง 3 ครั้ง ทดลองในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.60 ม. ยาว 17 ม. สูง 0.75 ม. ของห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งสิ้น 23 กรณี 66 ชุดข้อมูล พบว่าปัจจัยความสัมพันธ์หลักกับขนาดหินทิ้งที่พบคือ ความลาดชัน อัตราการไหล และมุมทรงตัว โดยขนาดของหินทิ้งจะใหญ่ขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการไหลสูงสุดของทางน้ำโดยเป็นแบบเส้นตรง และขนาดของหินทิ้งจะใหญ่ขึ้นในอัตราที่มากขึ้นตามการเพิ่มความลาดชันร่วมกับมุมทรงตัว นอกจากนี้การศึกษาได้เสนอสมการในการเลือกขนาดหินทิ้งในเบื้องต้นที่สัมพันธ์กับตัวแปรดังกล่าว

คำสำคัญ: แบบจำลองกายภาพ, ชลศาสตร์, การไหลแบบไหลข้าม, หินทิ้ง, ทางน้ำเปิด

Abstract

Riprap is a hydraulic structure which is normally used for erosion protection of other hydraulic structures such as embankments, levees, weirs and open channel. This experimental study was intended to determine a guide for estimating riprap size subjected to overtopping flow. Four uniformly graded sizes of local riprap material with nominal size of 12.7, 19.1, 38.1 and 50.8 mm, 3 riprap slopes at 2%, 5% and 10% and 3 riprap transport rates per water flow rate were used in this investigation. 23 cases and 66 data sets of experiment were performed in a rectangular flume of 0.60×17×0.75 m. in Coastal Hydraulic Laboratory, Department of Water Resources Engineering, Chulalongkorn University. The study results indicated that the riprap size at the threshold related to 3 major parameters consisting of riprap layer slope, water flow rate, and riprap's angle of repose. It was found that the riprap size increased linearly with the threshold flow rate, and also increased gradually with the slope and riprap's angle of repose. In

¹ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* Corresponding author, E-mail: seree.c@chula.ac.th

addition to the study results, an equation as a guide for preliminarily determining riprap size from parameters concerned was proposed.

Keywords: physical model, hydraulic, overtopping flow, riprap, open channel

บทนำ

หินทิ้ง (riprap) เป็นโครงสร้างชลศาสตร์ประกอบด้วยหินคละขนาดกัน (graded size) หรือคัดขนาดสม่ำเสมอ (uniform size) ถมเป็นชั้น (layer) เพื่อป้องกันการกัดเซาะตลิ่งน้ำหรือตลิ่งตามตำแหน่งที่ถมเนื่องจากกระแสน้ำหรือคลื่นบริเวณนั้นมีพลังงานมากพอที่จะพัดพาวัสดุตลิ่งน้ำหรือตลิ่งเดิมได้ (USBR, 1987) ซึ่งมักเป็นการไหลแบบไหลข้าม (overtopping flow) ตัวหินทิ้ง ดังนั้นการออกแบบต้องการใช้หินทิ้งขนาดเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้โดยไม่เกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างหินทิ้งภายใต้สภาวะการไหลที่ออกแบบหรือกำหนดให้

การศึกษาหาขนาดหินทิ้งที่มีเสถียรภาพและปัจจัยที่เกี่ยวข้องภายใต้การไหลแบบท่วมตัวโครงสร้างนั้นมีมานานและต่อเนื่องกันเป็นจำนวนมาก โดย Abt (2013) พยายามรวบรวมมาได้เป็นจำนวน 21 การศึกษาในห้องปฏิบัติการหรือการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมจำนวนปัจจัยทั้งสิ้น 8 ปัจจัย ได้แก่ ความลาดตลิ่งน้ำ (channel bed slope) อัตราการไหล (flow rate) มุมทรงตัว (angle of repose) ความคละกัน (uniformity) ความลึกการไหล (flow depth) ความเร็วการไหล (flow velocity) ความกว้างตลิ่งน้ำ (channel bed width) และความหนาชั้นหินทิ้ง (riprap layer's thickness) ได้สรุปว่าให้เลือกใช้ปัจจัยและการศึกษาตามข้อจำกัดของงานเท่านั้น

การศึกษานี้ต้องการทราบปัจจัยและความสัมพันธ์ที่มีผลต่อเสถียรภาพของหินทิ้งโดยใช้ขนาดช่วง 12.7 ถึง 50.8 มม. (0.5 ถึง 2 นิ้ว) ในความลาดชันของชั้นหินทิ้งช่วง 2% ถึง 10% ด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ของทางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.60 ม. ยาว 17 ม. สูง 0.75 ม. ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรการไหล ณ สภาวะเริ่มเคลื่อนที่ของหินทิ้งกับคุณลักษณะของหินทิ้ง

การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

จาก 21 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับขนาดและเสถียรภาพของโครงสร้างหินทิ้งซึ่งรวบรวมโดย Abt (2013) ที่กล่าวมา แจกแจงความถี่ที่ใช้ปัจจัยดังนี้ ความลาดตลิ่งน้ำ (S, θ) 20 การศึกษา อัตราการไหล (Q) 18 การศึกษา มุมทรงตัว (ϕ) 9 การศึกษา ความคละกัน (C_u) 5 การศึกษา ความลึกการไหล (y) 4 การศึกษา ความเร็วการไหล (V) 3 การศึกษา ความกว้างตลิ่งน้ำ (B) 1 การศึกษา และความหนาชั้นหินทิ้ง (T_h) 1 การศึกษา แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 เห็นได้ว่าความลาดชันและอัตราการไหลมีความสัมพันธ์กันอย่างสำคัญเทียบกับปัจจัยอื่นซึ่งมีไม่ถึงครึ่ง

พิจารณาความเร็วการไหล ความลึกการไหล และความกว้างตลิ่งน้ำ ทั้งสามปัจจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของอัตราการไหล ($Q = A \times V = B \times y \times V$, สำหรับทางน้ำหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือทางน้ำที่กว้าง) อันเป็นปัจจัยหลักที่ควรรวมกันได้ ความคละกันไม่ต้องคำนวณเมื่อหินทิ้งมีขนาดสม่ำเสมอ และความหนาชั้นหินทิ้ง ที่หนากว่าสองเท่าของขนาดหินเฉลี่ยนั้นไม่ต้องคิด คงเหลือเพียงอัตราการไหล ความลาดชัน และมุมทรงตัวที่เป็นปัจจัยอย่างเอกเทศ 3 ปัจจัยหลักนี้ที่ควรใช้ในการศึกษาขนาดหินทิ้งที่คัดขนาดสม่ำเสมอสำหรับการไหลแบบไหลข้ามโครงสร้างหินทิ้งที่หนาในทางน้ำเปิดหน้าตัดการไหลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตลิ่งน้ำลาดเอียงลงท้ายน้ำ

ตารางที่ 1 แหล่งอ้างอิง สมการ และความถี่ของตัวแปร

แหล่งอ้างอิง	สมการ	S	Q	ϕ	C_u	y	V	B	T_h
Isbash (1936)	$V_c = y \cdot \Psi \cdot D_{50}^{1/2}$					✓	✓		
Olivier (1967) *	$q_f = 0.423 \cdot D_{50}^{3/2} [(\gamma_s - \gamma) / \gamma]^{5/3} S^{-7/6}$	✓	✓						
Hartung & Scheuerlein (1970)	$q_f = \sigma \cdot y \cdot \left[1.2 \sqrt{D_{50}} \cos \phi \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)}{\sigma \cdot \gamma}} \right]$	✓	✓	✓		✓			
Knauss (1979)	$q_f = 0.18 \sqrt{g} \cdot D_{50}^{3/2} (1.2 / \Phi)^{5/3} S^{-7/6}$	✓	✓						
Stephenson (1979)	$D_{50} = \left[\frac{q_f (\tan \theta)^{7/6} n^{1/6}}{C \sqrt{g} \cdot [(1-n)(S-1) \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)]^{5/3}} \right]^{2/3}$	✓	✓	✓					
FHWA (1989) *	$D_{50} \cdot C_{HEC} = \frac{0.001 \cdot V_{avg}^3}{y^{0.5} \left\{ 1 - (\sin^2 \theta / \sin^2 \phi) \right\}^{1.5}}$	✓		✓			✓		
Abt & Johnson (1991) *	$D_{50} = 5.23 \cdot S^{0.43} (1.35 q_f)^{0.56}$	✓	✓						
Maynord (1992) *	$D_{50} = (2.26 \cdot S^{0.555} \cdot q_f^{2/3}) / (g^{1/3})$	✓	✓						
Wittler & Abt (1997) *	$D_{50} = 0.6 q_s^{0.56} C_s^{-0.67} (\tan \theta)^{-0.683} \left[\frac{\sin \theta}{(S_c \cos \theta - 1)(\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)} \right]^{1.11}$ $C_s = 0.75 + (\log C_u)^{-2}$	✓	✓	✓	✓				
Robinson et al. (1998)	$q_f = 9.76 \times 10^{-7} D_{50}^{1.89} S^{-1.5}, S < 0.10$ $q_f = 8.07 \times 10^{-6} D_{50}^{1.89} S^{-0.58}, 0.10 \leq S \leq 0.40$	✓	✓						
Mishra (1998)	$D_{50} = \frac{0.55 q_f^{0.52}}{C_u^{0.25} S^{0.75}} \left[\frac{\sin \theta}{(2.65 \cos \theta - 1)(\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)} \right]^{1.11}$	✓	✓	✓	✓				
Frizell et al. (1998)	Graphical analysis between $D_{50} \cdot C_u^{0.25}$ vs q_f groups in S	✓	✓		✓				

ตารางที่ 1 (ต่อ) แหล่งอ้างอิง สมการ และความถี่ของตัวแปร

แหล่งอ้างอิง	สมการ	S	Q	ϕ	C_u	y	V	B	T_h
Chang (1998)	$D_{50} = \frac{0.887 \cdot q_f^{5/9}}{S^{5/18} \left[\frac{1}{S} - \frac{1}{\tan(1+5S)\phi} \right]^{25/27}}$	✓	✓	✓					
Ferro (2000)	$D_{50} = 0.95 \cdot B \left(\frac{Q \cdot S}{B^{5/2} g^{1/2}} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{1/2}$	✓	✓					✓	
NRCS (2002) *	$D_{50} = [q_f (S^{1.5}) / 0.00475]^{1/1.89}, 0.02 < S < 0.10$	✓	✓						
	$D_{50} = [q_f (S^{0.58}) / 0.0393]^{1/1.89}, 0.10 \leq S \leq 0.40$	✓	✓						
LaGasse et al. (2006)	$D_{50} = \frac{0.55 q_f^{0.52}}{C_u^{0.25} S^{0.75}} \left[\frac{\sin \theta}{(S_G \cos \theta - 1)(\cos \theta \tan \phi - \sin \theta)} \right]^{1.11}$	✓	✓	✓	✓				
Peirson & Cameron (2006)	$V_c = 1.15 \sqrt{2g(\rho_s - \rho)} / \phi \sqrt{D_{50} \cos \theta} \sqrt{\tan \phi - \tan \theta}$	✓		✓		✓	✓		
Siebel (2007)	$D_{50} = 1.71 \cdot S^{0.68} q_f^{2/3} [\rho / (\rho_s - \rho)]^{1/3}$	✓	✓						
Peirson et al. (2008)	$q_f = \sigma \cdot y \cdot [0.88 \sqrt{2g(\rho_s - \rho)} / \phi \sqrt{D_{50} \cos \theta} \sqrt{\tan \phi - \tan \theta}]$	✓	✓	✓		✓			
Eli and Gray (2008)	$q_f = D_{50}^{3/2} \sqrt{g \cos \theta}$	✓	✓						
Khan & Ahmad (2011)	$D_{50} = 0.66 \cdot T_h^{0.58} S^{0.22} C_u^{-0.45} q_f^{0.22}$	✓	✓		✓				✓
รวม		20	18	9	5	4	3	1	1

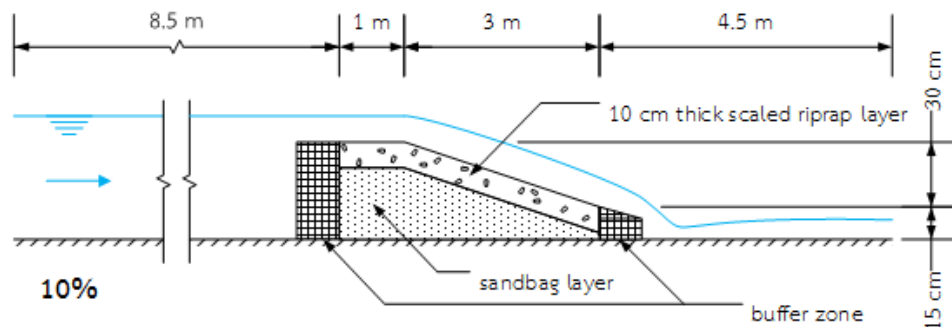
หมายเหตุ: * คือ การศึกษาที่ใช้หน่วยอังกฤษ (English units)

Aeration factor ($\sigma = 1 - 1.3 \sin \theta + 0.24 [y + (D_{50}/3)] / D_{50}$), Specific Gravity of riprap (S_G), Manning's roughness coefficient (n)

ทุกสมการมีข้อจำกัดในการใช้งาน

วิธีการศึกษา

การศึกษาทดลองด้วยรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($ก \times ย \times ส = 0.60 \times 17 \times 0.75$ ม.) ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้ระบบสูบน้ำหมุนเวียน สร้างอัตราการไหลสูงสุดได้ประมาณ 85 ลิตร/วินาที โดยติดตั้งแบบจำลองโครงสร้างหินทิ้งแบบรูปสี่เหลี่ยม (Abt *et al.* 2008) ตามความลาดชัน 2%, 5% หรือ 10% ที่ต้องการ โดยรูปภาพที่ 1 เป็นตัวอย่างของความลาดชัน 10% ในรางน้ำเปิดของห้องปฏิบัติการ



รูปภาพที่ 1 ผังโดยสังเขปของแบบจำลองหินทิ้งที่ความลาดชัน 10%

วัสดุหินทิ้งที่ใช้ศึกษาเป็นหินแกรนิตย่อยภายในประเทศไทย คัดขนาดสม่ำเสมอ 4 ขนาด มีค่าแทนขนาด (nominal size) เป็น 12.7, 19.1, 38.1 และ 50.8 มม. (0.5, 0.75, 1.5 และ 2 นิ้ว ตามลำดับ) โดยสองขนาดแรกได้จากการคัดขนาดหินย่อยเบอร์ 1 ด้วยเครื่องร่อนตะแกรง (sieve) ส่วนสองขนาดหลังได้จากการสังคัลและซื้อหินโรยทางรถไฟจากศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย อ.วิหารแดง จ.สระบุรี สรุปคุณสมบัติทางกายภาพที่สนใจดังตารางที่ 2 ทั้งนี้มุมทรงตัวไม่ได้วัดด้วยวิธีแบบเทกรวย (funnel method) อย่างมาตรฐาน ASTM D6393 (ASTM, 2014) แต่ใช้รางปรับความลาดชัน (tilting box method) ดังรูปที่ 2 (a) เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์และเครื่องจักรทุ่นแรงทดสอบหินขนาดใหญ่ได้ โดยถมหินทิ้งให้ได้ระดับและเกลี่ยให้ราบในรางปรับความลาดชัน ปรับความลาดชันเพิ่มทีละน้อยจนถล่มถือเป็นมุมทรงตัว แสดงดังรูปภาพที่ 2 (b)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทิ้ง

ค่าแทนขนาด (มม.)	ความถ่วงจำเพาะ (Apparent S.G.)	มุมทรงตัว, ϕ (องศา)
12.7	2.70	50
19.1	2.71	52
38.1	2.74	55
50.8	2.74	63



(a) รางปรับความลาดชันขณะใช้งาน



(b) สภาวะมุมทรงตัว

รูปภาพที่ 2 รางปรับความลาดชันสำหรับหามุมทรงตัวของหินทิ้งในการศึกษา

การเก็บข้อมูลทดลองต่อหนึ่งกรณีมี 3 ช่วงดังนี้

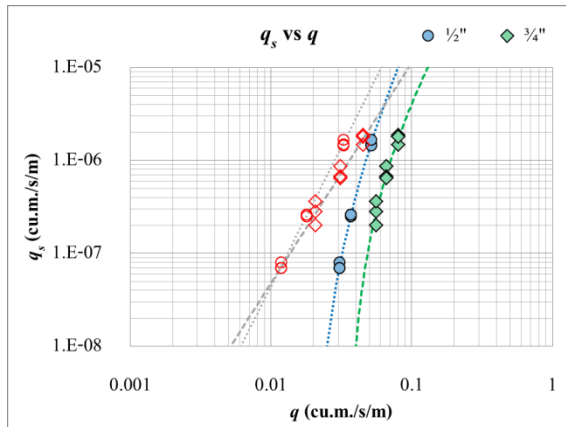
- 1) ช่วงเตรียมการ ติดตั้งแบบจำลองตามความลาดชัน เลือกขนาดหินทิ้ง ถมและเกลี่ยหินทิ้งให้ไ้ระดับ
- 2) ช่วงทดลอง เปิดเครื่องสูบน้ำและวาล์วน้ำเข้าแบบจำลองในอัตราต่ำแบบไม่ให้เกิดการพัดพาหินทิ้งจนสมดุล ปรับวาล์วเพิ่มอัตราการไหลถึงระดับที่ต้องการ (มี 3 ค่า) ใ้เวลาหนึ่งให้ระบบสมดุล ตั้งตะแกรงดักหินทิ้งพร้อมจับเวลา เมื่อครบกำหนดเวลาให้เก็บหินและตั้งตะแกรงซ้ำให้ต่อเนื่องเพื่อความแม่นยำของข้อมูล เมื่อเก็บตัวอย่างเพียงพอแล้วปิดวาล์วและเครื่องสูบน้ำ
- 3) ช่วงหลังการทดลอง ตากหินทิ้งที่ตกมาให้แห้ง ชั่งน้ำหนักคิดเป็นอัตราการพัดพา ถมหินคืนที่และเกลี่ยให้ไ้ระดับเช่นเดิม แล้วทดลองใหม่ด้วยอัตราการไหล ขนาดหิน หรือความลาดชัน ที่เปลี่ยนไปจนครบทุกกรณี

จากความลาดชัน 3 ระดับ ขนาดหิน 4 ขนาด และอัตราการไหล 3 ค่า คิดเป็น 36 กรณีการทดลอง แต่ทำได้ไม่ครบเนื่องจากสร้างอัตราการไหลได้จำกัด เหลือเพียง 23 กรณี 66 ชุดข้อมูล ตามตารางที่ 3 เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

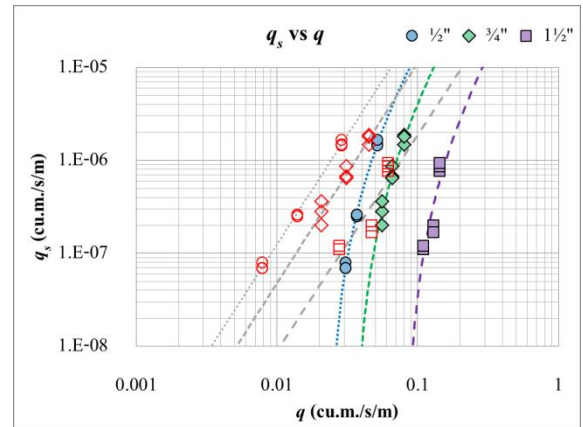
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิเคราะห์ผลเริ่มด้วยการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อน (q_0) โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) อันเป็นวิธีทางสถิติ หาค่าด้วยการลองผิดลองถูก (trial & error) อย่างมีหลักการคือ ไม่ใช่ใช้อัตราการไหลน้อยกว่าข้อมูลจริงที่ไม่พัดพา ไม่ใช่ใช้อัตราการไหลสูงกว่าข้อมูลจริงที่มีการพัดพา และให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ผลการลองค่าให้ผลลัพธ์ได้ไม่กี่กรณี การวิเคราะห์เชิงลึกพบว่าที่ความลาดชันเดียวกัน เส้นโค้ง $q_s = C(q - q_0)^m$ และเส้นตรง $q_s = Cq^m$ ในกราฟ log-log ของหินขนาดหนึ่งดูขนาดกับหินอีกขนาด จึงอนุมานว่าเส้นสมการควรจะขนานกันระหว่างกรณีต่างๆ ทำให้หาอัตราการไหลแรกเคลื่อนของกรณีอื่นได้โดยไม่ต้องสนใจค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เปรียบเทียบกับรูปภาพที่ 3 อันเป็นข้อมูลที่ความลาดชัน 5% โดย (a) การลองค่าหาได้เพียงขนาด 0.5 และ 0.75 นิ้วเท่านั้น กับ (b) การปรับเส้นสามารถหาขนาด 1.5 นิ้ว เพิ่มได้ครบ 3 ขนาดที่มีข้อมูล สรุปผลการคำนวณและสมการดังตารางที่ 4

สำหรับกรณีที่ไม่ม่ข้อมูลนั้น ใช้หลักลำดับและอนุกรม (sequences & series) ประมาณค่าอัตราการไหลที่เกินข้อจำกัดโดยตั้งค่าอื่นเป็นแนวโน้มได้ผลดังกราฟรูปภาพที่ 4 ซึ่งแสดงระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง (a) และความลาดชัน (b) ซึ่งสัญลักษณ์ที่ทับคือผลจากการวิเคราะห์ความถดถอย ส่วนที่กลวงคือผลจากหลักลำดับและอนุกรมนี้



(a) การลองผิดลองถูก



(b) การใช้เส้นสมการ

รูปภาพที่ 3 การวิเคราะห์หัตถการการไหลแรกเคลื่อนด้วยการวิเคราะห์ความถดถอย

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดลอง

Run No.	Size (mm)	Slope	q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)
1	12.7	2%	0.094667	0.00000017
2				0.00000024
3				0.00000023
4			0.122000	0.00000054
5				0.00000073
6				0.00000064
7		5%	0.030833	0.00000008
8				0.00000007
9				0.00000007
10			0.037000	0.00000025
11				0.00000026
12				0.00000026
13	19.1	5%	0.051667	0.00000149
14				0.00000146
15				0.00000167
16		10%	0.016000	0.00000027
17				0.00000034
18				0.00000029
19			0.025000	0.00000451
20				0.00000528
21				0.00000451
22	19.1	2%	0.122833	0.00000030

Run No.	Size (mm)	Slope	q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)
23	19.1	2%	0.138167	0.00000032
24				0.00000048
25				0.00000057
26		5%	0.055833	0.00000028
27				0.00000036
28				0.00000020
29	19.1	5%	0.066333	0.00000086
30				0.00000067
31				0.00000064
32			0.080167	0.00000148
33				0.00000187
34				0.00000179
35	38.1	10%	0.025000	0.00000011
36				0.00000010
37				0.00000010
38		5%	0.033167	0.00000080
39				0.00000083
40				0.00000076
41		5%	0.041000	0.00000480
42				0.00000563
43				0.00000456
44	38.1	5%	0.109667	0.00000011

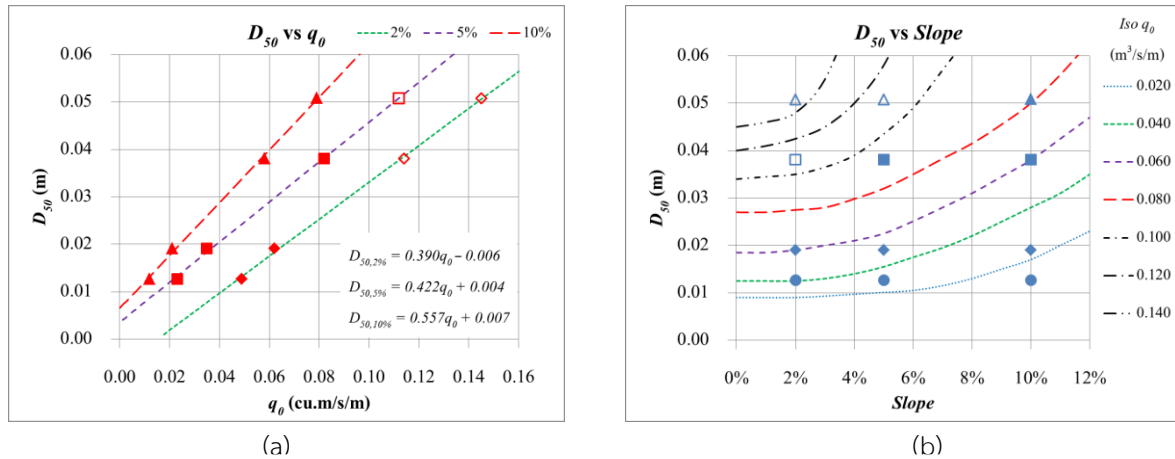
ตารางที่ 3 (ต่อ) ข้อมูลการทดลอง

Run No.	Size (mm)	Slope	q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)
45				0.00000011
46				0.00000012
47				0.00000020
48			0.128833	0.00000020
49				0.00000017
50				0.00000077
51			0.143333	0.00000086
52				0.00000094
53				0.00000009
54			0.071333	0.00000030
55				0.00000021
56				0.00000132

Run No.	Size (mm)	Slope	q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)
57	50.8	10%	0.101500	0.00000213
58				0.00000202
59				0.00000020
60			0.117167	0.00000025
61				0.00000025
62				0.00000055
63			0.136000	0.00000068
64				0.00000176
65				0.00000217
66				0.00000209

ตารางที่ 4 ค่าและสมการอัตราการไหลแรกเคลื่อน

ขนาดหินทิ้ง	ลาดท้องน้ำ	q_0 ($m^3/s/m$)	สมการ $q_s = C(q - q_0)^m$	R^2
12.7 มม.	2%	0.049	$q_s = 0.0003(q - 0.049)^{2.3390}$	0.9394
12.7 มม.	5%	0.023	$q_s = 0.0063(q - 0.023)^{2.3526}$	0.9967
12.7 มม.	10%	0.012	$q_s = 0.1275(q - 0.012)^{2.3480}$	0.9961
19.1 มม.	2%	0.062	$q_s = 0.0002(q - 0.062)^{2.3295}$	0.9421
19.1 มม.	5%	0.035	$q_s = 0.0026(q - 0.035)^{2.3711}$	0.9519
19.1 มม.	10%	0.021	$q_s = 0.0319(q - 0.021)^{2.3119}$	0.9643
38.1 มม.	5%	0.082	$q_s = 0.0004(q - 0.082)^{2.3235}$	0.7978
38.1 มม.	10%	0.058	$q_s = 0.0042(q - 0.058)^{2.3296}$	0.8981
50.4 มม.	10%	0.079	$q_s = 0.0013(q - 0.079)^{2.2976}$	0.9748



รูปภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหินกับอัตราการไหล (a) และระหว่างขนาดหินกับความลาดชัน (b)

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหินกับอัตราการไหลแรกเคลื่อนดังรูปที่ 4 (a) ได้แนวโน้มเป็นเส้นตรงแปรผันตรงที่ความลาดชันเดียวกัน กับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหินกับความลาดชันตามรูปที่ 4 (b) ซึ่งอัตราการไหลแรกเคลื่อนแสดงด้วยเส้นชั้นอัตราการไหลที่เท่ากัน ($Iso q_0$) โดยเห็นว่าเส้นชั้นมีแนวโน้มขึ้นขึ้นเมื่อความลาดชันลดลงทำให้ต้องเลือกใช้หินขนาดใหญ่ขึ้นมากโดยผลวิเคราะห์ได้เป็นสมการที่ (1)

พิจารณาขนาดหินกับมุมทรงตัวที่เกี่ยวข้องกันตามคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดชันและขนาดหินสามารถมีปัจจัยมุมทรงตัวเสริมได้ วิเคราะห์ดังสมการที่ (2) ซึ่งคงความสัมพันธ์เหมือนผลวิเคราะห์ปัจจัยเดียวว่าอัตราการไหลยังแปรผันตรงอย่างคงที่ ส่วนความลาดชันร่วมกับมุมทรงตัวยังแปรผันตรงอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นเช่นเดิม ทำการกลับข้างสมการเพื่อให้ได้การคำนวณเลือกขนาดหินซึ่งโดยมีผลดังสมการที่ (3) โดยให้ q_0 เท่ากับ q_{max} ซึ่งคืออัตราการไหลสูงสุดของทางน้ำเปิดที่จะออกแบบเลือกขนาดหินทั้ง

$$q_0 = \tan \phi (S^{-0.02} - 1) \quad (1)$$

$$q_0 = \left[\tan \phi - \left(0.05 - 0.02 \frac{D_{50}}{0.0254} \right) \right] S^{-0.02} - \tan \phi \quad (2)$$

$$D_{50} = 1.27 [(q_{max} + \tan \phi) S^{0.02} - \tan \phi] + 0.0635 \quad (3)$$

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาหาขนาดหินทั้งที่มีเสถียรภาพในทางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ท้องน้ำลาดลงช่วง 2%–10% ภายใต้การใช้วัสดุหินทั้งภายในประเทศที่คัดขนาดสม่ำเสมอช่วง 0.5 ถึง 2 นิ้ว ถมเป็นชั้นหนาอย่างน้อยสองเท่าของขนาดหิน และมีการไหลแบบไหลข้ามตัวโครงสร้าง ด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ พบว่ามี 3 ปัจจัยหลักได้แก่ อัตราการไหลสูงสุดของทางน้ำ ความลาดชันท้องน้ำ และมุมทรงตัว โดยปัจจัยอัตราการไหลแปรผันตรงอย่างคงที่และปัจจัยความลาดชันร่วมกับมุมทรงตัวแปรผันตรงอย่างไม่คงที่ตามความสัมพันธ์ร่วมทั้ง 3 ปัจจัยดังสมการที่ (3)

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย และขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
D_{50}	ขนาดหินทิ้ง	m
q	อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
q_0	อัตราการไหลที่วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
q_{max}	อัตราการไหลสูงสุดของทางน้ำเปิดที่จะออกแบบเลือกขนาดหินทิ้ง	$m^3/s/m$
q_s	อัตราการพัดพาท้องน้ำเชิงปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
S	ความลาดชันของโครงสร้างหินทิ้ง	m/m
ϕ	มุมทรงตัวที่ได้จากรางปรับความลาดชัน (tilting box method)	degree

เอกสารอ้างอิง

- Abt, S.R. & Johnson, T.L. (1991). Riprap design for overtopping flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, 117 (8), 959-972.
- Abt, S.R., Thornton, C., Gallegos, H., & Ullmann, C. (2008). Round-shaped riprap stabilization in overtopping flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, 134 (8), 1035-1041.
- Abt, S.R., Thornton, C.I., Scholl, B.A., & Bender, T.R. (2013). Evaluation of overtopping riprap design relationships. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 49 (4), 923-937.
- American Society for Testing and Materials (ASTM, 2014) **ASTM D6393: Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices**.
- Chang, H.H. (1998). Riprap stability on steep slopes. **International Journal of Sediment Research**, 13 (2), 40-49.
- Eli, R.N. & Gray, D.D. (2008). Hydraulic performance of a steep single layer riprap drainage channel. **Journal of Hydraulic Engineering**, 134 (11), 1651-1655.
- Ferro, V. (2000). Design relationships for rock chute channels. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 43 (3), 585-590.
- FHWA (Federal Highway Administration). (1989). **Design of Riprap Revetment**. Hydraulic Engineering Circular No. 11, Federal Highway Administration Report FHWA-IP-89-016, March, 182 pp.
- Frizell, K.H., Ruff, J.F., & Mishra, S. (1998). Simplified design guidelines for riprap subjected to overtopping flow. In **Proceedings of the Annual Association of State Dam Safety Officials (ASDSO)**, Las Vegas, Nevada.
- Hartung, D.C. & Scheuerlein, H. (1970). Design of overflow rockfill dams. In **Proceedings of the 10th International Congress of Large Dams**, 1, 587-598.
- Isbash, S. (1936). **Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water**. U.S. Army Engineer District, Eastport, Maine.

- Khan, D. & Ahmad, Z. (2011). Stabilization of angular-shaped riprap under overtopping flows. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 59, 1153-1157.
- Knauss, J. (1979). Computation of maximum discharge at overflow rock fill dams. In **Proceedings of the 13th Congress of International Commission of Large Dams**, pp. 143-159.
- LaGasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W., & Ruff, J.F. (2006). **Riprap design criteria, recommended specifications, and quality control**. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program Report 568.
- Maynard, S.T. (1992). Steep stream riprap design. In **Proceedings of the U.S. Army Corps of Engineers Workshop on Steep Streams**, October 27-29, pp. 8-1-8-9, Seattle, Washington.
- Mishra, S.K. (1998). **Riprap Design of Overtopped Embankments**. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2002). **Lined Waterway or Outlet**. Conservation Practice Standard, Code 468, July.
- Olivier, H. (1967). Through and Overflow Rock Fill Dams - New Design Techniques. In **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, 36, 433-471.
- Peirson, W.L. & Cameron, S. (2006). Design of rock protection to prevent erosion by water flows down steep slopes. **Journal of Hydraulic Engineering**, 132 (10), 1110-1114.
- Peirson, W.L., Figlus, J., Pells, S.E., & Cox, R.J. (2008). Placed rock as protection against erosion by flow down steep slopes. **Journal of Hydraulic Engineering**, 134 (9), 1370-1375.
- Robinson, K.M., Rice, C.E., & Kadavy, K.C. (1998). Design of rock chutes. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 41 (3), 621-626.
- Siebel, R. (2007). Experimental investigations on the stability of riprap layers on overtoppable earthdams. **Environmental Fluid Mechanics**, 7 (6), 455-467.
- Stephenson, D. (1979). **Rock fill in hydraulic engineering**, Elsevier Scientific, New York City, New York.
- United States Bureau of Reclamation. (1987), **Design of small dams**, USBR.
- Wittler, R.J. & Abt, S.R. (1997). **Riprap design for full spectrum overtopping flows**. Unpublished Report, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.