

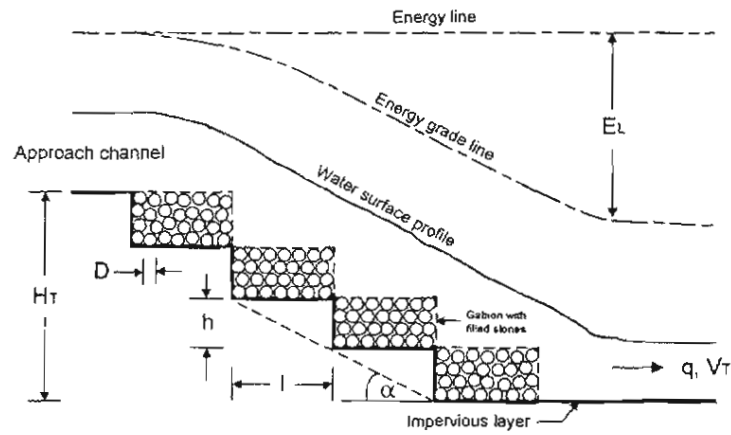


Figure 5 Variables in dimensional analysis

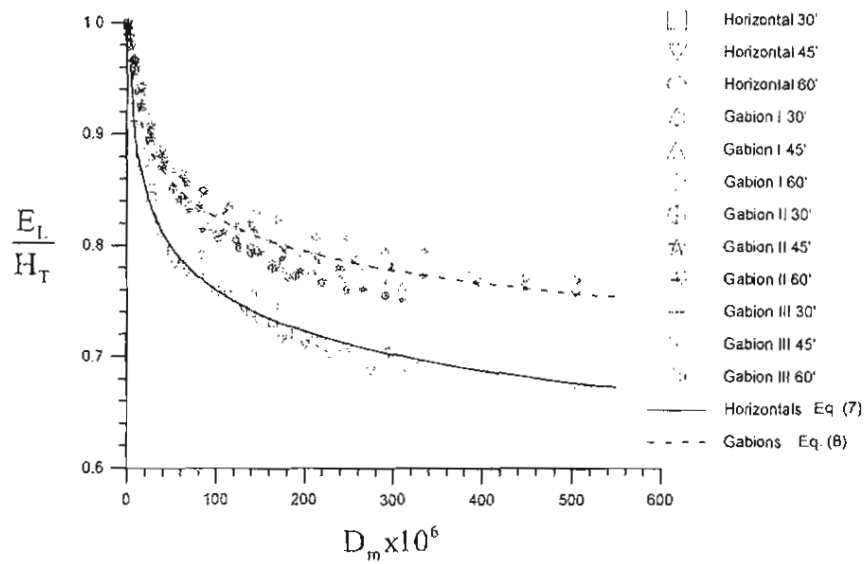


Figure 6 Relationship between energy dissipation on gabion stepped spillways and modified spillway drop number

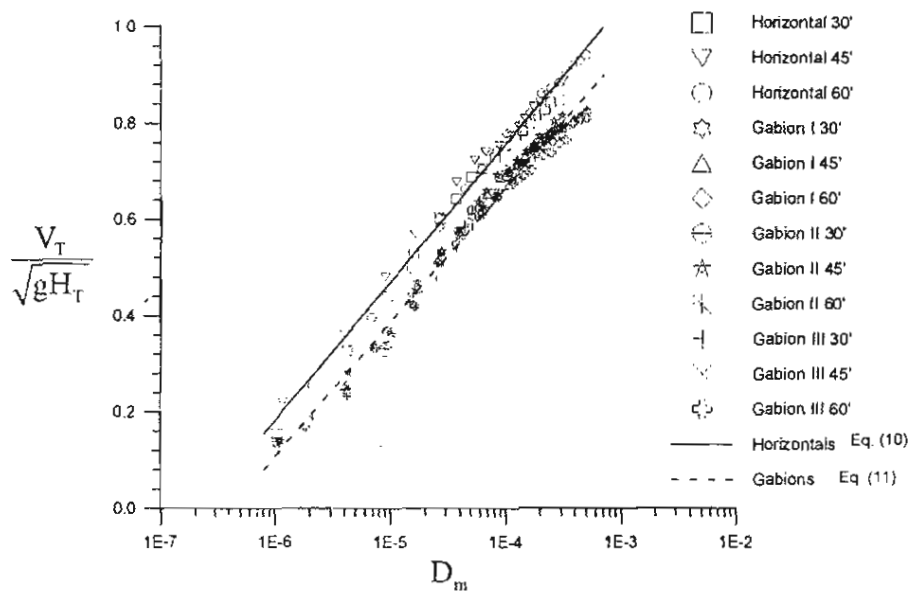


Figure 7 Flow velocity at spillway outlet and modified spillway drop number

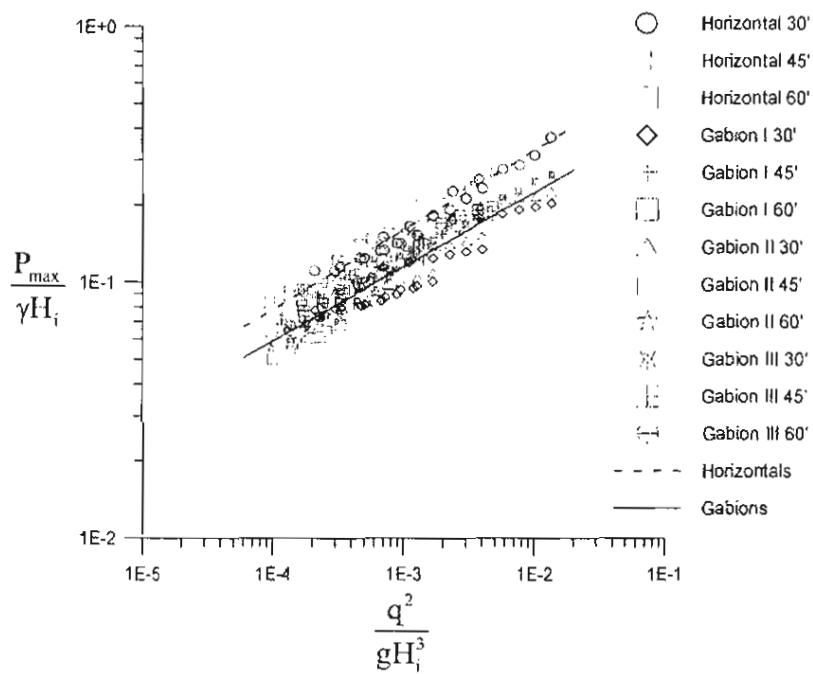


Figure 8 Relationship between maximum pressure on steps and step drop number

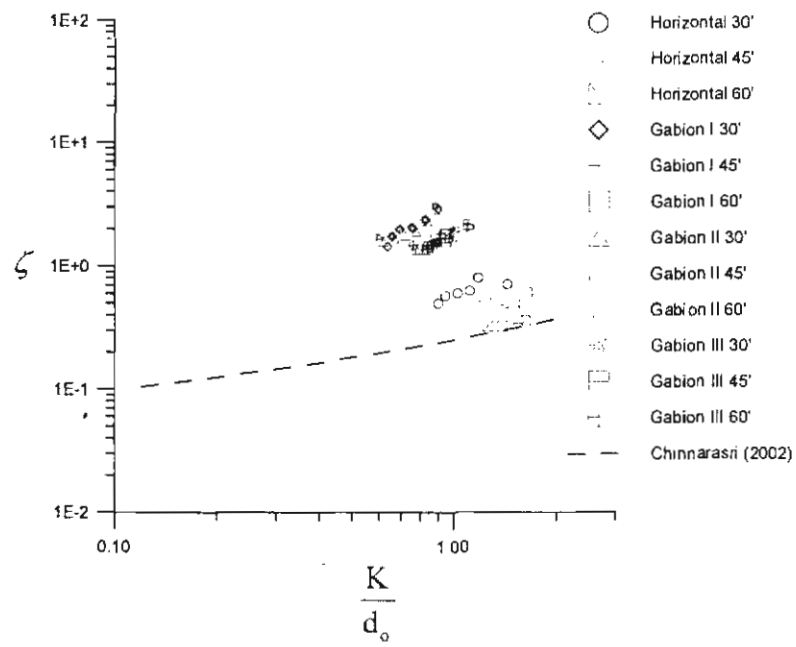


Figure 9 Friction factor of skimming flows under equilibrium condition

ภาคผนวก ข2

สำเนาบทความเรื่อง Pressure on step and flow depth on gabion stepped chutes, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 15(2), pp. 1-7

ความดันบนพื้นรางและความลึกของการไหลบนรางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

Pressure on Step and Flow Depth on Gabion Stepped Chutes

ชัยยุทธ ชินณะราศรี¹, สมชาย ดอนเจดีย์^{1&2} และ อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา¹

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 71340

, Chaiyuth Chinnarasri¹, Somchai Donjadee^{1&2}, and Udonsak Israngkura¹

¹Water Resour. Eng. Res. Lab. (WAREE), Dept. Civil Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

²Department of Irrigation Engineering, Kasetsart University, Kampaeng Saen Campus, Nakorn Pathom 71340

E-mail: chaiyuth.chi@kmutt.ac.th, t_donjadee@yahoo.com

บทคัดย่อ

รางขั้นบันไดเป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่สำคัญสำหรับระบบระบายน้ำของถนนที่ตัดผ่านบริเวณเทือกเขา ช่วยลดพลังงานและความเร็วของกระแสน้ำทางด้านปลายราง ทำให้ลดขนาดของอ่างสลายพลังงานที่ปลายรางก่อนจะระบายน้ำลงสู่ทางน้ำธรรมชาติได้ บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาจากการทดลองเกี่ยวกับชลศาสตร์การไหลบนรางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายบรรจุหิน ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ทนทาน และราคาถูก ผลการศึกษาประกอบไปด้วยรูปแบบการไหลบนราง ความดันบนพื้นราง และความลึกของการไหลบนราง ซึ่งพบว่ารางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายช่วยลดแรงดันของน้ำบนขั้นบันไดได้ร้อยละ 27 เมื่อเปรียบเทียบกับรางขั้นบันไดแบบพื้นราบ ความลึกในรางแบบกล่องตาข่ายมีแนวโน้มน้อยกว่าเนื่องจากการที่กล่องตาข่ายได้ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหินได้บางส่วน ข้อมูลจากการศึกษานี้จะเป็นพื้นฐานในการวิจัยและออกแบบรางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายต่อไป

Abstract

Stepped chute is the important hydraulic structure for drainage system of mountainous roads. It increases the efficiency of energy dissipation and reduces outflow velocity causing a smaller energy dissipation basin before water is released to the natural streams. This paper presents the results of the experimental studies on the hydraulics of flow on gabion stepped chutes. Gabions consist of rockfill material enlaced by a mesh. They are local available, high stability and low cost. The results of the study include type of flow on the structure, pressure on step, and flow depth on the structure. It was found that the pressure on step was less to 27 percent. Due to base flow through the filled stones, the flow depth on gabion stepped chute was less than that

of horizontal stepped chutes. These result data are useful for the future research and fundamental design of gabion stepped chutes.

1. บทนำ

การลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำจากการไหลของน้ำในระบบระบายน้ำบนพื้นที่ลาดชันสูงก่อนที่น้ำจะไหลเข้าสู่ทางน้ำธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาการกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้นกับลำน้ำธรรมชาติได้ ที่ผ่านมามีผู้ทำการทดลองและออกแบบอ่างสลายพลังงานเพื่อชะลอความเร็วของน้ำไว้หลายรูปแบบ [1] ซึ่งแต่ละรูปแบบเหมาะกับสถานที่และสภาวะการไหลแตกต่างกันออกไป แต่วัตถุประสงค์หลักที่เหมือนกันคือเพื่อลดขนาดของอ่างสลายพลังงานและความเร็วของน้ำที่ปลายรางอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก่อนที่จะปล่อยให้ไหลออกสู่ทางน้ำธรรมชาติ

รางระบายน้ำขั้นบันไดเป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่สำคัญช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงาน และลดความเร็วการไหลทางด้านท้ายน้ำ ทำให้ขนาดของอ่างสลายพลังงานเล็กลง ในช่วงกว่าสองทศวรรษที่ผ่านมารางชนิดนี้ได้รับความนิยมใช้กันอย่างมาก [2] สำหรับตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ การทดลองเกี่ยวกับการสลายพลังงานของรางขั้นบันไดแบบพื้นราบ ([3], [4], [5]) และสามารถสรุปได้ว่าการสลายพลังงานขึ้นอยู่กับความลาดชันของรางและอัตราการไหล โดยเมื่อความลาดชันของรางเพิ่มขึ้นการสลายพลังงานลดลง และที่ความลาดชันเดียวกันการสลายพลังงานลดลงเมื่ออัตราการไหลมากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการไหลบนรางขั้นบันได ได้มีนักวิจัยหลายท่าน นำเสนอผลงานไว้ ([6], [7], [8]) และสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลบนรางขั้นบันไดแบบพื้นราบ แบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือที่อัตราการไหลน้อยการไหลบนขั้นบันไดเป็นแบบ Nappe flow เมื่อ

อัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นการไหลเป็นแบบ Transition flow และเปลี่ยนเป็นแบบ Skimming flow สำหรับอัตราการไหลที่สูงมาก

นอกเหนือจากรางชั้นบันไดแบบพื้นราบแล้วยังได้มีการศึกษาถึงรางชั้นบันไดประเภทอื่นบ้างเหมือนกัน เช่นรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่าย ซึ่งภายในบรรจุหิน เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ทนทาน และราคาถูก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่ผ่านมา ([9], [10], [11]) เป็นการเน้นถึงประสิทธิภาพการสลายพลังงานและลักษณะการไหลเท่านั้น ยังขาดคุณสมบัติที่สำคัญที่จะใช้ประกอบในการออกแบบรางชั้นบันไดอยู่อีก

ดังนั้นการศึกษาลักษณะการไหลบนรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่ายจึงจำเป็นต้องทำการการวิจัยเพิ่มเติมให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อประโยชน์ในการออกแบบและนำไปใช้งาน งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหล ความดันบนพื้นรางชั้นบันได และความลึกการไหลในรางชั้นบันได พร้อมทั้งเปรียบเทียบลักษณะการไหลดังกล่าวกับการไหลบนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ข้อมูลจากผลการศึกษาจะเป็นพื้นฐานในการวิจัยและออกแบบรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่ายต่อไป

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาลักษณะการไหลบนรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่ายได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) การวิเคราะห์มิติ 2) การทดลอง 3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง และ 4) การสรุปผล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การวิเคราะห์มิติ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลผ่านรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่าย ได้ใช้วิธีวิเคราะห์มิติของ Buckingham- π ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไหลแสดงดังรูปที่ 1 และสามารถสรุปตัวแปรไร้มิติที่สำคัญได้ดังนี้

$$\frac{P_{Lmax}}{\gamma H_1} = f_1 \left(\frac{q^2}{g H_1^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (1)$$

$$\frac{d_1}{\gamma H_1} = f_2 \left(\frac{q^2}{g H_1^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (2)$$

เมื่อ q คือ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที)

V_T คือ ความเร็วทางด้านท้ายน้ำ (ม./วินาที)

E_L คือ การสูญเสียพลังงาน (ม.)

H_T คือ ความสูงของรางชั้นบันได (ม.)

h คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.)

H_1 คือ ความต่างระดับระหว่างปากทางเข้ารางกับพื้นชั้นบันไดที่กำลังพิจารณา (ม.)

d_1 คือ ความลึกของการไหลในรางชั้นบันได (ม.)

D คือ ขนาดของหิน (ม.)

P_{Lmax} คือ ความดันมากที่สุดบนชั้นบันได (นิวตัน/ม.²)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²)

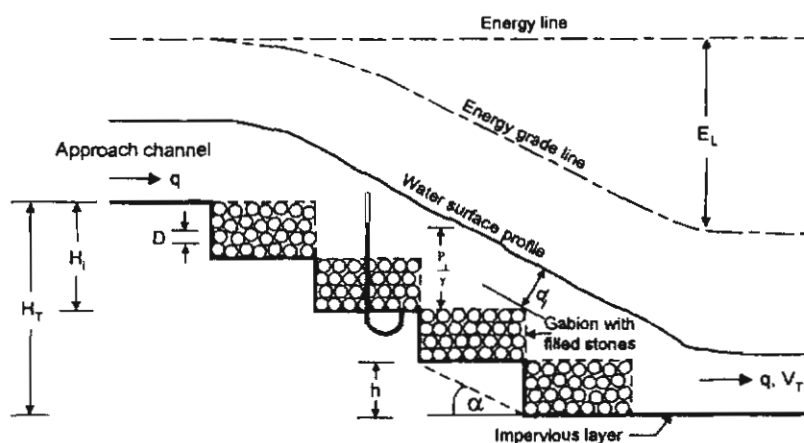
α คือ ความลาดเอียงของรางชั้นบันได

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (นิวตัน/ม.³)

จากการวิเคราะห์จะให้ความหมายของเทอมไร้มิติต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ $\frac{P_{Lmax}}{\gamma H_1}$ หมายถึงสัดส่วนความดันที่น้ำกระทำต่อชั้นบันได

$\frac{q^2}{g H_1^3}$ หมายถึง Step drop number ของการไหลบนชั้นที่กำลังพิจารณา $\frac{D}{h}$

หมายถึงสัดส่วนของขนาดหิน และ $\frac{d_1}{\gamma H_1}$ หมายถึงสัดส่วนความลึกของการไหล



รูปที่ 1. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลผ่านรางชั้นบันไดแบบกล่องคาข่าย

2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้พื้นที่บริเวณด้านหลังของอาคารชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมีคูน้ำจากบ่อพักน้ำเข้าสู่ถังวัดอัตราการไหล และไหลเข้ารางขึ้นบันไดโดยผ่านปากทางเข้ารางซึ่งทำหน้าที่ปรับสภาพการไหล ให้มีระดับผิวน้ำค่อนข้างราบเรียบ ถังวัดอัตราการไหลมีฝ่ายรูปตัววี (V-notched weir) ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าเพื่อทำหน้าที่วัดอัตราการไหล [12] จากการสอบเทียบฝ่ายวัดน้ำสามารถเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการไหลได้ดังนี้คือ $Q = 0.02h_w^{2.47}$ เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (ลิตร/วินาที), h_w คือ ความสูงในหลอดวัดระดับน้ำโดยวัดจากระดับต่ำสุดของปากฝ่าย (ซม.) ซึ่งอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที

รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ ที่ใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมของการไหลเปรียบเทียบกับรางกล่องตาข่าย มี 3 รางซึ่งมีความลาดเอียง 30° , 45° และ 60° และมีความสูง 1.50, 2.12 และ 2.60 เมตร ตามลำดับ แต่ละรางมีความกว้าง 0.40 ม. และมีจำนวนขั้นบันได 20 ขั้น รางเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ทำเป็นรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ด้วยการนำกล่องตาข่ายซึ่งบรรจุหินไว้เต็มกล่อง (Gabions) มาวางบนขั้นบันได ในการทดลองครั้งนี้ใช้หิน 3 ชนิดคือ 1) Gabions I หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 25-35 มิลลิเมตร 2) Gabions II หินที่มีผิวกลมมนขนาด 25-35 มิลลิเมตร และ 3) Gabions III หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 50-70 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความพรุนเท่ากับ 0.27, 0.30 และ 0.39 ตามลำดับ

การวัดความเร็วของการไหล ทำการวัดที่บริเวณด้านเหนือหน้าผ. ตำแหน่งก่อนที่น้ำไหลเข้ารางขึ้นบันได และที่บริเวณท้ายน้ำ ผ. ตำแหน่งที่น้ำออกจากรางขึ้นบันได โดยทำการวัด 2 วิธี คือ 1) วัดความลึกของน้ำที่หน้าตัดการไหล และสามารถคำนวณความเร็วจากสมการ $v = Q/(Bd)$ และ 2) โดยใช้หลอดปิโตต สามารถคำนวณความเร็วจากสมการ $v = c_v \sqrt{2gh_p}$ เมื่อ v คือ ความเร็ว (ม./วินาที) Q คือ อัตราการไหล (ม.³/วินาที) B คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหล (ม.) d คือ ความลึกการไหล (ม.) c_v คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องวัด g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²) h_p คือ ความสูงของน้ำในหลอดปิโตตเหนือระดับผิวน้ำ (ม.) สำหรับการวัดความดันได้ใช้หลอดพิโซมิเตอร์ ทำการวัดที่ขั้นบันไดทั้งถูกตั้งและถูกนอน ส่วนการวัดความลึกได้ทำการวัดที่ผืนของรางที่ขึ้นบันไดทุกขั้น บริเวณทางด้านเหนือหน้า ผ. ตำแหน่งก่อนที่น้ำเข้ารางขึ้นบันได และบริเวณทางด้านท้ายน้ำ ผ. ตำแหน่งที่น้ำออกจากรางขึ้นบันได

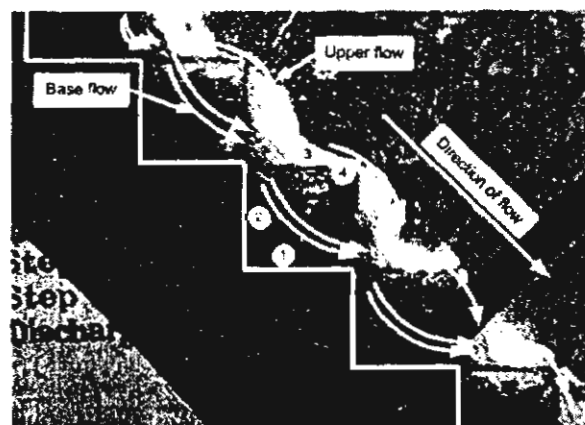
3. ผลการทดลอง

- ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอผลการทดลอง ออกเป็น 1) รูปแบบการไหลในรางขึ้นบันได 2) ความดันบนพื้นรางขึ้นบันได และ 3) ความลึกของการไหลบนรางขึ้นบันได โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบการไหลในรางขึ้นบันได

การไหลในรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบเรียงตามลำดับค่าอัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ แต่ในกรณีของรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่าย การไหลจะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย (Base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย (Upper flow) จากการที่การไหลได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนนี้เอง ทำให้พลังงานการไหลบนกล่องตาข่ายได้ถูกสลายไปมากกว่าการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ

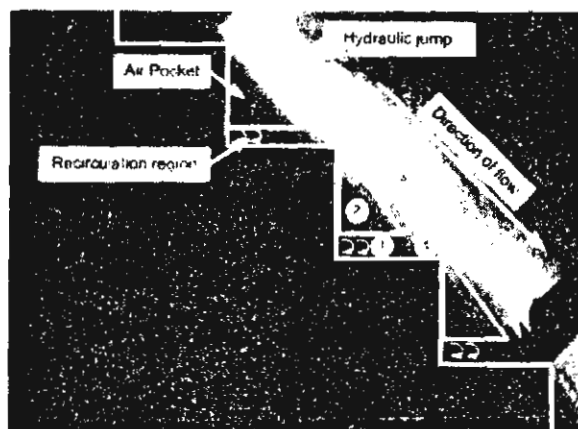
ในการไหลแบบ Nappe flow อัตราไหลบนรางน้อย การไหลทั้งหมดจะไหลผ่านกล่องตาข่ายจนกระทั่งเมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งการไหลจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลผ่านหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย ซึ่งจะมีการผสมของน้ำกับอากาศบริเวณผิวน้ำข้าง และเมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าการเกิดไฮโดรลิกจัมป์บนขั้นบันไดบางขั้นแต่ไม่รุนแรงมากเมื่อเทียบกับการเกิดไฮโดรลิกจัมป์บนขั้นบันไดแบบพื้นราบ จนกระทั่งเมื่ออัตราไหลเพิ่มสูงขึ้นอีกการไหลจะพัฒนาสู่รูปแบบการไหลเข้าสู่ช่วง Transition flow สำหรับตัวอย่างการไหลแบบ Nappe flow ของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่ายได้แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนตัวอย่างของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบแสดงดังรูปที่ 3 จากการสังเกตได้พบความแตกต่างของลักษณะการไหลแบบ Nappe flow บนรางขึ้นบันไดทั้งสองชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 การไหลแบบ Nappe flow บนรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

สำหรับการไหลแบบ Transition flow และ Skimming flow บนรางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบ พบว่ามีพฤติกรรมที่เหมือนกัน เนื่องจากการไหลที่ลอดผ่านกล่องตาข่ายมีปริมาณที่น้อยกว่าส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่ายเป็นอย่างมาก พฤติกรรมของการไหลจึงถูกควบคุมด้วยปริมาณน้ำที่ไหลบนขั้นบันได โดยการไหลบน

ชั้นบันไดที่ทำด้วยกล่องตาข่ายจะเปรียบเสมือนเป็นการไหลบนผิวขอบเขตที่มีความหยาบผิวมากกว่าการไหลบนชั้นบันไดแบบพื้นราบ



รูปที่ 3 การไหลแบบ Nappe flow บนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะการไหลแบบ Nappe flow ของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบกับรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

บริเวณที่	แบบพื้นราบ	แบบกล่องตาข่าย
1	เกิดการหมุนวนของน้ำ	ไม่เกิดการหมุนวนของน้ำ
2	มีโพรงอากาศ เกิดความดันติดลบ	ไม่มีโพรงอากาศ
3	เกิดการกระโดดของน้ำ เนื่องจากน้ำตกกระทบพื้นราบ	ไม่มีการกระโดดของน้ำ เนื่องจากช่องว่างระหว่างพื้นราบ หินช่วยดูดซับพลังงานไว้
4	แรงดันที่ตกกระทบบสูง	แรงดันที่เกิดขึ้นน้อย

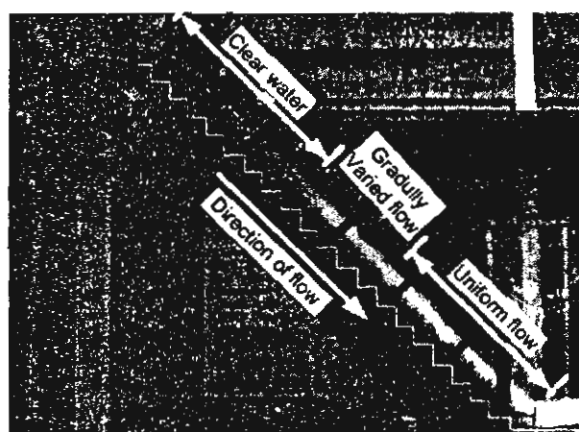
หมายเหตุ

1. การหมุนวนของน้ำ ความดันติดลบ และแรงกระแทกของน้ำมีผลทำให้พื้นรางถูกทำลายได้ง่าย
2. การกระโดดของน้ำส่งผลให้ต้องสร้างผนังด้านข้างของรางสูงขึ้น

โดยทั่วไปลักษณะการไหลแบบ Transition flow ซึ่งเป็นช่วงต่อการไหลแบบ Nappe flow และ Skimming flow เป็นการผสมของผิวน้ำกับอากาศเป็นละอองน้ำในปริมาณที่สูงตลอดราง ส่วนการไหลแบบ Skimming flow พบว่าน้ำในบริเวณต้นรางจะมีลักษณะเป็นน้ำใส (clear water) จนถึงจุด Inception point ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการผสมของน้ำกับอากาศ เพื่อเข้าสู่การไหลแบบเปลี่ยนแปรทีละน้อย (Gradually varied flow) และเข้าสู่ช่วงที่เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) ที่บริเวณส่วนกลางและส่วนปลายราง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณฟองอากาศของการไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายมีน้อยกว่าที่พบในรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ เมื่อพิจารณาถึง

การสลายพลังงาน พบว่า ในส่วนที่เป็น Upper flow การไหลเป็นการสัมผัสกับขอบของกล่องตาข่ายซึ่งมีความเสียดทานสูง ทำให้การสูญเสียพลังงานการไหลสูงกว่ากรณีของการไหลบนชั้นบันไดแบบพื้นราบ

ตัวอย่างของการไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดกล่องตาข่ายแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดกล่องตาข่าย

จากการที่รางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ช่วยสลายพลังงานการไหลได้สูงกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ดังนั้นความเร็วของการไหลที่ปลายทางออกของรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย จึงน้อยกว่ากรณีของการไหลออกจากรางชั้นบันไดแบบพื้นราบเสมอ

3.2 ความดันบนพื้นรางชั้นบันได

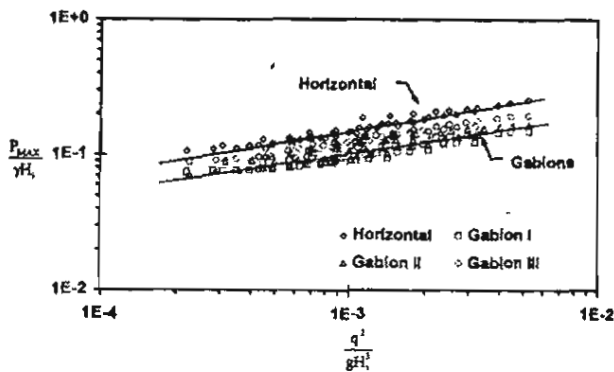
จากลักษณะการไหลของน้ำที่มาปะทะกับรางชั้นบันไดแต่ละขั้น ทำให้เกิดแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางชั้นบันได อาจส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างชั้นบันได ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูงสุดที่กระทำบนพื้นรางชั้นบันได กับ Drop number ของชั้นบันไดขั้นดังกล่าวซึ่งจะเรียกชื่อเป็น

$$\text{Step drop number } \frac{q^2}{gH^3}$$

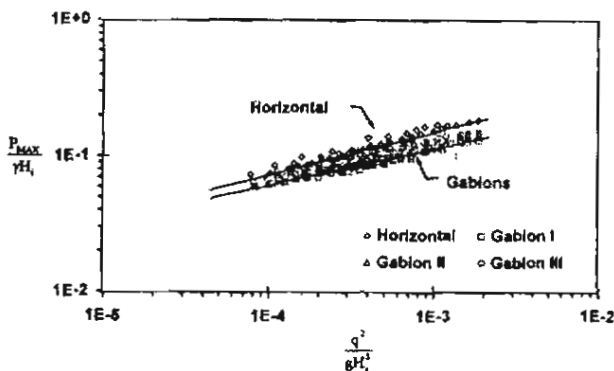
การเปรียบเทียบแรงดันที่การไหลกระทำกับพื้นรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย กับพื้นรางชั้นบันไดแบบพื้นราบแสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีความสัมพันธ์กับค่า Step drop number อย่างชัดเจน โดยเมื่อค่า Step drop number มากขึ้น ความดันบนพื้นรางชั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย และความดันที่การไหลกระทำกับพื้นรางของรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายจะน้อยกว่าพื้นราบทุกค่าของ Step drop number ทั้งนี้เนื่องจากรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายมีหินซึ่งบรรจุในกล่องตาข่ายช่วยในการรับแรงกระแทกก่อนที่แรงดันน้ำจะกระทำกับพื้นราง

จากการเปรียบเทียบรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ พบว่ารางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถลด

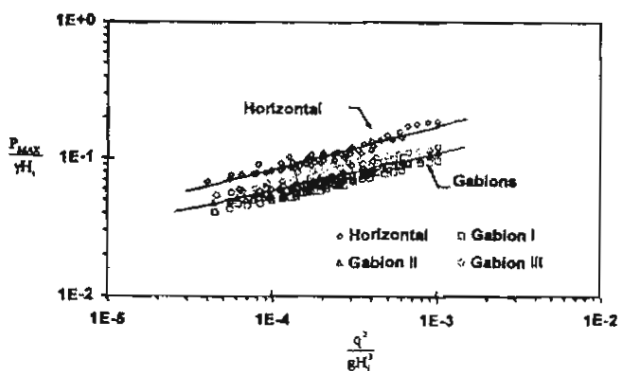
แรงดันน้ำลงได้ประมาณร้อยละ 27 ของแรงดันน้ำขึ้นแบบพื้นราบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางขังน้ำแบบก่อดองคาข่ายที่ใช้ขนาดหินและความพรุนต่างกันพบว่า แรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางขังน้ำแบบก่อดองคาข่ายที่มีความพรุนน้อยกว่าสามารถลดแรงดันน้ำได้มากกว่ากรณีของก่อดองคาข่ายที่มีความพรุนมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่ค่า Step drop number สูงๆ



a) ความลาดเอียงของราง 30°



b) ความลาดเอียงของราง 45°



c) ความลาดเอียงของราง 60°

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูงสุดบนขังน้ำกับ ค่า Step drop number

โดยสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันและค่า step drop number ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\frac{P_{i \max}}{\gamma H_i} = m \left(\frac{q^2}{g H_i^3} \right)^n \quad (3)$$

เมื่อ $P_{i \max}$ คือ ความดันที่มากที่สุดของขังน้ำชั้นที่ i (นิวตัน/ตร.ม.)

H_i คือ ความสูงในแนวตั้งวัดจากทางเข้าถึงขังน้ำชั้นที่ i (ม.)

q คือ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²)

m และ n คือ สัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (3)

α	รางขังน้ำแบบพื้นราบ			รางขังน้ำแบบก่อดองคาข่าย		
	m	n	r^2	m	n	r^2
30	1.218	0.299	0.946	0.740	0.276	0.739
45	1.348	0.312	0.946	0.785	0.271	0.887
60	1.520	0.314	0.915	0.764	0.283	0.821

จากการที่กระแสน้ำที่ไหลบนก่อดองคาข่าย มีความเร็วและแรงดันตกกระแทกสูง ส่งผลให้ก่อดองคาข่ายอาจชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ก่อดองคาข่ายจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึง แนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความมั่นคงของขังน้ำแบบก่อดองคาข่าย ซึ่งทำได้ด้วยการออกแบบก่อดองคาข่ายให้มีการยึดติดแน่นระหว่างก่อดองคาข่ายด้วยกันเอง การเรียงตัวของก่อดองคาข่ายทำได้ด้วยการวางคาข่ายซ้อนทับทั้งในแนวราบและแนวตั้งเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวจากแรงเสียดทานก็ได้ รวมถึงการยึดระหว่างก่อดองคาข่ายกับสถานที่ก่อสร้าง ด้วยเหล็กหรือลวดที่มีปริมาณมากเพียงพอ

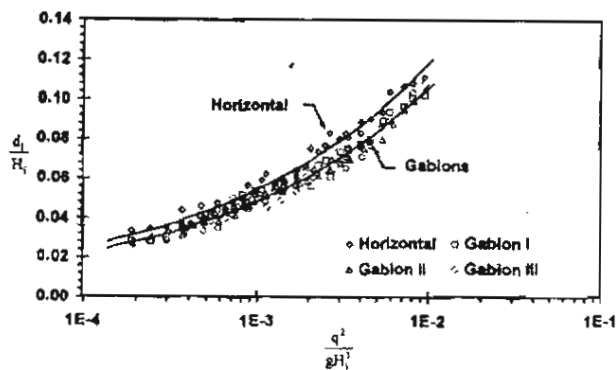
3.3 ความลึกของการไหลบนรางขังน้ำขึ้น

ในการออกแบบความสูงของผนังรางขังน้ำขึ้น จำเป็นต้องรู้ความลึกของการไหลรวมถึงฟองอากาศที่ปะปนกับการไหล จึงจะทำให้ผนังรางมีความสูงเพียงพอที่การไหลจะไม่กระเซ็นออกมา จากผลการทดลองพบว่าความลึกของการไหลบนรางขังน้ำขึ้น จะมีส่วนผสมของฟองอากาศปะปนอยู่ที่บริเวณผิวหน้าเป็นจำนวนมาก เมื่อพิจารณาความลึกของการไหลที่รวมกับฟองอากาศ ที่ความลาดเอียงเดียวกันและที่อัตราไหลเดียวกัน พบว่าความลึกของการไหลบนรางขังน้ำขึ้นแบบพื้นราบและแบบก่อดองคาข่ายไม่ค่อยแตกต่างกันนัก

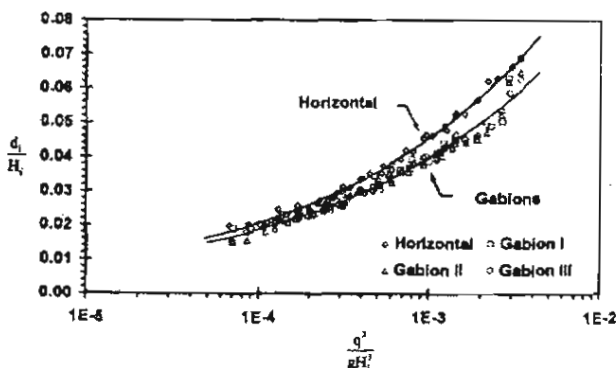
แต่เมื่อพิจารณาถึงความลึกของน้ำที่ไม่รวมส่วนที่มีการผสมของฟองอากาศ พบว่าความลึกในรางแบบก่อดองคาข่ายมีแนวโน้มน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่ก่อดองคาข่ายได้ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหินได้

บางส่วน (Base flow) อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่เกินร้อยละ 10 ของความลึกการไหลรวม

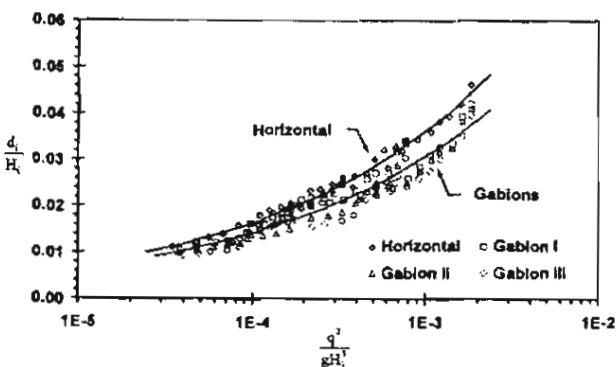
ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ไร้มิติ และค่า Step drop number ของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบ ก่อช่องคายน้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยความลึกของการไหลแปรผันตามค่า อัตราไหล เมื่ออัตราไหลมากขึ้น ความลึกบนขั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย



า) ความลาดเอียงของราง 30°



บ) ความลาดเอียงของราง 45°



ค) ความลาดเอียงของราง 60°

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกบนขั้นบันไดไร้มิติ กับ ค่า Step drop number

จากผลการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง d_i/H_i กับค่า Step drop number ของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบก่อกองคายน้ำ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d_i}{H_i} = p \left(\frac{q^2}{gH_i^3} \right)^s \quad (4)$$

เมื่อ d_i คือ ความลึกการไหลของบันไดขั้นที่ i (ม.)
 H_i คือ ความสูงในแนวตั้งวัดจากทางเข้าถึงบันไดขั้นที่ i (ม.)
 q คือ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที)
 p และ s คือ สัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (4)

α	รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ			รางขึ้นบันไดแบบก่อกองคายน้ำ		
	p	s	r^2	p	s	r^2
30	0.555	0.336	0.974	0.508	0.341	0.974
45	0.484	0.343	0.990	0.387	0.329	0.980
60	0.391	0.345	0.980	0.318	0.339	0.919

เมื่อพิจารณาถึงชั้นความหนาของฟองอากาศ พบว่าขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลและความลาดชันของราง กล่าวคือ เมื่อความลาดชันของ รางเพิ่มขึ้น ความหนาของฟองอากาศจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหล เพิ่มขึ้น ความหนาของฟองอากาศจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบกับก่อกองคายน้ำ พบว่ามีความหนาของฟอง อากาศใกล้เคียงกัน

4. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ว่าการไหลในรางขึ้นบันได แบบก่อกองคายน้ำสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบเรียงตามลำดับค่า อัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในรางขึ้นบันไดแบบ พื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ แต่ในกรณีของรางขึ้นบันไดแบบก่อกองคายน้ำ การไหล จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในก่อกองคาย น้ำ (Base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของก่อกองคายน้ำ (Upper flow) จากลักษณะการไหลและแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ข้อเสียดพลังงาน การไหลและลดความเร็วการไหลที่ออกจากรางได้ชัดเจน

รางขึ้นบันไดแบบก่อกองคายน้ำสามารถลดแรงดันที่น้ำกระทำ กับพื้นราง $\frac{P_i}{\gamma H_i}$ ได้ร้อยละ 27 เมื่อเปรียบเทียบกับรางขึ้นบันไดแบบพื้น ราบ โดยแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการไหล

หรือความลาดเอียงของรางเพิ่มมากขึ้น และแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นราง ขึ้นบันไดแบบกล่องค้ำขาที่มีความพรุนน้อยกว่าสามารถลดแรงดันน้ำ ได้มากกว่ากรณีของกล่องค้ำขาที่มีความพรุนมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่ ค่า Step drop number สูงๆ

การไหลบนขั้นบันไดพบว่ามีส่วนผสมของฟองอากาศปะปน อยู่บริเวณผิวหน้าเป็นจำนวนมาก เมื่ออัตราไหลมากขึ้น ความลึกบน ขั้นบันไดจะมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความลึกของน้ำที่ไม่รวมส่วนที่มีการ ผสมของฟองอากาศ พบว่าความลึกในรางแบบกล่องค้ำขามีแนวโน้ม น้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่กล่องค้ำขาได้ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหิน ได้บางส่วน (Base flow) อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่เกินร้อยละ 10 ของความลึกการไหลรวม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- 1 US Department of the Interior, "Design of Small Dams", Bureau of Reclamation, Denver (CO), USA, 1st edition, 1965.
- 2 Chanson, H., "Forum Article", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 9, 2000, pp. 636-637.
- 3 Stephenson, D., "Energy Dissipation down Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, No. 9, 1991, pp. 27-30.
- 4 Christodoulou, G.C., "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993, pp. 644-650.
- 5 Israngkura, U. and Chinnarasri, C., "Flow Depth and Energy Losses through Stepped Chutes", Proceedings of the 9th Congress of Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research (APD-IAHR Congress), Singapore, 1994, pp. 156-163.
- 6 Chanson, H., "Prediction of the Transition Nappe/Skimming Flow on a Stepped Channel" Journal of Hydraulics Research, IAHR, Vol. 34, No. 3, 1996, pp. 421-429.
- 7 Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 9, 1999, pp. 969-971.
- 8 Chinnarasri, C., "Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on the Step Faces of Stepped Spillways", Dam Engineering, Vol. 12, No. 4, 2002, pp. 303-321.
- 9 Stephenson, D., "Gabion Energy Dissipators", Proceeding 13th ICOLD Congress, New Delhi, Q. 50, R. 3, 1979, pp. 33-43.
- 10 Peyras, L., Royet, P., & Degoutte, G., "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 707-717.
- 11 Donjadee, S., Chinnarasri, C., Israngkura, U., and Chaturabul, T., "Flow Through Gabion Stepped Spillways", KMUTT Research and Development Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 81-93. (in Thai)
- 12 Bos, M.G., "Discharge Measurement Structures", International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 1976, pp. 23-32.

ภาคผนวก ข3

สำเนาบทความเรื่อง Energy dissipation and outlet velocity on stepped channels with end sills, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 15(1), pp. 25-32

การสลายพลังงานและความเร็วท้ายรางบนรางขั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น Energy Dissipation and Outlet Velocity on Stepped Channels with End Sills

ทศพล จตุระบุล ชัยยุทธ ชินณะราศรี และ อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา

ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE)

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Thodsapol Chaturabul, Chaiyuth Chinnarasri and Udomsak Israngkura

Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE)

Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

Tel: 0-2470-9137 E-Mail: chaiyuth.chi@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษจากการทดลองเพื่อหาการสลายพลังงานและความเร็วการไหลท้ายรางขั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น ตัวรางกว้าง 0.40 ม. และยาว 3.0 ม. โดยมีความลาดชัน 30° 45° และ 60° ตามลำดับ ขั้นบันไดมีความสูงร้อยละ 5 ของความสูงราง ความสูงของธรณีที่ปลายขั้นคือ 0.0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสลายพลังงานและความเร็วท้ายรางคือ ความลาดเอียงของราง Drop number และธรณีที่ปลายขั้น การสลายพลังงานของการไหลบนรางขั้นบันไดจะลดลง เมื่อค่า Drop number และความลาดชันของรางเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของธรณีที่ปลายขั้นเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความเร็วท้ายรางขั้นบันไดจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า Drop number และความลาดชันของรางเพิ่มขึ้น แต่ลดลงเมื่อความสูงของธรณีที่ปลายขั้นเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ของการสลายพลังงานของการไหลบนรางขั้นบันไดและความเร็วการไหลท้ายรางกับตัวแปรที่สำคัญได้แสดงในรูปสมการ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.895 ถึง 0.996

Abstract

This paper presents the results of the experimental study on the energy dissipation and outlet velocity on stepped channels with end sills. The channels are 0.40 m wide and 3.0 m long with the slopes of 30° , 45° and 60° , respectively. The step height is 5% of the channel height. The heights of the end sill are 0.0, 0.5, 1.0 and 1.5 cm, respectively. It was found that the important variables affecting the energy dissipation and outlet velocity were channel slope, Drop number, and end sill. The energy dissipation decreased when Drop number and the slope of the channel increased but increased when the height of end sill increased. In contrast, the outlet velocity increased

when Drop number and the slope of channel increased. From these results, the relations of energy dissipation and outlet velocity on stepped channel and the important variables were formed with the R^2 in the ranges of 0.895 and 0.996.

1. บทนำ

รางขั้นบันไดเป็นทางน้ำเปิดซึ่งมีพื้นรางเป็นขั้นบันได รางประเภทนี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นรางระบายน้ำผ่านบริเวณที่มีความลาดชันสูง เช่น ทางระบายน้ำด้านของเขื่อน หรือระบบระบายน้ำของถนนที่ตัดผ่านภูเขา ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา การออกแบบและก่อสร้างรางขั้นบันไดได้รับความนิยมอย่างมาก อันเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้วัสดุประเภท Roller-compacted concrete และ Polymer-coated gabion wire ในการก่อสร้างเขื่อนและทางน้ำด้าน ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีวิธีการก่อสร้างที่สอดคล้องกับรางขั้นบันได

Essery และ Homor [1] เป็นบุคคลแรกที่ทำการทดลองอย่างจริงจังเกี่ยวกับการไหลบนรางขั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบพื้นเอียง พร้อมทั้งเสนอกราฟสำหรับออกแบบรางขั้นบันได สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการสลายพลังงานของรางขั้นบันได มีผู้สนใจทำการทดลองมากมาย เช่น Stephenson [2] Rajaratnam [3] Diez-Cascon และคณะ [4] Peyras และคณะ [5] Christodoulou [6] Israngkura และ Chinnarasri [7] Frattino และคณะ [8] และ Pinheiro และ Fael [9] เป็นต้น

ในปี พ.ศ. 2537 Chamani และ Rajaratnam [10] ได้เสนอสมการคำนวณการสลายพลังงานบนรางขั้นบันไดแบบพื้นราบขึ้นเป็นครั้งแรก และในปีเดียวกัน Chanson [11] ก็เสนอสมการคำนวณการสลายพลังงานในการไหลแบบ Nappe flow และ Skimming flow ทั้งแบบมีประตูบังคับน้ำและไม่มี ผลจากรายงานของ Chanson [11] ทำให้เกิดบทวิเคราะห์และวิจารณ์ตามมาหลายฉบับ เช่น Ohsu และ Yasuda [12] Kells [13] และ Matos และ Quintela [14] หลังจากนั้น Chanson และ

RECEIVED 16 September, 2003

ACCEPTED 25 November, 2003

Toombes [15] ก็ได้เสนอผลการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสลายพลังงานในรางที่มีความลาดชันน้อย

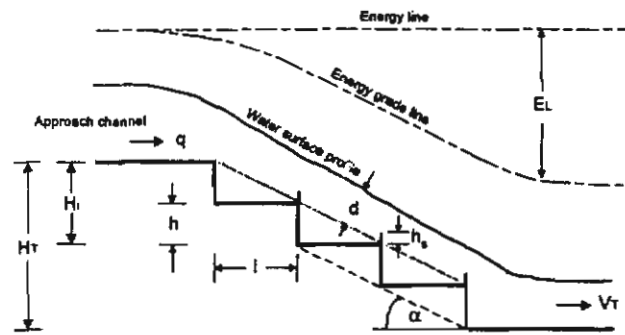
สำหรับรายงานการศึกษาเกี่ยวกับรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชัน พบว่า Poggi [16-17] เป็นบุคคลแรกที่ทำการรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการไหลบนอาคารระดับที่มีธรณีที่ปลาย โดยศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบ *Nappe flow* ที่มีการกระโดดของน้ำบนพื้นอาคาร และพบว่าอาคารระดับที่มีธรณีที่ปลายสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าอาคารระดับทั่วไปเล็กน้อย ต่อมา Vital และ Porey [18] ก็ได้ทำการศึกษาเพื่อออกแบบทางน้ำชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันโค้งมนแบบ *Ogee* ของเขื่อน Tehri ในประเทศซาอุดีอาระเบีย และเมื่อไม่นานมานี้ Peruginelli และ Pagliara [19] ก็ได้ศึกษาการสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันเทียบกับรางชันบันไดแบบพื้นราบ ผลที่ได้พบว่ารางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันสามารถสลายพลังงานได้มากกว่ารางชันบันไดแบบพื้นราบเล็กน้อย ในขณะที่ Aigner [20] ได้สร้างสมการพื้นฐานจากการวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบรางชันบันไดแบบอ่าง

ถึงแม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับการไหลบนรางชันบันไดมีการศึกษามากกว่า 10 ปี แต่ก็ยังอยู่ในวงจำกัด ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาชลศาสตร์การไหลบนรางชันบันไดแบบพื้นราบ งานศึกษาหลายฉบับยังต้องการการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาเกี่ยวกับชลศาสตร์การไหลบนรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันหรือแบบมีอ่าง และรางชันบันไดรูปแบบอื่นซึ่งมีผู้ทำการศึกษาน้อยมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าววัตถุประสงค์ของการศึกษานี้จึงเป็นการทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำบนรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงาน และความเร็วการไหลท้ายรางชันบันไดเทียบกับตัวแปรการออกแบบรางอื่นๆ ในรูปตัวแปรไร้มิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันรวมถึงอาคารสลายพลังงานที่ปลายรางต่อไป

2. การวิเคราะห์มิติ

ในสภาวะการไหลใดๆ การสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชัน (E_L) จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (q) ความสูงรวมของรางชันบันได (H_T) ความลาดชันของราง (α) ความสูงถูกต้องของชันบันได (h) ความสูงของธรณีที่ปลายชัน (h_s) และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งตัวแปรต่างๆ นี้แสดงไว้ดังรูปที่ 1 และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้เป็น

$$E_L = f_n(q, H_T, \alpha, h, h_s, g) \quad (1)$$



รูปที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสลายพลังงานของรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชัน

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการไหลบนรางชันบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชันให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความทฤษฎีของ Buckingham- π ซึ่งจากสมการที่ 1 สามารถวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติได้เป็น

$$\frac{E_L}{H_T} = f_1\left(\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{h_s}{h}, \alpha\right) \quad (2)$$

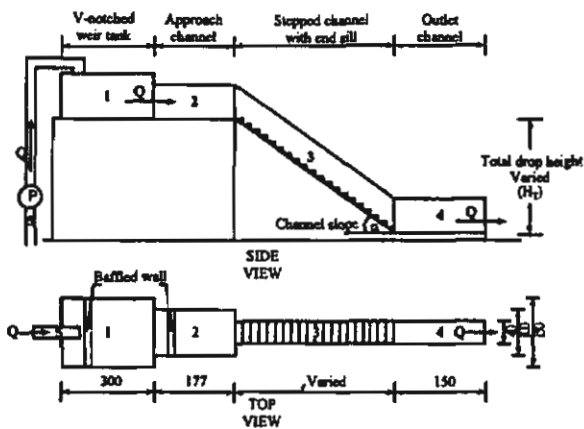
ในทำนองเดียวกัน พลังงานที่เหลืออยู่บริเวณท้ายรางชันบันไดในรูปของความเร็วสัมพัทธ์จะเขียนได้เป็น

$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_2\left(\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{h_s}{h}, \alpha\right) \quad (3)$$

เมื่อ E_L/H_T เป็นอัตราส่วนการสูญเสียพลังงานของการไหลบนรางชันบันไดต่อความสูงราง $V_T/\sqrt{gH_T}$ เป็นความเร็วการไหลไร้มิติที่ท้ายรางชันบันได V_T เป็นความเร็วการไหลที่ท้ายรางชันบันได q^2/gH_T^3 เป็นค่า Drop number h_s/h เป็นความสูงสัมพัทธ์ของธรณีที่ปลายชัน และ α เป็นความลาดชันของรางชันบันได

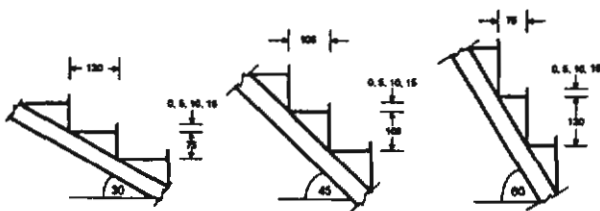
3. อุปกรณ์และวิธีการ

ผังการจัดวางอุปกรณ์การทดลองแสดงโดยตั้งเขปดังรูปที่ 2 อุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ถังรับน้ำซึ่งติดตั้งฝายวัดอัตราการไหลเป็นรูปสามเหลี่ยม ปากทางเข้าราง รางชันบันได และรางระบายน้ำออก ซึ่งแสดงไว้ดังหมายเลขที่ 1 ถึง 4 ในรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2 หังการจ้ควางอุปกรณัทดลอง

รางจ้บันไดที่ใ้ใช้ในการศึกษาเป็นรางจ้บันไดแบบมีรณัที่ปลายจ้ัน ตัวรางสร้างด้วยแผ่นพลาสติกใส มีความกว้าง 0.40 เมตร ยาว 3.0 เมตร มีความลาดชัน 30° 45° และ 60° และมีความสูงในแนวตั้งเท่ากับ 1.50, 2.12, และ 2.60 เมตร คมด้าค้บ จ้ันบันไดมีความสูงร้ยละ 5 ของความสูงราง และมีความสูงของรณัที่ปลายจ้ันบันไดเท่ากับ 0.0, 0.5, 1.0, และ 1.5 ซม. คมด้าค้บ มิติของจ้ันบันไดและรณัที่ปลายจ้ันแสดงไว้ในรูปที่ 3



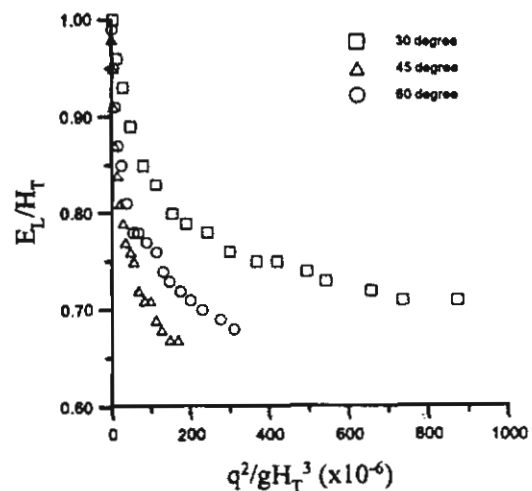
รูปที่ 3 มิติของจ้ันบันไดและรณัที่ปลายจ้ันในหน่วยมิลลิเมตร

การวัดความลึกและความเร็วการไหลกระทำ 2 จุด คือ บริเวณปากทางเข้าราง ห่างจากจ้ันบันไดจ้ันแรกประมาณ 1 เท่าของความยาวลูกนอน เพื่อลดอิทธิพลของการไหลย้อนกลับ และบริเวณท้ายรางระบายน้ำ ออก ห่างจากจ้ันบันไดจ้ันสุดท้ายประมาณ 3-4 เท่าของความยาวลูกนอนของจ้ันบันได เพื่อลดอิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนและการผสมกันของน้ำและอากาศ ความลึกการไหลในหน้าค้ดของรางวัดโดยใ้ Vernier-depth gauge ส่วนความเร็วการไหลของการศึกษาครั้งนี้ได้วัด 2 วิธี คือ ค้านวนจากความลึกของน้ำไหลลดปิดคอด และค้านวนจากสมการต่อเนื่อง ผลการค้านวนจากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันไม่เกิน ร้ยละ 10 ดังนั้นการค้านวนการสลายพลังงานและความเร็วการไหลของการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใ้ผลจากวัดโดยตรงด้วยหลอดปิดคอด

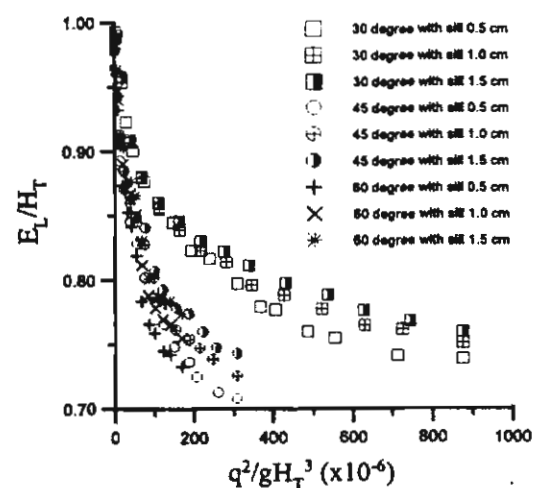
การทดลองทำโดยปล่อยน้ำเข้าสู้รางจ้ันบันได ผ่านดังวัดอัตราการไหลและปากทางเข้าราง เข้าสู้รางจ้ันบันได แล้วไหลลงทางระบายน้ำออก เมื่อการไหลเข้าสู่สภาวะการไหลแบบคงที่ จึงทำการวัดอัตราการไหล ความลึก และความเร็วการไหล

4. การสลายพลังงานของการไหลบนรางจ้ันบันได

การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการสูญเสียพลังงานการไหลบนรางจ้ันบันได (E_L/H_T) กับค่า Drop number (q^2/gH_T^3) ของรางจ้ันบันไดแบบพื้นราบ ($h_s = 0.0$ ซม.) และแบบมีรณัที่ปลายจ้ัน ($h_s = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ซม.) ใ้ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ความลาดเอียงของจ้ันบันไดต่างๆได้แสดงไว้ในรูปที่ 4



(ก) รางจ้ันบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางจ้ันบันไดแบบมีรณัที่ปลายจ้ัน

รูปที่ 4 การสลายพลังงานกับค่า Drop number

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ความลาดชันของรางขึ้นบันได รวมถึง Drop number และระยะที่ปลายชั้นมีอิทธิพลต่อการสลายพลังงาน โคจรขึ้นบันไดที่มีความลาดชันน้อยจะสลายพลังงานได้มากกว่ารางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันมาก ซึ่งในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันต่างกันจะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อค่า Drop number มากขึ้น ความแตกต่างของการสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันต่างกันก็จะมากขึ้นด้วย และเมื่ออัตราการไหลในรางมีค่ามาก การสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 45° และ 60° (รูปที่ 4 ก) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 30° ประมาณร้อยละ 7 และ 12 ตามลำดับ ในขณะที่การสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° (รูปที่ 4 ข) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 30° ประมาณร้อยละ 9 ของพลังงานทั้งหมด

การสลายพลังงานในรางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก ในช่วงอัตราการไหลที่ต่ำการศึกษา การไหลบนรางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 60° จะเข้าสู่สภาวะการไหลแบบ Skimming flow เฉพาะในช่วงปลายของราง ดังนั้นการสลายพลังงานส่วนใหญ่จึงเกิดจากการไหลตก การกระโดดข้ามชั้น และการพุ่งตัวของน้ำออกจากชั้นมากกว่าที่จะเกิดจากการไหลวนในช่องว่างของบันได ทำให้มีการสลายพลังงานมาก และมีปริมาณใกล้เคียงกับรางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความลาดชัน 45°

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ Drop number พบว่าการสลายพลังงานจะลดลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น แต่เมื่อ Drop number มีค่าสูง การสลายพลังงานจะค่อยๆ ลดลงและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อค่า Drop number มากขึ้น

สำหรับอิทธิพลของความสูงของระยะที่ปลายชั้นพบว่า รางขึ้นบันไดที่มีความสูงระยะที่ปลายชั้นมากจะมีการสลายพลังงานมากกว่ารางขึ้นบันไดที่มีความสูงของระยะที่ปลายชั้นน้อย ซึ่งรวมถึงรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบด้วย โดยในช่วงที่ Drop number มีค่าน้อย การสลายพลังงานของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้นจะใกล้เคียงกัน การสลายพลังงานส่วนใหญ่เกิดจากการไหลตกและการกระโดดตัวของน้ำบนชั้นบันได แต่เมื่อ Drop number มีค่ามากขึ้น ความสูงของระยะที่ปลายชั้นจะมีอิทธิพลต่อการสลายพลังงานอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความสูงของระยะที่ปลายชั้นได้ช่วยเพิ่มขนาดของอ่างบนชั้นบันได ทำให้การไหลวนของน้ำต้องการพลังงานในการสร้างเสถียรภาพมากขึ้น

ในรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 30° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความสูงของระยะ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_p/h = 0, 0.07, 0.13$ และ

0.20) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.68, 0.74, 0.75 และ 0.76 ตามลำดับ ในขณะที่รางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 45° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความสูงของระยะ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_p/h = 0, 0.05, 0.09$ และ 0.14) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.66, 0.71, 0.73 และ 0.74 ตามลำดับ ส่วนรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 60° การสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้นที่มีความสูงของระยะ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_p/h = 0, 0.04, 0.08$ และ 0.12) จะเข้าใกล้ค่าคงที่ประมาณ 0.65, 0.73, 0.75 และ 0.77 ตามลำดับ และเมื่อมองภาพรวมเปรียบเทียบระหว่างการสลายพลังงานเนื่องจากการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้น พบว่ารางขึ้นบันไดแบบมีระยะที่ปลายชั้นสามารถสลายพลังงานได้มากกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 8

จากโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของการสลายพลังงานกับค่า Drop number จะให้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการยกกำลัง คือ

$$\frac{E_L}{H_T} = \eta_1 \left(\frac{q^2}{gH_T^3} \right)^{\eta_2} \quad (4)$$

เมื่อ η_1 และ η_2 เป็นสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการ

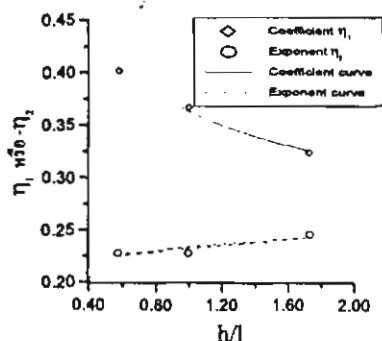
จากผลการศึกษาจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ η_1 ตัวเลขยกกำลัง η_2 และค่าสหสัมพันธ์ของชุดข้อมูล (R^2) ของรางขึ้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีระยะที่ปลายชั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการการสลายพลังงาน

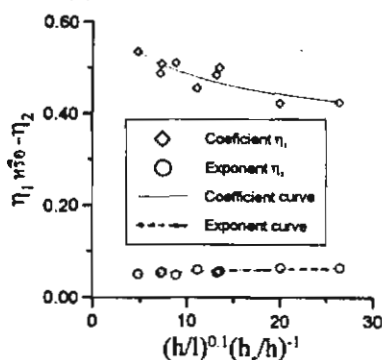
ความลาดชัน (องศา)	h/l	h_p/h	η_1	η_2	R^2
30	0.577	0.00	0.402	-0.076	0.977
		0.07	0.501	-0.057	0.961
		0.13	0.510	-0.056	0.991
		0.20	0.536	-0.051	0.982
45	1.000	0.00	0.367	-0.076	0.975
		0.05	0.423	-0.066	0.958
		0.09	0.456	-0.06	0.946
		0.14	0.489	-0.054	0.949
60	1.732	0.00	0.324	-0.082	0.969
		0.04	0.426	-0.065	0.933
		0.08	0.485	-0.054	0.898
		0.12	0.511	-0.050	0.895

เนื่องจากสมการการสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดที่มีความหลากหลายและไม่สะดวกในการใช้งาน การศึกษาครั้งนี้จึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 มาเพื่อหาความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ใช้ออกแบบรางขึ้นบันได ได้ถึงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรูปที่ 5ก เป็นถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ซึ่งจัดอยู่ในรูป η_1 และ $-\eta_2$ กับสัดส่วนความสูงของลูกตั้งและความยาวลูกนอนของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ (h/l) ส่วนรูปที่ 5ข เป็นถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 ซึ่งจัดอยู่ในรูป η_1 และ $-\eta_2$ กับตัวแปรออกแบบรางขึ้นบันไดแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความลาดชันของรางกับความสูงของรอยนูนที่ปลายขึ้น $[(h/l)^{0.1}(h_r/h)^{-1}]$

ถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 ในสมการการสลายพลังงานของทั้งรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนความสูงลูกตั้งและลูกนอนของรางขึ้นบันไดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวเลขยกกำลัง η_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อสัดส่วนความสูงลูกตั้งและลูกนอนของรางขึ้นบันไดเพิ่มขึ้น



(ก) รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางขึ้นบันไดแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น

รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลัง ของสมการการสลายพลังงานกับตัวแปรออกแบบรางขึ้นบันได

จากถึงความสัมพันธ์ในรูปที่ 5ก เมื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 กับความลาดชันของรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ คือ

$$\eta_{1,2} = a \left(\frac{h}{l} \right)^b \quad (5)$$

เมื่อ $\eta_{1,2}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวเลขยกกำลังของสมการการสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ a และ b เป็นค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลัง ในการคำนวณหา η_1 , a และ b มีค่าเท่ากับ 0.363 และ -0.196 สำหรับการคำนวณหา η_2 , a และ b มีค่าเท่ากับ -0.078 และ 0.069 โดยที่สมการที่ 5 นี้ครอบคลุมช่วง h/l ระหว่าง 0.577 ถึง 1.732 และมีค่าสหสัมพันธ์ของสมการมากกว่า 0.750

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำรูปที่ 5ข มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปสมการ จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ η_1 และตัวเลขยกกำลัง η_2 กับตัวแปรออกแบบรางขึ้นบันไดแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น คือ

$$\eta_{1,2} = c \left[\left(\frac{h}{l} \right)^{0.1} \left(\frac{h_r}{h} \right)^{-1} \right]^d \quad (6)$$

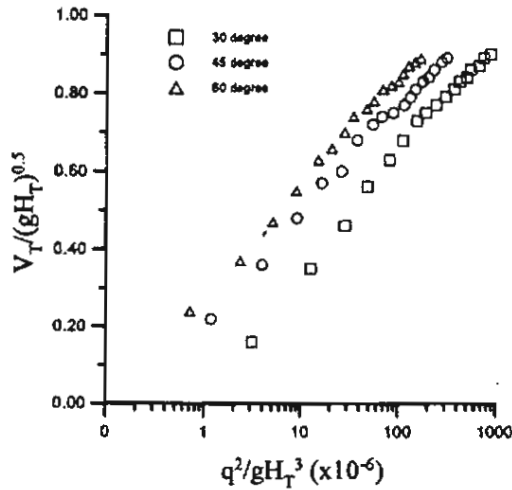
เมื่อ $\eta_{1,2}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวเลขยกกำลังของสมการการสลายพลังงานของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น c และ d เป็นค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลัง ในการคำนวณหา η_1 , c และ d มีค่าเท่ากับ 0.662 และ -0.134 สำหรับการคำนวณหา η_2 , c และ d มีค่าเท่ากับ -0.040 และ 0.141 โดยที่สมการที่ 6 นี้ครอบคลุมช่วง h/l ระหว่าง 0.577 ถึง 1.732 และช่วง h_r/h ระหว่าง 0.07 ถึง 0.20 มีค่าสหสัมพันธ์ของสมการมากกว่า 0.675

5. ความเร็วการไหลท้ายรางขึ้นบันได

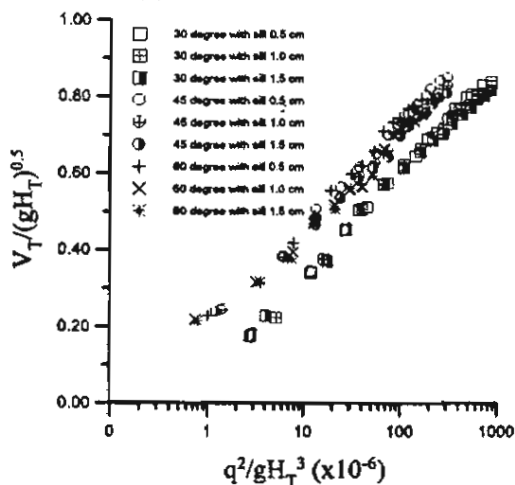
การศึกษานี้ได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลไว้มีดท้ายรางขึ้นบันได ($V_r / \sqrt{gH_r}$) กับค่า Drop number ของรางขึ้นบันไดทั้งแบบพื้นราบ ($h_r = 0.0$ ซม.) และแบบมีรอยนูนที่ปลายขึ้น ($h_r = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ซม.) ถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่ความลาดเอียงของรางขึ้นบันได รวมถึง Drop number และรอยนูนที่ปลายขึ้นมีอิทธิพลต่อความเร็วการไหลท้ายรางขึ้นบันได โดยรางที่มีความลาดชันน้อยจะมีความเร็วท้ายรางน้อยกว่ารางที่มีความลาดชันมาก เนื่องจากรางที่มีความลาดชันน้อยมีสัดส่วนการสลายพลังงานมากกว่ารางที่มีความลาดชันมาก ทำให้พลังงานจลน์ที่เหลืออยู่ท้ายราง

น้อยกว่ารางขึ้นบันไดที่มีความลาดชันมาก และส่งผลให้ความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดน้อยตามไปด้วย



(ก) รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ



(ข) รางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้น

รูปที่ 6 ความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดกับค่า Drop number

ในรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 30° และ 45° จะมีความเร็วที่ท้ายรางน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชัน 60° ประมาณร้อยละ 15 และ 8 ตามลำดับ (รูปที่ 6ก) ในขณะที่ความเร็วที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 30° จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° และ 60° ประมาณร้อยละ 9 (รูปที่ 6ข) โดยความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° จะใกล้เคียงกับรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 60° ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในงานรูปที่ 4.2ข ที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ Drop number พบว่าความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น และ

สอดคล้องกับการทดลองงานซึ่งตกลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อการทดลองงานตกลง พลังงานจลน์ที่เหลืออยู่ที่ท้ายรางขึ้นบันไดจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับอิทธิพลของความสูงของธรณีที่ปลายขั้นพบว่า รางขึ้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นสูง จะมีความเร็วการไหลที่ท้ายรางน้อยกว่ารางขึ้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นต่ำ ซึ่งรวมถึงรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบด้วย เนื่องจากรางขึ้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นสูง จะมีการทดลองงานที่สูงกว่ารางขึ้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายขั้นต่ำ ในช่วง Drop number มีค่าน้อย ความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายจะใกล้เคียงกัน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกสลายไปบนรางขึ้นบันได ทำให้พลังงานจลน์ที่ท้ายรางขึ้นบันไดมีค่าน้อย แต่เมื่อ Drop number มีค่ามาก ธรณีที่ปลายขั้นจะมีผลต่อความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดอย่างเห็นได้ชัด แต่การเปลี่ยนแปลงความสูงของธรณีที่ปลายขั้นจะมีผลต่อความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดเพียงเล็กน้อย

ในรางขึ้นบันไดที่มีความลาดชัน 30° ความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นซึ่งมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.07, 0.13$ และ 0.20) จะน้อยกว่าความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ ($h_s/h = 0$) ประมาณร้อยละ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 45° และมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.05, 0.09$ และ 0.14) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชันเท่ากัน ประมาณร้อยละ 3, 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นที่มีความลาดชัน 60° และมีความสูงของธรณีเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซม. ($h_s/h = 0.04, 0.08$ และ 0.12) จะน้อยกว่ารางขึ้นบันไดแบบพื้นราบที่มีความลาดชันเท่ากัน ประมาณร้อยละ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ

จากโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 6 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลที่ท้ายรางขึ้นบันไดกับค่า Drop number จะได้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการลอการิทึม คือ

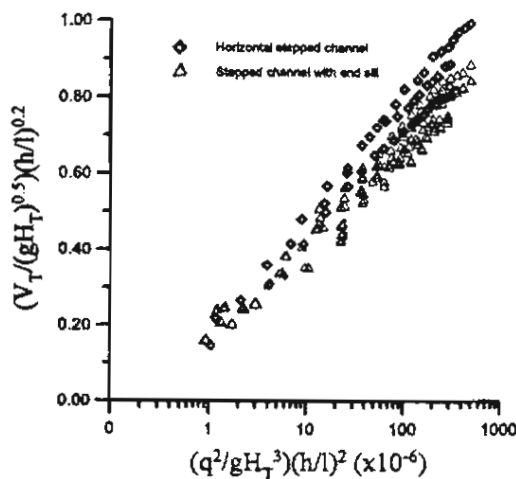
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = \eta_b \ln \left(\frac{q^2}{gH_T^3} \right) + \eta_s \quad (7)$$

เมื่อ η_b และ η_s เป็นสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการ แสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับรางขึ้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายขั้นตามการคำนวณตามารอดแสดงได้ด้วยสมการเดียวในแต่ละความลาดชัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของธรณีที่ปลายขั้นมีอิทธิพลต่อความเร็วที่ท้ายรางขึ้นบันไดน้อยมาก

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์และตัวเลขยกกำลังของสมการความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นบันได

ความ ลาดชัน (องศา)	แบบพื้นราบ			แบบมีธรณีที่ปลายชั้น		
	η_1	η_2	R^2	η_1	η_2	R^2
30	0.132	1.859	0.993	0.115	1.659	0.993
45	0.120	1.872	0.994	0.112	1.738	0.990
60	0.122	1.970	0.996	0.111	1.730	0.974

เนื่องจากสมการความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นบันไดที่มีความหลากหลายและไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน การศึกษาครั้งนี้จึงได้ปรับปรุงโครงสร้างสัมพัทธ์ในรูปที่ 6 ขึ้นใหม่ เพื่อให้ได้ถึงความสัมพันธ์เพียง 2 เส้น ซึ่งเป็นตัวแทนของความเร็วที่ธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น สำหรับทุกความลาดชันของธารวางชั้นบันได โดยนำค่าสัดส่วนความสูงของลูกตั้งกับความยาวลูกนอนของธารวางชั้นบันได (h/l) ไปคูณกับตัวแปรไร้มิติในแนวแกนนอนและแกนตั้งของรูปที่ 6 ได้ตัวแปรไร้มิติเป็น $[(q^2/gH_T^3)(h/l)^2]$ และ $[(V_T/\sqrt{gH_T})(h/l)^{0.2}]$ โดยตัวแปร $[(q^2/gH_T^3)(h/l)^2]$ จะเรียกเป็นค่า Modified drop number และได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นบันไดกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชันธารวางชั้นบันได

จากโครงสร้างสัมพัทธ์ที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบการลอการิทึม จะได้สมการความสัมพันธ์ของความเร็วที่ธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชัน ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.960 ดังสมการที่ 8

$$\left(\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^{0.2} = 0.13 \ln \left[\left(\frac{q^2}{gH_T^3}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^2\right] + 1.93 \quad (8)$$

สมการความสัมพันธ์ของความเร็วที่ธารวางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชั้นกับค่า Modified drop number สำหรับทุกความลาดชัน ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.960 ดังสมการที่ 9

$$\left(\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^{0.2} = 0.11 \ln \left[\left(\frac{q^2}{gH_T^3}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^2\right] + 1.70 \quad (9)$$

6. สรุป

การสถาปนาผลงานของการไหลบนธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยจะลดลงเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ Drop number มีค่ามาก นอกจากนี้ การสถาปนาผลงานจะมีความมากขึ้นเมื่อความลาดชันของธารวางชั้นบันไดมากขึ้น และที่ค่า Drop number สูงๆ ความแตกต่างระหว่างการสถาปนาผลงานของการไหลบนธารวางชั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย ที่สภาวะการไหลเดียวกัน ธารวางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นสูงจะสถาปนาผลงานมากกว่าธารวางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นน้อย โดยเมื่อ Drop number เพิ่มขึ้น การสถาปนาผลงานของธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้นจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดประมาณร้อยละ 8 และการเพิ่มความสูงของธรณีที่ปลายชั้นจะเพิ่มการสถาปนาผลงานได้เฉลี่ยร้อยละ 3 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปความสัมพันธ์ไว้ในรูปสมการออกกำลังได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.895 ถึง 0.977

ความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้น มีแนวโน้มเหมือนกัน และสอดคล้องกับการสถาปนาผลงาน โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Drop number เพิ่มขึ้น การเพิ่มความลาดชันของธารวางชั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบมีธรณีที่ปลายชั้นสามารถลดความเร็วที่ธารวางชั้นได้ประมาณร้อยละ 8-15 และที่สภาวะการไหลเดียวกัน ธารวางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นสูงจะมีความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นน้อยกว่าธารวางชั้นบันไดที่มีธรณีที่ปลายชั้นต่ำ โดยธารวางชั้นบันไดแบบมีธรณีที่ปลายชั้นจะมีความเร็วการไหลน้อยกว่าธารวางชั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 7-12 และการเพิ่มความสูงของธรณีที่ปลายชั้นจะลดความเร็วการไหลที่ธารวางชั้นได้เฉลี่ยร้อยละ 2 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปความสัมพันธ์ไว้ในรูปสมการลอการิทึมได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่าง 0.974 ถึง 0.996

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทบวงมหาวิทยาลัย และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้

สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน และขอขอบคุณ ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Esserry, I.T.S. and Hornor, M.W., "The Hydraulics Design of Stepped Spillways", Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Report No. 33, London, 1971, 41 pages.
- [2] Stephenson, D., "Energy Dissipation down Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, No. 9, 1991, pp. 27-30.
- [3] Rajaratnam, N., "Skimming Flow in Stepped Spillway", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 4, 1990, pp. 587-591.
- [4] Diez-Cascon, et al., "Studies on the Hydraulic Behaviour of Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Vol. 43, No. 9, 1991, pp. 22-26.
- [5] Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G., "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 707-717.
- [6] Christodoulou, G.C., "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993, pp. 644-650.
- [7] Israngkura, U. and Chinnarasri, C., "Flow Depth and Energy Losses through Stepped Chutes", Proceedings of the 9th Congress of Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research (APD-IAHR Congress), Singapore, 1994, pp. 156-163.
- [8] Fratino, U., Piccinini, A.F. and Mainis, G.de, "Dissipation Efficiency of Stepped Spillways", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 103-110.
- [9] Pinheiro, A.N. and Fael, C.S., "Nappe Flow in Stepped Channels-Occurrence and Energy Dissipation", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 119-126.
- [10] Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., "Jet Flow on Stepped Spillways" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 2, 1994, pp. 254-259.
- [11] Chanson, H., "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 32, No. 2, 1994, pp. 213-218.
- [12] Ohtsu, I. and Yasuda, Y., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 115-117.
- [13] Kells, J.A., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulics Research, IAHR, Vol. 33, No.1, 1995, pp. 128-133.
- [14] Matos, J. and Quintela, A., "Discussion on Comparison of Energy Dissipation Between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 135-139.
- [15] Chanson, H. and Toombes, L., "Energy Dissipation in Stepped Waterway", Proceedings of 27th International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress, Holly Jr., F.M. and Aasaffer, A. (Eds), San Francisco, USA, 1997, pp. 595-600 (Vol. D).
- [16] Poggi, B., "Sopra li Scaricatori a Scala di Stramazzi", L'energia elettrica, Milan, Oct., 1949, 26 pages.
- [17] Poggi, B., "Lo Scaricatore a Scala di Stramazzi", L'energia elettrica, Milan, Jan., 1956, 33 pages.
- [18] Vittal, N. and Porey P.D., "Design of Cascade Stilling Basins for High Dam Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, 1987, pp. 225-237.
- [19] Peruginelli, A. and Pagliara, S., "Energy Dissipation Comparison among Stepped Channel, Drop, and Ramp Structures", in International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Minor, H.E. & Hager, W.H. (Eds.), Zurich, Switzerland, 2000, pp. 111-118.
- [20] Aigner, D., "Hydraulic Design of Pooled Step Cascades", XXIX International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress, 16-21 September, 2001, Beijing, China.

ภาคผนวก ข4

สำเนาบทความเรื่อง Flow through gabion stepped spillways, KMUTT Research and Development Journal, Vol. 27(1), pp. 81-93 (in Thai)

การไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

สมชาย ดอนเจดีย์¹

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 71340

ชัยยุทธ ชินณะราศรี² อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา² และ ทศพล จตุระบุล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด พุ่่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 29 สิงหาคม 2546 ตอบรับเมื่อ 4 ธันวาคม 2546

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายจากการทดลองในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดที่มีความกว้าง 0.40 เมตร มีความลาดชันของราง 30° , 45° และ 60° โดยมีความสูงของรางเท่ากับ 1.50, 2.12, และ 2.60 เมตร ตามลำดับ ชั้นบันไดมีความสูงเป็นร้อยละ 5 ของความสูงราง อัตราไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที จากผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราไหลน้อย การไหลผ่านชั้นบันไดจะเป็นแบบ Nappe flow แต่เมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้นการไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบ Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ การแบ่งขอบเขตของการไหลแสดงได้ด้วยตัวเลขอัตราส่วนของความลึกวิกฤตต่อความสูงชั้นบันได การสูญเสียพลังงานการไหลแปรเปลี่ยนผกผันกับค่า Modified drop number โดยการสูญเสียพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Modified drop number ลดลง ในขณะที่การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น ความเร็วทางด้านท้ายน้ำจะลดลง ทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงานได้ประมาณร้อยละ 10 และลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำได้ร้อยละ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ

คำสำคัญ : ทางระบายน้ำล้นชั้นบันได / กล่องตาข่าย / การสูญเสียพลังงาน / ความเร็วท้ายน้ำ

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน (อดีตนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ (WAREE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Flow through Gabion Stepped Spillways

Somchai Donjadee¹

Kasetsart University, Kampaeng Saen Campus, Nakorn Pathom 71340

Chaiyuth Chinnarasri² Udomsak Israngkura² and Thodsapol Chaturabul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 29 August 2003 ; accepted 4 December 2003

Abstract

This paper presents the results of the experimental studies on the flow through the gabion stepped spillways. The width of the gabion stepped spillways is 0.40 m and the slopes of the gabion stepped spillways are 30°, 45°, and 60° with total spillway drop height 1.50, 2.12, and 2.60 m, respectively. The step height is 5 percent of the total spillway drop height. The discharge through the gabion stepped spillways was varied from 4 to 68 l/s. It was found that nappe flow occurred at low flow rates, transition flow at intermediate discharges and skimming flow at larger flow rates. The regimes of flow could be identified by the ratio of critical flow depth and step height. The energy loss varied inversely with the modified drop number, i.e. energy loss increased when modified drop number decreased. As the energy loss of flow increased, the velocity of flow at the spillway outlet decreased. The energy of flow was dissipated more in the gabion stepped spillways than in the horizontal stepped spillways about 10 percent. The velocity of flow at the outlet of the gabion stepped spillways was less than that of the horizontal stepped spillways by about 14 percent.

Keywords : Stepped spillways / Gabions / Energy loss / Outlet velocity

¹ Lecturer, Department of Irrigation Engineering (Former Graduate Student, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi).

² Assistant Professor, Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE), Department of Civil Engineering.

³ Researcher, Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE), Department of Civil Engineering.

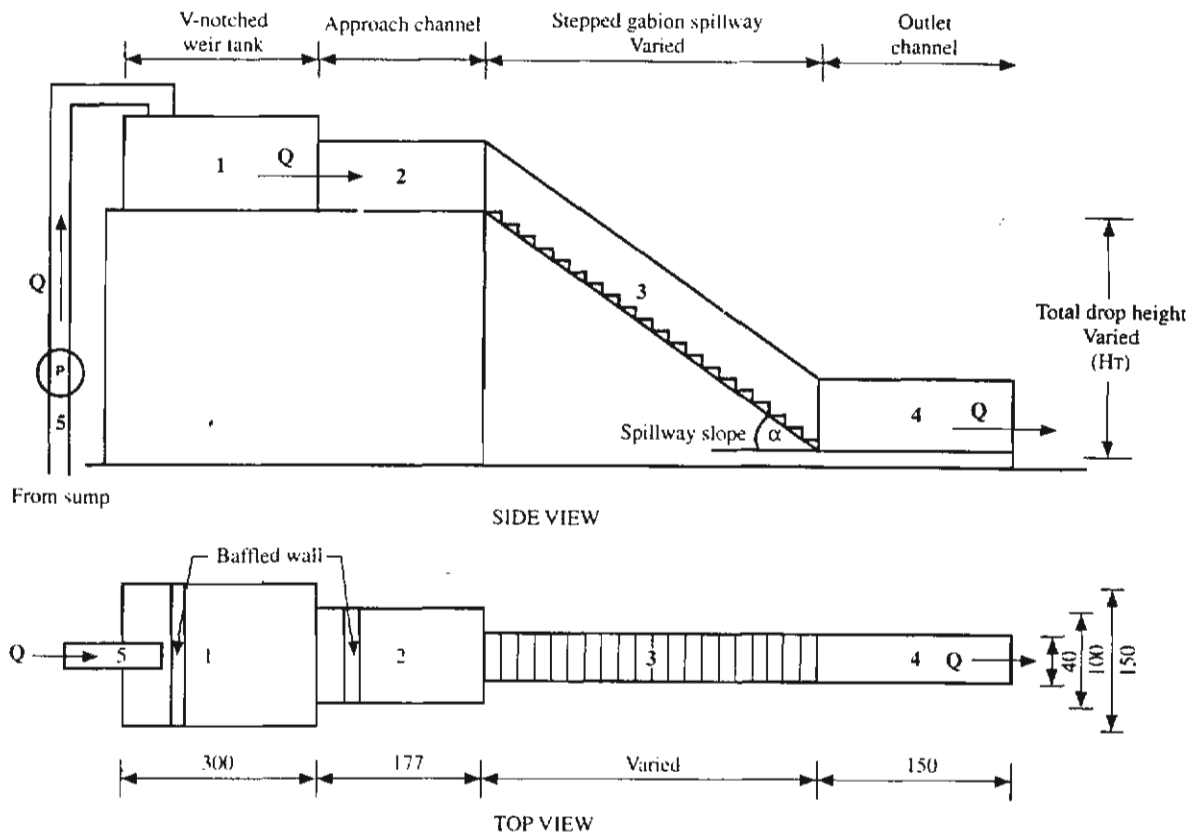
1. บทนำ

ทางระบายน้ำล้นขั้นบันได (stepped spillway) เป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่สำคัญสำหรับการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ โดยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงาน และลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำ ทำให้ความยาวของการเกิดน้ำกระโดดบริเวณท้ายน้ำสั้นลง ส่งผลให้สามารถลดขนาดการก่อสร้างของอ่างสลายพลังงานลงได้ นอกจากนี้ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดยังก่อให้เกิดการผสมกันของฟองอากาศได้ดี [1] และมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นดีกว่าทางระบายน้ำล้นแบบพื้นเรียบ (plain-bed spillway) [2]-[6] ที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาทางระบายน้ำล้นแบบขั้นบันไดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายพลังงานให้มากยิ่งขึ้น ด้วยการนำวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูกอย่างเช่น หิน มาใส่ในกล่องตาข่ายแล้วนำมาวางเป็นขั้นบันได (Gabion steps) [7]-[8] แนวคิดนี้เป็นที่น่าสนใจและควรมีการศึกษาทดลองเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ซึ่งรวมถึงการสลายพลังงานและความเร็วทางด้านท้ายน้ำ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบ (horizontal stepped spillway) เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบเบื้องต้นในการก่อสร้างทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้พื้นที่ของอาคารชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาและทดลองแสดงดังรูปที่ 1 โดยบิ๊มจะสูบน้ำจากบ่อพักน้ำเข้าสู่ถังวัดอัตราไหล และไหลเข้าทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดโดยผ่านปากทางเข้ารางซึ่งทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลให้มีระดับผิวน้ำค่อนข้างราบเรียบ ถังวัดอัตราไหลมีฝายรูปตัววี (V-notched weir) ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าเพื่อทำหน้าที่วัดอัตราไหล โดยออกแบบตามเกณฑ์ที่เสนอโดย Bos [9] จากการสอบเทียบฝายวัดน้ำสามารถเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราไหลได้ดังนี้คือ $Q = 0.02 h_w^{2.42}$ เมื่อ Q คือ อัตราไหล (ลิตร/วินาที) และ h_w คือ ความสูงของระดับน้ำเหนือสันฝาย โดยวัดจากระดับต่ำสุดของปากฝายรูปตัววี (เซนติเมตร) ซึ่งอัตราไหลที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที

ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบที่ใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการไหลมี 3 รางซึ่งมีความลาดชัน 30° , 45° และ 60° และมีความสูง 1.50, 2.12 และ 2.60 เมตร ตามลำดับ แต่ละรางมีความกว้าง 0.40 เมตร ขั้นบันไดมีความสูงเป็นร้อยละ 5 ของความสูงราง และนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย โดยการนำกล่องตาข่ายซึ่งบรรจุหินไว้เต็มกล่อง (Gabions) มาวางบนขั้นบันได ในการทดลองครั้งนี้ใช้หิน 3 ชนิดคือ 1) หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 25-35 มิลลิเมตร (Gabion I) 2) หินที่มีผิวกลมมนขนาด 25-35 มิลลิเมตร (Gabion II) และ 3) หินที่มีผิวขรุขระมีขนาด 50-70 มิลลิเมตร (Gabion III) ซึ่งมีอัตราส่วนความพรุนเท่ากับ 0.27, 0.30 และ 0.39 ตามลำดับ

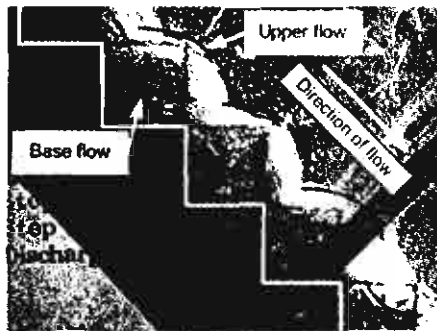


รูปที่ 1 ฟังการจัดวางอุปกรณ์การทดลอง (ชม.)

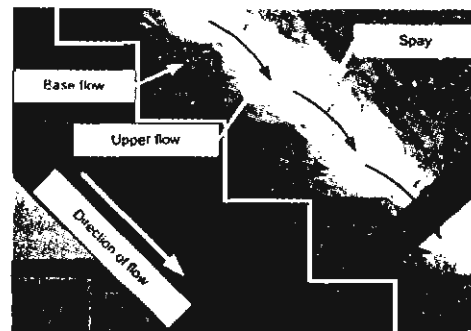
การวัดความเร็วได้ทำการวัดที่บริเวณด้านเหนือน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนที่น้ำไหลเข้าทางระบายน้ำล้นชั้นบันได และที่บริเวณท้ายน้ำ ณ ตำแหน่งที่น้ำออกจากทางระบายน้ำล้นชั้นบันได โดยทำการวัด 2 วิธี คือ 1) วัดความลึกของน้ำที่หน้าตัดการไหล และคำนวณความเร็วจากสมการ $v = \frac{Q}{Bd}$ และ 2) โดยใช้หลอดปิโตต และคำนวณความเร็วจากสมการ $v = c_v \sqrt{2gh_p}$ เมื่อ v คือ ความเร็ว (ม./วินาที) Q คือ อัตราไหล (ม.³/วินาที) B คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหล (ม.) d คือ ความลึกการไหล (ม.) c_v คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้ของเครื่องมือวัด (c_v เท่ากับ 0.98 [10]) g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²) และ h_p คือ ความสูงของน้ำในหลอดปิโตตเหนือระดับผิวน้ำ (ม.)

3. ลักษณะทางกายภาพของการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันได

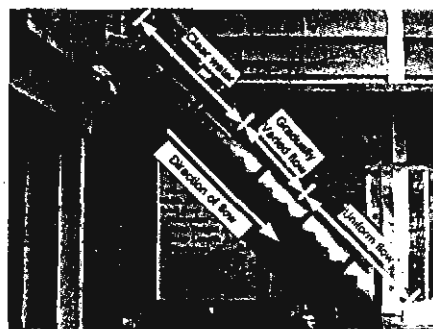
การไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบ เรียงตามลำดับค่าอัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe Transition และ Skimming flow ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย การไหลแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย (base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย (upper flow) ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) Nappe flow



(ข) Transition flow



(ค) Skimming flow

รูปที่ 2 ลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

(ก) Nappe flow (ข) Transition flow และ (ค) Skimming flow

สำหรับการไหลแบบ Nappe flow บนทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย น้ำจะเริ่มไหลผ่านกล่องตาข่าย จนถึงอัตราไหลค่าหนึ่งแล้วจึงเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบ Transition flow ในการไหลแบบ Nappe flow นี้ ปริมาณน้ำจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายและส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย ซึ่งส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายจะไหลในลักษณะเลียนขั้นบันไดผ่านช่องว่างระหว่างหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย ส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย กระแสน้ำจะไหลแบบผิวกล่องตาข่ายและมีการผสมของอากาศบริเวณผิวน้ำ เมื่ออัตราไหลมากขึ้นจะเริ่มเกิดน้ำกระโดดบนขั้นบันไดแล้วพัฒนาเข้าสู่ช่วง Transition flow ซึ่งพบว่าการไหลแบบ Transition flow บริเวณผิวน้ำ จะมีการผสมของน้ำและอากาศ เกิดเป็นละอองน้ำในปริมาณที่สูงมาก และไม่สามารถกำหนดรูปแบบการไหลได้แน่นอนเพราะเป็นช่วงที่การไหลแบบ Nappe flow เปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเข้าสู่การไหลแบบ Skimming flow

การไหลแบบ Skimming flow สามารถแบ่งการไหลได้ 3 ช่วงคือ 1) ช่วงน้ำไหลเข้าสู่ทางระบายน้ำล้น ซึ่งน้ำในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นน้ำใส (clear water) 2) ช่วงที่เป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปรที่ละน้อย (gradually varied flow) และ 3) ช่วงที่เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) การผสมของฟองอากาศจะเริ่มจากจุดที่เปลี่ยนจากช่วงน้ำใสที่มีปริมาณน้ำไหลเต็มพื้นที่ภาคตัดขวางของการไหลมาเป็นช่วงที่การไหลเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป จุด

ที่เริ่มเกิดการผสมของฟองอากาศนี้ เรียกว่า “Inception point” จากการที่การไหลแบบ Skimming flow จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราไหลสูงๆ ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายจึงมีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ไหลบนกล่องตาข่าย

สำหรับการแบ่งขอบเขตการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันได ได้มีผู้ทำการทดลองการไหลบนทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ [1], [3]-[4], [11]-[16] และได้เสนอสมการไว้หลายรูปแบบดังตารางที่ 1 ซึ่งส่วนใหญ่จะวิเคราะห์และนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง d_c/h กับ h/l เมื่อ d_c คือ ความลึกวิกฤติของการไหล (ม.) h คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.) และ l คือ ความยาวของชั้นบันได (ม.)

ในการทดลองครั้งนี้ได้เสนอกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d_c/h กับ h/l จากผลการทดลองในครั้งนี้รวมกับผลการศึกษาของผู้อื่นซึ่งเป็นทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าการแบ่งขอบเขตการไหลของทั้งทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบและทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย สามารถใช้เกณฑ์เดียวกันได้โดยขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow และขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\frac{d_c}{h} = 0.92 - 0.30 \left(\frac{h}{l} \right) - 0.07 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{d_c}{h} = 0.84 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.20} \quad (2)$$

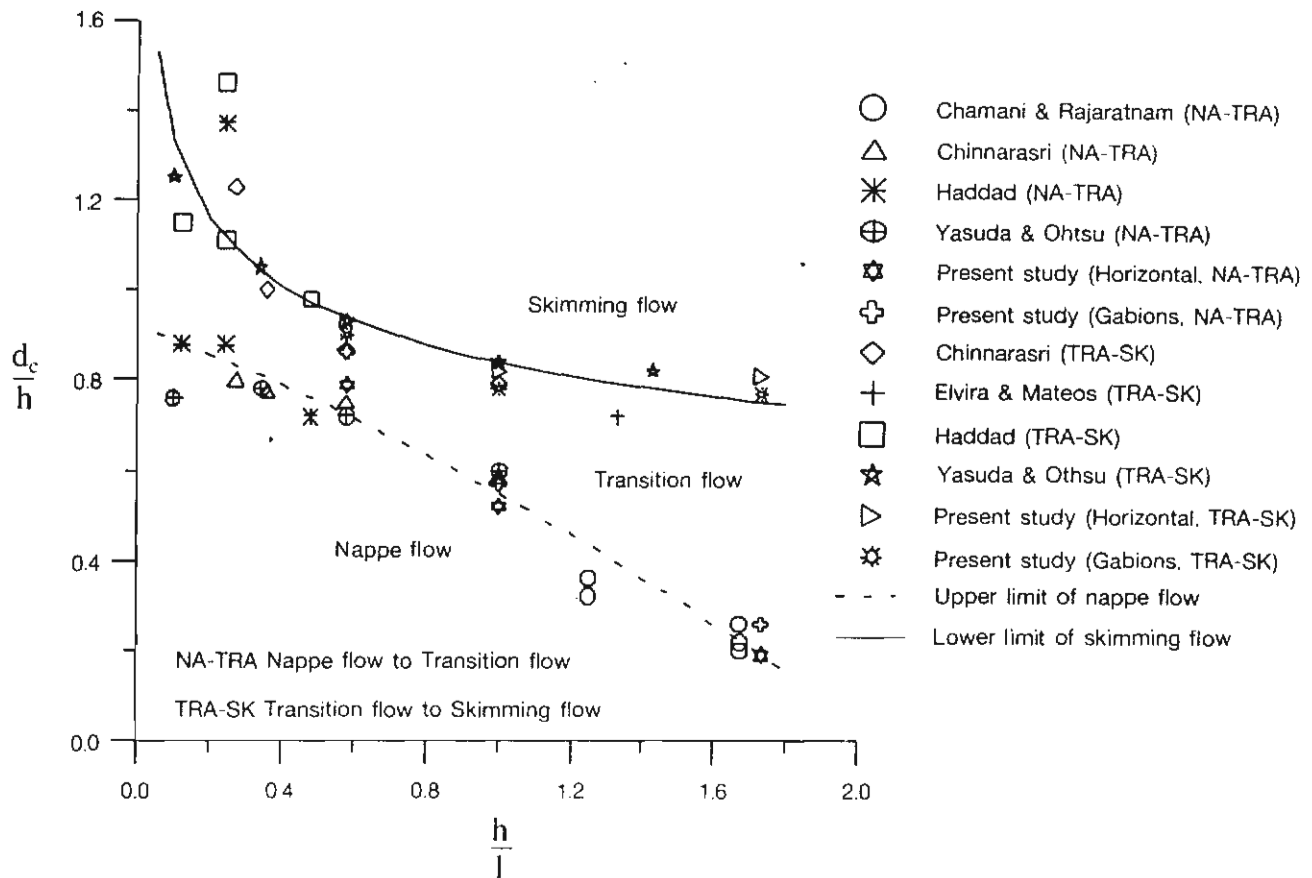
เมื่อ d_c คือ ความลึกวิกฤติของการไหล (ม.)

h คือ ความสูงของชั้นบันได (ม.)

l คือ ความยาวของชั้นบันได (ม.)

ตารางที่ 1 สมการเงื่อนไขการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันได

ผู้ศึกษา	สมการ	หมายเหตุ
• ขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow		
Chanson (1995) [11]	$\frac{d_c}{h} \leq 0.092 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.276}$	แบ่งภาวะการไหลแบบ Nappe flow ที่มีการกระโจนของน้ำ
Yasuda และ Ohtsu (1999) [12]	$\frac{d_c}{h} = \left(1.4 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}$	-
Chanson (2001) [3]	$\frac{d_c}{h} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h}{l}\right)$	$0.5 < h/l \leq 1.7$ ความแม่นยำ $\pm 10\%$
Chinnarasri (2002) [4]	$\frac{d_c}{h} = 0.80 (0.55)^{h/l}$	$0.4 < h/l \leq 5.0$
• ขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow		
Chanson (1994) [1]	$\frac{d_c}{h} = 1.057 - 0.465 \left(\frac{h}{l}\right)$	-
Mondardo และ Fabiani (1995) [13]	$\frac{d_c}{h} = 1.195 - 0.595 \left(\frac{h}{l}\right)$	สำหรับขั้นบันไดที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตหรือหิน
	$\frac{d_c}{h} = 0.781 - 0.177 \left(\frac{h}{l}\right)$	สำหรับขั้นบันไดที่ก่อสร้างด้วยกล่องตาข่าย
Chanson (1996) [14]	$\frac{(d_c)_{\text{onset}}}{h} = \frac{Fr_b^{2/3} \sqrt{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}}{\sqrt{1 + 2Fr_b^{2/3} \left(1 + \frac{1}{Fr_b^2}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{\cos \alpha_b}{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}\right)}}$	ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการไหลตกอิสระ เมื่อ Fr_b เป็น Froude number ที่มุมของขั้นบันได และ α_b เป็นมุมของการไหลผ่านมุมขั้นบันได (องศา)
James et al. (1999) [15]	$\frac{d_c}{h} = 0.541 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.07}$	$h/l \geq 0.3$
Yasuda และ Ohtsu (1999) [12]	$\frac{d_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.165}$	-
Tatewar และ Ingle (1996) [16]	$\frac{d_c}{h} = -0.120 \left(\frac{h}{l}\right) - 0.004 \theta + 0.888$	สำหรับขั้นบันไดแบบพื้นเอียง $0.4 < h/l \leq 0.85$ เมื่อ θ เป็นมุมเอียงของพื้นรางขั้นบันได
Chanson (2001) [3]	$\frac{d_c}{h} = 1.20 - 0.325 \left(\frac{h}{l}\right)$	$0.5 < h/l \leq 1.7$ ความแม่นยำ $\pm 10\%$
Chinnarasri (2002) [4]	$\frac{d_c}{h} = 0.80 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.22}$	$0.4 < h/l \leq 50$



รูปที่ 3 ขอบเขตการจำแนกประเภทของการไหลบนทางระบายน้ำล้นขั้นบันได

4. การสลายพลังงานและความเร็วทางด้านท้ายน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างการสลายพลังงานและความเร็วด้านท้ายน้ำกับตัวแปรที่สำคัญที่มีบทบาทต่อลักษณะการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย โดยได้ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติของ Buckingham- π สามารถสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญได้ดังนี้

$$\text{การสลายพลังงาน} : \frac{E_L}{H_T} = f_1 \left(\frac{q^2}{qH_T^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (3)$$

$$\text{ความเร็วทางด้านท้ายน้ำ} : \frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_1 \left(\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{D}{h}, \alpha \right) \quad (4)$$

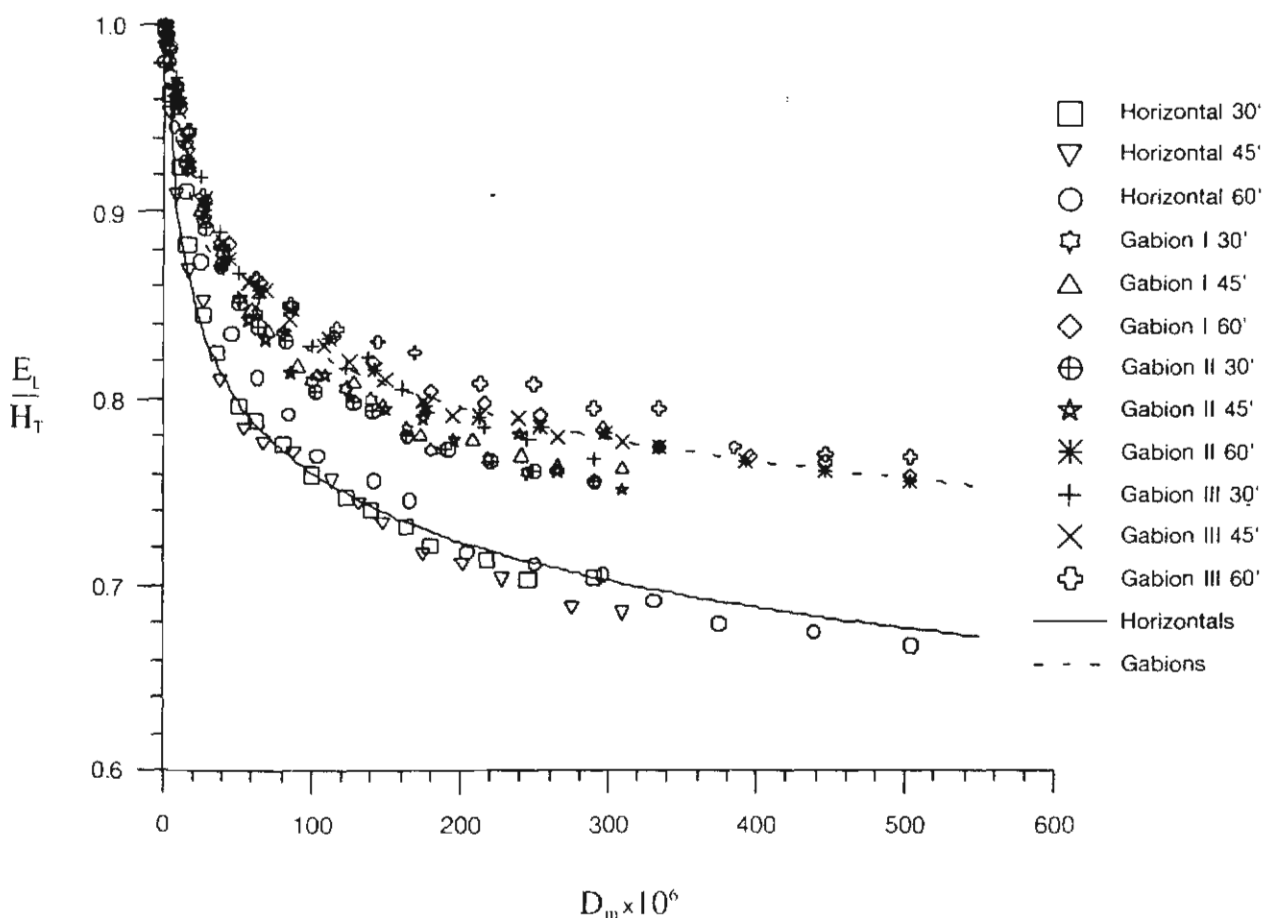
เมื่อ E_L คือ การสูญเสียพลังงาน (ม.) H_T คือ ความสูงทั้งหมดของทางระบายน้ำล้นขั้นบันได (ม.) q คือ อัตราไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที/ม.) V_T คือ ความเร็วทางด้านท้ายน้ำ (ม./วินาที) h คือ ความสูงของขั้นบันได (ม.) D คือ ขนาดของหิน (ม.) g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²) α คือ ความ

ลาดชันของทางระบายน้ำ $\frac{E_L}{H_T}$ คืออัตราส่วนการสลายพลังงานต่อความสูงรวมของทางระบายน้ำ $\frac{q^2}{gH_T^3}$ เรียก

ว่า Spillway drop number และ $\frac{D}{h}$ หมายถึงอัตราส่วนของขนาดหินต่อความสูงชั้นบันได

จากผลการศึกษาพบว่า อิทธิพลของความลาดเอียงของรางมีผลอย่างมากต่อการสลายพลังงานของการไหลบนทางระบายน้ำชั้นบันไดทั้งแบบพื้นราบและแบบกล่องตาข่าย โดยที่ค่า Spillway drop number เท่ากัน รางที่มีความลาดชันน้อยกว่าสามารถสลายพลังงานได้ในอัตราที่สูงกว่ารางที่มีความลาดชันมากกว่า และที่รางเดียวกัน การสูญเสียพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Spillway drop number ลดลง จากการที่ความลาดเอียงของรางมีอิทธิพลอย่างมากกับการสลายพลังงาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำค่า $(h/l)^2$ มาคูณเข้ากับ Spillway drop number แล้วเรียกใหม่ว่าเป็น Modified drop number ($D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$) ซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการสูญเสียพลังงานกับ Modified drop number ของทุกความชันของรางเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกัน

การเปรียบเทียบ การสูญเสียพลังงานในการไหลผ่านทางระบายน้ำชั้นบันไดแบบพื้นราบกับทางระบายน้ำชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสูญเสียพลังงานและ Modified drop number

จากผลการศึกษาพบว่า ในช่วงที่เป็นการไหลแบบ Nappe flow การสลายพลังงานจะเกิดขึ้นมากเนื่องจากมวลน้ำไหลลงมากกระทบกับชั้นบันไดและการเกิดกระโดดของน้ำในบางส่วนของชั้นบันไดสำหรับการไหลแบบ Skimming flow ซึ่งกระแสจะแตะสัมผัสกับปลายชั้นบันไดในช่วงเวลาสั้นๆ ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับปลายชั้นบันไดมีน้อย การสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาเกิดจากแรงเสียดทานของการไหล และการไหลวนของกระแสในช่องว่างระหว่างชั้นบันได

จะเห็นได้ว่าการสลายพลังงานของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย จะสลายพลังงานได้มากกว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบทุกค่าของ Modified drop number ($D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$) โดยมีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานมากกว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 10 จากการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ของการสลายพลังงาน กับค่า Modified drop number ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\text{สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ} \quad \frac{E_L}{H_T} = 0.392 D_M^{-0.072} \quad (5)$$

$$\text{สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย} \quad \frac{E_L}{H_T} = 0.502 D_M^{-0.054} \quad (6)$$

เนื่องจากการไหลในทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายการไหลจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลผ่านกล่องตาข่ายและส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย เมื่ออัตราไหลน้อยจะเป็นการไหลผ่านกล่องตาข่ายเกือบทั้งหมด จะเห็นได้ว่าพลังงานการไหลจะถูกสลายไปได้เกือบทั้งหมด โดยดูได้จากสัดส่วน E_L/H_T ที่เข้าใกล้ศูนย์ เมื่ออัตราไหลมากขึ้นจะพบการไหลส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่าย โดยปริมาณน้ำที่ไหลตกกระทบกับผิวบนกล่องตาข่ายจะถูกกล่องตาข่ายที่มีความพรุน (porosity) ช่วยในการดูดซับพลังงานอีกส่วนหนึ่งด้วย

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดหินที่บรรจุในกล่องตาข่าย พบว่าที่ทุกความลาดชันของราง หินผิวขรุขระขนาดใหญ่จะช่วยสลายพลังงานของการไหลได้ดีกว่าหินผิวขรุขระขนาดเล็กและหินผิวกลมมนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจากขนาดของหิน พบว่าหินที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าหินที่มีขนาดเล็กกว่าประมาณร้อยละ 2 ถึง 3 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหินขนาดใหญ่มีปริมาณช่องว่างระหว่างก้อนหินที่มากกว่า การไหลผ่านกล่องตาข่ายจึงมีปริมาณมากกว่า และจากเหตุผลที่ว่า การสลายพลังงานในส่วนของการไหลผ่านกล่องตาข่ายสามารถสลายพลังงานได้เกือบทั้งหมด สำหรับหินชนิดเดียวกันหินที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหินต่างชนิดกัน พบว่าหินที่มีผิวขรุขระ (crushed) สามารถสลายพลังงานได้มากกว่า หินที่มีผิวกลมมน (rounded) ประมาณร้อยละ 1 ถึง 2

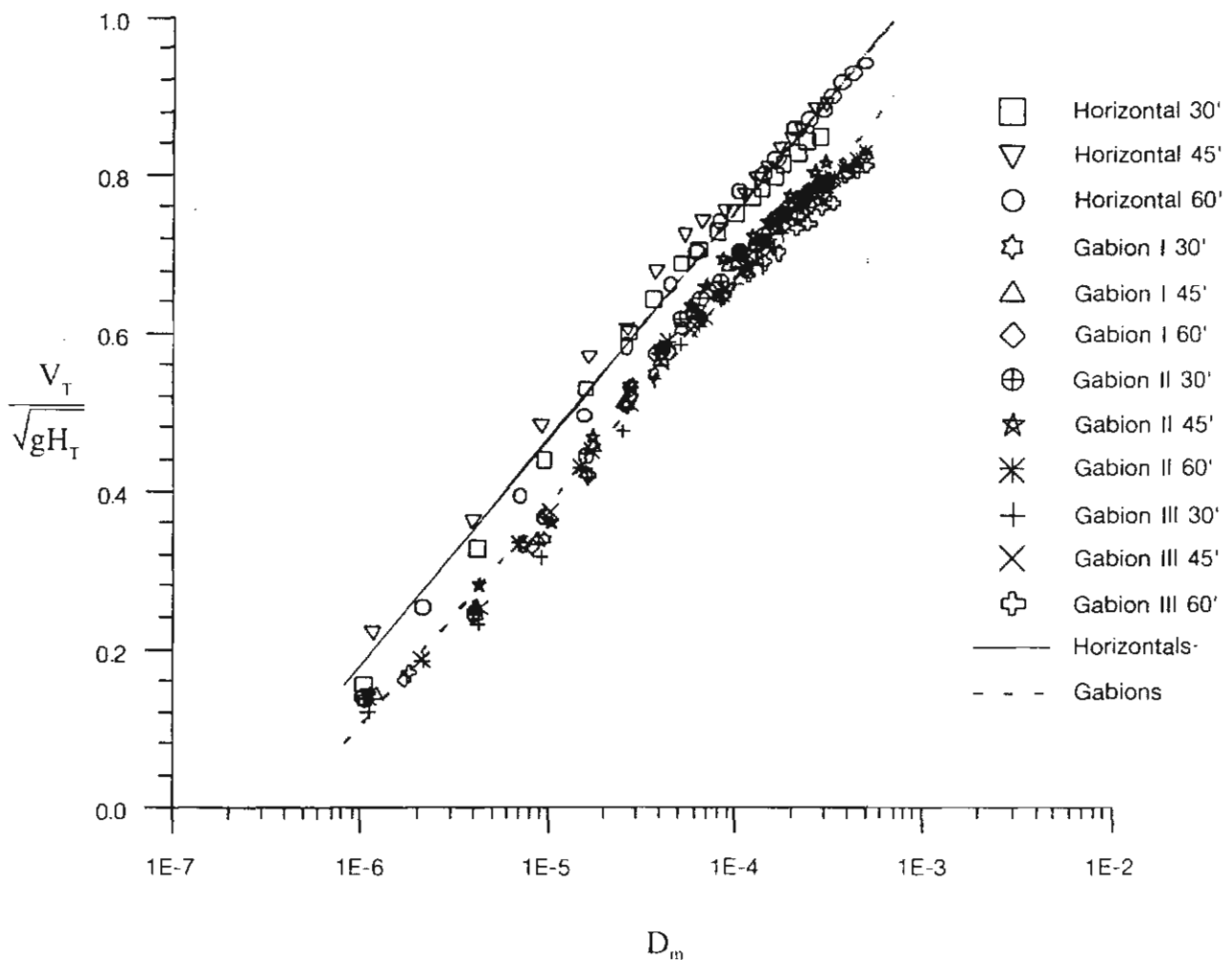
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดกับค่า Modified drop number (D_M) ของทุกลักษณะการไหลมีลักษณะเป็นเส้นตรงต่อเนื่อง ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายน้อยกว่าของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบทุกค่าของ Modified

drop number ซึ่งสอดคล้องกับการที่การสลายพลังงานในการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย มีมากกว่าการไหลผ่านทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ

จากการเปรียบเทียบระหว่างทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบกับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย พบว่าทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำลงได้ประมาณร้อยละ 14 ของทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ ซึ่งสามารถหาสมการตัวแทนได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบพื้นราบ
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = 0.124 \ln D_m + 1.901 \quad (7)$$

สำหรับทางระบายน้ำล้นชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย
$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = 0.121 \ln D_m + 1.777 \quad (8)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทางด้านท้ายน้ำและ Modified drop number

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า การไหลที่เกิดขึ้นบนทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ซึ่งการแบ่งขอบเขตของการไหลแสดงได้ด้วยตัวเลขอัตราส่วนของความลึกวิกฤตต่อความสูงขั้นบันได (d_c/h) โดยที่สมการแสดงขีดจำกัดบนของการไหลแบบ Nappe flow และขีดจำกัดล่างของการไหลแบบ Skimming flow แสดงไว้ดังสมการที่ 1 และ 2

การสลายพลังงาน (E_L/H_T) ของทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถสลายพลังงานได้มากกว่าทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบประมาณร้อยละ 10 โดยที่การสลายพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Modified drop number ($D_M = [(h/l)^2(q^2/gH_T^3)]$) ลดลง และที่ Modified drop number เท่ากัน ทางระบายน้ำล้นที่มีความลาดชันน้อยกว่าสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า ในขณะที่ความเร็วที่ปลายทางออกของทางระบายน้ำล้นขั้นบันได จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความลาดชันของรางเพิ่มมากขึ้น โดยที่ทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถลดความเร็ว ($V_T/(gH_T)^{0.5}$) ได้ประมาณร้อยละ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับทางระบายน้ำล้นขั้นบันไดแบบพื้นราบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Chanson, H., 1994, "Hydraulics of Skimming Flow over Stepped Channels and Spillways", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 32, No. 3, pp. 445-460.
2. อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา และ ชัยยุทธ ชินณะราศรี, 2535, "การสูญเสียพลังงานการไหลในรางขั้นบันได", *การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์*, 26-29 พฤศจิกายน, กรุงเทพฯ, หน้า 209-221.
3. Chanson, H., 2001, "Hydraulics Design of Stepped Spillway and Downstream Energy Dissipators", *Dam Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 205-242.
4. Chinnarasri, C., 2002, "Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on the Step Faces of Stepped Spillways", *Dam Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 303-321.
5. Frizell, K.H., 1992, "Hydraulics of Stepped Spillways for RCC Dams and Dam Rehabilitations", *Proceeding of the 3rd Specialty Conference on Roller Compacted Concrete*, ASCE, San Diego CA, pp. 423-439.

6. Sorensen, R.M., 1985, "Stepped Spillway Hydraulics Model Investigation", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 12, pp. 1461-1472.
7. Peyras, L., Royet, P., and Degoutte, G., 1992, "Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 5, pp. 707-717.
8. Stephenson, D., 1979, "Gabion Energy Dissipators", *Proceeding of the 13th ICOLD Congress*, New Delhi, Q. 50, R. 3, pp. 33-43.
9. Bos, M.G., 1976, "Discharge Measurement Structures", *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen, The Netherlands, pp. 23-32.
10. Linsley, R.K., 1992, *Water Resources Engineering*, McGraw-Hill, New York, pp. 361-364.
11. Chanson, H., 1995, *Hydraulics Design of Stepped Cascades, Channel, Weirs and Spillways*, Pergamon, Oxford, UK, 292 p.
12. Yasuda, Y. and Ohtsu, I., 1999, "Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels", *Proceedings of the 28th International Association for Hydraulic Research (IAHR)-Congress*, Graz, Austria.
13. Mandardo, J. M. and Fabiani, A.L., 1995, "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 33, No.1 pp.119-122.
14. Chanson, H., 1996, "Prediction of the Transition Nappe/Skimming Flow on a Stepped Channel", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 34, No. 3, pp. 421-429.
15. James, C.S., Comninou, M., and Palmer, M.W., 1999, "Effects of Slope and Step Size on the Hydraulics of Stepped Chutes", *Journal of South African Institute of Civil Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 1-6.
16. Tatewar, S.P. and Ingle, R.N., 1999, "Nappe Flow on Inclined Stepped Spillways", *Journal of Institute of Engineering, India*, Vol. 79, No. 2, pp. 175-179.
17. Haddad, A.A., 1998, *Water Flow over Stepped Spillway*, Master of Engineering Thesis, Polytechnic of Bari, Italy.
18. Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., 1999, "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 9, pp. 969-971.
19. Elviro, V. and Mateos, C., 1995, "Spanish Research into Stepped Spillways", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 2, No. 5, pp. 61-65.

ภาคผนวก ข5

สำเนาบทความเรื่อง Energy Dissipation on Stepped Spillways with End Sill,
The 4th Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil
Engineering (RSID4), Bangkok, Thailand, April 3-5, pp. B6-9-B6-16

ENERGY DISSIPATION ON STEPPED SPILLWAYS WITH END SILL

Chaiyuth Chinnarasri, Udomsak Israngkura, Thodsapol Chaturabul

Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE)

Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Bangmod, Bangkok 10140, THAILAND

E-mail: Chaiyuth.chi@kmutt.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the results of the experimental studies on the energy loss through the stepped spillways with end sill. The slopes of the spillways are 30° , 45° , and 60° , with total drop height 1.50, 2.12, and 2.60 m, respectively. The height of the end sill varies from 0 – 20% of the height of the step. As observed, the flow regime on a stepped spillway can be either a nappe flow or skimming flow regime. Nappe flow occurs at relatively small discharge whereas at larger discharge skimming flow is found. Based on dimensional analysis, the important parameters are analyzed and the relevant dimensionless parameters are formed. It is found that the energy loss is strongly influenced by the spillway drop number and the slope of the stepped spillways. As the spillway drop number increases the energy loss decreases. In addition, at the same spillway drop number the energy loss in the milder slope is greater than that in the steeper one.

KEYWORDS: Energy dissipation, stepped spillways, end sill

INTRODUCTION

Stepped spillway is an energy dissipator having profile made up of steps. These steps significantly increase the rate of energy dissipation of the flow on the spillway face. Therefore, the size of the energy dissipation basin at the spillway toe can greatly be reduced.

The first comprehensive work on stepped channels was made by Essery and Hornor (1978) and a numerous graphs useful for design were provided. A number of experimental studies on energy dissipation by stepped spillways were made (Sorensen, 1985, Rajaratnam, 1990, Diez-Cascon et al., 1991, Stephenson, 1991, Peyras et al., 1992, Christodoulou, 1993, Israngkura and Chinnarasri, 1994, and Pegram et al., 1999.)

For a given chute geometry, the flow pattern may be either nappe flow at low flow rates, transition for intermediate discharge or skimming flow at larger flow rates. In the nappe flow regime, the flow from each step hits the step below as a falling jet. The energy dissipation is caused by the impact of the nappe on the step surface and by the turbulence created by dispersal of the nappe. A comparative study of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes was made by Chanson (1994) and equations for estimating the energy loss of both nappe and skimming flow were introduced.

In the skimming flow regime, the water flow down the stepped face as a coherent stream skimming over the step lips and cushioned by the recirculating fluid trapped between them. Air entrainment generally occurs and enhances the flow turbulence. The energy dissipation appears to be resulted mainly from the momentum transfer from the air entrained stream to the recirculating fluid trapped underneath.

It was reported by Chinnarasri (2002) that the nappe flow would occur when

$$\frac{d_c}{h} \leq 0.98(0.55)^{\frac{h}{l}} \quad (1)$$

and the skimming flow would occur when

$$\frac{d_c}{h} \geq 0.80 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.22} \quad (2)$$

where d_c is the critical depth, h is the step height, and l is the step length. Generally, relative energy loss may be calculated based on the flow depths or flow velocities and it was not less than about 40%. This information may be applied to determine the proper dimensions of a stepped spillway and its energy dissipator to accommodate the design flow rate.

An experimental study on the energy dissipation comparison among the stepped channel, drop, and block ramp structures was reported by Peruginelli and Pagliara (2000). For the case of stepped channels different step types were used: plain steel steps, rough steps, and plain step with end sills of 0.025x0.025 m. The total drop height was 1.574 m with channel slope of 1V:2H. It was found that the presence of the end sill increases the energy dissipation process about 0 – 4 % for the case of nappe flow but the rate of energy dissipation of both nappe and skimming flow was not mentioned.

As the knowledge of how much the stepped spillway with end sill increases the energy dissipation is still limited, therefore, it is the objective of this study to investigate through experiments on the rate of energy dissipation of flow through the stepped spillways with varied height of end sill.

DIMENSIONAL ANALYSIS

In any flow regime, the energy loss through a stepped spillway E_L depends on the discharge per unit width of spillway q , the spillway drop height H_T , the step height h , the end sill height a , the slope of the spillway α , and the gravitation acceleration g . These variables are shown in Fig. 1. They could be expressed functionally as:

$$E_L = f_1[q, H_T, h, a, \alpha, g] \quad (3)$$

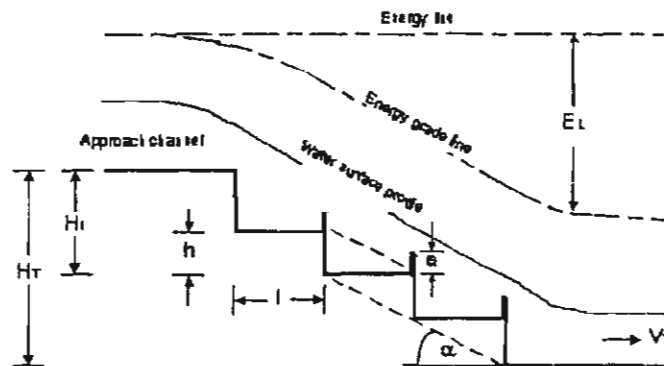


Fig. 1 Variables in dimensional analysis

Using Buckingham Pi theory, the variables in Equation (3) can be expressed in non-dimensional form as:

$$\frac{E_L}{H_T} = f_2 \left[\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{H_T}{h}, \frac{a}{h}, \alpha \right] \quad (4)$$

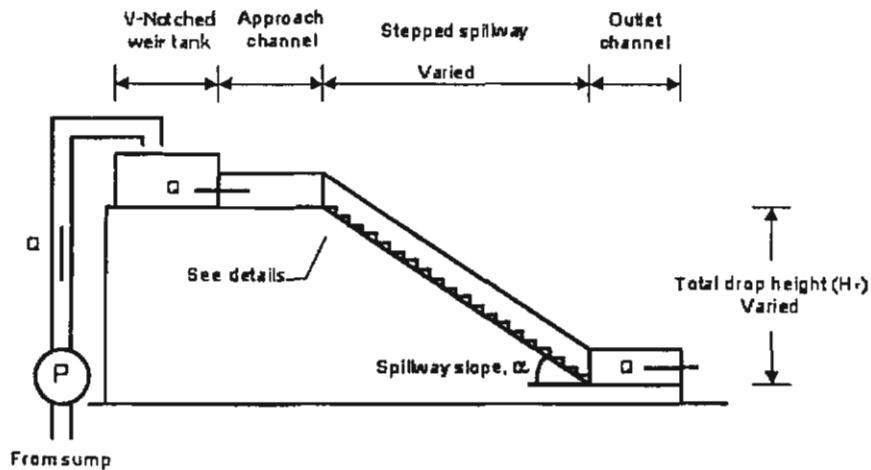
Similarly, the remaining kinetic energy at the spillway outlet can be expressed in dimensionless velocity ratio as:

$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_3 \left[\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{H_T}{h}, \frac{a}{h}, \alpha \right] \quad (5)$$

where V_T is the flow velocity at the spillway outlet. The dimensionless term $q^2/(gH_T^3)$ is named as "Spillway Drop Number", the ratio H_T/h is actually the number of steps in the spillway, and the ratio a/h is the relative height of end sill.

EXPERIMENTS

The experimental setup is as shown in Fig. 2. Water was pumped from a laboratory sump to the V-Notched weir tank from which water entered the stepped spillway through an approach channel. At the bottom of the stepped channel, a horizontal outlet conveyed the water back to the sump. The discharge, measured by the V-Notched weir tank, was varied from 4 – 68 l/s.



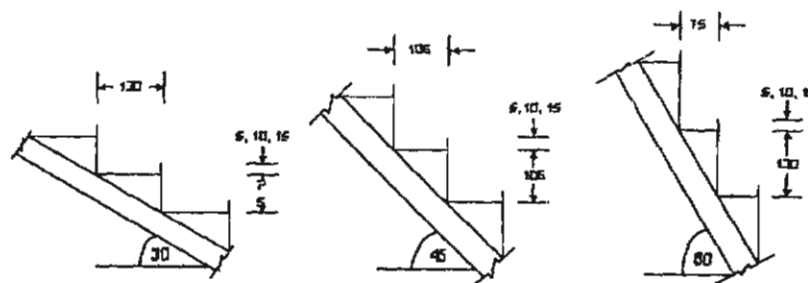


Fig. 3 Step dimension in millimeters

The measurements of depth and velocities in the spillway outlet were made at about 3-4 times of the step length away from the lowest step face where turbulence and air entrainment effect became less violent. The depths across the chute width were measured by a vernier-depth gauge. The velocities were measured by two methods, first by a pitot tube and second by dividing the flow rate by the measured flow area. The values obtained were within 10% differences. In calculating the energy loss the velocity obtained from the first method was used.

The depths in the chute were measured vertically from the step tips to the water surface by a vernier-depth gauge and by a scale attached on the side wall at each step. For conditions where skimming flow occurred, these depth included air entrainment effects. For nappe flow condition, the flow normally appeared as a free jet falling from upper step to hit on the adjacent lower step successively but at some locations the jet went far beyond the adjacent lower step. The depths as measured by this method thus indicated the upper nappe profiles or the apparent water surface profiles instead of the true depth of flow.

RESULTS AND DISCUSSION

The appearances of nappe flow (NF) and skimming flow (SF) in the experiments are as shown in Fig. 4. The relationships between the energy loss ratio E_L/H_T and the spillway drop number q^2/gH_T^3 at different spillway slope α and different end sill height ratios a/h are shown in Fig. 5.

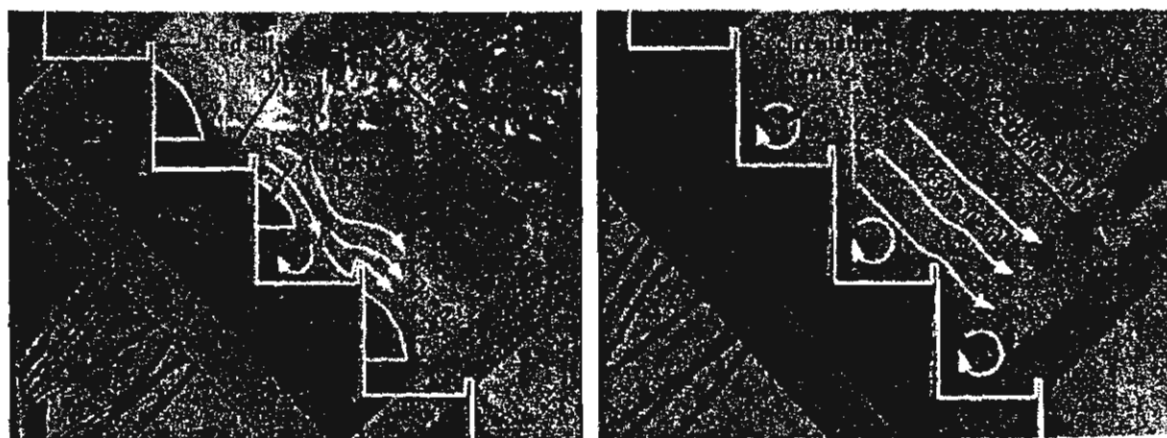


Fig.4 Nappe flow (left) and skimming flow (right) on stepped spillway with end sill

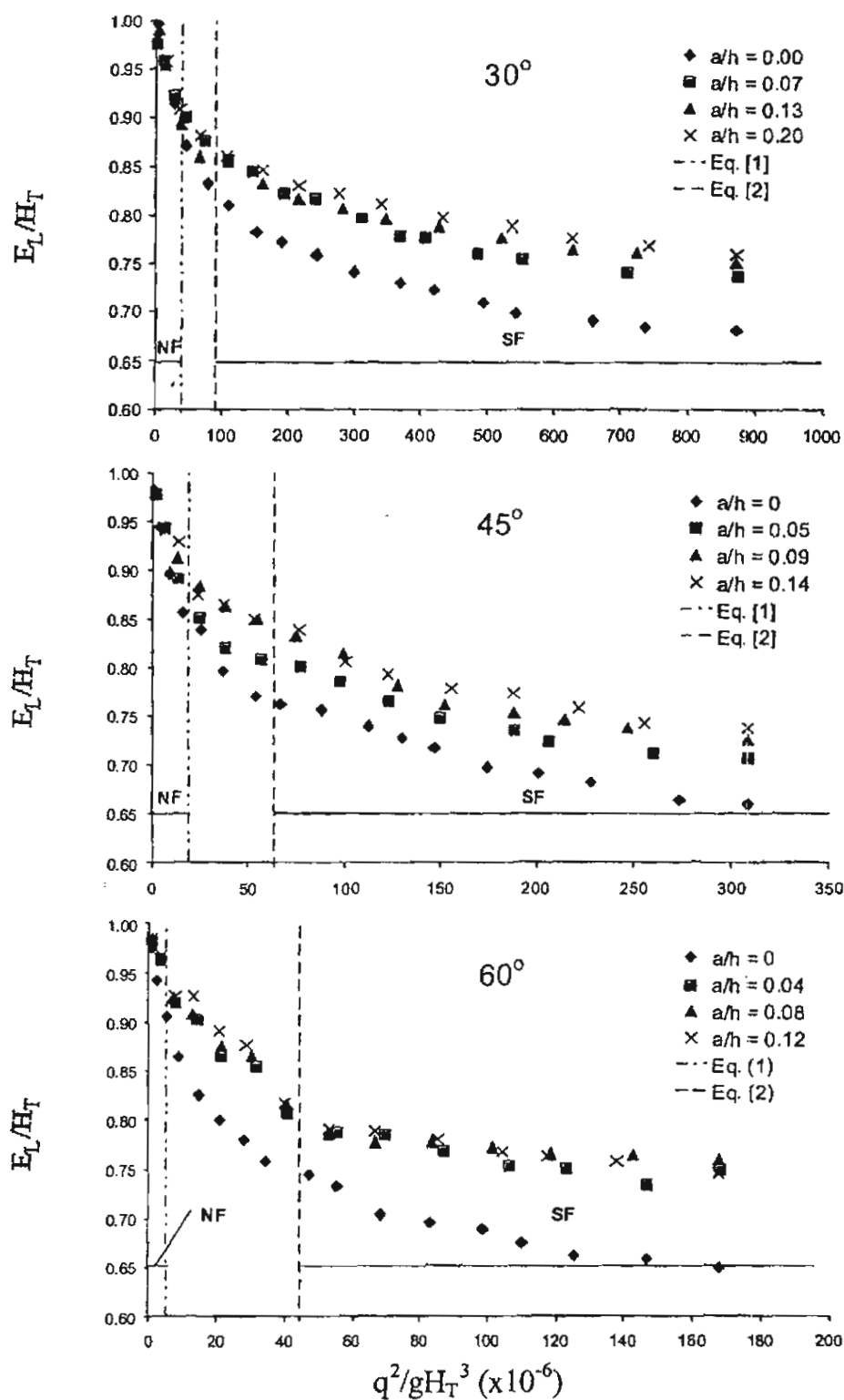


Fig. 5 Relationship between energy dissipation on stepped spillway with end sill and spillway drop number

It could be seen that in every case the energy loss ratio decreases as the spillway drop number increases. According to the criteria for nappe flow and skimming flow regimes on plain bed stepped spillways as proposed by Chinnarasri (2002), it could be observed that the variations of E_L/H_T with q^2/gH_T^3 in different flow regimes are distinctively different.

In the nappe flow regime where the spillway drop number is very low, E_L/H_T decreases rapidly as q^2/gH_T^3 increases and the ratio a/h has very little effects upon E_L/H_T especially for the spillway of milder slope. The presence of the end sill increases the energy dissipation less than 3 %. As most of the flow energy is dissipated due to jet breakup and jet mixing on the step and the formation of hydraulic jump on the step. However, it is observed that the appearance of end sill is not much influence to the characteristics of jet and hydraulic jump on the step.

In the skimming flow regime, E_L/H_T gradually decreases toward a constant value as q^2/gH_T^3 increases. In this regime the effect of a/h on E_L/H_T can evidently be observed that the higher a/h produced the greater E_L/H_T . The presence of the end sill increases the energy dissipation about 8 %. It is due to the fact that as a/h increases, the recirculation vortices are well trapped on the spillway steps. They are more stable than those in the smaller a/h ratio. More energy is therefore required to maintain these stable recirculation vortices.

As for the effect of spillway slope, it could be observed that at the same value of a/h and the same q^2/gH_T^3 , the milder slope spillway produced greater energy loss. At the highest q^2/gH_T^3 being observed which skimming flow was fully established, the value of E_L/H_T for $a/h = 0$ (no sill) to $a/h = 0.20$ for 30° slope varied from 0.67 to 0.76 while at 45° and 60° slopes this ratio varied from 0.66 to 0.74 and from 0.68 to 0.77 respectively.

The relationships between the kinetic energy at the spillway outlet $V_T/(gH_T)^{0.5}$ and the spillway drop number q^2/gH_T^3 are as shown in Fig. 6. The region of nappe flow and skimming flow regimes are presented based on the spillway drop number corresponding to Fig. 5. The kinetic energy ratio increases almost linearly with q^2/gH_T^3 and agrees reasonably well with the variation of E_L/H_T with q^2/gH_T^3 . As the energy loss decreases when q^2/gH_T^3 increases, the remaining kinetic energy at the spillway outlet increases.

In the nappe flow regime, the kinetic energy at the spillway outlet for all cases are small and they are almost the same because most of the flow energy are dissipated along the stepped spillway. In the skimming flow regime, the kinetic energy at the spillway outlet for the presence of the end sill is less than that for the plain stepped spillway because more flow energy is dissipated.

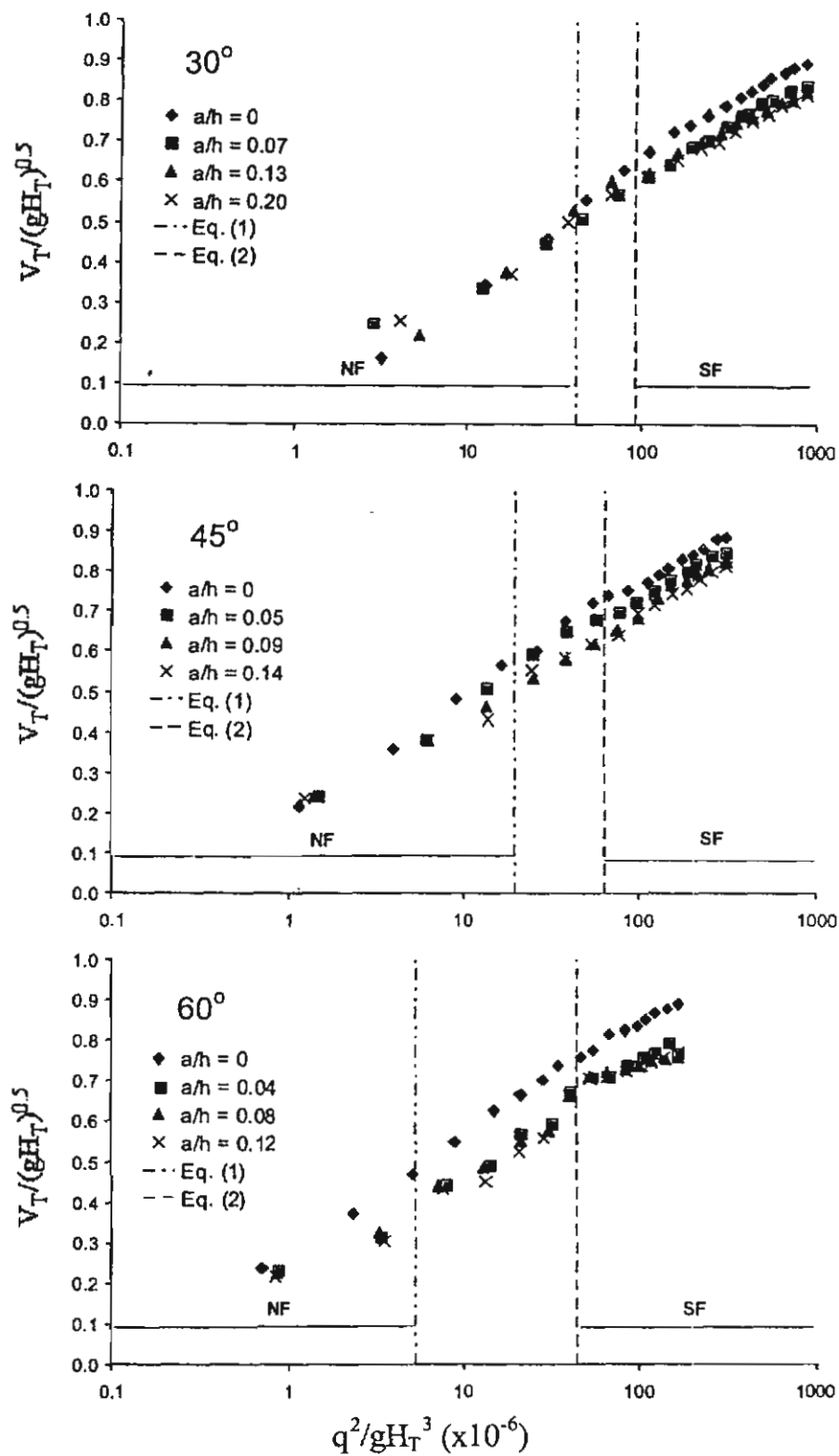


Fig. 6 Flow velocity at spillway outlet

CONCLUSIONS

The conclusions from this investigation can be made as follows:

- 1) Flow occurrences on stepped spillway with end sill, as well as the plain bed stepped spillway, can be categorized into two main flow regimes, i.e., the nappe flow and the skimming flow regimes.
- 2) Under the same flow conditions and the same step geometry, the stepped spillway with end sill could produce more energy loss than the plain bed one especially in the skimming flow regime. As the end sill height increases, the energy loss increases.
- 3) Stepped spillway with end sill which laid at a milder slope yields the energy loss greater than the steeper one.
- 4) The spillway drop number q^2/gHr^3 has a very strong influence on the energy loss. In the nappe flow regime, the energy loss decreases rapidly when drop number increases. However, this decreasing rate is less and approaches a constant value when the flow is in the skimming flow regime.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank King Mongkut's University of Technology Thonburi, Ministry of University Affairs, and Thailand Research Fund for providing partially financial support in the study. Valuable guidance and encouragement from Prof. Somchai Wongwises is appreciated.

REFERENCES

- Chanson, H. (1994) Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.32, No.2, pp.213-218.
- Chinnarasri, C. (2002) Assessing the flow resistance of skimming flow on the step faces of stepped spillways. *Dam Engineering*, Vol.12, No.4, pp.303-321.
- Christodoulou, G.C. (1993) Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.644-650.
- Diez-Cascon, J., Blanco, J.L., Revilla, J., and Garcia, R. (1991) Studies on the hydraulic behavior of stepped spillways. *Journal of Water Power and Dam Construction*, Vol.43, No.9, pp.22-26.
- Essery, I.T.S. and Hornor, M.W. (1978). The hydraulic design of stepped spillway. *CIRIA Report No. 33*, London, UK.
- Israngkura, U. and Chinnarasri, C. (1994) Flow depth and energy losses through stepped chutes. *Proceedings of the 9th Congress of Asian and Pacific Division of the IAHR*, Singapore, pp.156-163.
- Rajaratnam, N. (1990) Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.116, No.4, pp.587-691.
- Pegram, G.G.S., Officer, A.K., and Mottram, S.R. (1999) Hydraulics of skimming flow on modelled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.125, No.5, pp.500-510.
- Peruginelli, A. and Pagliara, S. (2000) Energy dissipation comparison among stepped channel, drop, and ramp structures. *Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, Switzerland, pp.111-118.
- Peyras, L., Royet, P., and Degoutte, G. (1992) Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.118, No.5, pp.707-717.
- Sorensen, R.M. (1985) Stepped spillway hydraulics model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.111, No.12, pp.1461-1472.
- Stephenson, D. (1991) Energy dissipation down stepped spillways. *Journal of Water Power and Dam Construction*, Vol.43, No.9, pp.27-30.

ภาคผนวก ข6

สำเนาบทความเรื่อง Energy Loss through Stepped Gabion Spillways, Regional Conference on energy Technology towards a Clean Environment, 12-14 February, Phuket, Thailand, pp. 436-441

Energy Loss through Stepped Gabion Spillways

C. Chinnarasri, U. Israngkura, and S. Donjadee

Water Resources Engineering Research Lab. (WAREE), Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

Abstract

This paper presents the results of the experimental studies on the energy loss through the stepped gabion spillways. The slopes of the gabion spillways are of 30°, 45°, and 60° with total drop heights 1.50, 2.12, and 2.60 m, respectively. Based on dimensional analysis, the important parameters are analyzed and the relevant dimensionless parameters are formed. It is found that the energy of flow is more dissipated in the stepped gabion spillways than in the plain stepped spillways. The energy loss is influenced by the spillway drop number, the slope of the stepped spillways, and the size of filled stones. At the same spillway drop number, the energy loss in the milder slope is greater than that in the steeper one.

Keywords: Energy loss, stepped spillways, gabion.

Introduction

Stepped spillway is a steep channel, which its floor is built up of a series of steps. Besides the ease of construction and maintenance, one of its advantages over the plain bed spillway is that more of the flow energy could be dissipate through it. As a result the flow leaves the stepped spillway at a lower velocity and a smaller size of energy dissipator could be used. The first comprehensive work on plain stepped channels was made by Essery and Hornor [1] and a numerous graphs useful for design were provided. A number of experimental studies on energy dissipation stepped spillways were made [2-8].

Recently, new construction materials e.g. gabions and design techniques have increased the interest in stepped chutes and spillways. Generally, gabions are used for building small retaining structures such as small gabion weirs, channel linings, and supporting parts of small earth dams.

Although a lot of research has been conducted on hydraulics of flow through stepped chutes and spillways, the hydraulics of flow through gabions has received less attention. Few research works on energy dissipation over stepped gabion structures was made by [9-10] and simple relationships of energy loss and drop number were provided. However, no comparison between plain stepped spillways and stepped gabion spillways was reported.

Therefore, the objective of the study is to conduct a new experimental test on the stepped gabion spillways in order to investigate the rate of energy dissipation of flow and to compare the energy loss between the plain stepped spillways and stepped gabion spillways.

Data Reduction

Gabions are hexagonal mesh boxes filled with small sizes of stones. Their advantages as construction materials are: 1) their stability, 2) low cost, 3) flexibility, and 4) porosity. The porosity of gabions is an important characteristic preventing the building up of uplift pressures.

When water flows over a gabion structure, the flowing water can be divided into two parts, i.e. base flow through the void between the filled stones and overflow on the gabion structure. The amount of base flow depends on the dimensions of gabions, the porosity, and the type of flow regime. Typically the step height equals the height of the gabion. The stone size of the rockfill is equal at least 1 to 1.5 times the mesh size but should not be larger than 2/3 of the minimum dimension of the gabion. With these dimensions, the flow pattern may be either nappe flow at low flow rates, transition for intermediate discharge or skimming flow at larger flow rates.

In any flow regime and by neglecting the effect of base flow, the energy loss through a stepped spillway E_L depends on the total discharge per unit width of spillway q , the spillway drop height H_T , the step or gabion height h , the stone diameter D , the slope of the spillway α , and the gravitation acceleration g . These variables are shown in Figure 1. They could be expressed functionally as:

$$E_L = f_1 [q, H_T, h, D, l, g] \quad (1)$$

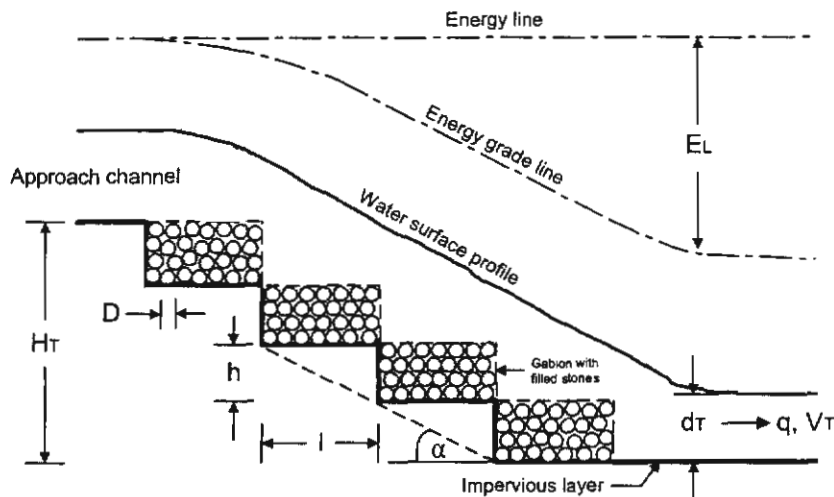


Figure 1. Variables in dimensional analysis

Using Buckingham Pi theory, the variables in Equation (1) can be expressed in non-dimensional form as:

$$\frac{E_L}{H_T} = f_2 \left[\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{H_T}{h}, \frac{D}{h}, \alpha \right] \quad (2)$$

in which α is the $\tan^{-1} (h/l)$

Similarly, the flow velocity at the spillway outlet V_T could be expressed as:

$$\frac{V_T}{\sqrt{gH_T}} = f_3 \left[\frac{q^2}{gH_T^3}, \frac{H_T}{h}, \frac{D}{h}, \alpha \right] \quad (3)$$

The dimensionless term $\frac{q^2}{gH_T^3}$ is named as “Spillway Drop Number”, the ratio $\frac{H_T}{h}$ is actually the number of steps in the spillway, and the ratio $\frac{D}{h}$ is the relative stone height.

Experiments

An outline of the experimental arrangement is shown in Figure 2. Water was pumped from a laboratory sump to the V-notched weir tank from which water entered the stepped spillway through an approach channel. At the bottom of the stepped channel, a horizontal outlet carried the water back to the sump. The discharge was measured by the V-notched weir tank. The discharge was varied from 4 – 68 l/s.

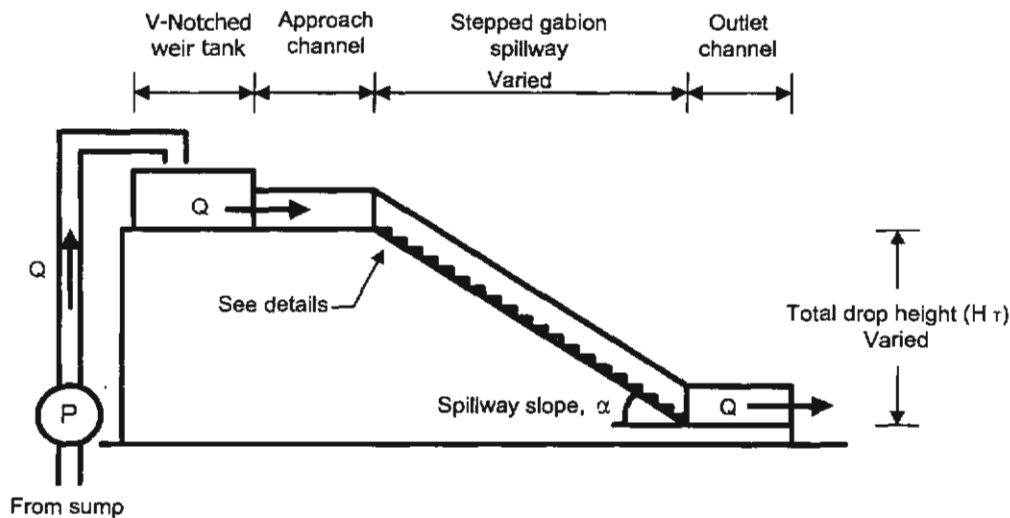


Figure 2. Experimental set-up

The stepped spillways are made of plexiglass having widths of 0.40 m and consist of 20 steps. The slope of the stepped channel, α , are 30°, 45°, and 60°. The total drop height of the stepped channel, H_T , are 1.5, 2.12, and 2.60, respectively. The dimensions of the step can be defined as h/l , where h is the step height and l is its horizontal length. Each step, gabion boxes filled with stones are placed on the step face. The volume of the gabion boxes are $(h) \times (l) \times (\text{spillway width})$.

To investigate the effect of filled stones, three types of stones are used, i.e. i) crushed stone of 25-35 mm diameter, ii) rounded stone of 25-35 mm diameter, and iii) crushed stone of 50-70 mm diameter. The average void ratios of gabions are 0.27, 0.30, and 0.39, respectively. Figure 3 shows gabion dimension.

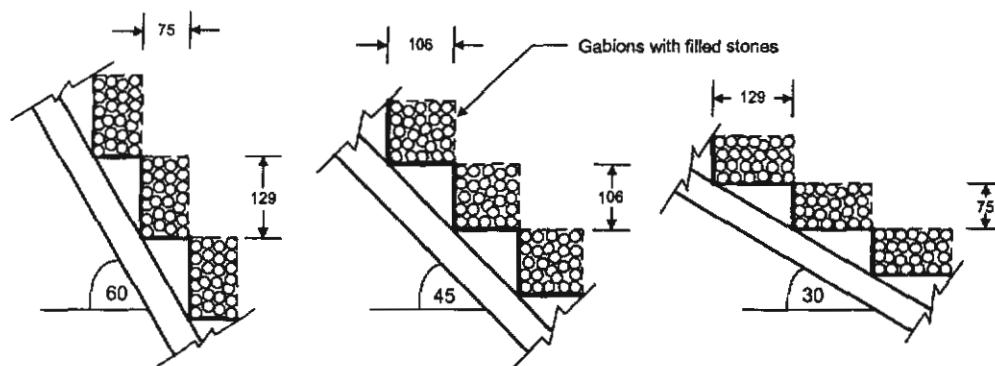


Figure 3. Gabion dimension in millimeters

The measurements of depth and velocities in the spillway outlet were measured at about 3-4 times of the step length away from the lowest step face where turbulence and air entrainment effect became less violent. The depths across the chute width were measured by a vernier-depth gauge. The velocities were measured by two methods, first by a pitot tube and second by dividing the measured flow area. The value obtained were within 10% differences. In calculating the energy loss the velocity obtained from the first method was used.

Results and Discussion

The relationships between measured energy loss on stepped gabion spillways and spillway drop number at various spillway slopes are shown in Figure 4. It is found that the energy of flow is more dissipated in the stepped gabion spillways than in the plain stepped spillways. As the water flows over the stepped gabion spillways, the water is divided into two parts, i.e. flow over gabion boxes and flow through the gabion boxes (base flow). In the base flow, the water can flow through the void between filled stones, which results in reduction of the impact of the mass of the water on the face of the spillway steps. Small unstable vortices behind stones are observed, while more energy is required due to the interference of wake and step face.

Generally, the energy loss ratios in the stepped gabion spillways are greater than those in the corresponding plain stepped spillways by 10% approximately for all spillway slopes.

For low flow, the nappe flow regime is observed while at high flow the skimming flow occurs. As spillway drop number approaches zero, the flow pattern is of nappe regime and the energy loss ratio approaches unity. Most of the flow energy is dissipated in the nappe flow regime because of jet breakup and jet mixing on the step and the formation of hydraulic jump on the step.

The energy loss ratio (E_L / H_T) varies inversely with the spillway drop number (q^2 / gH_T^3). The energy loss ratio decreases sharply at small value of the spillway drop number. The skimming flow pattern is observed as the spillway drop number increases further, the rate of decrease of energy loss ratio is reduced and shows the trend to approach a constant value.

For high flow, it is found that the flow energy is more dissipated in the spillway of milder slope than the steeper one at the same drop number. For spillway of milder slope, the step length (l) is longer than the step height (h) therefore the recirculating vortices can not fill the entire cavity between the step

edges and the wake from one edge interferes with the the next step. For steep slope, a stable recirculation in the cavities between adjacent steps is observed. The energy loss is due to the circulation of these vortices.

Within the range of this study, it is found that the flow energy could be more dissipated by the bigger stone size than by the smaller one. The crushed stone could dissipate more energy than the rounded one. The gabion filled with bigger stones has higher void ratio than the one filled with smaller stones. As some energy of flow is dissipated in the void in the gabion, therefore the higher void ratio, the higher rate of energy dissipation. However, the effect of stone size and shape seems to have little influence on the energy loss as compared with increasing effect of spillway slope.

The velocity ratio $(V_T / \sqrt{gH_T})$ increases directly with increasing spillway drop number for every slopes and every gabion type as shown in Figure 5. As compared with the plain stepped spillways, this ratio is smaller, which is the result of higher energy loss on the gabion.

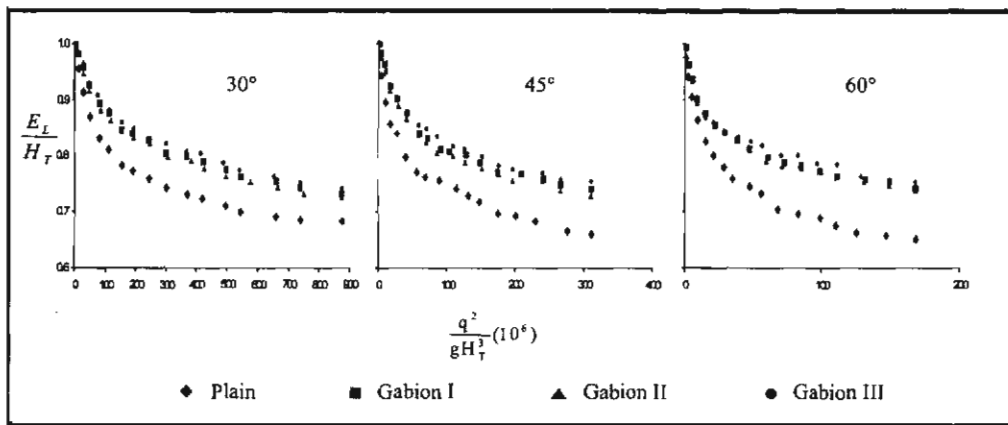


Figure 4. Relationship between energy dissipation on stepped gabion spillways and spillway drop number at various spillway slopes

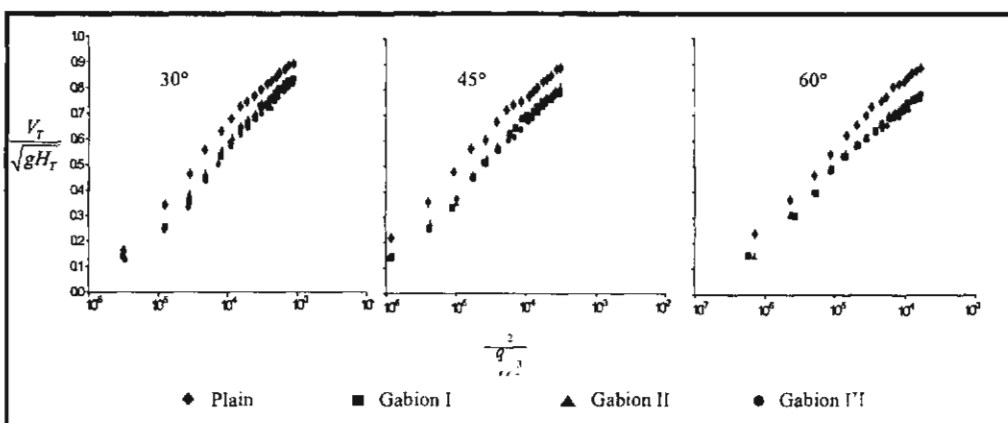


Figure 5. Flow Velocity at spillway outlet and spillway drop number at various spillway slopes

Conclusions

This paper presents the new experimental data to investigate the energy loss through stepped gabion spillways. From the study, the following conclusions are obtained:

1. Generally, the energy loss ratios in the stepped gabion spillways are greater than those in the corresponding plain stepped spillways by 10% approximately for all spillway slopes. As a result, the velocity at the outlet is less.
2. The size and shape of filled stone have small effects on the energy dissipation, within the range of investigation.
3. The other parameters, i.e. spillway slope and spillway drop number have been found to effect the energy dissipation in the same manner as found in the plain stepped spillways.

Acknowledgement

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF) for providing partially financial support in the study. Valuable guidance and encouragement from Prof. Somchai Wongwises is appreciated.

References

- [1] Essery I.T.S. and Hornor M.W. (1978) *CIRIA Report No. 33*, London, UK.
- [2] Sorensen R.M. (1985) *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111: 12, 1461-1472.
- [3] Rajaratnam N. (1990) *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116: 4, 587-691.
- [4] Diez-Cascon J., Blanco J.L., Revilla J., and Garcia R. (1991) *Journal of Water Power and Dam Construction*, 43: 9, 22-26.
- [5] Stephenson D. (1991) *Journal of Water Power and Dam Construction*, 43: 9, 27-30.
- [6] Christodoulou G.C. (1993) *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 119: 5, 644-650.
- [7] Israngkura U. and Chinnarasri C. (1994) *Proceedings of the 9th Congress of Asian and Pacific Division of the IAHR*, Singapore, 156-163.
- [8] Pegram G.G.S., Officer A.K., and Mottram S.R. (1999) *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125: 5, 500-510.
- [9] Stephenson D. (1979) *Q5R3, Proceedings of the 13th ICOLD Congress*, CIGB, Paris, France, 33-43.
- [10] Peyras L., Royet P., and Degoutte G. (1992) *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118: 5, 707-717.