

ความดันบนพื้นรางและความลึกของการไหลบนรางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

Pressure on Step and Flow Depth on Gabion Stepped Chutes

ชัยยุทธ ชินณะราศรี¹ สมชาย คอนเจดีย์^{1&2} และ อุดมศักดิ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา¹¹ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140²ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 71340Chaiyuth Chinnarasri¹, Somchai Donjadee^{1&2}, and Udonsak Israngkura¹¹Water Resour. Eng. Res. Lab. (WAREE), Dept. Civil Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140²Department 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 ข้อมูลจากผลศึกษานี้จะเป็นพื้นฐานในการวิจัยและออกแบบรางขั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายต่อไป

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

การลดความเร็วทางด้านท้ายน้ำจากการไหลของน้ำในระบบระบายน้ำบนพื้นที่ลาดชันสูงก่อนที่จะไหลเข้าสู่ลำน้ำธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาการกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้นกับลำน้ำธรรมชาติได้ ที่ผ่านมามีผู้ทำการทดลองและออกแบบอ่างสลายพลังงานเพื่อชะลอความเร็วของน้ำไว้หลายรูปแบบ [1] ซึ่งแต่ละรูปแบบเหมาะกับสถานที่และสภาวะการไหลแตกต่างกันออกไป แต่วัตถุประสงค์หลักที่เหมือนกันคือเพื่อลดขนาดของอ่างสลายพลังงานและความเร็วของน้ำที่ปลายรางอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก่อนที่จะปล่อยให้น้ำไหลออกสู่ลำน้ำธรรมชาติ

รางระบายน้ำขั้นบันไดเป็นโครงสร้างทางชลศาสตร์ที่สำคัญช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพลังงาน และลดความเร็วการไหลทางด้านท้ายน้ำ ทำให้อ่างสลายพลังงานเล็กลง 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 เช่นรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ซึ่งภายในบรรจุหิน เป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ทนทาน และราคาถูก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่ผ่านมา ([9], [10], [11]) เป็นการเน้นถึงประสิทธิภาพการสลายพลังงานและลักษณะการไหลเท่านั้น ยังขาดคุณสมบัติที่สำคัญที่จะใช้ประกอบในการออกแบบรางชั้นบันไดอยู่อีก

ดังนั้นการศึกษาลักษณะการไหลบนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายจึงจำเป็นต้องทำการวิจัยเพิ่มเติมให้มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อประโยชน์ในการออกแบบและนำไปใช้งาน งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึง รูปแบบการไหล ความดันบนพื้นรางชั้นบันได และความลึกของการไหลในรางชั้นบันได พร้อมทั้งเปรียบเทียบลักษณะการไหลดังกล่าวกับการไหลบนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ข้อมูลจากผลการศึกษาจะเป็นพื้นฐานในการวิจัยและออกแบบรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายต่อไป

2. วิธีการศึกษา

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

2.1 การวิเคราะห์มิติ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลผ่านรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ได้ใช้วิธีวิเคราะห์มิติของ Buckingham- π ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไหลแสดงดังรูปที่ 1 และสามารถสรุปตัวแปรไร้มิติที่สำคัญได้ดังนี้

ความดันบนพื้นรางชั้นบันได

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

ความลึกของการไหล

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

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_i คือ ความต่างระดับระหว่างปากทางเข้ารางกับพื้นชั้นบันไดที่กำลังพิจารณา (ม.)

d_i คือ ความลึกของการไหลในรางชั้นบันได (ม.)

D คือ ขนาดของหิน (ม.)

$P_{\max}$ คือ ความดันมากที่สุดบนชั้นบันได (นิวตัน/ม.²)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²)

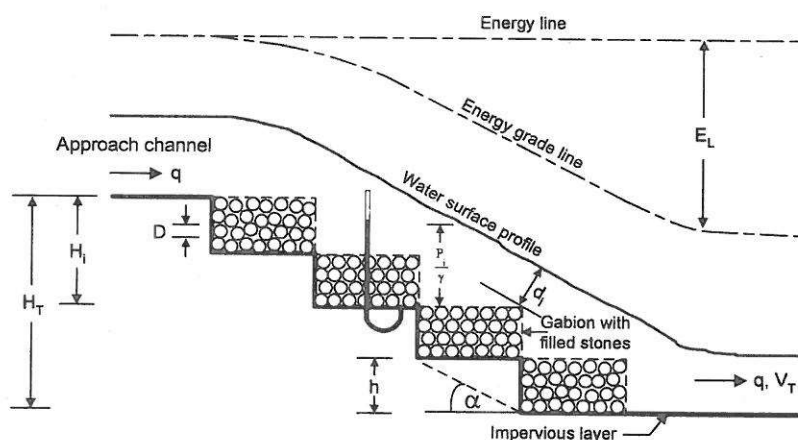
α คือ ความลาดเอียงของรางชั้นบันได

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (นิวตัน/ม.³)

จากการวิเคราะห์จะให้ความหมายของเทอมไร้มิติต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ $\frac{P_{i \max}}{\gamma H_i}$ หมายถึงสัดส่วนความดันที่น้ำกระทำต่อชั้นบันได

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

หมายถึงสัดส่วนของขนาดหิน และ $\frac{d_i}{\gamma H_i}$ หมายถึงสัดส่วนความลึกของการไหล



รูปที่ 1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลผ่านรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้พื้นที่บริเวณด้านหลังของอาคารชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยปั๊มสูบน้ำจากบ่อพักน้ำเข้าสู่ตัววัดอัตราการไหล และไหลเข้ารางชั้นบันไดโดยผ่านปากทางเข้ารางซึ่งทำหน้าที่ปรับสภาพการไหล ให้มีระดับผิวน้ำค่อนข้างราบเรียบ ถึงตัววัดอัตราการไหลมีฝายรูปตัววี (V-notched weir) ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าเพื่อทำหน้าที่วัดอัตราการไหล [12] จากการสอบเทียบฝายวัดน้ำสามารถเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการไหลได้ดังนี้คือ $Q = 0.02h_w^{2.42}$ เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (ลิตร/วินาที), h_w คือ ความสูงในหลอดวัดระดับน้ำโดยวัดจากระดับต่ำสุดของปากฝาย (ซม.) ซึ่งอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองมีค่าระหว่าง 4 ถึง 68 ลิตรต่อวินาที

รางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ที่ใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมของการไหลเปรียบเทียบกับรางกล่องตาข่าย มี 3 รางซึ่งมีความลาดเอียง 30° , 45° และ 60° และมีความสูง 1.50, 2.12 และ 2.60 เมตร ตามลำดับ แต่ละรางมีความกว้าง 0.40 ม. และมีจำนวนชั้นบันได 20 ชั้น รางเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ทำเป็นรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ด้วยการนำกล่องตาข่ายซึ่งบรรจุหินไว้เต็มกล่อง (Gabions) มาวางบนชั้นบันได 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 ทำการวัดที่บริเวณด้านเหนือน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนที่น้ำไหลเข้ารางชั้นบันได และที่บริเวณท้ายน้ำ ณ ตำแหน่งที่น้ำออกจากรางชั้นบันได 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 ทำการวัดที่ชั้นบันไดทั้งถูกตั้งและถูกนอน ส่วนการวัดความลึกได้ทำการวัดที่ผิวน้ำของรางที่ชั้นบันไดทุกชั้น บริเวณทางด้านเหนือน้ำ ณ ตำแหน่งก่อนที่น้ำเข้ารางชั้นบันได และบริเวณทางด้านท้ายน้ำ ณ ตำแหน่งที่น้ำออกจากรางชั้นบันได

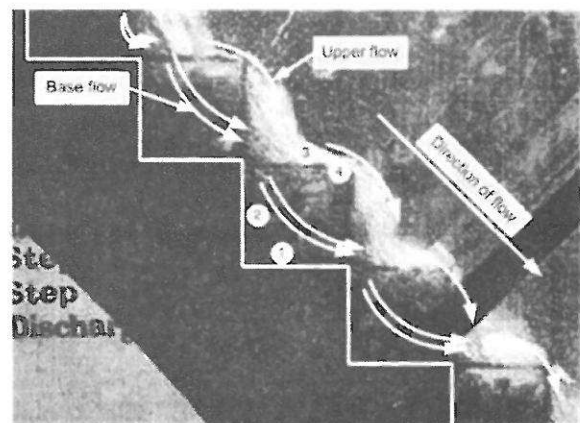
3. ผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอผลการทดลอง ออกเป็น 1) รูปแบบการไหลในรางชั้นบันได 2) ความดันบนพื้นรางชั้นบันได และ 3) ความลึกของการไหลบนรางชั้นบันได โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบการไหลในรางชั้นบันได

การไหลในรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบเรียงตามลำดับค่าอัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ แต่ในกรณีของรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย การไหลจะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย (Base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย (Upper flow) จากการที่การไหลได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนนี้เอง ทำให้พลังงานการไหลบนกล่องตาข่ายได้ถูกสลายไปมากกว่าการไหลบนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ

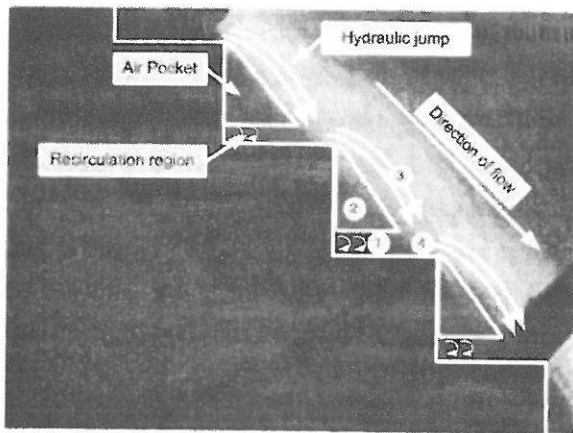
ในการไหลแบบ Nappe flow อัตราไหลบนรางน้อย การไหลทั้งหมดจะไหลผ่านกล่องตาข่ายจนกระทั่งเมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งการไหลจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ไหลผ่านหินที่บรรจุอยู่ในกล่องตาข่าย และส่วนที่ไหลบนผิวของกล่องตาข่าย ซึ่งจะมีการผสมของน้ำกับอากาศบริเวณผิวน้ำบ้าง และเมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าเกิดไฮโดรลิกจัมป์บนชั้นบันไดบางชั้นแต่ไม่รุนแรงมากเมื่อเทียบกับการเกิดไฮโดรลิกจัมป์บนชั้นบันไดแบบพื้นราบ จนกระทั่งเมื่ออัตราไหลเพิ่มสูงขึ้นอีกการไหลจะพัฒนารูปแบบการไหลเข้าสู่ช่วง Transition flow สำหรับตัวอย่างการไหลแบบ Nappe flow ของการไหลบนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายได้แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนตัวอย่างของการไหลบนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบแสดงดังรูปที่ 3 จากการสังเกตได้พบความแตกต่างของลักษณะการไหลแบบ Nappe flow บนรางชั้นบันไดทั้งสองชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 การไหลแบบ Nappe flow บนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย

สำหรับการไหลแบบ Transition flow และ Skimming flow บนรางชั้นบันไดแบบกล่องตาข่ายและแบบพื้นราบ พบว่ามีพฤติกรรมที่เหมือนกัน เนื่องจากการไหลที่ลอดผ่านกล่องตาข่ายมีปริมาณที่น้อยกว่าส่วนที่ไหลบนกล่องตาข่ายเป็นอย่างมาก พฤติกรรมการไหลจึงถูกควบคุมด้วยปริมาณน้ำที่ไหลบนชั้นบันได โดยการไหลบน

ชั้นบันไดที่ทำด้วยกล่องดาข่ายจะเปรียบเสมือนเป็นการไหลบนผิวขอบเขตที่มีความหยาบผิวมากกว่าการไหลบนชั้นบันไดแบบพื้นราบ



รูปที่ 3 การไหลแบบ Nappe flow บนรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะการไหลแบบ Nappe flow ของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบกับรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่าย

บริเวณที่	แบบพื้นราบ	แบบกล่องดาข่าย
1	เกิดการหมุนวนของน้ำ	ไม่เกิดการหมุนวนของน้ำ
2	มีโพรงอากาศ เกิดความคันติลล	ไม่มีโพรงอากาศ
3	เกิดการกระโดดของน้ำ เนื่องจากน้ำตกกระทบพื้นราบ	ไม่มีการกระโดดของน้ำ เนื่องจากช่องว่างระหว่างพื้นราง หินช่วยดูดซับพลังงานไว้
4	แรงดันที่ตกกระทบสูง	แรงดันที่เกิดขึ้นน้อย

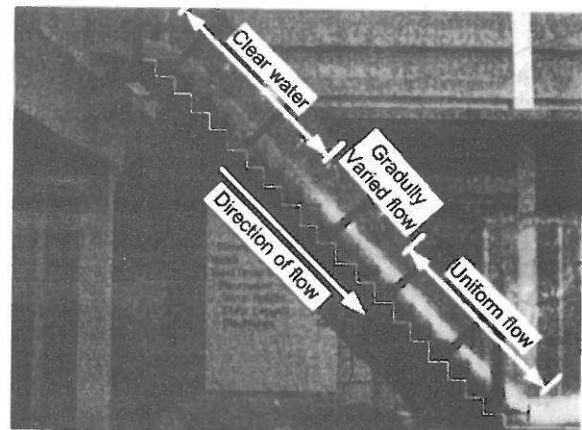
หมายเหตุ

1. การหมุนวนของน้ำ ความคันติลล และแรงกระแทกของน้ำมีผลทำให้พื้นรางถูกทำลายได้ง่าย
2. การกระโดดของน้ำส่งผลให้ต้องสร้างผนังด้านข้างของรางสูงขึ้น

โดยทั่วไปลักษณะการไหลแบบ Transition flow ซึ่งเป็นช่วงต่อระหว่างการไหลแบบ Nappe flow และ Skimming flow เป็นการผสมของผิวน้ำกับอากาศเป็นละอองน้ำในปริมาณที่สูงตลอดราง ส่วนการไหลแบบ Skimming flow พบว่าน้ำในบริเวณต้นรางจะมีลักษณะเป็นน้ำใส (clear water) จนถึงจุด Inception point ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการผสมของน้ำกับอากาศเพื่อเข้าสู่การไหลแบบเปลี่ยนแปรทีละน้อย (Gradually varied flow) และเข้าสู่ช่วงที่เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) ที่บริเวณส่วนกลางและส่วนปลายราง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณฟองอากาศของการไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่ายมีน้อยกว่าที่พบในรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ เมื่อพิจารณาถึง

การสลายพลังงาน พบว่า ในส่วนที่เป็น Upper flow การไหลเป็นการสัมผัสกับขอบของกล่องดาข่ายซึ่งมีความเสียดทานสูง ทำให้การสูญเสียพลังงานการไหลสูงกว่ากรณีของการไหลบนชั้นบันไดแบบพื้นราบ

ตัวอย่างของการไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดกล่องดาข่ายแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การไหลแบบ Skimming flow บนรางชั้นบันไดกล่องดาข่าย

จากการที่รางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่าย ช่วยสลายพลังงานการไหลได้สูงกว่ารางชั้นบันไดแบบพื้นราบ ดังนั้นความเร็วของการไหลที่ปลายทางออกของรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่าย จึงน้อยกว่ากรณีของการไหลออกจากรางชั้นบันไดแบบพื้นราบเสมอ

3.2 ความดันบนพื้นรางชั้นบันได

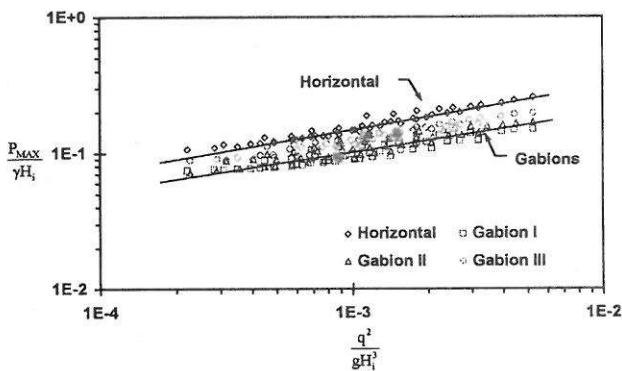
จากลักษณะการไหลของน้ำที่มาปะทะกับรางชั้นบันไดแต่ละขั้น ทำให้เกิดแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางชั้นบันได อาจส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างชั้นบันได ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูงสุดที่กระทำบนพื้นรางชั้นบันได กับ Drop number ของชั้นบันไดชั้นดังกล่าวซึ่งจะเรียกชื่อเป็น

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

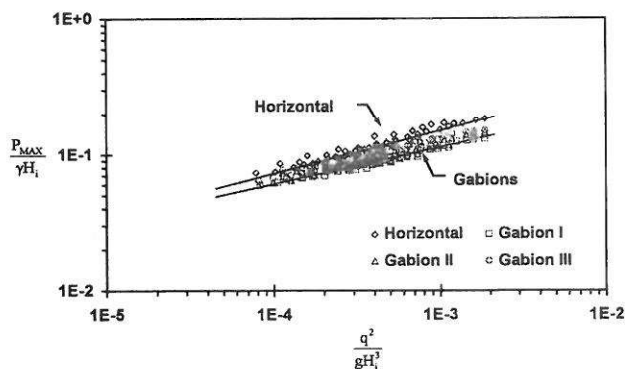
การเปรียบเทียบแรงดันที่การไหลกระทำกับรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่าย กับพื้นรางชั้นบันไดแบบพื้นราบแสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีความสัมพันธ์กับค่า Step drop number อย่างชัดเจน โดยเมื่อค่า Step drop number มากขึ้น ความดันบนพื้นรางชั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย และความดันที่การไหลกระทำกับพื้นรางของรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่ายจะน้อยกว่ารางพื้นราบทุกค่าของ Step drop number ทั้งนี้เนื่องจากรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่ายมีหินซึ่งบรรจุในกล่องดาข่ายช่วยในการรับแรงกระแทกก่อนที่แรงดันน้ำจะกระทำกับพื้นราง

จากการเปรียบเทียบรางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่ายและรางชั้นบันไดแบบพื้นราบ พบว่ารางชั้นบันไดแบบกล่องดาข่ายสามารถลด

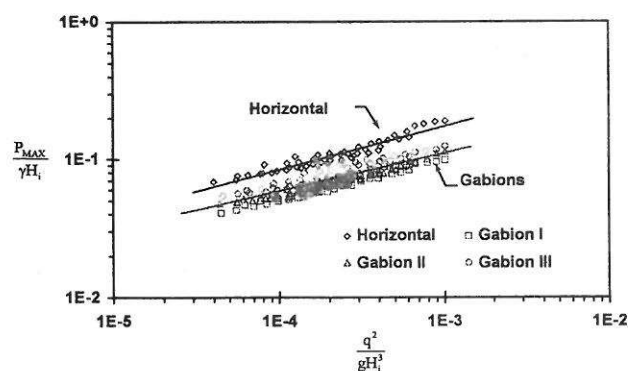
แรงดันน้ำลงได้ประมาณร้อยละ 27 ของแรงดันขึ้นบันไดแบบพื้นราบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นราบกับพื้นบันไดแบบกล่องตาข่ายที่ใช้ขนาดหินและความพรุนต่างกันพบว่า แรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นราบกับพื้นบันไดแบบกล่องตาข่ายที่มีความพรุนน้อยกว่าสามารถลดแรงดันน้ำได้มากกว่าแรงดันของกล่องตาข่ายที่มีความพรุนมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่ค่า Step drop number สูงๆ



a) ความลาดเอียงของราง 30°



b) ความลาดเอียงของราง 45°



c) ความลาดเอียงของราง 60°

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูงสุดบนขั้นบันได กับ 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 ความดันที่มากที่สุดของบันไดขั้นที่ i (นิวตัน/ตร.ม.)

H_i คือ ความสูงในแนวตั้งวัดจากทางเข้าถึงบันไดขั้นที่ i (ม.)

q คือ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที²)

m และ n คือ สัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (3)

α	รางขึ้นบันไดแบบพื้นราบ			รางขึ้นบันไดแบบกล่องตาข่าย		
	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

จากการที่กระแสน้ำที่ไหลบนกล่องตาข่าย มีความเร็วและแรงดันตกกระแทกสูง ส่งผลให้กล่องตาข่ายอาจชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้กล่องตาข่ายจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึง แนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความมั่นคงของขั้นบันไดแบบกล่องตาข่าย ซึ่งทำได้ด้วยการออกแบบกล่องตาข่ายให้มีการยึดติดแน่นระหว่างกล่องตาข่ายด้วยกันเอง การเรียงตัวของกล่องอาจทำได้ด้วยการวางตาข่ายซ้อนทับทั้งในแนวราบและแนวตั้งเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวจากแรงเสียดทานก็ได้ รวมถึงการยึดระหว่างกล่องตาข่ายกับสถานที่ก่อสร้าง ด้วยเหล็กหรือลวดที่มีปริมาณมากเพียงพอ

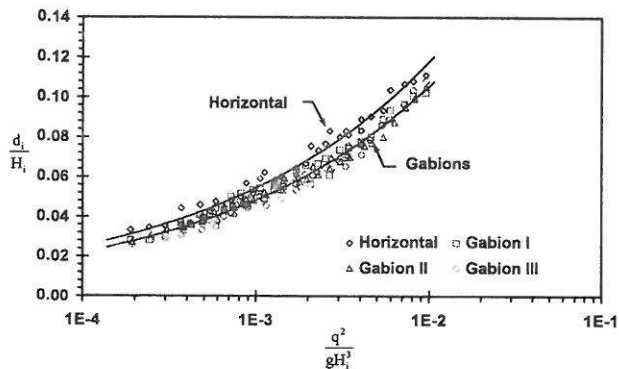
3.3 ความลึกของการไหลบนรางขึ้นบันได

ในการออกแบบความสูงของผนังรางขึ้นบันได จำเป็นต้องรู้ความลึกของการไหลรวมถึงฟองอากาศที่ปะปนกับการไหล จึงจะทำให้ผนังรางมีความสูงเพียงพอที่การไหลจะไม่กระเซ็นออกมา จากผลการทดลองพบว่าความลึกของการไหลบนขั้นบันได จะมีส่วนผสมของฟองอากาศปะปนอยู่ที่บริเวณผิวหน้าเป็นจำนวนมาก เมื่อพิจารณาความลึกของการไหลที่รวมกับฟองอากาศ ที่ความลาดเอียงเดียวกันและที่อัตราไหลเดียวกัน พบว่าความลึกของการไหลบนรางขึ้นบันไดแบบพื้นราบและแบบกล่องตาข่ายไม่ค่อยแตกต่างกันนัก

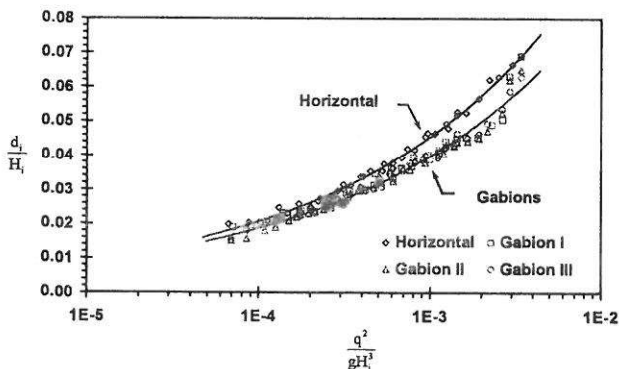
แต่เมื่อพิจารณาถึงความลึกของน้ำที่ไม่รวมส่วนที่มีการผสมของฟองอากาศ พบว่าความลึกในรางแบบกล่องตาข่ายมีแนวโน้มน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่กล่องตาข่ายได้ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหินได้

บางส่วน (Base flow) อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่เกินร้อยละ 10 ของความลึกการไหลรวม

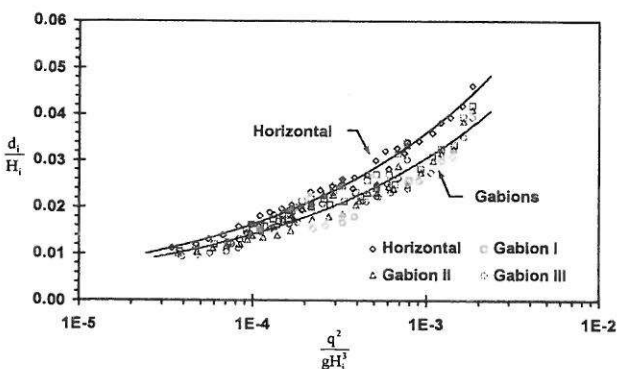
ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ไร้มิติ และค่า Step drop number ของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบ ก่อช่องตาข่าย แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยความลึกของการไหลแปรผันตามค่า อัตราไหล เมื่ออัตราไหลมากขึ้น ความลึกบนชั้นบันไดจะมากขึ้นด้วย



a) ความลาดเอียงของราง 30°



b) ความลาดเอียงของราง 45°



c) ความลาดเอียงของราง 60°

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกบนชั้นบันไดไร้มิติ กับ ค่า Step drop number

จากผลการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง d_i/H_i กับค่า Step drop number ของรางชั้นบันไดแบบพื้นราบและแบบก่อกองตาข่าย ได้ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ d_i คือ ความลึกการไหลของบันไดชั้นที่ i (ม.)
 H_i คือ ความสูงในแนวตั้งวัดจากทางเข้าถึงบันไดชั้นที่ i (ม.)
 q คือ อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง (ม.³/วินาที)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที)²
 p และ s คือ สัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (4)

α	รางชั้นบันไดแบบพื้นราบ			รางชั้นบันไดแบบก่อกองตาข่าย		
	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 รางชั้นบันไดแบบพื้นราบกับก่อกองตาข่าย พบว่ามีความหนาของฟอง อากาศใกล้เคียงกัน

4. สรุป

จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ว่า การไหลในรางชั้นบันได แบบก่อกองตาข่ายสามารถแบ่งช่วงการไหลได้ 3 แบบเรียงตามลำดับค่า อัตราไหลจากน้อยไปหามาก เช่นเดียวกับการไหลในรางชั้นบันไดแบบ พื้นราบ คือ การไหลแบบ Nappe flow, Transition flow และ Skimming flow ตามลำดับ แต่ในกรณีของรางชั้นบันไดแบบก่อกองตาข่าย การไหล จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลผ่านชั้นหินที่บรรจุอยู่ในก่อกองตา ข่าย (Base flow) และส่วนที่ไหลบนผิวของก่อกองตาข่าย (Upper flow) จากลักษณะการไหลและแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ช่วยสลายพลังงาน การไหลและลดความเร็วการไหลที่ออกจากรางได้ดังนี้

รางชั้นบันไดแบบก่อกองตาข่ายสามารถลดแรงดันที่น้ำกระทำ กับพื้นราง $P_{i \max}$ ได้ร้อยละ 27 เมื่อเปรียบเทียบกับรางชั้นบันไดแบบพื้น ราบ โดยแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นรางจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการไหล

หรือความลาดเอียงของรางเพิ่มมากขึ้น และแรงดันที่น้ำกระทำกับพื้นราง
ชั้นบนใดแบบกล่องตาข่ายที่มีความพรุนน้อยกว่าสามารถลดแรงดันน้ำ
ได้มากกว่าการฉีกของกล่องตาข่ายที่มีความพรุนมากกว่า โดยเฉพาะช่วงที่
ค่า Step drop number สูงๆ

การไหลบนชั้นบนใดพบว่ามีส่วนผสมของฟองอากาศปะปน
อยู่บริเวณผิวหน้าเป็นจำนวนมาก เมื่ออัตราไหลมากขึ้น ความลึกบน
ชั้นบนใดจะมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความลึกของน้ำที่ไม่รวมส่วนที่มีการ
ผสมของฟองอากาศ พบว่าความลึกในรางแบบกล่องตาข่ายมีแนวโน้ม
น้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่กล่องตาข่ายได้ยอมให้มีการไหลผ่านช่องหิน
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.