

ผลของมาตราส่วนของแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ต่อการเลือกหินทิ้งในทางน้ำเปิด



นายณัฐ อุนพงษ์สีมานนท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scale Effect of Hydraulic Physical Model in Open Channel Riprap Selection

Mr. Nat Hoonpongsimanon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering
Department of Water Resources Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของมาตราส่วนของแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ต่อการเลือกหินทิ้งในทางน้ำเปิด
โดย	นายณัฐ สุณพงษ์สิมานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทโรยธา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยพันธุ์ รักริฉัย)

ณัฐ ฮุนพงษ์สิมามานนท์ : ผลของมาตราส่วนของแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ต่อการเลือกหินทิ้ง
ในทางน้ำเปิด (Scale Effect of Hydraulic Physical Model in Open Channel Riprap Selection)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เสรี จันทโรยธา, หน้า.

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อหาผลจากการเลือกขนาดหินทิ้งที่ได้จากแบบจำลอง
กายภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา ผลของมาตราส่วน และการปรับแก้การเลือกขนาดหินทิ้ง ภายใต้การ
ใช้วัสดุหินที่คัดขนาดมา 4 ขนาด ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $1\frac{1}{2}$ และ 2 นิ้ว) ความลาดท้องน้ำ 3 ระดับ (2%, 5% และ 10%) คู่อัตรา
การไหลและการพัดพา 3 คู่ ทดลองในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้าง×ลึก = 0.60×0.75 ม.) ของ
ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมี
ระบบหมุนเวียนรักษาระดับน้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยทฤษฎีกฎความคล้ายคลึงกันในเกณฑ์ของ Froude รวมทั้งสิ้น
23 กรณี 66 ชุดข้อมูล

ผลการศึกษาด้านปัจจัยความสัมพันธ์หลักคือ ขนาดหินทิ้ง ความลาดท้องน้ำ และมุมทรงตัว กับอัตราการ
ไหลของน้ำที่สภาวะเริ่มเคลื่อนที่ของหินทิ้ง พบว่าปัจจัยขนาดหินแปรผันตรงอย่างคงที่กับอัตราการไหล ปัจจัยลาด
ท้องน้ำร่วมกับมุมทรงตัวแปรผกผันอย่างไม่คงที่กับอัตราการไหลแบบผลต่างลดลงเมื่อเพิ่มความลาดท้องน้ำ ผลของ
มาตราส่วนแบบจำลองตามเกณฑ์ของ Froude ให้ค่าต่ำกว่าทฤษฎีและการปรับแก้ที่แปรผันตรงอย่างไม่คงที่แบบ
ลดลงเมื่อใช้มาตราส่วนใกล้ 1:1 ในช่วง 1:8 ถึง 1:1 ดังนั้นการเลือกขนาดหินทิ้งเพื่อป้องกันการกัดเซาะในทางน้ำ
เปิดด้วยมาตราส่วนมิติจะให้ขนาดของหินทิ้งใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากเกณฑ์ของ Froude

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิติต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5470190821 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: PHYSICAL MODEL / HYDRAULIC / RIPRAP / OPEN CHANNEL / SCALE EFFECT

NAT HOONPONGSIMANON: Scale Effect of Hydraulic Physical Model in Open Channel Riprap Selection. ADVISOR: ASSOC. PROF. SEREE CHANYOTHA, Ph.D., pp.

This experimental study was aimed at determining the effects of riprap size selection obtained from physical hydraulic modelling. Four uniformly graded sizes of local riprap material (nominal size of ½, ¾, 1½ and 2 inch), 3 levels of bed slope (2%, 5% and 10%) and 3 pairs of water flow rate and sediment flow rate were used in this investigation. The experiments of 23 cases and 66 data sets were performed in a rectangular flume (Width × Depth = 0.60 × 0.75 m.) of Coastal and Hydraulic Model Laboratory, Department of Water Resources Engineering, Chulalongkorn University. The experiment data were analysed by Froude Law of similitude.

The analysis results showed that water discharge at the incipient riprap movement highly related to 3 major parameters consisting of riprap size, structure bed slope and angle of repose. The riprap size was found linearly proportional to the incipient flow rate. The bed slope and the angle of repose were found gradually proportional to the incipient flow rate. The riprap size obtained from modelling scaled by Froude Law of similitude was under-estimate and its calibration was gradually proportional to the scale ratio within a range of 1:8 to 1:1. Therefore, the riprap size selected from a physical hydraulic dimensional scaled model yielded a larger riprap size than from the Froude Law scaled.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Water Resources Engineering Student's Signature

Field of Study: Water Resources Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รวมเล่มได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งที่เริ่มต้นด้วยความสนใจส่วนตัวขณะทำรายงานประจำภาค ประกอบกับความสนับสนุนอย่างมากมาตั้งแต่อาจารย์ที่ปรึกษา คณาจารย์ภาควิชา เจ้าหน้าที่ รุ่นพี่ และรุ่นน้องของข้าพเจ้าในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่ง ที่ให้คำแนะนำ ให้หลักการ ชี้แนะแนวทาง ทั้งการเรียนและการทำงานของข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ ที่แนะนำให้ข้าพเจ้าได้รู้จักภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลา ให้คำแนะนำ ชี้จุดบกพร่อง และตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรม และช่วยเหลือข้าพเจ้ามาโดยตลอดแม้เกษียณราชการ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่มีมอบทุนอุดหนุนการวิจัยแก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ส่งเสริมและสนับสนุนการตัดสินใจที่ดีของข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ณัฐ อนุพงษ์สีมานนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาที่ผ่านมา	4
2.1 กฎความคล้ายคลึงกัน (Laws of Similitude).....	4
2.2 การเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ (Initiation of Sediment Bed Motion).....	8
2.3 การศึกษาที่ผ่านมา (Literature Review)	10
บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพและการทดลอง	11
3.1 แบบจำลองกายภาพของโครงสร้างหินทิ้งในทางน้ำเปิด.....	11
3.2 วัสดุหินทิ้ง.....	13
3.3 ขั้นตอนการทดลองและการบันทึกข้อมูล.....	14
3.4 สรุปข้อมูลการทดลอง	18
บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
4.1 การวิเคราะห์หาอัตราการไหลแรกเคลื่อน	39
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลแรกเคลื่อน.....	48
4.3 การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วน.....	54

บทที่ 5	สรุปผลการศึกษา	65
5.1	การอภิปรายและสรุปผลการศึกษา	65
5.2	ข้อเสนอแนะ	70
รายการอ้างอิง		71
	เอกสารอ้างอิงภาษาไทย	71
	เอกสารอ้างอิงภาษาต่างประเทศ	71
ภาคผนวก ก.	แบบจำลองศาสตร์ทางน้ำเปิด	73
ภาคผนวก ข.	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหินทิ้ง	81
ภาคผนวก ค.	ข้อมูลการทดลอง	87
ภาคผนวก ง.	การวิเคราะห์ความถดถอย	108
ภาคผนวก จ.	สัญลักษณ์และนิยามในวิทยานิพนธ์	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		113

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	เกณฑ์ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์	5
ตารางที่ 2-2	คุณลักษณะต่างๆ ตามเกณฑ์ของ Froude และ Reynolds ที่แปรตามมาตราส่วน	6
ตารางที่ 3-1	สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของหินทิ้ง	13
ตารางที่ 3-2	ตัวอย่างการบันทึกข้อมูล	17
ตารางที่ 3-3	จำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูล	18
ตารางที่ 3-4	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	20
ตารางที่ 3-5	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	21
ตารางที่ 3-6	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	22
ตารางที่ 3-7	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	25
ตารางที่ 3-8	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	26
ตารางที่ 3-9	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	27
ตารางที่ 3-10	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	30
ตารางที่ 3-11	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	30
ตารางที่ 3-12	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	31
ตารางที่ 3-13	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	34
ตารางที่ 3-14	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	34
ตารางที่ 3-15	สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	35
ตารางที่ 4-1	จำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์	39
ตารางที่ 4-2	สมการการพัดพาวัสดุท้องน้ำ	44
ตารางที่ 4-3	การวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยลำดับและอนุกรม	46
ตารางที่ 4-4	สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง	49
ตารางที่ 4-5	สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ	51
ตารางที่ 4-6	สมการความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาร่วมกัน	53
ตารางที่ 4-7	ข้อมูลปัจจัยและอัตราการไหลแรกเคลื่อนจากแหล่งอ้างอิง	54
ตารางที่ 4-8	สรุปข้อมูลของการศึกษานี้รวมกับการศึกษาที่ผ่านมา	55
ตารางที่ 4-9	ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 2%	56
ตารางที่ 4-10	ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 5%	57
ตารางที่ 4-11	ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 10%	57
ตารางที่ 4-12	ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 20%	58
ตารางที่ 4-13	สมการความสัมพันธ์ของการย่อ/ขยายขนาดหิน	60
ตารางที่ 4-14	สมการความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลัง	63

สารบัญตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ตำแหน่งมาตรฐานระดับน้ำของรางน้ำ	75
ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ข้อมูลและผลการสอบเทียบความลาดชัน	79
ตารางภาคผนวกที่ ก-3 ข้อมูลการสอบเทียบอัตราการไหล	80
ตารางภาคผนวกที่ ข-1 ข้อมูลและการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะแต่ละลักษณะของหินทิ้ง	84
ตารางภาคผนวกที่ ข-2 ข้อมูลและค่าเฉลี่ย	86
ตารางภาคผนวกที่ ค-1 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	88
ตารางภาคผนวกที่ ค-2 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	90
ตารางภาคผนวกที่ ค-3 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	92
ตารางภาคผนวกที่ ค-4 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	94
ตารางภาคผนวกที่ ค-5 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	96
ตารางภาคผนวกที่ ค-6 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	98
ตารางภาคผนวกที่ ค-7 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	100
ตารางภาคผนวกที่ ค-8 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	100
ตารางภาคผนวกที่ ค-9 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	102
ตารางภาคผนวกที่ ค-10 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	104
ตารางภาคผนวกที่ ค-11 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	104
ตารางภาคผนวกที่ ค-12 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	106

สารบัญรูป

รูปที่ 1-1 การศึกษาฝายหนองสลิก	1
รูปที่ 2-1 ตัวอย่างมาตราส่วนมิติเรขาคณิตทั้งสองแบบ	4
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างผลของมาตราส่วนในการศึกษาทางน้ำล้นของเขื่อน Gebidem ประเทศสวีตเซอร์แลนด์	7
รูปที่ 2-3 ฝังความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การไหลกับเลขเรโนลด์ของอนุภาคที่ขนาดสม้าเสมอของ Shield	9
รูปที่ 3-1 การออกแบบการทดลองของ Abt, Thornton et al (2008)	11
รูปที่ 3-2 รางน้ำเปิดของห้องปฏิบัติการ	11
รูปที่ 3-3 ฝังการติดตั้งแบบจำลอง	12
รูปที่ 3-4 ตัวอย่างการติดตั้งแบบจำลองจริงที่ลาดท้องน้ำ 5%	13
รูปที่ 3-5 ช่วงเตรียมการ	15
รูปที่ 3-6 ช่วงทดลอง	15
รูปที่ 3-7 ช่วงหลังการทดลอง	15
รูปที่ 3-8 ฝังขั้นตอนการทดลอง	16
รูปที่ 3-9 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	23
รูปที่ 3-10 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	23
รูปที่ 3-11 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	24
รูปที่ 3-12 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	28
รูปที่ 3-13 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	28
รูปที่ 3-14 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	29
รูปที่ 3-15 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	32
รูปที่ 3-16 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	32
รูปที่ 3-17 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	33
รูปที่ 3-18 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%	36
รูปที่ 3-19 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%	36
รูปที่ 3-20 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%	37
รูปที่ 3-21 กราฟข้อมูลการทดลองในฝังของ Shield	38
รูปที่ 4-1 ข้อมูลวิเคราะห์ในฝังของ Shield	40
รูปที่ 4-2 ผลการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยการลองผิดลองถูก	41
รูปที่ 4-3 ผลการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนในกราฟมาตราต่างๆ	42
รูปที่ 4-4 การหาอัตราการไหลแรกเคลื่อน	43
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 2%	44
รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 5%	45
รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 10%	45

รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง	47
รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ	47
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์กับขนาดหินทิ้ง	48
รูปที่ 4-11 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง	49
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์กับความลาดท้องน้ำ	50
รูปที่ 4-13 การหาความสัมพันธ์กับความลาดชัน	51
รูปที่ 4-14 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ	52
รูปที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนมิติและมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude	58
รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนย่อเชิงมิติและมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude	59
รูปที่ 4-17 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหินที่ความลาดท้องน้ำต่างๆ	60
รูปที่ 4-18 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหินที่ความลาดท้องน้ำต่างๆ ในมาตรา log-log	61
รูปที่ 4-19 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหิน	62
รูปที่ 4-20 กราฟความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลัง	63
รูปที่ 5-1 ผลการวิเคราะห์ความถดถอย	66
รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้งและลาดท้องน้ำ	67
รูปที่ 5-3 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบแยกปัจจัย	68
รูปที่ 5-4 กราฟความสัมพันธ์ของมาตราส่วนหินทิ้งระหว่างผลทดลองจริงกับผลทางทฤษฎี	69

สารบัญรูปภาคผนวก

รูปภาคผนวกที่ ก-1 ผังโดยสังเขปของแบบจำลองชลศาสตร์ทางน้ำเปิด	76
รูปภาคผนวกที่ ก-2 ผังโดยสังเขปของตำแหน่งมาตรวัดระดับน้ำของรางน้ำ	76
รูปภาคผนวกที่ ก-3 อุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการ	77
รูปภาคผนวกที่ ก-4 มาตรวัดความลาดชันที่มี	78
รูปภาคผนวกที่ ก-5 การวัดเพื่อสอบเทียบความลาดชัน	78
รูปภาคผนวกที่ ก-6 ผลการสอบเทียบความลาดชัน	79
รูปภาคผนวกที่ ก-7 ผลการสอบเทียบอัตราการไหล	80
รูปภาคผนวกที่ ข-1 หินทิ้งขนาดต่างๆ	82
รูปภาคผนวกที่ ข-2 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของหินทิ้ง	83
รูปภาคผนวกที่ ข-3 การวัดมุมทรงตัวด้วยรางปรับความลาดชัน	85

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ (physical hydraulic model) เป็นเครื่องมือที่ดีเมื่อต้องการหาคำตอบของปัญหาทางชลศาสตร์อันซับซ้อน (Webb et al., 2010) ที่แบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematical model) ไม่สามารถให้คำตอบได้ดีพอ โดยเฉพาะโครงสร้างชลศาสตร์ขนาดใหญ่หรือส่งผลกระทบต่อในเชิงวิศวกรรมเป็นวงกว้าง เช่น เขื่อน (dam) ฝาย (weir) ตอม่อสะพาน (bridges' pier) ประตูน้ำ (sluice gate) เป็นต้น

ในประเทศไทยมีการใช้แบบจำลองนี้เพื่อศึกษาปัญหาของตัวต้นแบบ (prototype) ของอาคารชลศาสตร์ (hydraulic structure) อยู่บ้าง โดยมาจากการวิจัยของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมชลประทาน ตัวอย่างกรณี 'การศึกษาแบบจำลองชลศาสตร์ฝายหนองสลัก กรณีศึกษาการปรับปรุงอาคารสลายพลังงานด้านท้ายภายหลังลดสันฝายและติดตั้งฝายยาง' (กัญญา อินทร์เกลี้ยง, 2549) ดังรูปที่ 1-1 และ 'โครงการศึกษาประสิทธิภาพการระบายน้ำในคลองลัดโพธิ์และแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณใกล้เคียง ภายหลังการก่อสร้างโครงการปรับปรุงคลองลัดโพธิ์' (ปริญญา กมลสินธุ์, 2551) เป็นต้น

การใช้แบบจำลองกายภาพเพื่อศึกษาโครงสร้างชลศาสตร์มักมีข้อโต้แย้งเกิดขึ้น โดยเฉพาะแบบจำลองนั้นสามารถเป็นตัวแทนได้อย่างแท้จริงหรือไม่ เช่น การศึกษาแม่น้ำที่กว้างแต่ต้นที่เลือกใช้มาตราส่วนแนวระนาบกับแนวตั้งที่ไม่เท่ากัน การจำลองตะกอนท้องน้ำ (channel bed material) หรือหินทิ้ง (riprap) ที่มักทำโดยใช้ดินเหนียว (clay) หรือทราย (sand) เป็นวัสดุจำลองเมื่อมีการย่อขนาดในมาตราส่วนที่มาก ทั้งที่วัสดุทั้งสามนั้นล้วนมีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกัน (หิน 2.75 ทราย 2.65 ดินเหนียว 2.4) และผิดแปลกจากลักษณะพื้นฐานซึ่งหินกับทรายเป็นวัสดุที่ร่วน (non-cohesive) แต่ดินเหนียวนั้นยึดเกาะกันได้ (cohesive) เป็นต้น

นอกจากนั้นแบบจำลองนั้นอาจจำลองค่าได้ต่ำ (under-estimate) หรือสูง (over-estimate) กว่าความเป็นจริงเมื่อมีโครงสร้างจริงในสนาม ทำให้ต้องศึกษาป้องกันความเสียหาย ปรับปรุงโครงสร้างเดิม หรือได้โครงสร้างที่ใหญ่โตเกินความจำเป็นในภายหลัง ซึ่งภายใต้ระยะเวลาศึกษาและการเลือกใช้วัสดุที่จำกัดอาจทำให้มีการกำหนดที่ไม่เหมาะสม ทั้งนี้ประเทศไทยในปัจจุบันมีการศึกษาด้านแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์นี้เป็นจำนวนน้อย แต่ตัวโครงสร้างกลับมีความสำคัญยิ่ง ทำให้การทำงานที่เกี่ยวข้องใช้การอ้างอิงจากการศึกษาของต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งบางเรื่องยังไม่มีการศึกษายืนยันผลดีในประเทศไทย โดยหินทิ้งในแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์เป็นหนึ่งในนั้น



(ก) แบบจำลองมาตราส่วน 1:50 (พ.ศ.2549)



(ข) ฝายจริงหลังการปรับปรุง (พ.ศ.2551)

รูปที่ 1-1 การศึกษาฝายหนองสลัก

หินทิ้ง (rirap) ประกอบด้วยหินคละขนาดกัน (graded size) หรือคัตขนาดสม่ำเสมอ (uniform size) ถมเป็นชั้น (layer) เพื่อป้องกันการกัดเซาะท้องน้ำหรือตลิ่งของทางน้ำเปิด (open channel) ตามตำแหน่งที่ถมเนื่องจากกระแสน้ำหรือคลื่นบริเวณนั้นมีพลังงานมากพอที่จะพัดพาวัสดุท้องน้ำหรือตลิ่งเดิมได้ (USBR, 1987, Design of Small Dams) อันเป็นความเสียหายและอาจกระทบต่อโครงสร้างใกล้เคียง เช่น ตอม่อสะพาน ฝาย เขื่อน ที่อยู่อาศัยริมตลิ่ง เป็นต้น

‘การศึกษาแบบจำลองชลศาสตร์ฝายหนองสลัก กรณีศึกษาการปรับปรุงอาคารสลายพลังงานด้านท้ายภายหลังลดสันฝายและติดตั้งฝายยาง’ (กัญญา อินทร์เกลี้ยง 2549) ใช้มาตราส่วนย่อ 1:50 ซึ่ง Le Méhauté (1990) อ้างถึงใน Heller, (2011) ชี้แจงว่ามาตราส่วน 1:50 สำหรับโครงสร้างประเภทฝายนั้นเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการศึกษาวิจัย แต่มีผลของมาตราส่วนระดับหนึ่งซึ่งไม่ควรมองข้าม จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษานี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อให้ทราบถึงผลของการใช้มาตราส่วนจากการเลือกขนาดหินทิ้ง ด้วยแบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการ
- 2) เพื่อพิจารณาหาตัวแปรการไหลและตัวแปรหินทิ้งที่มีผลต่อสถานะเริ่มเสถียรภาพของหินทิ้ง
- 3) เพื่อหาความสัมพันธ์ของมาตราส่วนขนาดหินทิ้งที่ได้จากการทดลองในเกณฑ์ของ Froude และการใช้สัดส่วนทางเรขาคณิต
- 4) เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ในการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาทางชลศาสตร์การไหลและการกัดเซาะของหินทิ้ง รวมถึงการนำไปสู่การประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโครงสร้างทางชลศาสตร์อื่นๆ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองกายภาพในเกณฑ์ของ Froude เพื่อศึกษาถึงการปรับแก้มาตราส่วนวัสดุท้องน้ำ โดยทดลองด้วยแบบจำลองชลศาสตร์ทางน้ำเปิด ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ระบบสูบน้ำหมุนเวียนในการรักษาระดับน้ำและความดันให้คงที่มีรายละเอียดดังนี้

- 1) รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. ยาว 17 ม. ผนังรางน้ำเป็นกระจกใสทั้ง 2 ด้าน รางน้ำสามารถสร้างความลาดเอียงได้สูงสุด 1.5% มีประตูน้ำแบบบานยก (sluice gate) ที่ปลายรางน้ำ มีตะแกรง (screen) ที่บ่อกักน้ำด้านเหนือน้ำ วัดอัตราการไหลด้วยถังฝายสามเหลี่ยมมุมฉากสันคม (90° V-notch weir) ที่ท้ายรางน้ำซึ่งมีกำแพงสลายคลื่นในตัว โดยอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h) หลังไหลผ่านกำแพงสลายคลื่น ด้วยหลอดน้ำหรือมานอมิเตอร์ (manometer) ด้านนอกฝาย
- 2) ระบบสูบน้ำหมุนเวียนประกอบด้วยถังเก็บน้ำชั้นบน ระดับความสูงน้ำ +30.0 ม. ความจุ 30 ลบ.ม. เครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง แต่ละเครื่องสามารถสูบน้ำได้สูงสุด 25 ลิตร/วินาที การหมุนเวียนของน้ำเริ่มจากปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำชั้นบน ไหลลงตามท่อลงมาที่วาล์วควบคุม (ชั้นล่าง) ไหลเข้าบ่อกักน้ำด้านเหนือน้ำ

ไหลผ่านรางน้ำ ลงถังฝายสามเหลี่ยม ลงสู่ถังเก็บน้ำรวม (sump) ระดับอ้างอิง +0.0 ม. และถูกสูบขึ้นไปถึง
เก็บน้ำชั้นบนตามเดิม

- 3) วัสดุท่อน้ำเป็นหินทิ้งที่มีการย่อยและคัดขนาดอย่างสม่ำเสมอ (uniform distribution) 4 ขนาด ดังนี้ $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $1\frac{1}{2}$ และ 2 นิ้ว ซึ่งเปรียบเทียบมาตราส่วนกันได้

ตัวแปรที่ศึกษาคือ ขนาดหินทิ้ง 4 ขนาด ความลาดท่อน้ำ 3 ค่า และคู่อัตราการไหลของน้ำกับการพัดพาหิน
ทิ้ง 3 คู่ แต่ละคู่ทำอย่างน้อย 5 ครั้งเพื่อความแม่นยำของข้อมูล รวมจำนวนข้อมูลขั้นต่ำ 180 ชุด เพื่อวิเคราะห์
ความสัมพันธ์ของมาตราส่วน 3 ระดับ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการศึกษาที่ผ่านมา

2.1 กฎความคล้ายคลึงกัน (Laws of Similitude)

ความคล้ายคลึงกันระหว่างแบบจำลอง (model, ตัวห้อย m) กับตัวต้นแบบ (prototype, ตัวห้อย p) อย่างสมบูรณ์นั้น ต้องมีความคล้ายคลึงกันทั้ง 3 ลักษณะดังนี้

1) ความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต (geometric similitude)

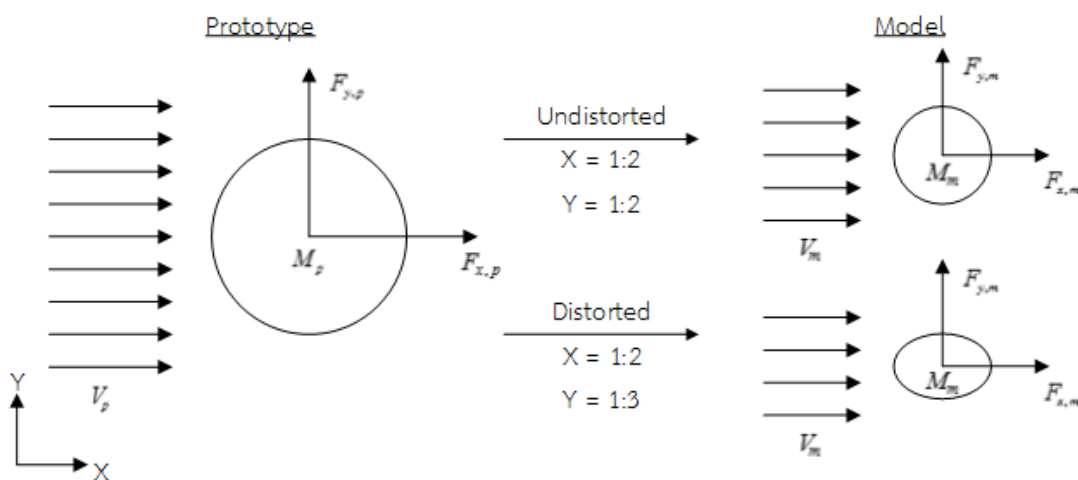
แบบจำลองและตัวต้นแบบจะมีความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิตเมื่อมาตราส่วน (scale) ของมิติ (dimensions) เดียวกันระหว่างแบบจำลองกับตัวต้นแบบมีค่าคงที่ ซึ่งอาจเป็นมาตราส่วนเดียวทุกมิติ (undistorted model) หรือต่างกัน (distorted model) ก็ได้ดังรูปที่ 2-1 โดยลักษณะด้านนี้สามารถทำได้ง่ายเว้นแต่กรณีเช่นแบบจำลองแม่น้ำที่กว้างแต่ตื้นซึ่งเมื่อเลือกใช้มาตราส่วนที่เท่ากันทุกมิติแล้วทำให้ความลึกการไหลในแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าความสามารถของอุปกรณ์ที่ใช้วัดจึงต้องเลือกใช้มาตราส่วนแนวระนาบกับแนวตั้งที่ไม่เท่ากันเพื่อให้สามารถวัดความลึกการไหลได้ เป็นต้น

2) ความคล้ายคลึงกันทางจลนศาสตร์ (kinematic similitude)

แบบจำลองและตัวต้นแบบจะมีความคล้ายคลึงกันทางจลนศาสตร์ เมื่อรูปแบบการไหลของของไหลผ่านแบบจำลองและตัวต้นแบบมีรูปแบบที่เหมือนกัน กล่าวคือ อัตราส่วนและทิศทางของความเร็วหรือความเร่งของอนุภาคของไหลที่สัมพันธ์กันมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2-1 และสมการดังนี้ในกรณีมาตราส่วนเท่ากันทุกมิติ โดยลักษณะด้านนี้สามารถทำได้ง่ายเมื่อเป็นมิติเดียวหรือการไหลในทิศทางเดียวเท่านั้นอย่างการไหลในรางน้ำที่ทดลองด้วยการวัดความเร็วการไหลหรืออัตราการไหลให้เป็นตามสัดส่วนของระยะกระจัดหรือปริมาตรตามลำดับเท่านั้น

$$\frac{V_{x,m}}{V_{x,p}} = \frac{V_{y,m}}{V_{y,p}} = \text{ค่าคงที่}$$

$$\frac{a_{x,m}}{a_{x,p}} = \frac{a_{y,m}}{a_{y,p}} = \text{ค่าคงที่}$$



รูปที่ 2-1 ตัวอย่างมาตราส่วนมิติเรขาคณิตทั้งสองแบบ

3) ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ (dynamic similitude)

แบบจำลองและตัวต้นแบบจะมีความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ เมื่ออัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อของไหลที่สัมพันธ์กันในแบบจำลองและตัวต้นแบบมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2-1 และสมการดังนี้ในกรณีมีมาตราส่วนเท่ากันทุกมิติ ซึ่งลักษณะด้านนี้ทำอย่างสมบูรณ์ได้ลำบากถึงระดับเป็นไปได้เมื่อไม่ใช้มาตราส่วน 1:1 เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายประเภทและทุกประเภทต้องเป็นสัดส่วนคงที่ที่เท่ากัน ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลจะเลือกพิจารณาเฉพาะเกณฑ์สัดส่วนแรงที่มีอิทธิพลต่อวัตถุประสงค์ที่ศึกษามากที่สุดเท่านั้น ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์การไหลสามารถจำแนกได้หลายเกณฑ์ขึ้นกับสัดส่วนระหว่างคู่ของแรงที่เกิดขึ้น โดยขึ้นกับแรงเฉื่อย (inertia force) เป็นสำคัญ ดังตารางที่ 2-1

$$\frac{F_{x,m}}{F_{x,p}} = \frac{F_{y,m}}{F_{y,p}} = \frac{m_m \cdot a_{x,m}}{m_p \cdot a_{x,p}} = \frac{m_m \cdot a_{y,m}}{m_p \cdot a_{y,p}} = \text{ค่าคงที่}$$

จากตารางที่ 2-1 แสดงเกณฑ์และแรงที่คู่กับแรงเฉื่อยเช่น แรงโน้มถ่วง (gravity force) แรงหนืด (viscous force) แรงตึงผิว (surface tension force) แรงดัน (pressure force) และสภาพอัดตัวได้ (compressibility) โดยทั่วไปแล้วพฤติกรรมการไหลมักพิจารณาด้วยแรงโน้มถ่วงกับแรงหนืดเทียบเป็นเกณฑ์ของ Froude กับ Reynold ตามลำดับ ตารางที่ 2-2 แสดงความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์ของคุณลักษณะต่างๆ ตามเกณฑ์ของ Froude และ Reynold ระหว่างแบบจำลองกับตัวต้นแบบ (USBR, 1987, Hydraulic Laboratory Techniques) ทว่าการไหลในทางน้ำเปิดเป็นการไหลผ่านช่องทางที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (natural) หรือถูกสร้างขึ้น (man-made) โดยที่ผิวน้ำสัมผัสกับอากาศและเป็นการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (gravitational flow) (เสรี จันทโรยธา, 2556) ดังนั้นเกณฑ์ของ Froude จึงเป็นตัวพิจารณาหลักของการศึกษา

ตารางที่ 2-1 เกณฑ์ความคล้ายคลึงกันทางพลศาสตร์

เกณฑ์	พารามิเตอร์ของเกณฑ์	สัดส่วนระหว่าง
Froude number	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$	inertia force กับ gravity force
Reynold number	$Rn = \frac{LV}{\nu}$	inertia force กับ viscous force
Weber number	$Wb = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$	inertia force กับ surface tension force
Euler number	$Eu = \frac{p}{\rho V^2}$	inertia force กับ pressure force
Cauchy number	$Ca = \frac{\rho V^2}{E}$	inertia force กับ compressibility

ตารางที่ 2-2 คุณลักษณะต่างๆ ตามเกณฑ์ของ Froude และ Reynolds ที่แปรตามมาตราส่วน

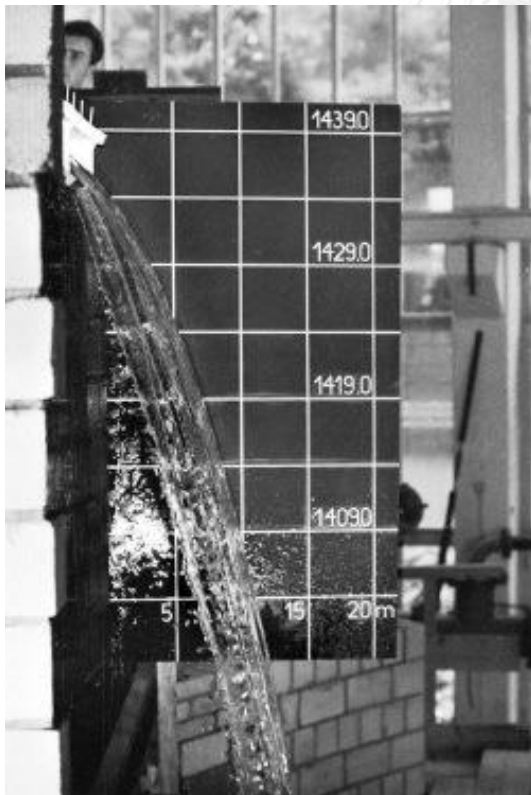
คุณลักษณะ	มิติ	Froude Law	Reynolds Law
คุณสมบัติทางเรขาคณิต			
ระยะทาง (length, L)	L	L_r	L_r
พื้นที่ (area, A)	L^2	L_r^2	L_r^2
ปริมาตร (volume, V)	L^3	L_r^3	L_r^3
คุณสมบัติทางกลศาสตร์			
เวลา (time, t)	T	$\left[\frac{L\rho}{\gamma} \right]_r^{1/2}$	$\left[\frac{L^2\rho}{\mu} \right]_r$
ความเร็ว (velocity, V)	LT^{-1}	$\left[\frac{L\gamma}{\rho} \right]_r^{1/2}$	$\left[\frac{\mu}{L\rho} \right]_r$
ความเร่ง (acceleration, a)	LT^{-2}	$\left[\frac{\gamma}{\rho} \right]_r$	$\left[\frac{\mu^2}{L^3\rho^2} \right]_r$
อัตราการไหล (discharge, Q)	L^3T^{-1}	$\left[L^{5/2} \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{1/2} \right]_r$	$\left[\frac{L\mu}{\rho} \right]_r$
คุณสมบัติทางพลศาสตร์			
มวล (mass, m)	M	$(L^3\rho)_r$	$(L^3\rho)_r$
แรง (force, F)	MLT^{-2}	$(L^3\gamma)_r$	$\left[\frac{\mu^2}{\rho} \right]_r$
ความหนาแน่น (density, ρ)	ML^{-3}	ρ_r	ρ_r
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, γ)	$ML^{-2}T^{-2}$	γ_r	$\left[\frac{\mu^2}{L^3\rho} \right]_r$
ความดัน (pressure intensity, p)	$ML^{-1}T^{-2}$	$(L\gamma)_r$	$\left[\frac{\mu^2}{L^2\rho} \right]_r$
โมเมนตัม (impulse & momentum, M)	MLT^{-1}	$\left[L^{7/2}(\rho\gamma)^{1/2} \right]_r$	$(L^2\mu)_r$
พลังงาน (energy & work, E)	ML^2T^{-2}	$(L^4\gamma)_r$	$\left[\frac{L\mu^2}{\rho} \right]_r$
กำลังงาน (power, P)	ML^2T^{-3}	$\left[\frac{L^{7/2}\gamma^{3/2}}{\rho^{1/2}} \right]_r$	$\left[\frac{\mu^3}{L\rho^2} \right]_r$

ความคลาดเคลื่อนของการศึกษาด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ที่มักเกิดขึ้นคือ

1) การวัด (Measurement effect) ที่ไม่สามารถคงสภาพขณะวัด (Intrusive/Non-intrusive measurement) ให้เหมือนกันระหว่างแบบจำลองกับตัวต้นแบบ เช่น การวัดความลึกน้ำด้วยไม้ระดับ (staff gauge) ในแม่น้ำที่กว้างจนอิทธิพลการกีดขวางของไม้ระดับน้อยมากเทียบกับแบบจำลองที่มีขนาดเล็กเมื่อวัดด้วยวิธีเดียวกันจึงมีอิทธิพลการกีดขวางสูงพอที่ทำให้ความลึกที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากความจริง เป็นต้น

2) ตัวจำลอง (Model effect) ที่ชัดเจนคือการใช้มาตราส่วนที่ไม่เท่ากันใน 2 ระนาบ (distorted model) ของแบบจำลองบริเวณศึกษาที่กว้างแต่ต้นเพื่อให้สังเกตพฤติกรรมการไหลได้ในระดับหนึ่ง กับกลศาสตร์ของคลื่นหรือกระแสน้ำซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างน้ำขึ้นน้ำลง คลื่นจากลม กระแสน้ำอุ่นน้ำเย็น เมื่อจำลองในห้องปฏิบัติการที่ใช้กลศาสตร์การจำลองต่างรูปแบบกัน และวัสดุจำลองที่ไม่เป็นตัวแทนที่เหมาะสมแต่จำเป็น สมมติเรือต้นแบบเป็นเหล็กซึ่งลอยน้ำได้เพราะน้ำหนักแทนที่น้อยกว่าปริมาตรที่จมน้ำ เมื่อย่อส่วนลงจนน้ำหนักแทนที่มากกว่าปริมาตร เรือจำลองจะไม่ลอยน้ำ ต้องเปลี่ยนวัสดุเป็นอย่างอื่นเช่นไม้หรือพลาสติก เป็นต้น

3) ผลของมาตราส่วน (scale effect) คือสัดส่วนของแรง (force ratio) ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งคงลักษณะตามทฤษฎีได้ยาก โดยรูปที่ 2-2 เป็นตัวอย่างผลของมาตราส่วนในเกณฑ์ของ Weber ของทางน้ำล้น (spillway) ของเขื่อน Gebidem ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยแบบจำลองสามารถคงสภาพลำนน้ำได้ด้วยแรงตึงผิว แต่ตัวต้นแบบทำไม่ได้



(ก) แบบจำลอง 1:30



(ข) ตัวต้นแบบ

รูปที่ 2-2 ตัวอย่างผลของมาตราส่วนในการศึกษาทางน้ำล้นของเขื่อน Gebidem ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

2.2 การเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ (Initiation of Sediment Bed Motion)

ตะกอน (sediment) หมายถึง วัสดุของแข็งจำพวก หิน ดิน ทราย ที่มีการเคลื่อนที่ปะปนไปกับกระแสน้ำ รวมทั้งวัสดุท้องน้ำที่มีการเคลื่อนที่ ในทางน้ำธรรมชาติหรือทางน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น การพัดพาตะกอนที่ทับถมรวมตัวกันกับวัสดุท้องน้ำที่มีอยู่เดิมทำให้ระดับท้องน้ำสูงขึ้นเรียกว่า ‘การตกตะกอน’ (sedimentation) การพัดพาวัสดุท้องน้ำเดิมออกไปทำให้ระดับท้องน้ำต่ำลงคือ ‘การกัดเซาะ’ (erosion, scouring) ซึ่งล้วนก่อให้เกิดผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพของทางน้ำทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงและควบคุมสภาพของแม่น้ำและโครงสร้างชลศาสตร์รอบข้างจึงมีความสำคัญ

คุณสมบัติของตะกอนที่สำคัญคือ ความหนาแน่น (density) ขนาด (size) รูปร่าง (shape) การกระจาย (size distribution) อัตราตกตะกอน (fall velocity) และมุมที่เริ่มเคลื่อนที่ (angle of repose) ร่วมกับคุณสมบัติการไหลของทางน้ำอย่าง ความลาดท้องน้ำ (bed slope, S) ความลึกการไหล (flow depth, y) อัตราการไหล (flow rate, Q) และความเร็วการไหล (flow velocity, V) โดยคุณสมบัติเหล่านี้เป็นปัจจัยที่กำหนดลักษณะทางกายภาพทางน้ำ ลักษณะการนำพา (transport mode) และอัตราการนำพาตะกอน (transport rate, Q_s) (Chen, 2003)

การเริ่มเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการกัดเซาะทางน้ำที่มีผลต่อเสถียรภาพและคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของทางน้ำ การออกแบบทางน้ำมีข้อกำหนดคือควบคุมไม่ให้เกิดการเริ่มเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดย Shield เป็นผู้ศึกษาแรกๆ ในด้านนี้ (Yang, 1996) ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Shield (Shield's parameters) ดังต่อไปนี้

- 1) พารามิเตอร์การไหล (flow parameter, ψ)

$$\psi = \frac{u_*^2}{\Delta g D_{50}}$$

โดย u_* คือ ความเร็วเฉือน (shear velocity) คำนวณดังนี้ $u_* = \sqrt{g R_h S}$ [m/s]

Δ คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) คำนวณดังนี้ $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก [9.81 m/s²]

D_{50} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน [m]

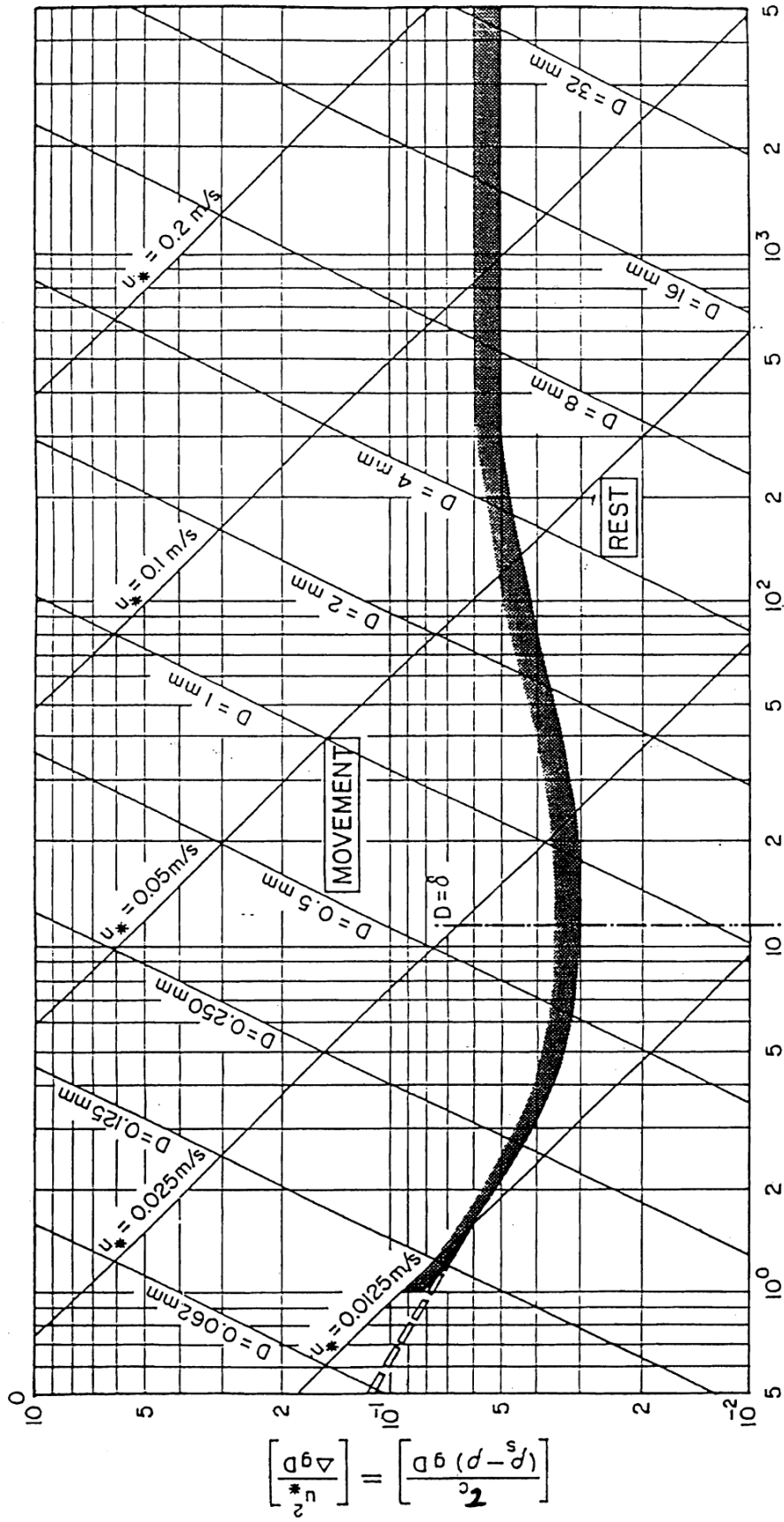
- 2) เลขเรย์โนลด์ของอนุภาค (Particle Reynold's Number, Rn_*)

Shield (1936) พบว่าสภาวะการเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอนมีความสัมพันธ์กับขนาดตะกอน (D_{50}) และความหนาของชั้นอิทธิพลความหนืดของการไหลแบบราบเรียบ (thickness of laminar sublayer, δ) ดังนี้

$$Rn_* = 11.5 \frac{D_{50}}{\delta} = \frac{u_* D_{50}}{\nu}$$

โดย ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ (kinematic viscosity) ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำที่ไหล

เมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งสองครบแล้ว นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกันโดยให้เลขเรย์โนลด์ของอนุภาคเป็นแกนแนวราบและพารามิเตอร์การไหลเป็นแกนแนวตั้งในมาตรา log-log ดังกราฟรูปที่ 2-3 ซึ่งเรียกเป็นผังของ Shield (Shield's Diagram) โดยแถบสีดำคือบริเวณที่ Shield ได้สังเกตเห็นการเริ่มเคลื่อนที่ของท้องน้ำในวัสดุประเภทกรวดและทรายขนาดต่างๆ ประกอบกับเส้นความเร็วเฉือนที่แยกจากด้านซ้ายบนลงขวาล่างและเส้นขนาดของวัสดุท้องน้ำที่แยกจากด้านซ้ายล่างขึ้นขวาบน



$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} = 11.6 \frac{D}{\delta}$$

Lines of equal u_* and D based on $\rho_s = 2,650 \text{ kg/m}^3$ and $\nu = 1.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (12°C)

รูปที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การไหลกับผลต่อของอนุภาคที่ขนาดสม่ำเสมอของ Shield

2.3 การศึกษาที่ผ่านมา (Literature Review)

Le Méhauté (1990 อ้างถึงใน Heller, 2011) ได้เสนอมาตราส่วนแบบจำลองกายภาพที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการศึกษาวิจัย แต่มีผลของมาตราส่วนระดับหนึ่งซึ่งไม่ควรมองข้าม ซึ่งเสนอให้แม่น้ำใช้มาตราส่วน 1:100 ในแนวตั้ง กับ 1:800 ในแนวราบ สำหรับทางน้ำเข้า (intake) ทางน้ำออก (outlet) และทางน้ำล้น (spillway) ของโครงสร้างชลศาสตร์ใช้มาตราส่วน 1:50 ถึง 1:100 ส่วนเขื่อนหินใช้มาตราส่วน 1:30 ถึง 1:50 ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองกายภาพของฝายหนองสลักโดยกรมชลประทาน (กัญญา อินทร์เกลี้ยง, 2549) ย่อมมีผลของมาตราส่วนที่ไม่ควรละทิ้ง

Aguirre-Pe (2003) ได้สร้างค่า Particle Densimetric Froude number (Fr^*) ขึ้น เพื่อเป็นทางเลือกในการหาสภาวะการไหล โดยทดลองในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับตะกอนท้องน้ำขนาดสม่ำเสมอในช่วง 0.7–1.6 นิ้ว ที่ความลาดชัน 2–6% พบว่ามีความแม่นยำมากกว่าการศึกษาของ Shield

Siebel (2007) พบว่า ณ สภาวะการไหลที่ตะกอนเริ่มเคลื่อนที่ของ Shield มีความเร็วการไหลต่ำกว่าการทดลอง

Beheshti (2008) วิเคราะห์สมการสภาวะการไหลที่ตะกอนเริ่มเคลื่อนที่จำนวน 7 สมการที่ตัดยอดจาก Shield พบว่าสมการของ Shield ไม่เหมาะสม และของ Paphitis (2001) เหมาะสมกับข้อมูลทั้ง 7 แหล่ง

ดังนั้นการใช้หลักการของ Shield สำหรับสภาพการทดลองแบบที่กล่าวไม่เหมาะสมซึ่งไม่ได้ครอบคลุมทุกกรณี

Turowski (2011) ได้ศึกษาอัตราการนำพาตะกอนท้องน้ำเชิงสถิติโดยใช้เครื่องวัดทางอ้อม (indirect sensor) ระหว่างห้องทดลองกับสนามจริง พบว่าไม่เหมาะสมเพราะค่าคงที่ของเครื่องวัดขึ้นกับสภาวะแวดล้อมนั้นๆ และต้องมีข้อมูลจริงจำนวนมาก เพื่อให้ค่าทางสถิติมีความแม่นยำจึงจะสามารถใช้งานได้ ดังนั้นการใช้เซนเซอร์วัดต้องปรับแก้ทุกครั้งสำหรับการศึกษาที่เปลี่ยนไป ซึ่งเสียเวลา สิ้นเปลืองงบประมาณสอบเทียบอุปกรณ์ เป็นการเพิ่มขั้นตอนการคำนวณและมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นสะสมในการศึกษา จึงแนะนำให้วัดค่าโดยตรง (direct sensing) เพื่อความแม่นยำและรวดเร็ว

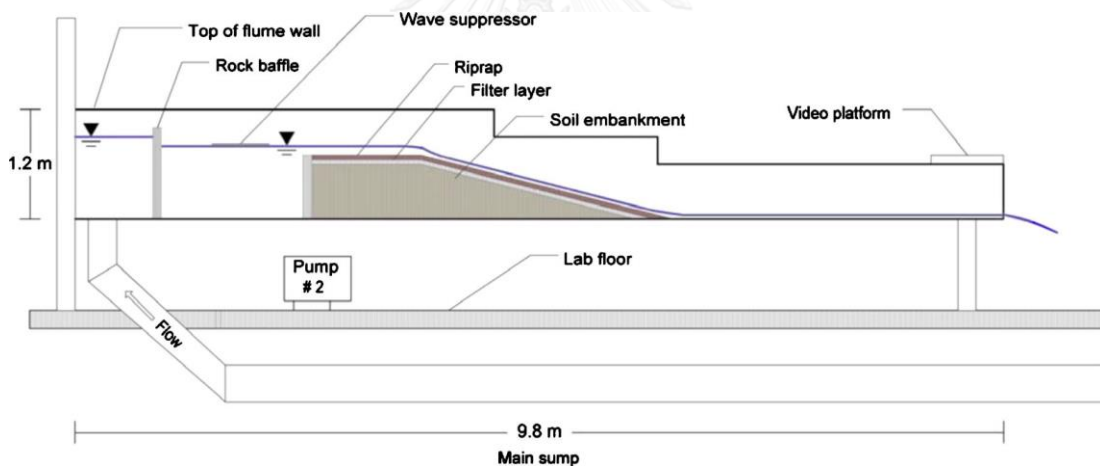
Abt (2013) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดหินทั้ง 21 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของโครงสร้างหินทั้งที่น้ำไหลท่วมตัวโครงสร้าง มีตัวแปรที่สนใจ 9 ตัวแปรคือ ความลาดชัน อัตราการไหล มุมทรงตัว ความเร็วการไหล ความคละกัน ความลาดชันตลิ่งด้านข้าง ความลึกการไหล ความกว้างท้องน้ำ และความหนาของชั้นหินที่ถม พบว่าสมการของ Khan and Ahmad (2011) กับ Chang (1998) มีความเหมาะสมกับข้อมูลจาก 21 การศึกษา นี้ วิเคราะห์ความถี่ของปัจจัยในการศึกษาได้ดังนี้ ความลาดชัน 19 การศึกษา, อัตราการไหล 17 การศึกษา, มุมทรงตัว 5 การศึกษา, ความเร็วการไหล 5 การศึกษา, ความคละกัน 5 การศึกษา, ความลาดชันตลิ่งด้านข้าง 4 การศึกษา, ความลึกการไหล 2 การศึกษา, ความกว้างท้องน้ำ 1 การศึกษา และความหนาชั้นหินทั้ง 1 การศึกษา เห็นได้ว่าความลาดชันและอัตราการไหลมีความสัมพันธ์กันอย่างสำคัญยิ่งเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นซึ่งล้วนไม่เกิน 5 การศึกษา พิจารณาความเร็วการไหล, ความลึกการไหล และความกว้างท้องน้ำ ทั้งสามปัจจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของอัตราการไหลเมื่อเป็นทางน้ำหน้าตลิ่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า อันเป็นปัจจัยหลักที่ควรรวมกันได้, ความลาดชันตลิ่งด้านข้างไม่จำเป็นสำหรับการไหลแบบท่วมตัวโครงสร้าง, ความคละกันไม่ต้องคำนวณเมื่อหินทั้งมีขนาดสม่ำเสมอ, ความหนาชั้นหินทั้งที่หนากว่าสองเท่าของขนาดหินเฉลี่ยนั้นไม่ต้องคิด คงเหลือเพียงมุมทรงตัวที่เป็นปัจจัยอย่างเอกเทศ รวมเป็น 3 ปัจจัยหลักที่ควรใช้ในการศึกษาขนาดหินทั้งที่คัดขนาดสม่ำเสมอสำหรับการไหลแบบไหลข้ามโครงสร้างหินทั้งที่หนาในทางน้ำเปิดหน้าตลิ่งการไหลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ท้องน้ำลาดเอียงลงท้ายน้ำ

บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพและการทดลอง

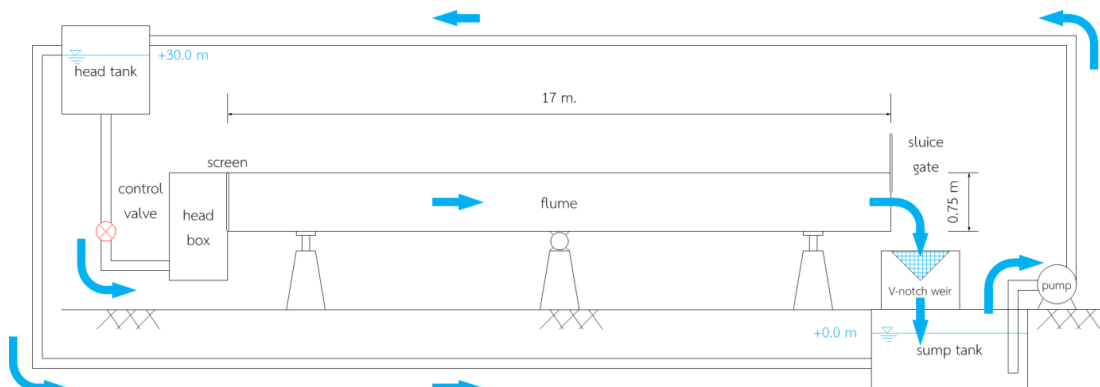
จากการศึกษาที่ผ่านมาได้กำหนดเงื่อนไขเป็นการศึกษาโครงสร้างหินทิ้งที่คัดขนาดสม่ำเสมอมาทดแทนให้ลาดเอียงในทางน้ำเปิดหน้าตัดการไหลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีการไหลแบบไหลข้ามโครงสร้างหินทิ้ง ดังนั้นต้องออกแบบการทดลองให้เข้าเงื่อนไขดังกล่าว โดย Abt, Thornton et al. (2008) ได้ออกแบบการทดลองที่เข้าเงื่อนไขดังรูปที่ 3-1

3.1 แบบจำลองกายภาพของโครงสร้างหินทิ้งในทางน้ำเปิด

แบบจำลองกายภาพนี้ติดตั้งและทดลองในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าของห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. ยาว 17 ม. มีระบบสูบน้ำหมุนเวียนดังรูปที่ 3-2 (รายละเอียดดูที่ ภาคผนวก ก.) สามารถปรับความลาดชันได้ไม่เกิน 1.5% จึงติดตั้งแบบจำลองตามแนวทางของ Abt, Thornton et al. (2008) ที่ถมโครงสร้างเป็นรูปลิ้มเพื่อสร้างความลาดท้องน้ำให้ได้ 2%, 5% และ 10% โดยอธิบายตำแหน่งการติดตั้งและผังดังรูปที่ 3-3 เปรียบเทียบกับภาพการติดตั้งและทดลองในรางน้ำจริงดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-1 การออกแบบการทดลองของ Abt, Thornton et al (2008)



รูปที่ 3-2 รางน้ำเปิดของห้องปฏิบัติการ

ตำแหน่งการติดตั้ง (ตำแหน่ง +X.XXX ม. นับจากตะแกรงของถังพักน้ำต้นน้ำ)

ตำแหน่ง +0.000 ถึง +8.300 ม.

ไม่มีการติดตั้งใดๆ

ตำแหน่ง +8.300 ถึง +8.500 ม.

วางกล่องกรงหิน (gabion) กั้นบริเวณโครงสร้างให้สูงตามความลาดชันต่างๆ เป็นส่วนปรับสภาวะการไหล (buffer zone)

ตำแหน่ง +8.500 ถึง +12.500 ม.

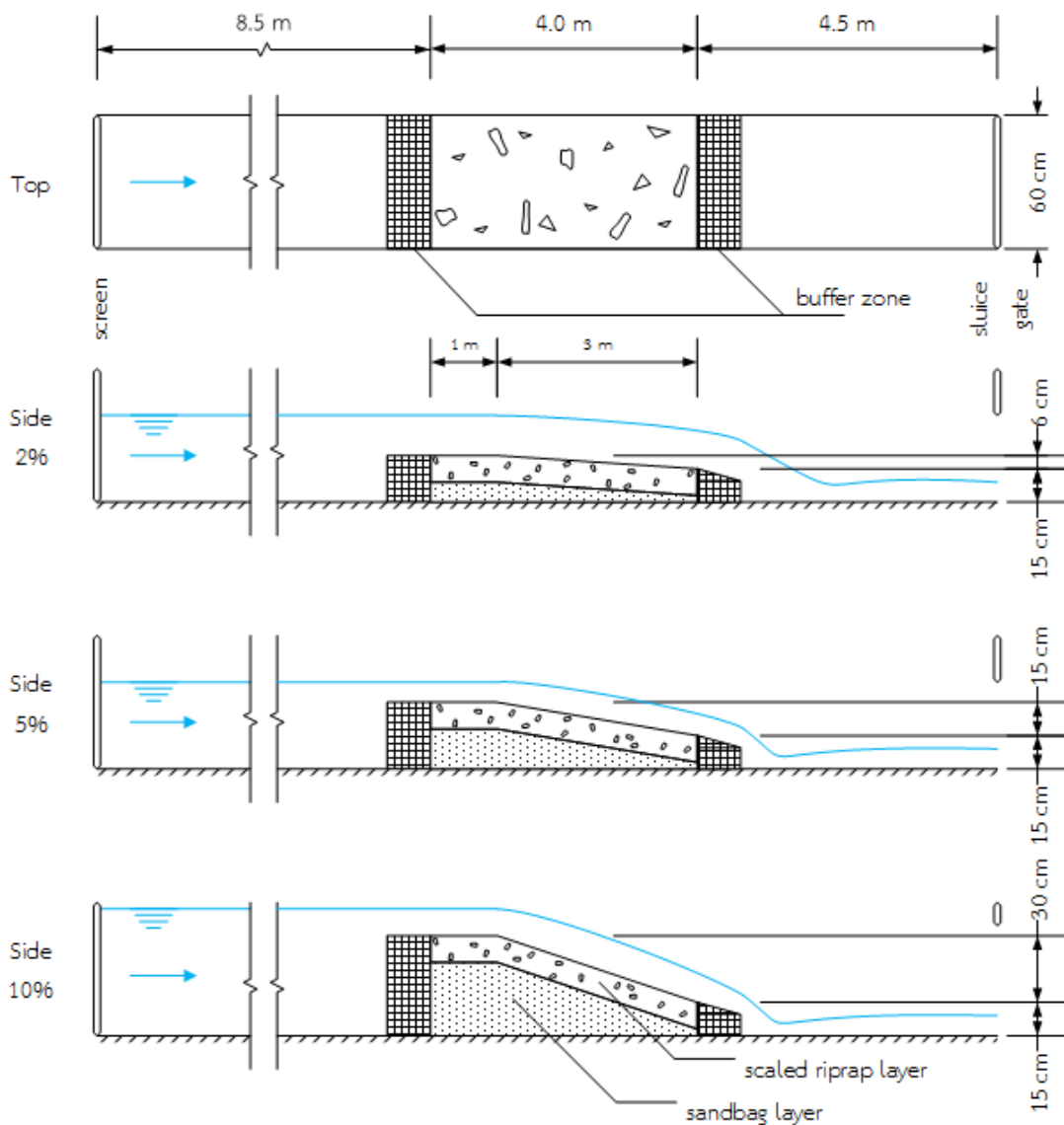
ถมหินทิ้งหนาประมาณ 10 ซม. บนชั้นกระสอบทรายที่ถมเป็นรูปลิ่มลาดลงท้ายน้ำ โดย 1 ม. แรกเป็นพื้นราบ 3 ม. หลังเป็นทางลาดลง

ตำแหน่ง +12.500 ถึง +12.700 ม.

วางกล่องกรงหินเป็นตัวกั้นบริเวณโครงสร้าง

ตำแหน่ง +12.700 ถึง +17.000 ม.

ไม่มีการติดตั้งใดๆ



รูปที่ 3-3 ผังการติดตั้งแบบจำลอง



รูปที่ 3-4 ตัวอย่างการติดตั้งแบบจำลองจริงที่ลาดท้องน้ำ 5%

3.2 วัสดุหินทิ้ง

วัสดุหินทิ้งที่ใช้ทดลองเป็นหินแกรนิตย่อยซึ่งใช้ก่อสร้างทั่วไปในประเทศไทย มีการคัดขนาดอย่างสม่ำเสมอ 4 ขนาด กำหนดค่าแทนขนาด (nominal size) เป็น ½, ¾, 1½ และ 2 นิ้ว (12.7, 19.1, 38.1 และ 50.8 มม. ตามลำดับ) โดยขนาด ½ และ ¾ นิ้ว ได้จากการนำหินย่อยเบอร์ 1 มาคัดขนาดด้วยเครื่องร่อนตะแกรง (sieve) ของภาควิชาวิศวกรรมโยธาและภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนหินขนาด 1½ และ 2 นิ้ว สังกัดและซื้อจากศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย อ.วิหารแดง จ.สระบุรี บริษัทอิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเม้นต์ ซึ่งจัดประเภทเป็นหินโรยทางรถไฟ สรุปคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของหินทิ้งดังตารางที่ 3-1 (รายละเอียดการทดลองคุณสมบัติได้ที่ ภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 3-1 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของหินทิ้ง

ค่าแทนขนาด (นิ้ว)	ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent S.G.)	มุมทรงตัว (องศา)
½	2.70	50
¾	2.71	52
1½	2.74	55
2	2.74	63

3.3 ขั้นตอนการทดลองและการบันทึกข้อมูล

การทดลองแต่ละกรณีแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงเตรียมการ ช่วงทดลอง และช่วงหลังการทดลอง

1) ช่วงเตรียมการ

ช่วงเตรียมการเป็นช่วงดำเนินการติดตั้งรูปแบบลาดท้องน้ำ (S) เลือกขนาดหินทิ้ง ถมกับเกลี่ยหินทิ้งให้ได้ระดับ และตรวจความพร้อมอื่นๆ ของแบบจำลองและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเช่น การรั่วซึมของรางน้ำ สภาพรางเลื่อน ตะแกรงดักหิน อุปกรณ์วัดที่ได้สอบเทียบเรียบร้อยแล้ว สภาพโดยรอบของห้องปฏิบัติการ เป็นต้น ตัวอย่างรูปที่ 3-5 โดยใช้เวลาเตรียมการประมาณ 2 สัปดาห์ต่อการเปลี่ยนรูปแบบหรือขนาดหินอย่างไร้ความเสียหาย

2) ช่วงทดลอง

การทดลองเริ่มด้วยเปิดเครื่องสูบน้ำให้ระบบหมุนเวียนน้ำสมดุล เปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้าแบบจำลองในอัตราต่ำซึ่งไม่เกิดการพัดพาหินทิ้งจนสมดุล ปรับวาล์วเพิ่มอัตราการไหลถึงระดับที่ต้องการ (Q) ไว้ระยะเวลาหนึ่งให้ระบบสมดุล ตั้งตะแกรงดักหินท้ายรางน้ำพร้อมจับเวลา (t) ประมาณ 10 นาที ขณะรอครบกำหนดเวลาให้เก็บข้อมูลอื่นๆ อย่างความลึกการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ (y) ระดับน้ำเหนือสันฝาย (h) ภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว เมื่อครบกำหนดให้เปลี่ยนตะแกรงและทำซ้ำเพื่อความแม่นยำของข้อมูล เมื่อได้ชุดข้อมูลของกรณีทดลองเพียงพอแล้วให้ปิดวาล์วน้ำเข้าแบบจำลองและปิดเครื่องสูบน้ำ ตัวอย่างรูปที่ 3-6 รวมเวลาดทดลองประมาณ 1 ชั่วโมงเศษต่อกรณี

3) ช่วงหลังการทดลอง

เมื่อปิดเครื่องสูบน้ำแล้วให้ระบายน้ำออกจากรางน้ำ ถังพักน้ำ และถังฝาย ด้วยวาล์วน้ำทิ้งทั้งหมด ทำการตากหินทิ้งที่ดักมาให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก (W) คิดเป็นอัตราการพัดพา ($Q_s = W/t$) ถมหินคืนที่พร้อมเกลี่ยให้ได้ระดับเช่นเดิม และทำความสะอาดบริเวณโดยรอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างรูปที่ 3-7 รวมเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ถึงข้ามคืนต่อกรณี

สรุปขั้นตอนการทดลองเสนอตามแผนผังดังรูปที่ 3-8 และตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแสดงดังตารางที่ 3-2 โดยเป็นของหินขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ที่ความลาดชัน 5% โดยปรับค่าตัวแปรที่ศึกษา 3 อย่าง ได้แก่ ขนาดหินทิ้งจำนวน 4 ขนาด ความลาดท้องน้ำจำนวน 3 ระดับ กับอัตราการไหลของน้ำจำนวน 3 ค่า แต่ละค่าเก็บข้อมูล 5 ชุด รวมเป็น 36 กรณี 180 ชุดข้อมูลแล้ว ชุดข้อมูลแต่ละชุดบันทึกความลึกการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ และน้ำหนักหินที่ดักได้ต่อเวลา 10 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ภายหลัง



รางเลื่อนวางตะแกรงดักหินท้ายรางน้ำ

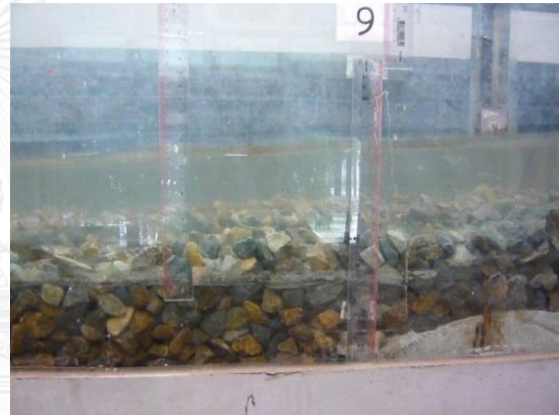


การติดตั้งกรงหิน ชั้นถุทราย และชั้นหินทิ้ง

รูปที่ 3-5 ช่วงเตรียมการ



ฝายและตะแกรงดักหินขณะทดลอง

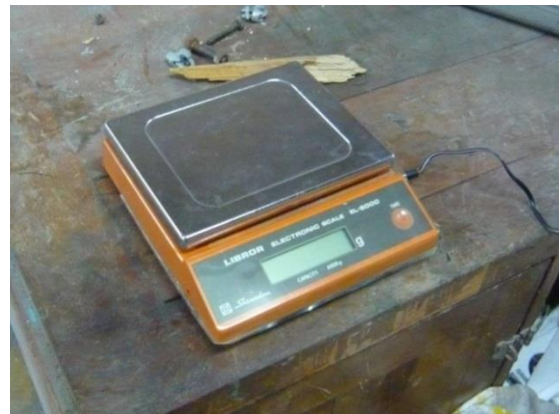


การวัดความลึกการไหลโดยมาตรวัดนอกรางน้ำ

รูปที่ 3-6 ช่วงทดลอง

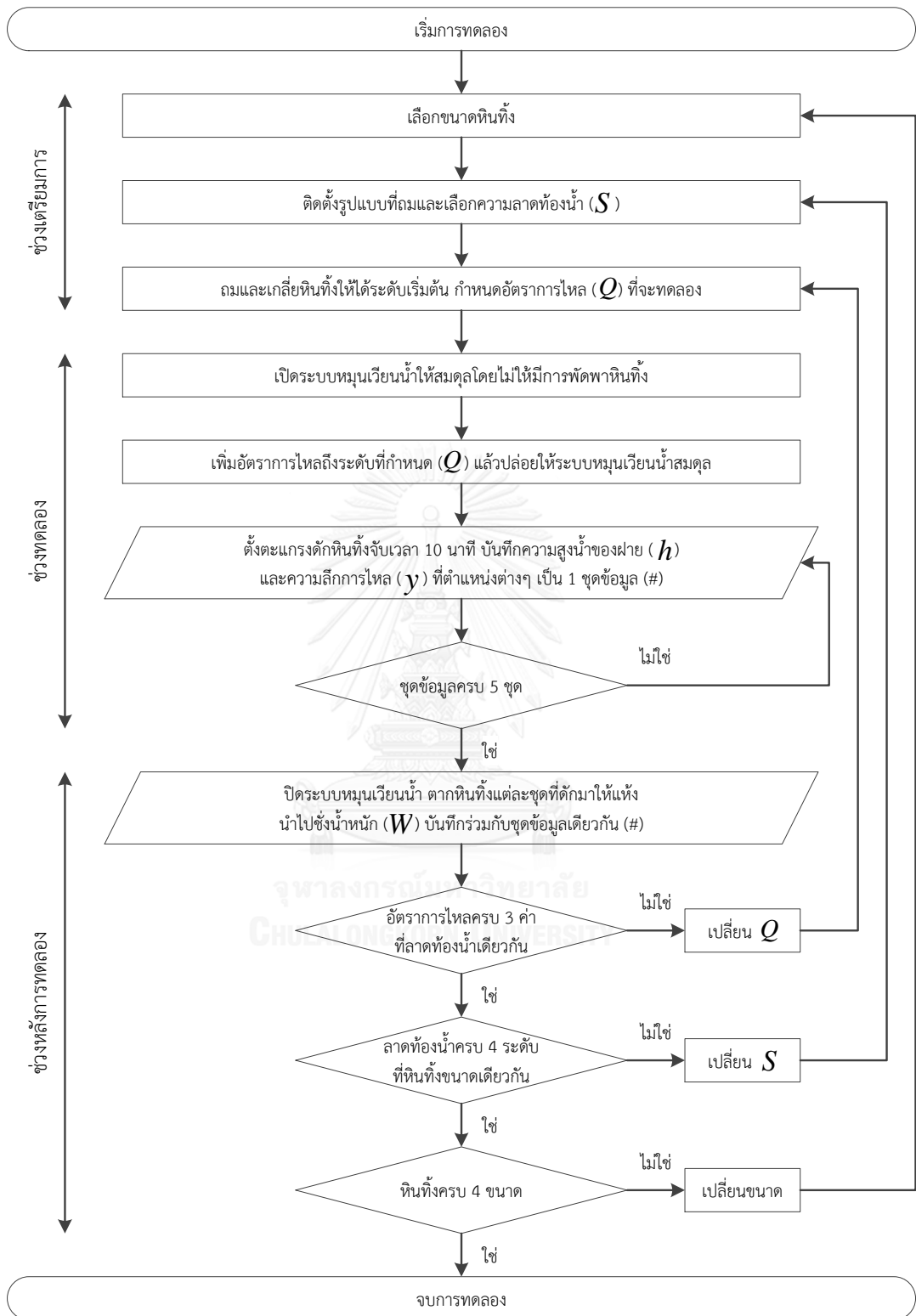


ปริมาณหินที่ดักได้



เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 1 กรัม

รูปที่ 3-7 ช่วงหลังการทดลอง



รูปที่ 3-8 ผังขั้นตอนการทดลอง

ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูล

Size (in)	Slope (%)	h (cm)	Run No.	W (kg)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	#6 (cm)	#5 (cm)	#4 (cm)	#3.1 (cm)	#3 (cm)	#2 (cm)	#1 (cm)	Note
3/4	5%	21.1	1	0.269	13.7	10.2	18.6	22.9	24.9	29.0	21.8	31.4	24.4	25.0	24.4	32.4	25.1	33.1	
			2	0.355	13.7	10.2	18.6	23.0	24.9	28.9	21.8	32.4	24.3	25.0	24.4	32.3	25.0	33.1	
			3	0.903	13.5	10.2	18.5	22.9	24.9	28.9	21.8	32.4	24.4	25.0	24.4	32.3	25.0	33.1	
			4	0.192	13.4	10.1	18.4	22.9	24.9	28.9	21.8	32.4	24.4	25.0	24.4	32.3	25.0	33.1	
			5	0.481	13.3	10.1	18.3	23.0	24.9	28.9	21.9	32.4	24.3	25.0	24.3	32.3	25.0	33.1	
...

3.4 สรุปข้อมูลการทดลอง

จำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูล

กรณีศึกษาแต่ละกรณีนับเมื่อมีอัตราการพัดพาหินเกิดขึ้น จากที่ตั้งเป้าไว้ที่อย่างน้อย 3 กรณีต่อความลาดท้องน้ำและขนาดหินทั้งหมด 12 คู่ รวมเป็น 36 กรณีศึกษากับ 180 ชุดข้อมูลนั้นไม่สามารถทำได้ครบถ้วนเพราะมีกรณีศึกษาที่หินไม่เคลื่อนที่ โดยเฉพาะเมื่อหินมีขนาดใหญ่ในความลาดท้องน้ำน้อย นอกจากนี้ยังบันทึกข้อมูลของกรณีที่ไม่เกิดการพัดพาด้วยเพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3-3 แจกแจงจำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูล (ในวงเล็บ) รวม 31 กรณีกับ 145 ชุดข้อมูล

อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง (flow rate per unit width, q)

อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง ($q = Q/B$) มีหน่วยเป็น ลบ.ม./วินาที/เมตร (cu.m./s/m) คำนวณจากค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h) หน่วยเซนติเมตร ไปสอบเทียบอัตราการไหลตามสมการ $Q = (2.586 \times 10^{-2}) h^{2.351}$ หน่วยลิตร/วินาที ต่อความกว้างรางน้ำ (B) 0.60 เมตร (ภาคผนวก ก. การสอบเทียบอัตราการไหล)

อัตราการพัดพาท้องน้ำเชิงปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง (volumetric sediment flow rate per unit width, q_s)

อัตราการพัดพาท้องน้ำเชิงปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง มีหน่วยเป็น ลบ.ม./วินาที/เมตร คำนวณจากน้ำหนักหินที่ตกได้ (W) ต่อเวลา (t) ต่อความกว้างรางน้ำ 0.60 เมตร แปลงเป็นปริมาตรด้วยความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent S.G.) ของหินแต่ละขนาดจากตารางที่ 3-1

จากการสังเกตคู่อัตราการไหลกับอัตราการพัดพาที่ขนาดและความลาดท้องน้ำต่างๆ พบว่าหินขนาดเดียวกันที่ความลาดท้องน้ำต่ำต้องใช้อัตราการไหลสูงจึงจะเกิดการพัดพาวัสดุท้องน้ำ เมื่อเพิ่มความลาดท้องน้ำแล้วพบว่าอัตราการไหลที่มีการพัดพาน้อยลงและอัตราการพัดพาเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ตารางที่ 3-3 จำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูล

ขนาดหิน ลาดท้องน้ำ	½ นิ้ว	¾ นิ้ว	1½ นิ้ว	2 นิ้ว	รวมกรณีศึกษา (รวมชุดข้อมูล)
2%	3 (13)	4 (25)	0 (0)	0 (0)	7 (38)
5%	3 (13)	3 (18)	4 (14)	1 (1)	11 (46)
10%	3 (13)	3 (15)	4 (20)	3 (13)	13 (61)
รวมกรณีศึกษา (รวมชุดข้อมูล)	9 (39)	10 (58)	8 (34)	4 (14)	31 (145)

ความลึกการไหล (depth of flow, y)

ความลึกการไหลวัดโดยอ่านมาตรวัดแบบติดตายที่ผนังรางน้ำซึ่งเป็นกระจกใสมองเห็นได้ ที่ตำแหน่งต่างๆ (ภาคผนวก ก.) ความละเอียด 1 มิลลิเมตร ไปสอบเทียบกับระดับท้องน้ำก่อน เฉลี่ยค่าความลึกการไหล 2 บริเวณคือ บริเวณก่อนผ่านหินทิ้ง (y_{in}) ซึ่งเฉลี่ยจากมาตรวัดระดับตำแหน่งที่ #6.1 และ #7 กับบริเวณหินทิ้ง (y_{riprap}) ซึ่งเฉลี่ยจากมาตรวัดระดับตำแหน่งที่ #8, #8.1, #9, #9.1 และ #10 ทุกระดับความลาดท้องน้ำ

ความลึกการไหลบริเวณก่อนผ่านหินทิ้งมีค่าช่วง 3.2 – 16.7 ซม. กับบริเวณหินทิ้งมีความลึกช่วง 0.7 – 13.3 ซม. จากข้อมูลเฉพาะกรณีที่มีการพัดพาเท่านั้น

ความเร็วการไหล (flow velocity, V)

ความเร็วการไหลคำนวณจากอัตราการไหล (Q) หารพื้นที่หน้าตัดการไหล ($A = By$) โดยคำนวณ 2 บริเวณเช่นเดียวกับความลึกการไหล คือ บริเวณก่อนไหลเข้าหินทิ้ง (V_{in}) กับบริเวณหินทิ้ง (V_{riprap})

ความเร็วการไหลบริเวณก่อนผ่านหินทิ้งมีค่าช่วง 0.391 – 1.619 ม./วินาที กับบริเวณหินทิ้งมีความเร็วช่วง 0.535 – 3.571 ม./วินาที จากข้อมูลเฉพาะกรณีที่มีการพัดพาเท่านั้น

ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number, Fr)

ฟรูดนัมเบอร์เป็นค่าบ่งบอกถึงสภาวะการไหลของน้ำ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงในทางน้ำเปิด ($Fr = V/\sqrt{gD}$) โดยสำหรับทางน้ำเปิดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นค่าความลึกชลศาสตร์ (hydraulic depth, D) เท่ากับความลึกการไหล (y) จึงได้ว่า $Fr = V/\sqrt{gy}$ แบ่งได้ 3 สภาวะ คือ การไหลได้วิกฤต (subcritical flow, $Fr < 1$) การไหลวิกฤติ (critical flow, $Fr = 1$) และ การไหลเหนือวิกฤติ (supercritical flow, $Fr > 1$) โดยคำนวณ 2 บริเวณเช่นกันคือ บริเวณก่อนไหลเข้าหินทิ้ง (Fr_{in}) กับบริเวณหินทิ้ง (Fr_{riprap})

การศึกษานี้เกิดทุกสภาวะโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.49 – 13.63 จากข้อมูลเฉพาะกรณีที่มีการพัดพาเท่านั้น และมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเดียวคือ จากการไหลได้วิกฤติที่บริเวณก่อนผ่านหินทิ้งเป็นเหนือวิกฤติที่บริเวณหินทิ้งทุกความลาดท้องน้ำ

ตารางที่ 3-4 ถึง ตารางที่ 3-15 แสดงข้อมูลข้างต้นของแต่ละชุดข้อมูล โดยในคอลัมน์ Note ที่ระบุ n/a คือ กรณีที่ไม่เกิดการพัดพาท้องน้ำ ($q_s = 0$) ซึ่งบันทึกไว้เป็นหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ต่อไป

รูปที่ 3-9 ถึง รูปที่ 3-20 เป็นกราฟของหินแต่ละขนาดและความลาดท้องน้ำ แสดงอัตราการไหลกับอัตราการพัดพาในแบบ normal graph และอัตราการไหลกับฟรูดนัมเบอร์ในแบบ semi-log graph โดยใช้อัตราการไหลเป็นแกนนอนหลักร่วมกันแบบ normal x-axis graph

ผังของ Shield (Shield's diagram)

ผังของ Shield เป็นความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การไหล (flow parameters, ψ) กับเลขเรโนลด์ของอนุภาค (Particle Reynold's number, Rn_*) ที่ขนาดวัสดุท้องน้ำมีความสม่ำเสมอ โดยพารามิเตอร์การไหลของการทดลองมีค่าช่วง 0.032 – 0.108 ส่วนเลขเรโนลด์ของอนุภาคคืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (inertia force) กับแรงหนืด (viscous force) ต่ออนุภาคท้องน้ำ โดยความหนืดจลน์ (kinematics viscosity) แปรตามอุณหภูมิของของไหล และน้ำในการทดลองไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนักในช่วง 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นความหนืดจลน์ 8.00×10^{-7} เมตร²/วินาที คำนวณได้ค่าช่วง 1,301 – 14,919 จากข้อมูลเฉพาะกรณีที่มีการพัดพาเท่านั้น

เมื่อนำมารวมกันในผังของ Shield ดังรูปที่ 3-21 พบว่าการทดลองให้ค่าคลาดเคลื่อนจากเส้นข้อมูลที่ผ่านมา แต่คลาดเคลื่อนเป็นแบบแผนโดยเรียงตัวขนานกันทั้งระหว่างหินต่างขนาดและเส้นขนาดหินที่ผ่านมา และมีข้อมูลบางชุดตกอยู่ในช่วงไม่มีการเคลื่อนที่

ตารางที่ 3-4 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1/2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

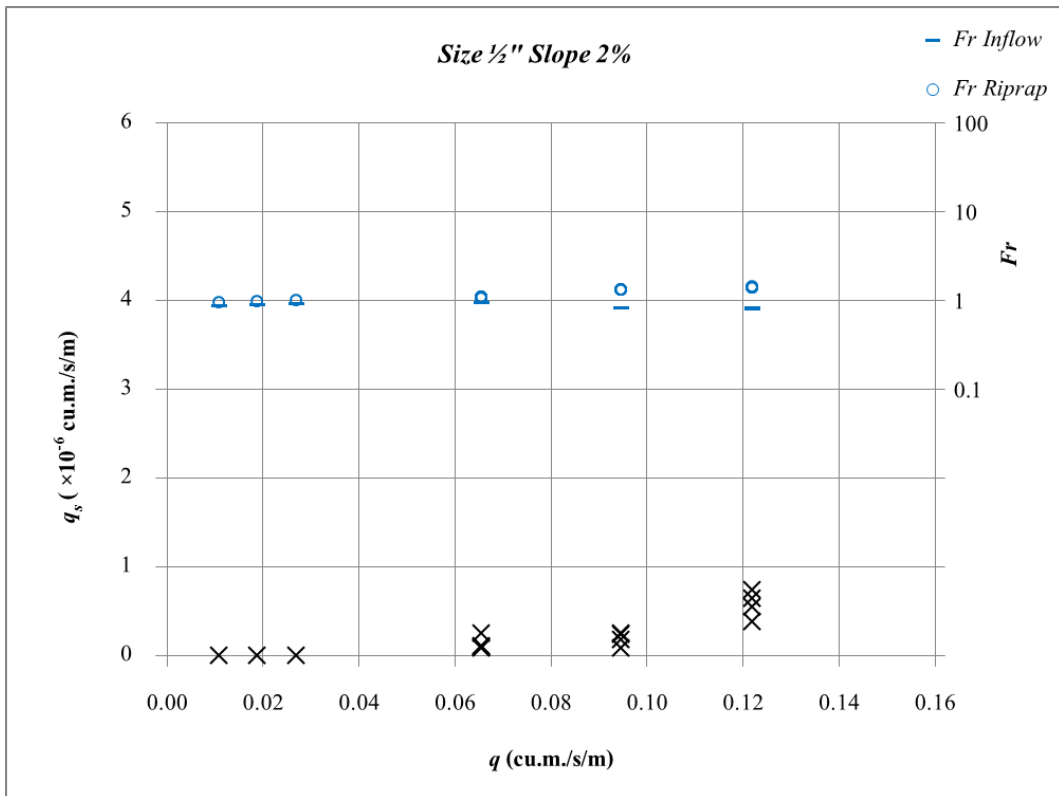
q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.010833	0.00×10^{-6}	2.4	2.5	0.451	0.433	0.93	0.87	0.021	1,047	n/a
0.018833	0.00×10^{-6}	3.4	3.6	0.554	0.523	0.96	0.88	0.028	1,222	n/a
0.027000	0.00×10^{-6}	4.2	4.5	0.643	0.600	1.00	0.90	0.034	1,349	n/a
0.065667	0.09×10^{-6}	7.2	8.0	0.912	0.821	1.09	0.93	0.054	1,698	
		7.3	7.9	0.900	0.831	1.06	0.94	0.054	1,698	
		7.2	8.0	0.912	0.821	1.09	0.93	0.054	1,698	
		7.2	7.9	0.912	0.831	1.09	0.94	0.054	1,698	
0.094667	0.17×10^{-6}	8.1	11.1	1.169	0.853	1.31	0.82	0.059	1,778	
		8.2	11.1	1.154	0.853	1.29	0.82	0.059	1,778	
		8.2	11.1	1.154	0.853	1.29	0.82	0.059	1,778	
		8.2	11.1	1.154	0.853	1.29	0.82	0.059	1,778	
0.122000	0.54×10^{-6}	9.3	13.3	1.312	0.917	1.37	0.80	0.066	1,873	
		9.3	13.3	1.312	0.917	1.37	0.80	0.066	1,873	
		9.3	13.2	1.312	0.924	1.37	0.81	0.066	1,873	
		9.2	13.2	1.326	0.924	1.40	0.81	0.066	1,873	

ตารางที่ 3-5 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

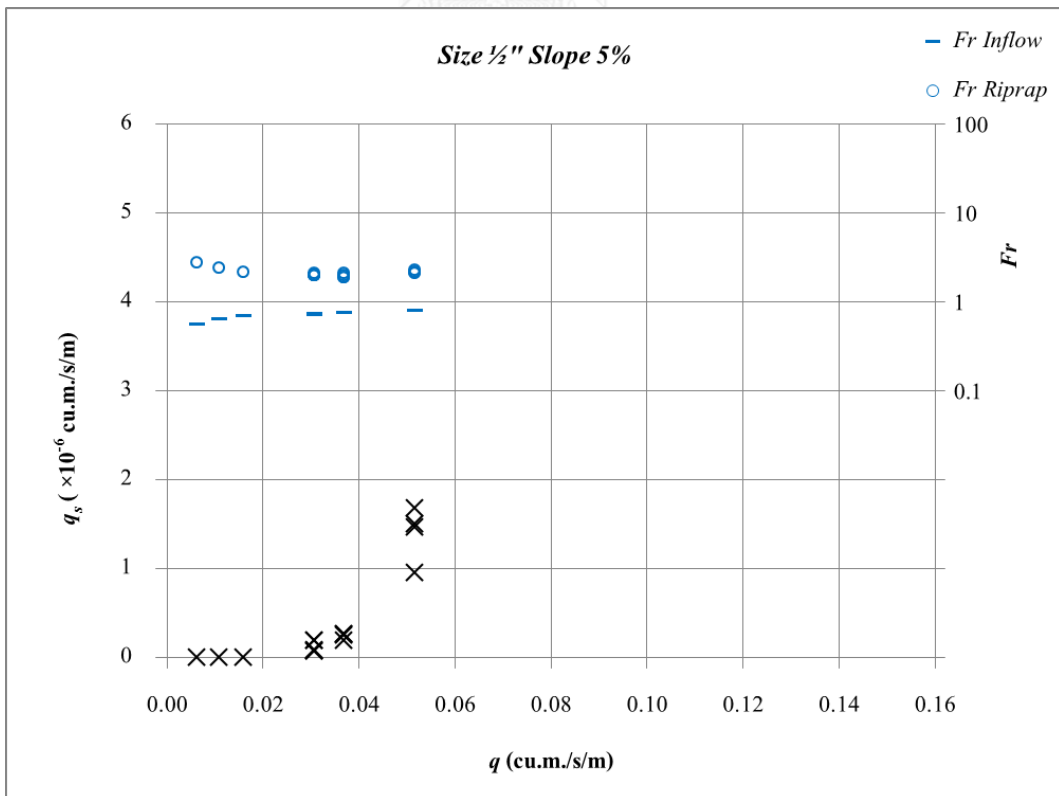
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note	
0.006167	0.00×10^{-6}	0.8	2.3	0.771	0.268	2.75	0.56	0.018	984	n/a	
0.011000	0.00×10^{-6}	1.3	3.1	0.846	0.355	2.37	0.64	0.029	1,238	n/a	
0.016000	0.00×10^{-6}	1.8	3.8	0.889	0.421	2.12	0.69	0.039	1,444	n/a	
0.030833	0.19×10^{-6}	2.9	5.7	1.063	0.541	1.99	0.72	0.061	1,809		
	0.08×10^{-6}	2.9	5.6	1.063	0.551	1.99	0.74	0.061	1,809		
	0.07×10^{-6}	2.9	5.7	1.063	0.541	1.99	0.72	0.061	1,809		
	0.18×10^{-6}	2.9	5.7	1.063	0.541	1.99	0.72	0.061	1,809		
	0.07×10^{-6}	2.8	5.6	1.101	0.551	2.10	0.74	0.059	1,778		
	0.037000	0.25×10^{-6}	3.4	6.3	1.088	0.587	1.88	0.75	0.070	1,936	
		0.26×10^{-6}	3.4	6.3	1.088	0.587	1.88	0.75	0.070	1,936	
0.26×10^{-6}		3.3	6.3	1.121	0.587	1.97	0.75	0.069	1,920		
0.19×10^{-6}		3.2	6.3	1.156	0.587	2.06	0.75	0.067	1,889		
0.051667	1.49×10^{-6}	4.0	7.6	1.292	0.680	2.06	0.79	0.082	2,095		
	1.46×10^{-6}	3.9	7.6	1.325	0.680	2.14	0.79	0.080	2,063		
	1.67×10^{-6}	3.9	7.6	1.325	0.680	2.14	0.79	0.080	2,063		
	0.95×10^{-6}	3.8	7.6	1.360	0.680	2.23	0.79	0.079	2,047		

ตารางที่ 3-6 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดต้งน้ำ 10%

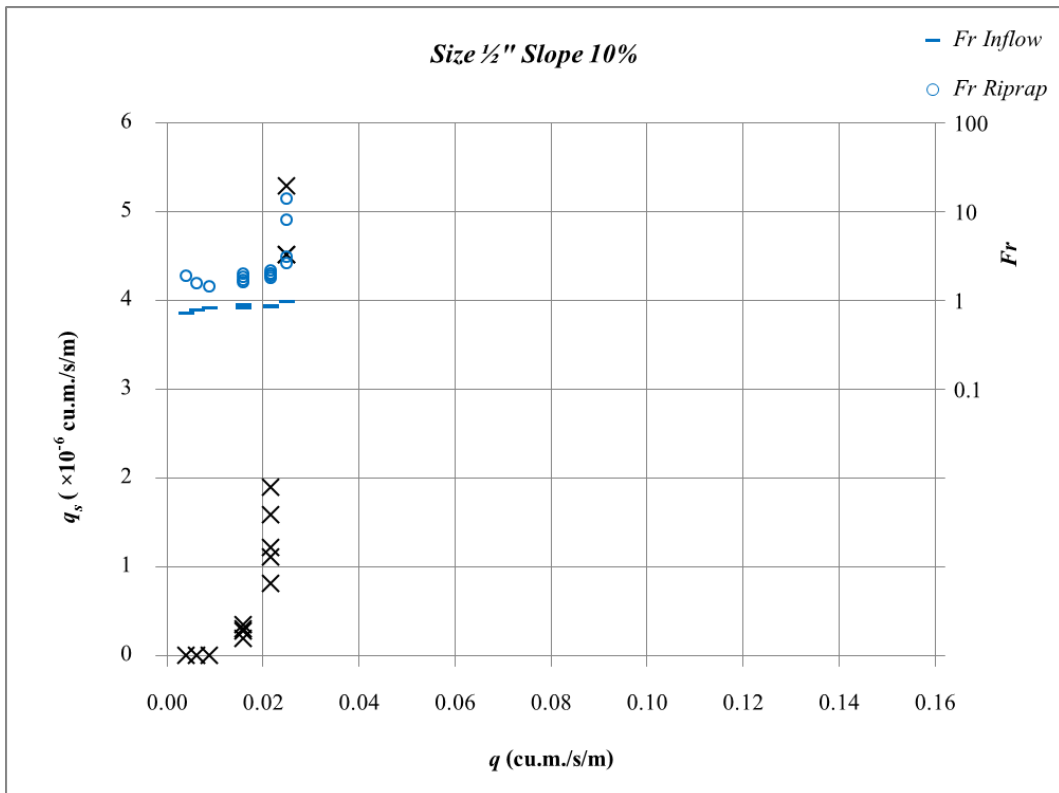
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.004167	0.00×10^{-6}	0.8	1.5	0.521	0.278	1.86	0.72	0.036	1,381	n/a
0.006333	0.00×10^{-6}	1.2	1.9	0.528	0.333	1.54	0.77	0.053	1,682	n/a
0.009000	0.00×10^{-6}	1.6	2.3	0.563	0.391	1.42	0.82	0.070	1,936	n/a
0.016000	0.27×10^{-6}	2.2	3.4	0.727	0.471	1.56	0.82	0.095	2,254	
	0.34×10^{-6}	2.1	3.4	0.762	0.471	1.68	0.82	0.091	2,206	
	0.19×10^{-6}	2.0	3.4	0.800	0.471	1.81	0.82	0.087	2,158	
	0.29×10^{-6}	1.9	3.2	0.842	0.500	1.95	0.89	0.084	2,111	
0.021667	1.21×10^{-6}	2.5	4.0	0.867	0.542	1.75	0.87	0.108	2,397	
	0.81×10^{-6}	2.4	4.1	0.903	0.528	1.86	0.83	0.103	2,349	
	1.10×10^{-6}	2.3	4.0	0.942	0.542	1.98	0.87	0.099	2,301	
	1.58×10^{-6}	2.3	4.0	0.942	0.542	1.98	0.87	0.099	2,301	
	1.89×10^{-6}	2.2	4.0	0.985	0.542	2.12	0.87	0.095	2,254	
0.025000	4.51×10^{-6}	2.1	4.1	1.190	0.610	2.62	0.96	0.091	2,206	
	6.56×10^{-6}	1.9	4.1	1.316	0.610	3.05	0.96	0.084	2,111	
	5.28×10^{-6}	1.0	4.1	2.500	0.610	7.98	0.96	0.045	1,555	
	4.51×10^{-6}	0.7	4.1	3.571	0.610	13.63	0.96	0.032	1,301	



รูปที่ 3-9 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1/2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%



รูปที่ 3-10 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1/2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%



รูปที่ 3-11 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%



ตารางที่ 3-7 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

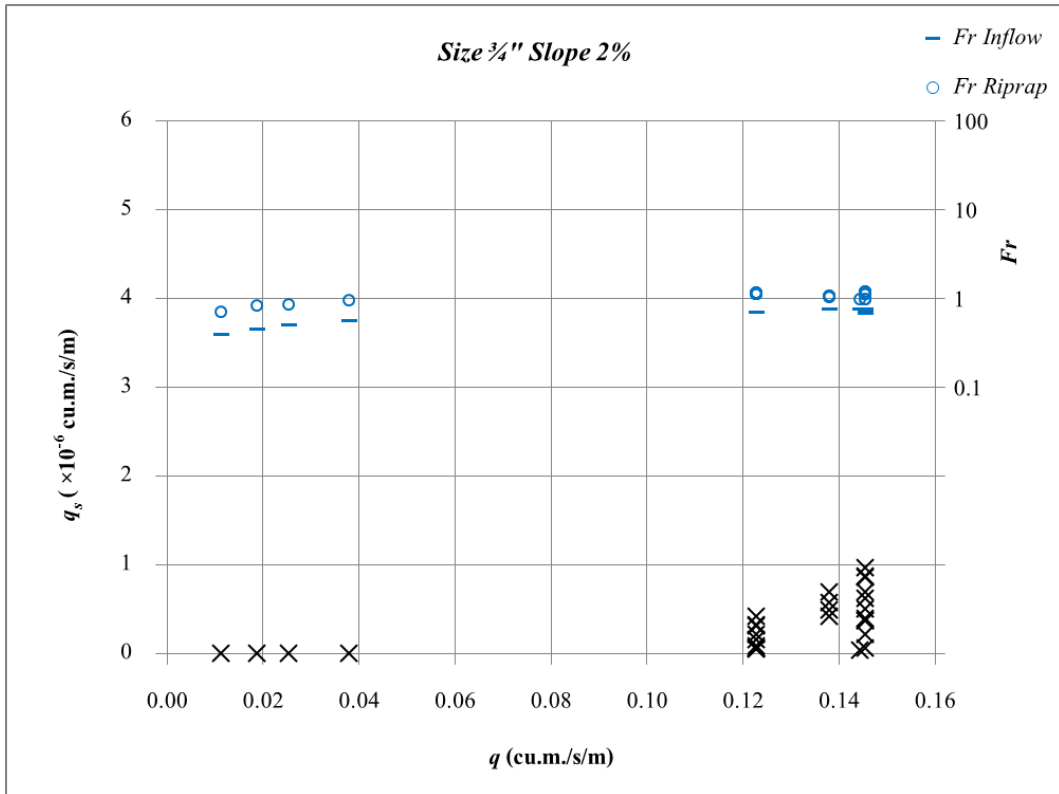
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.011333	0.00×10^{-6}	3.0	4.4	0.378	0.258	0.70	0.39	0.017	1,738	n/a
0.018833	0.00×10^{-6}	3.8	5.6	0.496	0.336	0.81	0.45	0.021	1,928	n/a
0.025500	0.00×10^{-6}	4.5	6.4	0.567	0.398	0.85	0.50	0.024	2,095	n/a
0.038000	0.00×10^{-6}	5.5	7.8	0.691	0.487	0.94	0.56	0.029	2,285	n/a
0.122833	0.21×10^{-6}	10.5	14.7	1.170	0.836	1.15	0.70	0.048	2,952	
	0.15×10^{-6}	10.5	14.7	1.170	0.836	1.15	0.70	0.048	2,952	
	0.05×10^{-6}	10.5	14.7	1.170	0.836	1.15	0.70	0.048	2,952	
	0.08×10^{-6}	10.5	14.7	1.170	0.836	1.15	0.70	0.048	2,952	
	0.30×10^{-6}	10.8	14.8	1.137	0.830	1.10	0.69	0.049	2,976	
	0.41×10^{-6}	10.8	14.8	1.137	0.830	1.10	0.69	0.049	2,976	
	0.32×10^{-6}	10.7	14.8	1.148	0.830	1.12	0.69	0.048	2,952	
	0.06×10^{-6}	10.7	14.7	1.148	0.836	1.12	0.70	0.048	2,952	
	0.04×10^{-6}	10.7	14.7	1.148	0.836	1.12	0.70	0.048	2,952	
0.138167	0.41×10^{-6}	12.3	15.0	1.123	0.921	1.02	0.76	0.054	3,119	
	0.69×10^{-6}	12.2	15.1	1.133	0.915	1.04	0.75	0.053	3,095	
	0.48×10^{-6}	12.2	15.0	1.133	0.921	1.04	0.76	0.053	3,095	
	0.57×10^{-6}	12.1	15.0	1.142	0.921	1.05	0.76	0.053	3,095	
0.144500	0.03×10^{-6}	13.1	15.4	1.103	0.938	0.97	0.76	0.056	3,190	
0.145500	0.36×10^{-6}	13.3	15.5	1.094	0.939	0.96	0.76	0.056	3,190	
	0.06×10^{-6}	13.2	15.5	1.102	0.939	0.97	0.76	0.056	3,190	
	0.21×10^{-6}	12.1	16.5	1.202	0.882	1.10	0.69	0.053	3,095	
	0.85×10^{-6}	12.1	16.4	1.202	0.887	1.10	0.70	0.053	3,095	
	0.50×10^{-6}	12.0	16.4	1.213	0.887	1.12	0.70	0.053	3,095	
	0.61×10^{-6}	12.0	16.4	1.213	0.887	1.12	0.70	0.053	3,095	
	0.96×10^{-6}	11.8	16.7	1.233	0.871	1.15	0.68	0.052	3,071	
	0.36×10^{-6}	11.7	16.7	1.244	0.871	1.16	0.68	0.052	3,071	
	0.69×10^{-6}	11.7	16.7	1.244	0.871	1.16	0.68	0.052	3,071	
	0.39×10^{-6}	11.6	16.7	1.254	0.871	1.18	0.68	0.051	3,047	
	0.86×10^{-6}	11.6	16.7	1.254	0.871	1.18	0.68	0.051	3,047	

ตารางที่ 3-8 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ๓/๔ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

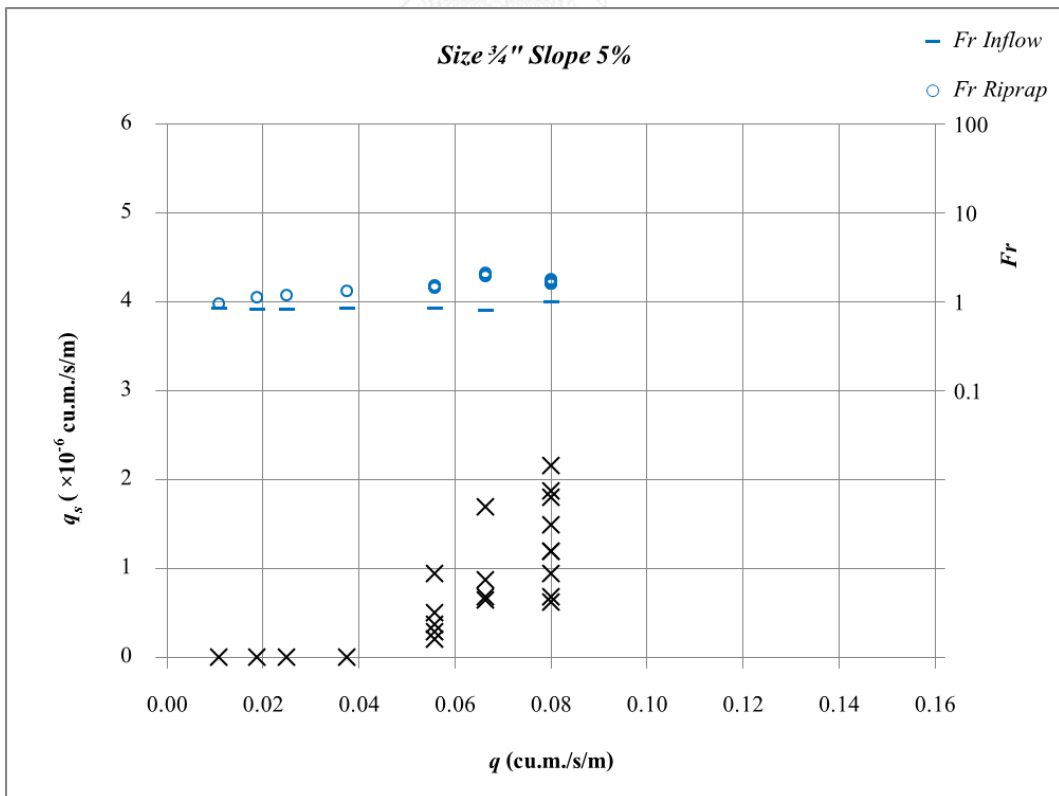
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.011000	0.00×10^{-6}	2.4	2.6	0.458	0.423	0.94	0.84	0.034	2,476	n/a
0.018833	0.00×10^{-6}	3.1	3.8	0.608	0.496	1.10	0.81	0.043	2,785	n/a
0.025000	0.00×10^{-6}	3.6	4.6	0.694	0.543	1.17	0.81	0.049	2,976	n/a
0.037500	0.00×10^{-6}	4.4	5.9	0.852	0.636	1.30	0.84	0.059	3,261	n/a
0.055833	0.28×10^{-6}	5.3	7.7	1.053	0.725	1.46	0.83	0.069	3,547	
	0.36×10^{-6}	5.4	7.6	1.034	0.735	1.42	0.85	0.070	3,571	
	0.93×10^{-6}	5.3	7.6	1.053	0.735	1.46	0.85	0.069	3,547	
	0.20×10^{-6}	5.2	7.6	1.074	0.735	1.50	0.85	0.068	3,500	
	0.49×10^{-6}	5.2	7.7	1.074	0.725	1.50	0.83	0.068	3,500	
0.066333	0.86×10^{-6}	5.0	8.9	1.327	0.745	1.89	0.80	0.066	3,452	
	0.67×10^{-6}	4.9	8.9	1.354	0.745	1.95	0.80	0.065	3,428	
	0.64×10^{-6}	4.8	8.9	1.382	0.745	2.01	0.80	0.064	3,404	
	1.69×10^{-6}	4.7	8.9	1.411	0.745	2.08	0.80	0.062	3,357	
0.080167	2.15×10^{-6}	6.4	8.8	1.253	0.911	1.58	0.98	0.081	3,833	
	1.48×10^{-6}	6.4	8.7	1.253	0.921	1.58	1.00	0.081	3,833	
	0.61×10^{-6}	6.3	8.7	1.272	0.921	1.62	1.00	0.080	3,809	
	0.93×10^{-6}	6.2	8.7	1.293	0.921	1.66	1.00	0.079	3,785	
	1.87×10^{-6}	6.4	8.8	1.253	0.911	1.58	0.98	0.081	3,833	
	1.18×10^{-6}	6.2	8.8	1.293	0.911	1.66	0.98	0.079	3,785	
	1.19×10^{-6}	6.2	8.7	1.293	0.921	1.66	1.00	0.079	3,785	
	0.67×10^{-6}	6.1	8.7	1.314	0.921	1.70	1.00	0.078	3,761	
1.79×10^{-6}	6.0	8.7	1.336	0.921	1.74	1.00	0.077	3,738		

ตารางที่ 3-9 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดต้งน้ำ 10%

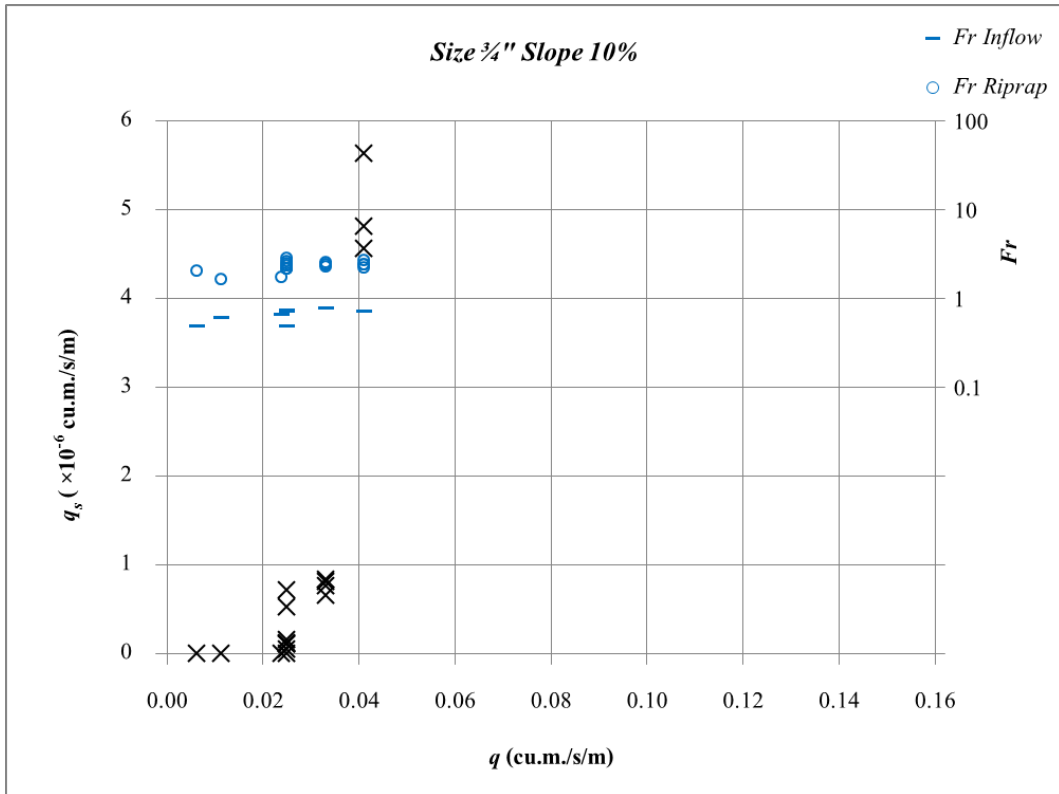
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note	
0.006333	0.00×10^{-6}	1.0	2.6	0.633	0.244	2.02	0.48	0.030	2,333	n/a	
0.011333	0.00×10^{-6}	1.7	3.3	0.667	0.343	1.63	0.60	0.050	3,000	n/a	
0.023833	0.00×10^{-6}	2.7	5.1	0.883	0.467	1.72	0.66	0.076	3,714	n/a	
0.025000	0.71×10^{-6}	2.3	5.0	1.087	0.500	2.29	0.71	0.066	3,452		
	0.52×10^{-6}	2.2	4.9	1.136	0.510	2.45	0.74	0.063	3,381		
	0.04×10^{-6}	2.1	4.9	1.190	0.510	2.62	0.74	0.060	3,309		
	0.00×10^{-6}	2.0	4.9	1.250	0.510	2.82	0.74	0.058	3,238	n/a	
	0.11×10^{-6}	2.4	4.9	1.042	0.510	2.15	0.74	0.069	3,523		
	0.10×10^{-6}	2.4	4.9	1.042	0.510	2.15	0.74	0.069	3,523		
	0.15×10^{-6}	2.3	6.4	1.087	0.391	2.29	0.49	0.066	3,452		
	0.10×10^{-6}	2.4	4.9	1.042	0.510	2.15	0.74	0.069	3,523		
	0.033167	0.65×10^{-6}	2.8	5.7	1.185	0.582	2.26	0.78	0.078	3,761	
		0.80×10^{-6}	2.7	5.7	1.228	0.582	2.39	0.78	0.076	3,714	
0.83×10^{-6}		2.7	5.7	1.228	0.582	2.39	0.78	0.076	3,714		
0.76×10^{-6}		2.6	5.7	1.276	0.582	2.53	0.78	0.073	3,642		
0.041000	6.49×10^{-6}	3.1	6.9	1.323	0.594	2.40	0.72	0.086	3,952		
	4.80×10^{-6}	3.3	6.9	1.242	0.594	2.18	0.72	0.092	4,071		
	5.63×10^{-6}	3.1	6.9	1.323	0.594	2.40	0.72	0.086	3,952		
	4.56×10^{-6}	2.9	6.9	1.414	0.594	2.65	0.72	0.081	3,833		



รูปที่ 3-12 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 3/4 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%



รูปที่ 3-13 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 3/4 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%



รูปที่ 3-14 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 3/4 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

ตารางที่ 3-10 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

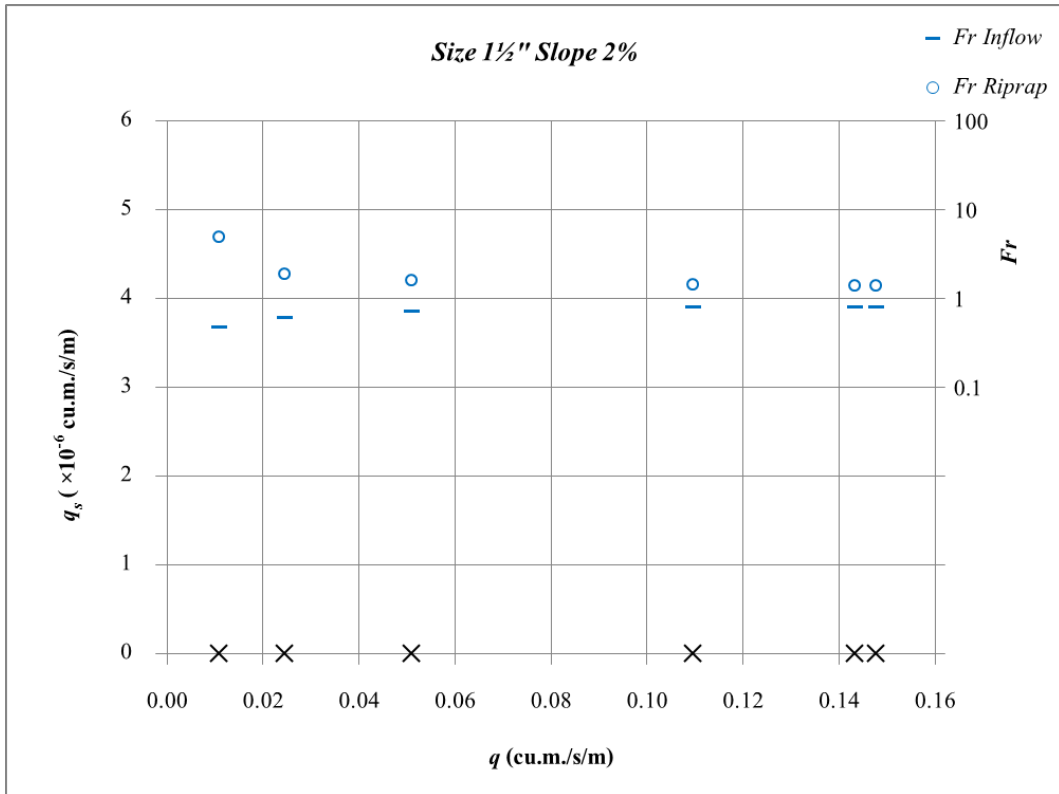
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.010833	0.00×10^{-6}	0.8	3.8	1.354	0.285	4.83	0.47	0.002	1,857	n/a
0.024667	0.00×10^{-6}	2.6	5.5	0.949	0.448	1.88	0.61	0.007	3,238	n/a
0.051000	0.00×10^{-6}	4.7	8.1	1.085	0.630	1.60	0.71	0.012	4,238	n/a
0.109667	0.00×10^{-6}	8.5	12.5	1.290	0.877	1.41	0.79	0.020	5,428	n/a
0.143333	0.00×10^{-6}	10.4	15.0	1.378	0.956	1.36	0.79	0.023	5,856	n/a
0.147667	0.00×10^{-6}	10.6	15.3	1.393	0.965	1.37	0.79	0.024	5,904	n/a

ตารางที่ 3-11 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

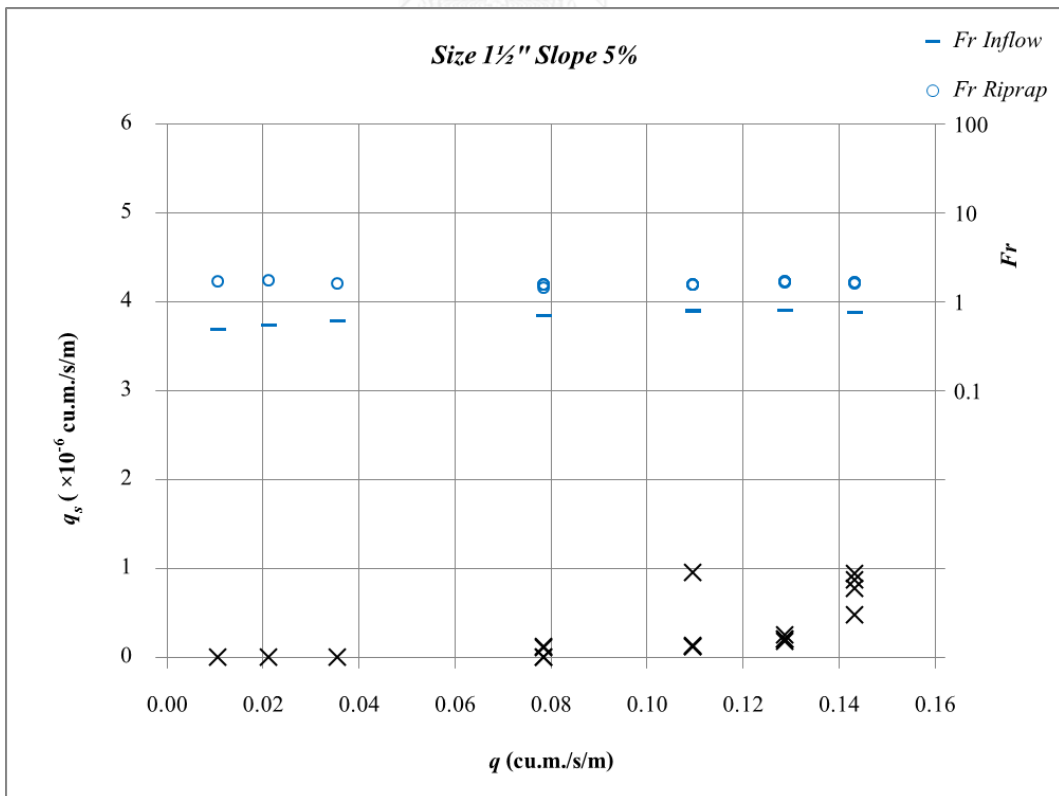
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.010667	0.00×10^{-6}	1.6	3.7	0.667	0.288	1.68	0.48	0.011	4,095	n/a
0.021333	0.00×10^{-6}	2.5	5.4	0.853	0.395	1.72	0.54	0.017	5,047	n/a
0.035500	0.00×10^{-6}	3.7	7.1	0.959	0.500	1.59	0.60	0.025	6,047	n/a
0.078667	0.11×10^{-6}	6.8	11.0	1.157	0.715	1.42	0.69	0.042	7,856	
	0.00×10^{-6}	6.4	11.0	1.229	0.715	1.55	0.69	0.040	7,666	n/a
	0.00×10^{-6}	6.4	11.0	1.229	0.715	1.55	0.69	0.040	7,666	n/a
	0.10×10^{-6}	6.4	11.0	1.229	0.715	1.55	0.69	0.040	7,666	
0.109667	0.95×10^{-6}	8.1	12.5	1.354	0.877	1.52	0.79	0.048	8,428	
	0.11×10^{-6}	8.0	12.6	1.371	0.870	1.55	0.78	0.048	8,380	
	0.11×10^{-6}	8.0	12.5	1.371	0.877	1.55	0.79	0.048	8,380	
	0.12×10^{-6}	8.0	12.5	1.371	0.877	1.55	0.79	0.048	8,380	
0.128833	0.20×10^{-6}	8.6	13.9	1.498	0.927	1.63	0.79	0.050	8,618	
	0.20×10^{-6}	8.5	13.9	1.516	0.927	1.66	0.79	0.050	8,570	
	0.25×10^{-6}	8.5	13.9	1.516	0.927	1.66	0.79	0.050	8,570	
	0.17×10^{-6}	8.4	13.9	1.534	0.927	1.69	0.79	0.049	8,523	
0.143333	0.77×10^{-6}	9.3	15.5	1.541	0.925	1.61	0.75	0.054	8,904	
	0.86×10^{-6}	9.4	15.5	1.525	0.925	1.59	0.75	0.054	8,904	
	0.94×10^{-6}	9.3	15.4	1.541	0.931	1.61	0.76	0.054	8,904	
	0.47×10^{-6}	9.2	15.3	1.558	0.937	1.64	0.76	0.053	8,856	

ตารางที่ 3-12 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

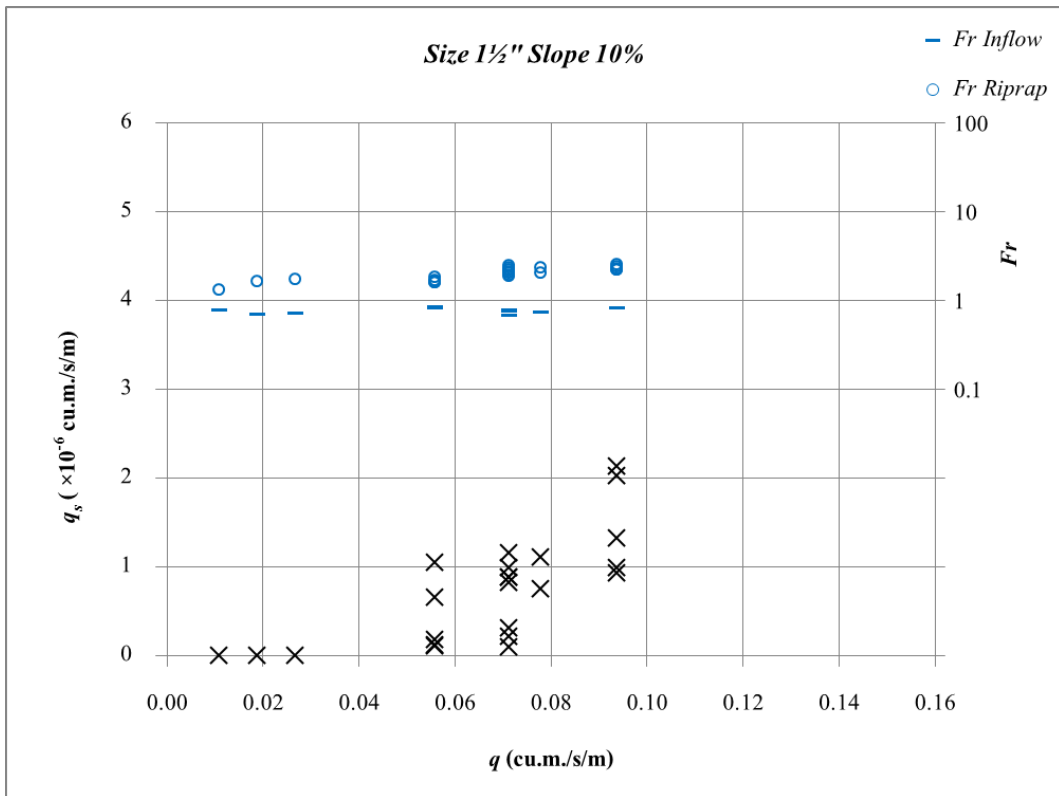
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note	
0.010833	0.00×10^{-6}	1.9	2.7	0.570	0.401	1.32	0.78	0.027	6,333	n/a	
0.018833	0.00×10^{-6}	2.4	4.2	0.785	0.448	1.62	0.70	0.034	7,047	n/a	
0.026667	0.00×10^{-6}	2.9	5.2	0.920	0.513	1.72	0.72	0.040	7,666	n/a	
0.055833	0.11×10^{-6}	5.0	7.8	1.117	0.716	1.59	0.82	0.065	9,761		
	0.10×10^{-6}	5.0	7.7	1.117	0.725	1.59	0.83	0.065	9,761		
	0.65×10^{-6}	4.9	7.7	1.139	0.725	1.64	0.83	0.063	9,665		
	1.04×10^{-6}	4.8	7.7	1.163	0.725	1.69	0.83	0.063	9,618		
	0.17×10^{-6}	4.6	7.7	1.214	0.725	1.81	0.83	0.060	9,427		
	0.071333	0.87×10^{-6}	5.2	9.6	1.372	0.743	1.92	0.77	0.067	9,904	
		1.15×10^{-6}	4.8	9.5	1.486	0.751	2.17	0.78	0.063	9,618	
0.88×10^{-6}		4.9	9.5	1.456	0.751	2.10	0.78	0.063	9,665		
0.82×10^{-6}		4.6	9.5	1.551	0.751	2.31	0.78	0.060	9,427		
0.98×10^{-6}		4.4	9.5	1.621	0.751	2.47	0.78	0.058	9,237		
0.09×10^{-6}		5.0	9.7	1.427	0.735	2.04	0.75	0.065	9,761		
0.30×10^{-6}		4.8	9.7	1.486	0.735	2.17	0.75	0.063	9,618		
0.077833	0.21×10^{-6}	5.3	10.5	1.346	0.679	1.87	0.67	0.068	9,999		
	0.75×10^{-6}	5.3	10.5	1.469	0.741	2.04	0.73	0.068	9,999		
	1.10×10^{-6}	4.9	10.5	1.588	0.741	2.29	0.73	0.063	9,665		
0.093833	1.32×10^{-6}	5.7	11.1	1.646	0.845	2.20	0.81	0.072	10,332		
	0.92×10^{-6}	5.7	11.1	1.646	0.845	2.20	0.81	0.072	10,332		
	2.13×10^{-6}	5.6	11.1	1.676	0.845	2.26	0.81	0.071	10,237		
	2.02×10^{-6}	5.4	11.1	1.738	0.845	2.39	0.81	0.069	10,094		
	0.98×10^{-6}	5.2	11.1	1.804	0.845	2.53	0.81	0.067	9,904		



รูปที่ 3-15 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%



รูปที่ 3-16 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%



รูปที่ 3-17 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

ตารางที่ 3-13 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.010667	0.00×10^{-6}	0.9	3.5	1.185	0.305	3.99	0.52	0.002	2,603	n/a
0.021333	0.00×10^{-6}	2.3	5.1	0.928	0.418	1.95	0.59	0.005	4,126	n/a
0.037000	0.00×10^{-6}	3.7	6.8	1.000	0.544	1.66	0.67	0.007	5,079	n/a
0.065000	0.00×10^{-6}	5.7	9.7	1.140	0.670	1.52	0.69	0.011	6,158	n/a
0.121000	0.00×10^{-6}	9.2	13.4	1.315	0.903	1.38	0.79	0.016	7,491	n/a
0.143333	0.00×10^{-6}	10.3	15.1	1.392	0.949	1.38	0.78	0.017	7,809	n/a

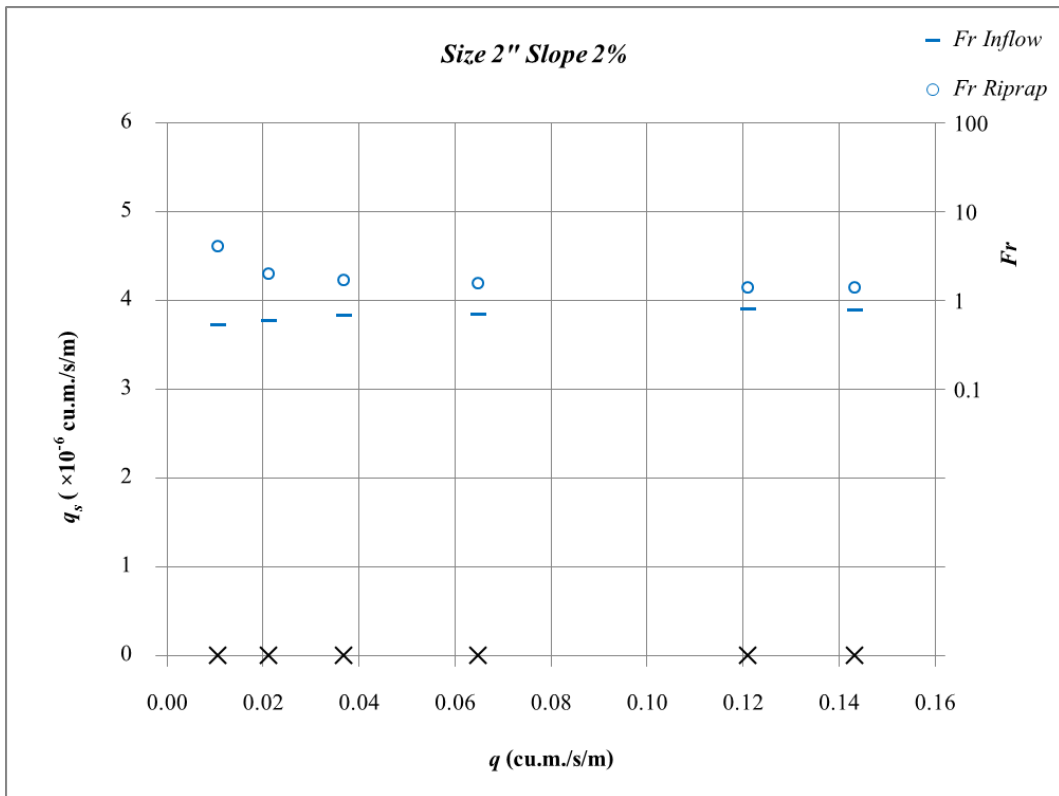
ตารางที่ 3-14 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.010667	0.00×10^{-6}	0.8	3.0	1.333	0.356	4.76	0.66	0.004	3,936	n/a
0.020667	0.00×10^{-6}	1.8	4.5	1.148	0.459	2.73	0.69	0.010	5,777	n/a
0.036000	0.00×10^{-6}	3.0	6.3	1.200	0.571	2.21	0.73	0.016	7,364	n/a
0.065000	0.00×10^{-6}	4.9	8.9	1.327	0.730	1.91	0.78	0.024	9,142	n/a
0.143333	0.00×10^{-6}	8.9	14.7	1.610	0.975	1.72	0.81	0.039	11,618	n/a
	0.00×10^{-6}	8.9	14.6	1.610	0.982	1.72	0.82	0.039	11,618	n/a
	0.18×10^{-6}	8.9	14.6	1.610	0.982	1.72	0.82	0.039	11,618	
	0.00×10^{-6}	8.8	14.6	1.629	0.982	1.75	0.82	0.039	11,618	n/a

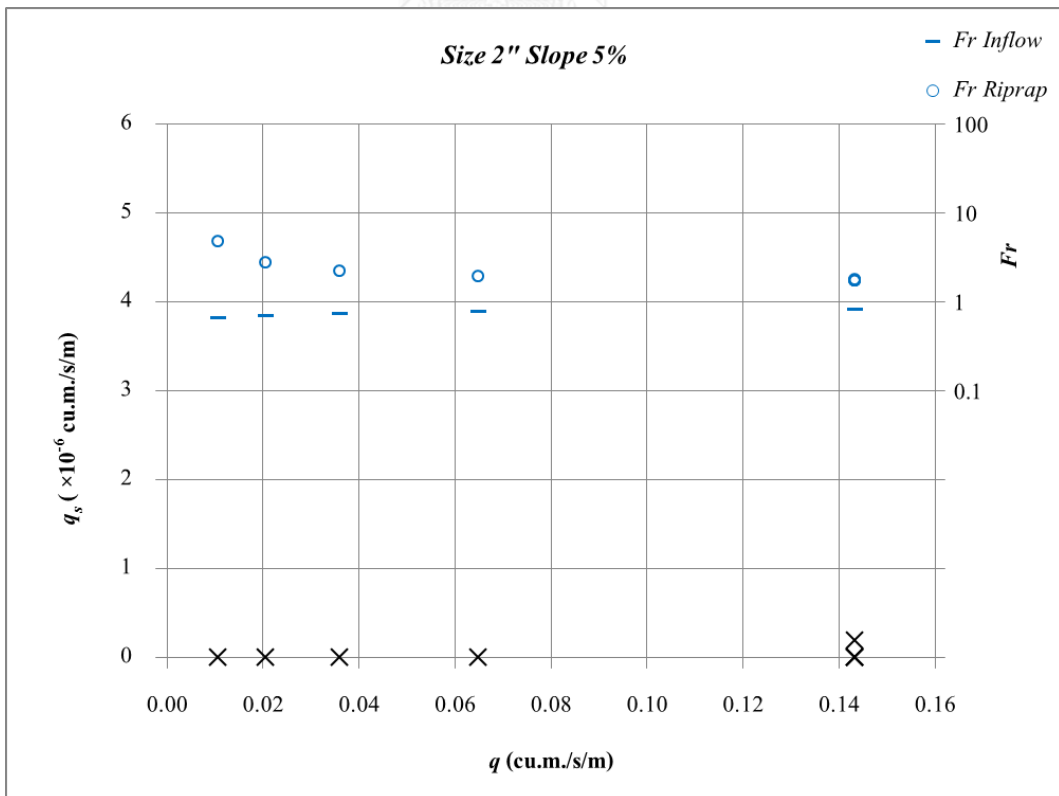
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-15 สรุปข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

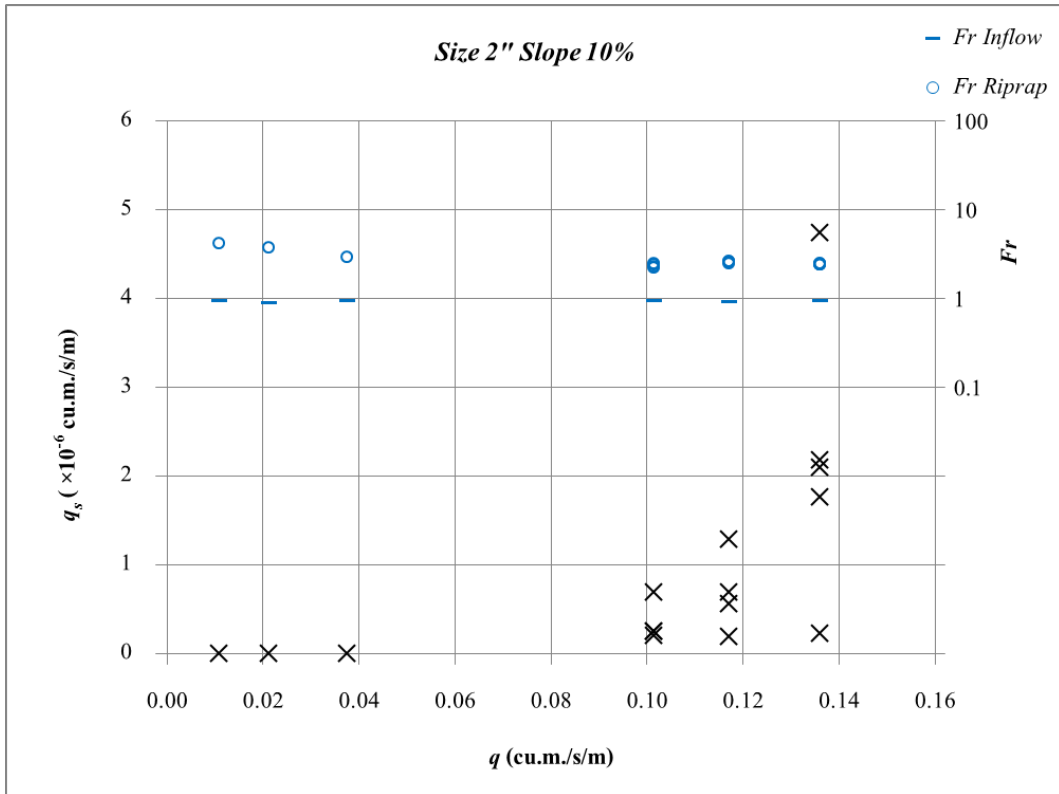
q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	ψ	Rn_*	Note
0.011000	0.00×10^{-6}	0.9	2.4	1.222	0.458	4.11	0.94	0.010	5,841	n/a
0.021333	0.00×10^{-6}	1.5	3.9	1.422	0.547	3.71	0.88	0.016	7,491	n/a
0.037500	0.00×10^{-6}	2.6	5.4	1.442	0.694	2.86	0.95	0.027	9,713	n/a
0.101500	0.20×10^{-6}	6.0	10.7	1.692	0.949	2.21	0.93	0.056	14,030	
	0.25×10^{-6}	5.9	10.7	1.720	0.949	2.26	0.93	0.056	13,966	
	0.68×10^{-6}	5.7	10.7	1.781	0.949	2.38	0.93	0.054	13,776	
	0.25×10^{-6}	5.6	10.7	1.813	0.949	2.45	0.93	0.053	13,649	
0.117167	0.18×10^{-6}	6.1	11.8	1.921	0.993	2.48	0.92	0.057	14,157	
	0.55×10^{-6}	6.0	11.8	1.953	0.993	2.55	0.92	0.056	14,030	
	1.28×10^{-6}	5.9	11.8	1.986	0.993	2.61	0.92	0.056	13,966	
	0.68×10^{-6}	5.9	11.8	1.986	0.993	2.61	0.92	0.056	13,966	
0.136000	1.76×10^{-6}	6.9	13.0	1.971	1.046	2.40	0.93	0.064	14,919	
	0.22×10^{-6}	6.8	13.0	2.000	1.046	2.45	0.93	0.063	14,792	
	2.17×10^{-6}	6.8	13.0	2.000	1.046	2.45	0.93	0.063	14,792	
	2.09×10^{-6}	6.9	13.0	1.971	1.046	2.40	0.93	0.064	14,919	
	4.74×10^{-6}	6.9	12.9	1.971	1.054	2.40	0.94	0.064	14,919	



รูปที่ 3-18 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

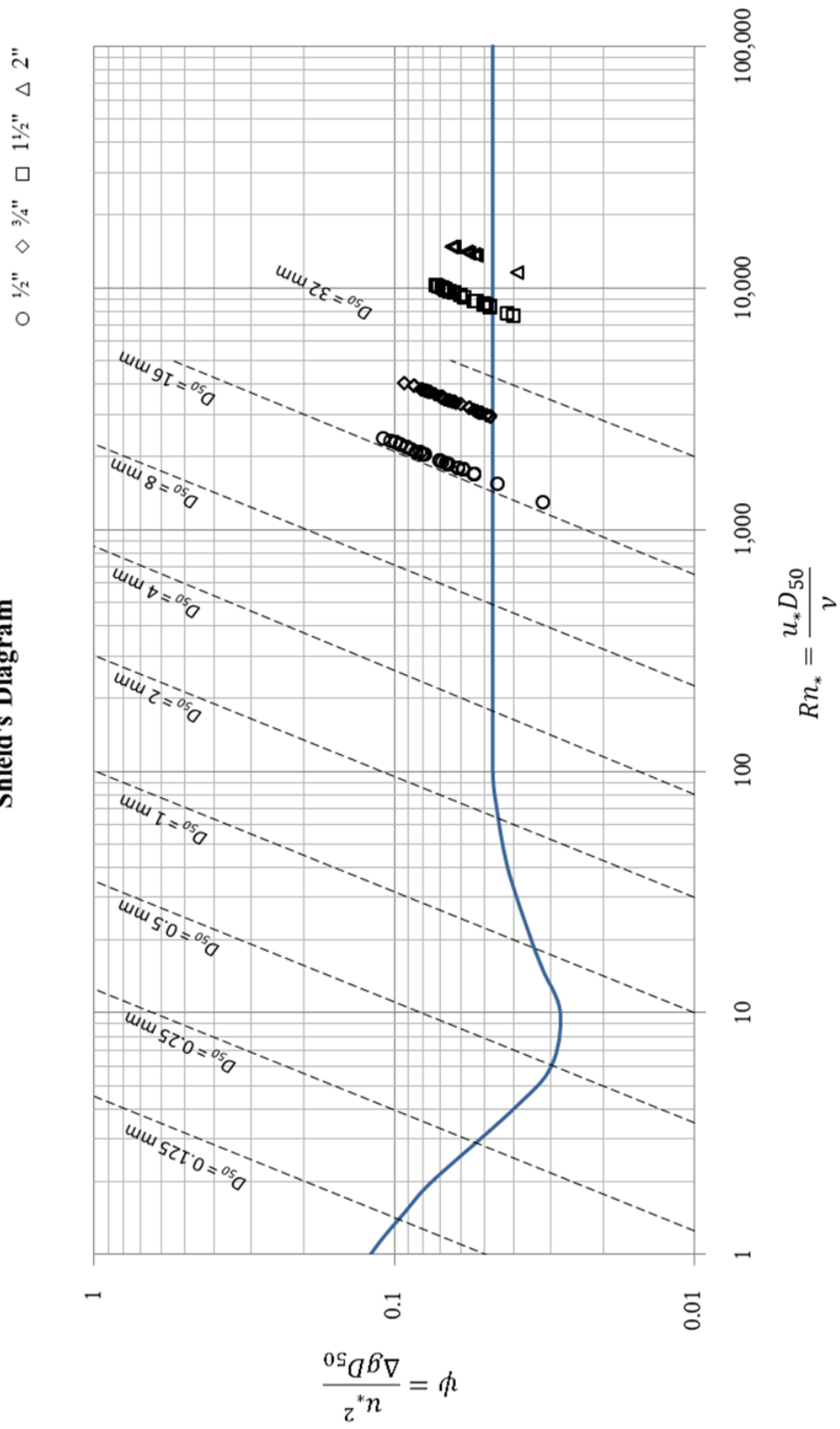


รูปที่ 3-19 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%



รูปที่ 3-20 กราฟข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

Shield's Diagram



รูปที่ 3-21 กราฟข้อมูลการทดลองในถังของ Shield

บทที่ 4 การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เบื้องต้นจากข้อมูลทั้งหมดในบทที่ 3 ตารางที่ 3-3 เห็นได้ว่า หินขนาด 1½ นิ้ว กับ 2 นิ้ว ที่ความลาดท้องน้ำ 2% ไม่มีการพัดพาท้องน้ำเกิดขึ้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ อีกทั้งหินขนาด 2 นิ้วที่ความลาดท้องน้ำ 5% มีเพียง 1 กรณี 1 ชุดข้อมูล ซึ่งไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นกรณีศึกษาและชุดข้อมูลนอกเหนือจากข้างต้นจะคัดเลือกพร้อมกับวิเคราะห์ผลต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งผลการคัดเลือกและวิเคราะห์ที่ได้แจกแจงดังตารางที่ 4-1 อันสรุปจำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูล (ในวงเล็บ) รวมทั้งสิ้น 23 กรณีศึกษา 66 ชุดข้อมูล โดยสามารถดูรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทั้งหมดได้ใน ภาคผนวก ค. คอลัมน์ Note ที่ระบุไว้ว่า Use

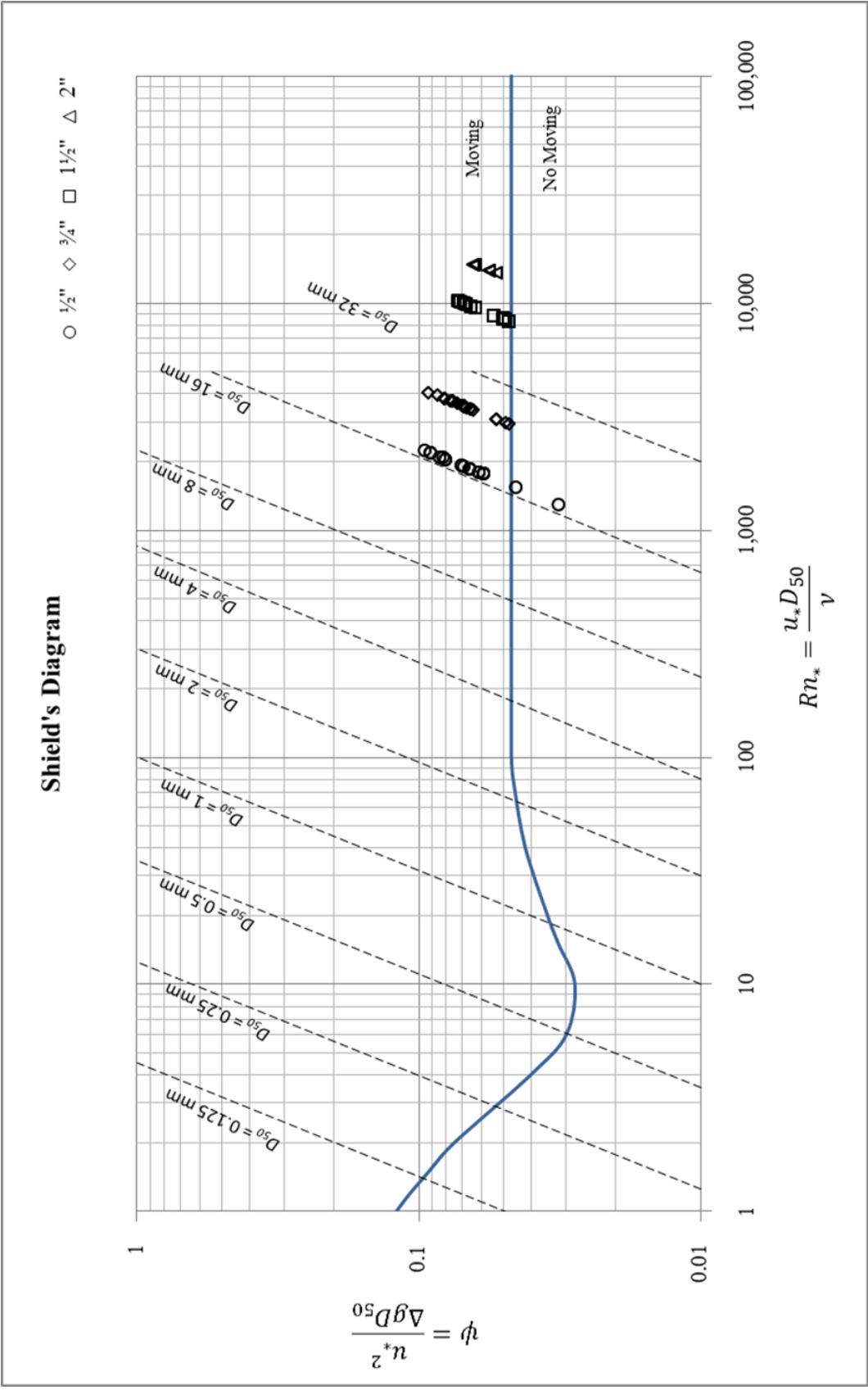
4.1 การวิเคราะห์หาอัตราการไหลแรกเคลื่อน

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการทราบถึงผลของการใช้มาตราส่วนเชิงเส้นตรงของหินที่ระหว่างแบบจำลองกายภาพกับตัวต้นแบบในเกณฑ์ของ Froude ค่าชีวิตที่ชัดเจนคืออัตราการไหลที่ทำให้โครงสร้างพังทลาย (q_f) ซึ่งการที่โครงสร้างจะสามารถพังทลายได้นั้นต้องมีการเริ่มพัดพาหินที่เกิดขึ้น ณ อัตราการไหลหนึ่งที้น้อยกว่าก่อนกำหนดให้เป็นอัตราการไหลที่วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ (q_0) หรืออัตราการไหลแรกเคลื่อน

จากการศึกษาการเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำของ Shield ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การไหล (ψ) กับเลขเรโนลด์ของอนุภาค (Rn_*) แสดงเป็นผังกอง Shield ซึ่ง Pawet (2011) กำหนดให้เส้นแบ่งสภาวะเคลื่อนที่/ไม่เคลื่อนที่ ต่อยาวออกไปเป็นแนวราบที่ $\psi = 0.047$ ตลอดเลขเรโนลด์ของอนุภาคตั้งแต่ 200 เป็นต้นไป ข้อมูลที่คัดเลือกส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสภาวะเคลื่อนที่ได้ตามทฤษฎีแต่มีข้อมูลบางส่วนที่ตกในช่วงไม่เคลื่อนที่ซึ่งที่มีการพัดพาเกิดขึ้นประกอบกับไม่มีข้อมูลที่คาบเส้นที่ชัดเจนดังผังกอง Shield รูปที่ 4-1 สันนิษฐานความคลาดเคลื่อนนี้ น่าจะมาจาก การเก็บข้อมูลในการทดลองที่ต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลาหนึ่งประกอบกับอัตราการพัดพาที่สูงทำให้ระดับท้องน้ำเริ่มต้นลดต่ำลงแต่การปรับแก้การอ่านระดับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้อ่านความลึกการไหล (y) ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง เมื่อความลึกการไหลน้อยลง รัศมีชลศาสตร์ ($R_h = By / (B + 2y)$) สำหรับหน้าตัดการไหลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า) มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ความเร็วเฉือน ($u_* = \sqrt{gR_h S}$) อันเป็นตัวแปรผันตรงของพารามิเตอร์การไหล ($\psi = u_*^2 / (\Delta g D_{50})$) และเลขเรโนลด์ของอนุภาค ($Rn_* = u_* D_{50} / \nu$) มีค่าลดลงจนตกอยู่ในช่วงไม่มีการเคลื่อนที่ตามที่เกิดขึ้นนี้ได้ แปลว่าการใช้การศึกษาของ Shield สำหรับการศึกษาไม่เหมาะสมเช่นเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Aguirre-Pe (2003), Siebel (2007) และ Beheshti (2008) ดังนั้นต้องใช้วิธีอื่นในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4-1 จำนวนกรณีศึกษาและจำนวนชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

ขนาดหิน ลาดท้องน้ำ	½ นิ้ว	¾ นิ้ว	1½ นิ้ว	2 นิ้ว	รวมกรณีศึกษา (รวมชุดข้อมูล)
2%	2 (6)	2 (4)	0 (0)	0 (0)	4 (10)
5%	3 (9)	3 (9)	3 (9)	0 (0)	9 (27)
10%	2 (6)	3 (9)	2 (6)	3 (8)	10 (29)
รวมกรณีศึกษา (รวมชุดข้อมูล)	7 (21)	8 (22)	5 (15)	3 (8)	23 (66)



รูปที่ 4-1 ข้อมูลวิเคราะห์ที่ฝั่งของ Shield

เมื่อการศึกษาของ Shield ไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลของการศึกษานี้ การวิเคราะห์แบบพื้นฐานและตรงไปตรงมาด้วยสถิติจึงถูกเลือกใช้แทน โดยพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis, ดูหลักการคำนวณได้ใน ภาคผนวก ง.) ซึ่งเป็นการหาเส้นแนวโน้มและจุดสนใจของเส้นแนวโน้ม ในลักษณะวิธีเดียวกันกับ Stage-Discharge Curve ที่ใช้หาระดับน้ำที่ไม่มีการไหลในทางน้ำเปิด (Linsley, 1988) เปรียบเส้นแนวโน้มคือระดับน้ำที่ให้อัตราการไหลต่างๆ กับการศึกษานี้คืออัตราการพัดพาท้องน้ำที่สัมพันธ์กับอัตราการไหล และจุดสนใจคือระดับที่ไม่มีการไหลซึ่งในการศึกษานี้คืออัตราการไหลแรกเคลื่อน ดังนั้นอัตราการไหลแรกเคลื่อนสามารถหาได้จากข้อมูลที่คัดเลือกมาโดยมีสมการตั้งต้นดังนี้

$$q_s = C(q - q_0)^m$$

โดย q_s คือ อัตราการพัดพาท้องน้ำเชิงปริมาตร [m³/s/m]
 q คือ อัตราการไหล [m³/s/m]
 q_0 คือ อัตราการไหลแรกเคลื่อน [m³/s/m]
 C, m คือ สัมประสิทธิ์และเลขชี้กำลังของสมการตามลำดับ

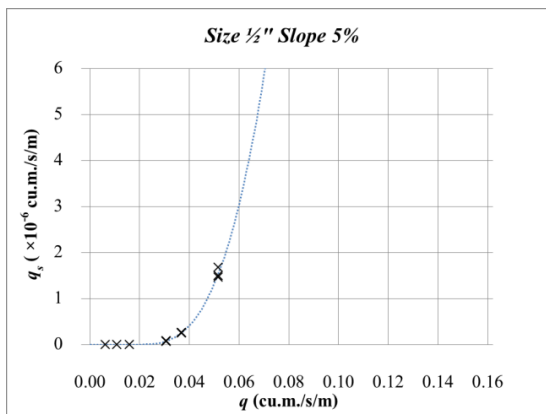
การหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยจากสมการตั้งต้นทำโดยการลองผิดลองถูก (trial & error) โดยมีหลักการคือ ไม่ใช่ค่าอัตราการไหลที่มากกว่าชุดข้อมูลจริงที่เริ่มมีการพัดพาเกิดขึ้น และให้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) สูงที่สุด พบว่าสามารถหาได้เพียง 2 กรณีคือ ขนาด 1/2 นิ้ว และขนาด 3/4 นิ้ว ที่ความลาดชัน 5% ทั้งคู่ ได้สมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ ตามลำดับข้างล่างและแสดงดังรูปที่ 4-2

1/2 นิ้ว 5%

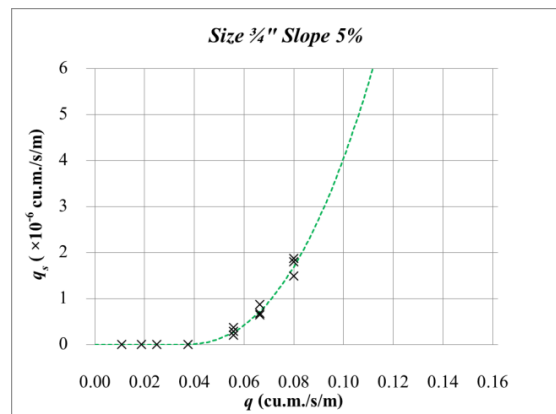
$$q_s = 0.0439(q - 0.019)^{2.9987} \quad R^2 = 0.9983$$

3/4 นิ้ว 5%

$$q_s = 0.0026(q - 0.035)^{2.3711} \quad R^2 = 0.9519$$



(ก) หินขนาด 1/2 นิ้ว ลาดท้องน้ำ 5%



(ข) หินขนาด 3/4 นิ้ว ลาดท้องน้ำ 5%

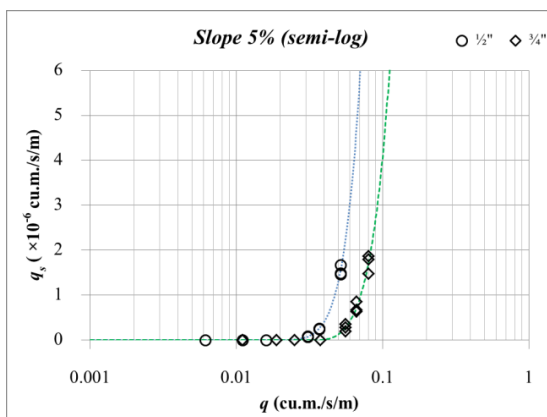
รูปที่ 4-2 ผลการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยการลองผิดลองถูก

จากการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนโดยหลักการ 2 ข้อ ข้างต้นไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้ทุกกรณีจึงสังเกตเส้นสมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ ในกราฟแบบต่างๆ อย่างมาตรฐานปกติ (normal graph, รูปที่ 4-2) มาตรฐาน semi-log (รูปที่ 4-3 ก.) และมาตรฐาน log-log (รูปที่ 4-3 ข.) พบว่าเส้นสมการของแต่ละกรณีมีลักษณะขนานกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกราฟมาตรฐาน log-log พิจารณาลักษณะเส้นที่ขนานกันภายใต้การดำเนินการทดลองนี้ที่สภาพแวดล้อมมีความคล้ายคลึงกันตลอดระยะเวลาทดลอง มีเพียงขนาดหินทิ้งและลาดท้องน้ำที่แปรเปลี่ยนได้ ดังนั้นลักษณะเส้นที่ขนานกันควรเกิดกับกรณีอื่นๆ ด้วย

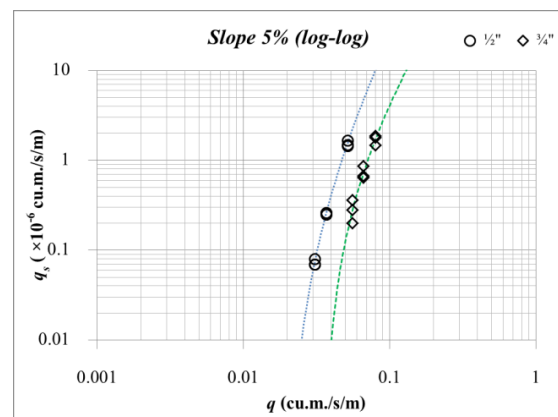
จากลักษณะเส้นที่ขนานกันที่ควรเกิดกับกรณีอื่นด้วยนั้น ทำให้หลักการลงค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนสามารถละค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจได้ เหลือเพียงไม่เลือกใช้อัตราการไหลที่มากกว่าจุดข้อมูลจริงที่เริ่มมีการพัฒนาเกิดขึ้นเท่านั้น หากแต่การลงค่าให้เส้นโค้งสมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ ขนานกันในกราฟมาตรฐาน log-log ด้วยสายตานั้นไม่เหมาะสมเท่าที่ควร จึงใช้สมการ $q_s = Cq^m$ ที่สัมประสิทธิ์ (C) และเลขชี้กำลัง (m) เดียวกันจากการวิเคราะห์ความถดถอยของแต่ละกรณี ซึ่งให้รูปแบบเป็นเส้นตรงในกราฟมาตรฐาน log-log เข้าช่วยหาอัตราการไหลแรกเคลื่อน โดยการที่เส้นตรงจะดูขนานกันได้ในกราฟมาตรฐาน log-log ต้องมีเลขชี้กำลังที่เท่ากันหรือใกล้เคียง ดังนั้นจึงลงค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนลงในการวิเคราะห์ความถดถอยให้ได้เลขชี้กำลังที่เท่ากันหรือใกล้เคียง

ผลพบว่าเมื่อยึดขนาด 1/2 นิ้ว เป็นเกณฑ์จะไม่สามารถหาค่าของขนาด 1 1/2 นิ้ว ได้เพราะค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่ให้เส้นตรงขนานกันมีค่ามากกว่าข้อมูลจริงที่เริ่มมีการพัฒนาเกิดขึ้น แต่เมื่อยึดขนาด 3/4 นิ้ว เป็นเกณฑ์แล้วสามารถหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนของขนาด 1 1/2 นิ้ว ที่ยอมรับได้ เปรียบเทียบการหาค่าที่ไม่พิจารณาเส้นตรงให้ขนาดดังรูปที่ 4-4 (ก) และการหาค่าที่พิจารณาเส้นตรงให้ขนาดดังรูปที่ 4-4 (ข) ซึ่งหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนของกรณีอื่นได้ โดยเส้นโค้งคือสมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ และเส้นตรงคือสมการ $q_s = Cq^m$

สรุปอัตราการไหลแรกเคลื่อนของแต่ละขนาดหินทิ้งและความลาดท้องน้ำดังตารางที่ 4-2 ซึ่งเห็นว่าเลขชี้กำลังของสมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ มีค่าใกล้เคียงกันที่ 2.3 และกราฟความสัมพันธ์ของเส้นสมการของแต่ละขนาดที่ความลาดชันเดียวกันดังรูปที่ 4-5 ถึงรูปที่ 4-7 โดยเส้นโค้งคือสมการ $q_s = C(q - q_0)^m$ และเส้นตรงคือสมการ $q_s = Cq^m$

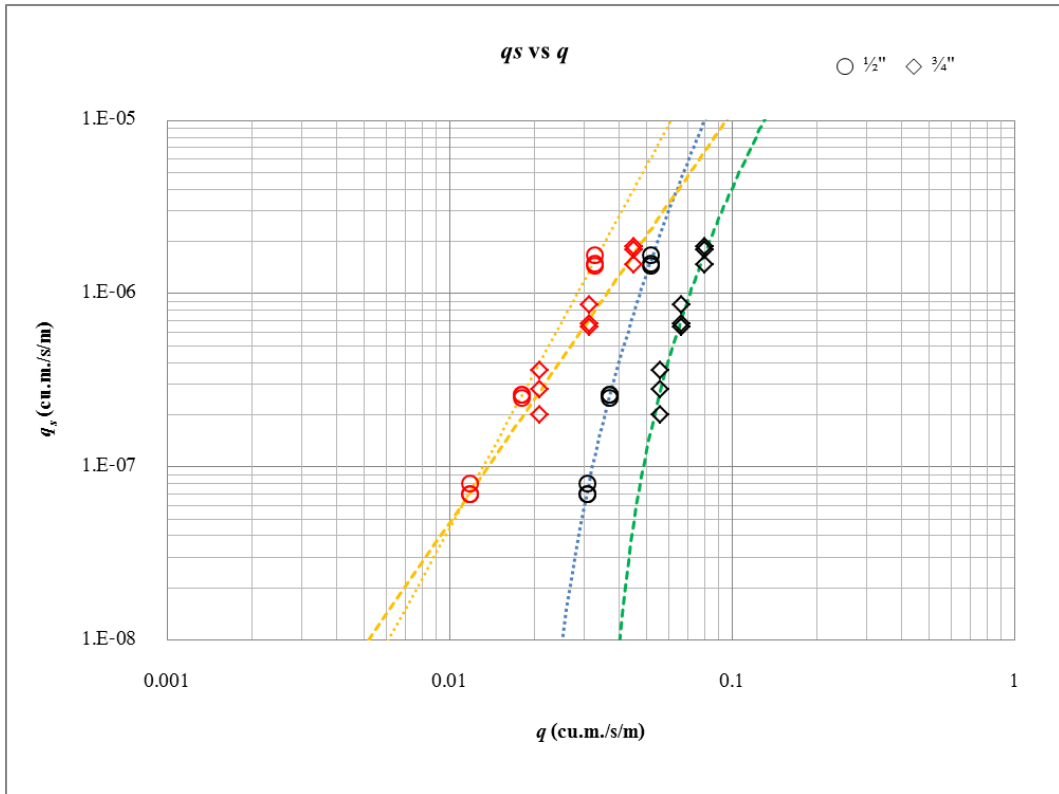


(ก) มาตรฐาน semi-log

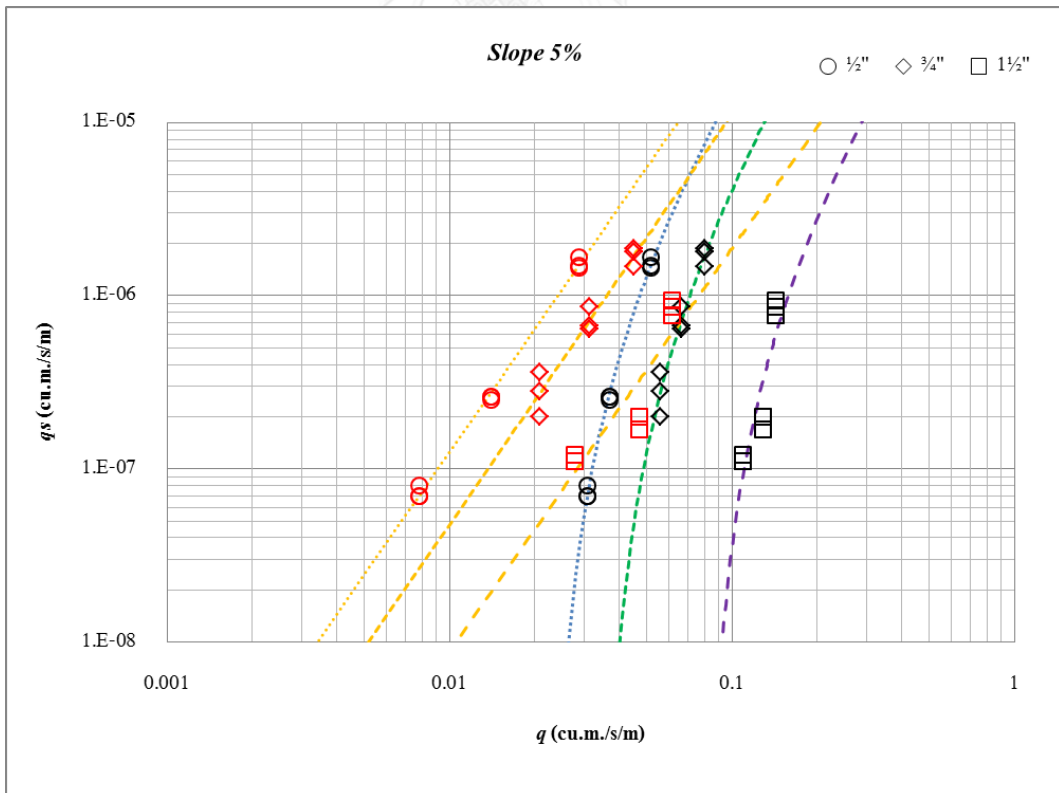


(ข) มาตรฐาน log-log

รูปที่ 4-3 ผลการหาอัตราการไหลแรกเคลื่อนในกราฟมาตรฐานต่างๆ



(ก) การหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่ไม่พิจารณาเส้นตรงให้ขนานกัน

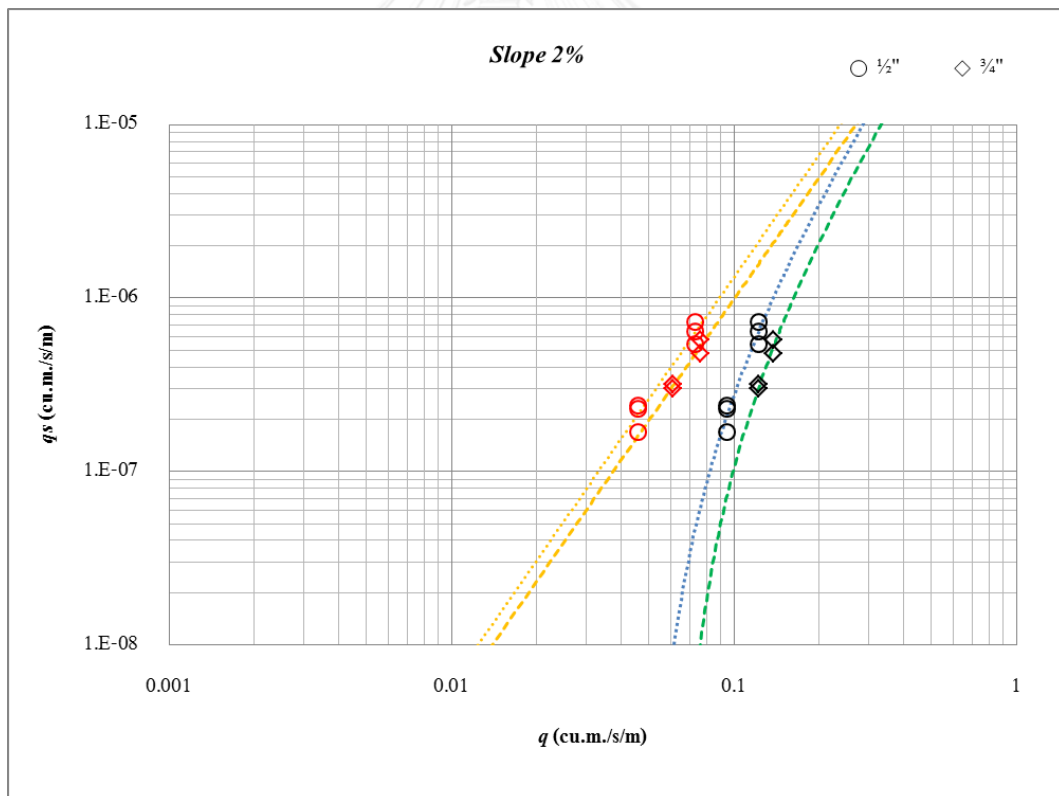


(ข) การหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่พิจารณาเส้นตรงให้ขนานกัน

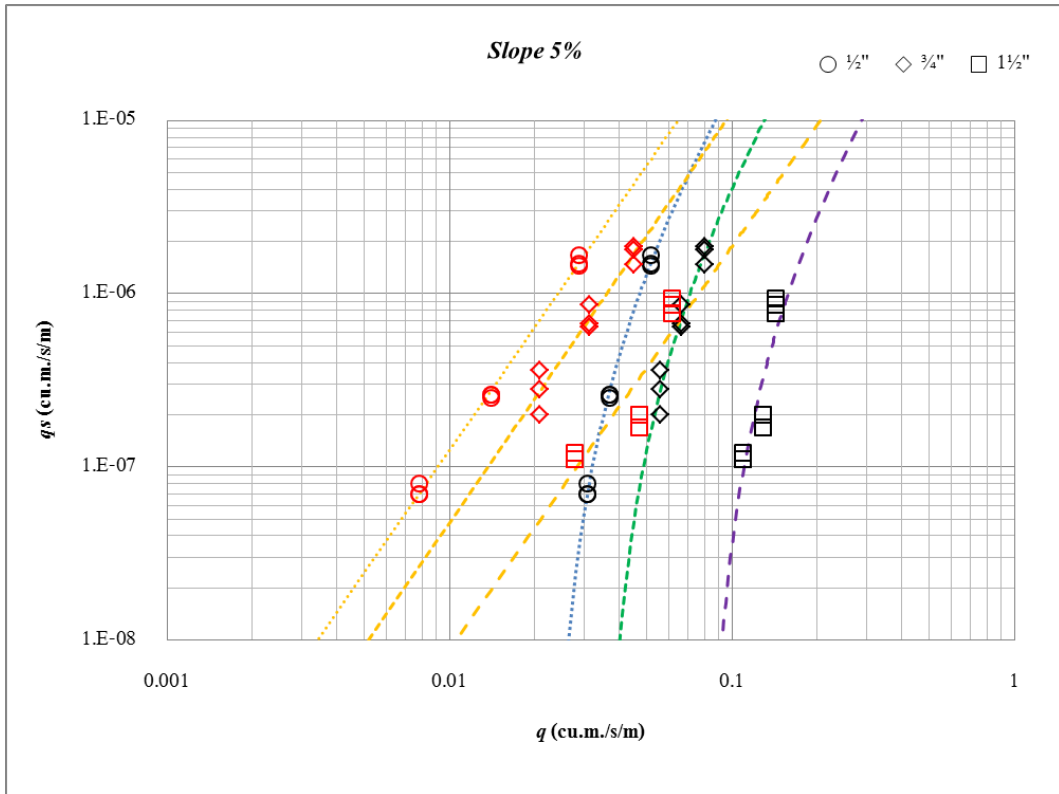
รูปที่ 4-4 การหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อน

ตารางที่ 4-2 สมการการพัดพาวัสดุท้องน้ำ

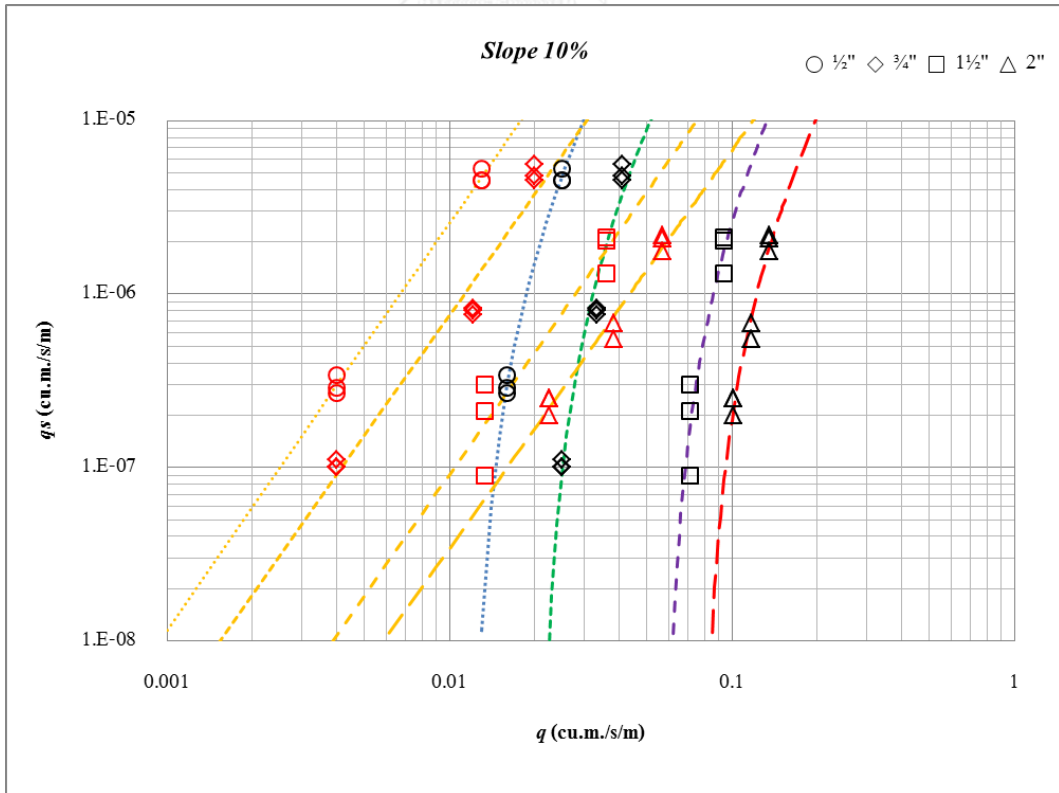
ขนาด หินทิ้ง	ลาด ท้องน้ำ	q_0 ($m^3/s/m$)	สมการ $q_s = C(q - q_0)^m$	R^2
½ นิ้ว	2%	0.049	$q_s = 0.0003(q - 0.049)^{2.3390}$	0.9394
½ นิ้ว	5%	0.023	$q_s = 0.0063(q - 0.023)^{2.3526}$	0.9967
½ นิ้ว	10%	0.012	$q_s = 0.1275(q - 0.012)^{2.3480}$	0.9961
¾ นิ้ว	2%	0.062	$q_s = 0.0002(q - 0.062)^{2.3295}$	0.9421
¾ นิ้ว	5%	0.035	$q_s = 0.0026(q - 0.035)^{2.3711}$	0.9519
¾ นิ้ว	10%	0.021	$q_s = 0.0319(q - 0.021)^{2.3119}$	0.9643
1½ นิ้ว	5%	0.082	$q_s = 0.0004(q - 0.082)^{2.3235}$	0.7978
1½ นิ้ว	10%	0.058	$q_s = 0.0042(q - 0.058)^{2.3296}$	0.8981
2 นิ้ว	10%	0.079	$q_s = 0.0013(q - 0.079)^{2.2976}$	0.9748



รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 2%



รูปที่ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 5%



รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ที่ความลาดท้องน้ำ 10%

จากการพิจารณาสมการเส้นตรงให้ขนาดกันในกราฟพาดตรา log-log เพื่อหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนโดยที่ไม่ต้องสนใจสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทางสถิตินั้นสามารถหาค่าเฉพาะกรณีที่มีการพัฒนาเกิดขึ้นเท่านั้น สำหรับกรณีที่ไม่สามารถทำให้โครงสร้างหินทิ้งเกิดการพัดพาหรือพังทลายได้ อย่างหินทิ้งขนาด 1½ กับ 2 นิ้ว ที่ลาดท้องน้ำ 2% อันเนื่องมาจากความสามารถของอุปกรณ์ทดลองที่มี หรือกรณีที่มีข้อมูลไม่เพียงพอ อย่างหินทิ้งขนาด 2 นิ้ว ที่ลาดท้องน้ำ 5% ซึ่งมีเพียง 1 ชุดข้อมูล นั้น จะทำการประมาณค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยหลักลำดับและอนุกรม (sequences & series)

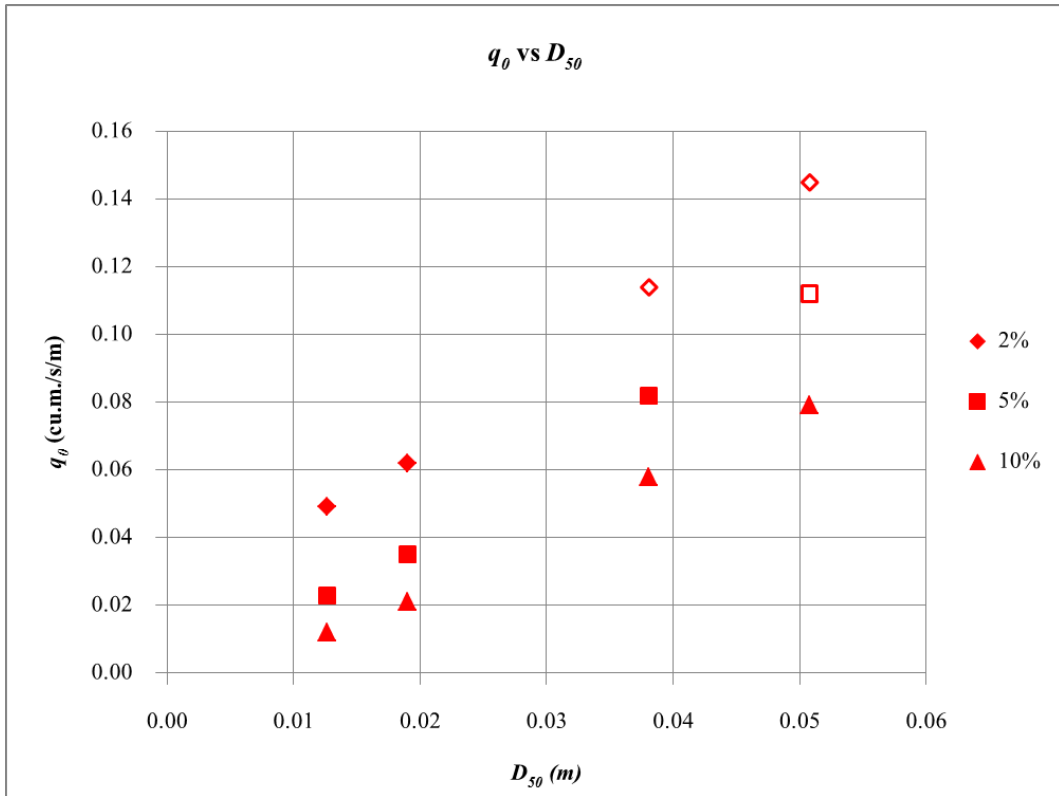
หลักลำดับและอนุกรมเป็นการหาค่าของข้อมูลในอันดับถัดไปหรือที่ขาดหายไปจากกลุ่มชุดข้อมูลที่มีอยู่อย่างเป็นระเบียบหรือมีความสัมพันธ์กันเป็นรูปแบบที่สังเกตได้ ดังนั้นอัตราการไหลแรกเคลื่อนของกรณีที่ไม่ใช่ข้อมูลวิเคราะห์ภายใต้การทดลองที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมให้มีเฉพาะตัวแปรการทดลองคือขนาดหินทิ้งและความลาดท้องน้ำ ประกอบกับค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่ได้จากวิเคราะห์ความถดถอยที่พิจารณาสมการเส้นตรงให้ขนาดกันในกราฟพาดตรา log-log ของกรณีอื่นเป็นแนวทาง ทำให้สามารถประมาณค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนของกรณีที่ไม่ใช่ข้อมูลวิเคราะห์เนื่องจากข้อจำกัดการทดลองได้

วิธีการวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยหลักลำดับและอนุกรมทำโดยจัดข้อมูลให้เป็นระเบียบตามตัวแปรการทดลองคือขนาดหินทิ้งและความลาดท้องน้ำ ประกอบกับค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่มี ดังตารางที่ 4-3 พิจารณาที่ลาดท้องน้ำ 10% ที่มีข้อมูลครบทุกขนาดหินทิ้ง เมื่อเปลี่ยนขนาดหินทิ้งให้ใหญ่ขึ้น อัตราการไหลแรกเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย วิเคราะห์ผลต่างของอัตราการไหลแรกเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นพบว่าผลต่างที่หินทิ้งขนาด 1½ และ 2 นิ้ว เพิ่มเป็นสัดส่วนของผลต่าง 0.009 ลบ.ม./วินาที/ม. ระหว่าง ½ นิ้ว กับ ¾ นิ้ว ที่ประมาณ 5 และ 7.4 เท่าตามลำดับ แสดงวิธีคำนวณด้วยตัวเอียงในตารางที่ 4-3 เทียบกับที่ลาดท้องน้ำ 5% ที่ไม่มีข้อมูลของหินทิ้งขนาด 2 นิ้ว แต่สัดส่วนผลต่างระหว่างหินทิ้งขนาด ¾ กับ 1½ นิ้ว เป็นที่ประมาณ 5 เท่า ของผลต่าง 0.012 ลบ.ม./วินาที/ม. ระหว่าง ½ นิ้ว กับ ¾ นิ้ว เช่นกันดังตัวเอียงในตารางที่ 4-3 ดังนั้นค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนของหินทิ้งขนาด 2 นิ้ว ที่ลาดท้องน้ำ 5% ควรเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน 7.4 เท่า ของผลต่างระหว่างหินทิ้งขนาด ½ กับ ¾ นิ้ว เช่นเดียวกับกับลาดท้องน้ำ 10% และทำเช่นเดิมกับที่ลาดท้องน้ำ 2% เมื่อหินทิ้งขนาด 1½ และ 2 นิ้ว ให้ครบ ในขณะที่เมื่อยึดขนาดหินทิ้งและแปรความลาดท้องน้ำจะไม่สามารถหาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนของหินขนาด 2 นิ้ว ได้เพราะไม่มีผลต่างเริ่มต้นเป็นแนวทางการวิเคราะห์

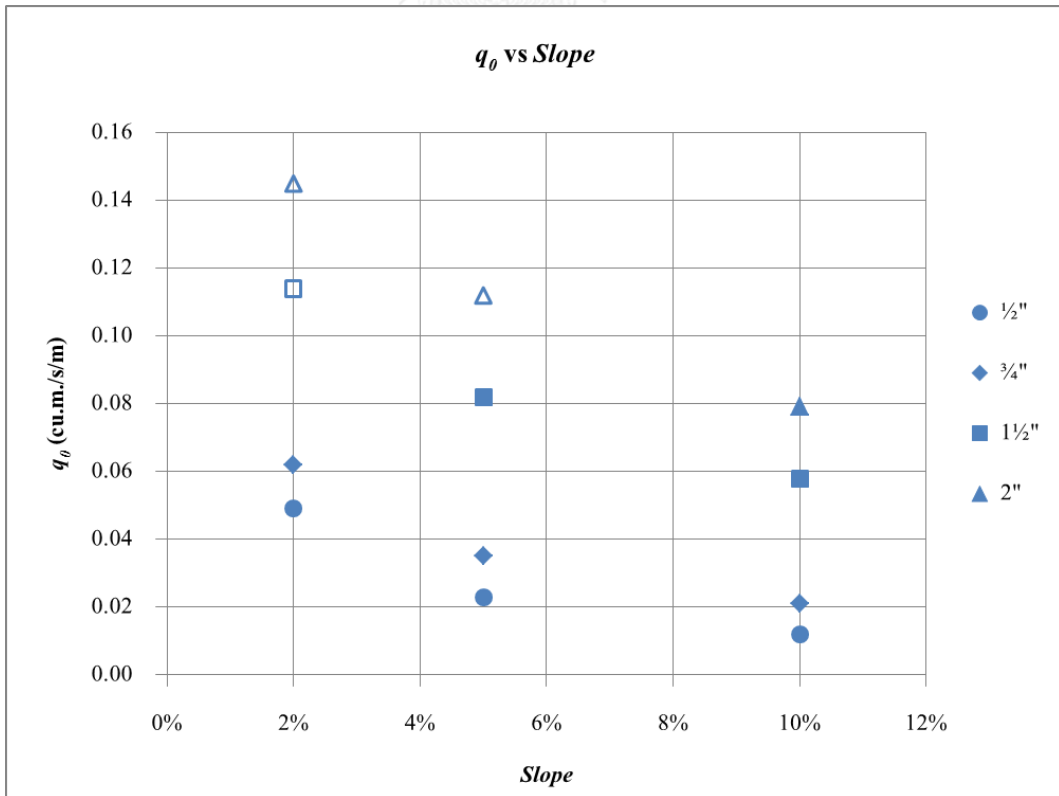
สรุปวิธีคำนวณด้วยตัวเอียงกับผลการวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยตัวหนาเอียงขีดเส้นใต้ในตารางที่ 4-3 และสัญลักษณ์กลางในกราฟรูปที่ 4-8 ที่สัมพันธ์กับขนาดหินทิ้งและกราฟรูปที่ 4-9 ที่สัมพันธ์กับความลาดท้องน้ำซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการทดลอง

ตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนด้วยลำดับและอนุกรม

q_0	ลาดท้องน้ำ 2%	ลาดท้องน้ำ 5%	ลาดท้องน้ำ 10%
½ นิ้ว	0.049	0.023	0.012
¾ นิ้ว	0.062 = 0.049 + 0.013	0.035 = 0.023 + 0.012	0.021 = 0.012 + 0.009
1½ นิ้ว	0.114 = 0.049 + ($\approx 0.013 \times 5$)	0.082 = 0.023 + ($\approx 0.012 \times 5$)	0.058 = 0.012 + ($\approx 0.009 \times 5$)
2 นิ้ว	0.145 = 0.049 + ($\approx 0.013 \times 7.4$)	0.112 = 0.023 + ($\approx 0.012 \times 7.4$)	0.079 = 0.012 + ($\approx 0.009 \times 7.4$)



รูปที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง



รูปที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลแรกเคลื่อน

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาตัวแปรการไหลและตัวแปรหินทิ้งที่มีผลต่อสภาวะเริ่มเสถียรภาพของโครงสร้างหินทิ้ง จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Abt (2013) ที่รวบรวมมา 21 การศึกษา ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดหินทิ้งที่มีเสถียรภาพเมื่อน้ำไหลท่วมตัวโครงสร้าง มีตัวแปรที่สนใจ 9 ตัวแปร แจกแจงความถี่ดังนี้ ความลาดชัน 19 การศึกษา, อัตราการไหล 17 การศึกษา, มุมทรงตัว 5 การศึกษา, ความเร็วการไหล 5 การศึกษา, ความคละกั้น 5 การศึกษา, ความลาดชันตั้งด้านข้าง 4 การศึกษา, ความลึกการไหล 2 การศึกษา, ความกว้างท้องน้ำ 1 การศึกษา และความหนาชั้นหินทิ้ง 1 การศึกษา เห็นได้ว่าความลาดท้องน้ำ (S) และอัตราการไหล (q) มีความสัมพันธ์กับขนาดหินทิ้ง (D_{50}) อย่างยิ่ง จึงทำการวิเคราะห์ในปัจจุบันนี้เป็นอย่างง่ายโดยมีรูปสมการดังนี้

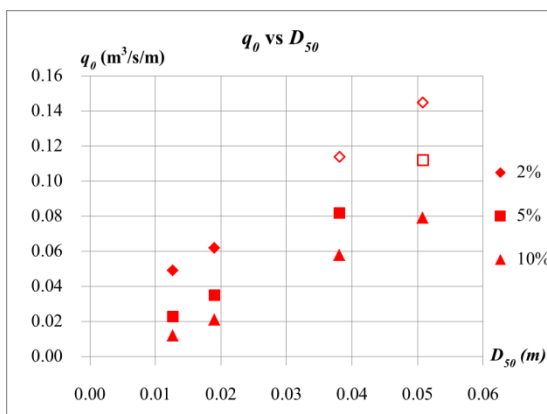
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง เปรียบเทียบด้วยกราฟรูปแบบต่างๆ อย่างกราฟมาตราปกติกับมาตรา log-log ดังรูปที่ 4-10 ล้วนบ่งบอกถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงอย่างคงที่หรือเป็นเส้นตรงทั่วไปตามความลาดท้องน้ำต่างๆ วิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายโดยมีรูปสมการดังนี้

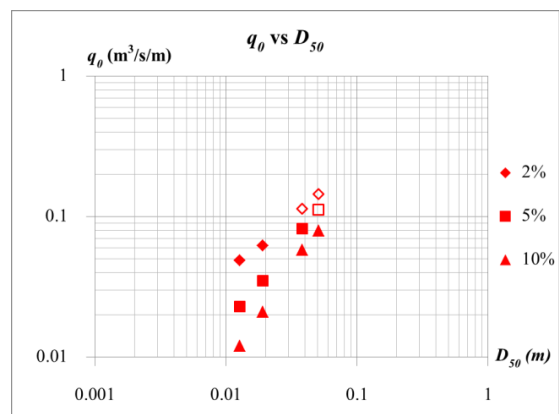
$$q_0 = m \cdot D_{50} + C$$

โดย q_0 คือ อัตราการไหลแรกเคลื่อน [m³/s/m]
 D_{50} คือ ขนาดหินทิ้ง [m]
 m, C คือ สัมประสิทธิ์และจุดตัดแกนของสมการตามลำดับ

ผลวิเคราะห์ด้วยความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายคำนวณค่าสัมประสิทธิ์และจุดตัดแกนของสมการเส้นตรงได้ตามตารางที่ 4-4 และแสดงดังกราฟรูปที่ 4-11 พิจารณาสมการที่ลาดท้องน้ำ 2% ซึ่งจุดตัดแกนอัตราการไหลแรกเคลื่อนเป็นบวก แปลว่าเมื่อหินมีขนาดเล็กเพียงใดล้วนจำเป็นต้องมีน้ำไหลท่วมผ่านโครงสร้างก่อนถึงจะมีการพัดพาเกิดขึ้น เทียบกับลาดท้องน้ำที่ 5% กับ 10% ซึ่งจุดตัดแกนอัตราการไหลแรกเคลื่อนเป็นลบ แปลว่าหากก่อโครงสร้างหินทิ้งที่ความลาดท้องน้ำนี้จำเป็นต้องใช้หินขนาดใหญ่ประมาณหนึ่งเพื่อไม่ให้โครงสร้างพังทลายตั้งแต่ก่อสร้างหรือก่อนใช้งาน เช่นที่ความลาดชัน 10% ต้องใช้หินขนาดใหญ่กว่า 0.0067 ม.(0.26 นิ้ว) เป็นต้น



(ก) มาตรฐานปกติ



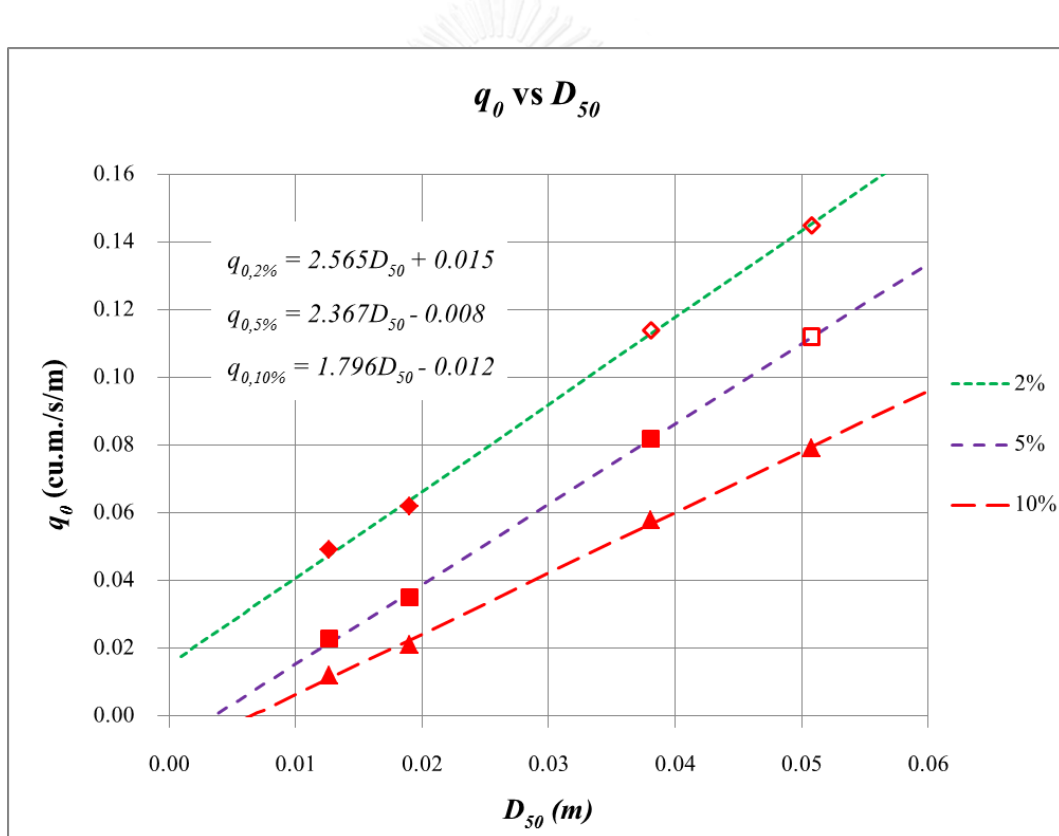
(ข) มาตรฐาน log-log

รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์กับขนาดหินทิ้ง

จากลักษณะที่แสดงออกในเชิงสมการและกราฟนั้นมีความเป็นไปได้สูงที่ปัจจัยขนาดหินที่จะแสดงออกในรูปแบบนี้ แต่มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นลักษณะเส้นโค้งแบบโค้งน้อยถึงน้อยที่สุด (เลขชี้กำลังของสมการเส้นโค้งมีค่าใกล้ 1) ทั้งนี้ทั้งนั้นหินขนาดหนึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่จำกัดเป็นช่วงข้อมูลหนึ่ง เมื่อก่อสร้างเกินช่วงย่อมไม่มีเสถียรภาพขณะติดตั้งหรือขณะใช้งาน อันเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นจากการศึกษา

ตารางที่ 4-4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง

ความลาดต่อน้ำ	สมการ $q_0 = m \cdot D_{50} + C$	R^2
2%	$q_0 = 2.565D_{50} + 0.015$	0.9988
5%	$q_0 = 2.367D_{50} - 0.008$	0.9991
10%	$q_0 = 1.796D_{50} - 0.012$	0.9983



รูปที่ 4-11 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ เปรียบเทียบกับกราฟรูปแบบต่างๆ อย่างกราฟมาตราปกติกับมาตรา log-log ดังรูปที่ 4-12 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันอย่างส่วนต่างลดลง หรือมีลักษณะเป็นเส้นโค้งไฮเปอร์โบล่าในกราฟมาตราปกติ ตามหินทั้งขนาดต่างๆ วิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นโดยการลองผิดลองถูกในหลักวิธี Stage-Discharge Curve เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์หาอัตราการไหลแรกเคลื่อนแต่ปรับสมการตั้งต้นเป็นดังนี้

$$q_0 - c = C(S - s)^m$$

โดย q_0 คือ อัตราการไหลแรกเคลื่อน [m³/s/m]

S คือ ความลาดท้องน้ำ [m/m]

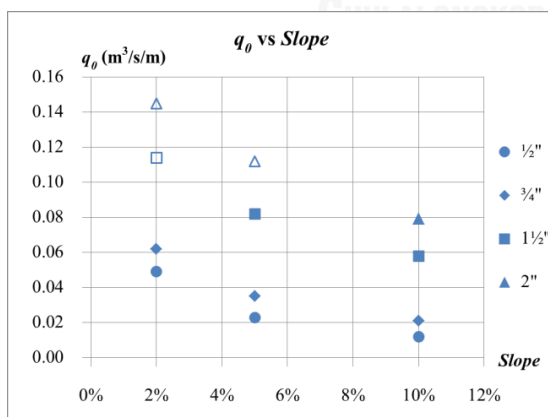
c, s คือ พจน์ปรับค่าอัตราการไหลและความลาดท้องน้ำตามลำดับ

C, m คือ สัมประสิทธิ์และเลขชี้กำลังของสมการตามลำดับ

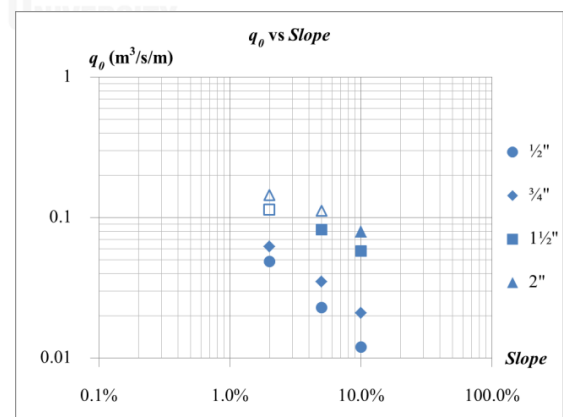
จากสมการตั้งต้นซึ่งมีพจน์ปรับค่าจำนวน 2 ตัวแปรให้วิเคราะห์ การหาค่าด้วยวิธีลองผิดลองถูกแบบเดิมทำได้ยากและหากหาค่าได้ก็ไม่ทราบถึงความเป็นมาของค่าตัวแปรที่ได้ จึงพยายามนำปัจจัยอื่นที่มีการเก็บข้อมูลอย่างความถ่วงจำเพาะกับมุมทรงตัวของหินทั้งตามตารางที่ 3-1 มาวิเคราะห์เพิ่มเติม

ผลของความถ่วงจำเพาะของหินทั้งรวมกับความลาดชันนั้นไม่มีการบ่งชี้ที่ชัดเจนเพราะการกระจายตัวของค่าความถ่วงจำเพาะมีน้อยมากและบางขนาดมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

ผลของมุมทรงตัวของหินทั้งรวมกับความลาดชันนั้นให้ความสัมพันธ์ที่ดีเมื่อใช้ตรีโกณมิติของมุมทรงตัวในสมการตั้งต้นแสดงดังตารางที่ 4-5 กราฟรูปที่ 4-13 โดยพิจารณาจากผลวิเคราะห์ความถดถอยของเลขชี้กำลัง (m) ที่เกาะกลุ่มกัน ไม่กระจายตัวหรือมีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่งเช่นเดียวกันกับผลจากวิธีลองผิดลองถูก ในขณะที่สัมประสิทธิ์ของสมการ (C) ล้วนได้ค่าน้อยกว่าผลตรีโกณมิติของมุมทรงตัวเล็กน้อย



(ก) มาตราปกติ



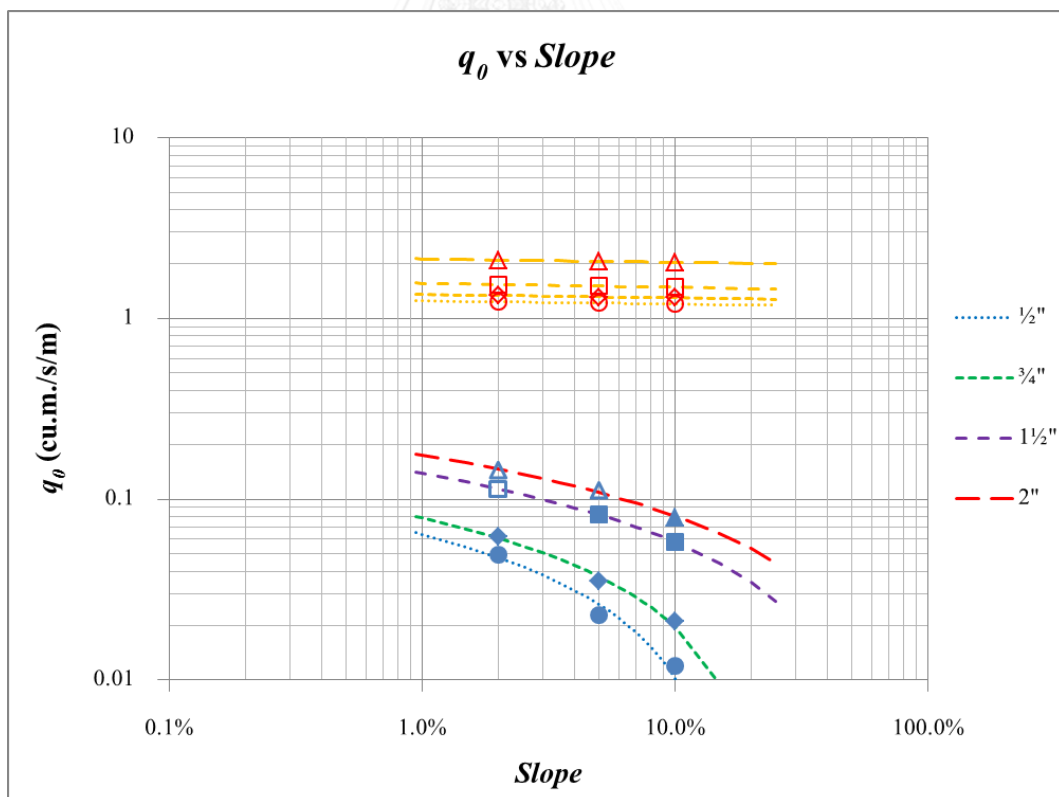
(ข) มาตรา log-log

รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์กับความลาดท้องน้ำ

จากตารางที่ 4-5 ซึ่งปรากฏความสัมพันธ์ร่วมกันกับตรีโกณมิติของมุมทรงตัวในพจน์เดียวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำที่สามารถละลายปัจจัยมุมทรงตัวของวัสดุหินที่ออกจากกันได้ หรือเมื่อใช้วัสดุหินที่ขนาดเดียวกันแต่มุมทรงตัวมีค่าต่างกันแสดงดังกราฟรูปที่ 4-13 โดยเส้นโค้งด้านล่างคือสมการ $q_0 = CS^m \pm \tan \theta$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รวมปัจจัยมุมทรงตัว และเส้นตรงด้านบนคือสมการ $q_0 = CS^m$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ละลายปัจจัยมุมทรงตัวออกไป จากการพิจารณาเลขชี้กำลัง (m) ที่เกาะกลุ่มกัน ไม่มีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่ง มีค่าเฉลี่ยที่ -0.02 ทำให้เส้นตรงมีลักษณะขนานกันเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หาอัตราการไหลแรกเคลื่อน

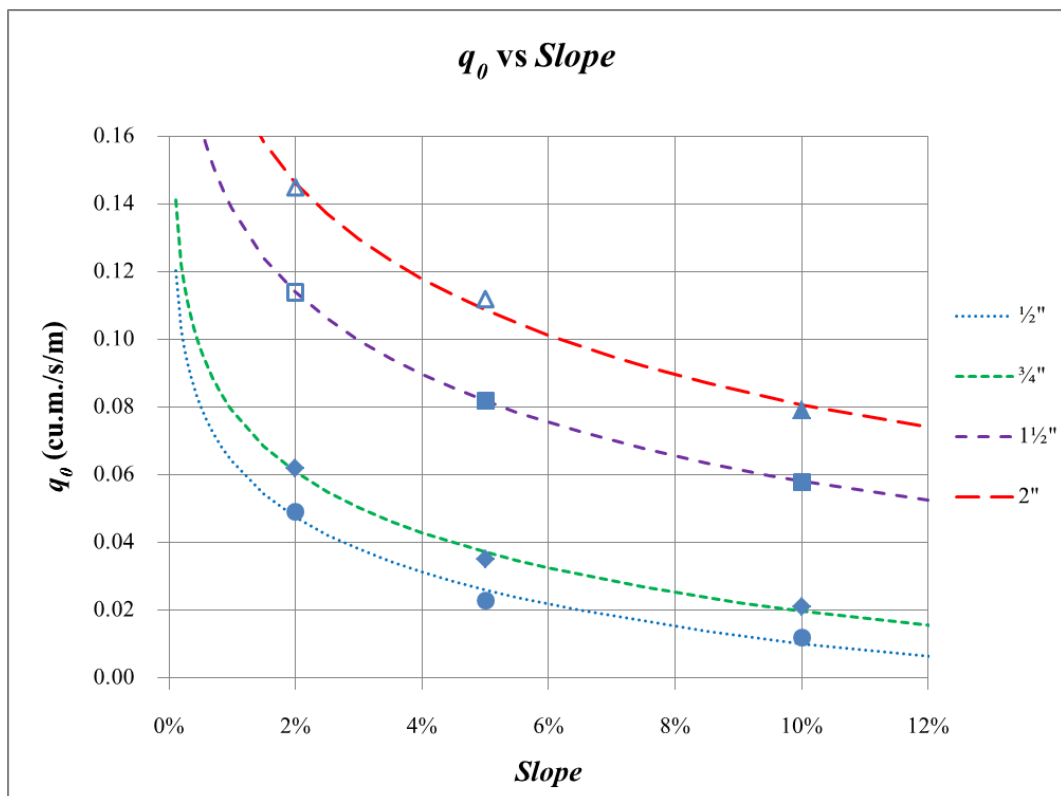
ตารางที่ 4-5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ

ขนาดหินที่	มุมทรงตัว (θ)	$\tan \theta$	สมการ $q_0 = CS^m \pm \tan \theta$	R^2
½ นิ้ว	50	1.192	$q_0 = 1.150S^{-0.019} - 1.192$	0.9787
¾ นิ้ว	52	1.280	$q_0 = 1.243S^{-0.019} - 1.280$	0.9906
1½ นิ้ว	55	1.428	$q_0 = 1.410S^{-0.023} - 1.428$	0.9999
2 นิ้ว	63	1.963	$q_0 = 1.953S^{-0.020} - 1.963$	0.9929



รูปที่ 4-13 การหาความสัมพันธ์กับความลาดชัน

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่พิจารณากลุ่มเส้นตรงให้ขนานกัน ทำการแปลงมาตราของกราฟกลับเป็นมาตราปกติดังรูปที่ 4-14 เห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำเป็นแบบแปรผกผันอย่างส่วนต่างลดลงเมื่อความลาดท้องน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น วิเคราะห์จุดสนใจ 2 จุด จุดที่หนึ่งคือเมื่อความลาดชันเป็น 0% จะได้ค่าประมาณของอัตราการไหลแรกเคลื่อนสูงสุดสำหรับหินทั้งขนาดนั้นๆ กับจุดที่สองเมื่ออัตราการไหลแรกเคลื่อนเป็น 0 จะได้ความลาดท้องน้ำสูงสุดที่หินทั้งขนาดนั้นๆ นำจะสามารถก่อก่อได้ ซึ่งทั้ง 2 จุดเป็นค่าประมาณเนื่องจากการต่อเส้นแนวโน้ม (extrapolation) ออกนอกช่วงข้อมูลเป็นระยะที่กว้างกว่าช่วงข้อมูลที่มี ทำให้จุดสนใจไม่สามารถชี้ชัดได้จนกว่าจะมีข้อมูลการศึกษาในช่วงส่วนต่อเส้นแนวโน้มเพิ่มเติม



รูปที่ 4-14 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับความลาดท้องน้ำ

ความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาร่วมกัน

จากปัจจัยขนาดหินทิ้ง ความลาดท้องน้ำ และอัตราการไหล ที่ Abt (2013) ได้สรุปว่ามีความสัมพันธ์อย่างยิ่ง และวิเคราะห์ว่ามุมทรงตัวควรเป็นปัจจัยสำคัญเช่นกันสำหรับเสถียรภาพของโครงสร้างหินทิ้งที่น้ำไหลท่วมตัว โครงสร้างในทางน้ำเปิด ประกอบกับการศึกษานี้พบว่าต้องใช้ปัจจัยมุมทรงตัวร่วมในการวิเคราะห์เพื่อความแม่นยำของข้อมูล ดังนั้นจึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกันทั้ง 3 ปัจจัย ต่ออัตราการไหลแรกเคลื่อน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วม ได้มีการวิเคราะห์ในหลายแง่มุมจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นแบบต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4-6 โดยลำดับที่ 1 เป็นเชิงเส้นอย่างง่าย ($y = \sum(m_i x_i) + C$) ลำดับที่ 2 เป็นเชิงเส้นยกกำลัง ($y = Cx_1^{m_1} \dots x_k^{m_k}$) ส่วนลำดับที่ 3 และ 4 เป็นการวิเคราะห์ความถดถอยจากสมการในตารางที่ 4-5 โดยลำดับที่ 3 ทำการเฉลี่ยเลขชี้กำลังและอนุมานว่าพจน์สัมประสิทธิ์เป็นตรีโกณของมุมทรงตัวเนื่องจากค่าใกล้เคียงกันมาก ลำดับที่ 4 ทำการเฉลี่ยเลขชี้กำลังและวิเคราะห์ความถดถอยของพจน์สัมประสิทธิ์ด้วยความสัมพันธ์กับขนาดหินทิ้งโดยพิจารณาปัจจัยขนาดหินทิ้งกับมุมทรงตัวนั้นมีความเกี่ยวเนื่องกันตามคุณสมบัติทางกายภาพอย่างแยกไม่ออก ซึ่งผลการวิเคราะห์ความถดถอยของสัมประสิทธิ์ได้ $C = \tan \theta - (0.05 - 0.02D_{50,inch})$ ซึ่งเป็นหน่วยอังกฤษจึงแปลงเป็นหน่วยเมตริก

ผลปรากฏว่าลำดับที่ 4 มีความเข้ากันของข้อมูลสูงกว่าลำดับอื่นโดยที่คงความสัมพันธ์เหมือนการวิเคราะห์ปัจจัยเดียว ซึ่งเห็นว่าปัจจัยขนาดหินทิ้งยังมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผันตรงอย่างคงที่เพราะตัวคูณตัวหารเป็นค่าคงที่ ส่วนความลาดชันร่วมเป็นแบบแปรผกผันอย่างส่วนต่างน้อยลงเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นเช่นเดิมจากเลขยกกำลังที่ติดลบเช่นเดียวกัน จึงให้สมการลำดับที่ 4 เป็นสมการความสัมพันธ์ของการศึกษานี้

สรุปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลแรกเคลื่อนมี 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ขนาดหินทิ้ง ความลาดท้องน้ำ และมุมทรงตัวของหิน ร่วมกันในรูปสมการดังนี้

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

โดย	q_0	คือ อัตราการไหลแรกเคลื่อน	[$m^3/s/m$]
	θ	คือ มุมทรงตัวด้วยวิธี tilting box	[degree]
	D_{50}	คือ ขนาดหินทิ้ง	[m]
	S	คือ ความลาดท้องน้ำ	[m/m]

ตารางที่ 4-6 สมการความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาร่วมกัน

ลำดับที่	สมการ	R^2
1	$q_0 = 2.305D_{50} - 0.603S - 0.003 \tan \theta + 0.036$	0.9683
2	$q_0 = 0.588D_{50}^{1.145} S^{-0.583} (\tan \theta)^{-0.100}$	0.9650
3	$q_0 = \tan \theta (S^{-0.020} - 1)$	0.7559
4	$q_0 = \left[\tan \theta - \left(0.05 - 0.02 \frac{D_{50}}{0.0254} \right) \right] S^{-0.02} - \tan \theta$	0.8760

4.3 การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วน

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาความสัมพันธ์ของมาตราส่วนขนาดหินทิ้งที่ได้จากการทดลองในเกณฑ์ของ Froude และการใช้สัดส่วนทางเรขาคณิต จึงใช้การศึกษาที่ผ่านมาร่วมกับการศึกษานี้เพื่อให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลได้มากขึ้น โดยเลือกใช้การศึกษาที่มีข้อมูลอัตราการไหลแรกเคลื่อนในความลาดท้องน้ำที่มีลักษณะเดียวกันกับการศึกษานี้

แม้ Abt (2013) ได้รวบรวมข้อมูลเสถียรภาพของโครงสร้างหินทิ้งที่น้ำไหลท่วมตัวโครงสร้างกว่า 21 แห่งอ้างอิง โดยตัวแปรคือ ขนาดหินทิ้ง ความลาดท้องน้ำ อัตราการไหล สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ ($C_u = D_{60}/D_{10}$) และความหนาชั้นหินที่ถม (d) แต่อัตราการไหลนั้นเป็นอัตราการไหลที่ทำให้โครงสร้างพังทลาย (q_f) ไม่ใช่อัตราการไหลแรกเคลื่อน (q_0) จึงศึกษาสืบลงไปแหล่งอ้างอิงของการศึกษาประกอบกับหาแหล่งอ้างอิงเพิ่มเติมเพื่ออาจมีการเก็บข้อมูลอัตราการไหลแรกเคลื่อน พบว่า Abt and Johnson (1991) กับ Aguirre-Pe (2003) มีข้อมูลลักษณะนี้สรุปข้อมูลปัจจัยและอัตราการไหลแรกเคลื่อนดังตารางที่ 4-7

เหตุที่เลือกแหล่งอ้างอิง 2 แหล่งนี้เพราะนอกจากมีอัตราการไหลแรกเคลื่อน คือ ความลาดท้องน้ำตรงกับที่ศึกษาหรือเทียบกันได้ ขนาดหินทิ้งที่เทียบมาตราส่วนกันได้ การไหลเป็นการไหลเหนือวิกฤติแบบเดียวกับที่วิเคราะห์มา ($Fr > 1$) ความคละของขนาดหินที่สม่ำเสมอหรือใกล้เคียง (C_u มีค่าเข้าใกล้ 1 จากช่วง 1 ถึง 100) และควรมีมุมทรงตัวกับความถ่วงจำเพาะไว้วิเคราะห์

ผลวิเคราะห์ปัจจัยความถ่วงจำเพาะนั้นไม่มีความแตกต่างเพราะค่าไม่กระจายตัวกันเช่นเคย ส่วนมุมทรงตัว (angle of repose) นั้นมีความแตกต่างกันมากซึ่งเป็นเพราะนิยามและวิธีการวัดมุมที่ต่างกัน โดย Abt and Johnson (1991) วัดมุมแรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction) ด้วยวิธีของ ASTM และนิยามให้มุมทรงตัวกับมุมแรงเสียดทานภายในของหินทิ้งมีค่าเท่ากันตามการศึกษาของ Metcalf (1965) ในขณะที่การศึกษานี้วัดด้วยวางปรับระดับ (tilting box method, ดูได้ที่ ภาคผนวก ข.) เห็นว่าทั้ง 2 การศึกษาล้วนไม่ได้ใช้วิธีของ ASTM-D6393 ในการวัดมุมทรงตัวตามมาตรฐานโดยตรง จึงละปัจจัยมุมทรงตัวในการวิเคราะห์ร่วมกัน

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลปัจจัยและอัตราการไหลแรกเคลื่อนจากแหล่งอ้างอิง

แหล่งอ้างอิง	S	D_{50} (นิ้ว)	θ	ถ.พ.	Fr	C_u	q_0 ($m^3/s/m$)	
Aguirre-Pe (2003)	5%	1½	n/a	n/a	1.29 – 1.82	Uniform	0.102	
Abt and Johnson (1991)	10%	2	37	2.72	n/a	2.14	0.040	
			41	2.72	2.09 – 2.20	2.09	0.053 – 0.076	
			4	38	2.50	n/a	2.12	0.125 – 0.137
	20%	2	4	42	2.65	n/a	2.15	0.254 – 0.285
				41	2.75	n/a	2.09	0.038
				38	2.50	n/a	2.12	0.068
				42	2.65	n/a	2.15	0.128
5	4	42	2.65	n/a	1.62	0.248		
		6	42	2.65	n/a	1.69	0.308	

รวมข้อมูลของการศึกษานี้ร่วมกับการศึกษาที่ผ่านมาดังตารางที่ 4-8 โดยให้คำย่อแทนการศึกษานี้เป็น E (Experiment) และคำย่อแทนการศึกษาที่ผ่านมาเป็น R (Reference) การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วนจะวิเคราะห์เป็นคู่ๆ ไป เมื่อวิเคราะห์จะได้การจับคู่ 3 ประเภท คือ การวิเคราะห์ด้วยข้อมูลการศึกษานี้เท่านั้น (EE) การวิเคราะห์ด้วยข้อมูลการศึกษานี้ร่วมกับการศึกษาที่ผ่านมา (ER) และการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมาเท่านั้น (RR)

การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude คือการเปรียบเทียบสัดส่วนของอัตราการไหลแรกเคลื่อนของแบบจำลองเทียบกับตัวต้นแบบระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลองจริงที่ Froude เท่ากันหรือใกล้เคียง จากตารางที่ 2-2 ที่ให้คุณลักษณะความคล้ายคลึงกันของอัตราการไหล (Q_r) ในเกณฑ์ของ Froude เป็น $\left[L^{5/2} (\gamma/\rho)^{1/2} \right]_r$ วิเคราะห์ที่ละขั้นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-8 สรุปข้อมูลของการศึกษานี้ร่วมกับการศึกษาที่ผ่านมา

แหล่งอ้างอิง	S (ม./ม.)	D_{50} (นิ้ว)	θ (องศา)	q_0 (ลบ.ม./วินาที/ม.)
E	2%	1/2	50	0.049
		3/4	52	0.062
		1 1/2	55	0.114
		2	63	0.145
	5%	1/2	50	0.023
		3/4	52	0.035
		1 1/2	55	0.082
		2	63	0.112
R (2003)	5%	1 1/2	n/a	0.102
E	10%	1/2	50	0.012
		3/4	52	0.021
		1 1/2	55	0.058
		2	63	0.079
R (1991)	10%	2	37	0.040
			41	0.076
		4	38	0.137
			42	0.285
	20%	2	41	0.038
		4	38	0.068
			42	0.128
		5	42	0.248
	6	42	0.308	

เริ่มด้วย $\left[L^{5/2} (\gamma/\rho)^{1/2} \right]_r$ เป็นสัดส่วนของอัตราการไหลแรกเคลื่อนของแบบจำลองเทียบกับตัวต้นแบบ

แยกเป็น $\frac{\left[L^{5/2} (\gamma/\rho)^{1/2} \right]_m}{\left[L^{5/2} (\gamma/\rho)^{1/2} \right]_p}$ โดยพจน์ (γ/ρ) สามารถหักล้างได้เพราะของไหลที่ใช้ทดลองเป็นน้ำ

เหมือนกัน

เหลือ $\left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{5/2}$ ซึ่งเป็นพจน์มิติ L ระหว่างแบบจำลอง (m) กับตัวต้นแบบ (p) ที่ Froude

เท่ากัน

ดังนั้น $\left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{5/2} = q_{0,r}$ ให้กลับข้างเลขชี้กำลังและรวมสัดส่วนแบบจำลองกับตัวต้นแบบ

เป็น $L_{r,Fr} = \left(\frac{q_{0,m}}{q_{0,p}} \right)^{2/5}$ อันเป็นมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude

ส่วน $L_{r,Exp} = \frac{D_{50,m}}{D_{50,p}}$ คือมาตราส่วนมิติจากขนาดหินโดยตรง (Experiment)

ผลการคำนวณผลของมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude เทียบกับมาตราส่วนมิติที่ความลาดท้องน้ำระดับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-9 ถึงตารางที่ 4-12 และกราฟแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16 โดยแกนแนวราบคือมาตราส่วนมิติที่ใช้จริง ($L_{r,Exp}$) ส่วนแกนแนวตั้งคือมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude ($L_{r,Fr}$) ที่ความลาดท้องน้ำต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-9 ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 2%

	q0					0.049	0.062	0.114	0.145
		repose			50	52	55	63	
			size	1/2"	3/4"	1 1/2"	2"		
$L_{r,Fr}$	0.049	50	1/2"		0.910	0.713	0.648		
	0.062	52	3/4"	1.099		0.784	0.712		
	0.114	55	1 1/2"	1.402	1.276		0.908		
	0.145	63	2"	1.543	1.405	1.101			
$L_{r,Exp}$	0.049	50	1/2"		0.667	0.333	0.250		
	0.062	52	3/4"	1.500		0.500	0.375		
	0.114	55	1 1/2"	3.000	2.000		0.750		
	0.145	63	2"	4.000	2.667	1.333			

ตารางที่ 4-10 ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 5%

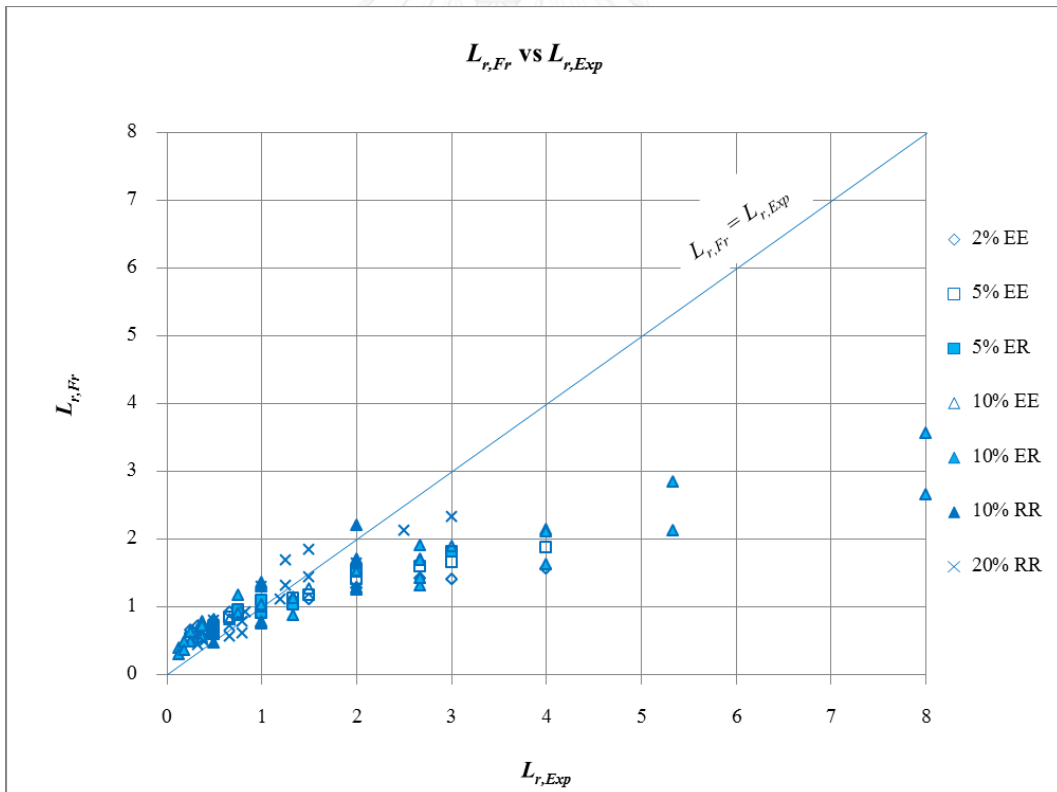
	q0			0.023	0.035	0.082	0.112	0.102
	repose			50	52	55	63	36
		size		½"	¾"	1½"	2"	1½"
Lr,Fr	0.023	50	½"		0.845	0.601	0.531	0.551
	0.035	52	¾"	1.183		0.711	0.628	0.652
	0.082	55	1½"	1.663	1.406		0.883	0.916
	0.112	63	2"	1.884	1.592	1.133		1.038
	0.102	36	1½"	1.814	1.534	1.091	0.963	
Lr,Exp	0.023	50	½"		0.667	0.333	0.250	0.333
	0.035	52	¾"	1.500		0.500	0.375	0.500
	0.082	55	1½"	3.000	2.000		0.750	1.000
	0.112	63	2"	4.000	2.667	1.333		1.333
	0.102	36	1½"	3.000	2.000	1.000	0.750	

ตารางที่ 4-11 ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 10%

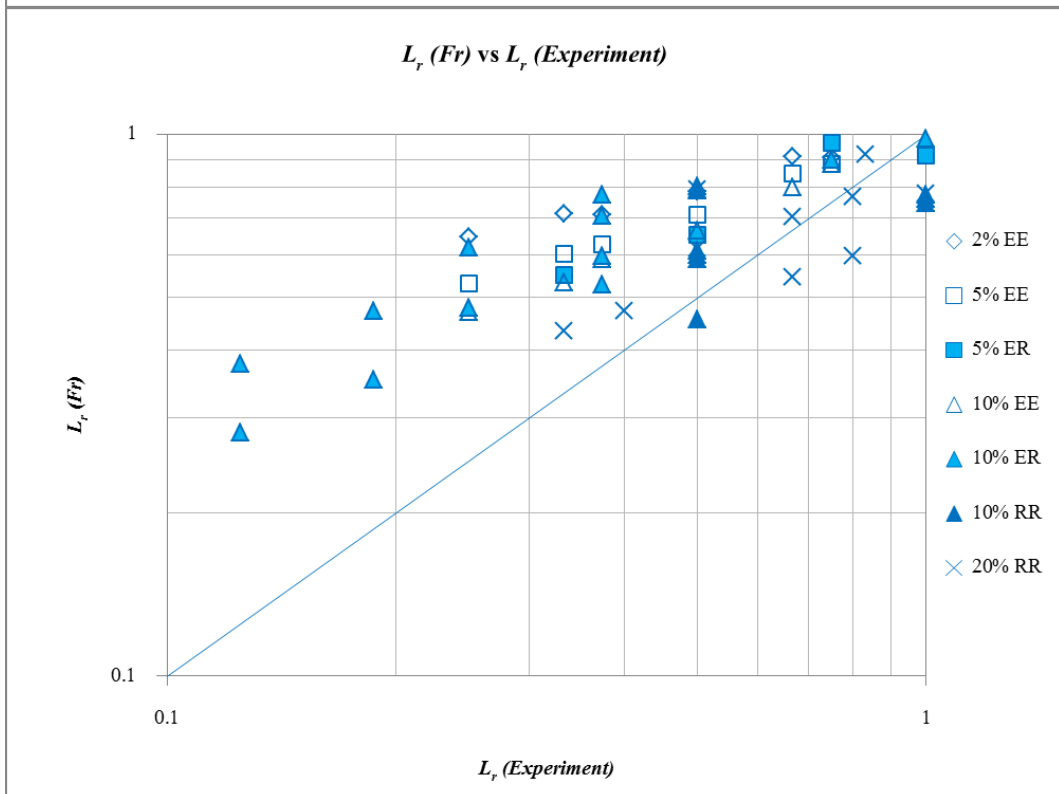
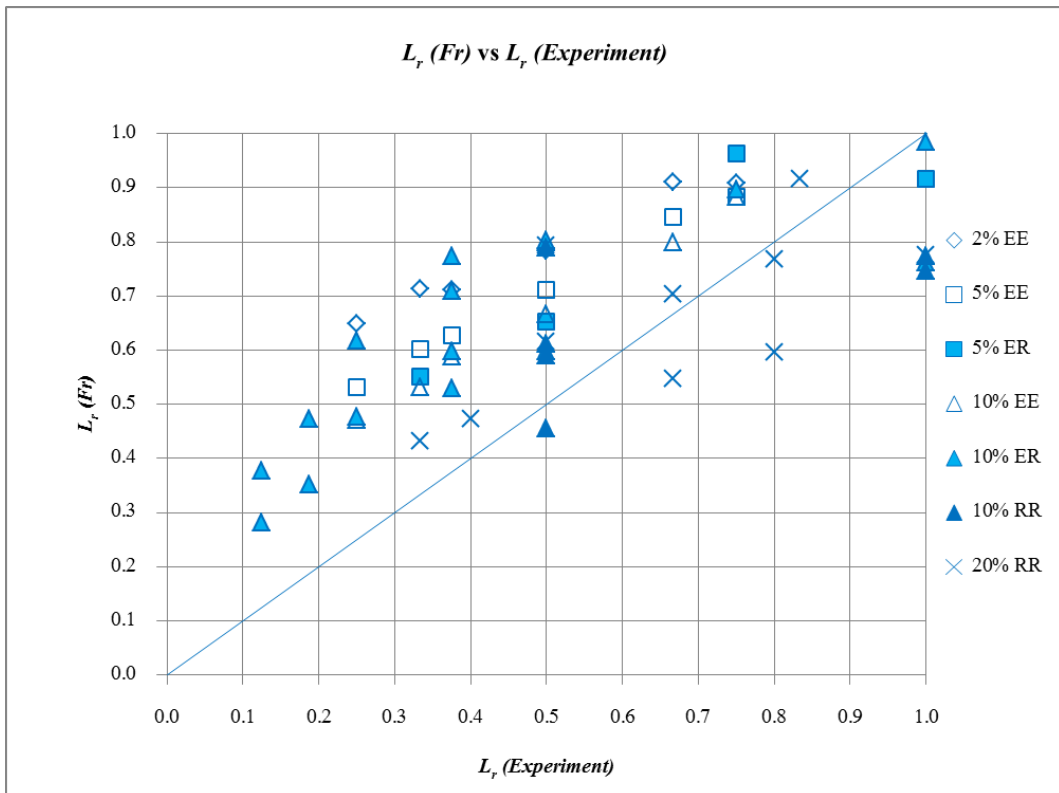
	q0			0.012	0.021	0.058	0.079	0.040	0.076	0.137	0.285
	repose			50	52	55	63	37	41	38	42
		size		½"	¾"	1½"	2"	2"	2"	4"	4"
Lr,Fr	0.012	50	½"		0.799	0.532	0.471	0.618	0.478	0.378	0.282
	0.021	52	¾"	1.251		0.666	0.589	0.773	0.598	0.472	0.352
	0.058	55	1½"	1.878	1.501		0.884	1.160	0.898	0.709	0.529
	0.079	63	2"	2.125	1.699	1.132		1.313	1.016	0.802	0.599
	0.040	37	2"	1.619	1.294	0.862	0.762		0.774	0.611	0.456
	0.076	41	2"	2.092	1.673	1.114	0.985	1.293		0.790	0.589
	0.137	38	4"	2.649	2.117	1.410	1.246	1.636	1.266		0.746
	0.285	42	4"	3.550	2.838	1.890	1.671	2.193	1.697	1.340	
Lr,Exp	0.012	50	½"		0.667	0.333	0.250	0.250	0.250	0.125	0.125
	0.021	52	¾"	1.500		0.500	0.375	0.375	0.375	0.188	0.188
	0.058	55	1½"	3.000	2.000		0.750	0.750	0.750	0.375	0.375
	0.079	63	2"	4.000	2.667	1.333		1.000	1.000	0.500	0.500
	0.040	37	2"	4.000	2.667	1.333	1.000		1.000	0.500	0.500
	0.076	41	2"	4.000	2.667	1.333	1.000	1.000		0.500	0.500
	0.137	38	4"	8.000	5.333	2.667	2.000	2.000	2.000		1.000
	0.285	42	4"	8.000	5.333	2.667	2.000	2.000	2.000	1.000	

ตารางที่ 4-12 ผลของมาตราส่วนที่ลาดท้องน้ำ 20%

	q0			0.038	0.068	0.128	0.248	0.308
		repose	size	41	38	42	42	42
				2"	4"	4"	5"	6"
$L_{r,Fr}$	0.038	41	2"		0.792	0.615	0.472	0.433
	0.068	38	4"	1.262		0.776	0.596	0.546
	0.128	42	4"	1.625	1.288		0.768	0.704
	0.248	42	5"	2.118	1.678	1.303		0.917
	0.308	42	6"	2.309	1.830	1.421	1.091	
$L_{r,Exp}$	0.038	41	2"		0.500	0.500	0.400	0.333
	0.068	38	4"	2.000		1.000	0.800	0.667
	0.128	42	4"	2.000	1.000		0.800	0.667
	0.248	42	5"	2.500	1.250	1.250		0.833
	0.308	42	6"	3.000	1.500	1.500	1.200	



รูปที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนมิติและมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude

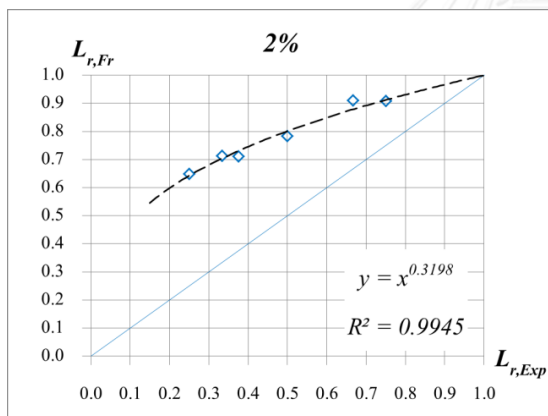


รูปที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนย่อเชิงมิติและมาตราส่วนตามเกณฑ์ของ Froude

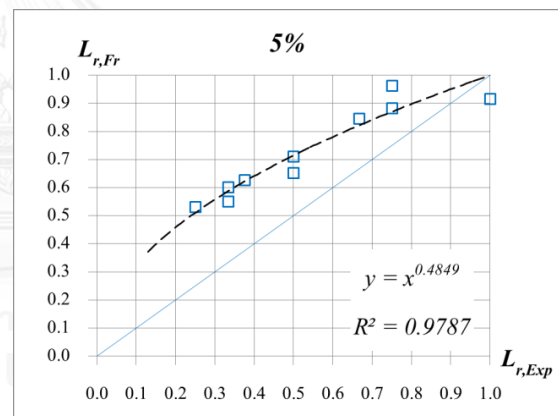
กราฟรูปที่ 4-15 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ไม่ใช่เส้นตรงอย่างชัดเจนในการย่อ/ขยายขนาดพื้นที่ซึ่งกราฟรูปที่ 4-16 เป็นส่วนขยายของกราฟรูปที่ 4-15 โดยรูปด้านบนเป็นมาตราปกติ ส่วนรูปด้านล่างเป็นมาตรา log-log เจาะจงค่าช่วง 0.1 ถึง 1 อันเป็นการย่อขนาดแบบจำลองเทียบกับตัวต้นแบบ จากการสังเกตเห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นของแต่ละลาดท้องน้ำแยกออกจากกัน จึงวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นของแต่ละลาดท้องน้ำ ผลการวิเคราะห์ความถดถอยของแต่ละลาดท้องน้ำเป็นสมการยกกำลังตามตารางที่ 4-13 กับเป็นกราฟมาตราปกติตามรูปที่ 4-17 และมาตรา log-log ตามรูปที่ 4-18

ตารางที่ 4-13 สมการความสัมพันธ์ของการย่อ/ขยายขนาดพื้นที่

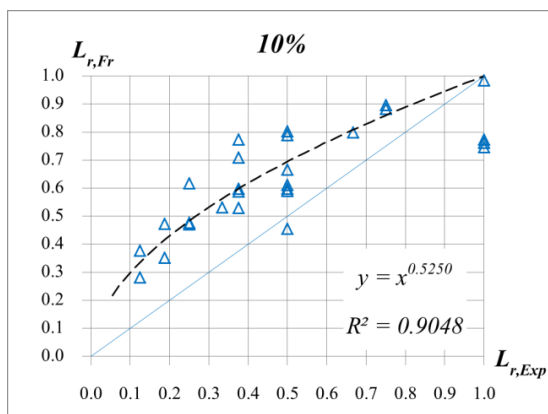
ความลาดชัน	สมการ $L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^m$	R^2
2%	$L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^{0.3195}$	0.9945
5%	$L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^{0.4849}$	0.9787
10%	$L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^{0.5250}$	0.9048
20%	$L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^{0.7734}$	0.8463



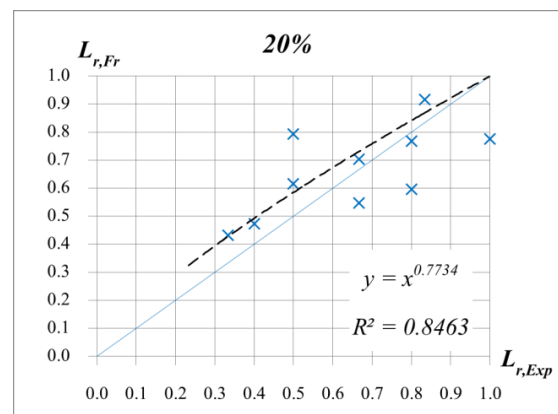
ลาดท้องน้ำ 2%



ลาดท้องน้ำ 5%

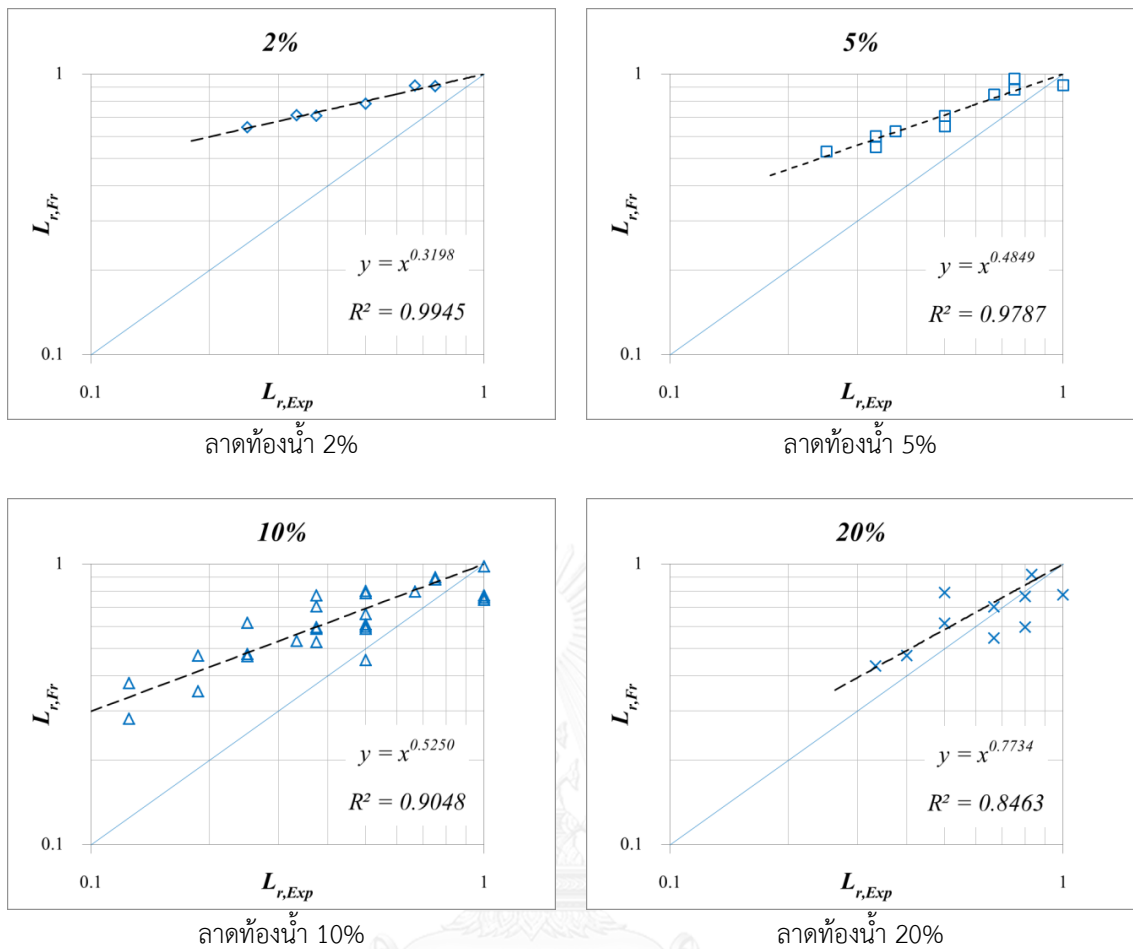


ลาดท้องน้ำ 10%



ลาดท้องน้ำ 20%

รูปที่ 4-17 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดพื้นที่ความลาดท้องน้ำต่างๆ

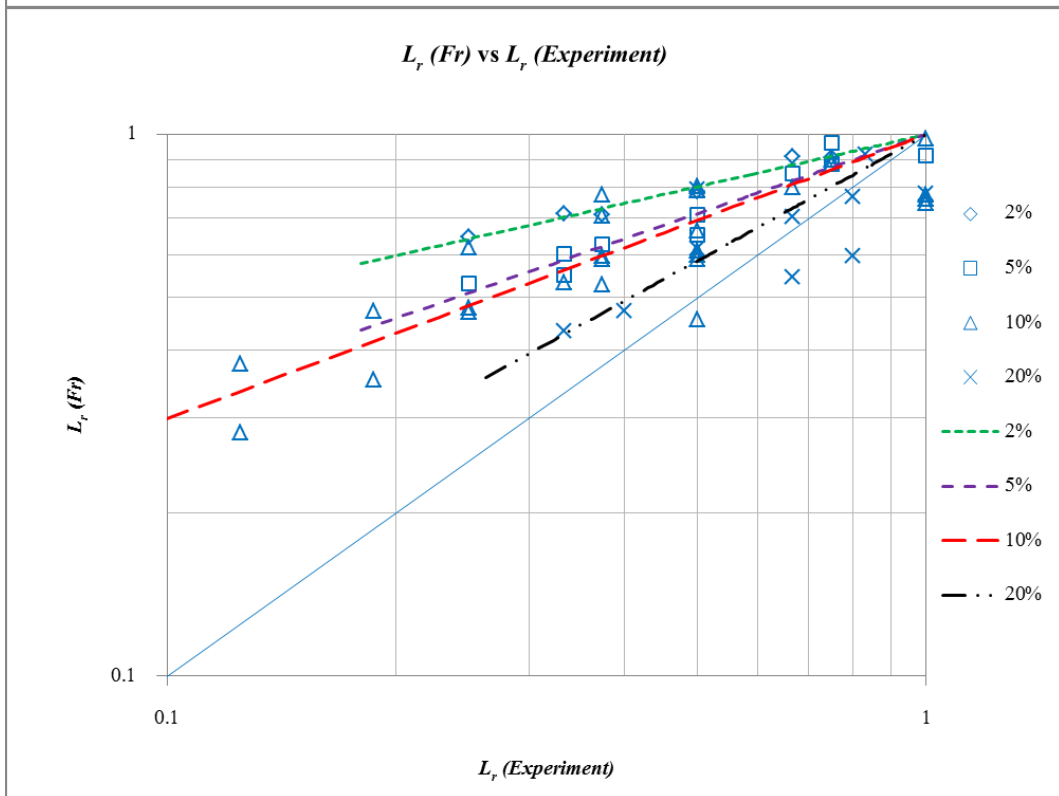
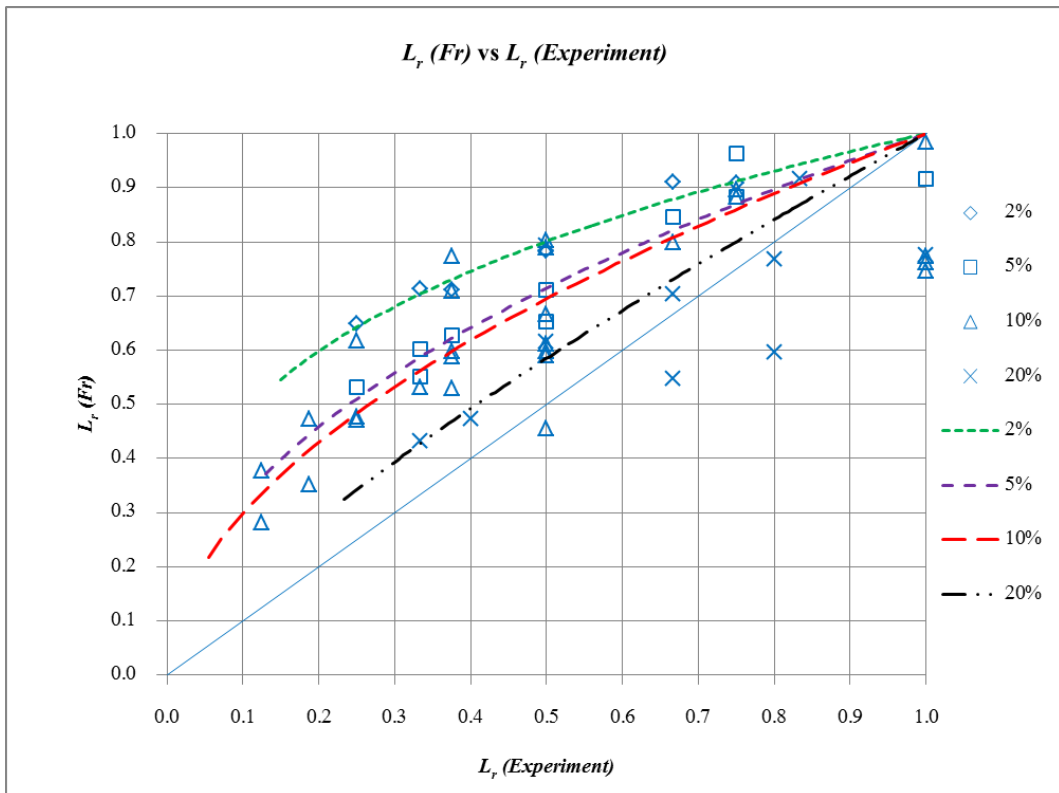


รูปที่ 4-18 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหินที่ความลาดต่อน้ำต่างๆ ในมาตรา log-log

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณากราฟ 5% 10% และ 20% ซึ่งล้วนมีการใช้ข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมา รวมถึงการศึกษา (ER) เห็นว่าที่ตำแหน่งมาตราส่วนมิติที่ใช้จริง (แกนแนวราบ) ตำแหน่งหนึ่งสามารถให้ตำแหน่งมาตราส่วนทางทฤษฎีในเกณฑ์ของ Froude (แกนแนวตั้ง) ได้หลายค่า ก่อให้เกิดแถบหรือช่วงของค่าปรับแก้มาตราส่วนขึ้น และการวิเคราะห์ความถดถอยของความลาดต่อน้ำหนึ่งจะให้ผลสมการที่ผ่านบริเวณกึ่งกลางแถบนั้นๆ โดยมีมุมทรงตัวเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดแถบข้อมูล จากข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมาซึ่งมีมุมทรงตัว 2 ค่าที่หินขนาดเดียวกันทำให้มีอัตราการไหลแรกเคลื่อนต่างกันด้วย แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมที่ชัดเจนได้เนื่องจากทั้งการศึกษานี้และการศึกษาที่ผ่านมาล้วนไม่ได้ใช้วิธีเดียวกันหรือวิธีมาตรฐานในการวัดมุมทรงตัว เหลือเพียงปัจจัยความลาดต่อน้ำให้วิเคราะห์ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหินรวมทุกความลาดชันดังกราฟรูปที่ 4-19 โดยรูปด้านบนเป็นมาตราปกติ ส่วนรูปด้านล่างเป็นมาตรา log-log เมื่อดูกราฟตามลำดับลาดต่อน้ำและกราฟความสัมพันธ์รวมพบว่าเมื่อลาดต่อน้ำเพิ่มขึ้น ความโค้งของเส้นสมการยิ่งลึบเข้าใกล้เส้นทแยงมุม ($y=x$) มากขึ้น และเมื่อความลาดต่อน้ำลดลง ความโค้งเส้นสมการจะห่างจากเส้นทแยงมุมออกไป ไม่ว่าในกรณีที่ยังไม่นำการศึกษาที่ผ่านมา รวมคำนวณหรือรวมอย่างปัจจุบันก็ตาม



รูปที่ 4-19 กราฟเส้นสมการความสัมพันธ์ของการย่อขนาดหิน

สมการยกกำลังที่คำนวณจากความถดถอยตามตารางที่ 4-13 ที่แยกแต่ละลาดท้องน้ำไว้สามารถวิเคราะห์รวมเป็นสมการหนึ่งเดียวได้ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยของเลขชี้กำลังของสมการโดยใช้ความลาดท้องน้ำเป็นตัวแปรอิสระของสมการเชิงเส้นรูปแบบต่างๆ อย่างเส้นตรงและเส้นโค้งยกกำลังได้ผลตามตารางที่ 4-14 และกราฟรูปที่ 4-20 ซึ่งเห็นว่าโค้งเชิงเส้นยกกำลังให้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่าเล็กน้อย แต่มีข้อจำกัดเมื่อความลาดท้องน้ำเป็นแนวราบ (0%) เลขชี้กำลังคำนวณได้ 0 ซึ่งไม่สามารถใช้หาความสัมพันธ์ได้ หากแต่เมื่อใช้เชิงเส้นตรงแล้วเมื่อความลาดท้องน้ำเป็นแนวราบแล้วเลขชี้กำลังจะได้ค่าหนึ่งเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ได้ ดังนั้นจึงใช้สมการความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลังเชิงเส้นตรงดังนี้

$$L_{r,Fr} = L_{r,Exp}^{2.3189S+0.3112}$$

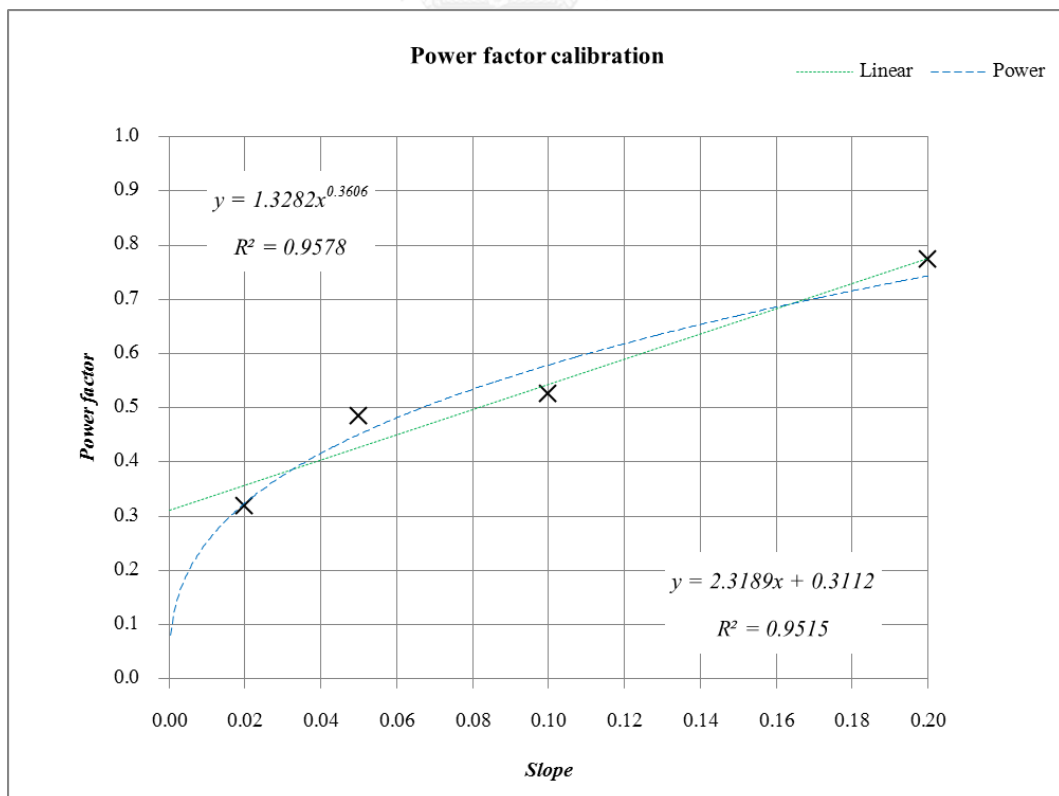
โดย $L_{r,Fr}$ คือ มาตรฐานตามเกณฑ์ของ Froude ($L_{r,Fr} = q_{0,r}^{2/5}$)

$L_{r,Exp}$ คือ มาตรฐานมิติจากขนาดหิน ($L_{r,Exp} = D_{50,r}$)

S คือ ความลาดท้องน้ำ [m/m]

ตารางที่ 4-14 สมการความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลัง

ประเภท	สมการความถดถอยของเลขชี้กำลัง ($m = f(S)$)	R^2
เส้นตรง	$m = 2.3189S + 0.3112$	0.9515
เส้นยกกำลัง	$m = 1.3282S^{0.3606}$	0.9578



รูปที่ 4-20 กราฟความสัมพันธ์ของเลขชี้กำลัง

พิจารณาผลการวิเคราะห์มาตราส่วนการย่อขนาดหินตามทฤษฎีในเกณฑ์ของ Froude มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงกับมาตราส่วนมิติที่ทดลองจริง โดยการขยายขนาดหินทั้งจากแบบจำลองด้วยเกณฑ์ของ Froude ให้ค่าต่ำกว่า (under-estimate) มาตราส่วนมิติ อธิบายด้วยตัวอย่างจากรูปที่ 4-19 ที่ความลาดท้องน้ำ 10% ถ้ามาตราส่วนมิติที่ทดลองจริงเป็น 1:10 (0.1 ที่แกนแนวราบ) จะได้มาตราส่วนขนาดหินทั้งตามเกณฑ์ของ Froude ที่ 3:10 (0.3 ที่แกนแนวตั้ง) สมมติแบบจำลองใช้หินทั้งขนาด 1 นิ้ว ที่ความลาดชัน 10% ด้วยมาตราส่วน 1:10 ในการศึกษา แปลว่า จะสร้างจริงที่ 10 นิ้ว เมื่อไม่มีการปรับแก้ แต่จากความสัมพันธ์ในการปรับแก้ที่วิเคราะห์มาชี้ว่ามาตราส่วน 3:10 หรือประมาณ 1:3 เป็นมาตราส่วนของขนาดหินทั้งที่เป็นตัวแทนที่แท้จริงของพฤติกรรมด้านเสถียรภาพของโครงสร้าง ดังนั้นการสร้างโครงสร้างหินทั้งจริงที่ 3 นิ้วนั้นเพียงพอแล้วไม่ต้องจัดหาขนาด 10 นิ้วตามมาตราส่วนเดิม

ดังนั้นการศึกษาเสถียรภาพของโครงสร้างหินทั้งด้วยแบบจำลองกายภาพที่ผ่านมาซึ่งไม่ได้ปรับแก้มาตราส่วนนั้นเลือกใช้ขนาดหินที่ใหญ่กว่าตัวแทนที่แท้จริง อันเป็นการป้องกันส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นมาจากตัวคูณความปลอดภัย (safety factor) หรืออัตราการไหลออกแบบ (designed flow) อีกระดับ ทั้งนี้อาจเป็นการออกแบบที่ป้องกันมากเกินไปจนได้โครงสร้างที่ใหญ่โตเกินความจำเป็นหรือไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การก่อสร้างและบำรุงรักษา

สรุปการศึกษาเสถียรภาพของโครงสร้างหินทั้งในทางน้ำเปิดที่น้ำไหลท่วมตัวโครงสร้างด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ที่ขยายขนาดหินทั้งจากแบบจำลองด้วยมาตราส่วนมิติให้ผลสูงกว่าทฤษฎีในเกณฑ์ของ Froude หากก่อสร้างตัวต้นแบบโดยไม่ปรับมาตราส่วนของหินทั้งจะได้โครงสร้างหินทั้งที่มีเสถียรภาพเพราะเลือกใช้ใหญ่กว่าตัวแทนที่แท้จริง

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

5.1 การอภิปรายและสรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบผลของการใช้มาตราส่วน (scale effect) ในการเลือกขนาดหินทิ้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าปรับแก้การย่อหรือขยายขนาดตามมาตราส่วน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกันกับปัจจัยที่ศึกษา และเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์การวิจัยแบบจำลองทางกายภาพทางชลศาสตร์การไหลและการกัดเซาะของหินทิ้งในทางน้ำเปิด รวมถึงการประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโครงสร้างทางชลศาสตร์อื่นๆ

ขอบเขตของการศึกษานี้คือ ใช้หินแกรนิตย่อยผลิตในประเทศไทยเป็นวัสดุหินทิ้งโดยคัดขนาดอย่างสม่ำเสมอ 4 ขนาด กำหนดค่าแทนขนาด (nominal size, D_{50}) เป็น $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $1\frac{1}{2}$ และ 2 นิ้ว ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่สนใจคือความหนาแน่นของวัสดุ (ρ_s) กับมุมทรงตัว (θ) ติดตั้งเป็นแบบจำลองที่ความลาดต่อน้ำ (S) จำนวน 3 ระดับคือ 2%, 5% และ 10% ในรางน้ำเปิดหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าของห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีระบบสูบน้ำหมุนเวียนรักษาระดับน้ำกับความดันคงที่โดยรางน้ำเปิดกว้าง (B) 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. ยาว 17 ม. สามารถสร้างอัตราการไหลได้สูงสุด 85 ลิตร/วินาที กับปรับความลาดชันได้ไม่เกิน 1.5%

จากความสามารถของอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการประกอบกับแนวทางการออกแบบแบบจำลองกายภาพโดย Abt, Thornton et al. (2008) จึงติดตั้งแบบจำลองกายภาพโดยโครงสร้างหินทิ้งยาว 4 ม. เป็นแบบถมรูปปลีมา เพื่อสร้างความลาดต่อน้ำ 2%, 5% และ 10% โดยตั้งความลาดชันของรางน้ำให้ราบ ไม่มีการยกกระดบต่อน้ำช่วงต้นรางน้ำถึงกึ่งกลางรางน้ำแต่สร้างความลาดต่อน้ำด้วยการถมกระสอบทรายรองพื้นให้สูงขึ้น กั้นบริเวณที่ถมโครงสร้างด้วยกำแพงหิน ถมโครงสร้างหินทิ้งให้ราบเป็นระยะ 1 ม. จากต้นน้ำและลาดลงท้ายรางน้ำเป็นระยะที่เหลือ 3 ม. ด้วยความลาดชันที่กำหนด

การทดลองและเก็บข้อมูลเริ่มด้วยเปิดเครื่องสูบน้ำให้ระบบหมุนเวียนน้ำสมดุล เปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้ารางน้ำในอัตราการไหลต่ำซึ่งไม่เกิดการพัดพาหินทิ้งจนระบบสมดุล ปรับวาล์วเพิ่มอัตราการไหลถึงระดับที่ต้องการไว้ระยะเวลาหนึ่งให้ระบบสมดุล ตั้งตะแกรงดักหินทิ้งพร้อมจับเวลา ขณะรอครบกำหนดเวลาทำการเก็บข้อมูลอื่นๆ อย่างความลึกการไหล (y) ตามตำแหน่งที่กำหนดเพื่อเฉลี่ยความลึกการไหล ระดับน้ำเหนือสันฝาย (h) เพื่อคิดอัตราการไหล (q) ภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวเพื่อสังเกตพฤติกรรมการพัดพา เมื่อครบกำหนดให้เปลี่ยนตะแกรงและทำซ้ำเพื่อความแม่นยำของข้อมูล เมื่อได้ชุดข้อมูลของกรณีเพียงพอแล้วให้ปิดวาล์วน้ำและเครื่องสูบน้ำ ตากหินทิ้งที่ดักมาให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักคิดเป็นอัตราการพัดพา (q_s) ถมหินคืนที่พร้อมเกลี่ยให้ได้ระดับพร้อมทดลองกรณีต่อไป รวมจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 31 กรณี 145 ชุดข้อมูล

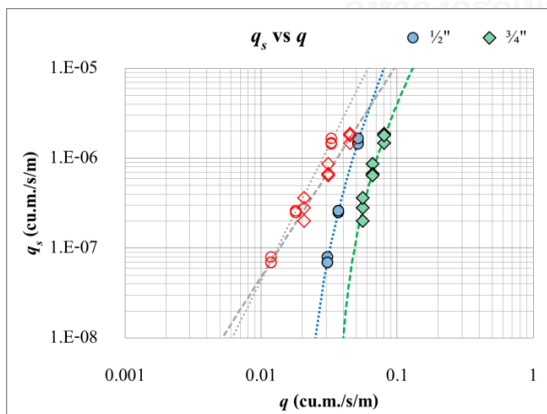
พิจารณาข้อมูลทั้งหมดพบว่า หินขนาด $1\frac{1}{2}$ กับ 2 นิ้ว ที่ความลาดต่อน้ำ 2% ไม่มีการพัดพาเกิดขึ้นจึงไม่นำมาวิเคราะห์ อีกทั้งหินขนาด 2 นิ้วที่ความลาดชัน 5% มีเพียง 1 กรณี 1 ชุดข้อมูล ซึ่งไม่พอสำหรับการวิเคราะห์และมีการเปลี่ยนรูปแบบการไหลจากได้วิกฤติเป็นเหนือวิกฤติเหมือนกันทุกกรณี กรณีและชุดข้อมูลที่เหลือทำการคัดเลือกพร้อมกับวิเคราะห์ผลตามความเหมาะสม สรุปจำนวนกรณีและชุดข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 23 กรณี 66 ชุดข้อมูล จากการวิเคราะห์ 3 ประเด็นดังนี้

การวิเคราะห์หาอัตราการไหลแรกเคลื่อน

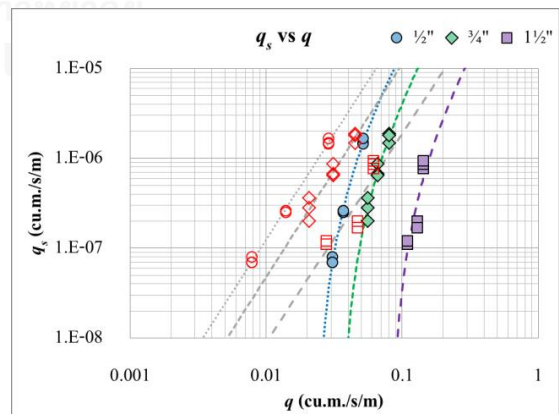
จากวัตถุประสงค์ของที่ต้องการทราบปัจจัยกับความสัมพันธ์ระหว่างกันของแบบจำลองเทียบกับตัวต้นแบบ ในเกณฑ์ของ Froude การที่จะทราบนั้นต้องมีค่าชี้วัดก่อน ค่าชี้วัดที่ชัดเจนคืออัตราการไหลที่ทำให้โครงสร้างพังทลาย (q_f) โดยก่อนที่โครงสร้างจะพังทลายต้องมีการเคลื่อนตัวของหินทิ้งที่อัตราการไหลหนึ่งก่อนอันเป็นอัตราการไหลแรกเคลื่อน (q_0)

อัตราการไหลแรกเคลื่อนสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีการเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ (บทที่ 2) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การไหล (ψ) กับเลขเรโนลด์ของอนุภาค (Rn_*) รวมกันเป็นผังของ Shield (Shield's Diagram) กำหนดให้เส้นแบ่งสภาวะเคลื่อนที่/ไม่เคลื่อนที่ ต่อยาวออกไปเป็นแนวราบที่ $\psi = 0.047$ ตลอด เลขเรโนลด์ของอนุภาคตั้งแต่ 200 เป็นต้นไปตาม Pawet (2011) พบว่ามีข้อมูลบางส่วนอยู่ในช่วงสภาวะไม่เคลื่อนที่ แม้มีการพัดพาเกิดขึ้นจริงประกอบกับไม่มีข้อมูลที่คาบเส้นแบ่งสภาวะที่ชัดเจน จึงใช้วิธีการทางสถิติมาคำนวณให้ชัดเจน

วิธีการทางสถิติที่ใช้คือการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) ซึ่งเป็นการหาเส้นแนวโน้มและจุดสนใจของเส้น เปรียบเส้นแนวโน้มคือความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับอัตราการพัดพาท้องน้ำ และจุดสนใจคืออัตราการไหลแรกเคลื่อนหรืออัตราการไหลสูงสุดที่ไม่มีการพัดพาเกิดขึ้น วิเคราะห์ด้วยการลองผิดลองถูก (trial & error) อย่างมีหลักการคือ ไม่ใช้อัตราการไหลมากกว่าข้อมูลจริงที่เริ่มมีการพัดพาเกิดขึ้น และให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ผลการลองไม่สามารถให้ค่าอัตราการไหลแรกเคลื่อนได้เป็นส่วนใหญ่ จึงวิเคราะห์ลึกลงไปในกรณีส่วนน้อยที่สามารถหาได้ พบว่าที่ความลาดท้องน้ำเดียวกันนั้น เส้นโค้ง $q_s = C(q - q_0)^m$ และเส้นตรง $q_s = Cq^m$ ในกราฟมาตรา log-log ของหินขนาดหนึ่งดูขนาดกับหินอีกขนาด จึงอนุมานว่าเส้นสมการควรจะขนานกันระหว่างกรณีต่างๆ ทำให้หาอัตราการไหลแรกเคลื่อนของกรณีอื่นได้โดยไม่ต้องสนใจค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับกรณีที่มีจำนวนข้อมูลอัตราการพัดพาที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับรูปที่ 5-1 (ก) และ (ข)



(ก) การไม่พิจารณาเส้นตรงให้ขนานกัน

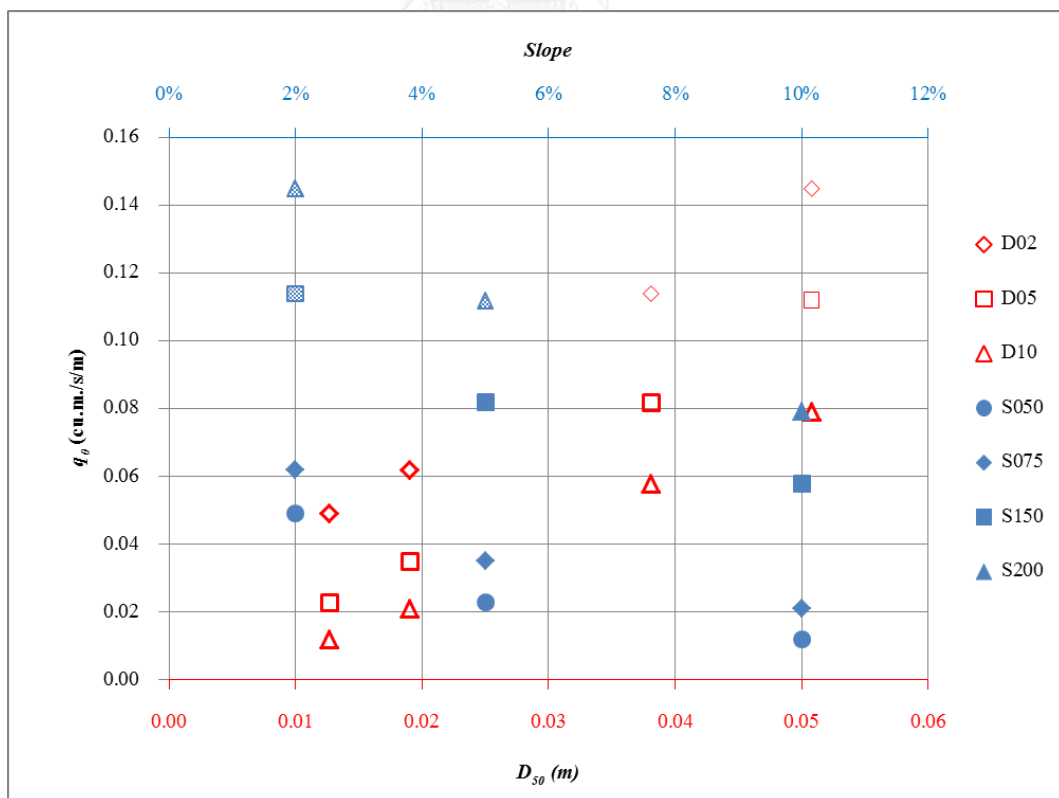


(ข) การพิจารณาเส้นตรงให้ขนานกัน

รูปที่ 5-1 ผลการวิเคราะห์ความถดถอย

สำหรับกรณีที่มีจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอ นั้น หลักลำดับและอนุกรม (sequences & series) สามารถประมาณค่าอัตราการไหลของกรณีที่เกิดข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ไม่สามารถทำให้โครงสร้างหินทิ้งเกิดการพัดพาหรือพังทลายได้ โดยตั้งอัตราการไหลแรกเคลื่อนของหินขนาดอื่นมาเป็นแนวทางได้ผลดังกราฟรูปที่ 5-2 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหินทิ้ง ลาดท้องน้ำ และอัตราการไหลแรกเคลื่อน โดยชุดข้อมูลประเภท D02, D05 และ D10 คือขนาดหินที่ลาดท้องน้ำ 2%, 5% และ 10% ตามลำดับในแกนนอนด้านล่าง กับชุดข้อมูลประเภท S050, S075, S150 และ S200 คือลาดท้องน้ำที่หินขนาด 1/2, 3/4, 1 1/2 และ 2 นิ้ว ตามลำดับในแกนนอนด้านบน สีหรือขอบของสัญลักษณ์ที่เข้มกว่าคือข้อมูลจากการวิเคราะห์ความถดถอยที่กล่าวก่อนหน้า สำหรับอันที่จางกว่าคือข้อมูลจากหลักลำดับและอนุกรมนี้

เมื่อได้ผลการประมาณค่าด้วยหลักลำดับและอนุกรมแล้ววิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลแรกเคลื่อนซึ่งขนาดหินทิ้งและลาดท้องน้ำเป็นตัวแปรที่ชัดเจนจึงให้ความสำคัญอันดับแรก เบื้องต้นจากการสังเกตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้งและกับลาดท้องน้ำดังรูปที่ 5-2 พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์กับขนาดหินทิ้งเป็นเส้นตรงแบบแปรผกผันตรงที่ความลาดชันเดียวกัน หรือเมื่อเพิ่มขนาดหินทิ้งให้ใหญ่ขึ้นต้องใช้อัตราการไหลมากขึ้นตามไปด้วยแบบคงที่ สมมติเช่นเมื่อเพิ่มขนาดหินจาก 1/2 นิ้ว เป็น 1 นิ้ว และจากขนาด 1 นิ้ว เป็น 1 1/2 นิ้ว ซึ่งเพิ่มขนาดที่ 1/2 นิ้ว เท่ากัน ล้วนได้อัตราการไหลแรกเคลื่อนเพิ่มขึ้น 1 หน่วยเท่ากันด้วย สำหรับแนวโน้มความสัมพันธ์กับลาดท้องน้ำเป็นเส้นโค้งแบบแปรผกผันที่หินขนาดเดียวกัน หรือเมื่อเพิ่มลาดท้องน้ำให้มากขึ้น อัตราการไหลแรกเคลื่อนกลับลดลงในอัตราที่น้อยกว่า สมมติเมื่อเพิ่มลาดท้องน้ำจาก 2% เป็น 5% และจาก 5% เป็น 8% ซึ่งเพิ่มขึ้น 3% เท่ากัน อัตราการไหลแรกเคลื่อนลดลงไม่เท่ากันโดยจาก 2% เป็น 5% ลดลง 1 หน่วย และจาก 5% เป็น 8% ลดลง 0.75 หน่วย เป็นต้น



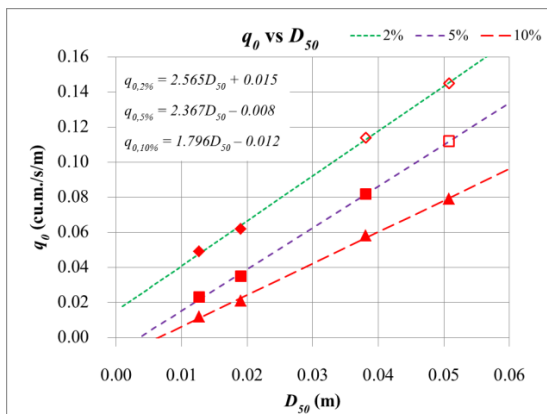
รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแรกเคลื่อนกับขนาดหินทิ้งและลาดท้องน้ำ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลแรกเคลื่อน

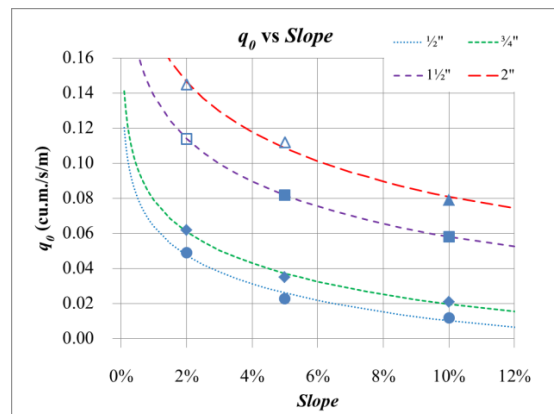
จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา ในขั้นตอนการวิเคราะห์ที่แล้งบ่งชี้ถึงขนาดหินทิ้งและความลาดท้องน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาจากการสังเกตกราฟความสัมพันธ์กัน ผลวิเคราะห์ปัจจัยขนาดหินทิ้งที่ลาดท้องน้ำคงที่ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่ายได้แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามที่สังเกตเบื้องต้น และปรากฏจุดสนใจที่อธิบายความสัมพันธ์ได้ โดยที่ความลาดชัน 2% นั้นแม้หินทิ้งขนาดเล็กเพียงใดก็จำเป็นต้องมีน้ำไหลท่วมผ่านโครงสร้างก่อนถึงจะมีการพัดพาเกิดขึ้น ส่วนความลาดชัน 5% กับ 10% นั้นต้องใช้หินขนาดใหญ่ประมาณหนึ่งเพื่อไม่ให้โครงสร้างพังทลายตั้งแต่ก่อสร้างหรือยังไม่มีไหลเกิดขึ้น ผลวิเคราะห์ปัจจัยความลาดท้องน้ำที่ขนาดหินทิ้งที่ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อนได้แนวโน้มลดลงอย่างไม่คงที่แบบผลต่างน้อยกว่าเดิมตามที่สังเกตเบื้องต้นเช่นกันโดยนำปัจจัยมุมทรงตัวมาคิดด้วยเพราะผลที่ได้นั้นไม่กระจายตัวห่างกันมากหรือมีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่งเฉกเช่นเมื่อไม่ใช้ปัจจัยมุมทรงตัวมาคำนวณร่วม และมีจุดสนใจถึง 2 จุด คือเมื่อความลาดชันเข้าใกล้ 0% จะได้ค่าประมาณของอัตราการไหลแรกเคลื่อนสูงสุดสำหรับหินทิ้งขนาดนั้นๆ กับเมื่ออัตราการไหลแรกเคลื่อนเป็น 0 จะได้ลาดท้องน้ำสูงสุดที่หินทิ้งขนาดนั้นๆ น่าจะสามารถก่อกำเนิด สืบเนื่องจากการต่อเส้นแนวโน้ม (extrapolation) ยาวออกนอกช่วงข้อมูลที่กว้างกว่าช่วงข้อมูลที่มีมาก ทำให้จุดสนใจไม่สามารถชี้ชัดได้จนกว่าจะมีข้อมูลการศึกษาในช่วงส่วนต่อเส้นแนวโน้มเพิ่มเติม ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5-3

ดังนั้นแล้วปัจจัยที่ศึกษาหลักของอัตราการไหลแรกเคลื่อนคือขนาดหินทิ้ง (D_{50}) และความลาดท้องน้ำ (S) ร่วมกับมุมทรงตัว (θ) พิจารณาปัจจัยขนาดหินทิ้งกับมุมทรงตัวนั้นมีความเกี่ยวเนื่องกันตามคุณสมบัติทางกายภาพ เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ร่วมระหว่างความลาดชันกับมุมทรงตัวสามารถมีปัจจัยขนาดหินทิ้งเสริมกันได้ จึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกันทั้ง 3 ปัจจัย ด้วยความถดถอยเชิงเส้นแบบต่างๆ กับการแปลงความสัมพันธ์ร่วมระหว่างลาดท้องน้ำกับมุมทรงตัวเดิม ผลพบว่าการแปลงความสัมพันธ์ร่วมระหว่างลาดท้องน้ำกับมุมทรงตัวเดิมให้ความเข้ากันของข้อมูลสูงกว่าแบบอื่นโดยที่ยังคงความสัมพันธ์เหมือนการวิเคราะห์ปัจจัยเดี่ยวๆ ได้ดังสมการข้างล่าง โดยเห็นว่าขนาดหินทิ้งยังมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันตรงอย่างคงที่เพราะตัวคูณตัวหารเป็นค่าคงที่ ส่วนลาดท้องน้ำร่วมกับมุมทรงตัวเป็นแบบแปรผกผันอย่างน้อยลงเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นเช่นเดิมจากเลขยกกำลังที่ติดลบเช่นเดียวกับกราฟลักษณะไฮเพอร์โบล่า

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



(ก) ปัจจัยขนาดหินทิ้ง



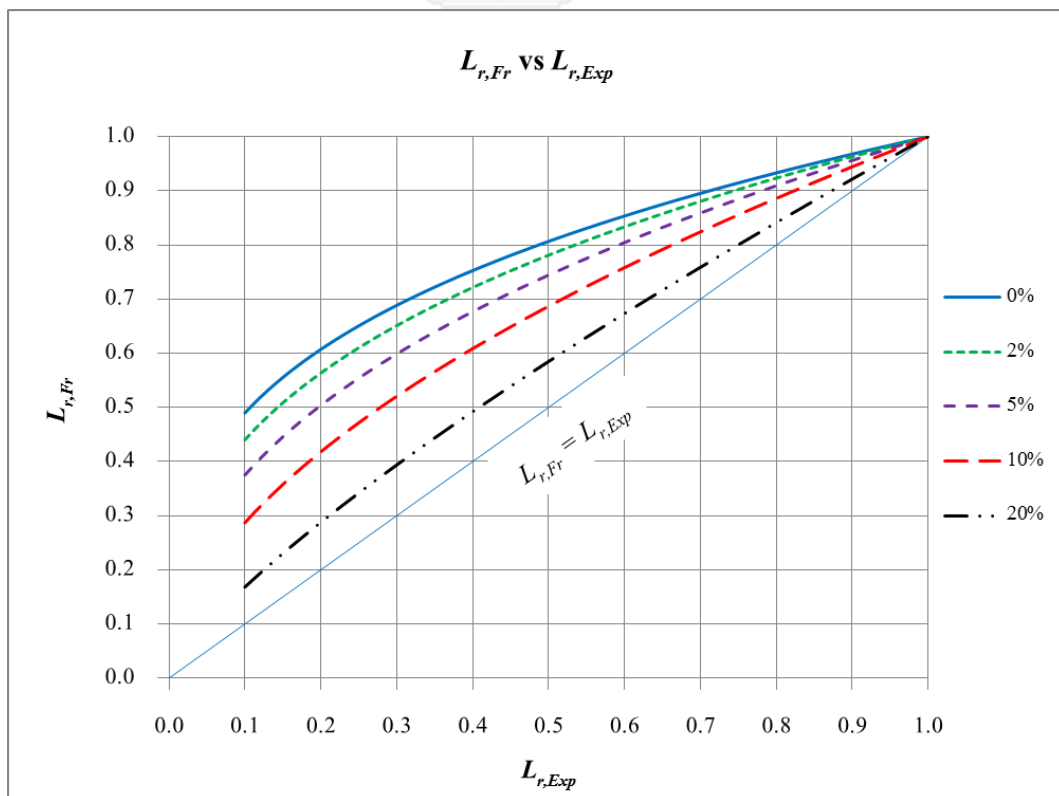
(ข) ปัจจัยลาดท้องน้ำ

รูปที่ 5-3 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบแยกปัจจัย

การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วน

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการทราบผลของการใช้มาตราส่วนในการเลือกขนาดหินทิ้งและการปรับแก้ จึงใช้การศึกษาที่ผ่านมาร่วมกับการศึกษานี้เพื่อให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลได้มากขึ้น โดยเลือกใช้การศึกษาของ Abt and Johnson (1991) กับ Aguirre-Pe (2003) เพราะมีอัตราการไหลแรกเคลื่อน มีลาดต่อน้ำตรงกับที่ศึกษาหรือเทียบกันได้ ใช้หินขนาดที่เทียบมาตราส่วนกันได้ และการไหลเป็นการไหลเหนือวิกฤติแบบเดียวกัน ประกอบกับความคละของขนาดหินที่เป็นแบบสมำเสมอหรือใกล้เคียง ซึ่งล้วนมีลักษณะแบบเดียวกับการศึกษานี้ การวิเคราะห์ผลของมาตราส่วนร่วมกันระหว่างการศึกษานี้กับการศึกษาที่ผ่านมาจะเป็นคู่ๆ รวมการจับคู่ได้ 3 ประเภท คือ ผลจากการศึกษานี้เท่านั้น ผลจากการศึกษานี้ร่วมกับการศึกษาที่ผ่านมา และผลจากการศึกษาที่ผ่านมาเท่านั้น ที่ความลาดต่อน้ำต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 ประเภท พบว่าที่ตำแหน่งมาตราส่วนมิติที่ใช้จริงตำแหน่งเดียวกันสามารถให้ตำแหน่งมาตราส่วนทางทฤษฎีในเกณฑ์ของ Froude ได้หลายค่า ก่อให้เกิดแถบของความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนขึ้นสันนิษฐานว่ามุ่มทรงตัวเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดแถบความสัมพันธ์นี้เพราะมีข้อมูลที่หินทิ้งขนาดเดียวกันแต่มีมุ่มทรงตัวต่างกัน แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนกับมุ่มทรงตัวได้เนื่องจากทั้งการศึกษานี้และการศึกษาที่ผ่านมามีไม่ได้ใช้วิธีเดียวกันหรือวิธีมาตรฐานในการวัดมุ่มทรงตัว คงเหลือเพียงปัจจัยความลาดต่อน้ำไว้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนมิติจากขนาดหินจริงกับมาตราส่วนทางทฤษฎีในเกณฑ์ของ Froude พบว่ามีความสัมพันธ์ประเภทแปรผันตรงอย่างไม่คงที่แบบน้อยลงในช่วงมาตราส่วน 1:8 (0.125) ถึง 1:1 (1.0) เมื่อใช้มาตราส่วนเข้าใกล้ 1:1 ดังกราฟรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 กราฟความสัมพันธ์ของมาตราส่วนหินทิ้งระหว่างผลทดลองจริงกับผลทางทฤษฎี

พิจารณาการใช้แบบจำลองย่อส่วนในการศึกษาจะให้มาตราส่วนตามทฤษฎีของกฎความคล้ายคลึงกันในเกณฑ์ของ Froude ต่ำกว่า (under-estimate) มาตราส่วนมิติ ตัวอย่างเช่นการศึกษาโครงสร้างหินทิ้งที่ความลาดชัน 10% ใช้แบบจำลองหินทิ้งขนาด 1 นิ้ว ด้วยมาตราส่วน 1:2 (0.5) จากตัวต้นแบบ แปลว่าจะสร้างตัวต้นแบบโดยใช้หินทิ้งขนาด 2 นิ้ว แต่จากความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์มาดังกราฟรูปที่ 5-4 ซึ่งว่ามาตราส่วน 7:10 (0.7) หรือประมาณ 1:1.5 เป็นมาตราส่วนที่แท้จริงซึ่งจะขยายขนาดน้อยกว่าที่ 1:2 ดังนั้นตัวต้นแบบโครงสร้างหินทิ้งสามารถสร้างด้วยขนาด 1.5 นิ้ว นั้นเพียงพอแล้วไม่ต้องจัดหาขนาด 2 นิ้วตามมาตราส่วนที่กำหนดแต่แรกโดยที่ส่วนอื่นของตัวต้นแบบยังขยายด้วยมาตราส่วน 1:2 เช่นเดิม

สรุปการศึกษาเสถียรภาพของโครงสร้างหินทิ้งที่ลาดเอียงลงช่วง 2% ถึง 20% ในทางน้ำเปิดด้วยแบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ที่ขยายขนาดหินทิ้งจากแบบจำลองในช่วงมาตราส่วน 1:8 ถึง 1:1 ให้ผลต่ำกว่าทฤษฎีของกฎความคล้ายคลึงกันในเกณฑ์ของ Froude เมื่อปรับแก้มาตราส่วนแล้วทำให้ตัวต้นแบบมีการขยายขนาดน้อยกว่า ดังนั้นหากก่อสร้างตัวต้นแบบโดยไม่ปรับมาตราส่วนของหินทิ้งจะได้ว่าโครงสร้างหินทิ้งมีเสถียรภาพเพราะเลือกใช้ใหญ่กว่าตัวแทนที่แท้จริง อันเป็นการป้องกันส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นมาจากตัวคูณความปลอดภัย (safety factor) อื่นๆ อีก ระดับ ทั้งนี้อาจเป็นการออกแบบที่ป้องกันมากเกินไปจนได้โครงสร้างที่ใหญ่โตเกินความจำเป็นหรือไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การก่อสร้างและบำรุงรักษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาในภายหน้าควรนิยามหรือพิจารณาการหามุมทรงตัวของวัสดุกองเทเช่น หิน กรวด ทราย ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งค่ามุมทรงตัวที่วัดได้ในการศึกษาสามารถวิเคราะห์ในการศึกษานี้ได้แต่ใช้กับการศึกษาที่ผ่านมามีอื่นๆ ไม่ได้ ทั้งที่การศึกษาทั้งหมดล้วนไม่ได้ใช้นิยามและการวัดตามมาตรฐาน
- 2) การศึกษาในภายหน้าควรทำที่มาตราส่วนย่อขนาดที่เล็กกว่า 1:10 ลงไป และที่ความลาดชันในแนวราบ เพื่อเติมเต็มและยืนยันการประมาณค่าจากสมการเส้นแนวโน้มเดิมให้ดียิ่งขึ้น
- 3) การศึกษาในภายหน้าควรรวมสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของหินทิ้งเข้าในปัจจัยหลักในการศึกษา เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมามีบันทึกแบบที่ละเอียดไม่สม่ำเสมอ

รายการอ้างอิง

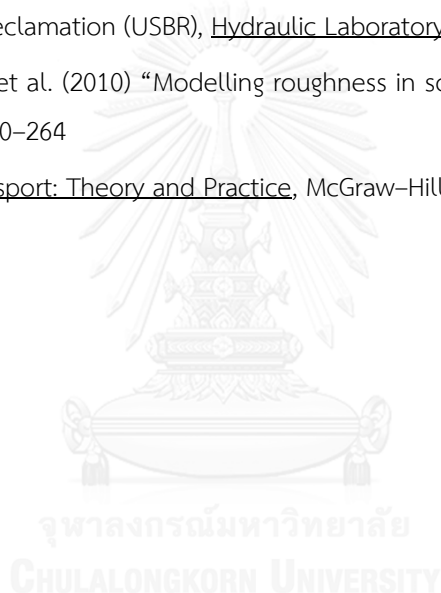
เอกสารอ้างอิงภาษาไทย

- กัญญา อินทร์เกลี้ยง, 2549, การศึกษาแบบจำลองชลศาสตร์ฝายหนองสลี กรณีศึกษาการปรับปรุงอาคารสลายพลังงานด้านท้ายฝายหลังลดสันฝายและติดตั้งฝายยาง, กลุ่มงานชลศาสตร์ ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน
- ปริญญา กมลสินธุ์, 2551, โครงการศึกษาประสิทธิภาพการระบายน้ำในคลองลัดโพธิ์และแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณใกล้เคียงภายหลังการก่อสร้างโครงการปรับปรุงคลองลัดโพธิ์, กลุ่มงานชลศาสตร์ ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน
- เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักวิจัย, 2556, ชลศาสตร์การไหลในทางน้ำเปิดชั้นพื้นฐาน, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เสรี จันทโรยธา และ ชัยพันธุ์ รักวิจัย, 2556, ชลศาสตร์การไหลในทางน้ำเปิดชั้นสูง, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิงภาษาต่างประเทศ

- Abt, S. and T. Johnson (1991) "Riprap Design for Overtopping Flow" Journal of Hydraulic Engineering 117(8), 959-972
- Abt, S., et al. (2008) "Round-Shaped Riprap Stabilization in Overtopping Flow" Journal of Hydraulic Engineering 134(8): 1035-1041.
- Abt, S. R., et al. (2013). "Evaluation of Overtopping Riprap Design Relationships" JAWRA Journal of the American Water Resources Association 49(4): 923-937.
- Aguirre-Pe, J., et al. (2003). "Particle Densimetric Froude Number for Estimating Sediment Transport" Journal of Hydraulic Engineering 129(6): 428-437.
- Beheshti, A. A. and B. Ataie-Ashtiani (2008), "Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement" Coastal Engineering 55(2008), 423-430
- Chen, W.F., The Civil Engineering Handbook, 2nd Edition, CRC Press LLC ,2003
- Heller, V. (2011) "Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models" Journal of Hydraulic Research 49(3), 293-306
- Linsley, Ray K., Hydrology for engineers, SI Metric Edition, McGraw-Hill, 1988

- Metcalf, J. R. (1966). "Angle of repose and internal friction" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 3(2): 155-161.
- Pawel Rowiński, Experimental Methods in Hydraulic Research, Springer, 2011
- Shield, A. (1936). "Application of Similarity Principles, and Turbulence Research to Bed-Load Movement" California Institute of Technology, Pasadena (translated from German)
- Siebel, R. (2007). "Experimental investigations on the stability of riprap layers on overtoppable earthdams" *Environmental Fluid Mechanics* 7(6): 455-467.
- Turowski, J. and D. Rickenmann (2011). "Measuring the Statistics of Bed-Load Transport Using Indirect Sensors" *Journal of Hydraulic Engineering* 137(1): 116-121.
- United States Bureau of Reclamation (USBR), Design of Small Dams, USBR, 1987
- United States Bureau of Reclamation (USBR), Hydraulic Laboratory Techniques, USBR, 1987
- Webb, C. B., S. L. Barfuss, et al. (2010) "Modelling roughness in scale models" *Journal of Hydraulic Research* 48(2), 260–264
- Yang, C. T., Sediment Transport: Theory and Practice, McGraw-Hill, 1996





ภาคผนวก ก. แบบจำลองศาสตร์ทางน้ำเปิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แบบจำลองชลศาสตร์ทางน้ำเปิดของห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล อาคารวิศวกรรม 5
ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ และมี
ระบบสูบน้ำหมุนเวียนเพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่

อุปกรณ์มีดังนี้

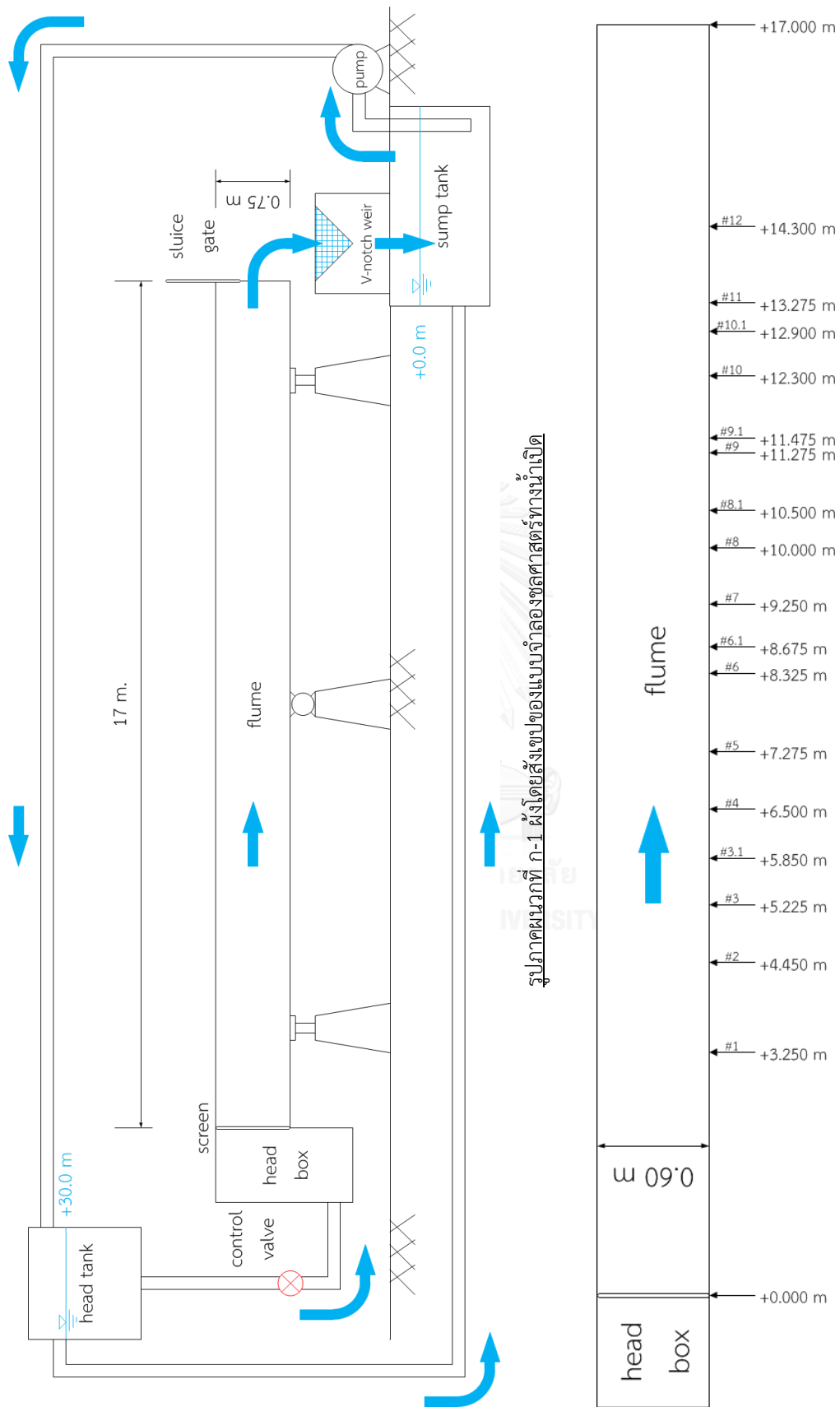
- 1) ถังเก็บน้ำ (head tank) ความจุ 30 ลบ.ม. อยู่บนชั้นดาดฟ้าของอาคาร ต่อท่อรักษาระดับน้ำสู่อุปกรณ์
โดยตรง
- 2) วาล์วควบคุม (control valve) ใช้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบ
- 3) รางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume) กว้าง 0.60 ม. ยาว 17 ม. ลึก 0.75 ม. ผนังด้านข้างทำ
ด้วยกระจกใสหนา 1.2 ซม. ทั้ง 2 ด้าน พื้นรางทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ความลาดเอียงของรางน้ำ
สามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า มีประตูน้ำแบบบานยก (sluice gate) ที่ปลายรางน้ำ มี
ตะแกรง (screen) ที่ถังพักน้ำด้านเหนือน้ำ (head box) เพื่อลดขนาดของคลื่นและความรุนแรงของ
กระแสน้ำ
- 4) ถังฝายสามเหลี่ยมมุมฉากสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งที่ท้ายรางน้ำ มีกำแพงสลายคลื่นในตัว ใช้วัด
อัตราการไหลของน้ำจากการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (h) หลังกำแพงสลายคลื่นด้วยมานอมิเตอร์
(manometer)
- 5) บ่อพักน้ำ (sump tank) ใช้เก็บน้ำจากรางน้ำและท่อรักษาระดับน้ำของถังเก็บน้ำ
- 6) เครื่องสูบน้ำ (pump) จำนวน 4 เครื่อง อัตราการไหลสูงสุดประมาณ 25 ลิตรต่อวินาทีต่อเครื่อง
- 7) นาฬิกาจับเวลา
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 1 กรัม

การหมุนเวียนน้ำเริ่มจากปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำชั้นดาดฟ้า (ระดับความสูงน้ำ +30.0 ม.) ด้วยวาล์วควบคุม
(ที่ชั้น 1) เข้าถังพักน้ำด้านเหนือน้ำของรางน้ำ น้ำจะไหลตามรางน้ำสู่ถังฝายสามเหลี่ยมที่ท้ายน้ำและลงบ่อพักน้ำ
(ระดับอ้างอิง +0.0 ม.) ต่อไป และถูกสูบกลับขึ้นไปยังถังเก็บน้ำอีกครั้งหนึ่ง ปริมาณน้ำส่วนเกินที่เพิ่มระดับความสูง
น้ำในถังเก็บน้ำชั้นดาดฟ้าจะไหลเข้าบ่อพักน้ำชั้นล่างโดยตรงด้วยท่อรักษาระดับน้ำ สรุปรูปภาพผนวกที่ ก-1

รางน้ำติดตั้งมาตรฐานระดับน้ำรวม 17 ตำแหน่ง กำหนดชื่อและมีระยะห่างจากต้นน้ำดังตารางภาคผนวกที่ ก-1 และรูปภาคผนวกที่ ก-2

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ตำแหน่งมาตรฐานระดับน้ำของรางน้ำ

ตำแหน่ง	ระยะ (ม.)	ตำแหน่ง	ระยะ (ม.)
#1	3.250	#8	10.000
#2	4.450	#8.1	10.500
#3	5.225	#9	11.275
#3.1	5.850	#9.1	11.475
#4	6.500	#10	12.300
#5	7.275	#10.1	12.900
#6	8.325	#11	13.275
#6.1	8.675	#12	14.300
#7	9.250		



รูปภาคผนวกที่ ก-1 ผังโดยสังเขปของแบบจำลองของตลาดน้ำเปิด

รูปภาคผนวกที่ ก-2 ผังโดยสังเขปของตำแหน่งมาตรวัดระดับน้ำของรางน้ำ



เครื่องสูบน้ำ



วาล์วควบคุม



ด้านในรางน้ำ



หลอดน้ำ (manometer) ด้านนอกถังฝาย



ถังฝายสามเหลี่ยมมุมฉาก



ห้องปฏิบัติการ

รูปภาคผนวกที่ ก-3 อุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการ

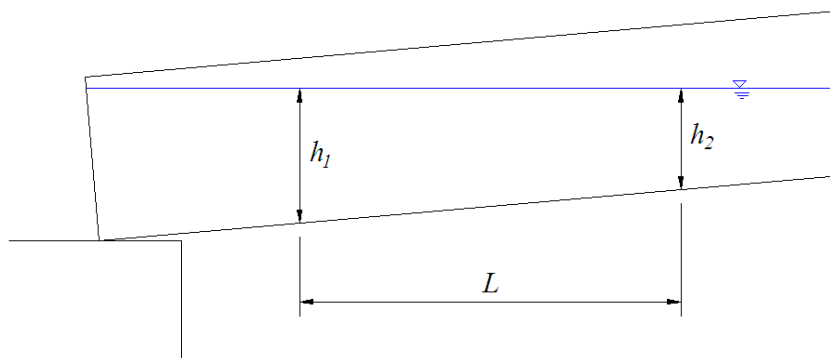
การสอบเทียบความลาดชัน

แบบจำลองชลศาสตร์ทางน้ำเปิดมีเข็มชี้ระดับแต่มาตรวัดเป็นไม้บรรทัดมาตราเมตริกทั่วไปดังรูปภาคผนวกที่ ก-4 ไม่ใช่มาตรวัดความลาดชันที่อ่านค่าไปใช้ได้ทันที ต้องมีการสอบเทียบความลาดชันระหว่างมาตรวัดที่มีกับความลาดชันจริง



รูปภาคผนวกที่ ก-4 มาตรวัดความลาดชันที่มี

การสอบเทียบความลาดชันทำโดยขังน้ำไว้ในรางน้ำที่ความลาดชันต่างๆ วัดระดับน้ำอย่างน้อย 2 ตำแหน่งตามระยะทางราบระยะหนึ่ง บันทึกค่าความสูง h_1 , h_2 กับระยะ L ไปคำนวณความลาดชัน (S_0) แสดงดังรูปภาคผนวกที่ ก-5



รูปภาคผนวกที่ ก-5 การวัดเพื่อสอบเทียบความลาดชัน

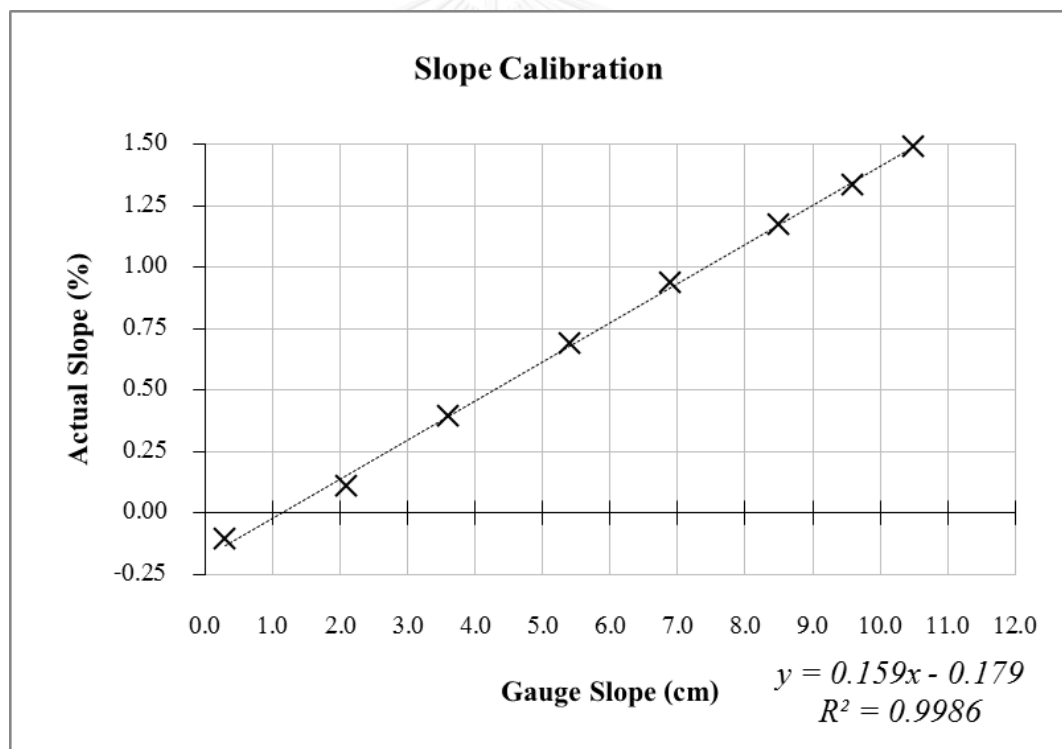
เมื่อความลาดชันของทางน้ำน้อยกว่า 6 องศา หรือ 10.5% ระดับน้ำและระยะทางที่วัดไม่ต้องคำนึงถึงผลของมุมเพราะความแตกต่างมีค่าน้อยมาก ($\sin \theta \approx \tan \theta$) จึงคำนวณได้ดังสมการดังนี้

$$S_0 = \frac{h_1 - h_2}{L} \times 100 \quad [\%]$$

สรุปข้อมูลและผลการสอบเทียบความลาดชันดังตารางภาคผนวกที่ ก-2 และรูปภาคผนวกที่ ก-6

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ข้อมูลและผลการสอบเทียบความลาดชัน

Gauge Slope (cm)	<i>h</i>					Average Actual Slope (%)
	#1 (+3.250 m)	#6 (+8.325 m)	#7 (+9.250 m)	#9 (+11.275 m)	#11 (+13.275 m)	
10.5	16.0	22.5	24.3	27.3	30.1	1.49
9.6	16.4	22.3	23.8	26.6	29.1	1.33
8.5	17.1	22.2	23.6	26.0	28.2	1.17
6.9	18.3	22.2	23.4	25.3	27.0	0.94
5.4	19.4	22.0	23.0	24.4	25.6	0.69
3.6	20.3	22.2	22.5	23.4	24.2	0.39
2.1	21.6	22.1	22.1	22.5	22.7	0.11
0.3	22.5	22.0	21.8	21.7	21.5	-0.11



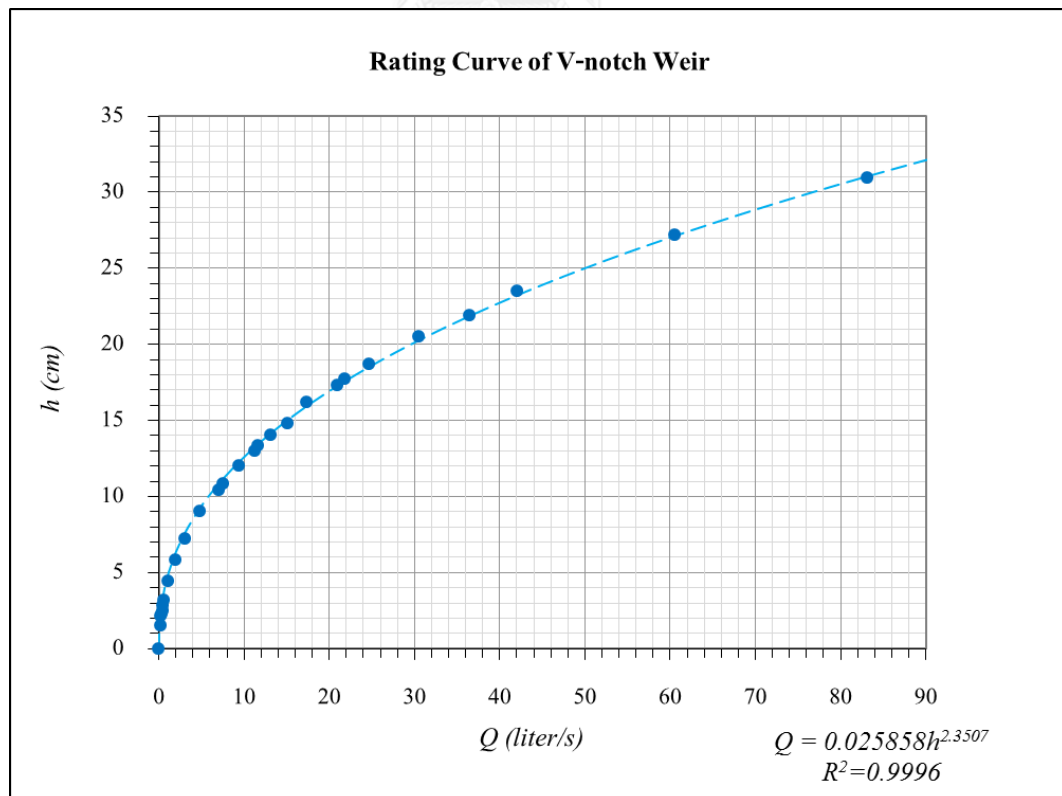
รูปภาคผนวกที่ ก-6 ผลการสอบเทียบความลาดชัน

การสอบเทียบอัตราการไหล

แบบจำลองชลศาสตร์ทางน้ำเปิดวัดอัตราการไหลด้วยความสัมพันธ์กับระดับน้ำ (stage-discharge curve) ที่ไหลผ่านฝายสามเหลี่ยมมุมฉากสันคม การสอบเทียบจึงทำโดยตรงด้วยการตวงวัดปริมาณน้ำต่อเวลาที่อัตราการไหลค่าหนึ่ง อย่างน้อย 3 ครั้ง ไปคำนวณค่าอัตราการไหลเฉลี่ยแต่ละช่วง ข้อมูลระดับน้ำกับอัตราการไหลที่สอบเทียบสรุปดังตารางภาคผนวกที่ ก-3 และกราฟรูปภาคผนวกที่ ก-7

ตารางภาคผนวกที่ ก-3 ข้อมูลการสอบเทียบอัตราการไหล

h (ซม.)	\bar{Q} (ลิตร/วินาที)	h (ซม.)	\bar{Q} (ลิตร/วินาที)	h (ซม.)	\bar{Q} (ลิตร/วินาที)
0.0	0.00	7.2	3.07	16.2	17.42
1.5	0.19	9.0	4.84	17.3	21.02
2.1	0.29	10.4	7.06	17.7	21.86
2.3	0.37	10.8	7.51	18.7	24.73
2.5	0.44	12.0	9.40	20.5	30.56
2.8	0.50	13.0	11.22	21.9	36.48
3.2	0.65	13.3	11.69	23.5	42.02
4.4	1.10	14.0	13.16	27.2	60.59
5.8	1.95	14.8	15.15	30.9	83.21



รูปภาคผนวกที่ ก-7 ผลการสอบเทียบอัตราการไหล

ภาคผนวก ข. คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหินทิ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประเภทของหินทิ้ง

วัสดุหินทิ้งที่ใช้ทดลองเป็นหินแกรนิตย่อยเบอร์ 1 และหินโรยทางรถไฟ ซึ่งผลิตได้และใช้ก่อสร้างในประเทศไทย

ขนาด (size)

วัสดุหินทิ้งที่ใช้ทดลองมีการย่อยและคัดขนาดอย่างสม่ำเสมอ 4 ขนาด ด้วยตะแกรงร่อน (sieve) เบอร์ 1/2, 3/4, 1, 1 1/2, 2 และ 3 นิ้ว กำหนดค่าแทนขนาด (nominal size) ตามเบอร์ตะแกรงร่อนโดยใช้หินที่ติดในตะแกรงเบอร์ 1/2, 3/4, 1 1/2 และ 2 นิ้ว โดยรูปภาคผนวกที่ ข-1 แสดงลักษณะที่สังเกตได้อย่าง ขนาด สี และความเป็นเหลี่ยมมุม



หินทิ้งขนาด 1/2 นิ้ว



หินทิ้งขนาด 3/4 นิ้ว



หินทิ้งขนาด 1 1/2 นิ้ว



หินทิ้งขนาด 2 นิ้ว

รูปภาคผนวกที่ ข-1 หินทิ้งขนาดต่างๆ

ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, S.G.)

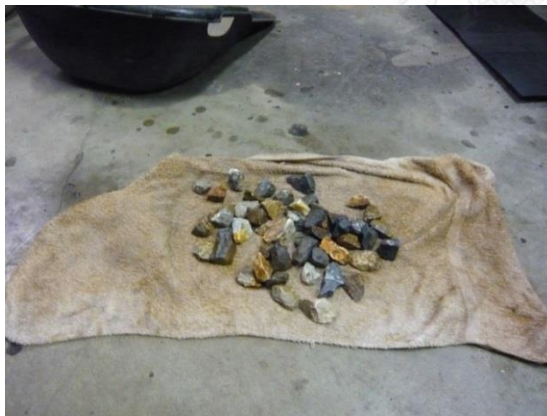
ความถ่วงจำเพาะของหินที่จัดเป็นวัสดุประเภทเทกอง (bulk material) มี 3 ลักษณะ ได้แก่ ค่าของ กองแห้ง (Bulk S.G.) ค่าของกองชุ่มน้ำ (Bulk SSD S.G.) และ ค่าปรากฏ (Apparent S.G.) โดยคำนวณจากน้ำหนักมวลรวมที่สภาวะอบแห้ง (Oven-dry; **A**) ผิวชุ่มน้ำ (Saturated Surface Dry, SSD; **B**) และ จมน้ำ (Submerge; **C**) แสดงวิธีการดังรูปภาคผนวกที่ ข-2 และสรุปการคำนวณดังตารางภาคผนวกที่ ข-1



การชั่งน้ำหนักที่สภาวะอบแห้ง



การชั่งน้ำหนักที่สภาวะจมน้ำ



การซับน้ำให้เป็นสภาวะผิวชุ่มน้ำ



การชั่งน้ำหนักที่สภาวะผิวชุ่มน้ำ

รูปภาคผนวกที่ ข-2 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของหินทิ้ง

ตารางภาคผนวกที่ ข-1 ข้อมูลและการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะแต่ละลักษณะของหินทิ้ง

Size (inch)	Oven-dry; <i>A</i> (g)	SSD; <i>B</i> (g)	Submerge; <i>C</i> (g)	Bulk S.G. $\frac{A}{B-C}$	Bulk SSD S.G. $\frac{B}{B-C}$	Apparent S.G. $\frac{A}{A-C}$
½	1319.9	1325.2	833.7	2.69	2.70	2.71
	1524.0	1530.7	956.8	2.66	2.67	2.69
	1863.8	1870.4	1175.6	2.68	2.69	2.71
	<i>Average</i>			2.67	2.69	2.70
¾	784.5	785.9	494.7	2.69	2.70	2.71
	745.4	746.7	471.7	2.71	2.72	2.72
	798.4	800.2	503.4	2.69	2.70	2.71
	<i>Average</i>			2.70	2.70	2.71
1½	963.7	964.7	611.9	2.73	2.73	2.74
	975.1	975.9	619.4	2.74	2.74	2.74
	952.6	954.2	603.5	2.72	2.72	2.73
	<i>Average</i>			2.73	2.73	2.74
2	1753.4	1754.2	1114.0	2.74	2.74	2.74
	1461.3	1461.3	927.1	2.74	2.74	2.74
	1815.9	1816.3	1150.9	2.73	2.73	2.73
	<i>Average</i>			2.73	2.74	2.74

มุมทรงตัว (angle of repose)

มุมทรงตัว หรือมุมกองพื้น คือค่าความลาดเอียงสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือกองวัสดุ มีความเสถียรตามธรรมชาติ ไม่เลื่อนไถล มีมาตรฐานการวัดโดยใช้วิธีแบบเทกรวย (funnel method) อย่าง ASTM-D6393 แต่ทางคณะฯ ไม่มีอุปกรณ์และเครื่องจักรทุ่นแรงในการทำตามมาตรฐาน จึงวัดโดยใช้รางปรับความลาดชัน (tilting box method) ทำโดยถมหินทิ้งให้ได้ระดับและเกลี่ยให้ราบในรางปรับความลาดชัน ปรับความลาดชันเพิ่มทีละน้อย เมื่อนหินก้อนแรกเคลื่อนตัวออกจากรางถือเป็นมุมแรกเคลื่อน ปรับความลาดชันเพิ่มต่อจนหินเคลื่อนตัวออกจากรางอีกครั้ง ถือเป็นมุมเคลื่อนกลุ่ม ปรับความลาดชันเพิ่มต่อจนหินถล่ม ถือเป็นมุมทรงตัว แสดงดังรูปภาพผนวกที่ ข-3 และสรุปผลการคำนวณดังตารางภาคผนวกที่ ข-2



รางปรับความลาดชัน



รางปรับความลาดชันขณะใช้งาน



มาตรวัดมุมทรงตัว



สภาวะมุมทรงตัว

รูปภาพผนวกที่ ข-3 การวัดมุมทรงตัวด้วยรางปรับความลาดชัน

ตารางภาคผนวกที่ ข-2 ข้อมูลและค่าเฉลี่ย

ขนาด (นิ้ว)	มูมแรกเคลื่อน	มูมเคลื่อนกลุ่ม	มูมทรงตัว	มูมแรกเคลื่อน เฉลี่ย	มูมเคลื่อนกลุ่ม เฉลี่ย	มูมทรงตัว เฉลี่ย
½	37	45	51	38	44	50
	45	46	52			
	34	42	50			
	32	42	48			
	40	47	50			
¾	46	49	54	46	50	52
	44	46	50			
	44	50	52			
	48	54				
	49	52				
1½	44	50	55	46	52	55
	42	48	52			
	46	53	57			
	44	54				
	52	54				
2	54	60	60	54	61	63
	47	58				
	48	54				
	65	66	66			
	54	68				



ภาคผนวก ค. ข้อมูลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1/2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010833	0.00×10 ⁻⁶	2.8	2.5	3.2	2.4	1.4	2.4	2.6	2.4	2.5	0.451
0.018833	0.00×10 ⁻⁶	3.9	3.4	4.1	3.3	2.3	3.4	3.8	3.4	3.6	0.554
0.027000	0.00×10 ⁻⁶	4.7	4.2	4.9	4.1	3.1	4.2	4.7	4.2	4.5	0.643
0.065667	0.09×10 ⁻⁶	7.1	7.3	8.1	7.3	6.3	7.7	8.3	7.2	8.0	0.912
	0.09×10 ⁻⁶	7.1	7.5	8.2	7.3	6.4	7.6	8.2	7.3	7.9	0.900
	0.08×10 ⁻⁶	7.0	7.4	8.1	7.3	6.4	7.6	8.3	7.2	8.0	0.912
	0.10×10 ⁻⁶	7.0	7.4	8.1	7.2	6.4	7.5	8.3	7.2	7.9	0.912
0.094667	0.24×10 ⁻⁶	7.0	7.4	8.1	7.2	6.4	7.6	8.3	7.2	8.0	0.912
	0.17×10 ⁻⁶	7.3	7.9	8.7	8.9	8.0	10.7	11.5	8.1	11.1	1.169
	0.24×10 ⁻⁶	7.4	7.9	8.8	8.9	8.1	10.7	11.5	8.2	11.1	1.154
	0.23×10 ⁻⁶	7.4	7.9	8.8	8.9	8.1	10.7	11.5	8.2	11.1	1.154
0.122000	0.08×10 ⁻⁶	7.3	7.9	8.8	8.9	8.0	10.7	11.4	8.2	11.1	1.154
	0.54×10 ⁻⁶	8.2	8.9	10.1	10.0	9.3	13.0	13.6	9.3	13.3	1.312
	0.37×10 ⁻⁶	8.1	8.9	10.2	10.1	9.3	13.0	13.5	9.3	13.3	1.312
	0.73×10 ⁻⁶	8.0	8.9	10.2	10.0	9.3	12.8	13.5	9.3	13.2	1.312
	0.64×10 ⁻⁶	7.9	8.8	10.2	10.0	9.2	12.8	13.5	9.2	13.2	1.326



(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.433	0.93	0.87	0.0222	0.066	0.021	1,047	n/a
0.523	0.96	0.88	0.0305	0.077	0.028	1,222	n/a
0.600	1.00	0.90	0.0368	0.085	0.034	1,349	n/a
0.821	1.09	0.93	0.0581	0.107	0.054	1,698	
0.831	1.06	0.94	0.0587	0.107	0.054	1,698	
0.821	1.09	0.93	0.0581	0.107	0.054	1,698	
0.831	1.09	0.94	0.0581	0.107	0.054	1,698	
0.821	1.09	0.93	0.0581	0.107	0.054	1,698	
0.853	1.31	0.82	0.0638	0.112	0.059	1,778	Use
0.853	1.29	0.82	0.0644	0.112	0.059	1,778	Use
0.853	1.29	0.82	0.0644	0.112	0.059	1,778	Use
0.853	1.29	0.82	0.0644	0.112	0.059	1,778	
0.917	1.37	0.80	0.0710	0.118	0.066	1,873	Use
0.917	1.37	0.80	0.0710	0.118	0.066	1,873	
0.924	1.37	0.81	0.0710	0.118	0.066	1,873	Use
0.924	1.40	0.81	0.0704	0.118	0.066	1,873	Use

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1/2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.006167	0.00×10 ⁻⁶	0.7	-0.3	0.3	1.8	1.5	2.2	2.3	0.8	2.3	0.771
0.011000	0.00×10 ⁻⁶	0.9	0.1	1.2	2.4	2.0	3.0	3.2	1.3	3.1	0.846
0.016000	0.00×10 ⁻⁶	1.7	0.3	1.6	2.9	2.5	3.7	3.9	1.8	3.8	0.889
0.030833	0.19×10 ⁻⁶	2.8	1.5	2.5	3.9	4.0	5.5	5.8	2.9	5.7	1.063
	0.08×10 ⁻⁶	3.0	1.4	2.4	3.9	4.0	5.5	5.7	2.9	5.6	1.063
0.030833	0.07×10 ⁻⁶	3.0	1.3	2.4	3.8	3.9	5.5	5.8	2.9	5.7	1.063
0.030833	0.18×10 ⁻⁶	2.9	1.4	2.3	3.8	3.9	5.5	5.8	2.9	5.7	1.063
0.030833	0.07×10 ⁻⁶	2.8	1.4	2.3	3.8	3.9	5.4	5.7	2.8	5.6	1.101
0.037000	0.25×10 ⁻⁶	3.3	2.5	3.0	3.9	4.3	6.1	6.5	3.4	6.3	1.088
	0.26×10 ⁻⁶	3.4	2.4	2.9	3.9	4.3	6.1	6.5	3.4	6.3	1.088
	0.26×10 ⁻⁶	3.4	2.2	2.8	3.9	4.3	6.1	6.5	3.3	6.3	1.121
	0.19×10 ⁻⁶	3.4	2.0	2.6	3.8	4.3	6.1	6.5	3.2	6.3	1.156
0.051667	1.49×10 ⁻⁶	3.8	2.5	4.0	4.9	4.9	7.2	8.0	4.0	7.6	1.292
	1.46×10 ⁻⁶	3.7	2.1	4.0	4.9	4.8	7.2	8.0	3.9	7.6	1.325
	1.67×10 ⁻⁶	3.8	2.0	3.9	4.9	4.8	7.1	8.0	3.9	7.6	1.325
	0.95×10 ⁻⁶	4.1	1.5	3.8	5.0	4.7	7.1	8.0	3.8	7.6	1.360

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.268	2.75	0.56	0.0078	0.062	0.018	984	n/a
0.355	2.37	0.64	0.0125	0.078	0.029	1,238	n/a
0.421	2.12	0.69	0.0170	0.091	0.039	1,444	n/a
0.541	1.99	0.72	0.0264	0.114	0.061	1,809	
0.551	1.99	0.74	0.0264	0.114	0.061	1,809	Use
0.541	1.99	0.72	0.0264	0.114	0.061	1,809	Use
0.541	1.99	0.72	0.0264	0.114	0.061	1,809	
0.551	2.10	0.74	0.0256	0.112	0.059	1,778	Use
0.587	1.88	0.75	0.0305	0.122	0.070	1,936	Use
0.587	1.88	0.75	0.0305	0.122	0.070	1,936	Use
0.587	1.97	0.75	0.0297	0.121	0.069	1,920	Use
0.587	2.06	0.75	0.0289	0.119	0.067	1,889	
0.680	2.06	0.79	0.0353	0.132	0.082	2,095	Use
0.680	2.14	0.79	0.0345	0.130	0.080	2,063	Use
0.680	2.14	0.79	0.0345	0.130	0.080	2,063	Use
0.680	2.23	0.79	0.0337	0.129	0.079	2,047	

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด ½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.004167	0.00×10 ⁻⁶	0.6	0.1	1.1	1.2	0.9	1.4	1.6	0.8	1.5	0.521
0.006333	0.00×10 ⁻⁶	1.3	0.5	1.5	1.6	1.0	1.8	2.0	1.2	1.9	0.528
0.009000	0.00×10 ⁻⁶	1.6	1.1	2.0	1.9	1.4	2.1	2.4	1.6	2.3	0.563
0.016000	0.27×10 ⁻⁶	2.9	1.9	2.0	2.4	2.0	3.2	3.5	2.2	3.4	0.727
	0.34×10 ⁻⁶	2.6	1.9	1.9	2.3	2.0	3.2	3.5	2.1	3.4	0.762
	0.19×10 ⁻⁶	2.5	2.0	1.9	2.2	1.7	3.2	3.5	2.0	3.4	0.800
	0.29×10 ⁻⁶	2.4	1.8	1.8	2.2	1.5	2.8	3.5	1.9	3.2	0.842
0.021667	1.21×10 ⁻⁶	3.1	2.0	2.2	2.2	3.0	3.5	4.5	2.5	4.0	0.867
	0.81×10 ⁻⁶	3.3	1.8	2.1	2.1	3.0	3.5	4.6	2.4	4.1	0.903
	1.10×10 ⁻⁶	3.3	1.6	1.9	2.0	2.9	3.5	4.5	2.3	4.0	0.942
	1.58×10 ⁻⁶	3.4	1.6	1.8	1.7	2.9	3.5	4.5	2.3	4.0	0.942
	1.89×10 ⁻⁶	3.2	1.5	1.8	1.5	2.9	3.5	4.5	2.2	4.0	0.985
0.025000	4.51×10 ⁻⁶	4.0	1.4	1.3	1.6	2.5	3.9	4.3	2.1	4.1	1.190
	6.56×10 ⁻⁶	3.9	1.2	0.9	1.4	2.3	3.9	4.3	1.9	4.1	1.316
	5.28×10 ⁻⁶	2.7	-0.9	-0.4	1.2	2.2	3.9	4.3	1.0	4.1	2.500
	4.51×10 ⁻⁶	2.4	-1.2	-0.6	1.0	2.0	3.9	4.3	0.7	4.1	3.571



(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.278	1.86	0.72	0.0078	0.087	0.036	1,381	n/a
0.333	1.54	0.77	0.0115	0.106	0.053	1,682	n/a
0.391	1.42	0.82	0.0152	0.122	0.070	1,936	n/a
0.471	1.56	0.82	0.0205	0.142	0.095	2,254	Use
0.471	1.68	0.82	0.0196	0.139	0.091	2,206	Use
0.471	1.81	0.82	0.0188	0.136	0.087	2,158	
0.500	1.95	0.89	0.0179	0.133	0.084	2,111	Use
0.542	1.75	0.87	0.0231	0.151	0.108	2,397	
0.528	1.86	0.83	0.0222	0.148	0.103	2,349	
0.542	1.98	0.87	0.0214	0.145	0.099	2,301	
0.542	1.98	0.87	0.0214	0.145	0.099	2,301	
0.542	2.12	0.87	0.0205	0.142	0.095	2,254	
0.610	2.62	0.96	0.0196	0.139	0.091	2,206	Use
0.610	3.05	0.96	0.0179	0.133	0.084	2,111	
0.610	7.98	0.96	0.0097	0.098	0.045	1,555	Use
0.610	13.63	0.96	0.0068	0.082	0.032	1,301	Use

ตารางภาคผนวกที่ ค-4 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.011333	0.00×10 ⁻⁶	3.0	2.8	3.6	3.3	2.3	4.4	4.4	3.0	4.4	0.378
0.018833	0.00×10 ⁻⁶	3.7	3.6	4.4	4.2	3.0	5.5	5.6	3.8	5.6	0.496
0.025500	0.00×10 ⁻⁶	4.5	4.4	5.1	4.9	3.5	6.3	6.5	4.5	6.4	0.567
0.038000	0.00×10 ⁻⁶	5.4	5.3	6.3	6.0	4.5	7.7	7.9	5.5	7.8	0.691
0.122833	0.21×10 ⁻⁶	9.5	10.9	11.3	11.3	9.8	14.2	15.1	10.5	14.7	1.170
	0.15×10 ⁻⁶	9.4	10.8	11.3	11.4	9.9	14.3	15.0	10.5	14.7	1.170
	0.05×10 ⁻⁶	9.4	10.6	11.3	11.4	9.9	14.3	15.0	10.5	14.7	1.170
	0.08×10 ⁻⁶	9.4	10.7	11.1	11.4	9.9	14.3	15.0	10.5	14.7	1.170
	0.30×10 ⁻⁶	9.2	10.3	11.7	12.1	10.6	14.7	14.9	10.8	14.8	1.137
	0.41×10 ⁻⁶	9.3	10.5	11.7	12.0	10.5	14.7	14.9	10.8	14.8	1.137
	0.32×10 ⁻⁶	9.4	10.2	11.6	11.9	10.5	14.6	14.9	10.7	14.8	1.148
	0.06×10 ⁻⁶	9.3	10.3	11.6	11.9	10.5	14.6	14.8	10.7	14.7	1.148
	0.04×10 ⁻⁶	9.4	10.3	11.6	11.9	10.5	14.6	14.8	10.7	14.7	1.148
	0.41×10 ⁻⁶	9.4	11.3	11.9	14.7	14.2	14.7	15.2	12.3	15.0	1.123
0.138167	0.69×10 ⁻⁶	9.3	11.2	11.8	14.6	14.2	14.8	15.3	12.2	15.1	1.133
	0.48×10 ⁻⁶	9.2	11.2	11.7	14.6	14.2	14.7	15.2	12.2	15.0	1.133
	0.57×10 ⁻⁶	9.1	11.1	11.8	14.5	14.1	14.7	15.2	12.1	15.0	1.142
0.144500	0.03×10 ⁻⁶	11.0	13.3	14.3	14.4	12.7	15.3	15.4	13.1	15.4	1.103
0.145500	0.36×10 ⁻⁶	11.1	13.4	14.4	14.6	12.9	15.5	15.5	13.3	15.5	1.094
	0.06×10 ⁻⁶	11.0	13.5	14.5	14.6	12.7	15.5	15.5	13.2	15.5	1.102
	0.21×10 ⁻⁶	9.0	11.6	13.0	14.0	13.1	16.4	16.5	12.1	16.5	1.202
	0.85×10 ⁻⁶	9.0	11.6	12.9	13.9	13.2	16.3	16.5	12.1	16.4	1.202
	0.50×10 ⁻⁶	9.0	11.5	12.7	13.8	13.1	16.3	16.4	12.0	16.4	1.213
	0.61×10 ⁻⁶	8.9	11.3	12.8	13.9	13.0	16.3	16.5	12.0	16.4	1.213
	0.96×10 ⁻⁶	9.2	10.6	12.3	14.1	13.1	16.3	17.0	11.8	16.7	1.233
	0.36×10 ⁻⁶	9.0	10.5	12.2	14.1	13.0	16.4	17.0	11.7	16.7	1.244
	0.69×10 ⁻⁶	9.0	10.4	12.2	14.0	12.9	16.4	17.0	11.7	16.7	1.244
	0.39×10 ⁻⁶	9.0	10.3	12.0	13.9	12.9	16.4	17.0	11.6	16.7	1.254
0.86×10 ⁻⁶	9.0	10.3	11.9	14.0	12.9	16.4	17.0	11.6	16.7	1.254	

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.258	0.70	0.39	0.0273	0.073	0.017	1,738	n/a
0.336	0.81	0.45	0.0337	0.081	0.021	1,928	n/a
0.398	0.85	0.50	0.0391	0.088	0.024	2,095	n/a
0.487	0.94	0.56	0.0465	0.096	0.029	2,285	n/a
0.836	1.15	0.70	0.0778	0.124	0.048	2,952	
0.836	1.15	0.70	0.0778	0.124	0.048	2,952	
0.836	1.15	0.70	0.0778	0.124	0.048	2,952	
0.836	1.15	0.70	0.0778	0.124	0.048	2,952	
0.830	1.10	0.69	0.0794	0.125	0.049	2,976	Use
0.830	1.10	0.69	0.0794	0.125	0.049	2,976	
0.830	1.12	0.69	0.0789	0.124	0.048	2,952	Use
0.836	1.12	0.70	0.0789	0.124	0.048	2,952	
0.836	1.12	0.70	0.0789	0.124	0.048	2,952	
0.921	1.02	0.76	0.0872	0.131	0.054	3,119	
0.915	1.04	0.75	0.0867	0.130	0.053	3,095	
0.921	1.04	0.76	0.0867	0.130	0.053	3,095	Use
0.921	1.05	0.76	0.0862	0.130	0.053	3,095	Use
0.938	0.97	0.76	0.0912	0.134	0.056	3,190	
0.939	0.96	0.76	0.0921	0.134	0.056	3,190	
0.939	0.97	0.76	0.0917	0.134	0.056	3,190	
0.882	1.10	0.69	0.0862	0.130	0.053	3,095	
0.887	1.10	0.70	0.0862	0.130	0.053	3,095	
0.887	1.12	0.70	0.0857	0.130	0.053	3,095	
0.887	1.12	0.70	0.0857	0.130	0.053	3,095	
0.871	1.15	0.68	0.0847	0.129	0.052	3,071	
0.871	1.16	0.68	0.0842	0.129	0.052	3,071	
0.871	1.16	0.68	0.0842	0.129	0.052	3,071	
0.871	1.18	0.68	0.0837	0.128	0.051	3,047	
0.871	1.18	0.68	0.0837	0.128	0.051	3,047	

ตารางภาคผนวกที่ ค-5 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.011000	0.00×10 ⁻⁶	2.6	2.3	2.5	2.4	2.0	2.5	2.7	2.4	2.6	0.458
0.018833	0.00×10 ⁻⁶	3.4	3.0	3.5	3.0	2.7	3.6	3.9	3.1	3.8	0.608
0.025000	0.00×10 ⁻⁶	3.9	3.5	4.0	3.4	3.4	4.4	4.7	3.6	4.6	0.694
0.037500	0.00×10 ⁻⁶	4.5	4.2	4.7	4.3	4.5	5.6	6.1	4.4	5.9	0.852
0.055833	0.28×10 ⁻⁶	5.8	4.9	5.9	5.5	4.6	7.5	7.8	5.3	7.7	1.053
	0.36×10 ⁻⁶	5.8	4.9	5.9	5.6	4.6	7.4	7.8	5.4	7.6	1.034
	0.93×10 ⁻⁶	5.6	4.9	5.8	5.5	4.6	7.4	7.8	5.3	7.6	1.053
	0.20×10 ⁻⁶	5.5	4.8	5.7	5.5	4.6	7.4	7.8	5.2	7.6	1.074
0.066333	0.49×10 ⁻⁶	5.4	4.8	5.6	5.6	4.6	7.4	7.9	5.2	7.7	1.074
	0.86×10 ⁻⁶	4.5	4.5	5.6	5.4	5.1	8.3	9.4	5.0	8.9	1.327
	0.67×10 ⁻⁶	4.4	4.4	5.5	5.2	5.1	8.4	9.4	4.9	8.9	1.354
	0.64×10 ⁻⁶	4.4	4.3	5.3	5.1	5.0	8.3	9.4	4.8	8.9	1.382
0.080167	1.69×10 ⁻⁶	4.4	4.2	5.1	5.0	5.0	8.4	9.3	4.7	8.9	1.411
	2.15×10 ⁻⁶	5.8	6.4	7.3	6.9	5.8	8.7	8.8	6.4	8.8	1.253
	1.48×10 ⁻⁶	5.6	6.4	7.5	6.8	5.8	8.7	8.7	6.4	8.7	1.253
	0.61×10 ⁻⁶	5.4	6.4	7.4	6.8	5.7	8.7	8.7	6.3	8.7	1.272
	0.93×10 ⁻⁶	5.2	6.4	7.4	6.7	5.5	8.7	8.7	6.2	8.7	1.293
	1.87×10 ⁻⁶	5.6	6.0	7.4	6.9	6.0	8.1	9.5	6.4	8.8	1.253
	1.18×10 ⁻⁶	4.9	6.0	7.3	6.8	6.0	8.0	9.6	6.2	8.8	1.293
	1.19×10 ⁻⁶	4.8	6.0	7.2	6.8	6.0	7.9	9.5	6.2	8.7	1.293
0.067×10 ⁻⁶	0.67×10 ⁻⁶	4.7	5.9	7.2	6.7	6.0	7.9	9.5	6.1	8.7	1.314
	1.79×10 ⁻⁶	4.6	5.9	7.1	6.6	5.9	7.9	9.5	6.0	8.7	1.336

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.423	0.94	0.84	0.0222	0.104	0.034	2,476	n/a
0.496	1.10	0.81	0.0281	0.117	0.043	2,785	n/a
0.543	1.17	0.81	0.0321	0.125	0.049	2,976	n/a
0.636	1.30	0.84	0.0384	0.137	0.059	3,261	n/a
0.725	1.46	0.83	0.0450	0.149	0.069	3,547	Use
0.735	1.42	0.85	0.0458	0.150	0.070	3,571	Use
0.735	1.46	0.85	0.0450	0.149	0.069	3,547	
0.735	1.50	0.85	0.0443	0.147	0.068	3,500	Use
0.725	1.50	0.83	0.0443	0.147	0.068	3,500	
0.745	1.89	0.80	0.0429	0.145	0.066	3,452	Use
0.745	1.95	0.80	0.0421	0.144	0.065	3,428	Use
0.745	2.01	0.80	0.0414	0.143	0.064	3,404	Use
0.745	2.08	0.80	0.0406	0.141	0.062	3,357	
0.911	1.58	0.98	0.0527	0.161	0.081	3,833	
0.921	1.58	1.00	0.0527	0.161	0.081	3,833	Use
0.921	1.62	1.00	0.0521	0.160	0.080	3,809	
0.921	1.66	1.00	0.0514	0.159	0.079	3,785	
0.911	1.58	0.98	0.0527	0.161	0.081	3,833	Use
0.911	1.66	0.98	0.0514	0.159	0.079	3,785	
0.921	1.66	1.00	0.0514	0.159	0.079	3,785	
0.921	1.70	1.00	0.0507	0.158	0.078	3,761	
0.921	1.74	1.00	0.0500	0.157	0.077	3,738	Use

ตารางภาคผนวกที่ ค-6 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด ¾ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)	
0.006333	0.00×10 ⁻⁶	2.2	0.0	0.6	1.3	1.0	2.3	2.9	1.0	2.6	0.633	
0.011333	0.00×10 ⁻⁶	2.6	0.1	1.6	2.1	2.0	2.9	3.7	1.7	3.3	0.667	
0.023833	0.00×10 ⁻⁶	3.7	1.4	2.5	3.3	2.8	4.2	6.0	2.7	5.1	0.883	
0.025000	0.71×10 ⁻⁶	3.1	1.7	2.5	2.2	2.1	4.4	5.5	2.3	5.0	1.087	
	0.52×10 ⁻⁶	2.9	1.5	2.5	2.1	2.0	4.4	5.4	2.2	4.9	1.136	
	0.04×10 ⁻⁶	2.9	1.3	2.4	2.0	2.0	4.4	5.4	2.1	4.9	1.190	
	0.00×10 ⁻⁶	2.6	1.3	2.3	2.0	2.0	4.4	5.4	2.0	4.9	1.250	
	0.11×10 ⁻⁶	3.3	1.8	2.4	2.0	2.4	4.3	5.4	2.4	4.9	1.042	
	0.10×10 ⁻⁶	3.3	1.9	2.3	2.1	2.4	4.3	5.4	2.4	4.9	1.042	
	0.15×10 ⁻⁶	3.2	1.8	2.3	2.0	2.4	7.3	5.4	2.3	6.4	1.087	
	0.10×10 ⁻⁶	3.3	1.9	2.4	2.0	2.4	4.3	5.4	2.4	4.9	1.042	
	0.033167	0.65×10 ⁻⁶	3.7	2.3	2.7	2.6	2.9	5.2	6.2	2.8	5.7	1.185
		0.80×10 ⁻⁶	3.5	2.2	2.5	2.6	2.9	5.2	6.2	2.7	5.7	1.228
0.83×10 ⁻⁶		3.5	2.1	2.5	2.6	2.9	5.2	6.2	2.7	5.7	1.228	
0.76×10 ⁻⁶		3.3	2.1	2.4	2.5	2.9	5.1	6.2	2.6	5.7	1.276	
0.041000	6.49×10 ⁻⁶	4.6	1.7	3.1	3.6	2.7	6.5	7.3	3.1	6.9	1.323	
	4.80×10 ⁻⁶	5.8	1.5	2.9	3.4	2.9	6.5	7.3	3.3	6.9	1.242	
	5.63×10 ⁻⁶	5.2	0.6	2.6	4.4	2.9	6.5	7.3	3.1	6.9	1.323	
	4.56×10 ⁻⁶	4.9	0.1	2.2	4.2	2.9	6.5	7.3	2.9	6.9	1.414	

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.244	2.02	0.48	0.0097	0.098	0.030	2,333	n/a
0.343	1.63	0.60	0.0161	0.126	0.050	3,000	n/a
0.467	1.72	0.66	0.0248	0.156	0.076	3,714	n/a
0.500	2.29	0.71	0.0214	0.145	0.066	3,452	
0.510	2.45	0.74	0.0205	0.142	0.063	3,381	
0.510	2.62	0.74	0.0196	0.139	0.060	3,309	
0.510	2.82	0.74	0.0188	0.136	0.058	3,238	n/a
0.510	2.15	0.74	0.0222	0.148	0.069	3,523	Use
0.510	2.15	0.74	0.0222	0.148	0.069	3,523	Use
0.391	2.29	0.49	0.0214	0.145	0.066	3,452	
0.510	2.15	0.74	0.0222	0.148	0.069	3,523	Use
0.582	2.26	0.78	0.0256	0.158	0.078	3,761	
0.582	2.39	0.78	0.0248	0.156	0.076	3,714	Use
0.582	2.39	0.78	0.0248	0.156	0.076	3,714	Use
0.582	2.53	0.78	0.0239	0.153	0.073	3,642	Use
0.594	2.40	0.72	0.0281	0.166	0.086	3,952	
0.594	2.18	0.72	0.0297	0.171	0.092	4,071	Use
0.594	2.40	0.72	0.0281	0.166	0.086	3,952	Use
0.594	2.65	0.72	0.0264	0.161	0.081	3,833	Use

ตารางภาคผนวกที่ ค-7 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010833	0.00×10 ⁻⁶	1.5	0.9	1.5	0.6	-0.3	3.5	4.0	0.8	3.8	1.354
0.024667	0.00×10 ⁻⁶	3.4	2.9	3.4	2.2	1.2	4.9	6.0	2.6	5.5	0.949
0.051000	0.00×10 ⁻⁶	4.3	5.5	5.9	4.3	3.6	7.3	8.8	4.7	8.1	1.085
0.109667	0.00×10 ⁻⁶	8.7	9.6	10.0	7.5	6.7	11.5	13.5	8.5	12.5	1.290
0.143333	0.00×10 ⁻⁶	10.8	11.1	11.9	9.8	8.5	14.0	16.0	10.4	15.0	1.378
0.147667	0.00×10 ⁻⁶	10.6	11.5	11.8	10.3	8.7	14.3	16.3	10.6	15.3	1.393

ตารางภาคผนวกที่ ค-8 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010667	0.00×10 ⁻⁶	2.1	0.2	1.0	2.5	2.0	3.5	3.9	1.6	3.7	0.667
0.021333	0.00×10 ⁻⁶	2.9	1.3	1.6	3.6	3.2	5.2	5.6	2.5	5.4	0.853
0.035500	0.00×10 ⁻⁶	4.1	2.0	3.0	5.2	4.1	6.6	7.5	3.7	7.1	0.959
0.078667	0.11×10 ⁻⁶	6.5	5.2	6.0	8.1	8.3	10.4	11.5	6.8	11.0	1.157
	0.00×10 ⁻⁶	6.5	4.6	5.9	7.3	7.6	10.4	11.5	6.4	11.0	1.229
	0.00×10 ⁻⁶	6.4	4.4	5.8	8.1	7.4	10.4	11.5	6.4	11.0	1.229
	0.10×10 ⁻⁶	6.2	4.4	5.9	8.1	7.5	10.4	11.5	6.4	11.0	1.229
0.109667	0.95×10 ⁻⁶	7.9	7.0	8.6	9.0	8.2	11.7	13.3	8.1	12.5	1.354
	0.11×10 ⁻⁶	7.8	7.0	8.0	8.9	8.2	11.8	13.3	8.0	12.6	1.371
	0.11×10 ⁻⁶	7.8	7.0	7.9	8.9	8.2	11.7	13.3	8.0	12.5	1.371
	0.12×10 ⁻⁶	7.8	7.0	7.9	8.9	8.2	11.7	13.3	8.0	12.5	1.371
0.128833	0.20×10 ⁻⁶	9.1	7.7	7.9	9.4	9.0	13.2	14.6	8.6	13.9	1.498
	0.20×10 ⁻⁶	9.1	7.5	7.8	9.4	8.7	13.2	14.6	8.5	13.9	1.516
	0.25×10 ⁻⁶	9.1	7.3	7.8	9.4	8.7	13.2	14.6	8.5	13.9	1.516
	0.17×10 ⁻⁶	9.1	7.2	7.7	9.4	8.7	13.2	14.6	8.4	13.9	1.534
0.143333	0.77×10 ⁻⁶	9.5	8.5	9.0	9.6	10.0	14.6	16.3	9.3	15.5	1.541
	0.86×10 ⁻⁶	9.7	8.5	9.0	9.7	10.0	14.6	16.3	9.4	15.5	1.525
	0.94×10 ⁻⁶	9.5	8.4	8.9	9.9	10.0	14.5	16.2	9.3	15.4	1.541
	0.47×10 ⁻⁶	9.2	8.3	8.8	9.7	10.0	14.4	16.1	9.2	15.3	1.558

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.285	4.83	0.47	0.0078	0.039	0.002	1,857	n/a
0.448	1.88	0.61	0.0239	0.068	0.007	3,238	n/a
0.630	1.60	0.71	0.0406	0.089	0.012	4,238	n/a
0.877	1.41	0.79	0.0662	0.114	0.020	5,428	n/a
0.956	1.36	0.79	0.0772	0.123	0.023	5,856	n/a
0.965	1.37	0.79	0.0783	0.124	0.024	5,904	n/a

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.288	1.68	0.48	0.0152	0.086	0.011	4,095	n/a
0.395	1.72	0.54	0.0231	0.106	0.017	5,047	n/a
0.500	1.59	0.60	0.0329	0.127	0.025	6,047	n/a
0.715	1.42	0.69	0.0554	0.165	0.042	7,856	
0.715	1.55	0.69	0.0527	0.161	0.040	7,666	n/a
0.715	1.55	0.69	0.0527	0.161	0.040	7,666	n/a
0.715	1.55	0.69	0.0527	0.161	0.040	7,666	
0.877	1.52	0.79	0.0638	0.177	0.048	8,428	
0.870	1.55	0.78	0.0632	0.176	0.048	8,380	Use
0.877	1.55	0.79	0.0632	0.176	0.048	8,380	Use
0.877	1.55	0.79	0.0632	0.176	0.048	8,380	Use
0.927	1.63	0.79	0.0668	0.181	0.050	8,618	Use
0.927	1.66	0.79	0.0662	0.180	0.050	8,570	Use
0.927	1.66	0.79	0.0662	0.180	0.050	8,570	
0.927	1.69	0.79	0.0656	0.179	0.049	8,523	Use
0.925	1.61	0.75	0.0710	0.187	0.054	8,904	Use
0.925	1.59	0.75	0.0716	0.187	0.054	8,904	Use
0.931	1.61	0.76	0.0710	0.187	0.054	8,904	Use
0.937	1.64	0.76	0.0704	0.186	0.053	8,856	

ตารางภาคผนวกที่ ค-9 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 1½ นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

q (m ³ /s/m)	q_s (m ³ /s/m)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010833	0.00×10 ⁻⁶	2.1	1.3	2.0	2.0	2.2	2.5	2.9	1.9	2.7	0.570
0.018833	0.00×10 ⁻⁶	2.7	1.7	2.6	2.2	2.7	3.7	4.6	2.4	4.2	0.785
0.026667	0.00×10 ⁻⁶	3.1	2.2	3.1	2.9	3.2	4.7	5.6	2.9	5.2	0.920
0.055833	0.11×10 ⁻⁶	5.1	3.4	5.8	4.9	5.9	7.1	8.4	5.0	7.8	1.117
	0.10×10 ⁻⁶	5.1	3.4	6.3	4.6	5.8	7.0	8.4	5.0	7.7	1.117
	0.65×10 ⁻⁶	5.1	3.3	6.0	4.6	5.7	7.0	8.4	4.9	7.7	1.139
	1.04×10 ⁻⁶	5.0	3.3	5.8	4.4	5.7	7.0	8.4	4.8	7.7	1.163
	0.17×10 ⁻⁶	4.6	2.6	5.7	4.4	6.0	7.0	8.4	4.6	7.7	1.214
	0.87×10 ⁻⁶	5.5	4.1	4.9	5.3	6.4	9.0	10.1	5.2	9.6	1.372
	1.15×10 ⁻⁶	5.4	3.1	4.6	4.9	6.3	9.0	10.0	4.8	9.5	1.486
0.071333	0.88×10 ⁻⁶	5.8	3.3	4.7	4.6	6.2	9.0	10.0	4.9	9.5	1.456
	0.82×10 ⁻⁶	5.7	3.2	3.8	4.4	6.1	9.0	10.0	4.6	9.5	1.551
	0.98×10 ⁻⁶	4.5	3.2	3.8	4.4	6.2	9.0	10.0	4.4	9.5	1.621
	0.09×10 ⁻⁶	6.2	3.1	5.0	5.0	5.7	8.7	10.7	5.0	9.7	1.427
	0.30×10 ⁻⁶	5.9	3.1	4.8	4.6	5.7	8.7	10.7	4.8	9.7	1.486
	0.21×10 ⁻⁶	6.0	3.7	5.9	5.0	6.0	9.2	11.7	5.3	10.5	1.346
	0.75×10 ⁻⁶	6.0	3.7	5.9	5.0	6.0	9.2	11.7	5.3	10.5	1.469
	1.10×10 ⁻⁶	6.1	3.1	4.5	5.0	6.0	9.2	11.7	4.9	10.5	1.588
	1.32×10 ⁻⁶	6.1	4.4	5.9	5.2	7.0	10.1	12.1	5.7	11.1	1.646
	0.92×10 ⁻⁶	6.1	4.6	5.7	5.2	6.9	10.1	12.1	5.7	11.1	1.646
0.093833	2.13×10 ⁻⁶	6.0	4.3	5.7	5.2	7.0	10.1	12.1	5.6	11.1	1.676
	2.02×10 ⁻⁶	5.8	3.8	5.4	5.1	7.0	10.1	12.1	5.4	11.1	1.738
	0.98×10 ⁻⁶	5.6	3.7	5.1	4.8	6.9	10.0	12.1	5.2	11.1	1.804

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.401	1.32	0.78	0.0179	0.133	0.027	6,333	n/a
0.448	1.62	0.70	0.0222	0.148	0.034	7,047	n/a
0.513	1.72	0.72	0.0264	0.161	0.040	7,666	n/a
0.716	1.59	0.82	0.0429	0.205	0.065	9,761	
0.725	1.59	0.83	0.0429	0.205	0.065	9,761	
0.725	1.64	0.83	0.0421	0.203	0.063	9,665	
0.725	1.69	0.83	0.0414	0.202	0.063	9,618	
0.725	1.81	0.83	0.0399	0.198	0.060	9,427	
0.743	1.92	0.77	0.0443	0.208	0.067	9,904	
0.751	2.17	0.78	0.0414	0.202	0.063	9,618	
0.751	2.10	0.78	0.0421	0.203	0.063	9,665	
0.751	2.31	0.78	0.0399	0.198	0.060	9,427	
0.751	2.47	0.78	0.0384	0.194	0.058	9,237	
0.735	2.04	0.75	0.0429	0.205	0.065	9,761	Use
0.735	2.17	0.75	0.0414	0.202	0.063	9,618	Use
0.679	1.87	0.67	0.0450	0.210	0.068	9,999	Use
0.741	2.04	0.73	0.0450	0.210	0.068	9,999	
0.741	2.29	0.73	0.0421	0.203	0.063	9,665	
0.845	2.20	0.81	0.0479	0.217	0.072	10,332	Use
0.845	2.20	0.81	0.0479	0.217	0.072	10,332	
0.845	2.26	0.81	0.0472	0.215	0.071	10,237	Use
0.845	2.39	0.81	0.0458	0.212	0.069	10,094	Use
0.845	2.53	0.81	0.0443	0.208	0.067	9,904	

ตารางภาคผนวกที่ ค-10 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 2%

q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010667	0.00×10^{-6}	1.5	0.4	1.2	0.4	1.1	3.4	3.5	0.9	3.5	1.185
0.021333	0.00×10^{-6}	2.9	2.0	2.8	1.5	2.2	4.9	5.2	2.3	5.1	0.928
0.037000	0.00×10^{-6}	4.4	3.5	4.4	2.7	3.5	6.6	7.0	3.7	6.8	1.000
0.065000	0.00×10^{-6}	6.2	5.7	6.5	4.4	5.9	9.4	9.9	5.7	9.7	1.140
0.121000	0.00×10^{-6}	9.3	9.4	10.1	8.0	9.2	12.9	13.8	9.2	13.4	1.315
0.143333	0.00×10^{-6}	10.4	10.1	11.1	9.1	10.7	14.6	15.6	10.3	15.1	1.392

ตารางภาคผนวกที่ ค-11 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 5%

q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.010667	0.00×10^{-6}	1.7	0.2	0.4	1.3	0.6	2.7	3.3	0.8	3.0	1.333
0.020667	0.00×10^{-6}	3.2	0.8	1.5	2.0	1.7	4.2	4.8	1.8	4.5	1.148
0.036000	0.00×10^{-6}	4.9	1.7	2.5	3.1	2.7	5.8	6.7	3.0	6.3	1.200
0.065000	0.00×10^{-6}	7.2	3.4	4.1	5.0	5.0	8.1	9.6	4.9	8.9	1.327
0.143333	0.00×10^{-6}	10.5	6.6	7.5	10.0	9.9	13.6	15.7	8.9	14.7	1.610
	0.00×10^{-6}	10.5	6.6	7.5	10.0	9.7	13.5	15.6	8.9	14.6	1.610
	0.18×10^{-6}	10.5	6.6	7.5	10.0	9.8	13.5	15.6	8.9	14.6	1.610
	0.00×10^{-6}	10.4	6.6	7.5	9.9	9.8	13.5	15.7	8.8	14.6	1.629

CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.305	3.99	0.52	0.0087	0.041	0.002	2,603	n/a
0.418	1.95	0.59	0.0214	0.065	0.005	4,126	n/a
0.544	1.66	0.67	0.0329	0.080	0.007	5,079	n/a
0.670	1.52	0.69	0.0479	0.097	0.011	6,158	n/a
0.903	1.38	0.79	0.0704	0.118	0.016	7,491	n/a
0.949	1.38	0.78	0.0767	0.123	0.017	7,809	n/a

(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.356	4.76	0.66	0.0078	0.062	0.004	3,936	n/a
0.459	2.73	0.69	0.0170	0.091	0.010	5,777	n/a
0.571	2.21	0.73	0.0273	0.116	0.016	7,364	n/a
0.730	1.91	0.78	0.0421	0.144	0.024	9,142	n/a
0.975	1.72	0.81	0.0686	0.183	0.039	11,618	n/a
0.982	1.72	0.82	0.0686	0.183	0.039	11,618	n/a
0.982	1.72	0.82	0.0686	0.183	0.039	11,618	
0.982	1.75	0.82	0.0680	0.183	0.039	11,618	n/a

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางภาคผนวกที่ ค-12 ข้อมูลการทดลองของหินขนาด 2 นิ้ว ความลาดท้องน้ำ 10%

q ($m^3/s/m$)	q_s ($m^3/s/m$)	#10 (cm)	#9.1 (cm)	#9 (cm)	#8.1 (cm)	#8 (cm)	#7 (cm)	#6.1 (cm)	y_{riprap} (cm)	y_{in} (cm)	V_{riprap} (m/s)
0.011000	0.00×10^{-6}	1.5	0.5	1.0	0.7	0.7	1.8	3.0	0.9	2.4	1.222
0.021333	0.00×10^{-6}	2.2	1.2	1.6	1.2	1.4	3.2	4.6	1.5	3.9	1.422
0.037500	0.00×10^{-6}	3.1	2.2	2.7	2.4	2.6	4.8	5.9	2.6	5.4	1.442
0.101500	0.20×10^{-6}	7.6	5.3	5.4	5.8	6.1	9.7	11.6	6.0	10.7	1.692
	0.25×10^{-6}	7.1	5.3	5.4	5.7	6.1	9.7	11.6	5.9	10.7	1.720
	0.68×10^{-6}	6.7	5.1	5.2	5.6	6.0	9.7	11.6	5.7	10.7	1.781
	0.25×10^{-6}	6.6	4.8	5.0	5.5	6.0	9.7	11.6	5.6	10.7	1.813
0.117167	0.18×10^{-6}	7.5	4.3	5.9	6.6	6.2	10.7	12.8	6.1	11.8	1.921
	0.55×10^{-6}	7.3	4.2	5.8	6.6	6.2	10.7	12.8	6.0	11.8	1.953
	1.28×10^{-6}	7.2	4.1	5.9	6.4	6.1	10.7	12.8	5.9	11.8	1.986
	0.68×10^{-6}	7.0	4.1	6.0	6.4	6.1	10.7	12.8	5.9	11.8	1.986
0.136000	1.76×10^{-6}	7.3	5.8	7.0	6.9	7.7	12.0	14.0	6.9	13.0	1.971
	0.22×10^{-6}	7.1	5.1	7.2	6.9	7.7	12.0	14.0	6.8	13.0	2.000
	2.17×10^{-6}	6.9	5.0	7.2	6.8	8.0	12.0	14.0	6.8	13.0	2.000
	2.09×10^{-6}	6.8	5.6	7.5	6.8	7.9	12.0	14.0	6.9	13.0	1.971
	4.74×10^{-6}	7.0	5.4	7.5	6.8	7.7	11.7	14.0	6.9	12.9	1.971



(ต่อ)

V_{in} (m/s)	Fr_{riprap}	Fr_{in}	R_h (m)	u_* (m/s)	ψ	Rn_*	Note
0.458	4.11	0.94	0.0087	0.092	0.010	5,841	n/a
0.547	3.71	0.88	0.0143	0.118	0.016	7,491	n/a
0.694	2.86	0.95	0.0239	0.153	0.027	9,713	n/a
0.949	2.21	0.93	0.0500	0.221	0.056	14,030	Use
0.949	2.26	0.93	0.0493	0.220	0.056	13,966	Use
0.949	2.38	0.93	0.0479	0.217	0.054	13,776	
0.949	2.45	0.93	0.0472	0.215	0.053	13,649	Use
0.993	2.48	0.92	0.0507	0.223	0.057	14,157	
0.993	2.55	0.92	0.0500	0.221	0.056	14,030	Use
0.993	2.61	0.92	0.0493	0.220	0.056	13,966	
0.993	2.61	0.92	0.0493	0.220	0.056	13,966	Use
1.046	2.40	0.93	0.0561	0.235	0.064	14,919	Use
1.046	2.45	0.93	0.0554	0.233	0.063	14,792	
1.046	2.45	0.93	0.0554	0.233	0.063	14,792	Use
1.046	2.40	0.93	0.0561	0.235	0.064	14,919	Use
1.054	2.40	0.94	0.0561	0.235	0.064	14,919	



ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์ความถดถอย

การวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เพื่อประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรตัวหนึ่งจากตัวแปรอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการประมาณ ซึ่งมีการกำหนดหรือทราบค่าตัวแปรอื่นๆ ล่วงหน้า การวิเคราะห์ความถดถอยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเดียว และการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน

1) การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเดียว (simple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยที่ทราบค่าหรือกำหนดค่าของตัวแปรตัวหนึ่งไว้ล่วงหน้า ตัวแปรที่ทราบค่าหรือกำหนดค่าไว้ล่วงหน้าคือตัวแปรอิสระ (independent variable) มักใช้สัญลักษณ์ x ส่วนตัวแปรที่ต้องการทราบคือตัวแปรตาม (dependent variable) มักใช้สัญลักษณ์ y

การหารูปแบบความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างตัวแปร 2 ตัว มักจัดให้อยู่ในรูปเชิงเส้นที่สามารถสังเกตได้ในแผนภาพการกระจาย (scatter diagram) ตามสมการเส้นตรงดังนี้

$$y = mx + C$$

โดย m คือ ความชัน (slope) ของเส้น

C คือ จุดตัดแกน Y (y-intercept) หรือค่าของ y เมื่อ x เป็น 0

การคำนวณค่า m และ C ของค่า x และ y ทุกค่าที่เคยเกิดขึ้นรวมจำนวน N ชุดข้อมูล จะคำนวณให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าต่ำที่สุด โดยทั่วไปจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งหลักการคือให้ผลบวกของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุดและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 มีค่ามากเข้าใกล้ 1 อันแสดงว่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y ได้ดี สรุปการคำนวณดังนี้

$$m = \frac{N(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{N(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$C = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N(\sum x^2) - (\sum x)^2} = \bar{y} - m\bar{x}$$

$$R^2 = \left\{ \frac{N(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N(\sum x^2) - (\sum x)^2] \cdot [N(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \right\}^2$$

ทั้งนี้การคำนวณข้างต้นสามารถใช้ได้ดีกับสมการเส้นตรงเท่านั้น หากแต่สามารถประยุกต์ให้วิเคราะห์สมการเชิงซ้อนหรือเส้นโค้งอย่าง สมการยกกำลัง (power equation, $y = Cx^m$) หรือสมการเอกซ์โพเนนเชียล (exponential equation, $y = C \cdot e^{mx}$) ได้เช่นกัน โดยประยุกต์พจน์ต่างๆ ให้เข้ากับสมการเส้นตรงดังนี้

สมการยกกำลัง

$$y = Cx^m$$

$$\log_{10}(y) = m \cdot \log_{10}(x) + \log_{10}(C)$$

$$\hat{y} = m\hat{x} + \hat{C}$$

สมการเอกซ์โพเนนเชียล

$$y = C \cdot e^{mx}$$

$$\ln(y) = mx + \ln(C)$$

$$\hat{y} = m\hat{x} + \hat{C}$$

2) การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (multiple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป โดยที่ยังต้องทราบค่าตัวแปรอิสระต่างๆ (x_i) ทุกตัวล่วงหน้าเช่นกัน

รูปแบบความสัมพันธ์เชิงซ้อนของตัวแปรอิสระจำนวน k ตัว มักจัดเป็นสมการ

$$y = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_k x_k + C$$

โดย m_i คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (partial regression coefficient)

C คือ จุดตัดแกน Y (y-intercept) หรือค่าของ y เมื่อ x_i ทุกตัวเป็น 0

การคำนวณค่า m_i , C และ R^2 จำเป็นต้องทราบค่า x_i และ y ทุกค่าที่เคยเกิดขึ้นรวมจำนวน N ชุดข้อมูล สรุปได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sum y \\ \sum x_1 y \\ \sum x_2 y \\ \vdots \\ \sum x_k y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum x_1 & \sum x_2 & \cdots & \sum x_k \\ \sum x_1 & \sum (x_1^2) & \sum x_1 x_2 & \cdots & \sum x_1 x_k \\ \sum x_2 & \sum x_1 x_2 & \sum (x_2^2) & \cdots & \sum x_2 x_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_k & \sum x_1 x_k & \sum x_2 x_k & \cdots & \sum (x_k^2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_k \end{bmatrix}$$

$$R^2 = 1 - \frac{C \sum y + m_1 \sum x_1 y + m_2 \sum x_2 y + \dots + m_k \sum x_k y - N \cdot \bar{y}^2}{(\sum y)^2 + (\sum x_1 y)^2 + (\sum x_2 y)^2 + \dots + (\sum x_k y)^2 - N \cdot \bar{y}^2}$$

เมื่อตัวแปรอิสระมี 2 ตัว สามารถสรุปสมการได้ 3 สมการ 3 ตัวแปร สำหรับคำนวณต่อไปนี้

$$\sum y = m_1 \sum x_1 + m_2 \sum x_2 + CN$$

$$\sum x_1 y = m_1 (\sum x_1^2) + m_2 \sum x_1 x_2 + C \sum x_1$$

$$\sum x_2 y = m_1 \sum x_1 x_2 + m_2 (\sum x_2^2) + C \sum x_2$$

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

สามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์พจน์ยกกำลังหรือพจน์เอกซโพเนนเชียลได้เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเดี่ยว โดยประยุกต์พจน์ต่างๆ แทนตัวแปรเดิม อย่างสมการยกกำลังดังนี้

$$y = C x_1^{m_1} x_2^{m_2}$$

$$\log_{10}(y) = m_1 \cdot \log_{10}(x_1) + m_2 \cdot \log_{10}(x_2) + \log_{10}(C)$$

$$\hat{y} = m_1 \hat{x}_1 + m_2 \hat{x}_2 + \hat{C}$$

ภาคผนวก จ. สัญลักษณ์และนิยามในวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สัญลักษณ์	นิยาม	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดการไหล	m^2
B	ความกว้างของผิวน้ำอิสระ, ความกว้างของรางน้ำหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	m
D	ความลึกชลศาสตร์, $D = A/B$	m
D_{50}	ขนาดวัสดุท้องน้ำ	m
Fr	Froude number, $Fr = V/\sqrt{gD}$	-
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก	m/s^2
h	ความสูงน้ำเหนือสันฝาย	cm
L_r	มาตราส่วนระหว่างแบบจำลองกับตัวต้นแบบ	-
P	เส้นขอบเปียก	m
q	อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง, $q = Q/B$	$m^3/s/m$
q_0	อัตราการไหลที่วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
q_f	อัตราการไหลที่โครงสร้างพังทลายต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
q_s	อัตราการพัดพาท้องน้ำเชิงปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง	$m^3/s/m$
Q	อัตราการไหล	m^3/s
Rn_*	เลขเรโนลด์ของอนุภาค	-
R_h	รัศมีชลศาสตร์, $R_h = A/P$	m
R^2	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	-
S	ความลาดท้องน้ำ	m/m
t	เวลา	s
u_*	ความเร็วเฉือน	m/s
V	ความเร็วการไหล	m/s
y	ความลึกการไหล	cm
γ	น้ำหนักจำเพาะของน้ำ	N/m^3
ν	ความหนืดเชิงจลน์	m^2/s
θ	มุมทรงตัว	degree
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ	kg/m^3
ρ_s	ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ	kg/m^3
ψ	พารามิเตอร์การไหล	-

ตัวห้อย	นิยาม
m	แบบจำลอง
p	ตัวต้นแบบ
r	สัดส่วนระหว่างแบบจำลองกับตัวต้นแบบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ณัฐ ฮุนพงษ์สิมานนท์ (Nat Hoonpongsimanon)

ภาควิศวกร สาขาโยธา เลขทะเบียน ทย.58398

การศึกษา

2554 – 2558 ปริญญาโท

ภาควิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยาการคอมพิวเตอร์ในด้านวิศวกรรม

ปฏิบัติการชลศาสตร์และอุทกวิทยา

การออกแบบโครงสร้างชลศาสตร์

อุทกวิทยาขั้นสูงและน้ำใต้ดิน

2550 – 2554 ปริญญาตรี

ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (วศ.บ. โยธา)

โครงการ “การจัดการอพยพหนีไฟ กรณีศึกษาอาคารโนเบลเฮาส์ พญาไท”

2547 – 2550 มัธยมศึกษา

โรงเรียนโยธินบูรณะ ภาควิชาภาษาอังกฤษ

การทำงาน

ตลอดปี 2556 วิศวกร 3

ส่วนปฏิบัติการลดน้ำสูญเสีย กองบำรุงรักษา สาขานนทบุรี การประปานครหลวง

ตลอดปี 2555 ผู้ช่วยสอน

รายวิชาปฏิบัติการชลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มี.ค. – พ.ค. 2549 วิศวกรสนาม

โครงการ The City พระราม 5-ราชพฤกษ์ บริษัท เอพี (ไทยแลนด์) จำกัด (มหาชน)