



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

ผลกระทบของรูปแบบการวางวัสดุผิวต่อความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้าง

พื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต

(Effects of the placement of surface materials on the wave
runup on concrete-cube sloping structures)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802196

สัญญาเลขที่ 140/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ผลกระทบของรูปแบบการวางวัสดุผิวต่อความ

สูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต

(Effects of the placement of surface materials on the

wave runup on concrete-cube sloping structures)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 140/2559

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 140/2559)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการวางลูกบาศก์คอนกรีตที่มีต่อพฤติกรรมของคลื่นที่ซัดขึ้นไปบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต และเพื่อสร้างสมการเชิงประสพการณ์ในการประมาณความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ที่คำนึงลักษณะคลื่นเข้ากระทบ ความลาดชันของโครงสร้าง และความสูงขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง การศึกษาดำเนินการในรางจำลองคลื่น กว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. และยาว 16 ม. ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี โดยทำทดลองบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต ที่มีการจัดเรียงวัสดุผิวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ จัดเรียงแบบเรียบ จัดเรียงแบบขั้นบันได และจัดเรียงแบบเตลุ่ม ขนาดของวัสดุผิวซึ่งเป็นลูกบาศก์คอนกรีต มี 3 ขนาด ได้แก่ $30 \times 30 \times 30$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร, $40 \times 40 \times 40$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และ $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร โครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ทำมุม 15.0 ถึง 25.0 องศา ความลึกของน้ำที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 35 ซม. คลื่นที่ใช้ในการศึกษาเป็นคลื่นแบบสมำเสมอที่ถูกสร้างขึ้นด้วยความถี่ 1.00 ถึง 1.67 เฮิรตซ์ ดำเนินการทดลองทั้งหมด 1,350 กรณี

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติบ่งชี้ว่า ความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงมีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับความลาดชันของโครงสร้าง ความชันของคลื่นเข้ากระทบ ความขรุขระของผิวโครงสร้าง ซึ่งขึ้นกับการจัดเรียงด้วย การจัดเรียงแบบเรียบทำให้ความขรุขระของผิวน้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อความสูงคลื่นซัดมากนัก การจัดเรียงแบบขั้นบันไดและการจัดเรียงแบบเตลุ่ม ทำให้ความขรุขระของผิวพื้นเอียงเพิ่มมากขึ้น แรงเสียดทานระหว่างคลื่นกับโครงสร้างเพิ่มขึ้น และทำให้ความสูงคลื่นซัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการถูกนำมาพัฒนาเป็นสมการทำนายความสูงคลื่นซัด โดยคำนึงถึงความสูงขรุขระ ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของพื้นเรียบ สมการที่มีความแม่นยำมากขึ้นทำให้เราสามารถออกแบบโครงสร้างให้มีความสูงลดลง ซึ่งทำให้ค่าก่อสร้างลดลงไปด้วย

Abstract

This research is to study the effects of the placement of surface materials on the behaviors of wave runup on concrete-cube sloping structures and to develop a set of empirical formulas to predict the wave runup on the concrete-cube sloping structures. The study was carried out in a wave flume of which the width of 60 cm., the depth of 80 cm. and the length of 16 m., in Hydraulic Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Burapha University, Chon Buri Province. The concrete-cube sloping and stepped sloping structures with three different placements – smooth, stepped and random - were used in the study with the slope ranging from 15.0 to 25.0 degrees. The sizes of the concrete cube were 30×30×30, 40×40×40 and 50×50×50 cubic millimeter. The water depth used in the test was 35 cm and the wave was regularly generated with the frequency of 1.00 to 1.67 Hz. The number of test was 1,350 cases in total.

The laboratory results indicate that the wave runup on the sloping structures is clearly relative to the slope of the structures, the wave steepness and the roughness of structure surface, which is relative to the placement of surface materials. For the case of the smooth placement, the roughness height was very smooth and did not influence the wave runup much. Whereas for the case of the stepped and the random placements, the roughness heights became higher and induce larger friction between the waves and the structures; consequently the wave runup were lower than those of the case of the smooth placement.

Experimental data was applied to develop an empirical formula for predicting the wave runup on the concrete-cube sloping structure. The proposed formula gives more accurate results compared to the formula of smooth slope. With the more accurate calculation of wave runup, design of lower height of structures can be done and lead to reduce the construction cost.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูป	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด	4
2.2 การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ	5
2.2.1 การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ	5
2.2.2 การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ	13
2.3 การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม	22
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	33
3.1 รายละเอียดการทดลองในห้องปฏิบัติการ	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	35
3.2.1 รางจำลองคลื่น	35
3.2.2 กล้องดิจิทัลบันทึกข้อมูล	40
3.2.3 เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้	40
3.2.4 เครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทาน	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 โครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต	41
3.4 วิธีการทดลอง	43
3.4.1 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์	43
3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	50
4.1 ผลการทดลอง	50
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
4.2.1 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ	52
4.2.2 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเรียบ	56
4.2.3 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบชั้นบันได	62
4.2.4 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเตลุ่ม	67
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปการทดลองในห้องปฏิบัติการ	73
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาในอนาคต	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก ก ผลผลิต	80
ภาคผนวก ข รายงานสรุปการเงิน	81
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	82

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2-1	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์	11
ตารางที่ 2-2	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา	12
ตารางที่ 2-3	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์	16
ตารางที่ 2-4	ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง	17
ตารางที่ 2-5	สรุปการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นระดับนโครงสร้างลาดเอียง	29
ตารางที่ 3-1	สรุปสภาพการทดลอง	34
ตารางที่ 3-2	ลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่น	35
ตารางที่ 4.1.1	ปฏิบัติการทดลองคลื่นชัดเข้าสู่พื้นเอียงแต่ละกรณี	51
ตารางที่ 4.2.1	สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ	52
ตารางที่ 4.2.2	สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเรียบ	56
ตารางที่ 4.2.3	สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบขั้นบันได	62
ตารางที่ 4.2.4	สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบท่สุ่ม	67
ตารางที่ 4.3.1	ตารางสรุปสมการที่ได้จากการศึกษา	72
ตารางที่ 5-1	สรุปสมการและพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองความสูงคลื่นชัด บนโครงสร้างพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีต	74

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 นิยามของความสูงคลื่นชัด	4
ภาพที่ 2-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_S / H_S และ ξ	9
ภาพที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_S / H_S และ ξ	13
ภาพที่ 2-4 เปรียบเทียบความสูงคลื่นชัดบนพื้นเรียบและพื้นหินเรียง	14
ภาพที่ 2-5 พื้นเอียงผิวขรุขระ	20
ภาพที่ 2-6 การวัดความสูงคลื่นชัดในภาคสนาม	23
ภาพที่ 3-1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	34
ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น	36
ภาพที่ 3-3 เครื่องกำเนิดคลื่น	38
ภาพที่ 3-4 ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยง	38
ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น	39
ภาพที่ 3-6 กล้องดิจิตอลบันทึกข้อมูล	40
ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้	40
ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดคลื่นแบบแรงต้านทาน	41
ภาพที่ 3-9 พื้นเอียงผิวเรียบ	42
ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างแบบหล่อและ ก้อนลูกบาศก์คอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง	42
ภาพที่ 3-11 การอุดรูรั่วด้วยดินน้ำมัน	43
ภาพที่ 3-12 เครื่องกำเนิดคลื่น	44
ภาพที่ 3-13 โครงสร้างพื้นเอียงที่ใช้รองรับพื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีต	44
ภาพที่ 3-14 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ	45
ภาพที่ 3-15 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบบันได	45
ภาพที่ 3-16 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบสุ่ม	45
ภาพที่ 3-17 ตัวสลายพลังงานคลื่น	46
ภาพที่ 3-18 แผงควบคุมเครื่องทดสอบทางน้ำไหล	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3-19 การวัดระดับน้ำนิ่ง	47
ภาพที่ 3-20 ระยะคันชักข้อเหวี่ยง	48
ภาพที่ 3-21 การวัดความสูงของคลื่นก่อนเข้ากระทบโครงสร้าง	48
ภาพที่ 3-22 การวัดความสูงของคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีต	49
ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ (R/H) กับ Surf Similarity (ξ)	53
ภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ	53
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\Psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1	58
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (Ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	61
ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	61
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\Psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบขั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1	64
ภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับ ค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบขั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (Ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบขั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	66
ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบขั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	66
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\Psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1	69
ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1	69
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (Ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	71
ภาพที่ 4-13 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ความสูงคลื่นซัด (Wave runup: R) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นในทะเลเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง ระดับพื้นที่ท้องทะเลที่ตื้นขึ้นส่งผลให้คลื่นเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยความสูงของคลื่นจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าจำกัดค่าหนึ่งแล้วเกิดการแตกตัว (Wave breaking) หลังจากนั้นคลื่นจะมีการสลายพลังงาน ซึ่งพลังงานที่เหลือส่วนหนึ่งกลายเป็นพลังงานศักย์อยู่ในรูปของความสูงคลื่นซัด ความสูงคลื่นซัดวัดได้จากระยะในแนวตั้งตั้งแต่ระดับน้ำนิ่ง (Still water level: SWL) ถึงระดับสูงสุดที่คลื่นซัดไปบนชายหาด เช่น เขื่อนกันคลื่น (Breakwaters) กำแพงกันคลื่น (Seawalls) รอดักทราย (Groins) เป็นต้น ความสูงคลื่นซัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับงานวิศวกรรมชายฝั่งทะเล โดยเป็นตัวกำหนดการออกแบบความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล และเป็นตัวกำหนดขอบเขตบนของเขตที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งตามแนวชายฝั่ง (Alongshore sediment transport) และตามแนวขวางฝั่ง (Cross-shore sediment transport) ซึ่งส่งผลให้ชายฝั่งมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงและเกิดปัญหาตามมา เช่น การกัดเซาะชายฝั่งทะเล หรือการทับถมทำให้เกิดพื้นที่งอก เป็นต้น ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงพร้อมทั้งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดไว้พอสมควร

สมการความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมามีส่วนใหญ่เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experiments) และทำการทดลองบนพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Smooth and impermeable slope) คลื่นแบบสม่ำเสมอ (Regular wave) สมการพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับและนิยมนำมาพัฒนา คือ สมการของ Hunt (1959) ซึ่งได้นำเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นซัด โดยที่ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความสูงคลื่น (Relative wave runup height: R/H) เป็นฟังก์ชันกับความชันของคลื่น (Wave steepness: H/L) และความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง (Beach or structure slope: $\tan \theta$) ต่อมาจึงมีผู้ศึกษาความสูงคลื่นซัดโดยสร้างคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular wave) และนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดที่มีค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ (Empirical parameters) เข้ามาพร้อมทั้งแนะนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ

ความสูงคลื่นซัดแต่ละประเภท นอกจากนี้ยังมีสมการความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม (Field experiments) ซึ่งทำการศึกษาความสูงคลื่นซัด ณ ชายหาดธรรมชาติ หรือ บริเวณที่มีโครงสร้างชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่น เขื่อนกันคลื่น เป็นต้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาสำหรับการทดลองความสูงคลื่นซัดในห้องปฏิบัติการ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นซัดส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานมาจากสมการของ Hunt (1959) สมการที่มีการพิจารณาความขรุขระเข้ามาเกี่ยวข้องยังมีจำนวนน้อย โดยมากมักเป็นเพียงการนำค่าแฟกเตอร์ความขรุขระที่จำแนกตามวัสดุผิวโครงสร้างไปเป็นตัวคูณเท่านั้น แต่ไม่มีการคำนึงถึงความสูงขรุขระ (Roughness height: d) เข้ามาโดยตรง งานวิจัยของ Rasmeemasuang (2010), Rasmeemasuang et al. (2014), วณิชย์และคณะ (2556) ได้นำเสนอสมการที่พิจารณาความสูงขรุขระสัมพันธ์กับความสูงคลื่น (Relative roughness height: d/H) ด้วย

การวางวัสดุของโครงสร้างที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น การเทหรือถมวัสดุแบบสุ่ม (Random fill) หรือการจัดเรียงอย่างตั้งใจ (Intentional arrangement) เป็นต้น ย่อมทำให้ความสูงขรุขระของพื้นผิวโครงสร้างไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายด้านพลังงานของคลื่นที่ซัดบนโครงสร้างนั้นไม่เท่ากัน และยิ่งผลให้ความสูงคลื่นซัดต่างกันมากที่สุด

โครงการวิจัยนี้ทำทดลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของคลื่นเข้ากระทบ ความลาดของโครงสร้าง ขนาดของลูกบาศก์คอนกรีต และลักษณะการวางลูกบาศก์คอนกรีต พร้อมทั้งสร้างสมการคำนวณหาความสูงคลื่นซัดที่เป็นฟังก์ชันของตัวเหล่านี้ เพื่อให้ได้ผลการทำนายดีกว่าสมการที่มีอยู่ปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการวางลูกบาศก์คอนกรีตที่มีต่อความสูงขรุขระและพฤติกรรมของคลื่นที่ซัดขึ้นไปบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต
2. เพื่อสร้างสมการเชิงประสพการณ์ในการประมาณความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ที่คำนึงลักษณะคลื่นเข้ากระทบ ความลาดชันของโครงสร้าง และความสูงขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจพฤติกรรมของคลื่นที่ซัดเข้าสู่โครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต รวมทั้งเข้าใจผลกระทบของรูปแบบการวางลูกบาศก์คอนกรีตที่มีต่อความสูงขรุขระและพฤติกรรมของคลื่นที่ซัดขึ้นไปบนโครงสร้างชนิดนี้ นำไปสู่การใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ได้สมการอย่างง่ายเพื่อทำนายความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ที่คำนึงลักษณะคลื่นเข้ากระทบ ความลาดชันของโครงสร้าง และความสูงขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและการเตือนภัยความรุนแรงของคลื่นซัดได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาผลกระทบของการวางวัสดุลูกบาศก์คอนกรีตต่อความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

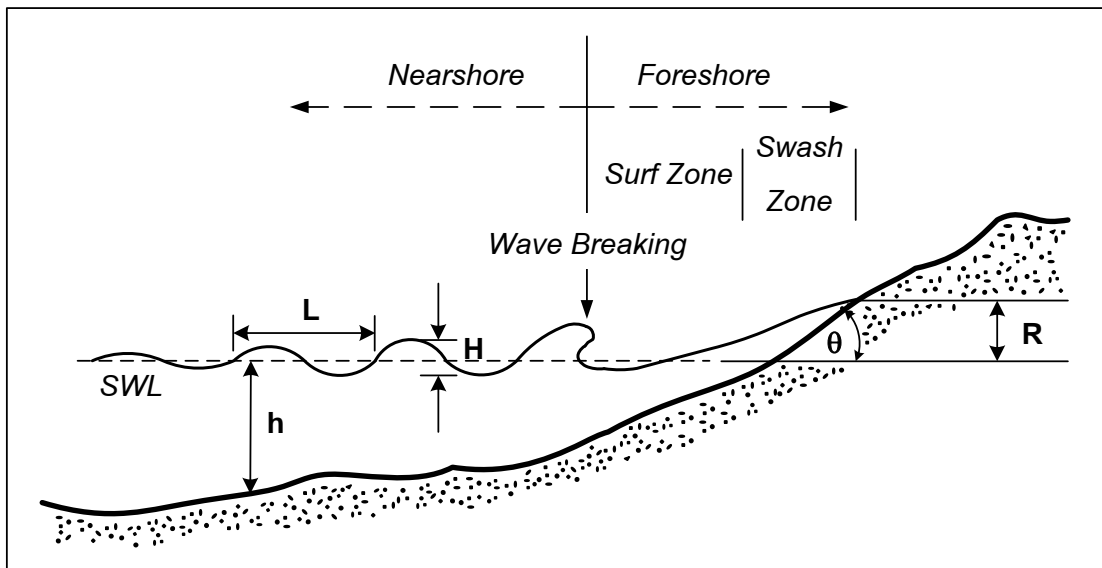
- (1) การทดลองถูกดำเนินการในรางจำลองคลื่น หน้าตัดกว้าง 600 mm ลึก 800 mm ยาว 16 m พร้อมด้วยเครื่องกำเนิดคลื่น ในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์
- (2) คลื่นที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ (Regular wave) ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคลื่นซัดของใบพัดคลื่น 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ความสูงของคลื่นจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความสูงคลื่นแบบวัดความต้านทาน การตั้งความถี่ของคลื่นและระยะคลื่นซัดของใบพัดคลื่นเช่นนี้ทำให้ได้คลื่นที่มีความชันของคลื่น (H/L) ระหว่าง 0.005 ถึง 0.242 ซึ่งอยู่ในช่วงความชันของคลื่นลม (Wind waves) ที่พบทั่วไปในพื้นที่ชายฝั่งทะเล
- (3) แบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต จะถูกสร้างขึ้นด้วยก้อนลูกบาศก์คอนกรีตที่ขนาดต่างๆ กัน จำนวน 3 ค่า คือ 30×30×30 ลูกบาศก์มิลลิเมตร, 40×40×40 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และ 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีวัสดุด้านหลังที่มีลักษณะที่น้ำซึมผ่านไม่ได้
- (4) รูปแบบการจัดวางลูกบาศก์คอนกรีต มี 3 รูปแบบ ได้แก่ จัดเรียงแบบเรียบ จัดเรียงแบบขั้นบันได และจัดเรียงแบบเตลุ่ม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่ง ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่องทะเลที่ตื้น โดยความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัดจากนั้นจะเกิดการแตกตัว และมีการสลายพลังงานออกมาบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (Surf zone) พลังงานส่วนหนึ่งจะกลายเป็นพลังงานศักย์ในรูปของความสูงคลื่นซัด (R) บริเวณเขตคลื่นซัดหาด (Swash zone) ซึ่งความสูงคลื่นซัดเป็นความยาวในแนวตั้งที่วัดจากระดับน้ำนิ่ง (SWL) ขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดที่คลื่นซัดไปบนหาดหรือพื้นเอียงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 โดยที่ θ คือ มุมที่เกิดจากความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง H คือ ความสูงคลื่น L คือ ความยาวคลื่น และ h คือ ระดับความลึกของน้ำจากระดับน้ำนิ่งถึงพื้น



ภาพที่ 2-1 นิยามของความสูงคลื่นซัด

ความสูงคลื่นซัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับงานวิศวกรรมชายฝั่งทะเล เนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล อีกทั้งขอบเขตบนของความสูงคลื่นซัดเป็นเขตที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายทั้งตามแนวชายฝั่งและตามแนวขวางฝั่งทะเล ซึ่งจะทำให้เกิดการกัดเซาะชายฝั่งทะเลตามมา (Ruggiero, Komar, McDougal, Marra, & Beach, 2001) นอกจากนี้การสร้างสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่แม่นยำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยขนาดของความรุนแรงคลื่นได้ดีอีกด้วย (Shankar, & Jayaratne, 2003)

การหาความสูงคลื่นซัดสามารถหาได้สองรูปแบบ คือ การหาความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีทั้งการทดสอบบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ และโครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวไม่เรียบ เช่น แบบผิวหินเรียง แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา แบบกล่องนูนสลับพื้นปลา เป็นต้น คลื่นที่ใช้ทดสอบเป็นคลื่นสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อการศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับการหาความสูงคลื่นซัดอีกหนึ่งรูปแบบ คือ การหาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม โดยส่วนใหญ่ดำเนินการวัดความสูงคลื่นซัดจากชายหาดธรรมชาติโดยตรง หรือวัดความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่น เชือกกันคลื่น เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อการศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม

2.2 การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนชายหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียงที่ผ่านมามีส่วนใหญ่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และมักทดสอบกับพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบสม่ำเสมอ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นซัดบนพื้นเอียงรวมทั้งมีการนำเสนอสมการเชิงประจักษ์สำหรับทำนายความสูงคลื่น นอกจากนี้ยังมีการทดลองจำนวนหนึ่งที่ทดสอบบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดการทดลองความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ดังนี้

2.2.1 การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

Hunt (1959) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ และคลื่นแบบสม่ำเสมอ โดยวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการของ (Grantham (1953); Iribarren & Nogales (1947); Miche (1944, 1951); Saville (1957)) และนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างชายฝั่งทะเล โดยที่ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์

(Relative wave runup height: R/H_0) เป็นฟังก์ชันกับความชันคลื่น ณ น้ำลึก (Wave steepness: H_0/L_0) และความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง ($\tan \theta$) ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (2-1)$$

สมการที่ 2-1 เป็นสมการที่ได้รับจากการทดลองกรณีคลื่นแบบสม่ำเสมอ ซึ่งเปรียบเสมือนการพิจารณาด้วยคลื่นที่มีความสูงคลื่นและคาบคลื่นเท่ากันทุกลูกคลื่น ทำให้เป็นสมการพื้นฐานที่ไม่สลับซับซ้อน ดังนั้นจึงเป็นสมการทั่วไปที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ และถูกใช้อ้างอิงเรื่อยมา นอกจากนี้ยังแนะนำถึงแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต โดยเปลี่ยนจากคลื่นแบบสม่ำเสมอเป็นคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ นั่นคือคลื่นลมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Wind generated) รวมถึงควรทดสอบในรางจำลองคลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อจำลองคลื่นให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุด และเน้นความสำคัญในเรื่องของการเกิดคลื่นสะท้อนซึ่งถ้าเป็นไปได้ควรทำให้เกิดคลื่นสะท้อนน้อยที่สุดในระหว่างการทดลอง เนื่องจากทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

จากการศึกษาของ Battjes (1974) พบว่าสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1595) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\frac{R}{H_0} = \xi \quad (2-2)$$

สำหรับ $0.1 < \xi < 2.3$

พารามิเตอร์ ξ นี้ถูกเรียกว่า "Surf similarity parameter" หรือ "Iribarren number" หรือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น มีค่าเท่ากับ $\tan \theta / \sqrt{H/L}$ โดยสามารถแบ่งการแตกตัวออกได้เป็นสี่ลักษณะ ได้แก่ การแตกตัวแบบ Spilling เมื่อ $\xi < 0.5$ การแตกตัวแบบ Plunging เมื่อ $0.5 < \xi < 3.0$ การแตกตัวแบบ Surging เมื่อ $\xi > 3.0$ และการแตกตัวแบบ Collapsing เมื่อ $\xi > 3.3$

ต่อมา Roos and Battjes (1976) ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ โดยใช้คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ขนาดหน้าตัดตรงจำลองคลื่นกว้าง 0.8 เมตร ลึก 0.6 เมตร และยาว 30 เมตร ความลาดชันของพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 3, 1 : 5 และ 1 : 7 ระดับความลึกของน้ำ (h) เท่ากับ 0.45 เมตร และความชันคลื่นในการทดลองอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.07 จากผลการทดลองพบว่าค่าความสูงคลื่นซัดที่ได้มีความสอดคล้องดีมากกับสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959)

Ahrens (1981) ได้สรุปจากผลการทดลองของ (Ahrens (1979); Kamphuis & Mohammed (1978); van Oorschot & d'Angremond (1968)) ซึ่งดำเนินการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ภายใต้อ่อนไหวเขตน้ำลึก (Deepwater) โดยที่ $3 \leq h/H_S \leq 12$ ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 1 ถึง 1 : 4 และทดลองโดยใช้ลักษณะความสูงคลื่นซัด (Characteristic of wave runup: R_{char}) สามารถแบบ ได้แก่ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นซัดจำนวน 2% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า (2% excess runup height: $R_{2\%}$) ความสูงคลื่นซัดสูงสุด 1/3 (The one-third highest runup height: $R_{1/3}$) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความสูงคลื่นซัดที่มีนัยสำคัญ (The significant runup height: R_S) และความสูงคลื่นซัดเฉลี่ย (Mean runup height: \bar{R}) จากการทดลองเขาได้ทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความสูงคลื่นที่มีนัยสำคัญ (R_{char} / H_S) กับฟังก์ชันของความชันคลื่น (H_S / gT_p^2) โดยที่ T_p คือ คาบคลื่นที่มีพลังงานสูงสุด และ g คือ ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมทั้งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดแบ่งเป็นสองรูปแบบ คือ สมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression equation) ดังสมการที่ 2-3 และสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical equation) ดังสมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-6 ที่เพิ่มพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ เข้ามาจากสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959) ดังนี้

สมการถดถอยแบบพหุนาม

$$\frac{R_{Char}}{H_S} = C_1 + C_2 \frac{H_S}{gT_p^2} + C_3 \left(\frac{H_S}{gT_p^2} \right)^2 \quad (2-3)$$

สำหรับ $\frac{1}{3} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$, $0.003 \leq \frac{H_S}{gT_p^2} \leq 0.005$ และ $\frac{h}{H_S} > 3$

โดยที่

C_1 , C_2 และ C_3 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยแบบไร้มิติ (Dimensionless regression coefficients)

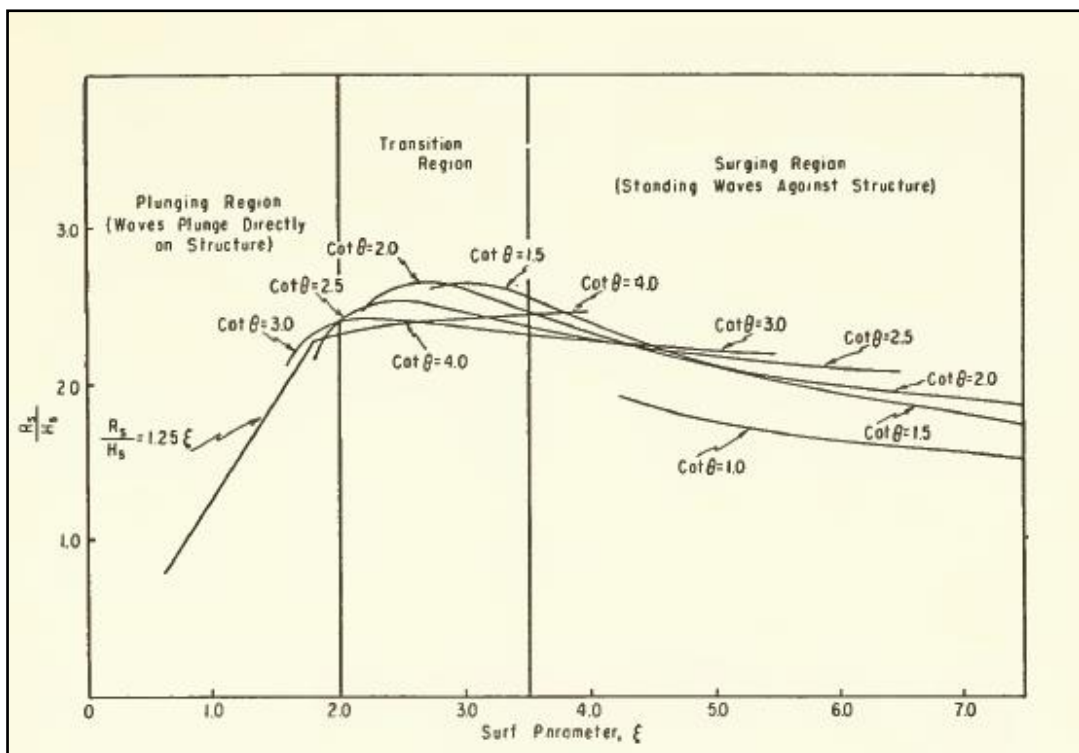
สมการเชิงประสบการณ์

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.61\xi \quad (2-4)$$

$$\frac{R_s}{H_s} = 1.25\xi \quad (2-5)$$

$$\frac{\bar{R}}{H_s} = 0.84\xi \quad (2-6)$$

สำหรับ $\tan \theta \leq \frac{1}{4}$, $\frac{H_s}{gT_p^2} > 0.003$, $\frac{h}{H_s} > 3$ และ $\xi \leq 2$



ภาพที่ 2-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s / H_s และ ξ (Ahrens, 1981)

นอกจากนี้เขาได้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่มีนัยสำคัญ (R_s / H_s) และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) ดังภาพที่ 2-2 ซึ่งเป็นการอธิบายตามช่วงของพารามิเตอร์ ξ โดยจากกราฟความสัมพันธ์พบว่า เมื่อ $\xi \leq 2.0$ อยู่ในช่วงการแตกตัวแบบ Plunging และเป็นช่วงที่มีขนาดความชันคลื่นมาก ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่ามากขึ้น และโครงสร้างมีความลาดชันน้อย ๆ ในขณะที่ $\xi \geq 3.5$ อยู่ในช่วงการแตกตัวแบบ Surging ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่าลดลง และโครงสร้างมีความลาดชันเพิ่มขึ้น สำหรับในช่วง $2.0 \leq \xi \leq 3.5$ พบว่ามีผลกระทบต่อกันน้อยมากระหว่าง ความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ ความชันคลื่น และความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง ดังนั้นสมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-6 สามารถใช้ได้ดีในช่วง $\xi \leq 2.0$ และให้คำแนะนำเพิ่มเติมว่าสมการยังสามารถใช้ได้ดีกับความลาดชันของโครงสร้างที่น้อยกว่า 1 : 4

Mase (1989) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัด โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ บนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ เพื่อพัฒนาสูตรที่ใช้ในการ

พยากรณ์ความสูงคลื่นซัด ดำเนินการทดสอบในรางจำลองคลื่นที่มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ลึก 75 เซนติเมตร และยาว 27 เมตร ความลาดชันของแบบจำลองพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 และ 1 : 30 ระดับความลึกน้ำคงที่ตลอดรางจำลองคลื่นซึ่งลึกเท่ากับ 45 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงที่ลาดชันเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10 และ 1 : 20 และลึกเท่ากับ 43 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงที่ลาดชันเท่ากับ 1 : 30 รวมทั้งหมด 120 กรณี ความชันคลื่น θ น้ำลึก อยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.07 ความสูงคลื่นถูกวัดด้วยมาตรวัดคลื่นแบบวัดการเก็บประจุ (Capacitance wave gauge) และสร้างคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอด้วยสเปกตรัมแบบ Pierson-Moskowitz จากผลการทดลองเขาพบว่าเมื่อทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ R_{\max} / H_0 , R_s / H_0 และ \bar{R} / H_0 กับความชันคลื่น θ น้ำลึก (H_0 / L_0) บนสเกล log-log แล้วค่าความลาดชันของเส้นตรงมีแนวโน้มของความสัมพันธ์แตกต่างจาก -0.5 ตามที่ Hunt (1959) ได้เสนอตั้งสมการที่ 2-1 ดังนั้นเขาจึงเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นซัดเชิงประสบการณ์ที่มีรูปแบบ ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \quad (2-7)$$

สำหรับ $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$ และ $0.007 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.07$

โดยที่

$\frac{R}{H_0}$ และ ξ ดังอธิบายข้างต้น

a และ b คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้ยังแนะนำค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ของความสูงคลื่นซัดรูปแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ (Mase, 1989)

R_{char}	a	b
R_{max}	2.32	0.77
$R_{2\%}$	1.86	0.71
$R_{1/10}$	1.70	0.71
R_S	1.38	0.70
\bar{R}	0.88	0.69

โดยที่

R_{char} , $R_{2\%}$, R_S หรือ $R_{1/3}$ และ \bar{R} ดังอธิบายข้างต้น

R_{max} คือ ความสูงคลื่นซัดสูงสุดแต่ละการทดสอบ (Highest runup height)

$R_{1/10}$ คือ ความสูงคลื่นซัดสูงสุด 1/10 (The one-tenth highest runup height)

Hedges and Mase (2004) ได้ทำการปรับเปลี่ยนสมการความสูงคลื่นซัดของ Hunt (1959) เนื่องจากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่ความลาดชันของพื้นเอียงหรือโครงสร้างน้อย ๆ ค่าความสูงคลื่นซัดจะเข้าใกล้ศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่ว่าความลาดชันจะน้อยเพียงใดก็ตาม ค่าความสูงคลื่นซัดก็จะไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากคลื่นที่แตกตัวและซัดเข้าสู่ชายฝั่งหรือโครงสร้างพื้นเอียงตลอดเวลา ทำให้ระดับน้ำเกิดการยกตัวขึ้นในระดับที่สูงกว่าระดับน้ำนิ่ง (SWL) ซึ่งเรียกว่า ระดับคลื่นยกตัว (Wave setup) ดังนั้น Hedges and Mase (2004) จึงทำการปรับแก้สมการโดยคำนึงถึงระดับคลื่นยกตัว เพิ่มเข้ามาดังสมการที่ 2-8

$$\frac{R_{char}}{H_S} = \frac{S_{char}}{H_S} + c \cdot \xi_0 \quad (2-8)$$

สำหรับ $0.13 < \xi_0 \leq 2.20$

โดยที่

R_{char} และ H_s ดังอธิบายข้างต้น

S_{char} คือ ระดับคลื่นยกตัวหรือค่าต่ำสุดของ R_{char} ที่ความลาดชันพื้นเอียงเข้าใกล้ศูนย์

T_s คือ คาบคลื่นที่มีนัยสำคัญ

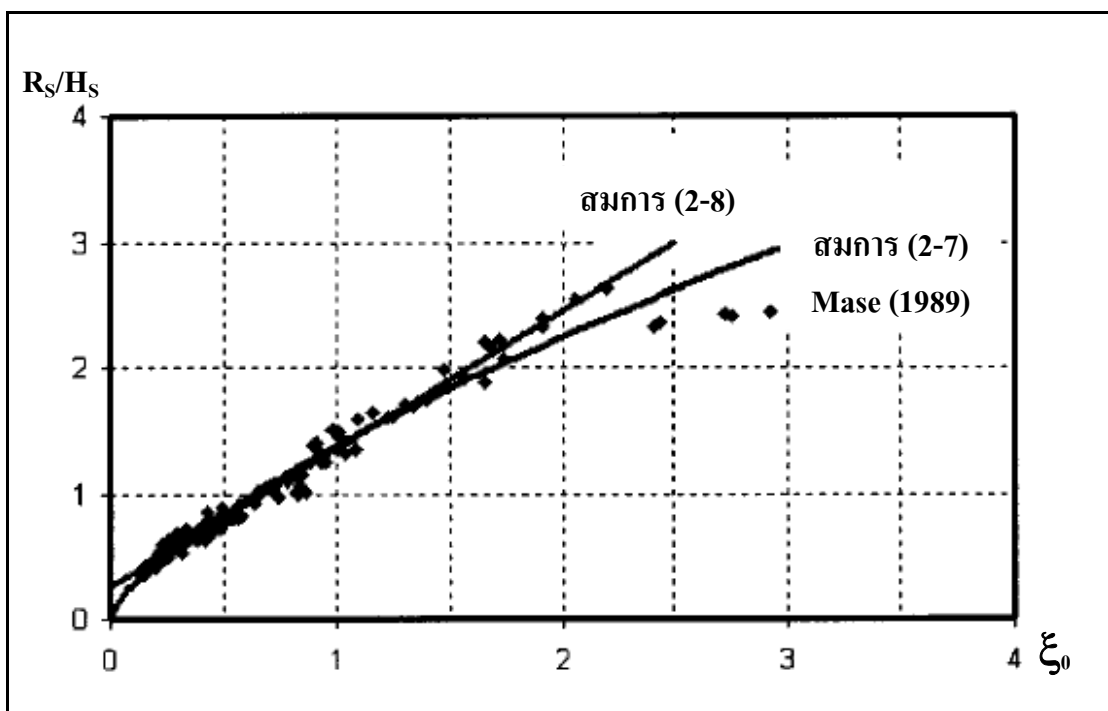
c คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

ξ_0 คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้ H_s และ T_s

ค่า S/H_s และ c ถูกนำเสนอโดยวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองของ Mase (1989) ซึ่งศึกษาความสูงคลื่นซัดของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ บนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ ความลาดชันของพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20 และ 1 : 30 โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ไว้ดังตารางที่ 2-2 ซึ่งผลการคำนวณจากสมการที่ 2-8 ถูกนำไปตรวจสอบกับข้อมูลการทดลองชุดเดิมของ Mase (1989) ดังภาพที่ 2-3 พบว่าสมการทั้งสองให้ค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเฉพาะในช่วง $\xi_0 < 1.5$ แต่สมการที่ 2-7 ของ Mase (1989) ให้ค่าที่ต่ำกว่าเมื่อ $\xi_0 \geq 2.2$ จากการศึกษาที่ผ่านมารวมทั้งการศึกษาของ CIRIA/CUR (1991) ได้ให้คำแนะนำว่าช่วง $\xi_0 \geq 2.2$ ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะเริ่มลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดด้วยสมการเส้นตรงอย่างง่ายของ Hedges and Mase (2004) จะให้ค่าที่แม่นยำในช่วง $\xi_0 < 2.2$ ซึ่งคลื่นเกิดการแตกตัวแบบ Plunging นั้นเอง

ตารางที่ 2-2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา (Hedges & Mase, 2004)

$\frac{R_{char}}{H_s}$	$\frac{S_{char}}{H_s}$	c	$\frac{S}{S_s}$	$\frac{c}{c_s}$	$\left(\frac{R}{R_s}\right)_{Rayleigh}$
$\frac{R_{2\%}}{H_s}$	0.37	1.38	1.37	1.33	1.40
$\frac{R_{1/10}}{H_s}$	0.34	1.27	1.26	1.22	1.27
$\frac{R_s}{H_s}$	0.27	1.04	1.00	1.00	1.00
$\frac{R_{mean}}{H_s}$	0.17	0.66	0.63	0.63	0.63



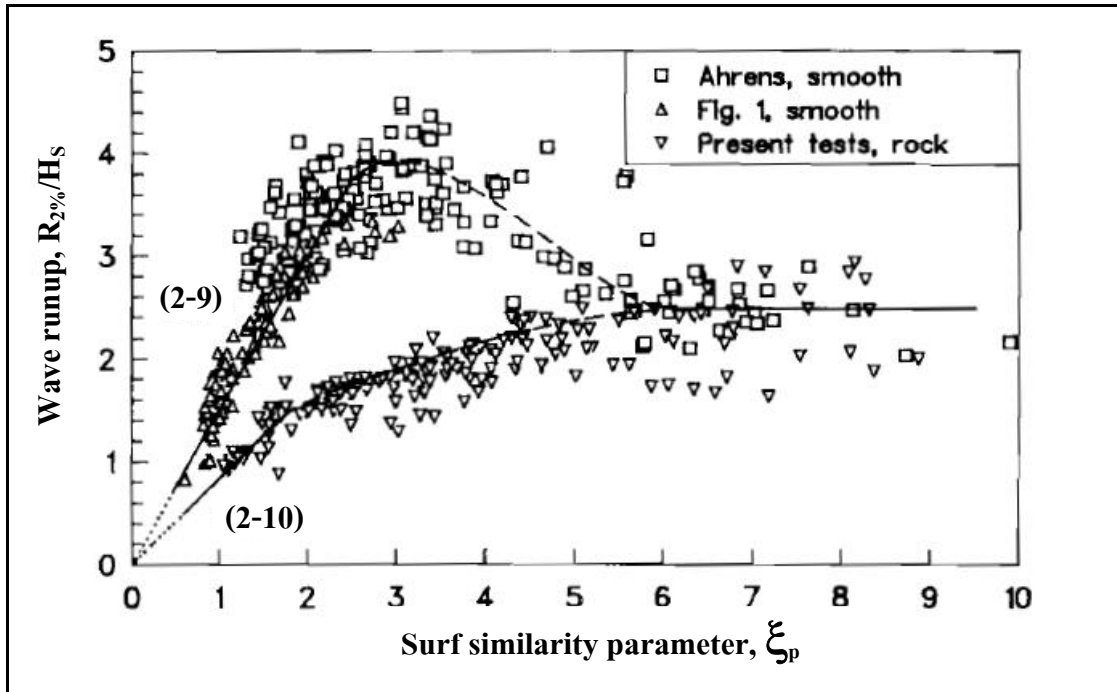
ภาพที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s / H_s และ ξ_0 (Hedges & Mase, 2004)

2.2.2 การทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

นอกเหนือจากที่มีการศึกษาความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ ยังมีผู้ทำการศึกษาและทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบไม่ผิวเรียบ เช่น โครงสร้างแบบหินเรียง แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา แบบกล่องนูนสลับพื้นปลา เป็นต้น

Van der Meer and Stam (1992) ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวหินเรียงที่วางด้วยหินเป็นชั้น ๆ ทั้งหมดสี่ลักษณะการเรียง ดำเนินการทดสอบโดยใช้คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4 และ 1 : 6 รางจำลองคลื่นขนาดความยาว 50 เมตร กว้าง 1.0 เมตร และลึก 1.2 เมตร ความลึกของระดับน้ำเท่ากับ 20, 40 และ 80 เซนติเมตร และใช้ขนาดก้อนหินร้อนผ่านตะแกรง 85% และ 15% โดยมวล รวมทั้งสิ้น 230 กรณี นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลการทดลองบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบของ (Ahrens (1981); Fuhrboter, Sparboom, & Witte (1989); Van Oorschot & d' Angremond (1968)) ซึ่งทดสอบในรางจำลองคลื่นขนาดใหญ่ที่มีขนาดความยาว 230 เมตร กว้าง 5 เมตร และลึก 7 เมตร ยกเว้นการ

ทดสอบของ Ahrens (1981) ที่มาจากการทดสอบในรางจำลองคลื่นขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลการทดลองแบบผิวหินเรียง ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 เปรียบเทียบความสูงคลื่นซัดบนพื้นเรียบและพื้นหินเรียง (Van der Meer & Stam, 1992)

จากผลการทดลองได้เสนอสมการความสูงคลื่นซัด ดังนี้

กรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.5\xi_p \quad (2-9)$$

สำหรับ $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{3}$ และ $0.5 < \xi_p < 2.0$

กรณีโครงสร้างพื้นเอียงแบบหินเรียง

$$\frac{R_{2\%}}{H_S} = 0.83\xi_p \quad (2-10)$$

สำหรับ $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$ และ $0.5 < \xi_p < 2.0$

$$\frac{R_{char}}{H_S} = a\xi_m \quad (2-11)$$

สำหรับ $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$, $0.004 \leq \frac{H_S}{L_m} \leq 0.063$ และ $\xi_m \leq 1.5$

$$\frac{R_{char}}{H_S} = b\xi_m^c \quad (2-12)$$

สำหรับ $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$, $0.004 \leq \frac{H_S}{L_m} \leq 0.063$ และ $\xi_m > 1.5$

$$\frac{R_{char}}{H_S} = d' \quad (2-13)$$

สำหรับ $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}$, $0.004 \leq \frac{H_S}{L_m} \leq 0.063$

โดยที่

$a, b, c, R_{char}, R_{2\%}, H_S$ และ T_p ดังอธิบายข้างต้น

d' คือ ค่าสูงสุด

T_m คือ คาบคลื่นเฉลี่ย

L_m คือ ความยาวคลื่นเฉลี่ย คำนวณได้จาก $L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi}$

ξ_m คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้ H_S และ T_m

ξ_p คือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น คำนวณโดยใช้ H_s และ T_p

นอกจากนี้ยังแนะนำค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์สำหรับใช้พยากรณ์ความสูงคลื่นซัดแต่ละรูปแบบ ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ (Van der Meer & Stam, 1992)

R_{char}	a	b	c	d'
$R_{0.13\%}$	1.12	1.34	0.55	2.58
$R_{1\%}$	1.01	1.24	0.48	2.15
$R_{2\%}$	0.96	1.17	0.46	1.97
$R_{5\%}$	0.86	1.05	0.44	1.68
$R_{10\%}$	0.77	0.94	0.42	1.45
R_s	0.72	0.88	0.41	1.35
\bar{R}	0.47	0.60	0.34	0.82

Technical Advisory Committee on Flood Defence (TAW, 2002) ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบผิวไม่เรียบ ซึ่งเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ เช่น พื้นคอนกรีต (Concrete) ยางมะตอย (Asphalt) ชั้นหิน (Armour rock) เป็นต้น ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 1 ถึง 1 : 8 และสร้างคลื่นแบบสมำเสมอ โดยมีการพิจารณาความขรุขระ (Roughness) คันดิน (Berm) และมุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง (The angle of incidence of wave attack) เข้ามาเกี่ยวข้อง พร้อมเสนอสมการความสูงคลื่นซัดดังสมการที่ 2-14 และแนะนำค่าแฟคเตอร์ความขรุขระซึ่งแบ่งตามกลุ่มลักษณะของวัสดุพื้นผิวโครงสร้าง ดังตารางที่ 2-4

$$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\alpha \cdot \xi_0 \quad (2-14)$$

สำหรับ $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$ และ $\xi_0 < 1.8$

โดยที่

$R_{2\%}$, H_s และ ξ_0 ดังอธิบายข้างต้น

γ_b , γ_f และ γ_α คือ แฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคันดิน ความขรุขระของผิวโครงสร้าง และ มุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง ตามลำดับ

ตารางที่ 2-4 ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง (TAW, 2002)

ผิวโครงสร้าง	γ_f
คอนกรีต (Concrete)	1.00
ยางมะตอย (Asphalt)	1.00
คอนกรีตบล็อก (Closed concrete block)	1.00
หญ้า (Grass)	1.00
หินภูเขาไฟ (Basalt)	0.90
บล็อกขนาดเล็ก 1/25 ของผิวหน้า (Small block over 1/25 of surface)	0.85
บล็อกขนาดเล็ก 1/9 ของผิวหน้า (Small block over 1/9 of surface)	0.80
หินสองชั้น (Armour rock – two layers thick)	0.55
หินชั้นเดียว (Armour rock – single layer)	0.70

Shankar and Jayaratne (2003) ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้าม (Wave overtopping) ในรางจำลองคลื่น เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของคลื่น ได้แก่ ความสูงคลื่น คาบคลื่น ความชันคลื่น และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) โดยอิทธิพลของคุณลักษณะพื้นเอียง ได้แก่ ความขรุขระ ความหนา และความพรุนที่มีผลต่อความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้ามที่ความลาดชัน 1 : 2 ทั้งในกรณีน้ำซึมผ่านได้และน้ำซึมผ่านไม่ได้ รวมทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและผิวขรุขระ และยังทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับคลื่นไหลล้นข้าม สำหรับการทดสอบความสูงคลื่นซัดจะใช้มาตรวัดคลื่นและบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์และมีการ

บันทึกภาพเคลื่อนไหวไว้ด้วย โดยใช้พื้นเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ พื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านได้ ส่วนการทดสอบหาคลิ้นไหลล้นข้ามจะใช้พื้นเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้และพื้นขรุขระน้ำซึมผ่านได้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบมีความน่าเชื่อถือที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ (Shore Protection Manual (SPM, 1984); Automated Coastal Engineering System (ACES, 1992)) และผลการทดสอบจากคนอื่น ๆ นอกจากนั้นพบว่าความชันคลิ้นเป็นพารามิเตอร์ที่ดีในการอธิบายผลกระทบรวมของความสูงคลิ้น และคาบคลิ้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลิ้นชัดกับคลิ้นไหลล้นข้ามนั้นจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential function) ส่วนแฟคเตอร์ความขรุขระ (γ_f) อยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 1 และความพรุนนั้นพบว่าไม่มีนัยสำคัญ

Neelamani and Sandhya (2004) ดำเนินการทดลองความสูงคลิ้นชัดบนโครงสร้างทั้งพื้นเอียงผิวเรียบ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยที่พื้นเอียงผิวขรุขระมีสองรูปแบบ คือ แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา และแบบกล่องนูนสลับพื้นปลา ดังภาพที่ 2-5 ทดสอบในรางจำลองคลิ้นขนาดความยาว 30 เมตร กว้าง 2 เมตร และลึก 1.7 เมตร ระดับน้ำลึก 0.7 เมตร สร้างคลิ้นแบบสม่ำเสมอ และทดสอบพื้นเอียงที่มุม 30, 40, 50, 60 และ 90 องศา จากผลการทดสอบพบว่า พื้นเอียงแบบกล่องนูนสลับพื้นปลาสามารถสลายพลังงานคลิ้นได้ดีที่สุด โดยสามารถสลายพลังงานของคลิ้นได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับพื้นเอียงผิวเรียบ พร้อมเสนอสมการความสูงคลิ้นชัดสำหรับพื้นเอียงทั้งสามรูปแบบ ดังนี้

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

$$\frac{R}{H} = \frac{\xi}{2.9 + 0.23\xi} \quad (2-15)$$

สำหรับ $1.74 < \xi < 5.50$ และ C.C. = 0.87

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา

$$\frac{R}{H} = 0.37\xi^{0.81} \quad (2-16)$$

สำหรับ $1.80 < \zeta < 5.50$ และ C.C. = .82

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องนูนสลับฟันปลา

$$\frac{R}{H} = 0.37\zeta^{0.58} \quad (2-17)$$

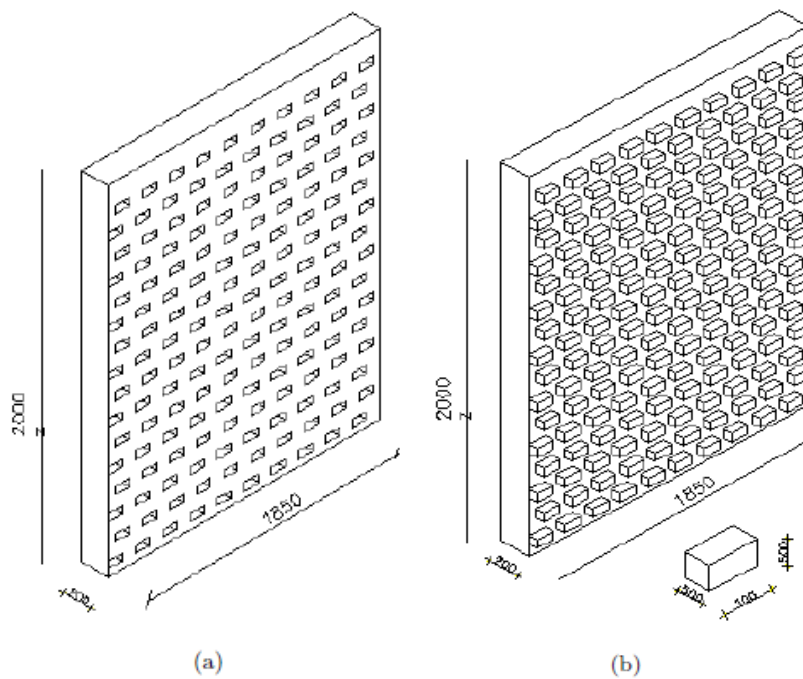
สำหรับ $1.74 < \zeta < 5.50$ และ C.C. = .86

โดยที่

$\frac{R}{H}$ และ ζ ดังอธิบายข้างต้น

C.C. คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) ระหว่างความสูงคลื่นซัด

สัมพันธ์ ($\frac{R}{H}$) ที่ได้จากการทดลองและได้จากสมการ



ภาพที่ 2-5 พื้นเอียงผิวขรุขระ (a) Dentated (b) Serrated (Neelamani & Sandhya, 2004)

Janaka (2008) ดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ความสูงคลื่นซัดและคลื่นไหลล้นข้าม โดยใช้รางจำลองคลื่นขนาดความยาว 40 เมตร กว้าง 2 เมตร และลึก 2.13 เมตร ความลาดชันโครงสร้างพื้นเอียงเท่ากับ 23.3 องศา ใช้พื้นเอียงผิวเรียบและผิว ขรุขระ ดำเนินการทดลองคล้ายการศึกษาของ Van der Meer and Stam (1992) โดยพื้นเอียงผิว ขรุขระนั้นจะแบ่งเป็นสองชั้น ชั้นล่างถูกวางด้วยหินขนาดเฉลี่ย 38 มิลลิเมตร น้ำหนัก 0.12 ถึง 0.18 กิโลกรัม และชั้นบนถูกวางด้วยหินที่มีขนาดเฉลี่ย 95 มิลลิเมตร น้ำหนัก 1.8 ถึง 2.0 กิโลกรัม หิน ทั้งหมดวางอยู่บนแผ่นไม้อัดซึ่งมีแผ่นเหล็กรองรับ คลื่นที่ใช้แบบสมำเสมอ วัดคลื่นโดยมาตรวัดคลื่น แบบวัดการเก็บประจุ (Capacitance wave gauge) ส่วนการวัดคลื่นไหลล้นข้ามดำเนินการโดยการ ใช้ถังสี่เหลี่ยมรองรับน้ำที่ไหลล้นข้ามแบบจำลองเพื่อนำมาหาปริมาตร จากผลการทดลองให้ผลที่ สอดคล้องกับการทดลองของ (Ahrens (1981); Van der Meer (1996)) ซึ่งเป็นคลื่นไม่สมำเสมอ ส่วนคลื่นไหลล้นข้ามเฉลี่ยบนพื้นเอียงผิวเรียบก็ให้ผลสอดคล้องที่ดีกับสมการที่นำเสนอของ (Owen (1980); Van der Meer (1996)) และคลื่นไหลล้นข้ามเฉลี่ยบนพื้นเอียงผิวขรุขระก็ให้ผลสอดคล้องที่ ดีกับการทดลองของ Van der Meer (1996) เช่นกัน

ธรรมนูญ รัชมีมาสเมือง (2554) ทำการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้น เอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระให้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ในสมการเดียว โดยใช้ข้อมูลการ ทดลองของ ธรรมนูญ รัชมีมาสเมือง, เอกพล คำชมภู และภาณุ แสงเพชร (2553) ซึ่งได้ทดลองความ สูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเรียบและโครงสร้างพื้นเอียงผิวขรุขระแบบหินเรียงน้ำซึมผ่านไม่ได้ ในราง จำลองคลื่นขนาดความยาว 16 เมตร กว้าง 60 เซนติเมตร และลึก 80 เซนติเมตร ความลาดชันของ โครงสร้างพื้นเอียงเท่ากับ 10.0, 12.5, 15.0, 17.5 และ 20.0 องศา สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบจะใช้ แผ่นเหล็กความยาว 255 เซนติเมตร และสำหรับพื้นเอียงผิวขรุขระ ผิวของพื้นเอียงถูกเรียงด้วยหินที่มี ขนาดเฉลี่ยหรือเรียกว่าความสูงขรุขระ (d) เท่ากับ 9.53, 15.88 และ 22.23 มิลลิเมตร ระดับความ ลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 25, 30 และ 35 เซนติเมตร สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ และความ ลึก 35 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่น แบบสมำเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.67, 0.83, 1.00 และ 1.17 เฮิรตซ์ ความสูงคลื่นที่ถูกสร้าง ขึ้นบริเวณน้ำลึกและความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ รวมทั้งสิ้น 280 กรณี ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัด

สัมพัทธ์ (R/H_0) และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) เพื่อสร้างสมการความสูงคลื่นระดับนอร์มัลไลซ์ของโครงสร้างลาดเอียงผิวเรียบ โดยมีค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์การณที่คำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) คล้ายรูปแบบสมการที่ 2-7 ของ Mase (1989) ซึ่งทำให้ได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ ดังสมการที่ 2-18 สำหรับสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวขรุขระจะคำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) ของผิวโครงสร้างพื้นเอียงเข้ามาโดยตรง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 2-19 และสุดท้ายได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวขรุขระซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นเอียงผิวเรียบเพียงแค่ระบุค่าความสูงขรุขระ (d) ดังสมการที่ 2-20

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

$$\frac{R}{H_0} = 1.11\xi^{0.60} \quad (2-18)$$

สำหรับ $10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.136$ และ $0.6 < \xi < 5.0$

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ

$$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \left[1 - c \left(\frac{d}{H_0} \right)^{d''} \right] \quad (2-19)$$

$$\frac{R}{H_0} = 1.11\xi^{0.60} \left[1 - 0.53 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.12} \right] \quad (2-20)$$

สำหรับ $10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$ และ $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$

โดยที่

a , b , c และ $\frac{R}{H_0}$ ดังอธิบายข้างต้น

d'' คือ พารามิเตอร์เชิงประจักษ์การณที่ได้จากการทดลอง

$\frac{d}{H_0}$ คือ ความสูงขรุขระสัมพัทธ์

2.3 การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม

การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนามมีการดำเนินการอยู่พอสมควร เช่น ตามชายหาดธรรมชาติ บริเวณที่มีกำแพงกันคลื่น เป็นต้น โดยทั่วไปมักใช้กล้องวิดีโอบันทึกภาพเคลื่อนไหวของความสูงคลื่นซัดบนชายหาดหรือโครงสร้างทางชายฝั่งทะเลแล้วทำการตอกหมุดหรือกำหนดสเกลความสูงคลื่นซัดให้เป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2-6 และใช้เครื่องวัดความลาดเอียง (Inclinometer) ของชายหาด การคำนวณหาความสูงคลื่นซัด (R) จะต้องทราบถึงระยะที่คลื่นซัดตามแนวหาด (Length of runup: RL) และมุมองศาของชายฝั่ง (θ) ซึ่งคำนวณ ดังสมการที่ 2-21

$$R = RL \sin \theta \quad (2-21)$$

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การเก็บข้อมูลเป็นสิ่งที่วัดได้ยากในภาคสนาม เช่น ความสูงคลื่น คาบคลื่น ขนาดของเม็ดทราย เป็นต้น จำเป็นต้องมีเครื่องมือเฉพาะทาง นอกจากนี้สมการส่วนใหญ่เป็นสมการที่ได้มาจากการดำเนินการตามชายหาดธรรมชาติ และไม่มีการยืนยันว่าสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างได้หรือไม่



ภาพที่ 2-6 การวัดความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม (Swenson, n.d.)

Holman (1986) ดำเนินการศึกษาค้นคว้าความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายหาดธรรมชาติ (Duck, North Carolina) ซึ่งเป็นมหาสมุทรเปิดและมีคลื่นซัดรุนแรง เขาทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวบริเวณเขตคลื่นซัดฝั่ง เป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ ซึ่งข้อมูลภาพเคลื่อนไหวถูกรวบรวมแล้ว แปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบสเปกตรัม มีข้อมูลความสูงคลื่นซัดทั้งหมด 149 ชุด ข้อมูล ซึ่งมีความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 4.0 เมตร และคาบคลื่น 6 ถึง 16 วินาที ข้อมูลถูกวัดด้วยทุ่นลึก 20 เมตร และวัดด้วย Baylor gage บริเวณท้ายท่าเรือมีความลึก 8 เมตร จากการทดสอบเขาได้นำเสนอสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 2-22

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 0.83\xi + 0.20 \quad (2-22)$$

สำหรับ $\frac{1}{15} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$

โดยที่

$R_{2\%}$, H_0 และ ξ ดังอธิบายข้างต้น

Nielsen and Hanslow (1991) ศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายหาดธรรมชาติทั้งหมดหกชายหาด ของ New South Wales มีความลาดชันของหาด 1 : 5 ถึง 1 : 30 ข้อมูลความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 0.53 ถึง 3.76 เมตร และคาบคลื่น 6.4 ถึง 11.5 วินาที โดยวัดจากทุ่นที่อยู่ห่างออกไป 30 กิโลเมตร ที่ความลึก 80 เมตร ในแต่ละหาดมีขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยที่แตกต่างกันซึ่งวัดจากเขตคลื่นซัด มีขนาดเท่ากับ 0.18, 0.40, 0.50, 0.80, 0.21 และ 0.22 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลพวกเขาได้เสนอสมการเชิงเส้นสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดแต่ละรูปแบบ ดังสมการที่ 2-23 ถึง สมการที่ 2-30

$$R_{rms} = L' \quad (2-23)$$

$$R_s = 1.42L' \quad (2-24)$$

$$R_{50\%} = 0.83L' \quad (2-25)$$

$$\bar{R} = 0.89L' \quad (2-26)$$

$$R_{20\%} = 1.98L' \quad (2-27)$$

$$R_{1\%} = 2.15L' \quad (2-28)$$

เมื่อ

$$L' = 0.6(H_{orms} L_0)^{0.5} \tan \theta \quad (2-29)$$

สำหรับ $\tan \theta \geq \frac{1}{10}$

$$L' = 0.05(H_{orms} L_0)^{0.5} \tan \theta \quad (2-30)$$

สำหรับ $\tan \theta \leq \frac{1}{10}$

โดยที่

$R_S, \bar{R}, R_{2\%}, L_0$ และ $\tan \theta$ ดังอธิบายข้างต้น

R_{rms} คือ ความสูงคลื่นชนิดแบบ Root mean square

$R_{50\%}$ คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นชนิดจำนวน 50% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า (50%

Excess runup height)

$R_{1\%}$ คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นชนิดจำนวน 1% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า

(1% Excess runup height)

H_{orms} คือ ความสูงคลื่นน้ำลึกแบบ Root mean square

L' คือ ความยาวคลื่นที่คำนวณมาจาก H_{orms} และ L_0

Ahrens and Seelig (1996) ศึกษาโดยใช้ข้อมูลของ (Douglass (1990); van Hijum & Pilarczyk (1982); Holman (1986); Nielsen & Hanslow (1991); Ward & Ahrens (1992)) ซึ่งดำเนินการศึกษาความสูงคลื่นชนิดบนหาดทรายและหาดกรวด ผลจากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชนิดขึ้นมาใหม่ โดยมีการพิจารณาเกี่ยวกับความขรุขระของชายหาด นั่นคือ ขนาดของเม็ดทรายและกรวดบริเวณเขตคลื่นแตกตัว และบริเวณเขตคลื่นชนิดฝั่ง ซึ่งเสนอสมการ ดังสมการที่ 2-31 และสมการที่ 2-32

$$\frac{R_{2\%}}{H_S} = \frac{4.1}{N_0} \sqrt{\frac{d_{sw}}{d_{sr}}} \quad (2-31)$$

เมื่อ

$$N_0 = \frac{H_S}{w_{sr} T}, w_{sr} = 14.5(d_{sr})^{1.1} \quad (2-32)$$

โดยที่

$R_{2\%}, H_S$ และ T ดังอธิบายข้างต้น

N_0 คือ พารามิเตอร์เกี่ยวกับความเร็วในการตกตะกอน หรือเรียกว่า “Dean number”

w_{sr} คือ ความเร็วการตกตะกอนในเขตคลื่นแตกตัว

d_{sw} คือ ขนาดอนุภาคตะกอนในเขตคลื่นซัดฝั่ง

d_{sr} คือ ขนาดอนุภาคตะกอนในเขตคลื่นแตกตัว

Ruggiero, Komar, McDougal, Marra, and Beach (2001) ศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายฝั่งทะเลออริกอน (Oregon) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นชายฝั่งที่มีคลื่นซัดรุนแรงจากพายุ ดำเนินการวัดความสูงคลื่นซัดจากการบันทึกภาพเคลื่อนไหว และใช้ข้อมูลความสูงคลื่นและคาบคลื่นจากทุ่นวัดที่อยู่ในทะเลลึก 64 เมตร โดยมีขอบเขตความสูงคลื่นน้ำลึกอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 4.6 คาบคลื่น 7 ถึง 17 วินาที และความลาดชันของหาด 0.005 ถึง 0.047 จากการวิเคราะห์ผลพวกเขา นำเสนอสมการเส้นตรงสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัด ดังสมการที่ 2-33

$$R_{2\%} = 0.27 \tan \theta (H_0 L_0)^{0.5} \quad (2-33)$$

โดยที่

$R_{2\%}$, H_0 , L_0 และ $\tan \theta$ ดังอธิบายข้างต้น

Na, Do, and Suh (2011) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพยากรณ์ขนาดความสูงคลื่นซัดโดยใช้ข้อมูลจากการพยากรณ์ร่วมด้วย เช่น ข้อมูลคลื่นพยากรณ์ ข้อมูลลมพยากรณ์ เป็นต้น โดยดำเนินการศึกษาในภาคสนาม ณ ชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของประเทศเกาหลีใต้ คณะผู้วิจัยวัดข้อมูลความสูงคลื่นซัดจากเขื่อนกันคลื่นทั้งหมดสี่แห่ง โดยการใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพเคลื่อนไหวในขณะที่คลื่นซัดเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นวันละ 2 ครั้ง ความสูงคลื่นซัดถูกจำแนกเป็นสเกลจาก 1 ถึง 9 แทนการบอกค่าความสูงคลื่นซัดเป็นตัวเลขในหน่วยความยาว มีลักษณะคล้ายกับสเกลโบฟอร์ต (Beaufort wind scale) ดำเนินการศึกษาทั้งหมด 9 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน ค.ศ. 2008 โดยข้อมูล 6 เดือนแรกสำหรับการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression equation) ที่มีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของลมและคลื่นในทะเล เช่น ขนาดลม ทิศทางลม ความสูงคลื่น เป็นต้น มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2-34

$$RS = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (2-34)$$

โดยที่

RS หรือ Y คือ ตัวแปรตาม สำหรับการศึกษานี้ คือ สเกลความสูงคลื่นซัด

x_1, x_2, \dots, x_k หรือ X_1, X_2, \dots, X_k คือ ตัวแปรอิสระ สำหรับการศึกษานี้ เช่น ความสูงคลื่น ทิศทางลม ทิศทางคลื่น เป็นต้น

β_0 คือ ส่วนตัดแกน Y เมื่อ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial regression coefficient)

สำหรับข้อมูล 3 เดือนหลังถูกนำมาสอบทานและนำมาเปรียบเทียบกับค่าขนาดคลื่นซัดที่ได้จากการสังเกต ซึ่งใช้หลักสถิติในการวิเคราะห์ผล จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดความสูงคลื่นซัดที่พยากรณ์กับขนาดความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการสำรวจโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าสเกลความสูงคลื่นซัดมีความคลาดเคลื่อน ± 1 สเกล ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นสมการการพยากรณ์จึงมีความแม่นยำในระดับที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เตือนภัยขนาดความรุนแรงของคลื่นซัดได้อีกด้วย

จากการศึกษาที่อ้างถึงข้างต้นซึ่งมีพอสมควร สามารถสรุปสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ทั้งการศึกษาในห้องปฏิบัติการและการศึกษาในภาคสนาม ดังตารางที่ 2-5 สมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นซัดส่วนใหญ่ยังคงมีพื้นฐานมาจากสมการของ Hunt (1959) และจะเห็นได้ว่าสมการที่มีการพิจารณาความขรุขระเข้ามาเกี่ยวข้องยังมีจำนวนน้อย และเป็นเพียงการแนะนำค่าแฟกเตอร์ความขรุขระ ได้แก่ สมการของ Ahrens and Seelig (1996) ซึ่งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดที่พิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบริเวณเขตคลื่นซัด (d_{sw}) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายเป็นบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (d_{sr}) สมการค่อนข้างซับซ้อนและจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ N_0 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงคลื่น คาบคลื่น และความเร็วตกตะกอนของทรายบริเวณเขตคลื่นแตกตัว อีกหนึ่งการศึกษาที่มีการพิจารณาความขรุขระของพื้นเอียงหรือความขรุขระของหาด คือ การศึกษาของ TAW (2002) โดยในสมการมีแฟกเตอร์เกี่ยวกับความขรุขระของพื้นเอียง แฟกเตอร์เกี่ยวกับคันดิน

และแฟกเตอร์เกี่ยวกับมุมของคลื่น ซึ่งค่าของแฟกเตอร์ความขรุขระจะขึ้นกับลักษณะของวัสดุของพื้นเอียงหรือลาด ส่วนการศึกษาของ Shankar and Jayaratne (2003) ก็มีการแนะนำช่วงของแฟกเตอร์ความขรุขระที่เหมาะสม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ TAW (2002) มีเพียงสมการของ ธรรมบุญ รัศมี มาสเมือง (2554) เท่านั้นที่คำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) โดยตรงและเป็นสมการอย่างง่ายที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระในสมการเดียวทำให้เกิดความสะดวกในการประมาณค่าความสูงคลื่นซัดบนหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง สำหรับสมการที่ได้จากการศึกษาในภาคสนามของ Na et al. (2011) ก็เป็นอีกหนึ่งการศึกษาที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่นำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกว่าสมการรูปแบบดั้งเดิม แต่ก็ยังมีสิ่งที่ควรทำเพิ่มเติม เช่น การคำนึงถึงความลาดชันของโครงสร้างหรือการเพิ่มตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสเกลคลื่นซัด ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล เป็นต้น

ตารางที่ 2-5 สรุปการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียง

ผู้ศึกษา	รูปแบบการศึกษา	ลักษณะพื้นเอียง	ความชัน ($\tan \theta$)	สมการที่ได้รับ
Hunt (1959), Battjes (1974)	Lab, Regular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 10 – 1 : 3	$\frac{R}{H} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} = \xi$ For $0.1 < \xi < 2.3$
Ahrens (1981)	Lab, Irregular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 4 – 1 : 1	$\frac{R_{char}}{H_s} = C_1 + C_2 \frac{H_s}{gT_p^2} + C_3 \left(\frac{H_s}{gT_p^2} \right)^2$ For $\frac{1}{3} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}$ $\frac{R_{char}}{H_s} = a\xi$ For $\tan \theta \leq \frac{1}{4}$
Holman (1986)	Field, Irregular	Sand Beaches	1 : 15 – 1 : 5	$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 0.83\xi + 0.20$ For $\frac{1}{15} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$
Mase (1989)	Lab, Irregular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 30 – 1 : 5	$\frac{R}{H_0} = a\xi^b$ For $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$, $0.007 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.07$

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ผู้ศึกษา	รูปแบบการศึกษา	ลักษณะพื้นเอียง	ความชัน ($\tan \theta$)	สมการที่ได้รับ
Nielsen and Hanslow (1991)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 5	$R = C \cdot L'$ $\tan \theta \geq \frac{1}{10}, L' = 0.6(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$ $\tan \theta < \frac{1}{10}, L' = 0.05(H_0 L_0)^{0.5} \tan \theta$
Van der Meer and Stam (1992)	Lab, Irregular Wave	Rough, Impermeable	1 : 6 – 1 : 1.5	$\frac{R_{char}}{H_s} = a \xi_m$ $\text{For } \frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m \leq 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = b \xi_m^{z_c}$ $\text{For } \frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m > 1.5$ $\frac{R_{Char}}{H_s} = d'$ $\text{For } d' = \text{Maximum}$
Ahrens and Seelig (1996)	Lab and Field, Irregular Wave	Sand and Gravel Beaches	–	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = \frac{4.1}{N_0} \sqrt{\frac{d_{sw}}{d_{sr}}}$ $N_0 = \frac{H_s}{w_{sr} T}, w_{sr} = 14.5(d_{sr})^{1.1}$
Ruggiero et al. (2001)	Field, Irregular Wave	Sand Beaches	1 : 30 – 1 : 20	$R_{2\%} = 0.27 \tan \theta (H_0 L_0)^{0.5}$
TAW (2002)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	1 : 8 – 1 : 1	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_a \cdot \xi_0$ $\text{For } \frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}, \xi_0 < 1.8$

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ผู้ศึกษา	รูปแบบ การศึกษา	ลักษณะ พื้นเอียง	ความชัน ($\tan \theta$)	สมการที่ได้รับ
Hedges & Mase (2004)	Lab, Irregular Wave	Smooth, Impermeable	1 : 30 – 1 : 5	$\frac{R_{char}}{H_s} = \frac{S_{char}}{H_s} + c \cdot \xi_0$ For $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$, $0.13 < \xi_0 \leq 2.2$
Neelamani & Sandhya (2004)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	$\geq 1 : 1.7$	Smooth: $\frac{R}{H} = \frac{\xi}{2.9 + 0.23\xi}$ For $1.74 < \xi < 5.5$ Rough: $\frac{R}{H} = a\xi^b$ For $1.8 < \xi < 5.5$
ธรรมนุญ รัศมีมาส เมือง และ คณะ (2553)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	1 : 5.6 – 1 : 2.7	$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \left(\frac{d}{H_0} \right)^c$ For $\frac{1}{5.6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{2.7}$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$, $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$
ธรรมนุญ รัศมีมาส เมือง(2554)	Lab, Regular Wave	Smooth and Rough, Impermeable	1 : 5.6 – 1 : 2.7	$\frac{R}{H_0} = a\xi^b \left[1 - c \left(\frac{d}{H_0} \right)^{d'} \right]$ For $\frac{1}{5.6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{2.7}$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$, $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ผู้ศึกษา	รูปแบบ การศึกษา	ลักษณะ พื้นเอียง	ความชัน ($\tan \theta$)	สมการที่ได้รับ
Na et al. (2011)	Field, Irregular Wave	Breakwater	-	$RS = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

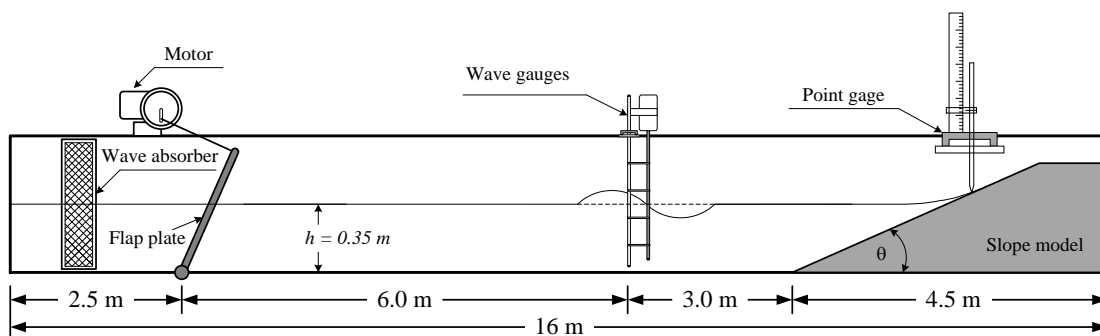
บทนี้อธิบายถึงวิธีศึกษาอย่างละเอียด ซึ่งโครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทดสอบคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีตขนาดต่างๆ ด้วยการจัดเรียงแบบต่างๆ แล้วนำข้อมูลการทดลองไปวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชด พร้อมเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีตที่คำนึงถึงลักษณะการจัดเรียง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 รายละเอียดการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต โดยนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นชดอย่างง่ายด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยสมการพิจารณาทั้งความสูงขรุขระของวัสดุผิวและลักษณะการจัดเรียงด้วยในสมการด้วย

การทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีตได้ดำเนินการในรางจำลองคลื่นที่มีความยาว 16 เมตร และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสมม่าเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความเร็วรอบของใบพัด 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที หรือคิดเป็นความถี่ 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร มุมที่ใช้ทำการทดลอง คือ 15, 17.5, 20, 22.5 และ 25 องศา ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นและด้านหลังโครงสร้างจำลองพื้นเอียงมีการติดตั้งตัวสลายคลื่น (Wave absorber) เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ความสูงของคลื่น (H) และความสูงคลื่นชด (R) บนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทาน (Resistance wave gauge) ในขณะที่ความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองเป็นแบบน้ำซึมผ่านไม่ได้ ลักษณะการจัดเรียงลูกบาศก์คอนกรีตมี 4 ลักษณะ คือ จัดเรียง

แบบเรียบ, จัดเรียงแบบมีรูปแบบบันได และจัดเรียงแบบสุ่มลักษณะและตำแหน่งของการติดตั้ง อุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3-1 และสภาพการทดลองทั้งหมดถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 3-1 สรุปสภาพการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความลาดชันของพื้นเอียง, θ (องศา)	15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0
ความลึกของน้ำ, h (ซม.)	35
ระยะคันชักข้อเหวี่ยง (มม.)	100, 120, 140, 160, 180, 200
ความเร็วรอบของใบพัดน้ำ (รอบ/นาที)	60, 70, 80, 90, 100
ความถี่ในการสร้างคลื่น, f (เฮิรตซ์)	0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.49, 1.67
คาบของคลื่น, T (วินาที)	1.20, 1.00, 0.86, 0.75, 0.67, 0.60
ขนาดของลูกบาศก์คอนกรีต (ซม.)	3, 4, 5
รูปแบบการจัดเรียง	3 รูปแบบ คือ แบบเรียบ แบบขั้นบันได และแบบสุ่ม
จำนวนการทดสอบ (กรณี)	1,350

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

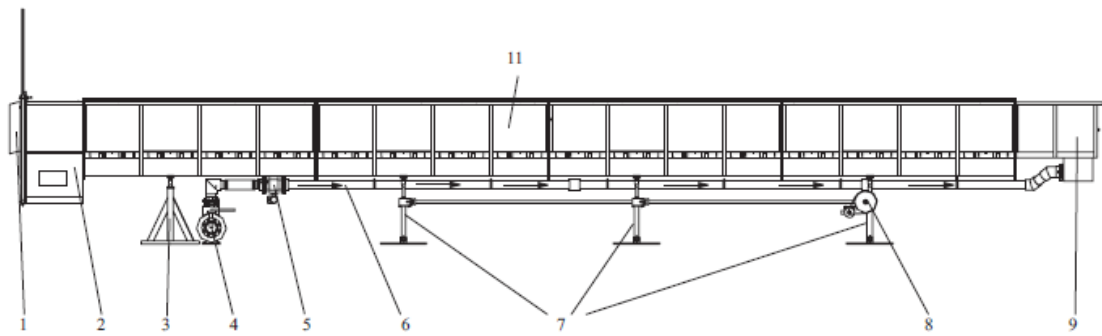
3.2.1 รางจำลองคลื่น

รางจำลองคลื่น คือ เครื่องมือการทดลองทางชลศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นรางจำลองคลื่น และรางทดลองการไหลได้ เครื่องมือมีลักษณะเป็นรางน้ำขนาดใหญ่ มีความยาวช่วงทดสอบ 16 เมตร หน้าตัดช่วงทดสอบกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร มีถังเก็บน้ำอยู่ข้างล่าง มีเครื่องสูบน้ำสำหรับสร้างการไหลผ่านรางและวนกลับมาที่ถังเก็บน้ำเพื่อสูบลูกกลับไปที่รางวนเป็นวงจร รางทดลองการไหลนี้สามารถสร้างอัตราการไหลสูงได้ถึง ประมาณ 330 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 5,500 ลิตรต่อวินาที ทำให้เกิดความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดสูงสุดถึง 0.2 เมตรต่อวินาที ตัวรางสามารถปรับความลาดเอียงได้

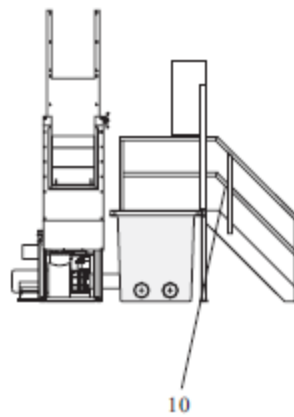
ในกรณีการใช้รางเป็นรางจำลองคลื่นนั้น ตัวรางจะต้องถูกทำให้เป็นระบบปิดโดยการปิดกั้นด้านท้ายน้ำ สูบน้ำเข้าไปในรางจนได้ปริมาณที่ต้องการ ติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่น (สำหรับรายละเอียดของเครื่องกำเนิดคลื่นถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป) และทำการสร้างคลื่นตามรูปแบบการศึกษาที่สนใจ เช่น การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่พัดเข้าสู่ชายหาด หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านโครงสร้างต่าง ๆ เช่น กำแพงกันคลื่น เขื่อนกันคลื่น เป็นต้น โดยลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่นแสดงดังตารางที่ 3-2 และส่วนประกอบของรางจำลองคลื่นแสดงดังภาพที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่น

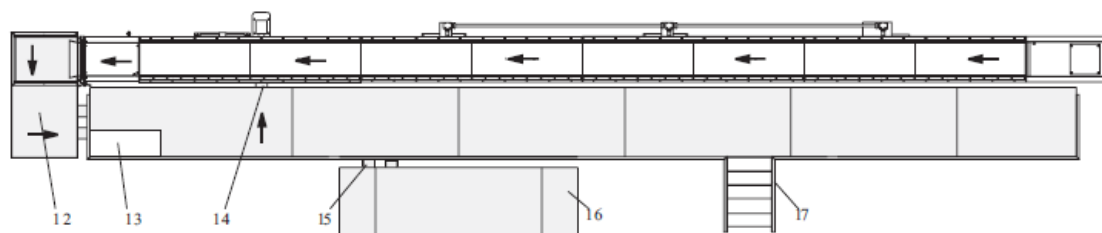
ความยาวทั้งหมดของเครื่อง (ม.)	21.0
ความยาวของช่วงทดสอบ (ม.)	16.0
ความสูงของเครื่อง (ม.)	2.1
ความกว้างของหน้าตัดทดสอบ (ม.)	0.6
ความลึกของหน้าตัดทดสอบ (ม.)	0.8
น้ำหนักของเครื่องเปล่า (ตัน)	4.0
น้ำหนักของเครื่องรวมกับน้ำ (ตัน)	14.0
ความจุของถังรวบรวมน้ำ (ลบ.ม.)	2.3
ความจุของถังกักเก็บน้ำ (ลบ.ม.)	4.3



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น (GUNT, 2001a)

ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น

หมายเลข 1: ช่องทางน้ำไหลออก (Channel outlet)

หมายเลข 2: บ่อดักตะกอน (Sediment trap)

หมายเลข 3: ฐานรองรับ (Fixed bearing)

หมายเลข 4: เครื่องสูบน้ำ (Pump unit)

หมายเลข 5: มาตรวัดอัตราการไหล (Flow meter)

หมายเลข 6: ท่อส่งน้ำ (Delivery line)

หมายเลข 7: ตัวปรับความลาดเอียง (Inclination adjustment)

หมายเลข 8: มอเตอร์สำหรับปรับความลาดเอียง (Motor drive inclination adjustment)

หมายเลข 9: ช่องทางน้ำเข้า (Inlet element)

หมายเลข 10: ราวกันตก (Railing)

หมายเลข 11: ส่วนทดสอบ (Measuring section)

หมายเลข 12: ถังรวบรวมน้ำ (Collecting tank)

หมายเลข 13: ตู้แผงวงจร (Switch box)

หมายเลข 14: แนวท่อดูดน้ำ (Pump suction line)

หมายเลข 15: ท่อเชื่อมระหว่างถังเก็บน้ำ (Pipe connection)

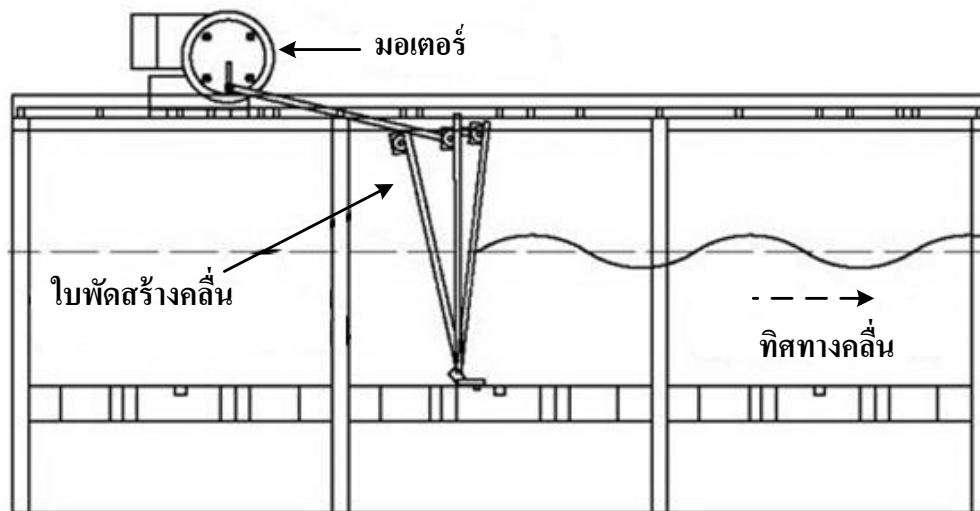
หมายเลข 16: ถังกักเก็บน้ำ (Return tank)

หมายเลข 17: บันไดทางขึ้น (Gallery stairway)

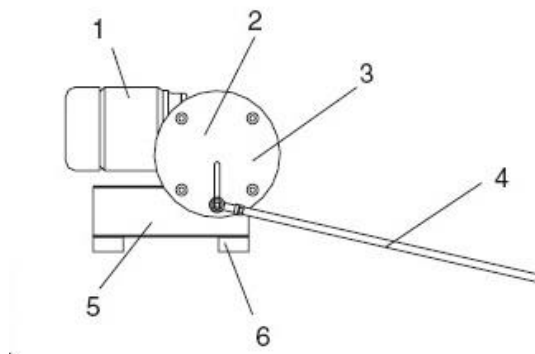
เครื่องกำเนิดคลื่นถูกใช้เพื่อการสร้างคลื่นในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้ร่วมกับรางจำลองคลื่น อุปกรณ์นี้ยังช่วยในเรื่องของการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นบนพื้นที่ชายฝั่ง มอเตอร์ของอุปกรณ์นี้มีความเร็วในการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 114 รอบต่อนาที ซึ่งจะเท่ากับความเร็วของคลื่นที่ 0 ถึง 1.9 เฮิร์ตซ์ ความสูงของคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะคันชักข้อเหวี่ยงซึ่งสามารถปรับได้ตั้งแต่ 40 ถึง 200 มิลลิเมตร

เครื่องกำเนิดคลื่นมีสลักเกลียวเพื่อนำไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบทางน้ำไหล คันชักเชื่อมต่อกับจุดยึดของใบพัดที่ทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Paddle and blocking plate) แสดงดังภาพที่ 3-3 เครื่องกำเนิดคลื่นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ โดยที่ลำดับของความเร็วในการหมุนมีหลากหลายขึ้นอยู่กับ

กับความถี่ของเครื่องมีการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์วัดระดับความดันไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยงแสดงดังภาพที่ 3-4 และส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น คลื่นแสดงดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-3 เครื่องกำเนิดคลื่น (GUNT, 2001b)



ภาพที่ 3-4 ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยง (GUNT, 2001b)

ส่วนประกอบของมอเตอร์

หมายเลข 1: มอเตอร์ (Worm gear motor)

หมายเลข 2: ตัวปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง (Stroke adjustment)

หมายเลข 3: จานข้อเหวี่ยง (Crank disk)

หมายเลข 4: คันชัก (Push rod)

หมายเลข 5: หมอนรองมอเตอร์ (Motor support)

หมายเลข 6: คานยึดหมอนรองมอเตอร์ (Cross bar)

ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น

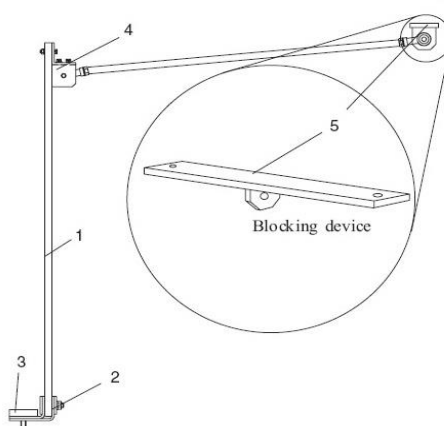
หมายเลข 1: ใบพัดสร้างคลื่น (Paddle and blocking plate)

หมายเลข 2: แผ่นประกบยางสำหรับยึดใบพัดกับพื้นราง (Flexible rubber bearing for connecting the plate to the channel bed)

หมายเลข 3: อุปกรณ์สำหรับยึดแผ่นประกบยางกับพื้นราง (Cramping device for fixing the rubber bearing to the channel bed)

หมายเลข 4: ตัวยึดคันชักกับใบพัด (Holder for connecting the pushing rod to the paddle and blocking plate)

หมายเลข 5: อุปกรณ์สำหรับยึดใบพัดให้กลายเป็นแผ่นกั้นน้ำ (Device for blocking the plate)



ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น (GUNT, 2001c)

3.2.2 กล้องดิจิทัลบันทึกข้อมูล

กล้องดิจิทัลยี่ห้อ OLYMPUS mju tough 3000 ดังรูปที่ 3.5 มีความละเอียด ความละเอียด 12 ล้านพิกเซล ใช้ในการบันทึกข้อมูลคลื่นในแนวด้านข้างและ ในรางจำลองคลื่นเพื่อบันทึก ลักษณะของคลื่นที่เข้ามากระทบกับโครงสร้างพื้นเอียง



ภาพที่ 3-6 กล้องดิจิทัลบันทึกข้อมูล

3.2.3 เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้

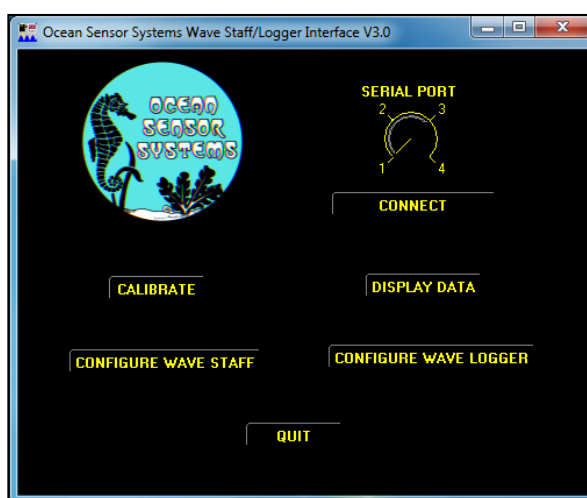
เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point Gauge) ติดตั้งบนรางเหล็ก เพื่อทำการวัดความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียง ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3-7 เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point Gauge)

3.2.4 เครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทาน

เครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทาน (Resistance wave gauge) ควบคุมโดยซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า Ocean Sensor System Wave Staff/Logger Interface Version 3.0 ดังรูปที่ 3.9 เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยพอร์ต USB ผลิตโดยบริษัท Ocean Sensor System ใช้วัดความสูงคลื่นก่อนเข้ากระทบกับโครงสร้างพื้น



ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดคลื่นแบบแรงต้านทาน

3.3 โครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต

โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบถูกนำไปใช้พื้นฐานรองลูกบาศก์คอนกรีต ทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) น้ำซึมผ่านไม่ได้ มีความยาว 255 เซนติเมตร กว้างเท่ากับความกว้างของรางจำลองคลื่น บริเวณฐานพื้นเอียงยึดติดด้วยสลักเกลียว และบริเวณหัวพื้นเอียงถูกยึดด้วยฐานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กสองแกนซึ่งสามารถปรับความลาดชันได้ตามต้องการ ดังภาพที่ 3-6 โดยพื้นเอียงผิวเรียบนี้จะถูกใช้พื้นฐานสำหรับการทดสอบพื้นผิวลักษณะอื่น ๆ ต่อไป



ภาพที่ 3-9 พื้นเอียงผิวเรียบ

ลูกบาศก์คอนกรีตที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 3 ขนาดด้วยกัน ได้แก่ ขนาด $3 \times 3 \times 3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาด $4 \times 4 \times 4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยลูกบาศก์คอนกรีตแต่ละก้อนถูกหล่อโดยแบบหล่อซึ่งทำขึ้นมาเป็นการเฉพาะ ทำจากเหล็กดังภาพที่ 3.7 ทำการหล่อและ ทิ้งไว้หนึ่งวันเพื่อให้คอนกรีตเซตตัว จากนั้นนำก้อนคอนกรีตที่ได้จากการหล่อไปทำการตัดโดยเครื่องตัดคอนกรีต



ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างแบบหล่อและ ก้อนลูกบาศก์คอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

3.4 วิธีการทดลอง

การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต มีขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

1. ยกบานประตูน้ำด้านท้ายน้ำให้ขึ้นสูงสุด จากนั้นใช้ดินน้ำมันอุดตามแนวขอบประตูทั้งสามด้าน ได้แก่ ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลออกจากรางจำลองคลื่นไปได้ ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 การอุดรูรั่วด้วยดินน้ำมัน

2. ติดตั้งใบพัดสร้างคลื่นที่มีการยึดติดแผ่นยางไว้เรียบร้อยแล้วที่ระยะ 2.5 เมตร จากทางน้ำออก ดังภาพที่ 3-15 (บริเวณขอบบนของรางจำลองคลื่นมีระยะบोक) และในขณะที่ใบพัดทำงาน ควรใช้น้ำมันหล่อลื่นทาบริเวณแผ่นยางด้านบน บริเวณจุดวงกลมสีแดง ดังภาพที่ 3-12 เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับระจกรางจำลองคลื่น ซึ่งช่วยให้แผ่นยางใช้งานได้นานขึ้น



ภาพที่ 3-12 เครื่องกำเนิดคลื่น

3. ติดตั้งแบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง และนำวัสดุ เช่น ก้อนคอนกรีตหรือถังพลาสติก
 อย่างหนา มารองไว้ใต้พื้นเอียงเพื่อกำยั้นไม่ให้พื้นเอียงแอ่นจนเสียรูปและยังกันไม่ให้พื้นเอียง
 กระเพื่อมจากแรงคลื่นขณะทำการทดลอง ดังภาพที่ 3-13 จากนั้นนำลูกบาศก์คอนกรีตแต่ละขนาด
 มาจัดเรียงตามรูปแบบ ดังภาพที่ 3-14 ถึง 3-16 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-13 โครงสร้างพื้นเอียงที่ใช้รองรับพื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีต



ภาพที่ 3-14 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ



ภาพที่ 3-15 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบบันได



ภาพที่ 3-16 พื้นลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบสุ่ม

4. ติดตั้งตัวสลายคลื่น ดังภาพที่ 3-17 จำนวนสองตัวโดยติดตั้งที่ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นและด้านหลังโครงสร้างจำลองพื้นเอียง เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน



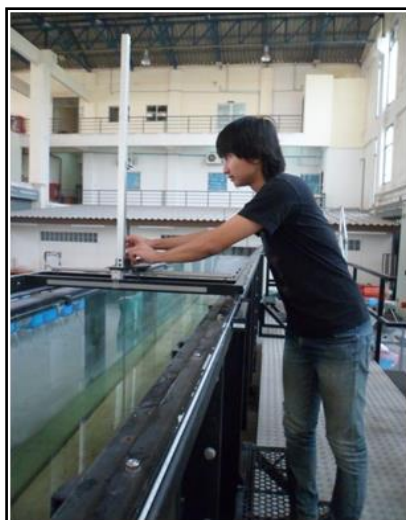
ภาพที่ 3-17 ตัวสลายพลังงานคลื่น

5. ตรวจสอบว่ารางจำลองคลื่นอยู่ในแนวระดับหรือไม่ โดยปรับค่าความชันบนกล่องควบคุมให้ใกล้เคียงค่าศูนย์ ดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 แผงควบคุมเครื่องทดสอบทางน้ำไหล

6. เปิดน้ำเข้าสู่รางจำลองคลื่น โดยให้ระดับน้ำมีความลึก 35 เซนติเมตร ใช้ที่วัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ วัดความลึกของน้ำ (h) ดังภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 การวัดระดับน้ำนิ่ง

7. เสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเตรียมการทดลองต่อไป

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีต แต่ละรูปแบบการจัดเรียง ได้แก่ การจัดเรียงแบบเรียบ การจัดเรียงแบบขั้นบันได และการจัดเรียงแบบท่สุ่มตามลำดับ โดยแต่ละกรณีทำการทดลองที่ละขนาดของลูกบาศก์คอนกรีต ได้แก่ 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ
2. ปรับพื้นเอียงให้ได้ความลาดชันตามต้องการ อาจจะเริ่มจากความลาดชันน้อยไปมาก หรือความลาดชันมากไปน้อยตามความเหมาะสม
3. ปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง (Stroke) ดังภาพที่ 3-20 โดยเริ่มการทดสอบที่ระยะ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ



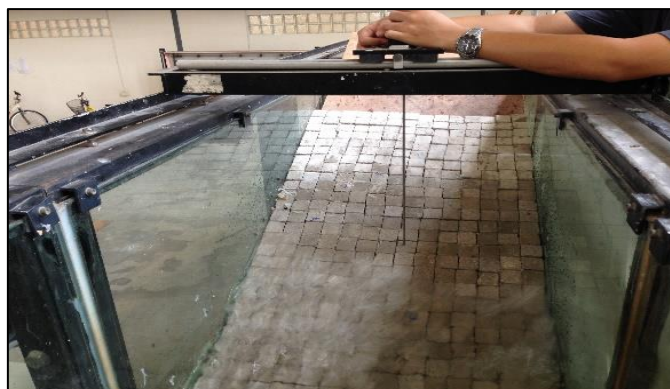
ภาพที่ 3-20 ระยะคันชักข้อเหวี่ยง

4. เปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดคลื่นที่แผงควบคุม โดยเริ่มทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเท่ากับ 60 รอบต่อนาที จากนั้นรอกจนคลื่นมีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอประมาณ 2 นาที

5. ใช้เครื่องวัดคลื่นแบบวัดความต้านทานวัดค่าความสูงของคลื่นในตำแหน่งที่คลื่นเกิดการก่อตัวขึ้นช่วงที่ห่างจากเครื่องกำเนิดคลื่นสองในสาม หรือที่ระยะประมาณ 8.50 เมตร จากประตูท้ายน้ำ ดังภาพที่ 3-21 (เนื่องจากได้ทดลองหาช่วงที่คลื่นก่อตัวอย่างสมบูรณ์ที่สุดจึงเลือกช่วงดังกล่าว) บันทึกค่าความสูงคลื่น (H) ด้วยโปรแกรม จำนวนคลื่นไม่น้อย 30 ลูก เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเลื่อนเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้มาวัดค่าความสูงคลื่นซัด (R) ที่แบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง ดังภาพที่ 3-22 โดยพยายามวัดคลื่นซัดที่มีความสูงที่สุดบนพื้นเอียง บันทึกค่าความสูงคลื่นซัดจำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3-21 การวัดความสูงของคลื่นก่อนเข้ากระทบโครงสร้าง



ภาพที่ 3-22 การวัดความสูงของคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีต

6. ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเป็น 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อ นาที ตามลำดับ แล้วปฏิบัติตามข้อ 4 และข้อ 5 จนครบทุกความเร็วรอบดังที่กล่าวมา จากนั้นปิด สวิตซ์เครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อเปลี่ยนระยะคันชัก
7. เปลี่ยนระยะคันชักข้อเหวี่ยงเป็น 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแต่ละระยะให้ปฏิบัติตามข้อ 4 ถึง ข้อ 6 จนครบทุกระยะคันชักข้อเหวี่ยง
8. เปลี่ยนความลาดชันของแบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง โดยแต่ละความลาดชันให้ ปฏิบัติตามข้อ 3 ถึง ข้อ 7 จนครบทุกความลาดชัน
9. เมื่อการทดลองกรณีพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ขนาด 3 เซนติเมตร เสร็จสิ้นแล้ว ให้ทำการเปลี่ยนพื้นเอียงที่มีขนาดลูกบาศก์คอนกรีตขนาดอื่นต่อไป แล้วทำการทดลอง โดยปฏิบัติตามข้อ 2 ถึง ข้อ 8 จนครบทุกขนาดจึงเสร็จสิ้นการดำเนินการทดลอง
10. เมื่อทำการทดลองกรณีพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ เสร็จสิ้นทุกขนาด แล้ว ให้เริ่มการทำลองกรณีพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได และกรณีพื้นเอียง ลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบท่มุ่ จนครบทุกรูปแบบการจัดเรียงจนเสร็จสิ้นทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

ค่าความสูงคลื่นซัดที่ได้มาจากการทดลองโดยได้ทำการทดลองในรางจำลองคลื่น กว้าง 0.60 เมตร ลึก 0.80 เมตร และยาว 16 เมตร และ ค่าความลาดชันที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25 องศา ความลึกของน้ำในทางน้ำไหลเท่ากับ 35 เซนติเมตร ค่าความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีตั้งแต่ 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.66 เฮิรตซ์ และระยะชักข้อเหวี่ยงในการสร้างคลื่น เท่ากับ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร

Hunt (1959) ได้เสนอสมการซึ่งเป็นไปตามพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ความสูงคลื่นซัดการแตกตัวของคลื่นสม่ำเสมอบนความลาดชัน ดังนี้

$$\frac{R}{H} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \quad (4.1)$$

จาก $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}}$ (Battjes, 1974) จะได้

$$\frac{R}{H} = \xi \quad (4.2)$$

Mase (1989) ได้ทำการทดลองที่มีลักษณะคล้ายกับการทดลองของ Hunt แต่ใช้คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular Wave) และได้เสนอสมการที่มีลักษณะคล้ายสมการของ Hunt แต่เพิ่มพารามิเตอร์เชิงประจักษ์ (Empirical Parameter) a และ b พร้อมทั้งแนะนำค่าที่เหมาะสมสำหรับความสูงคลื่นซัดเฉลี่ย (Mean Runup height; \bar{R}) ความสูงคลื่นซัดสูงสุดแต่ละการทดสอบ (Highest Runup Height; R_{\max}) ความสูง 2% เกินจากความสูงคลื่นซัด (2% Excess Runup Height; $R_{2\%}$) ความสูงคลื่นซัดสูงสุด 1/10 (The One-tenth Highest Runup Height; $R_{1/10}$)

และ ความสูงคลื่นซัดสูงสุด 1/3 (The One-third Highest Runup Height; $R_{1/3}$) และเสนอสมการ ความสูงคลื่นซัดของคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอบนพื้นเอียงผิวเรียบ ทึบน้ำ และมีความลาดชันน้อย ดังนี้

$$\frac{R}{H_0} = ax^b \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.1.1 ปฏิบัติการทดลองคลื่นซัดเข้าสู่พื้นเอียงแต่ละกรณี

ลักษณะพื้นผิวของ โครงสร้างพื้นเอียง	ความสูงคลื่นต่ำสุด (เซนติเมตร)	ความสูงคลื่นสูงสุด (เซนติเมตร)
พื้นผิวเรียบ	1.55	9.44
พื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเรียบ	1.28	9.67
พื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบขั้นบันได	1.04	5.58
พื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีต จัดเรียงแบบเตลุ่ม	1.06	5.98

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการศึกษา คือ การสร้างสมการความสูงคลื่นซัดที่คำนึงถึงความขรุขระของผิวพื้นโครงสร้าง แต่หากเราต้องวัดความขรุขระของผิวพื้นจริงทุกครั้ง ย่อมไม่เป็นการสะดวกต่อการออกแบบ เพราะต้องรอให้ก่อสร้างจริงก่อน การศึกษานี้จึงใช้ขนาดของวัสดุผิวแทนความสูงขรุขระ จากนั้นนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการ สำหรับความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการทดลอง บนความลาดชันในกรณีต่างๆ ทำให้สามารถอธิบายเป็นไปตามสมการดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

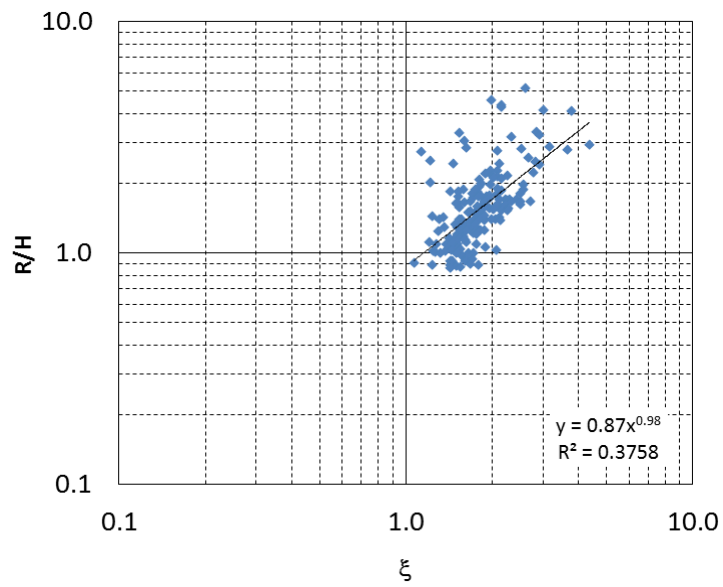
กรณีการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบเพียงอย่างเดียว มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.2.1 สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

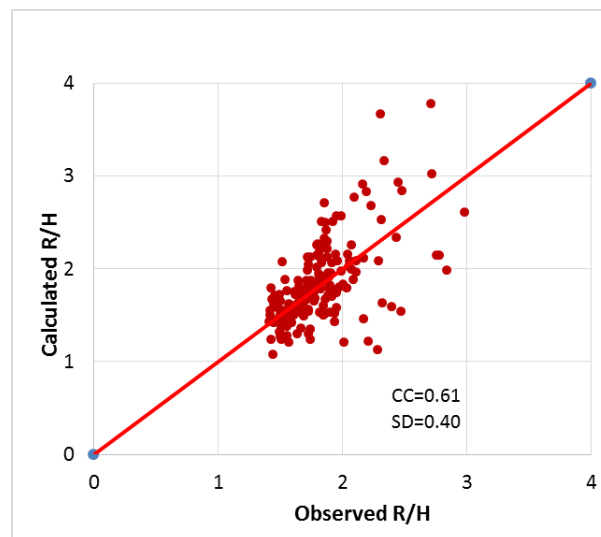
	พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
โครงสร้างพื้นเอียง แบบผิวเรียบ	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.123	0.008
	$(R / H)_{\text{obs}}$	4.35	1.07
	$(R / H)_{\text{cal}}$	5.12	0.86

การทดลองแบบพื้นเรียบได้ค่า $3.38 < R < 19.28$, $1.55 < H < 9.44$

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถวิเคราะห์ตามสมการของ Mase ได้ ดังภาพที่ 4-1 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการได้ ดังภาพที่ 4-2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC) เท่ากับ 0.61 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.40



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัณฑ์ (R/H) กับ Surf Similarity (ξ)



ภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัณฑ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

Hunt (1959) ได้เสนอสมการซึ่งเป็นไปตามพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ความสูงคลื่นขีดการแตกตัวของคลื่นสม่ำเสมอบนความลาดชัน ดังนี้

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \quad (4.4)$$

Mase (1984) ได้สร้างกราฟขึ้นระหว่าง R/H กับ Surf Similarity (ξ) ลงบนกราฟ log-log scale ได้เป็นสมการ

$$\frac{R}{H} = a \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)^b \quad (4.5)$$

แทนค่าตัวแปรให้เป็นสมการอย่างง่ายจะได้

$$y = ax^b \quad (4.6.1)$$

จากภาพที่ 4-1 ที่จะได้

$$y = 0.87x^{0.98} \quad (4.6.2)$$

ฉะนั้น $a = 0.87$, $c = 0.98$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการจะได้

$$\frac{R}{H} = 0.87 \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)^{0.98} \quad (4.7)$$

สำหรับ $0.008 < \frac{H}{L} < 0.123,$

เมื่อพิจารณาสมการที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ a และ b จะเข้าใกล้ค่า 1.0 มาก ดังนั้นหมายความว่าค่าที่คำนวณจากสมการนี้จะใกล้เคียงกับสมการพื้นฐานของ Hunt (1959) เมื่อนำทั้ง 2 สมการมาคำนวณคลื่อนีความต่างกันเพียง 8-9 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณพื้นเรียบจึงสรุปให้ใช้สมการพื้นฐานของ Hunt (1959) เพราะเป็นสมการที่คำนวณได้ง่าย ง่ายต่อการนำไปใช้งานและค่าใกล้เคียงกับความสูงคลื่นซัดที่ซัดขึ้นมาบนพื้นเรียบ

4.2.2 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ

กรณีการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.2

ตารางที่ 4.2.2 สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ

ขนาดลูกบาศก์ (เซนติเมตร)	พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
3	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.101	0.008
	$(R / H)_{obs}$	2.62	1.94
	$(R / H)_{cal}$	4.72	0.84
4	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.114	0.007
	$(R / H)_{obs}$	10.69	0.68
	$(R / H)_{cal}$	5.54	0.82
5	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.242	0.012
	$(R / H)_{obs}$	5.36	0.27
	$(R / H)_{cal}$	3.84	0.74

จากการทดลองเรียงลูกบาศก์แบบเรียบได้ค่า $2.42 < R < 17.32$, $1.28 < H < 9.67$

การวิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วยการสร้างสมการ จะแบ่งออกเป็น 2 สมการ ได้แก่

$$\text{สมการแบบที่ 1: } \frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

โดยจากสมการพื้นฐานของ Hunt (1959) เมื่อเราเพิ่มการพิจารณาความขรุขระเข้าไป โดยรูปแบบของพจน์ที่พิจารณาความขรุขระ เป็นไปตามสมการ

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right] \quad (4.8)$$

ดังนั้น

$$\frac{\frac{R}{H}}{\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)} = \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right] \quad (4.9)$$

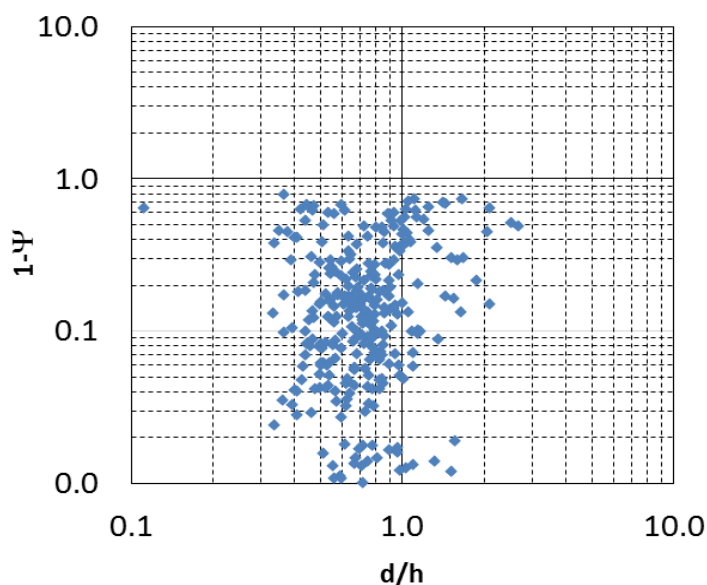
กำหนดให้

$$\Psi = \frac{\frac{R}{H}}{\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)} \quad (4.10)$$

จะได้

$$1 - \Psi = a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \quad (4.11)$$

ทำการหาค่า a_2 และ c จากวิธีกำลังสองที่น้อยสุด ดังแสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1

แทนค่าตัวแปรให้เป็นสมการอย่างง่ายจะได้

$$y = a_2 x^c \quad (4.12)$$

จากภาพที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1 จากกราฟเนื่องจากค่ามีการกระจายตัวของข้อมูลมาก เนื่องจากค่าความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) มีความสัมพันธ์ต่อความสูงคลื่นชันน้อยมากหรือแทบไม่มีเลยทำให้ค่ากราฟที่ได้กระจายตัวจึงไม่สามารถหาลากเส้นความสัมพันธ์ได้ทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ จึงสรุปว่าการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ไม่สามารถวิเคราะห์โดยสมการแบบที่ 1 ได้

สมการแบบที่ 2:
$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

จากสมการพื้นฐานของ Hunt (1959) เมื่อเราเพิ่มการพิจารณาความขรุขระเข้าไป โดยพจน์ที่พิจารณาความสูงขรุขระ ดังสมการ

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right] \quad (4.13)$$

ดังนั้น

$$\frac{\frac{R}{H}}{\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)} = \left[a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right] \quad (4.14)$$

กำหนดให้

$$\Psi = \frac{\frac{R}{H}}{\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)} \quad (4.15)$$

จะได้

$$\Psi = \frac{\frac{R}{H}}{\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)} \quad (4.16)$$

แทนค่าตัวแปรให้เป็นสมการอย่างง่ายจะได้

$$y = a_2 x^c \quad (4.17)$$

ค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c สามารถหาได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-4

ซึ่งจะได้ $a_2 = 0.90$, $c = -0.02$ หรือ $y = 0.90x^{-0.02}$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการจะได้

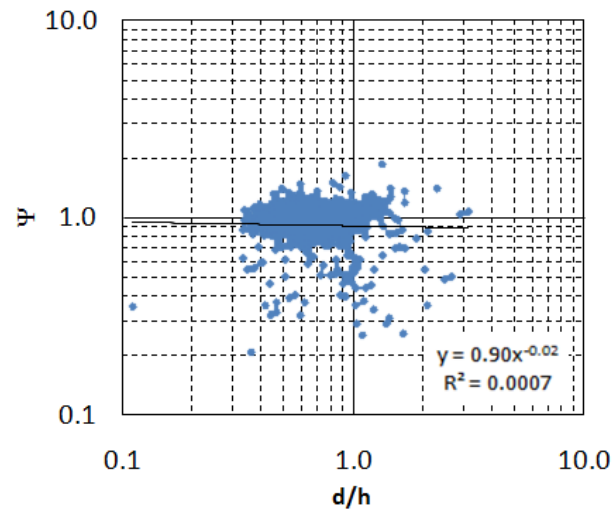
$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.90 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.02} \right] \quad (4.18)$$

สำหรับ

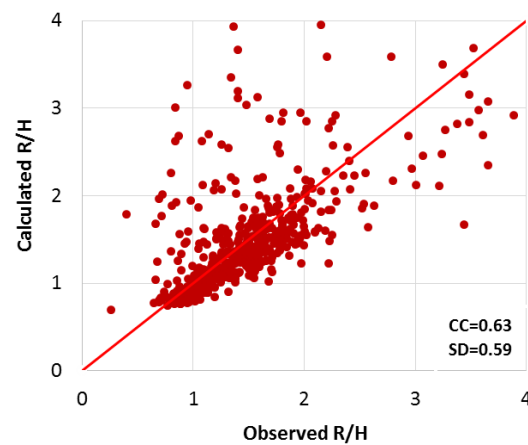
$$0.007 < \frac{H}{L} < 0.114, \quad 0.11 < \frac{d}{H} < 3.13$$

เมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC) เท่ากับ 0.63 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.59 ดังแสดงในภาพที่ 4-5

เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.18) ข้างบน ซึ่งพจน์หลังเป็นพจน์แสดงความขรุขระสัมพันธ์ นั่นคือ $\left[0.90 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.02} \right]$ จะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.89 ถึง 0.92 สามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยผลของความขรุขระ เมื่อคุณไปในสมการของกรณีพื้นเอียงผิวเรียบสามารถลดทอนค่าความสูงคลื่นซัดได้ 8 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ไม่มีผลของความขรุขระ สมการพื้นฐานของ Hunt จะเห็นว่า ความแตกต่างระหว่างสมการที่คำนึงถึงความขรุขระกับสมการที่ไม่คำนึงถึงความขรุขระแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2



ภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2

4.2.3 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบ

ชั้นบันได

กรณีการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.3

ตารางที่ 4.2.3 สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได

ขนาดลูกบาศก์ (เซนติเมตร)	พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
3	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.065	0.006
	$(R / H)_{obs}$	3.67	0.95
	$(R / H)_{cal}$	6.24	1.08
4	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.058	0.005
	$(R / H)_{obs}$	8.09	1.00
	$(R / H)_{cal}$	5.39	1.11
5	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.058	0.006
	$(R / H)_{obs}$	2.05	0.92
	$(R / H)_{cal}$	5.54	1.15

จากการทดลองเรียงลูกบาศก์แบบชั้นบันไดได้ค่า $1.58 < R < 9.58$, $1.04 < H < 5.58$

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ผลการทดลองในกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต
จัดเรียงแบบเรียบ ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยสมการ 2 รูปแบบ ได้แก่

$$\text{สมการแบบที่ 1: } \frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

จากการหาค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c เช่นเดียวกับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต
จัดเรียงแบบเรียบ ได้ ค่า $a_2 = 0.21$, $c = 0.07$ ดังภาพที่ 4-5

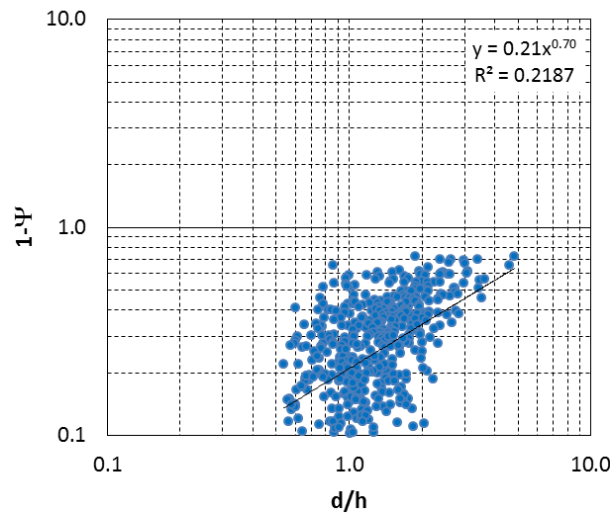
ดังนั้นแทนค่าลงในสมการรูปแบบที่ 1 จะได้

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - 0.21 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.07} \right] \quad (4.19)$$

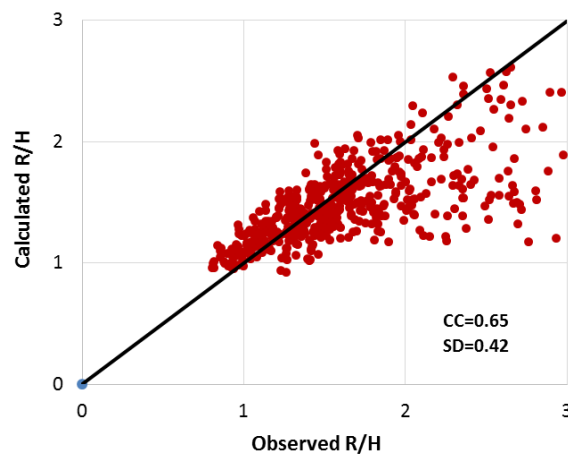
สำหรับ $0.006 < \frac{H}{L} < 0.065$, $0.54 < \frac{d}{H} < 4.81$

เมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วย
สมการกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC)
เท่ากับ 0.65 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.42 ดังแสดงในภาพที่
4-7

เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.19) ข้างบน ซึ่งพจน์หลังเป็นพจน์แสดงความชรุชระ
สัมพันธ์ นั่นคือ $\left[1 - 0.21 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.07} \right]$ จะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.48 ถึง 0.82 สามารถอธิบายได้อีก
อย่างหนึ่งว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยผลของความชรุชระ เมื่อคูณไปในสมการของกรณีพื้นเอียงผิว
เรียบสามารถลดทอนค่าความสูงคลื่นซัดได้ 18 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ไม่มีผลของความ
ชรุชระสมการพื้นฐานของ Hunt



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1



ภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1

สมการแบบที่ 2:
$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

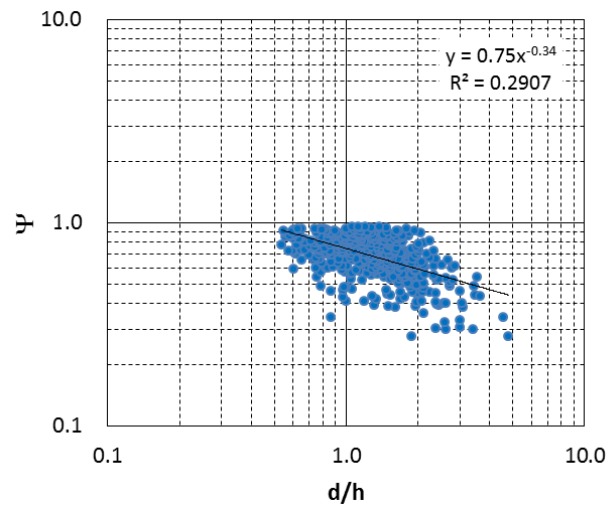
ในการทำงานเดียวกับกรณีข้างต้น เมื่อเราจัดสมการตามสมการที่ (4.15) จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c ได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-8 ซึ่งได้ค่า $a_2 = 0.75$ และ $c = -0.34$ หรือได้สมการ

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.75 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.34} \right] \quad (4.20)$$

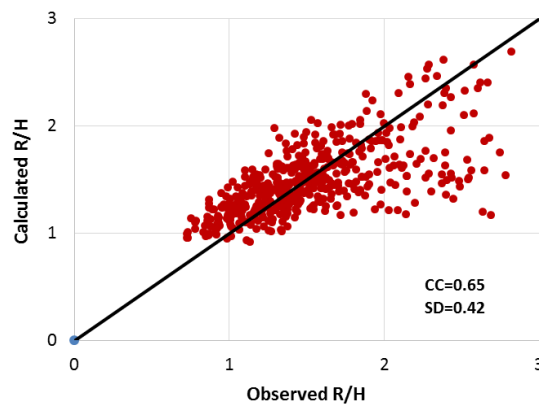
สำหรับ $0.006 < \frac{H}{L} < 0.065$, $0.54 < \frac{d}{H} < 4.81$

เมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC) เท่ากับ 0.65 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.42 ดังแสดงในภาพที่ 4-9

เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.19) ข้างบน ซึ่งพจน์หลังเป็นพจน์แสดงความชรุขระสัมพันธ์ นั่นคือ $\left[0.75 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.34} \right]$ จะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.48 ถึง 0.89 สามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยผลของความชรุขระ เมื่อคูณไปในสมการของกรณีพื้นเอียงผิวเรียบสามารถลดทอนค่าความสูงคลื่นซัดได้ 11 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย 26 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ไม่มีผลของความชรุขระสมการพื้นฐานของ Hunt



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2



ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2

4.2.4 การวิเคราะห์ผลกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม

กรณีการทดลองความสูงคลื่นระดับนโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.4

ตารางที่ 4.2.4 สรุปผลการทดลองกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม

ขนาดลูกบาศก์ (เซนติเมตร)	พารามิเตอร์	สูงสุด	ต่ำสุด
3	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.058	0.006
	$(R / H)_{obs}$	1.83	0.52
	$(R / H)_{cal}$	2.79	1.34
4	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.064	0.009
	$(R / H)_{obs}$	1.31	0.03
	$(R / H)_{cal}$	4.41	1.07
5	$\tan \theta$	0.47	0.27
	H / L	0.072	0.008
	$(R / H)_{obs}$	1.17	0.20
	$(R / H)_{cal}$	4.36	1.06

จากการทดลองเรียงลูกบาศก์แบบเตลุ่มได้ค่า $0.62 < R < 7.22$, $1.06 < H < 5.98$

ในการทำงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลการทดลองในกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์
คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ และกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได
ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยสมการ 2 รูปแบบ ได้แก่

$$\text{สมการแบบที่ 1: } \frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

จากการหาค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c เช่นเดียวกับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต
จัดเรียงแบบเรียบ ได้ ค่า $a_2 = 0.50$, $c = 0.64$ ดังภาพที่ 4.10

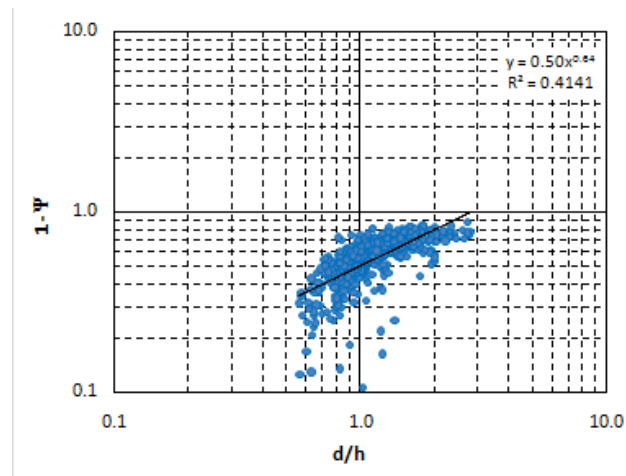
ดังนั้นแทนค่าลงในสมการรูปแบบที่ 1 จะได้

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - 0.50 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.64} \right] \quad (4.21)$$

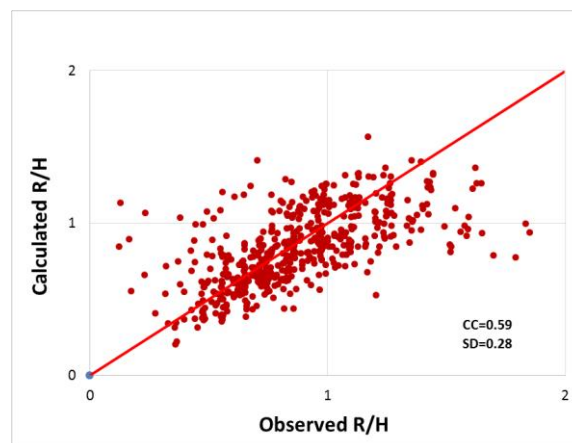
สำหรับ $0.006 < \frac{H}{L} < 0.072$, $0.57 < \frac{d}{H} < 3.42$

เมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วย
สมการกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC)
เท่ากับ 0.59 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.28 ดังแสดงในภาพที่
4-11

เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.19) ข้างบน ซึ่งพจน์หลังเป็นพจน์แสดงความชรุชระ
สัมพันธ์ นั่นคือ $\left[1 - 0.50 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.64} \right]$ จะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.30 ถึง 0.65 สามารถอธิบายได้อีก
อย่างหนึ่งว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยผลของความชรุชระ เมื่อคูณไปในสมการของกรณีพื้นเอียงผิว
เรียบสามารถลดทอนค่าความสูงคลื่นซัดได้ 35-70 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 58 เปอร์เซ็นต์
จากสมการกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของ Hunt



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ ($1-\psi$) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 1

$$\text{สมการแบบที่ 2: } \frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right]$$

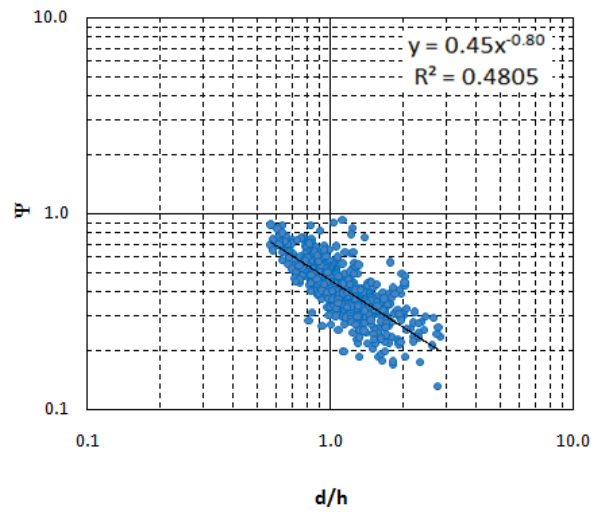
ในการทำงานเดียวกับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ และกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบขั้นบันได เมื่อเราจัดสมการตามสมการที่ (4.15) จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c ได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-8 ซึ่งได้ค่า $a_2 = 0.45$ และ $c = -0.80$ หรือได้สมการ

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.80} \right] \quad (4.22)$$

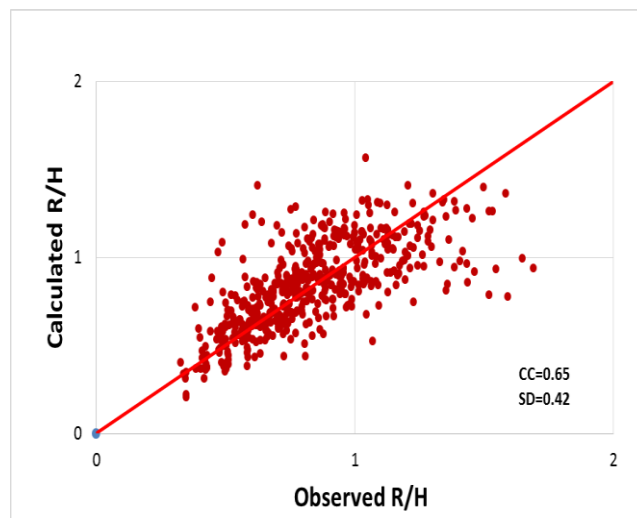
$$\text{สำหรับ } 0.006 < \frac{H}{L} < 0.072, \quad 0.57 < \frac{d}{H} < 3.42$$

เมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: CC) เท่ากับ 0.65 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 0.42 ดังแสดงในภาพที่ 4-9

เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.19) ข้างบน ซึ่งพจน์หลังเป็นพจน์แสดงความชรุขระสัมพันธ์ นั่นคือ $\left[0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.80} \right]$ จะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0.30 ถึง 0.71 สามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยผลของความชรุขระ เมื่อคุณไปในสมการของกรณีพื้นเอียงผิวเรียบสามารถลดทอนค่าความสูงคลื่นซัดได้ 29-70 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ไม่มีผลของความชรุขระสมการพื้นฐานของ Hunt



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับพารามิเตอร์ (ψ) สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2



ภาพที่ 4-13 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเตลุ่ม ที่วิเคราะห์ด้วยสมการแบบที่ 2

ตารางที่ 4.3.1 สรุปสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ทั้งในกรณีโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ โครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเรียบ โครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบชั้นบันได และโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีตจัดเรียงแบบเทสุ่ม จะเห็นได้ว่า สมการแบบที่ 2 ให้ความแม่นยำใกล้เคียงหรือดีกว่าสมการแบบที่ 1 อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกกรณี ดังนั้นการศึกษาจึงแนะนำการนำสมการรูปแบบที่ 2 ไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 4.3.1 ตารางสรุปสมการที่ได้จากการศึกษา

กรณีศึกษา	a ₁	b	a ₂	c	c.c.	s.d.	H/L		d/H	
							min	max	min	max
พื้นเรียบ	0.87	0.96	-	-	0.59	0.6	0.008	0.123	-	-
	$\frac{R}{H} = 1.517 \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right)^{0.365}$									
เรียงลูกบาศก์แบบเรียบ	-	-	0.90	-0.02	0.64	0.58	0.007	0.114	0.11	3.13
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.90 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.02} \right]$									
เรียงลูกบาศก์แบบชั้นบันได	-	-	0.21	0.70	0.65	0.42	0.006	0.065	0.54	4.81
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - 0.21 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.70} \right]$									
	-	-	0.75	-0.34	0.63	0.39	0.006	0.065	0.54	4.81
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.75 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.34} \right]$									
เรียงลูกบาศก์แบบสุ่ม	-	-	0.50	0.64	0.59	0.28	0.006	0.072	0.57	3.42
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[1 - 0.50 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.64} \right]$									
	-	-	0.45	-0.80	0.69	0.26	0.006	0.072	0.57	3.42
$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.80} \right]$										

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงวัสดุผิวต่อความสูงคลื่นชด และสร้างสมการทำนายความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ซึ่งได้ทำการทดลองในรางจำลองคลื่น ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา โดยสรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ ดังนี้

5.1 สรุปการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวลูกบาศก์คอนกรีต ที่มีการจัดเรียงวัสดุผิวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ จัดเรียงแบบเรียบ จัดเรียงแบบขั้นบันได และจัดเรียงแบบเตลุ่ม ขนาดของวัสดุผิวซึ่งเป็นลูกบาศก์คอนกรีต มี 3 ขนาด ได้แก่ $30 \times 30 \times 30$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร, $40 \times 40 \times 40$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และ $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร โครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต ทำมุม 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา คลื่นที่ใช้ในการศึกษาเป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ ดำเนินการทดลองทั้งหมด 1,350 กรณี และได้นำเสนอสมการความสูงคลื่นชดพร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังตารางที่ 5-1

จากการทดลองสรุปได้ว่า สมการทำนายความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีตทั้งสามรูปแบบการจัดเรียงให้ผลการทำนายได้ค่อนข้างดีมาก ในกรณีนี้ของการจัดเรียงแบบเรียบ มีความแตกต่างจากสมการดั้งเดิมแบบเรียบไม่มาก เนื่องจากวัสดุผิวถูกจัดเรียงแบบเรียบ มีความขรุขระเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย การศึกษาจึงแนะนำให้ใช้สมการแบบผิวเรียบที่ไม่ต้องคำนึงถึงขนาดวัสดุผิวเลย เนื่องจากสมการแบบเดิมเป็นแบบง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน

สำหรับกรณีการจัดเรียงแบบขั้นบันไดและการจัดเรียงแบบเตลุ่ม พบว่า ความสูงคลื่นชดทั้งสองกรณีมีค่าน้อยกว่าความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบมากถึง 11 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ย 26 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีการจัดเรียงแบบขั้นบันได และ 35 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยมี

ค่าเฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีการจัดเรียงแบบเตลุ่ม จะเห็นได้ว่า หากเราใช้สมการที่พิจารณาความขรุขระ จะสามารถทำให้เราลดความสูงของโครงสร้างได้ ทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างลงได้

เมื่อเปรียบเทียบการจัดเรียงแบบขั้นบันไดและแบบเตลุ่ม พบว่า การจัดเรียงแบบเตลุ่ม ทำให้เกิดความขรุขระบนผิวพื้นเอียงมากกว่าและสม่ำเสมอกว่า ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากกว่า ความสูงคลื่นชัดแบบโครงสร้างจึงน้อยกว่ากรณีของการจัดเรียงแบบขั้นบันได แต่ในทางปฏิบัติการจัดเรียงแบบขั้นบันไดจะทำให้ผู้มาใช้งานโครงสร้างสามารถเดินได้สะดวกกว่า

ตารางที่ 5-1 สรุปสมการและพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองความสูงคลื่นชัดบน
โครงสร้างพื้นเอียงลูกบาศก์คอนกรีต

กรณีศึกษา การจัดเรียง	a_2	c	C.C.	S.D.	H/L	d/H
แบบเรียบ	0.99	0	0.64	0.58	0.007 - 0.114	0.11-3.13
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.90 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.02} \right]$					
แบบขั้นบันได	0.99	0.45	0.63	0.39	0.006 - 0.065	0.54 - 4.81
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.75 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.34} \right]$					
แบบเตลุ่ม	0.99	0.45	0.69	0.26	0.006 - 0.072	0.57 - 3.42
	$\frac{R}{H} = \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \right) \left[0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.80} \right]$					

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาในอนาคต

1. การศึกษาในอนาคตควรทำการเก็บข้อมูลในภาคสนามร่วมด้วย เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้
2. การศึกษาในอนาคตอาจมีการประยุกต์ใช้ความสูงขรุขระ d ร่วมกับการศึกษาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความสูงคลื่นซัด เช่น พิจารณาความสูงขรุขระลงในสมการความสูงคลื่นซัดไหลล้น (Overtopping) เป็นต้น
3. ในการศึกษานี้จะใช้ทฤษฎีคลื่นน้ำลึก แต่เมื่อทำการตรวจสอบข้อมูลการทดลองพบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่ไม่เป็นไปตามทฤษฎีคลื่นน้ำลึก คือ ความลึกของระดับน้ำนิ่ง h ต้องมากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น L ดังนั้นอิทธิพลของความตื้นอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง แต่ทั้งนี้ขอบเขตของรางจำลองคลื่นนั้นมีขนาดจำกัด ถ้าเพิ่มความลึกของระดับน้ำนิ่ง อาจเกิดปัญหาคลื่นซัดล้นออกมาจากรางได้
4. ควรปรับลดค่าความสูงขรุขระสัมพัทธ์ d/H ให้น้อยลงกว่าเดิม เนื่องจากผลการวิเคราะห์พบว่าช่วง d/H น้อย ๆ จะให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และค่าในช่วงนี้จะพบได้มากในงานจริง
5. ไม่ใช้ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง $\tan \theta$ ที่สูง ๆ เนื่องจากจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อน ส่งผลให้การทดลองคลาดเคลื่อน

บรรณานุกรม

- ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง. (2554). สมการเชิงประสพการณ์อย่างง่ายสำหรับหาความสูงคลื่นซัดบนพื้น
เอียงผิวเรียบและผิวหยาบ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16*
(จำนวน 11 หน้า).
- ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง, เอกพล คำชมภู และภาณุ แสงเพชร. (2553). ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิว
ขรุขระ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15* (จำนวน 6 หน้า).
- Ahrens, J. P. (1979). Irregular Wave Runup. In *Proceedings of the Conference on
Coastal Structures 79th* (pp. 998-1019). American Society of Civil Engineers.
- Ahrens, J. P. (1981). *Irregular Wave Runup on Smooth Slopes*. Virginia: Department of
the Army Coastal Engineering Research Center Kingman Building.
- Ahrens, J.P., & Seelig, W.N. (1996). Wave Runup on Beaches. In *Proceeding of the 25th
Coastal Engineering Conference* (pp. 981-993). American Society of Civil
Engineers.
- Battjes, J.A. (1974). *Computations of Set-Up, Longshore Currents, Run-Up and
Overtopping due to Wind-Generated Waves. Report No. 74-2*.
Communications on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft
University of Technology.
- Battjes, J.A., & Roos, A. (1975). *Characteristics of Flow in Run-up of Periodic Waves*.
Report No. 75-3i. Communications on Hydraulics, Department of Civil
Engineering, Delft University of Technology.
- CIRIA/CUR. (1991). *Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering*.
London: Construction Industry Research and Information Association.
- David, A.L., Andre, S., & Ann, R.S. (1992). *Automated Coastal Engineering System*.
Mississippi: Department of Army, Waterways Experiment Station.
- Douglass, S.L. (1990). *Estimating Runup on Beaches: A Review of the State of the Art*.
Vicksburg, MS: U.S. Army, Waterways Experiment Station.
- Fuhrboter, A., Sparboom, U., & Witte, H. H. (1989). Hannover Large Wave Flume:
Experimental Results Regarding Wave Runup on Smooth and Rough Dike
Banks with 1:6 Slope. *Die Kiiste* (pp. 155-195). Germany: Heft

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Granthem, K.N. (1953). Wave Run-up on Sloping Structures. *American Geophysical Union*, 34(5).
- GUNT (2001a). *Instruction Manual HM161 Large Flow Channel*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau GmbH.
- GUNT (2001b). *Instruction Manual HM161.41 Wave Generator Flap-Type*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau Gerätebau GmbH.
- GUNT (2001c). *Technical Information HM161.74 Paddle and Blocking Plate*. Germany: G.U.N.T. Gerätebau Gerätebau GmbH.
- Hedges, T.S., & Mase, H. (2004). Modified Hunt's Equation Incorporating Wave Setup. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers*, 130(3), 109-113.
- Holman, R.A. (1986). Extreme Value Statistics for Wave Run-Up on a Natural Beach. *Coastal Engineering*, 9(6), 527-544.
- Hunt, I.A. (1959). Design of Seawalls and Breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division, American Society of Civil Engineers*, 85, 123-152.
- Iribarren, C.R. & Nogales, C. (1947). Protection of Ports, Section II, Communication 4, Ocean Navigation. In *Association of Navigation 17th Congress*. Lisbon.
- Janaka, J.W. (2008). Wave run-up and overtopping over smooth and rock slopes of coastal structures without crown walls. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 36(2), 157-164.
- Kamphuis, J.W., & Mohamed, N. (1978). Runup on Irregular Waves on Plane, Smooth Slope. *Journal of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Division*, 104(WW2).
- Mase, H. (1989). Random Wave Runup Height on Gentle Slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers*, 115, 649-661.
- Miche, M. (1944). Undulatory Movements of the Sea. *Annals des Ponts et Chaussees*, 114e Annee.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Miche, M. (1951). The Reflection Power of Maritime Works Exposed to Action of the Swell. *Annals des Ponts et Chaussees*, 121e Annee, 285-319.
- Na, S.J., Do, K.D., & Suh, K.-D. (2011). Forecast of wave run-up on coastal structure using offshore wave forecast data. *Coastal Engineering*, 58, 739-748.
- Neelamani, S., & Sandhya, N. (2004). Wave reflection, run-up, run-down and pressures on plane, dentated and serrated seawalls. *Coastal Engineering Journal*, 46(2), 141-169.
- Nielsen, P. & Hanslow, D.J. (1991). Wave Runup Distribution on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*, 7, 1139-1152.
- Owen, M.W. (1980). *Design of seawalls allowing for wave overtopping. Report No. 924*. Wallingford, UK: Hydraulics Research Station.
- Roos, A., & Battjes, J.A. (1976). Characteristics of flow in runup from periodic waves. In *Proceedings 15th International Conference Coastal Engineering* (pp.781-795). Hawaii
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., & Beach, R.A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. *Journal of Geophysical Research*, 17, 407-419.
- Saville, T., Jr. (1956). Wave Runup on Shore Structures. *Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers*, 82(WW2), 925.
- Shankar, N.J., & Jayaratne, M.P.R. (2003). Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures. *Ocean Engineering*, 30, 221-238.
- Swenson, M. (n.d.). *Bluff recession and Wave Impact Height Along the Wisconsin Shoreline of Lake Superior*. Retrieved from <http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/GLE401/web/Mike/Wave%20runup.htm>
- Technical Advisory Committee on Flood Defence (TAW). (2002). *Technical Report: Wave run-up and wave overtopping at dikes*. Netherlands: Delft.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. 2)*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). Coastal Engineering Manual. *Engineer Manual* (Vol. 6) 1110-2-1100. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- Van der Meer, J.W. (1996). Conceptual design of rubble mound breakwaters, In: Ed. (Philip L.-F. Liu) *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 1, 221-315.
- Van der Meer, J.W., & Stam, C.J.M. (1992). Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 118(5), 534-550.
- Van Hijum, E., & Pilarczyk, K.W. (1982). Gravel Beaches: Equilibrium Profile and Longshore Transport of coarse Material under Regular and Irregular Wave Attack. *Delft Hydraulic Laboratory Pub. (No. 272)*. Netherlands: Delft.
- Van Oorschot, J.H., & D'Angeremond, K. (1968). The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Runup. In *Proceedings of the 11th Conference on Coastal Engineering* (pp. 888-900). American Society of Civil Engineers.
- Ward, D.L. & Ahrens, J.P. (1992). *Laboratory Study of a Dynamic Berm Revetment. Technical Report CERC-92-1*. Vicksburg, MS: U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station

ภาคผนวก ก
ผลผลิต (Output)

บทความวิจัยที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ
เรื่อง

ผลกระทบของรูปแบบการวางวัสดุผิวต่อความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต

ภาคผนวก ข
รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการ (NRPM 13 หลัก): 2559A10802196 สัญญาเลขที่ 140/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ: ผลกระทบของรูปแบบการวางวัสดุผิวต่อความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบลูกบาศก์คอนกรีต
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึง วันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2560
ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 11 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ		
เงินงวดที่ 1 (50%)	เป็นจำนวนเงิน	266,200 บาท
เงินงวดที่ 2 (40%)	เป็นจำนวนเงิน	212,960 บาท
เงินงวดที่ 3 (10%)	เป็นจำนวนเงิน	53,240 บาท (ยังไม่ได้รับ)
รวม		532,400 บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	0.00	0.00	0.00
2. ค่าจ้าง	180,000.00	180,000.00	0.00
3. ค่าวัสดุ	44,000.00	37,500.00	6,500.00
4. ค่าใช้สอย	233,000.00	239,500.00	-6,500.00
5. ค่าครุภัณฑ์	0.00	0.00	0.00
6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ			
- เงินอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัย	53,240.00	53,240.00	0.00
รวม	532,400.00	532,400.00	0.00

.....
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....
ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ