

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

รหัสโครงการ 2555A10802025

สัญญาเลขที่ 57/2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง ระดับคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันได

(Wave run-up on stepped slopes)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

๕๐๑ 75121

๖๑ เม.ย. 2558

352065

เริ่มบริการ

๕๑ ก.พ. 2558

ธันวาคม พ.ศ. 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 57/2555

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 57/2555)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและพัฒนาสมการทำนายความสูงคลื่นชดบน โครงสร้างพื้นเอียงแบบขั้นบันได การศึกษาดำเนินการในรางจำลองคลื่น กว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. และ ยาว 16 ม. ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี โดยทำทดลองบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ และโครงสร้างพื้นเอียง แบบผิวขั้นบันได ที่ความลาดเอียงของพื้นเอียง 14 ถึง 27 องศา ความลึกของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ เท่ากับ 35 ซม. คลื่นที่ใช้ในการศึกษาเป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยความถี่ 0.83 ถึง 1.67 เฮิรตซ์

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติบ่งชี้ว่า ความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงมีความสัมพันธ์ อย่างชัดเจนกับความลาดชันของโครงสร้าง ความชันของคลื่นเข้ากระทบ และความขรุขระของผิว โครงสร้างซึ่งในกรณีนี้ คือ ค่าความสูงของขั้นบันได ความลาดชันที่ลดลง ความชันของคลื่นที่เพิ่มขึ้น และความขรุขระของผิวโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสูงคลื่นชดสัมพันธ์กับความสูงคลื่นเข้ากระทบ ลดลง เนื่องจากการสลายพลังงานของคลื่นจะเกิดมากขึ้นในทั้งสามกรณีดังกล่าว

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการถูกนำมาพัฒนาเป็นสมการทำนายความสูงคลื่นชด โดย คำนึงถึงความสูงขรุขระ และสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ ในสมการเดียว และมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของพื้นเรียบ สมการที่มีความ แม่นยำมากขึ้นทำให้เราสามารถออกแบบโครงสร้างให้มีความสูงลดลง ซึ่งทำให้ค่าก่อสร้างลดลงไปด้วย

Abstract

This research is to study the behaviors of and to develop the predictive formulas of wave runup on the stepped 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. A smooth sloping and stepped sloping structures were used in the study with the slope ranging from 14 to 27 degrees. The water depth used in the test was 35 cm and the wave was regularly generated with the frequency of 0.83 to 1.67 Hz.

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 the height of the steps in this case. Milder structure slope, greater wave steepness and rougher structure surface lower the wave runup, because these three conditions cause more the dissipation of incident waves.

Experimental data was applied to develop an empirical formula for predicting the wave runup that is able to be use for both smooth slope and stepped slope in the same equation. 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
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด	4
การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ	5
การศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ	28
เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	29
โครงสร้างพื้นเอียง	34
วิธีการทดลอง	39
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ	46
ผลการทดลองและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ	46
ผลการทดลองและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวขุ่นบันได	49
การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการทดลอง	54

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	70
สรุปการทดลองในห้องปฏิบัติการ	70
ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	73
ภาคผนวก ก ผลผลิต	77
ภาคผนวก ข รายงานสรุปการเงิน	90
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	91

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์	9
ตารางที่ 2-2	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษา	11
ตารางที่ 2-3	สรุปค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์	14
ตารางที่ 2-4	ค่าแฟคเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง	15
ตารางที่ 2-5	สรุปการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นระดับนโครงสร้างลาดเอียง	25-27
ตารางที่ 3-1	สรุปสภาพการทดลอง	29
ตารางที่ 3-2	ลักษณะทางกายภาพของรางจำลองคลื่น	30
ตารางที่ 3-3	รายละเอียดแบบจำลองพื้นเอียงแบบผิวขั้นบันได	35-36
ตารางที่ 4-1	ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	48
ตารางที่ 4-2	ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได	51
ตารางที่ 4-3	สรุปสมการที่ได้จากการทดลอง	54
ตารางที่ 4-4	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล R/H กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	56
ตารางที่ 4-5	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล H/L กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	58
ตารางที่ 4-6	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล ζ กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ	60
ตารางที่ 4-7	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล R/H กรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได	62
ตารางที่ 4-8	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล H/L กรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได	64
ตารางที่ 4-9	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล ζ กรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได	66
ตารางที่ 4-10	ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล d/H กรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได	68

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 นิยามของความสูงคลื่นชัด	4
ภาพที่ 2-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_S / H_S และ ξ	8
ภาพที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_S / H_S และ ξ	11
ภาพที่ 2-4 เปรียบเทียบความสูงคลื่นชัดบนพื้นเรียบและพื้นหินเรียง	12
ภาพที่ 2-5 พื้นเอียงผิวขรุขระ	17
ภาพที่ 2-6 การวัดความสูงคลื่นชัดในภาคสนาม	20
ภาพที่ 3-1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	29
ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบของรางจำลองคลื่น	30-31
ภาพที่ 3-3 เครื่องกำเนิดคลื่น	32
ภาพที่ 3-4 ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยง	33
ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น	34
ภาพที่ 3-6 พื้นเอียงผิวเรียบ	34
ภาพที่ 3-7 การจำลองพื้นเอียงแบบขั้นบันได	36
ภาพที่ 3-8 ใช้เครื่องพับสังกะสีเป็นขั้นบันได	37
ภาพที่ 3-9 แผ่นสังกะสีที่พับแล้ว	37
ภาพที่ 3-10 ฐานไม้รองแผ่นสังกะสี	38
ภาพที่ 3-11 ยึดติดแผ่นไม้บนพื้นเรียบให้แน่น	38
ภาพที่ 3-12 ยึดแผ่นสังกะสีเข้ากับแผ่นไม้	39
ภาพที่ 3-13 ติดตั้งพื้นเอียงแบบขั้นบันได	39
ภาพที่ 3-14 การอุดรูรั่วด้วยดินน้ำมัน	40
ภาพที่ 3-15 เครื่องกำเนิดคลื่น	40
ภาพที่ 3-16 พื้นเอียงผิวเรียบ	41
ภาพที่ 3-17 พื้นเอียงแบบขั้นบันได	41
ภาพที่ 3-18 ตัวสลายพลังงานคลื่น	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3-19 แมงควบคุมเครื่องทดสอบทางน้ำไหล	42
ภาพที่ 3-20 การวัดระดับน้ำนิ่ง	43
ภาพที่ 3-21 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	43
ภาพที่ 3-22 ระยะคันชักข้อเหวี่ยง	44
ภาพที่ 3-23 การวัดความสูงของคลื่น	45
ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ (R/H) กับ Surf Similarity (ξ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ	47
ภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ	49
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) กับ Ψ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวขรุขระ	50
ภาพที่ 4-4 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการ	52
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ (R/H)	53
ภาพที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก การคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H	55
ภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก การคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม H/L	57
ภาพที่ 4-8 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก การคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม ξ	59
ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก การคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4-10 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม	63
ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม ๕	65
ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบค่าความความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม	67

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียง พร้อมทั้งวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย และขอบเขตของการวิจัย

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

สมการความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมามีส่วนใหญ่นั้นเป็นสมการที่ได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (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) และนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดที่มีค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ (Empirical parameters) เข้ามาพร้อมทั้งแนะนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับความสูงคลื่นซัดแต่ละประเภท นอกจากนี้ยังมีสมการความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการศึกษาความสูงคลื่น

ชัดในภาคสนาม (Field experiments) ซึ่งทำการศึกษาความสูงคลื่นชัด ณ ชายหาดธรรมชาติ หรือ บริเวณที่มีโครงสร้างชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่น เขื่อนกันคลื่น เป็นต้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาสำหรับการทดลองความสูงคลื่นชัดในห้องปฏิบัติการ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นชัดส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานมาจากสมการของ Hunt (1959) และสมการที่มีการพิจารณาความขรุขระเข้ามาเกี่ยวข้องยังมีจำนวนน้อย และเป็นเพียงการนำค่าแฟกเตอร์ความขรุขระที่จำแนกตามวัสดุผิวโครงสร้างไปเป็นตัวคูณเท่านั้น แต่ไม่มีการคำนึงถึงความสูงขรุขระ (Roughness height: d) เข้ามาโดยตรง

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นชัดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบขั้นบันได โดยเป็นการศึกษาพฤติกรรมความสูงคลื่นชัดบนโครงสร้างลาดเอียงซึ่งทดลองในรางจำลองคลื่น (Wave flume) โดยทำการทดลองบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ และโครงสร้างพื้นเอียงแบบขั้นบันได (Stepped slope) พร้อมทั้งนำเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นชัดอย่างง่ายที่คำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) และสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระในสมการเดียว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่ชัดเข้าสู่โครงสร้างพื้นเอียงแบบผิวเรียบ และแบบขั้นบันได
2. เพื่อนำเสนอสมการอย่างง่ายเพื่อทำนายความสูงคลื่นชัดบนโครงสร้างลาดเอียงที่คำนึงถึงความสูงขรุขระของผิวโครงสร้าง และสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและแบบขั้นบันไดในสมการเดียว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจพฤติกรรมของคลื่นที่ชัดเข้าสู่โครงสร้างลาดเอียงแบบผิวเรียบและแบบขั้นบันได
2. ได้สมการอย่างง่ายเพื่อทำนายความสูงคลื่นชัดบนโครงสร้างลาดเอียงแบบผิวเรียบและแบบขั้นบันได เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างและการเตือนภัยความรุนแรงของคลื่นชัดได้

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้ มีดังนี้

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่นที่มีความยาว 16 เมตร และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีสองลักษณะ คือ แบบผิวเรียบและแบบผิวขั้นบันได คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสมำเสมอ

(Regular wave generator) ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร การตั้งความถี่ของคลื่นและระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่นเช่นนี้ทำให้ได้คลื่นที่มีความชันของคลื่น (H/L) ระหว่าง 0.013 ถึง 0.192 ซึ่งอยู่ในช่วงความชันของคลื่นลม (Wind waves) ที่พบทั่วไปในพื้นที่ชายฝั่งทะเล ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) พื้นเอียงผิวเรียบสร้างโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีความยาว 255 เซนติเมตร กว้างเท่ากับความกว้างของรางจำลองคลื่น ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 องศา สำหรับพื้นเอียงแบบชันบันไดทำมาจากแผ่นเหล็กสังกะสีเรียบ ถูกพับโดยเครื่องพับแผ่นสังกะสีให้เป็นชันบันได ซึ่งมีขนาดความสูงขรุขระหรือความสูงลูกตั้งของบันได เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอนเท่ากับ 1:2.0, 1:2.5, 1:3.0, 1:3.5 และ 1:4.0 ซึ่งอัตราส่วนนี้จะทำให้บันไดตั้งฉากกับแผ่นพื้นเอียงที่มุม 27, 22, 18, 16 และ 14 องศา ตามลำดับ

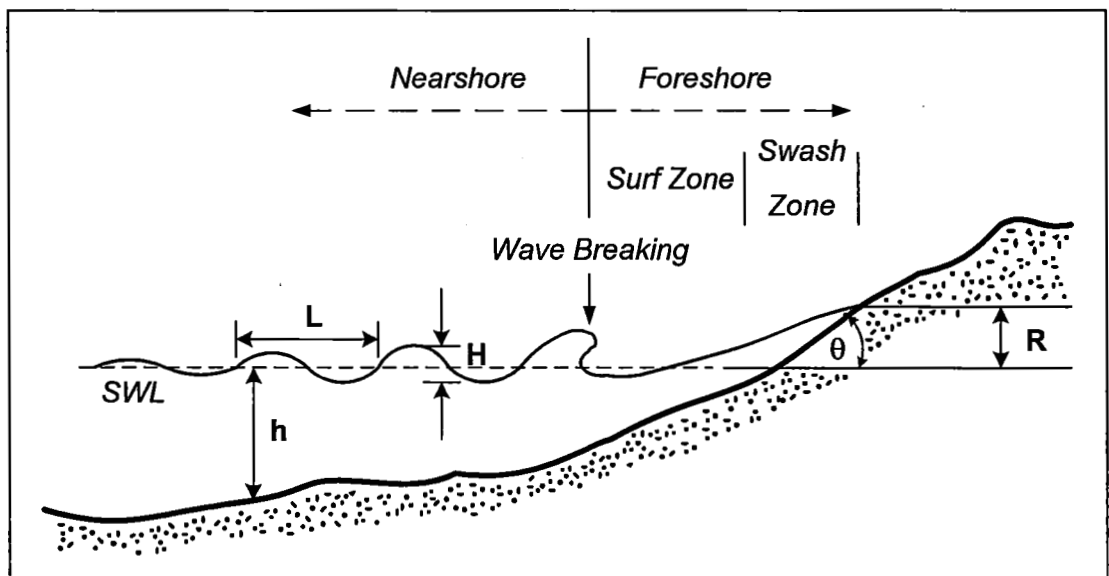
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้อธิบายถึงนิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด รวมถึงงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำการ
การศึกษาวิจัยไว้เพื่อสนับสนุนการวิจัยเรื่องนี้

นิยามและความสำคัญของความสูงคลื่นซัด

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่ง ความสูงคลื่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ท้องทะเล
ที่ตื้น โดยความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัดจากนั้นจะเกิดการแตกตัว และมีการสลายพลังงาน
ออกมาบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (Surf zone) พลังงานส่วนหนึ่งจะกลายเป็นพลังงานศักย์ในรูปของ
ความสูงคลื่นซัด (R) บริเวณเขตคลื่นซัดหาด (Swash zone) ซึ่งความสูงคลื่นซัดเป็นความยาวใน
แนวตั้งที่วัดจากระดับน้ำนิ่ง (SWL) ขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดที่คลื่นซัดไปบนหาดหรือพื้นเอียงของ
โครงสร้างชายฝั่งทะเล (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 โดยที่ θ
คือ มุมที่เกิดจากความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง H คือ ความสูงคลื่น L คือ ความยาว
คลื่น 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

การศึกษาความสูงคลื่นซัดด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนชายหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียงที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และมักทดสอบกับพื้นเอียงผิวเรียบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบสม่ำเสมอ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นซัดบนพื้นเอียงรวมทั้งมีการนำเสนอสมการเชิงประจักษ์สำหรับทำนายความสูงคลื่น นอกจากนี้ยังมีการทดลองจำนวนหนึ่งที่ทดสอบบนพื้นเอียงผิวไม่เรียบ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดการทดลองความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ดังนี้

การทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ

Hunt (1959) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ และคลื่นแบบสม่ำเสมอ โดยวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการของ (Granthem (1953); Iribarren & Nogales (1947); Miche (1944, 1951); Saville (1957)) และนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างชายฝั่งทะเล โดยที่ความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ (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 ซึ่งเปรียบเสมือน การพิจารณาด้วยคลื่นที่มีความสูงคลื่นและคาบคลื่นเท่ากันทุกลูกคลื่น ทำให้เป็นสมการพื้นฐานที่ไม่ สลับซับซ้อน ดังนั้นจึงเป็นสมการทั่วไปที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ และถูกใช้อ้างอิงเรื่อยมา นอกจากนี้ยัง แนะนำถึงแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต โดยเปลี่ยนจากคลื่นแบบสม่ำเสมอเป็นคลื่นแบบไม่ สม่ำเสมอ นั่นคือคลื่นลมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Wind generated) รวมถึงควรทดสอบในรางจำลอง คลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อจำลองคลื่นให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุด และเน้นความสำคัญในเรื่องของ การเกิดคลื่นสะท้อนซึ่งถ้าเป็นไปได้ควรทำให้เกิดคลื่นสะท้อนน้อยที่สุดในการทดลอง เนื่องจากทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

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

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

สำหรับ $0.1 < \xi < 2.3$

พารามิเตอร์ ξ นี้ถูกเรียกว่า "Surf similarity parameter" หรือ "Iribarren number" หรือ พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น มีค่าเท่ากับ $\tan \theta / \sqrt{H/L}$ โดยสามารถ แบ่งการแตกตัวออกได้เป็นสี่ลักษณะ 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) ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ โดยใช้คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ขนาดหน้าตัดรางจำลองคลื่นกว้าง 0.8 เมตร ลึก 0.6 เมตร และยาว 30 เมตร ความลาดชันของพื้นเอียงเท่ากับ 1 : 3, 1 : 5 และ 1 : 7 ระดับความลึกของ น้ำ (h) เท่ากับ 0.45 เมตร และความชันคลื่นในการทดลองอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.07 จากผลการ ทดลองพบว่าค่าความสูงคลื่นชดที่ได้มีความสอดคล้องดีมากกับสมการที่ 2-1 ของ Hunt (1959)

Ahrens (1981) ได้สรุปจากผลการทดลองของ (Ahrens (1979); Kamphuis & Mohammed (1978); van Oorschot & d'Angremond (1968)) ซึ่งดำเนินการทดลองความสูง คลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ภายใต้เงื่อนไขเขตน้ำลึก (Deepwater) โดยที่ 3

$\leq h/H_s \leq 12$ ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง 1 : 1 ถึง 1 : 4 และทดลองโดยใช้ลักษณะความสูงคลื่นซัด (Characteristic of wave runup: R_{char}) สามรูปแบบ 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)

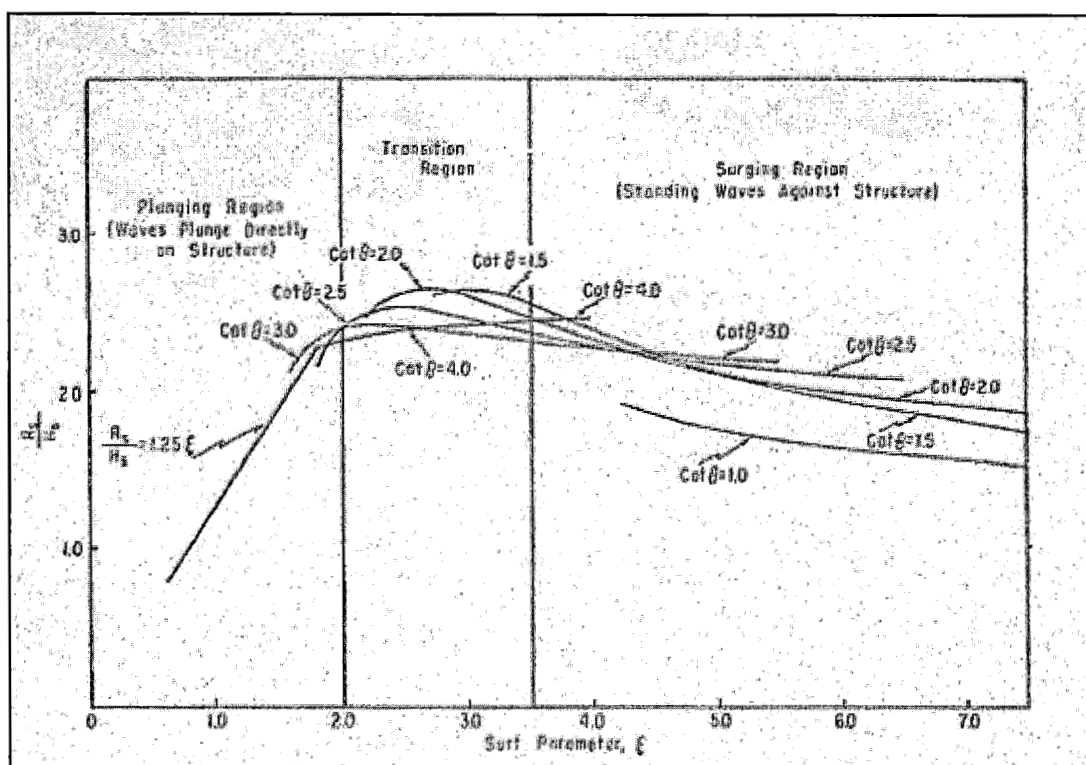
สมการเชิงประสพการณ์

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

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

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

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 $\xi \leq 2.0$ อยู่ในวงการแตกตัวแบบ Plunging และเป็นช่วงที่มีความชันคลื่นมาก ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่ามากขึ้น และโครงสร้างมีความลาดชันน้อย ๆ ในขณะที่ $\xi \geq 3.5$ อยู่ในวงการแตกตัวแบบ Surging ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อความชันคลื่นมีค่าลดลง และโครงสร้างมีความลาดชันเพิ่มขึ้น สำหรับในช่วง $2.0 \leq \xi \leq 3.5$ พบว่ามีผลกระทบต่อกันน้อยมากระหว่าง ความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ ความชันคลื่น และความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง ดังนั้น

สมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-6 สามารถใช้ได้ในช่วง $\xi \leq 2.0$ และให้คำแนะนำเพิ่มเติมว่าสมการยังสามารถใช้ได้กับความลาดชันของโครงสร้างที่น้อยกว่า 1 : 4

Mase (1989) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัด โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ บนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ คลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ เพื่อพัฒนาสูตรที่ใช้ในการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัด 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 ณ 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 ณ น้ำลึก (H_0 / L_0) บนสเกล log-log แล้วค่าความลาดชันของเส้นตรงมีแนวโน้มของความสัมพันธ์แตกต่างจาก -0.5 ตามที่ Hunt (1959) ได้เสนอตั้งสมการที่ 2-1 ดังนั้นเขาจึงเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นซัดเชิงประสพการณ์ที่มีรูปแบบ 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 พารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ที่ได้จากการทดลอง

นอกจากนี้ยังแนะนำค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ของความสูงคลื่นซัดรูปแบบต่าง 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

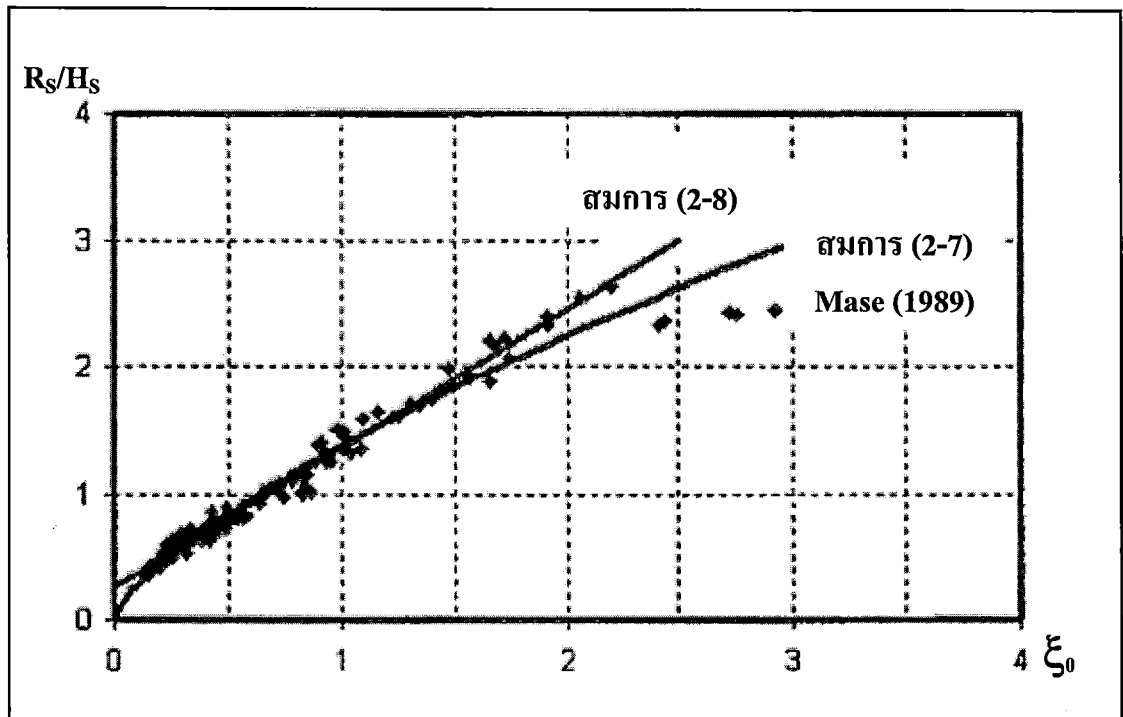
c คือ พารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง

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

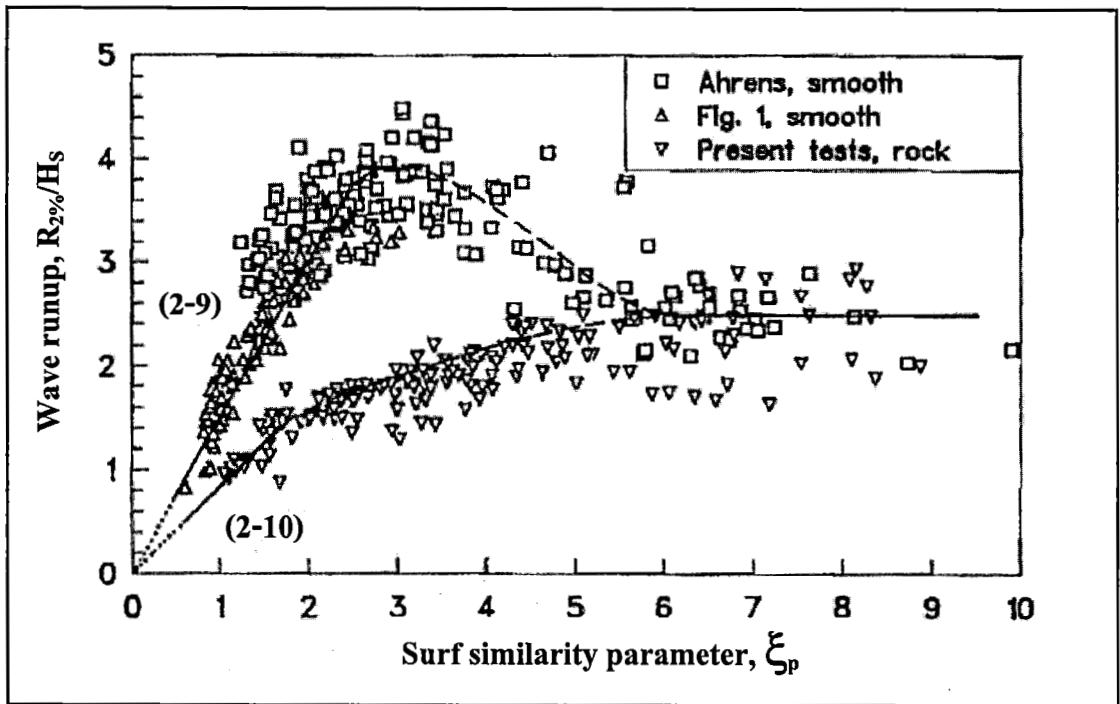


ภาพที่ 2-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s / H_s และ ξ_0 (Hedges & Mase, 2004)

การทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวไม่เรียบ

นอกเหนือจากที่มีการศึกษาความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบ ยังมีผู้ทำการศึกษาและทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงแบบไม่ผิวเรียบ เช่น โครงสร้างแบบหินเรียง แบบกล่องหลุมสลัฟพื้นปลา แบบกล่องนูนสลัฟพื้นปลา 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 ยกเว้นการทดสอบของ Ahrens (1981) ที่มาจากการทดสอบในรางจำลองคลื่นขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองแบบผิวหินเรียง 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 สรุปลค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ (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 และสร้างคลื่นแบบสม่ำเสมอ โดยมีการพิจารณาความขรุขระ (Roughness) คันดิน (Berm) และมุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง (The angle of incidence of wave attack) เข้ามาเกี่ยวข้อง พร้อมเสนอสมการความสูงคลื่นซัดตั้งสมการที่ 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 และมุมของคลื่นที่เข้าปะทะโครงสร้างพื้นเอียง ตามลำดับ

ตารางที่ 2-4 ค่าแฟกเตอร์ความขรุขระของพื้นผิวโครงสร้าง (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 และยังทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับคลื่นไหลล้นข้ามสำหรับการทดสอบความสูงคลื่นซัดจะใช้มาตรวัดคลื่นและบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์และมีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวไว้ด้วย โดยใช้พื้นเอียงผิวเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้ พื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านได้ ส่วนการทดสอบหาคคลื่นไหลล้นข้ามจะใช้พื้นเรียบน้ำซึมผ่านไม่ได้และพื้นขรุขระน้ำซึมผ่านได้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบมีความน่าเชื่อถือที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ (Shore Protection Manual (SPM, 1984); Automated Coastal Engineering System (ACES, 1992)) และผลการทดสอบจากคนอื่น ๆ นอกจากนั้นพบว่าความชันคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่ดีในการอธิบายผลกระทบรวมของความสูงคลื่น และคาบคลื่น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดกับคลื่นไหลล้นข้ามนั้นจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลัง

(Exponential function) ส่วนแฟคเตอร์ความขรุขระ (γ_f) อยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 1 และความพรุน นั้นพบว่าไม่มีนัยสำคัญ

Neelamani and Sandhya (2004) ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างทั้ง พื้นเอียงผิวเรียบ และพื้นเอียงผิวขรุขระน้ำซึมผ่านไม่ได้ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยที่พื้นเอียงผิวขรุขระมี สองรูปแบบ คือ แบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา และแบบกล่องนูนสลับพื้นปลา ดังภาพที่ 2-5 ทดสอบใน รางจำลองคลื่นขนาดความยาว 30 เมตร กว้าง 2 เมตร และลึก 1.7 เมตร ระดับน้ำลึก 0.7 เมตร สร้างคลื่นแบบสม่ำเสมอ และทดสอบพื้นเอียงที่มุม 30, 40, 50, 60 และ 90 องศา จากผลการ ทดสอบพบว่า พื้นเอียงแบบกล่องนูนสลับพื้นปลาสามารถสลายพลังงานคลื่นได้ดีที่สุด โดยสามารถ สลายพลังงานของคลื่นได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับพื้นเอียงผิวเรียบ พร้อมเสนอสมการความสูงคลื่นซัด สำหรับพื้นเอียงทั้งสามรูปแบบ ดังนี้

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

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

สำหรับ $1.74 < \xi < 5.50$ และ C.C. = .87

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องหลุมสลับพื้นปลา

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

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

กรณีพื้นเอียงผิวขรุขระแบบกล่องนูนสลับพื้นปลา

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

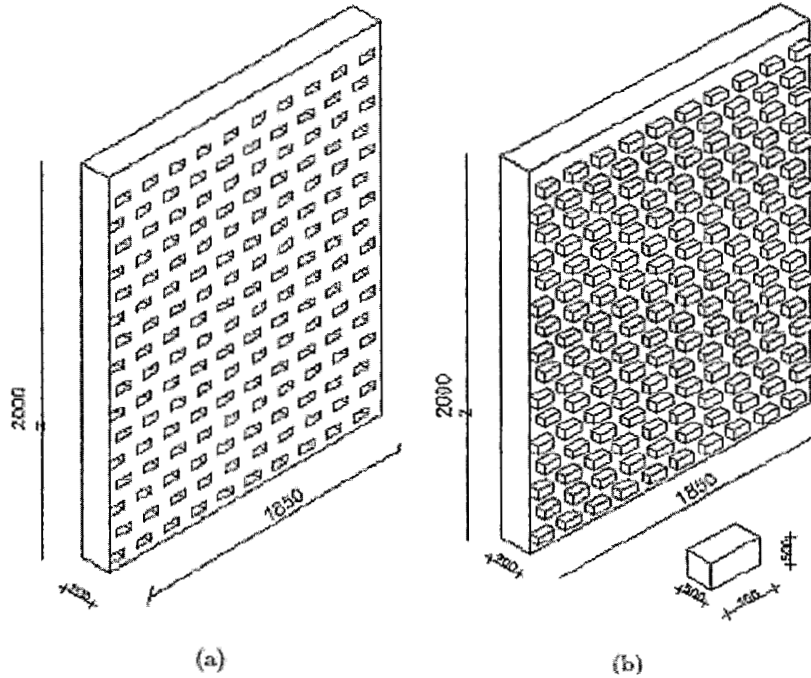
สำหรับ $1.74 < \xi < 5.50$ และ C.C. = .86

โดยที่

$\frac{R}{H}$ และ ξ ดังอธิบายข้างต้น

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

สัมพัทธ์ ($\frac{R}{H}$) 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 ใช้ถังสี่เหลี่ยมมารองน้ำที่ไหลล้นข้ามแบบจำลองเพื่อนำมาหาปริมาตร 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) ทำการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระให้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ในสมการเดียว โดยใช้ข้อมูลการทดลองของ ธรรมนูญ รัชมีมาสเมือง, เอกพล คำชมพู และภาณุ แสงเพชร (2553) ซึ่งได้ทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างพื้นเรียบและโครงสร้างพื้นเอียงผิวขรุขระแบบหินเรียงน้ำซึมผ่านไม่ได้ ในรางจำลองคลื่นขนาดความยาว 16 เมตร กว้าง 60 เซนติเมตร และลึก 80 เซนติเมตร ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียงเท่ากับ 10.0, 12.5, 15.0, 17.5 และ 20.0 องศา สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบจะใช้แผ่นเหล็กความยาว 255 เซนติเมตร และสำหรับพื้นเอียงผิวขรุขระ ผิวของพื้นเอียงถูกเรียงด้วยหินที่มีขนาดเฉลี่ยหรือเรียกว่าความสูงขรุขระ (d) เท่ากับ 9.53, 15.88 และ 22.23 มิลลิเมตร ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 25, 30 และ 35 เซนติเมตร สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ และความลึก 35 เซนติเมตร สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.67, 0.83, 1.00 และ 1.17 เฮิรตซ์ ความสูงคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นบริเวณน้ำลึกและความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ รวมทั้งสิ้น 280 กรณี ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ (R/H_0) และพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ζ) เพื่อสร้างสมการความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงผิวเรียบ โดยมีค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่คำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) คล้ายรูปแบบสมการที่ 2-7 ของ Mase (1989) ซึ่งทำให้ได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดสำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ ดังสมการที่ 2-18 สำหรับสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวขรุขระจะคำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) ของผิวโครงสร้างพื้นเอียงเข้ามาโดยตรง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 2-19 และสุดท้ายได้สมการพยากรณ์ความสูงคลื่นชดสำหรับพื้นเอียงผิวขรุขระซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นเอียงผิวเรียบเพียงแค่ระบุค่าความสูงขรุขระ (d) ดังสมการที่ 2-20

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

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

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

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 พารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ที่ได้จากการทดลอง

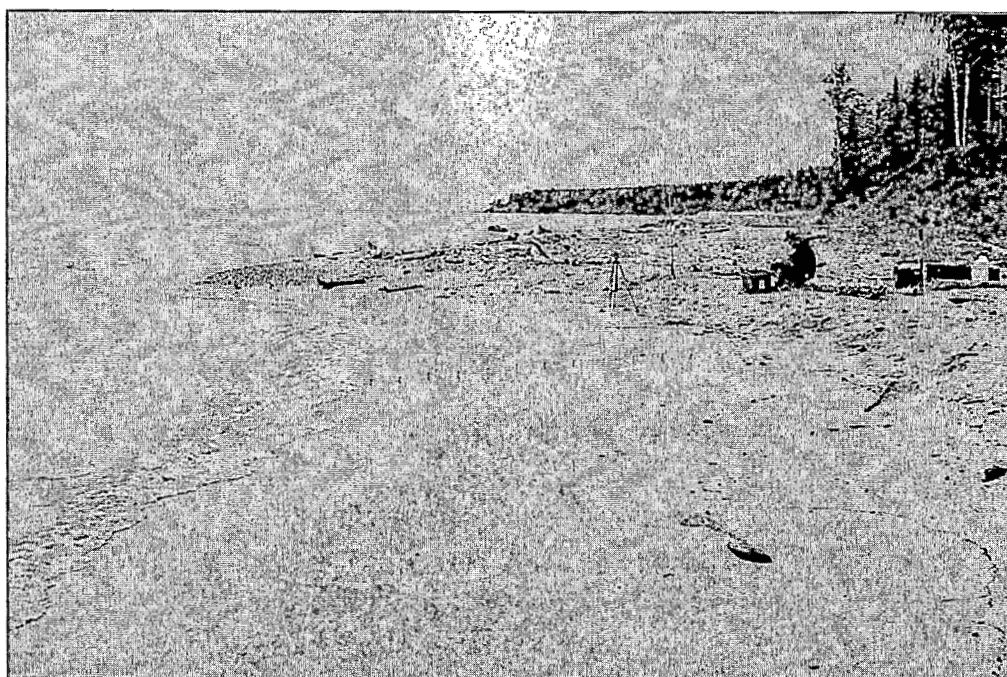
$\frac{d}{H_0}$ คือ ความสูงขรุขระสัมพัทธ์

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) ดำเนินการศึกษาความสูงคลื่นซัดในภาคสนาม ณ ชายหาดธรรมชาติ (Duck, North Carolina) ซึ่งเป็นมหาสมุทรเปิดและมีคลื่นซัดรุนแรง เขาทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวบริเวณเขตคลื่นซัดฝั่ง เป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ ซึ่งข้อมูลภาพเคลื่อนไหวถูกรวบรวมแล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลและนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบเวกเตอร์ มีข้อมูลความสูงคลื่นซัดทั้งหมด 149 ชุด ข้อมูลซึ่งมีความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 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 ชายหาด
ธรรมชาติทั้งหมดหกชายหาด ของ New South Wales มีความลาดชันของหาด 1 : 5 ถึง 1 : 30
ข้อมูลความสูงคลื่นอยู่ในช่วง 0.53 ถึง 3.76 เมตร และคาบคลื่น 6.4 ถึง 11.5 วินาที โดยวัดจากท่อนที่
อยู่ห่างออกไป 30 กิโลเมตร ที่ความลึก 80 เมตร ในแต่ละหาดมีขนาดเม็ดทรายเฉลี่ยที่แตกต่างกันซึ่ง
วัดจากเขตคลื่นซัด มีขนาดเท่ากับ 0.18, 0.40, 0.50, 0.80, 0.21 และ 0.22 มิลลิเมตร จากการ
วิเคราะห์ข้อมูลพวกเขาได้เสนอสมการเชิงเส้นสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดแต่ละรูปแบบ ดัง
สมการที่ 2-23 ถึง สมการที่ 2-30

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

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

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

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

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

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

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 ความสูงคลื่นซัดแบบ Root mean square

$R_{50\%}$ คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นซัดจำนวน 50% ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า (50% Excess runup height)

$R_{1\%}$ คือ ความสูงที่มีเพียงความสูงคลื่นซัดจำนวน 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)) ซึ่งดำเนินการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนหาดทรายและหาดกรวด ผลจากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดขึ้นมาใหม่ โดยมีการพิจารณาเกี่ยวกับความขรุขระของชายหาด นั่นคือ ขนาดของเม็ดทรายและกรวดบริเวณเขตคลื่นแตกตัว และบริเวณเขตคลื่นซัดฝั่ง 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 ซึ่งเป็นชายฝั่งที่มีคลื่นซัดรุนแรง

๖๒๕.๕๘

๘ 3๕3๕

๑.๕

352065

จากพายุ 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 โดยการใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพเคลื่อนไหวในขณะคลื่นซัดเข้าปะทะเขื่อนกันคลื่นวันละ 2 ครั้ง ความสูงคลื่นซัดถูกจำแนกเป็นสเกลจาก 1 ถึง 9 แทนการบอกค่าความสูงคลื่นซัดเป็นตัวเลขในหน่วยความยาว มีลักษณะคล้ายกับสเกลโบฟอร์ต (Beaufort wind scale) ดำเนินการศึกษาทั้งหมด 9 เดือน ตั้งแต่ เดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน 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 จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดความสูงคลื่นซัดที่พยากรณ์กับขนาดความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการสำรวจโดยการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสเกลความสูงคลื่นซัดมีความคลาดเคลื่อน ± 1 สเกล ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นสมการการพยากรณ์จึงมีความแม่นยำในระดับที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เตือนภัยขนาดความรุนแรงของคลื่นซัดได้อีกด้วย

จากการศึกษาที่อ้างถึงข้างต้นซึ่งมีพอสมควร สามารถสรุปสมการการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมา ทั้งการศึกษาในห้องปฏิบัติการและการศึกษาในภาคสนาม ดังตารางที่ 2-5 สมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นซัดส่วนใหญ่ยังคงมีพื้นฐานมาจากสมการของ Hunt (1959) และจะเห็นได้ว่าสมการที่มีการพิจารณาความขรุขระเข้ามาเกี่ยวข้องยังมีจำนวนน้อย และเป็นเพียงการแนะนำค่าแฟกเตอร์ความขรุขระ ได้แก่ สมการของ Ahrens and Seelig (1996) ซึ่งนำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดที่พิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบริเวณเขตคลื่นซัด (d_{sw}) และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบริเวณเขตคลื่นแตกตัว (d_{sr}) สมการค่อนข้างซับซ้อนและจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ N_0 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงคลื่น คาบคลื่น และความเร็วตกตะกอนของทรายบริเวณเขตคลื่นแตกตัว อีกหนึ่งการศึกษาที่มีการพิจารณาความขรุขระของพื้นเอียงหรือความขรุขระของหาด คือ การศึกษาของ TAW (2002) โดยในสมการมีแฟกเตอร์เกี่ยวกับความขรุขระของพื้นเอียง แฟกเตอร์เกี่ยวกับคันดิน และแฟกเตอร์เกี่ยวกับมุมของคลื่น ซึ่งค่าของแฟกเตอร์ความขรุขระจะขึ้นกับลักษณะของวัสดุของพื้นเอียงหรือหาด ส่วนการศึกษาของ Shankar and Jayaratne (2003) ก็มีการแนะนำช่วงของแฟกเตอร์ความขรุขระที่เหมาะสม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ TAW (2002) มีเพียงสมการของ ธรรมบุญ รัตมี มาสเมือง (2554) เท่านั้นที่คำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) โดยตรงและเป็นสมการอย่างง่ายที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระในสมการเดียวทำให้เกิดความสะดวกในการประมาณค่าความสูงคลื่นซัดบนหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง สำหรับสมการที่ได้จากการศึกษาในภาคสนามของ Na et al. (2011) ก็เป็นอีกหนึ่งการศึกษาที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสมการลดถอยเชิงเส้นพหุคูณสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่นำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกว่าสมการรูปแบบดั้งเดิม 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	$\frac{R_{char}}{H_s} = a \xi_m$ <p>For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m \leq 1.5$</p> $\frac{R_{Char}}{H_s} = b \xi_m^c$ <p>For $\frac{1}{6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1.5}, \xi_m > 1.5$</p> $\frac{R_{Char}}{H_s} = d'$ <p>For $d' = \text{Maximum}$</p>
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	$\frac{R_{2\%}}{H_s} = 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\alpha \cdot \xi_0$ <p>For $\frac{1}{8} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{1}, \xi_0 < 1.8$</p>

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 $1.8 < \xi < 5.5$
ธรรมบุญ 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 $\frac{1}{5.6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{2.7}$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$, $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$
ธรรมบุญ 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 $\frac{1}{5.6} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{2.7}$, $0.002 \leq \frac{H_0}{L_0} \leq 0.03$, $0.3 \leq \frac{d}{H_0} \leq 3.0$
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

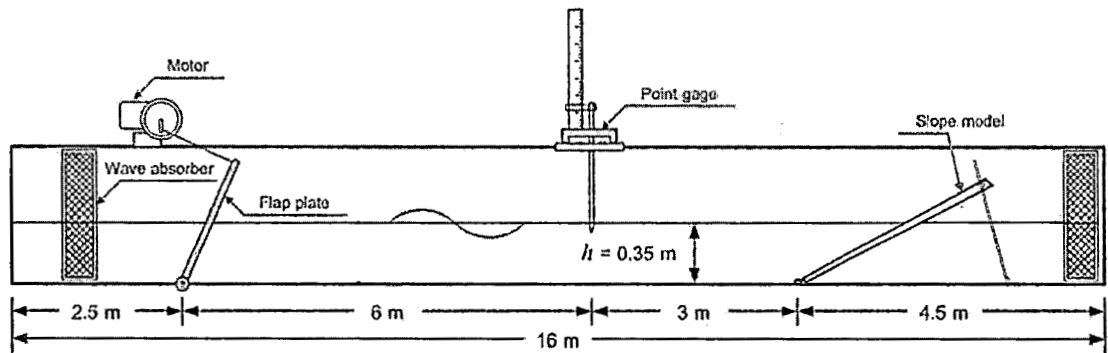
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายถึงวิธีการดำเนินการวิจัยอย่างละเอียด ซึ่งโครงการวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียง โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทดสอบคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงทั้งแบบผิวเรียบและแบบขั้นบันไดในรางจำลองคลื่น แล้วนำข้อมูลการทดลองไปวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชัต พร้อมเสนอสมการทำนายความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบขั้นบันไดในสมการเดียว ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

การทดลองความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงแบบต่าง ๆ ได้แก่ พื้นเอียงแบบผิวเรียบ และพื้นเอียงแบบผิวขั้นบันได โดยนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายความสูงคลื่นชัตอย่างง่ายด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระในสมการเดียว

การทดลองความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงแบบต่าง ๆ ได้ดำเนินการในรางจำลองคลื่นที่มีความยาว 16 เมตร และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสมำเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความเร็วรอบของใบพัด 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที หรือคิดเป็นความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตร ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นและด้านหลังโครงสร้างจำลองพื้นเอียงมีการติดตั้งตัวสลายคลื่น (Wave absorber) เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 เซนติเมตร ความสูงของคลื่น (H) และความสูงคลื่นชัต (R) บนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ ซึ่งทำการวัดอย่างละ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีทั้งหมดสองลักษณะดังที่กล่าวไว้ข้างต้น น้ำซึมผ่านไม่ได้ทุกลักษณะ และดำเนินการทดลองทั้งหมด 1,050 กรณี แบ่งเป็นพื้นเอียงผิวเรียบ 210 กรณี แบบขั้นบันได 840 กรณี ลักษณะและตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3-1 และสภาพการทดลองทั้งหมดถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 3-1 สรุปสภาพการทดลอง

พารามิเตอร์	ผิวเรียบ	บันได
ความลาดชันของพื้นเอียง, θ (องศา)	15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0	14, 16, 18, 22, 27
ความลึกของน้ำ, h (ซม.)	35	
ระยะค้นซักข้อเหวี่ยง (มม.)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200	
ความเร็วรอบของใบพัดน้ำ (รอบ/นาที)	50, 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	
ความสูงขรุขระของผิวพื้น, d (ซม.)	0	2, 3, 4, 5
จำนวนการทดสอบ (กรณี)	210	840

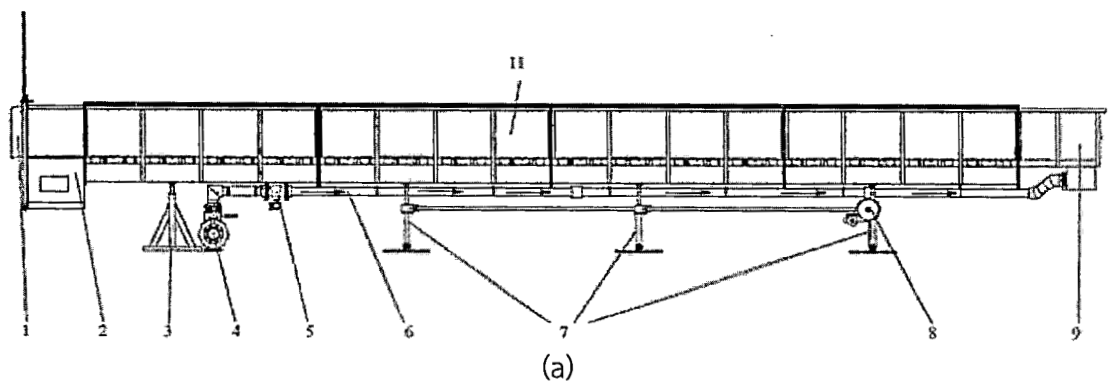
เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

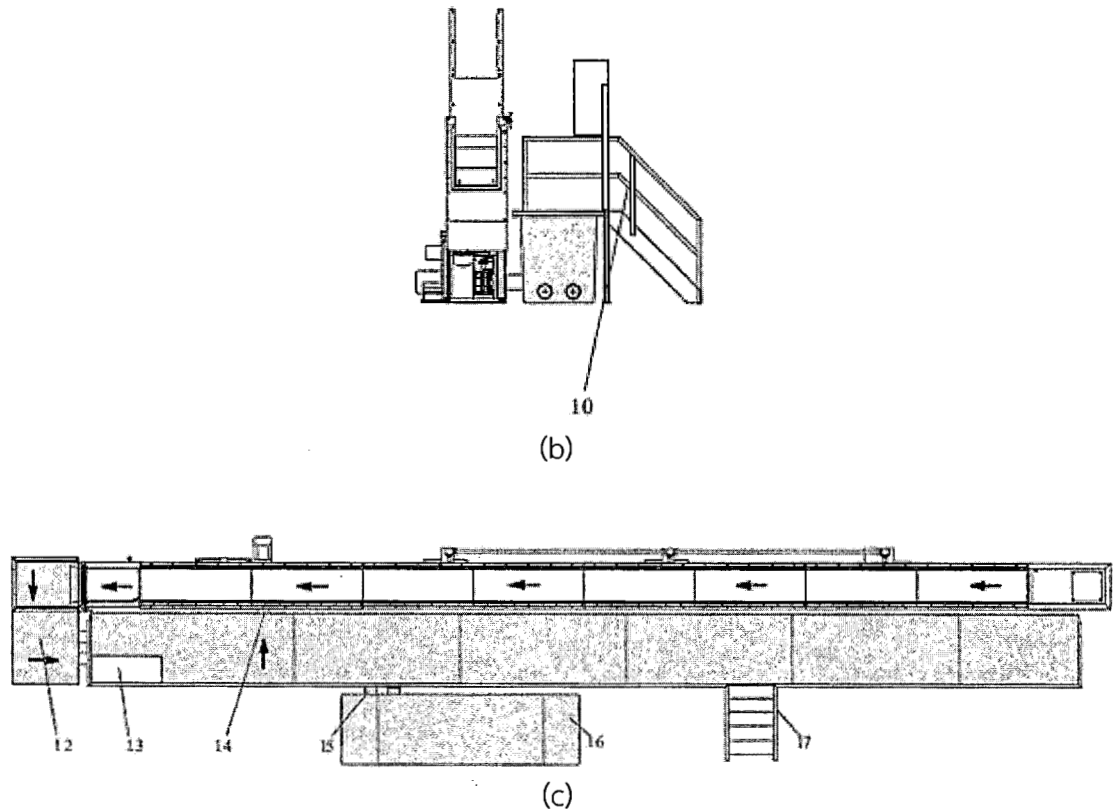
รางจำลองคลื่น คือ เครื่องมือการทดลองทางชลศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นรางจำลองคลื่นและรางทดลองการไหลได้ เครื่องมือมีลักษณะเป็นรางน้ำขนาดใหญ่ มีความยาวช่วงทดสอบ 16 เมตร หน้าตัดช่วงทดสอบกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 80 เซนติเมตร มีถังเก็บน้ำอยู่ข้างล่าง มีเครื่องสูบน้ำสำหรับสร้างการไหลผ่านรางและวนกลับมาที่ถังเก็บน้ำเพื่อสูบลูกกลับไปที่รางวนเป็นวงจร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

ในกรณีการใช้รางเป็นรางจำลองคลื่นนั้น ตัวรางจะต้องถูกทำให้เป็นระบบปิดโดยการปิดกั้นด้านท้ายน้ำ ใต้น้ำเข้าไปในรางจนได้ปริมาณที่ต้องการ 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





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)

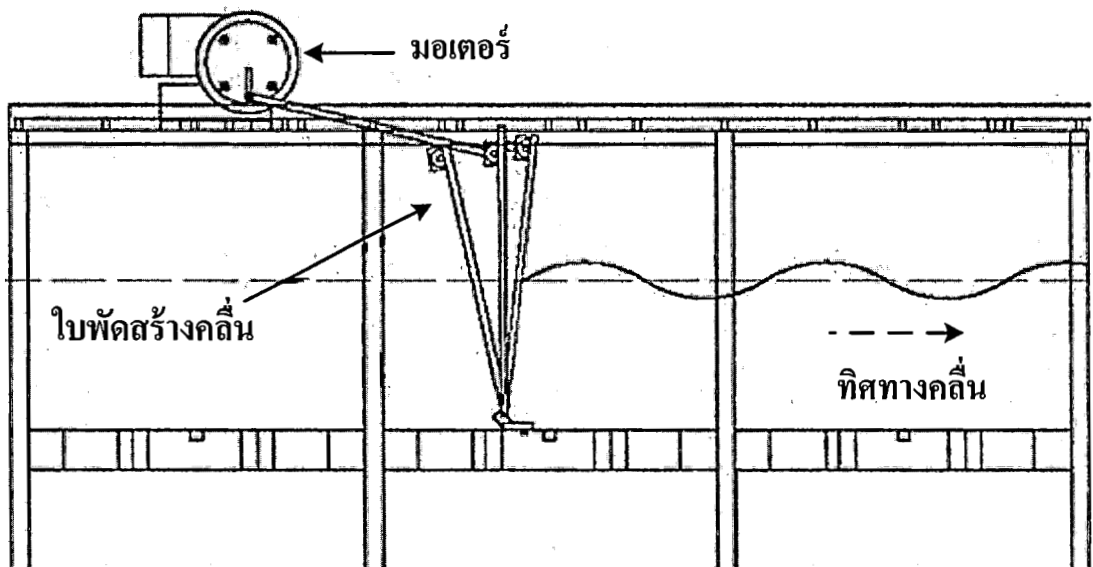
หมายเลข 15: ท่อเชื่อมระหว่างถังเก็บน้ำ (Pipe connection)

หมายเลข 16: ถังกักเก็บน้ำ (Return tank)

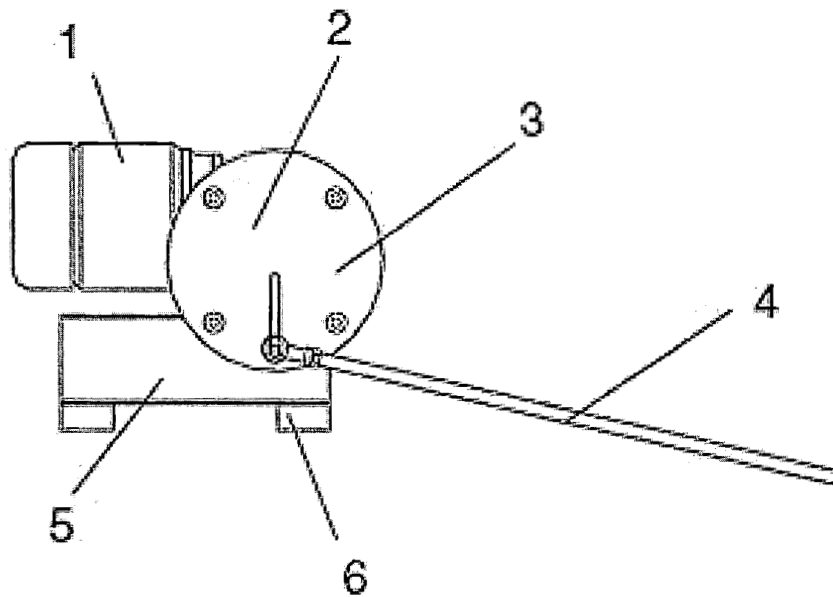
หมายเลข 17: บันไดทางขึ้น (Gallery stairway)

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 โดยที่ลำดับของความเร็วในการหมุนมีหลากหลายขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องมีการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์วัดระดับความดันไฟฟ้าดั่งที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนประกอบของมอเตอร์และคันชักข้อเหวี่ยงแสดงดังภาพที่ 3-4 และส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่นแสดงดังภาพที่ 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

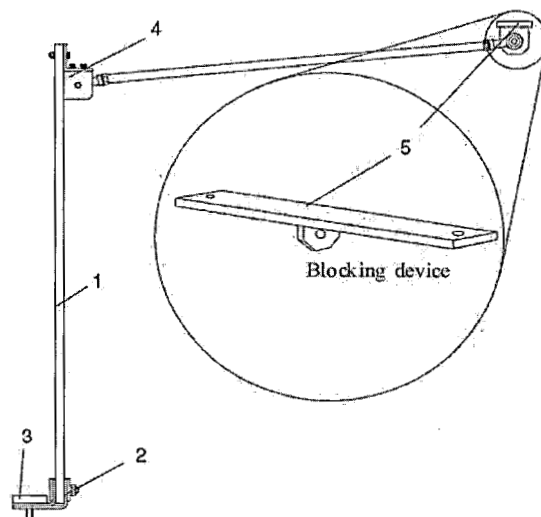
หมายเลข 1: ใบพัดสร้างคลื่น (Paddle and blocking plate)

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: ตัวยึดคั่นชั้กับใบพัด (Holder for connecting the pushing rod to the paddle and blocking plate)

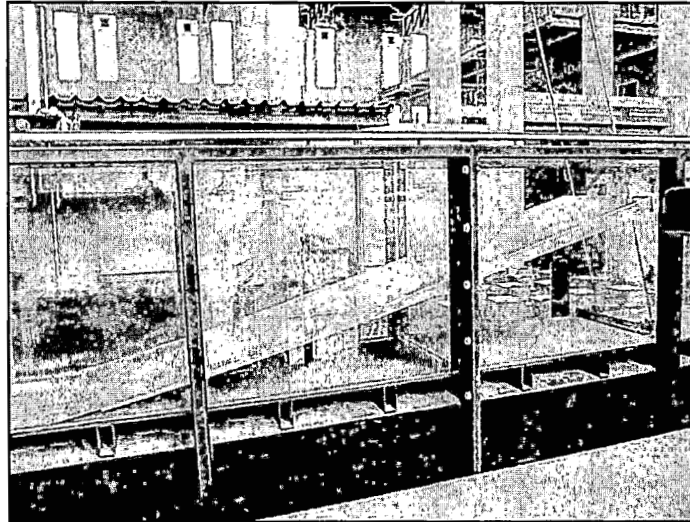
หมายเลข 5: อุปกรณ์สำหรับยึดใบพัดให้กลายเป็นแผ่นกั้นน้ำ (Device for blocking the plate)



ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของใบพัดสร้างคลื่น (GUNT, 2001c)

โครงสร้างพื้นเอียง

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

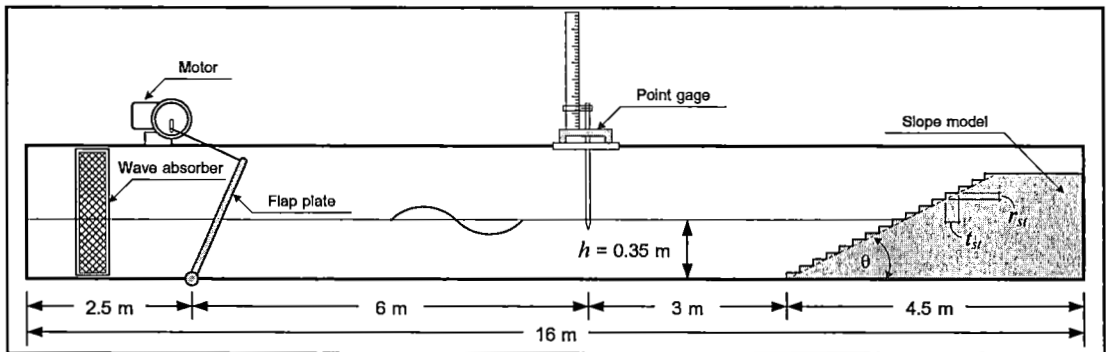


ภาพที่ 3-6 พื้นเอียงผิวเรียบ

พื้นบันไดที่ใช้ในการทดลองทำมาจากแผ่นเหล็กสังกะสีเรียบ ถูกพับโดยเครื่องพับแผ่นสังกะสีให้เป็นขั้นบันได ซึ่งมีขนาดความสูงขรุขระ (d) หรือความสูงลูกตั้งของบันได ได้แก่ 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอนเท่ากับ 1 : 2.0, 1 : 2.5, 1 : 3.0, 1 : 3.5 และ 1 : 4.0 ซึ่งอัตราส่วนนี้จะทำให้บันไดตั้งฉากกับแผ่นพื้นเอียงที่มุม 27, 22, 18, 16 และ 14 องศาตามลำดับ จากขนาดลูกตั้ง 4 ค่า และอัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอน 5 ค่า ทำให้ได้แบบจำลองพื้นเอียงขั้นบันไดจำนวน 20 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3-3 สำหรับการติดพื้นบันไดกับโครงสร้างพื้นเอียงผิวเรียบกระทำโดยใช้แผ่นไม้ยึดติดกับพื้นเรียบก่อน จากนั้นจึงนำแผ่นบันไดที่เตรียมไว้ยึดติดกับแผ่นไม้ จึงสามารถนำไปติดตั้งในรางจำลองคลื่นได้ การจำลองพื้นเอียงแบบขั้นบันไดแสดงดังภาพที่ 3-7

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดแบบจำลองพื้นเอียงแบบผิวชั้นบันได

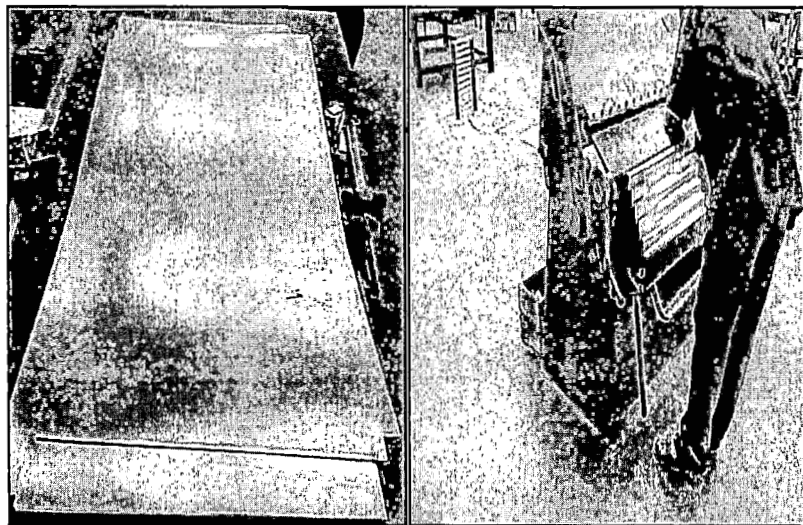
ลูกตั้ง:ลูกนอน	ลูกตั้ง (ซม.)	ลูกนอน (ซม.)	มุม (องศา)
1 : 2.0	2.0	4.0	27
1 : 2.5	2.0	5.0	22
1 : 3.0	2.0	6.0	18
1 : 3.5	2.0	7.0	16
1 : 4.0	2.0	8.0	14
1 : 2.0	3.0	6.0	27
1 : 2.5	3.0	7.5	22
1 : 3.0	3.0	9.0	18
1 : 3.5	3.0	10.5	16
1 : 4.0	3.0	12.0	14
1 : 2.0	4.0	8.0	27
1 : 2.5	4.0	10.0	22
1 : 3.0	4.0	12.0	18
1 : 3.5	4.0	14.0	16
1 : 4.0	4.0	16.0	14
1 : 2.0	5.0	10.0	27
1 : 2.5	5.0	12.5	22
1 : 3.0	5.0	15.0	18
1 : 3.5	5.0	17.5	16
1 : 4.0	5.0	20.0	14



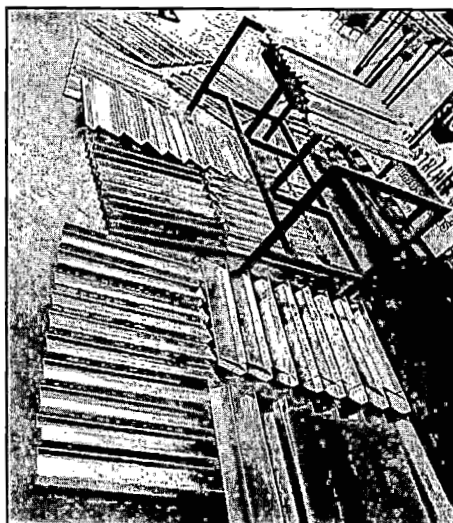
ภาพที่ 3-7 การจำลองพื้นเอียงแบบขั้นบันได

ขั้นตอนการทำพื้นเอียงแบบผิวขั้นบันได

1. ออกแบบขนาดของบันได โดยกำหนดขนาดความสูงขรุขระ (d) หรือความสูงลูกตั้งของบันไดเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร และกำหนดอัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอนเพื่อที่จะทำให้บันไดตั้งฉากกับแผ่นพื้นเอียงที่มุมใกล้เคียงกับการทดลองที่ผ่านมาซึ่งจะได้มุม 14, 16, 18, 22 และ 27 องศา
2. นำแผ่นเหล็กสังกะสีเรียบมาตัดด้วยเครื่องพับสังกะสีให้เป็นขั้นบันไดตามทีออกแบบไว้จนครบทุกขนาด ดังภาพที่ 3-8 และภาพที่ 3-9

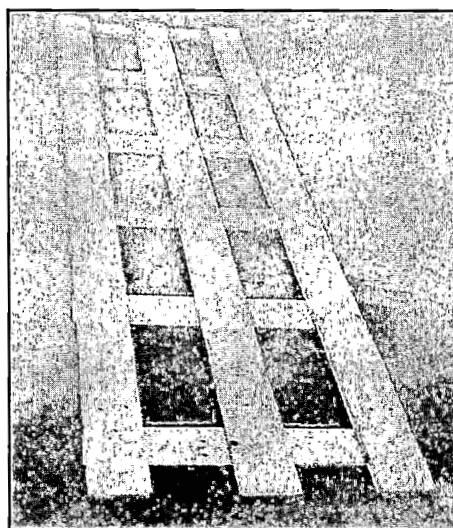


ภาพที่ 3-8 ใช้เครื่องพับสังกะสีเป็นขั้นบันได

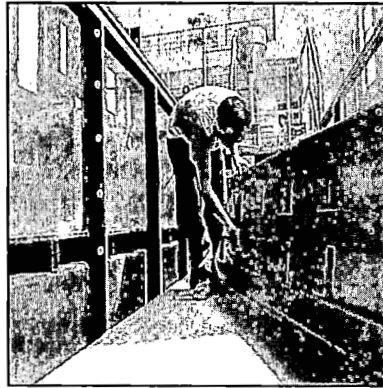


ภาพที่ 3-9 แผ่นสังกะสีที่พับแล้ว

3. นำไม้ยาว 2.50 เมตร มาประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 3-10 ให้มีความกว้างเท่ากับพื้นเอียงผิวเรียบ เพื่อเป็นฐานรองรับแผ่นสังกะสี และเจาะรูที่แผ่นไม้ สำหรับใช้นอตยึดกับแผ่นพื้นเรียบดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-10 ฐานไม้รองแผ่นสังกะสี



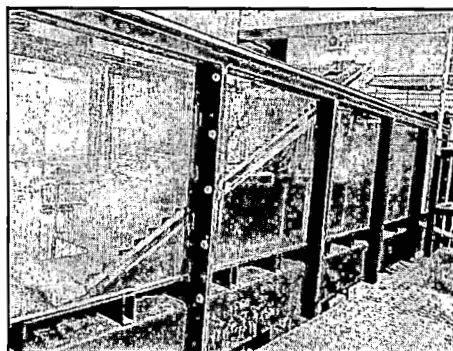
ภาพที่ 3-11 ยึดติดแผ่นไม้บนพื้นเรียบให้แน่น

4. นำแผ่นสังกะสีที่พับเป็นชั้นบันไดมายึดเข้ากับแผ่นไม้บนพื้นเอียง โดยใช้ไขควงไฟฟ้า
ชั้นน้อตให้ทะลุแผ่นสังกะสีเข้าไปยึดกับแผ่นไม้ ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 ยึดแผ่นสังกะสีเข้ากับแผ่นไม้

5. นำแบบจำลองพื้นเอียงแบบขั้นบันไดไปติดตั้งในรางจำลองคลื่น ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 ติดตั้งพื้นเอียงแบบขั้นบันได

วิธีการทดลอง

การทดลองความสูงคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงทั้งสองลักษณะ คือ แบบผิวเรียบ และแบบขั้นบันได มีขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองที่เหมือนกัน ดังนี้

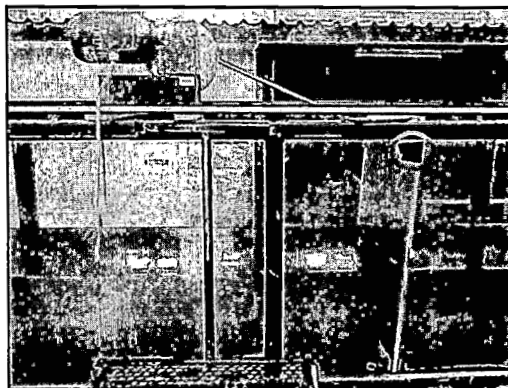
ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

1. ยกบานประตูน้ำด้านซ้ายน้ำให้ขึ้นสูงสุด จากนั้นใช้ดินน้ำมันอุดตามแนวขอบประตูทั้งสามด้าน ได้แก่ ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านล่าง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลออกจากรางจำลองคลื่นไปได้ ดังภาพที่ 3-14



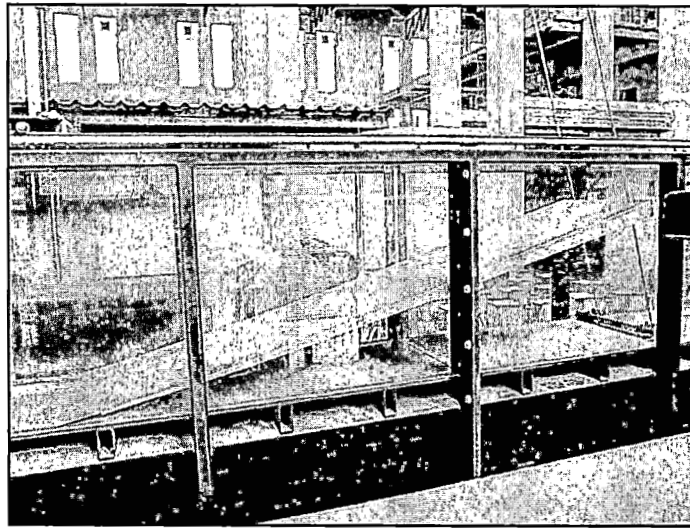
ภาพที่ 3-14 การอุดรูรั่วด้วยดินน้ำมัน

2. ติดตั้งใบพัดสร้างคลื่นที่มีการยึดติดแผ่นยางไว้เรียบร้อยแล้วที่ระยะ 2.5 เมตร จากทางน้ำออก ดังภาพที่ 3-15 (บริเวณขอบบนของรางจำลองคลื่นมีระยะบอก) และในขณะที่ใบพัดทำงาน ควรใช้น้ำมันหล่อลื่นทาบริเวณแผ่นยางด้านบน บริเวณจุดวงกลมสีแดง ดังภาพที่ 3-15 เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับกระจกรางจำลองคลื่น ซึ่งช่วยให้แผ่นยางใช้งานได้นานขึ้น.

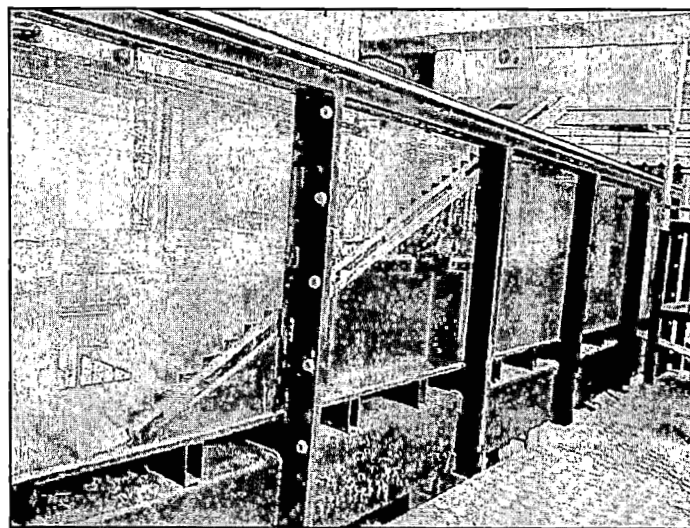


ภาพที่ 3-15 เครื่องกำเนิดคลื่น

3. ติดตั้งแบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง และนำวัสดุ เช่น ก้อนคอนกรีตหรือลึงพลาสติก
 อย่างหนา มารองไว้ใต้พื้นเอียงเพื่อค้ำยันไม่ให้พื้นเอียงแอ่นจนเสียรูปและยังกันไม่ให้พื้นเอียง
 กระเพื่อมจากแรงคลื่นขณะทำการทดลอง โดยเริ่มดำเนินการทดลองจากกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ
 และพื้นเอียงแบบขั้นบันได ดังภาพที่ 3-16 ถึง ภาพที่ 3-17 ตามลำดับ

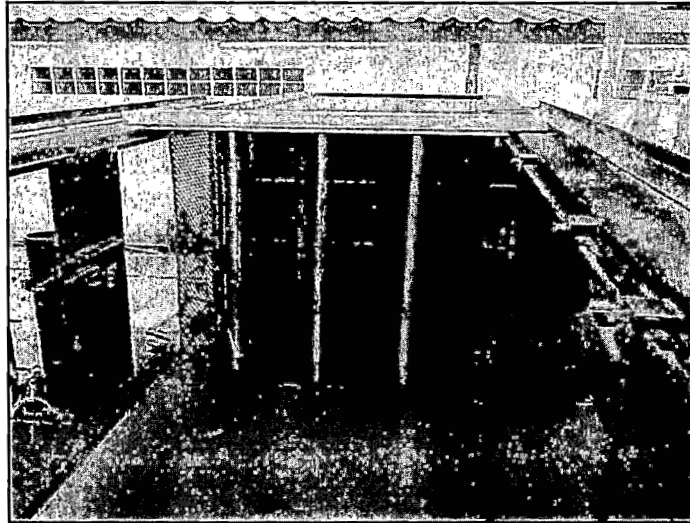


ภาพที่ 3-16 พื้นเอียงผิวเรียบ



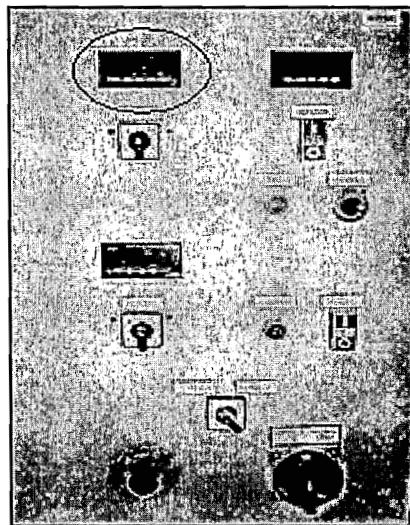
ภาพที่ 3-17 พื้นเอียงแบบขั้นบันได

4. ติดตั้งตัวสลายคลื่น ดังภาพที่ 3-18 จำนวนสองตัวโดยติดตั้งที่ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นและด้านหลังโครงสร้างจำลองพื้นเอียง เพื่อลดการเกิดคลื่นสะท้อน



ภาพที่ 3-18 ตัวสลายพลังงานคลื่น

5. ตรวจสอบว่าเครื่องทดสอบทางน้ำไหล (Large flow channel) อยู่ในแนวระดับหรือไม่ โดยปรับค่าความชันบนกล่องควบคุมให้ใกล้เคียงค่าศูนย์ ดังภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 แผงควบคุมเครื่องทดสอบทางน้ำไหล

6. เปิดน้ำเข้าสู่รางจำลองคลื่น โดยให้ระดับน้ำมีความลึก 35 เซนติเมตร ใช้ที่วัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ วัดความลึกของน้ำ (h) ดังภาพที่ 3-20

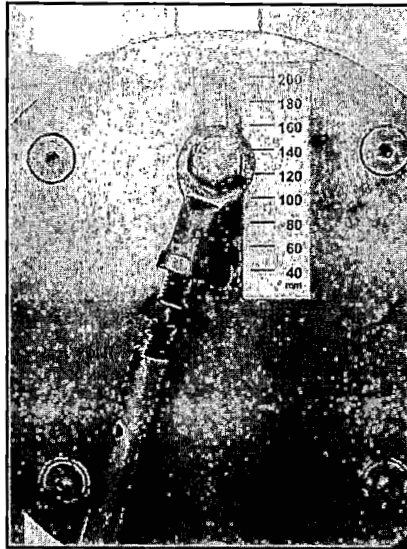


ภาพที่ 3-20 การวัดระดับน้ำนิ่ง

7. เสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเตรียมการทดลองต่อไป

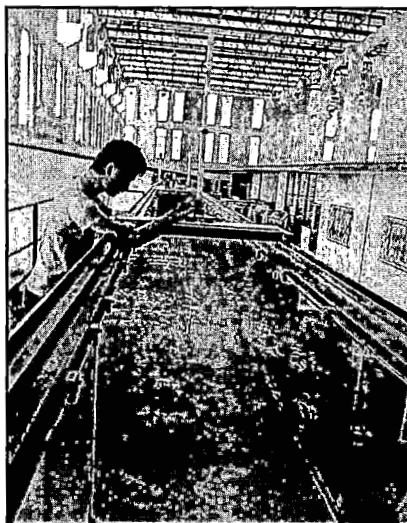
ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองความสูงคลื่นชัดโดยเริ่มจากกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ จากนั้นจึงทดลองกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระ ซึ่งได้แก่ พื้นเอียงแบบหินเรียง พื้นเอียงแบบชั้นบันได และพื้นเอียงแบบถุนทราย ตามลำดับ โดยกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระต้องทำการทดลองที่ละขนาด
2. ปรับพื้นเอียงให้ได้ความลาดชันตามต้องการ อาจจะเริ่มจากความลาดชันน้อยไปมาก หรือความลาดชันมากไปน้อยตามความเหมาะสม
3. ปรับระยะคันชักข้อเหวี่ยง (Stroke) ดังภาพที่ 3-22 โดยเริ่มการทดสอบที่ระยะ 80 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-22 ระยะคันชักข้อเหวี่ยง

4. เปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดคลื่นที่แผงควบคุม โดยเริ่มทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเท่ากับ 50 รอบต่อนาที จากนั้นรอนจนคลื่นมีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอประมาณ 2 นาที
5. ใช้เครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้วัดค่าความสูงของคลื่นในตำแหน่งที่คลื่นเกิดการก่อตัวขึ้นช่วงที่ห่างจากเครื่องกำเนิดคลื่นสองในสาม หรือที่ระยะประมาณ 8.50 เมตร จากประตูท้ายน้ำ ดังภาพที่ 3-22 (เนื่องจากได้ทดลองหาช่วงที่คลื่นก่อตัวอย่างสมบูรณ์ที่สุดจึงเลือกช่วงดังกล่าว) วัดและบันทึกค่าความสูงคลื่น (H) จำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเลื่อนเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้มาวัดค่าความสูงคลื่นซัด (R) ที่แบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง โดยพยายามวัดคลื่นซัดที่มีความสูงที่สุดบนพื้นเอียง บันทึกค่าความสูงคลื่นซัดจำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3-23 การวัดความสูงของคลื่น

6. ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคลื่นเป็น 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที ตามลำดับ แล้วปฏิบัติตามข้อ 4 และข้อ 5 จนครบทุกความเร็วรอบดังที่กล่าวมา จากนั้นปิดสวิตซ์เครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อเปลี่ยนระยะคันชัก

7. เปลี่ยนระยะคันชักข้อเหวี่ยงเป็น 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยแต่ละระยะให้ปฏิบัติตามข้อ 4 ถึง ข้อ 6 จนครบทุกระยะคันชักข้อเหวี่ยง

8. เปลี่ยนความลาดชันของแบบจำลองโครงสร้างพื้นเอียง โดยแต่ละความลาดชันให้ปฏิบัติตามข้อ 3 ถึง ข้อ 7 จนครบทุกความลาดชัน

9. กรณีพื้นเอียงผิวเรียบจะเสร็จสิ้นการดำเนินการทดลอง แต่สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระให้ทำการเปลี่ยนพื้นเอียงที่มีขนาดความสูงขรุขระค่าต่อไป แล้วทำการทดลองโดยปฏิบัติตามข้อ 2 ถึง ข้อ 8 จนครบทุกขนาดจึงเสร็จสิ้นการดำเนินการทดลอง

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

บทนี้อธิบายถึงผลการทดลองความสูงคลื่นชดบนโครงสร้างลาดเอียงทั้งหมดสองลักษณะ ได้แก่ พื้นเอียงผิวเรียบ พื้นเอียงผิวขุ่นบันได รวมทั้งสิ้น 1,050 กรณี (รายละเอียดสำหรับการทดลอง อธิบายในบทที่ 3) รวมถึงการได้มาซึ่งสมการความสูงคลื่นชดสำหรับโครงสร้างลาดเอียงแต่ละแบบที่ คำนึงถึงความสูงขรุขระ (d) และนำข้อมูลผลการทดลองไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นชด บนโครงสร้างลาดเอียง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ผลการทดลองและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นชดสำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ

จากการศึกษาของ Mase (1989) ได้เสนอสมการความสูงคลื่นชด โดยการสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ (R/H) กับพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่นหรือ Surf Similarity Parameter (ξ) บนสเกล Log-Log ดังสมการที่ 4-1

$$\frac{R}{H} = a\xi^b \quad (4-1)$$

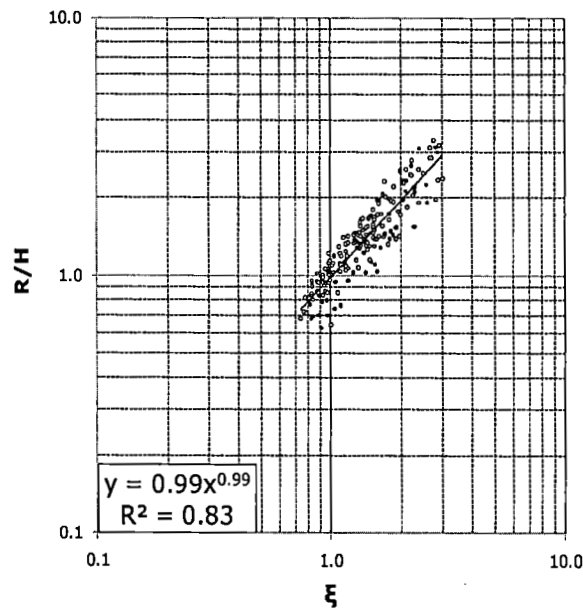
สำหรับ $\frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5}$, $0.007 \leq \frac{H}{L}$ และเมื่อ a และ b คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง

ในการศึกษานี้ สมการที่ 4-1 ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นสมการความสูงคลื่นชด สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบ แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะผ่านการกรองข้อมูลก่อน เพื่อตัดค่าที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ๆ ออก โดยวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R/H และ ξ ซึ่งพบว่า ความสูงคลื่นชดสัมพันธ์ R/H เพิ่มขึ้น การกระจายของข้อมูลก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะช่วง $R/H > 2.0$ ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่คลื่นถูกสร้างขึ้นด้วยความชันคลื่น H/L น้อย ๆ ($H/L < 0.03$) ส่งผลให้พารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ξ มีค่ามาก การกระจายของข้อมูลจะเริ่มชัดเจนประมาณช่วง $\xi > 2.5$ ผลการทดลองสำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและช่วงของการกระจายข้อมูลที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ (Ahrens (1981); Mase (1989); Van der Meer & Stam (1992)) เป็นอย่างดี และเพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับการศึกษาของ Battjes (1974) ที่มีการจำแนกชนิดการแตกตัวของคลื่นตามพารามิเตอร์ ξ ดังนั้นกรณีพื้นเอียงผิวเรียบจึงกรองข้อมูลโดยการตัดข้อมูลในช่วง $\xi > 3.0$ ออก ซึ่งเป็นช่วงการแตกตัวแบบ Surfing และ Collapsing เมื่อทำการกรองข้อมูลแล้วจึงวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง

R/H และ ξ อีกครั้ง ดังภาพที่ 4-1 ค่าตัวคูณ a และตัวยกกำลัง b ถูกคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังนั้นจะได้สมการความสูงคลื่นซัดของคลื่นสม่ำเสมอบนพื้นเอียงความลาดชันน้อย ผิวเรียบ และน้ำซึมผ่านไม่ได้ สำหรับการศึกษาี้ ดังสมการที่ 4-2

$$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99} \quad (4-2)$$

สำหรับ $15^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$, $0.63 \leq \frac{R}{H} \leq 3.35$, $0.01 \leq \frac{H}{L} \leq 0.15$, $0.74 \leq \xi \leq 3.00$ และเมื่อ $a = 0.99$ และ $b = 0.99$



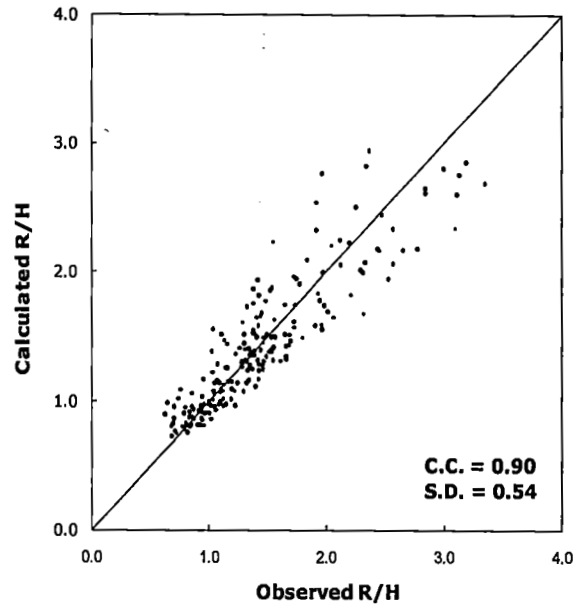
ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ (R/H) กับ Surf Similarity (ξ) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ

จากการทดลอง เมื่อปรับความเร็วรอบหรือความถี่ของคลื่น (Frequency) ระยะคันชักข้อเหวี่ยง และความลาดชันของพื้นเอียง จนครบทุกกรณี ซึ่งทำให้เกิดสภาพคลื่นที่แตกต่างกัน และได้ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองสำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งเป็นพารามิเตอร์ก่อนการกรองข้อมูล และพารามิเตอร์หลังการกรองข้อมูล สรุปไว้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

พารามิเตอร์	ก่อนการกรองข้อมูล			หลังการกรองข้อมูล		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
R (ซม.)	3.00	19.20	9.46	3.00	19.20	9.46
H (ซม.)	1.88	13.00	6.93	1.88	13.00	7.03
L (ซม.)	56.13	186.03	108.52	56.13	186.03	106.24
$\tan \theta$	0.27	0.47	0.37	0.27	0.47	0.36
R/H	0.63	3.35	1.48	0.63	3.35	1.44
H/L	0.01	0.15	0.08	0.01	0.15	0.08
ξ	0.74	3.60	1.50	0.74	3.00	1.45
a	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
b	0.96	0.96	0.96	0.99	0.99	0.99

ภาพที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ กับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4-2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าทั้งสองประเภทมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันและกัน หรือหมายความว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถทำนายความสูงคลื่นซัดในแต่ละกรณีที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: C.C.) เท่ากับ 0.90 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.) เท่ากับ 0.54 แสดงให้เห็นว่า เซตของข้อมูลนี้มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยอยู่พอสมควร เมื่อสังเกตจากภาพที่ 4-2 ก็พบว่า ความเบี่ยงเบนหรือการแกว่งของชุดข้อมูลจะเกิดมากโดยเฉพาะเมื่อค่า R/H มีค่ามาก ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่คลื่นถูกสร้างขึ้นด้วยความสูงน้อยมาก ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ช่วงการทดสอบดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นระหว่างการวัดความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียง



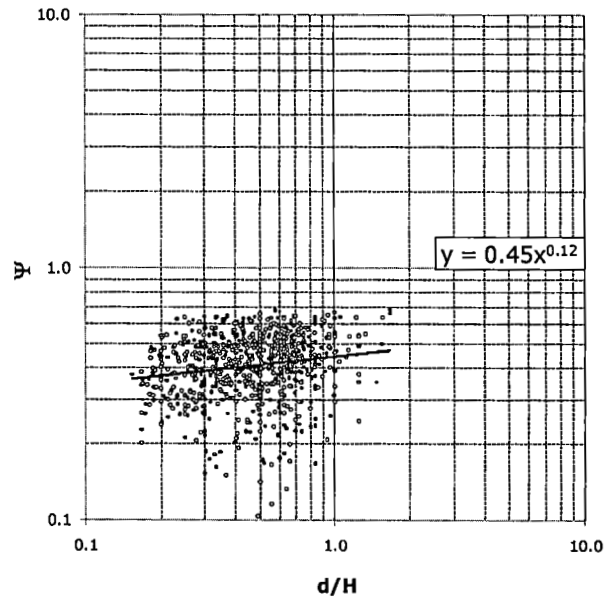
ภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ

ผลการทดลองและการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวน้ำชันบันได

การพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดกรณีพื้นเอียงผิวน้ำชันบันไดมีรูปแบบสมการความสูงคลื่นซัดดังสมการที่ 4-3 ความสูงขรุขระ d หมายถึง ความสูงลูกตั้งของชันบันได (สรุปไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3-1) สำหรับการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัดสำหรับพื้นเอียงผิวน้ำชันบันไดให้มีความแม่นยำมากขึ้น จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการทดลองที่ผ่านการกรองข้อมูลก่อน เพื่อตัดค่าที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ๆ ออก โดยวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R/H และ ξ พบว่า การเบี่ยงเบนของข้อมูลนั้นมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ ดังนั้น กรณีนี้จึงกรองข้อมูลโดยการตัดข้อมูล $\xi > 3.0$ ออกเช่นเดียวกัน แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ψ และ d/H เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ c และ d'' ดังแสดงในภาพที่ 4-3 ค่าตัวคูณ c และตัวยกกำลัง d'' ถูกคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้สมการความสูงคลื่นซัดของคลื่นสม่ำเสมอบนพื้นเอียงความลาดชันน้อย ผิวน้ำชันบันได และน้ำซึมผ่านไม่ได้ สำหรับการศึกษานี้ ดังสมการที่ 4-3

$$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99} \left[1 - 0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.12} \right] \quad (4-6)$$

สำหรับ $14^\circ \leq \theta \leq 27^\circ$, $0.31 \leq \frac{R}{H} \leq 1.53$, $0.01 \leq \frac{H}{L} \leq 0.19$, $0.64 \leq \xi \leq 2.99$,
 $0.15 \leq \frac{d}{H} \leq 1.67$ และเมื่อ $a = 0.99$, $b = 0.99$, $c = 0.45$ และ $d'' = 0.12$



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) กับ Ψ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวขี้บันได

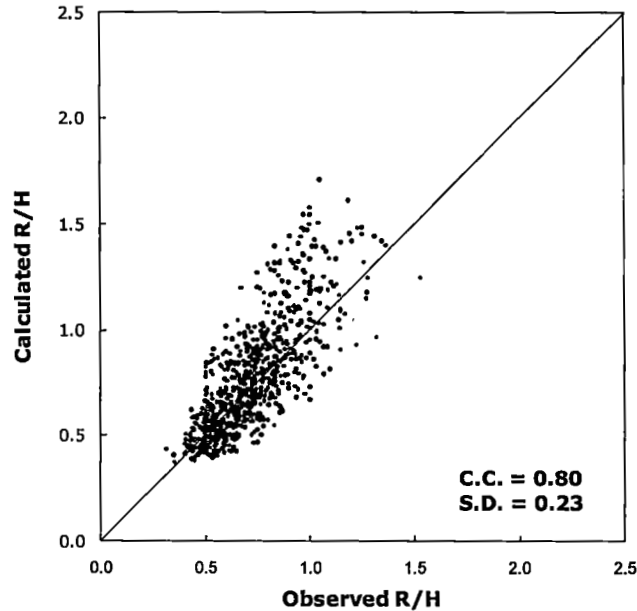
จากการทดลอง เมื่อปรับความเร็วรอบหรือความถี่ของคลื่น ระยะคันชักข้อเหวี่ยง ความลาดชันของพื้นเอียง และขนาดความสูงขรุขระ จนครบทุกกรณี ซึ่งทำให้เกิดสภาพคลื่นที่แตกต่างกัน และได้ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองสำหรับกรณีพื้นเอียงผิวแบบขี้บันได โดยแบ่งเป็นพารามิเตอร์ก่อนการกรองข้อมูล และพารามิเตอร์หลังการกรองข้อมูล สรุปไว้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได

พารามิเตอร์	ก่อนการกรองข้อมูล			หลังการกรองข้อมูล		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
R (ซม.)	1.30	11.70	5.19	1.30	11.70	5.24
H (ซม.)	1.80	14.12	7.43	2.40	14.12	7.56
L (ซม.)	56.13	186.03	108.52	56.13	186.03	106.41
d (ซม.)	2.00	5.00	3.50	2.00	5.00	3.51
$\tan \theta$	0.25	0.51	0.35	0.25	0.51	0.35
R/H	0.31	1.90	0.73	0.31	1.53	0.71
H/L	0.01	0.19	0.08	0.01	0.19	0.08
d/H	0.15	1.82	0.53	0.15	1.67	0.51
ξ	0.64	4.45	1.41	0.64	2.97	1.34
a	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
b	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
c	0.47	0.47	0.47	0.45	0.45	0.45
d''	0.16	0.16	0.16	0.12	0.12	0.12

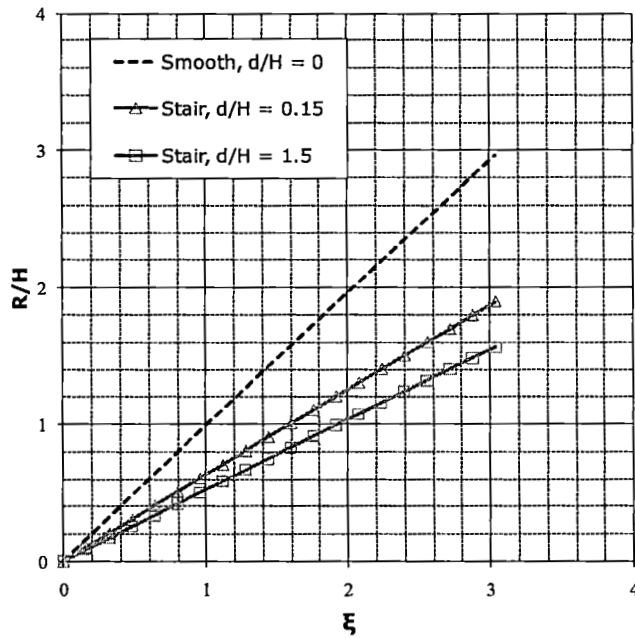
ภาพที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ กับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า ค่าทั้งสองประเภทมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันและกัน แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถทำนายความสูงคลื่นซัดในแต่ละกรณีที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการได้แม่นยำมากกว่า และการกระจายของข้อมูลก็มีค่าน้อยกว่าด้วย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความแตกต่างของพื้นโครงสร้าง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) เท่ากับ 0.80 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.23 และพบว่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 ส่วนใหญ่ให้ผลการทำนายที่มีค่ามากกว่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการ

ทดลอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าของพจน์ $[1 - 0.45(d/H)^{0.12}]$ ของการทดลองทุกกรณีจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 ถึง 0.64 หรือหมายความว่ากรณีพื้นเอียงผิวชันบันไดสามารถลดความสูงคลื่นซัดได้ถึง 36 ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ



ภาพที่ 4-4 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวชันบันได

ภาพที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ (R/H) ซึ่งคำนวณดังสมการที่ 4-3 โดยที่เส้นประสีน้ำเงิน คือ กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ เส้นสีฟ้ามีเครื่องหมายสามเหลี่ยมและเส้นสีฟ้ามีเครื่องหมายสี่เหลี่ยม คือ กรณีพื้นเอียงแบบผิวชันบันได เมื่อความสูงขรุขระสัมพัทธ์ $d/H = 0.15$ และ $d/H = 1.50$ ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่าความสูงคลื่นซัดกรณีพื้นเอียงผิวชันบันไดน้อยกว่าความสูงคลื่นซัดกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ เนื่องจากขณะที่คลื่นเคลื่อนตัวอยู่บนพื้นเอียงแบบผิวชันบันได ความสูงขรุขระของบันไดจะช่วยเพิ่มแรงเสียดทานซึ่งต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำได้มากกว่ากรณีพื้นเรียบ จึงช่วยสลายพลังงานของคลื่นที่เข้ามาปะทะกับโครงสร้างและส่งผลให้ความสูงคลื่นซัดลดลง 36 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ $d/H = 0.15$ และ 48 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ $d/H = 1.50$ เมื่อเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ



ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ (R/H) คำนวณโดยใช้สมการที่ 4-3

จากผลการทดลองพบว่าความสูงของคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวขรุขระมีค่าน้อยกว่าความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ โดยที่ความสูงขรุขระ d ยิ่งมากก็จะส่งผลให้ความสูงคลื่นซัด R ยิ่งลดลง เนื่องจากความสูงขรุขระนั้นเป็นตัวต้านทานแรงของคลื่นที่เข้ามากระทำกับโครงสร้างพื้นเอียง ทำให้พลังงานของคลื่นถูกสลายไปมากกว่ากรณีพื้นเอียงผิวเรียบที่ไม่มีความสูงขรุขระเป็นตัวต้านทานเลย ดังนั้นความสูงขรุขระจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการพัฒนาสมการความสูงคลื่นซัด สมการความสูงคลื่นซัดและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองทุกกรณี สรุปไว้ดังตารางที่ 4-3 เมื่อทำการเปรียบเทียบแต่ละสมการจะเห็นได้ว่า สมการความสูงคลื่นซัดกรณีพื้นเรียบสามารถทำนายความสูงคลื่นซัดในแต่ละกรณีที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) เท่ากับ 0.90 แม้ว่าเซตของข้อมูลนี้มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยอยู่พอสมควร โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.54 เนื่องจากการแกว่งของชุดข้อมูลจะเกิดมาก โดยเฉพาะเมื่อค่า R/H มีค่ามาก ช่วงการทดสอบดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นระหว่างการวัดความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียง สำหรับสมการความสูงคลื่นซัดกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระให้ความสามารถในการทำนายได้ค่อนข้างแม่นยำเช่นกัน โดยกรณีผิวขรุขระมีค่า C.C. เท่ากับ 0.80 อธิบายจากลักษณะทางกายภาพได้ว่า กรณีผิวขรุขระนั้น

รูปแบบจัดเรียงพื้นผิวที่เป็นระเบียบ สามารถวัดค่าความสูงคลื่นชัดได้ค่อนข้างง่าย จึงส่งผลให้ความสามารถในการทำนายมีความคลาดเคลื่อนน้อย

ตารางที่ 4-3 สรุปสมการที่ได้จากการทดลอง

กรณีศึกษา	a	b	c	d''	C.C.	S.D.	H/L		d/H	
							ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
พื้นเรียบ	0.99	0.99	0	0	0.90	0.54	0.01	0.15	0	0
	$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99}$									(4-2)
ชั้นบันได	0.99	0.99	0.45	0.12	0.80	0.23	0.01	0.19	0.15	1.67
	$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99} \left[1 - 0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.12} \right]$									(4-6)

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการทดลอง

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการทดลองสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นชัตบนโครงสร้างลาดเอียงแบบต่าง ๆ ได้ โดยวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ ซึ่งแบ่งตามข้อมูล R/H , H/L , ξ และ d/H แต่ละข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นห้าช่วง โดยแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 20 (สี่เหลี่ยมสีเทา), 20 ถึง 40 (สามเหลี่ยมสีฟ้า), 40 ถึง 60 (วงกลมสีน้ำตาล), 60 ถึง 80 (ข้าวหลามตัดสีแดง) และ 80 ถึง 100 (สี่เหลี่ยมสีม่วง) เส้นประแสดงถึงขอบเขตของความคลาดเคลื่อน ± 20 เปอร์เซ็นต์ และ ± 30 เปอร์เซ็นต์ และสร้างตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของแต่ละข้อมูลดังนี้

วิเคราะห์ข้อมูลกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-2 โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H ดังภาพที่ 4-6 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง R/H มีค่าอยู่ในช่วง 0.625 ถึง 3.351 ดังตารางที่ 4-4 พบว่าโดยรวมแล้วเกิดความคลาดเคลื่อนน้อย ซึ่งจำนวนข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ คือ ข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยข้อมูลสีเทา หรือช่วงค่า R/H น้อยที่สุด เกิดจำนวนความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ความสูงคลื่น H จะมาก ทำให้ความชัน

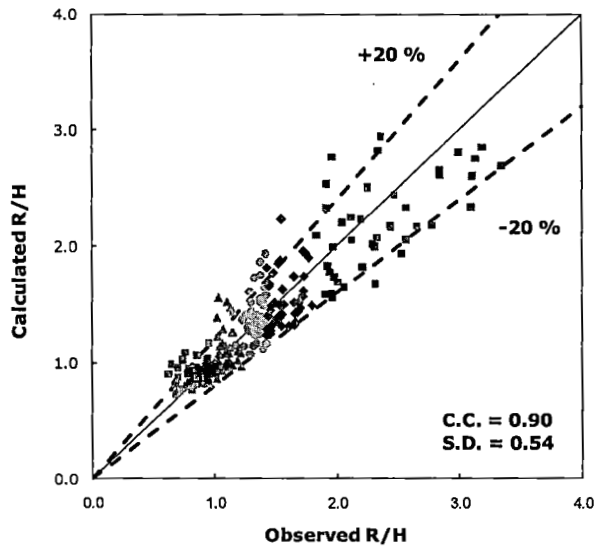
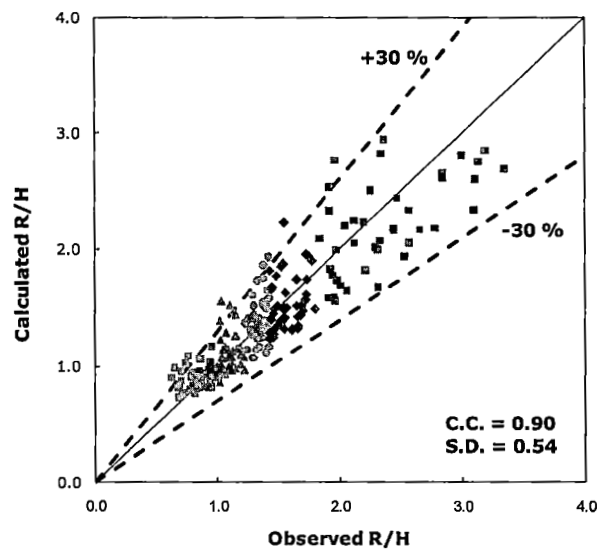
คลื่น H/L มากตามด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วที่ความชันคลื่นมาก คลื่นจะมีความเร็วน้อยส่งผลให้คลื่นเกิดพลังงานจลน์น้อยเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างพื้นเอียง กอปรกับยังพบว่าข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจะเกิดที่ความลาดชันของโครงสร้าง $\tan \theta$ ต่ำสุดเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีพื้นที่รับแรงเสียดทานระหว่างมวลน้ำกับพื้นเอียงมากกว่าโครงสร้างที่มีความลาดชันสูง จึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นชัดได้น้อยกว่าความสูงคลื่นชัดที่สมการทำนาย สำหรับข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 พบว่าช่วงข้อมูลที่เกิดความคลาดเคลื่อนและการกระจายโดยรวมที่ชัดเจน คือ ข้อมูลสีม่วง หรือช่วงค่า R/H มากที่สุด ความสูงคลื่นจะน้อย ความชันคลื่นก็น้อยตามด้วย ส่งผลให้คลื่นเกิดพลังงานจลน์มากเคลื่อนที่ไปยังโครงสร้างพื้นเอียง จึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นชัดได้มาก กอปรกับข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจะเกิดที่ความลาดชันของโครงสร้างสูงสุดเป็นส่วนใหญ่ และกรณีนี้จะเกิดคลื่นสะท้อนทำให้ค่าที่วัดได้ในช่วงนี้กระจายมากที่สุด

ตารางที่ 4-4 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล R/H กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

สี (สัญลักษณ์)	R/H		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		n	%	n	%	n	%	n	%
เทา (สีเหลี่ยม)	0-20	0.625-0.962	41	8	20	0	0	5	12	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.963-1.224	41	6	15	1	2	4	10	0	0
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	1.225-1.428	39	5	13	1	3	3	8	0	0
แดง (ข้าวหลามตัด)	60-80	1.429-1.814	42	4	10	0	0	1	2	0	0
ม่วง (สีเหลี่ยม)	80-100	1.815-3.351	41	5	12	6	15	2	5	0	0

หมายเหตุ: $N_{(+20)}$ และ $N_{(+30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

$N_{(-20)}$ และ $N_{(-30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

ภาพที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H

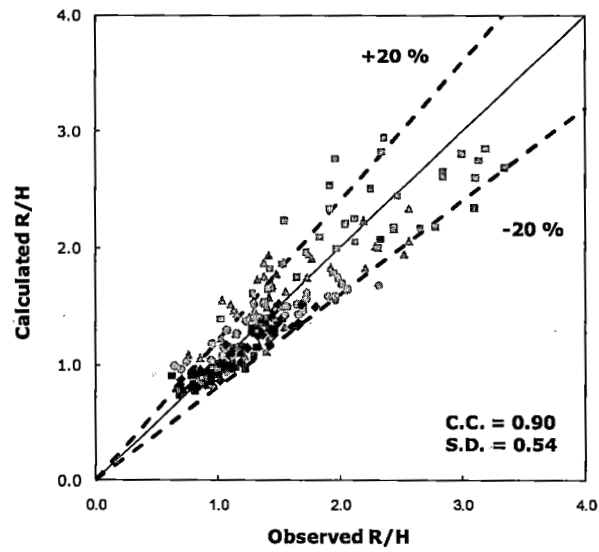
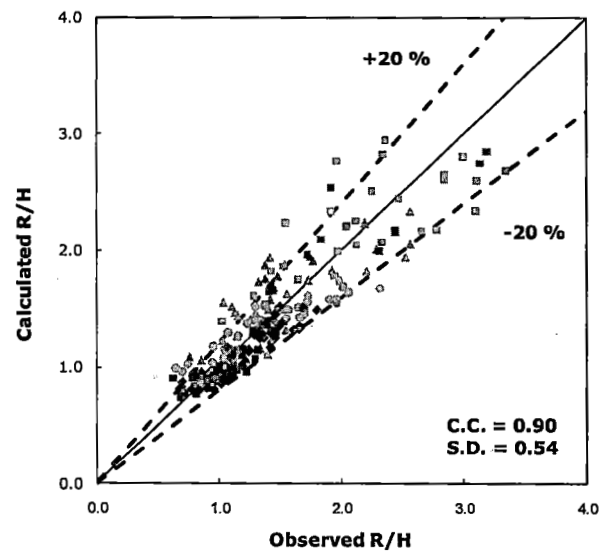
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-2 โดยแบ่งข้อมูลตามความชันคลื่น H/L ดังภาพที่ 4-7 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง H/L มีค่าอยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.150 ดังตารางที่ 4-5 พบว่าความชันคลื่น H/L ยิ่งน้อยทำให้เกิดการกระจายของข้อมูลมากขึ้น โดยเฉพาะช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 20 หรือข้อมูลสี่เทา และ 20 ถึง 40 หรือข้อมูลสี่ฟ้า จะเห็นได้ชัดว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้น คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยความคลาดเคลื่อนนี้อาจมีสาเหตุหนึ่งมาจากการเกิดคลื่นสะท้อน ซึ่งพบได้ในกรณีที่มีความชันของโครงสร้างพื้นเอียง $\tan\theta$ มาก และความชันคลื่น H/L น้อย โดยปกติแล้วที่ความชันคลื่นน้อย ความสูงคลื่น H จะน้อย และความยาวคลื่น L มาก คลื่นจะมีความเร็วและเกิดพลังงานจลน์มากเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นเอียงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้มาก แต่สำหรับกรณีที่เกิดคลื่นสะท้อนจะส่งผลให้คลื่นมีพลังงานจลน์ลดลง ส่งผลให้ค่าความสูงคลื่นซัดที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าความสูงคลื่นซัดที่สมการทำนาย และอีกสาเหตุหนึ่งจะพบในกรณีที่โครงสร้างมีความลาดชันน้อยซึ่งจะมีพื้นที่รับแรงเสียดทานระหว่างมวลน้ำกับพื้นเอียงมาก ส่งผลให้ค่าความสูงคลื่นซัดที่วัดได้จากการทดลองมีค่าน้อยเช่นกัน

ตารางที่ 4-5 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล H/L กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

สี (สัญลักษณ์)	H/L		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		n	%	n	%	n	%	n	%
เทา (สี่เหลี่ยม)	0-20	0.013-0.037	41	10	24	2	5	4	10	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.038-0.065	41	11	27	2	5	7	17	0	0
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	0.066-0.090	38	5	13	3	8	3	8	0	0
แดง (ข้าวหลามตัด)	60-80	0.091-0.111	42	1	2	0	0	0	0	0	0
ม่วง (สี่เหลี่ยม)	80-100	0.112-0.150	42	1	2	1	2	1	2	0	0

หมายเหตุ: $N_{(+20)}$ และ $N_{(+30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

$N_{(-20)}$ และ $N_{(-30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

ภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม H/L

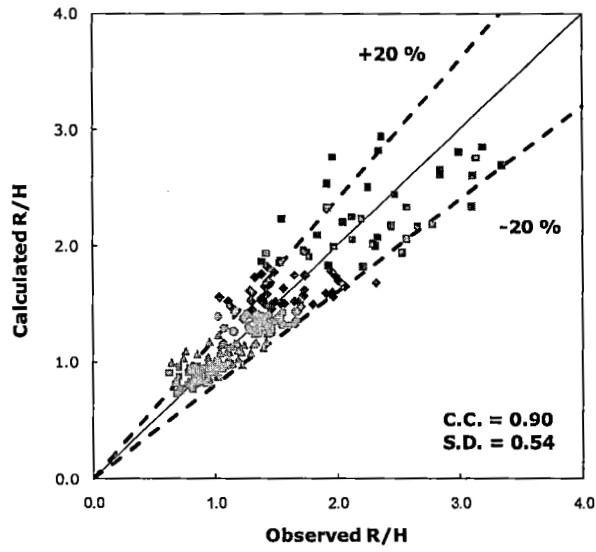
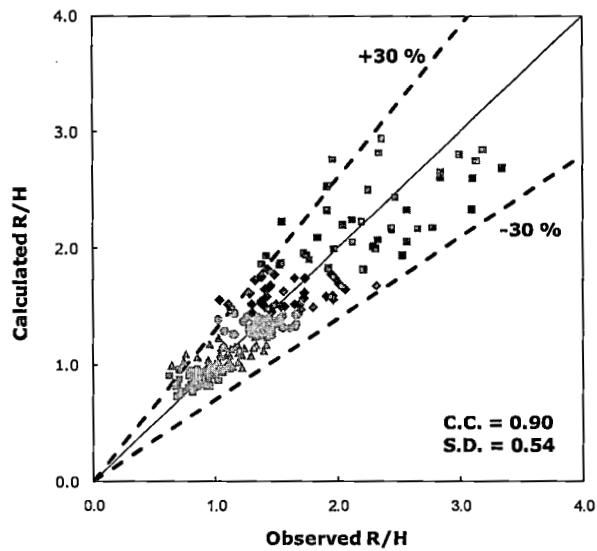
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-2 โดยแบ่งข้อมูลตามพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ξ ดังภาพที่ 4-8 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง ξ มีค่าอยู่ในช่วง 0.742 ถึง 3.000 ดังตารางที่ 4-6 พบว่าเมื่อค่า ξ เพิ่มขึ้น การกระจายของข้อมูลและความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในช่อง $N_{(+20)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และสามารถอธิบายความคลาดเคลื่อนนี้ได้จาก ξ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความลาดชันของโครงสร้าง $\tan \theta$ และความชันคลื่น H/L โดยที่ $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}}$ ค่า ξ ที่มากจะเกิดขึ้นเมื่อความลาดชันของโครงสร้างมากและความชันคลื่นน้อย ซึ่งกรณีนี้จากการทดลองพบว่าทำให้เกิดคลื่นสะท้อนและเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนนั่นเอง

ตารางที่ 4-6 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล ξ กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

สี (สัญลักษณ์)	ξ		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		n	%	n	%	n	%	n	%
เทา (สี่เหลี่ยม)	0-20	0.742-0.976	40	3	8	0	0	2	5	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.977-1.259	42	5	12	2	5	3	7	0	0
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	1.260-1.465	40	3	8	0	0	1	3	0	0
แดง (ข้าวหลามตัด)	60-80	1.466-1.851	41	7	17	3	7	4	10	0	0
ม่วง (สี่เหลี่ยม)	80-100	1.852-3.000	41	10	24	3	7	5	12	0	0

หมายเหตุ: $N_{(+20)}$ และ $N_{(+30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

$N_{(-20)}$ และ $N_{(-30)}$ คือ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ โดยแสดงจำนวน (n) และเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลในช่วงที่พิจารณา

(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

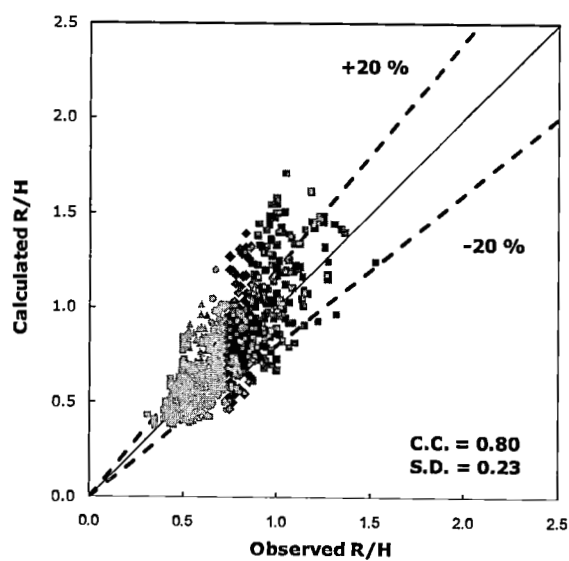
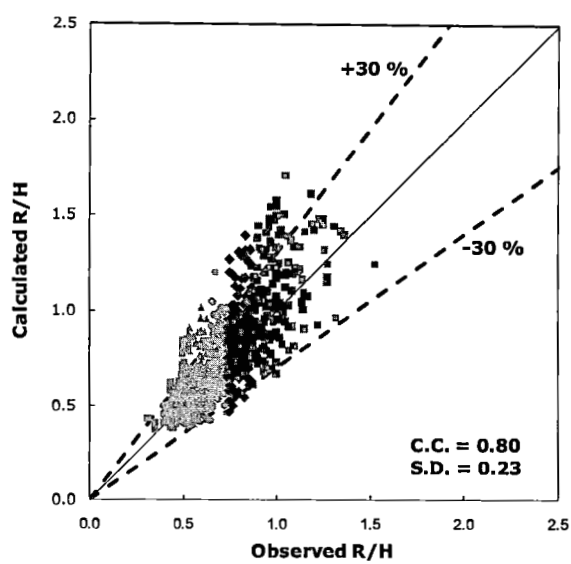
ภาพที่ 4-8 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยแบ่งข้อมูลตาม ζ

วิเคราะห์ข้อมูลกรณีพื้นเอียงผิวชั้นบันได

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H ดังภาพที่ 4-9 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง R/H มีค่าอยู่ในช่วง 0.313 ถึง 1.529 ดังตารางที่ 4-7 พบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลอง ($N_{(+20)}$ และ $N_{(+30)}$) จะเห็นชัดเจนในช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 80 ถึง 100 หรือช่วงที่ค่า R/H สูงที่สุดซึ่งมีความคลาดเคลื่อนถึง 33 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีนี้คลื่นจะมีความสูงน้อยและจากข้อมูลการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ความลาดชันสูง ๆ ซึ่งเป็นกรณีที่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนจึงวัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อย กอปรกับที่ความลาดชันสูง ๆ จะมีจำนวนชั้นบันไดมากกว่าโครงสร้างความลาดชันต่ำซึ่งจำนวนชั้นบันไดจะเป็นตัวสร้างแรงเสียดทานต่อมวลน้ำที่เข้ามาปะทะจึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อยเช่นกัน สำหรับความคลาดเคลื่อนบางส่วนเป็นข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลอง ($N_{(-20)}$ และ $N_{(-30)}$) ซึ่งมีแนวโน้มไม่ชัดเจนจึงไม่สามารถสรุปได้

ตารางที่ 4-7 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล R/H กรณีพื้นเอียงผิวชั้นบันได

สี (สัญลักษณ์)	R/H		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		N	%	n	%	n	%	N	%
เทา (สีเหลี่ยม)	0-20	0.313- 0.531	160	33	21	2	1	20	13	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.532- 0.637	160	34	21	20	13	22	14	3	2
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	0.638- 0.738	160	31	19	17	11	17	11	4	3
แดง (ข้าวหลาม ตัด)	60-80	0.739- 0.866	160	38	24	16	10	22	14	3	2
ม่วง (สีเหลี่ยม)	80-100	0.867- 1.529	161	53	33	13	8	35	22	1	1

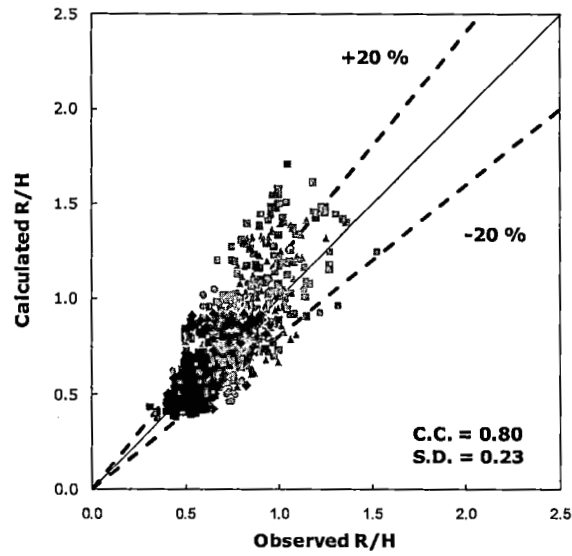
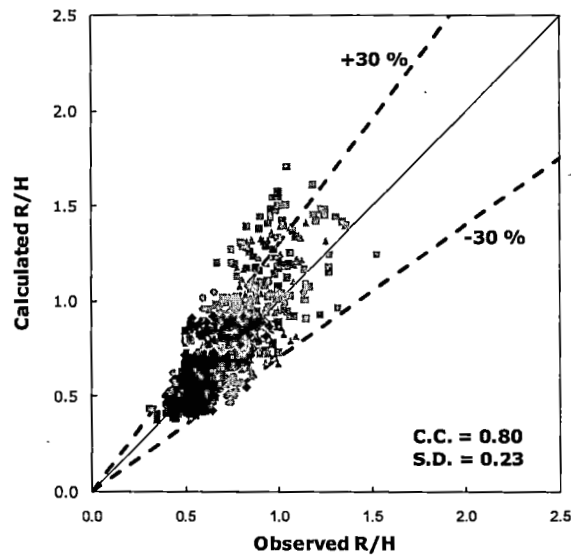
(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม R/H

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 โดยแบ่งข้อมูลตามความชันคลื่น H/L ดังภาพที่ 4-10 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง H/L มีค่าอยู่ในช่วง 0.014 ถึง 0.192 ดังตารางที่ 4-8 พบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เป็นจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยเฉพาะช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 20 หรือข้อมูลสี่เทา ความชันคลื่น H/L น้อย ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อนสูงถึง 47 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจมีสาเหตุจากการเกิดคลื่นสะท้อนซึ่งมักพบในกรณีที่มีความชันคลื่น H/L น้อย ทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อย และอีกสาเหตุหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ คือ เมื่อคลื่นที่มีความสูงคลื่น H น้อย เคลื่อนที่เข้าสู่พื้นเอียงแบบชันบันไดจะมีลักษณะคล้ายการปะทะเข้ากับกำแพงแนวตั้งและคลื่นไม่สามารถซัดขึ้นมบบนผิวชันบันไดได้ ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อยเช่นกัน

ตารางที่ 4-8 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล H/L กรณีพื้นเอียงผิวชันบันได

สี (สัญลักษณ์)	H/L		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		N	%	n	%	n	%	N	%
เทา (สี่เหลี่ยม)	0-20	0.014- 0.041	146	68	47	8	6	48	33	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.042- 0.073	173	41	24	18	10	24	14	1	1
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	0.074- 0.104	157	24	15	15	10	12	8	6	4
แดง (ข้าวหลาม ตัด)	60-80	0.105- 0.122	158	23	15	17	11	12	8	4	3
ม่วง (สี่เหลี่ยม)	80-100	0.123- 0.192	167	33	20	10	6	20	12	0	0

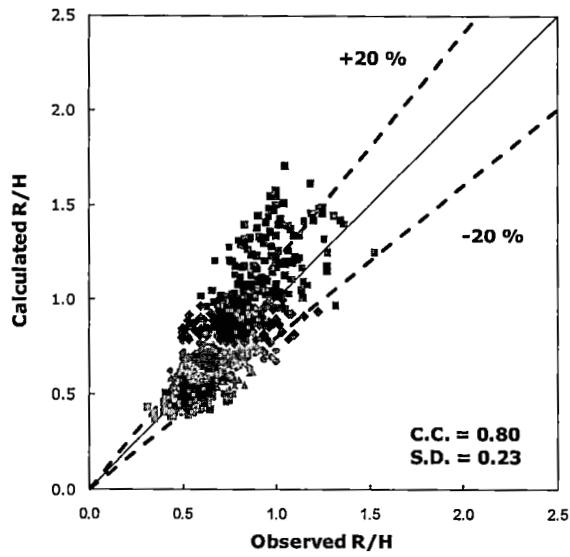
(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

ภาพที่ 4-10 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม H/L

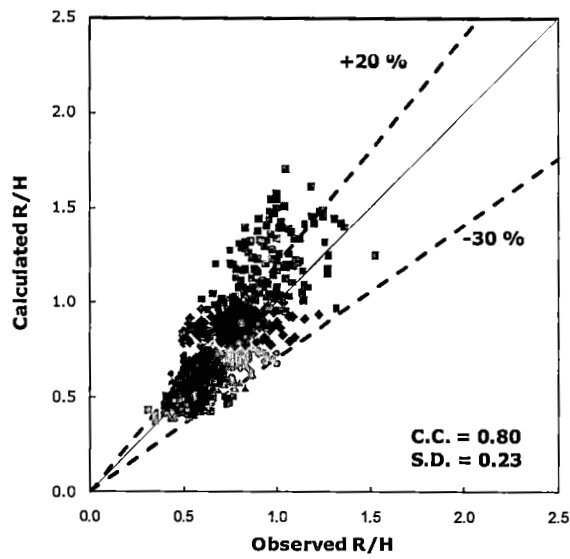
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 โดยแบ่งข้อมูลตามพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ξ ดังภาพที่ 4-11 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง ξ มีค่าอยู่ในช่วง 0.638 ถึง 2.968 ดังตารางที่ 4-9 โดยช่วงข้อมูล ξ ที่มีค่ามากที่สุด เกิดความคลาดเคลื่อนของ $N_{(+20)}$ และ $N_{(+30)}$ สูงถึง 61 เปอร์เซ็นต์ และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สามารถอธิบายความคลาดเคลื่อนนี้ได้จาก $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}}$ ค่า ξ ที่มากจะเกิดขึ้นเมื่อความชันของโครงสร้างมากและความชันคลื่นน้อย ซึ่งทำให้เกิดคลื่นสะท้อน พลังงานคลื่นจึงลดลงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อย รวมถึงเมื่อความชันคลื่นน้อยทำให้ความสูงคลื่นน้อยเหมือนเข้าปะทะกำแพงแนวตั้ง ลักษณะเช่นนี้ทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อยเช่นกัน นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของ $N_{(-20)}$ และ $N_{(-30)}$ ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ξ น้อยเช่นกัน ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความลาดชันของโครงสร้างน้อยและความชันคลื่นมาก และจากข้อมูลการทดลองมักพบที่ความสูงขรุขระที่มาก (ความสูงชันบันได 4 และ 5 ซม.) ซึ่งมีจำนวนชันบันไดน้อยกว่ากรณีความสูงขรุขระน้อย ๆ เมื่อคลื่นที่มีความสูงมากซัดปะทะโครงสร้างแบบชันบันได จำนวนชันบันไดที่น้อยจะสลายพลังงานคลื่นได้น้อยกว่าจำนวนชันบันไดที่มาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้มากกว่าความสูงคลื่นซัดจากสมการทำนาย

ตารางที่ 4-9 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล ξ กรณีพื้นเอียงผิวชันบันได

สี (สัญลักษณ์)	ξ		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		N	%	n	%	n	%	N	%
เทา (สี่เหลี่ยม)	0-20	0.638- 0.876	153	2	1	35	23	1	1	8	5
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.877- 1.082	167	14	8	17	10	4	2	2	1
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	1.083- 1.364	159	24	15	10	6	10	6	1	1
แดง (ข้าวหลามตัด)	60-80	1.365- 1.674	159	50	31	5	3	33	21	0	0
ม่วง (สี่เหลี่ยม)	80-100	1.675- 2.968	163	99	61	1	1	68	42	0	0



(a) ความคลาดเคลื่อน ±20%



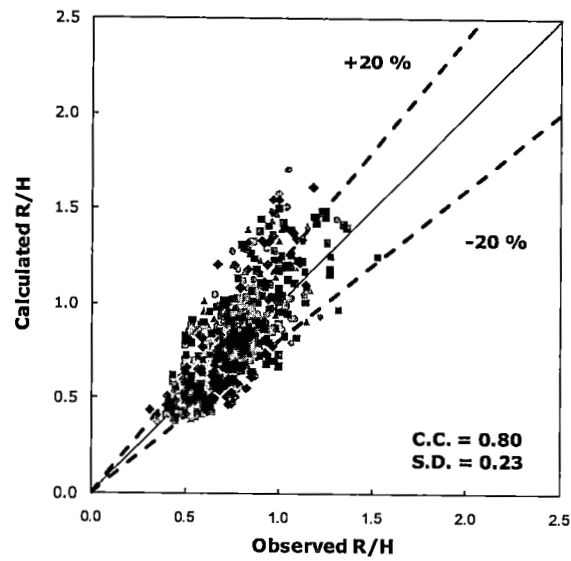
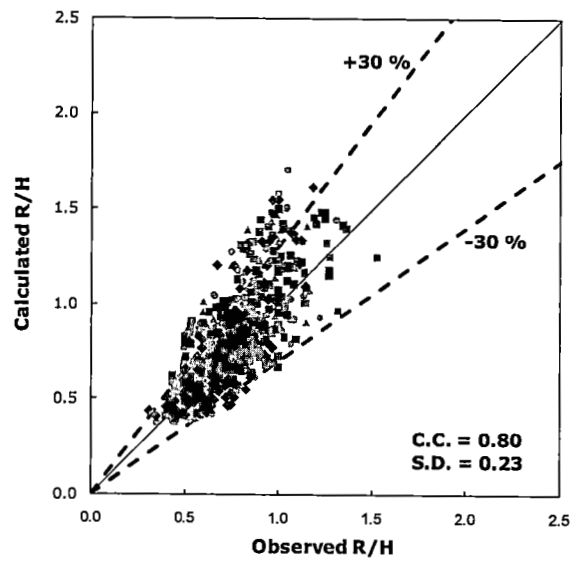
(b) ความคลาดเคลื่อน ±30%

ภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม ๕

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4-3 โดยแบ่งข้อมูลตามความสูงขรุขระสัมพันธ์ d/H ดังภาพที่ 4-12 และแบ่งข้อมูลตามเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นห้าช่วง ซึ่ง d/H มีค่าอยู่ในช่วง 0.154 ถึง 1.667 ดังตารางที่ 4-10 พบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เป็นจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ d/H เพิ่มขึ้น หรือ อธิบายได้ว่าเมื่อคลื่นที่มีความสูงน้อยซัดเข้าสู่พื้นเอียงแบบขั้นบันไดที่มีความสูงของขั้นบันได d มาก จะกลายเป็นลักษณะคลื่นซัดเข้าปะทะกำแพงแนวตั้ง เพราะขั้นบันไดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงคลื่น ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อยในการทดลอง แต่สำหรับความคลาดเคลื่อนบางส่วนที่เป็นข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 อาจมีสาเหตุมาจากกรณีคลื่นบางลูกที่สามารถซัดขึ้นไปบนขั้นบันไดได้ทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้มากเช่นกัน

ตารางที่ 4-10 ความคลาดเคลื่อนตามเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูล d/H กรณีพื้นเอียงผิวขั้นบันได

สี (สัญลักษณ์)	d/H		N	$N_{(+20)}$		$N_{(-20)}$		$N_{(+30)}$		$N_{(-30)}$	
	Percentile	ช่วงข้อมูล		N	%	n	%	n	%	N	%
เทา (สี่เหลี่ยม)	0-20	0.154- 0.299	158	33	21	4	3	19	12	0	0
ฟ้า (สามเหลี่ยม)	20-40	0.300- 0.416	162	35	22	14	9	24	15	0	0
น้ำตาล (วงกลม)	40-60	0.417- 0.525	160	39	24	14	9	22	14	2	1
แดง (ข้าวหลาม ตัด)	60-80	0.526- 0.666	149	37	25	21	14	21	14	7	5
ม่วง (สี่เหลี่ยม)	80-100	0.667- 1.667	172	45	26	15	9	30	17	2	1

(a) ความคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ (b) ความคลาดเคลื่อน $\pm 30\%$

ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นขั้วสัมผัสที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวชันบันได โดยแบ่งข้อมูลตาม d/H

ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนนี้สรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ R/H ที่วัดได้จากการทดลอง มีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกันทุกรูปแบบของโครงสร้างลาดเอียง คือ ที่ช่วงค่า R/H สูงที่สุด จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งจากการทดลองพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่ในช่วงนี้ถูกดำเนินการทดลองที่ความลาดชันโครงสร้างลาดเอียงสูงสุด กอปรกับความสูงคลื่นน้อยหรือความชันคลื่น H/L น้อยจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงและค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์มีการกระจายมาก สำหรับความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความชันคลื่น H/L มีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนทุกรูปแบบของโครงสร้างลาดเอียง คือ เมื่อ H/L ลดลง ข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 จะเพิ่มขึ้นที่ช่วงค่า H/L น้อยที่สุด จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก อาจมีสาเหตุจากคลื่นสะท้อนเช่นกัน ซึ่งมักพบในกรณีความชันคลื่นน้อย พลังงานจลน์ของคลื่นถึงแม้จะสูงแต่เมื่อเกิดคลื่นสะท้อนทำให้พลังงานลดลง ส่งผลให้ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่วัดได้จากการทดลองมีค่าน้อยและค่อนข้างกระจาย ส่วนความคลาดเคลื่อนเนื่องจากพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น ξ โดยจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนทุกรูปแบบของโครงสร้างลาดเอียง คือ เมื่อค่า ξ เพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สามารถอธิบายความคลาดเคลื่อนนี้ได้จาก ξ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความลาดชันของโครงสร้าง $\tan \theta$ และความชันคลื่น

$$H/L \text{ โดยที่ } \xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}} \text{ ค่า } \xi \text{ ที่มากจะเกิดขึ้นเมื่อความลาดชันของโครงสร้างมากและความชัน}$$

คลื่นน้อย ซึ่งในกรณีนี้จากการทดลองพบว่าทำให้เกิดคลื่นสะท้อน พลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างจึงลดลงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อย สำหรับจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่าน้อยกว่าข้อมูลการทดลองมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนและคลาดเคลื่อนน้อยมากสำหรับโครงสร้างลาดเอียงผิวเรียบ แต่ให้แนวโน้มที่ค่อนข้างชัดเจนในกรณีโครงสร้างลาดเอียงผิวขรุขระ คือ เมื่อค่า ξ น้อย ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความลาดชันของโครงสร้างน้อยและความชันคลื่นมาก และส่วนใหญ่จะพบที่ความสูงขรุขระมาก ๆ ซึ่งความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงขรุขระสัมพันธ์ d/H ของโครงสร้างลาดเอียงแบบผิวขรุขระ คือ ที่ช่วงค่า d/H สูงที่สุด จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก หรืออธิบายตามลักษณะทางกายภาพได้ว่าที่ความสูงขรุขระ d มาก และความสูงคลื่น H น้อย จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก เมื่อคลื่นที่มีความสูงน้อยเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นเอียงที่มีความสูงขรุขระ d มาก จะกลายเป็นลักษณะคลื่นซัดเข้าปะทะกำแพงแนวตั้ง ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนในกรณีพื้นเอียงแบบขั้นบันได เพราะขั้นบันไดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงคลื่น ด้วยลักษณะเช่นนี้จึงทำให้วัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อยในการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริงความสูงขรุขระจะสูงไม่มากเมื่อเทียบกับความสูงคลื่นที่ใช้ออกแบบ ทำให้สมการที่ใช้ทำนายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงและค่อนข้างแม่นยำ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างลาดเอียงเพื่อสร้างสมการทำนายความสูงคลื่นซัดอย่างง่าย ซึ่งทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยสรุปข้อมูลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ ดังนี้

สรุปการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง โดยพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีสองลักษณะ คือ ผิวเรียบ ผิวชันบันได และ ไข่คลื่นแบบสมมาตร ดำเนินการทดลองทั้งหมด 1,050 กรณี แบ่งเป็นพื้นเอียงผิวเรียบ 210 กรณี และแบบชันบันได 840 กรณี บนพื้นเอียงมีความลาดชันตั้งแต่ 14 ถึง 27 องศา และได้นำเสนอสมการความสูงคลื่นซัดพร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สรุปสมการและพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลอง

กรณีศึกษา	a	b	c	d''	C.C.	S.D.	H/L	d/H	ξ
พื้นเรียบ	0.99	0.99	0	0	0.90	0.54	0.01 -	0	0.74 -
							0.15		3.00
$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99}$									
ชันบันได	0.99	0.99	0.45	0.12	0.80	0.23	0.01 -	0.15 -	0.64 -
							0.19	1.67	2.97
$\frac{R}{H} = 0.99\xi^{0.99} \left[1 - 0.45 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.12} \right]$									

จากการทดลองสรุปได้ว่า สมการพื้นเอียงผิวเรียบให้ผลการทำนายได้อย่างแม่นยำ โดยค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ a และ b เท่ากับ 0.99 ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับสมการพื้นฐานของ Hunt (1959) เป็นอย่างมาก และอธิบายพฤติกรรมของคลื่นซัดบนพื้นเอียงได้ว่า เมื่อความชันคลื่น H/L ยิ่งน้อย จะทำให้เกิดความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ R/H มากขึ้น เนื่องจากที่ความชันคลื่นน้อย

คลื่นจะมีความเร็วมากกว่าความชันคลื่นที่มาก ส่งผลให้คลื่นเกิดพลังงานจลน์มากชดช้นไปบนพื้นเอียง และความลาดชันของพื้นเอียง $\tan \theta$ ยิ่งน้อย จะทำให้เกิดความสูงคลื่นชดสั้พธ์น้อยลง เนื่องจากเกิดพื้นที่รับแรงเสียดทานระหว่างมวลน้ำและพื้นเอียงมากกว่าโครงสร้างพื้นเอียงที่มีความลาดชันมาก สำหรับกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระมีการพิจารณาความสูงขรุขระสั้พธ์ d/H เพิ่มเข้ามาในสมการ ซึ่งผลของการศึกษาแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความขรุขระของผิวพื้นเอียงมีผลกระทบต่อความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียง โดยความสูงขรุขระที่เพิ่มสูงขึ้นจะสร้างความเสียดทานระหว่างมวลน้ำและผิวพื้นเอียงมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้พลังงานของคลื่นถูกสลายลงมากกว่ากรณีที่เกิดกับพื้นเอียงผิวเรียบ พลังงานที่ถูกสลายไปส่งผลให้พลังงานศักย์ที่อยู่ในรูปความสูงคลื่นชดลดลงด้วย ซึ่ง กรณีพื้นเอียงผิวชันบันไดสามารถลดความสูงคลื่นชดได้ถึง 36 ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

การศึกษานี้ได้นำเสนอสมการอย่างง่ายในการทำนายความสูงคลื่นชดของคลื่นแบบสม่ำเสมอบนพื้นเอียงความลาดชันน้อย น้ำซึมผ่านไม่ได้ ทั้งแบบผิวเรียบและแบบผิวขรุขระ สมการโดยทั่วไปจะคำนึงถึงปัจจัยความลาดชันของพื้นเอียง และความชันของคลื่น แต่การศึกษานี้จะคำนึงถึงความสูงขรุขระสั้พธ์เพิ่มเข้ามาในสมการ ซึ่งรูปแบบของสมการสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและกรณีพื้นเอียงผิวขรุขระได้อย่างสะดวก เพียงแค่ระบุค่าความสูงขรุขระของผิวสัมผัสเท่านั้น ซึ่งเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมที่มีความจำเป็นต้องประมาณค่าความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงของโครงสร้างหรือชายหาดทั่วไป

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาในอนาคตควรทำการเก็บข้อมูลในภาคสนามร่วมด้วย เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้
2. การศึกษาในอนาคตอาจมีการประยุกต์ใช้ความสูงขรุขระ d ร่วมกับการศึกษาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความสูงคลื่นชด เช่น พิจารณาความสูงขรุขระลงในสมการความสูงคลื่นชดไหลล้น (Overtopping) เป็นต้น
3. ในการศึกษาจะใช้ทฤษฎีคลื่นน้ำลึก แต่เมื่อทำการตรวจสอบข้อมูลการทดลองพบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่ไม่เป็นไปตามทฤษฎีคลื่นน้ำลึก คือ ความลึกของระดับน้ำนิ่ง h ต้องมากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น L ดังนั้นอิทธิพลของความตื้นอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง แต่ทั้งนี้ขอบเขตของรางจำลองคลื่นนั้นมีขนาดจำกัด ถ้าเพิ่มความลึกของระดับน้ำนิ่ง อาจเกิดปัญหาคลื่นชดล้นออกมามากเกินไป
4. ควรปรับลดค่าความสูงขรุขระสั้พธ์ d/H ให้น้อยลงกว่าเดิม เนื่องจากผลการวิเคราะห์พบว่าช่วง d/H น้อย ๆ จะให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และค่าในช่วงนี้จะพบได้มากในงานจริง

5. ไม่ใช่ความลาดชันของโครงสร้างพื้นเอียง $\tan \theta$ ที่สูง ๆ เนื่องจากจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อน ส่งผลให้การทดลองคลาดเคลื่อน

6. ความคลาดเคลื่อนส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากผู้วัดข้อมูล ซึ่งถ้าเป็นไปได้ควรจะวัดข้อมูลแค่คนเดียว

บรรณานุกรม

- ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง. (2554). สมการเชิงประสพการณ์อย่างง่ายสำหรับหาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบและผิวหยาบ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16* (จำนวน 11 หน้า).
- ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง, เอกพล คำชมภู และภาณุ แสงเพชร. (2553). ความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวขรุขระ. 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 Chaussées*, 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)

บทความวิจัยในวารสารระดับชาติ จำนวน 1 เรื่อง

วณิชย์ ชื่นใจ, นำพล พลเยี่ยม, สิทธิพงษ์ เพ็ชรฉวาง และธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง. ความสูงคลื่น
ตัดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันได. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ ๓๖ ฉบับที่ ๓ กรกฎาคม
- กันยายน ๒๕๕๖. ๓๒๙ - ๓๔๐.

ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบชันบันได

วณิชย์ ชื่นใจ¹ นำพล พลเยี่ยม² สิทธิพงษ์ เพ็ชรดวง² และ ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง³
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

การออกแบบโครงสร้างทางชายฝั่งทะเล เช่น กำแพงกันคลื่นหรือเขื่อนกันคลื่น จำเป็นต้องประมาณค่าความสูงคลื่นชด เพื่อใช้กำหนดความสูงของโครงสร้าง ดังนั้นการประมาณค่าความสูงคลื่นชดที่แม่นยำ ย่อมทำให้การออกแบบมีความปลอดภัยทางวิศวกรรมและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สมการความสูงคลื่นชดที่ใช้ในงานวิศวกรรมเป็นสมการเชิงประสพการณ์ ซึ่งได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ สมการที่มีอยู่เป็นสมการสำหรับโครงสร้างพื้นเรียบหรือโครงสร้างแบบหินเรียง แต่สำหรับโครงสร้างแบบพื้นเอียงชันบันไดนั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก การศึกษานี้ได้นำรูปแบบสมการที่มีอยู่ซึ่งมีการพิจารณาความสูงขรุขระของพื้นเอียงมาประยุกต์ใช้เพื่อพยากรณ์ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบชันบันได โดยหาพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์จากการทดลองความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบชันบันไดในห้องปฏิบัติการ ใช้รางจำลองคลื่นขนาดหน้าตัด กว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. และยาว 16 ม. ความลึกของน้ำที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 35 ซม. และสร้างคลื่นแบบสม่ำเสมอด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ในกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15 ถึง 25 องศา และกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 14 ถึง 27 องศา ใช้ขนาดความสูงขรุขระ (ความสูงลูกตั้งของชันบันได) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ซม. ผลการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดกับความสูงขรุขระของพื้นเอียง โดยที่เมื่อความสูงขรุขระเพิ่มขึ้น ความสูงคลื่นชดจะลดลง เนื่องจากความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น และจากผลการทดลองทำให้ได้สมการเชิงประสพการณ์สำหรับทำนายความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบชันบันไดที่สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นเอียงผิวเรียบได้อย่างสะดวกและค่อนข้างแม่นยำ

คำสำคัญ : ความสูงคลื่นชด / พื้นเอียงแบบชันบันได / กำแพงกันคลื่น / สมการเชิงประสพการณ์ / ความชันคลื่น

* Corresponding author; E-mail: thamnoon@buu.ac.th

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Wave run-up on stepped slopes

Wanich Chuenchai¹, Namphol Pholyeam², Sitthipong Phetchawang²,

and Thamnoon Rasmeemasmuang^{3*}

Burapha University, Muang, Cholburi 20131

Abstract

In the design of coastal structures such as seawalls or breakwaters, it is necessary to calculate the wave run-up height so as to define the height of structures. Thus, precise estimation of the wave run-up height would bring about the engineering safety and economy. Most formula for the wave run-up calculation are empirical formula, introduced from laboratory experimental data and have been proposed for either the wave run-up on smooth slopes or on rubble-mound slopes. The research on stepped slope is, however, still limited. In this study, an existing form of the wave run-up formula that accounts for the roughness of surface slopes was applied to forecast the wave run-up on stepped slopes. Empirical parameters in the formula were determined from the experimental data in laboratory. The experiments were conducted with a regular wave flume of 60 cm wide, 80 cm deep and 16 m long. The depth of water in a uniform section of the flume was 35 cm. Regular waves were generated at the frequencies of 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 and 1.67 Hz. For the case of smooth slopes, the slope ranged from 15 to 25 degrees and for the case of stepped slopes, the slope ranged for 14 to 27 degrees. The step riser heights were 2, 3, 4 and 5 cm. The experimental results showed that the wave run-up decreased as the riser heights increased, due to increasing friction. The wave run-up formula for both smooth and stepped slopes is proposed with satisfactory precision

Keywords : Empirical formula / Seawall / Stepped slope / Wave run-up / Wave steepness

* Corresponding author; E-mail: thamnoon@buu.ac.th

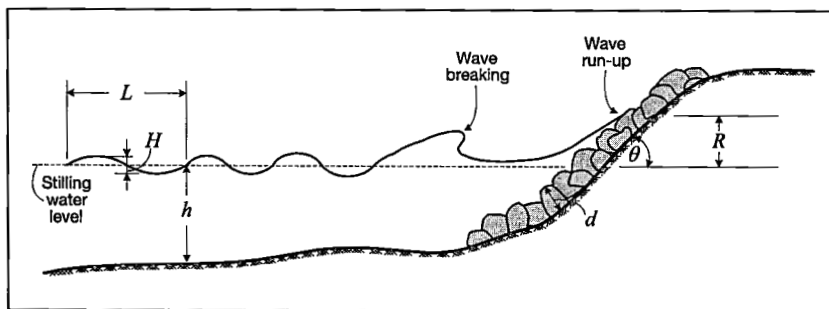
¹ Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Bachelor Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ความสูงคลื่นซัด (Wave run-up: R) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นในทะเลเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง ระดับพื้นท้องทะเลที่ตื้นขึ้นส่งผลให้คลื่นเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยความสูงของคลื่นจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าจำกัดค่าหนึ่งแล้วเกิดการแตกตัว (Wave breaking) หลังจากนั้นคลื่นจะมีการสลายพลังงาน ซึ่งพลังงานที่เหลือส่วนหนึ่งกลายเป็นพลังงานศักย์อยู่ในรูปของความสูงคลื่นซัด [1] ความสูงคลื่นซัด คือ ระยะในแนวตั้งวัดจากระดับน้ำนิ่ง (Still water level: SWL) ถึงระดับสูงสุดที่คลื่นซัดไปบนชายหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง เช่น เขื่อนกันคลื่น (Breakwater) กำแพงกันคลื่น (Seawall) เป็นต้น [2] ดังแสดงในรูปที่ 1 ความสูงคลื่นซัดเป็น



รูปที่ 1 ความสูงคลื่นซัดบนโครงสร้างพื้นเอียง

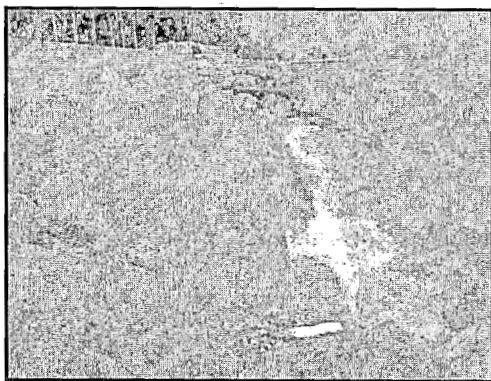
การศึกษาความสูงคลื่นซัดที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ Hunt [1] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำขุ่นผ่านไม่ได้และใช้คลื่นแบบสม่ำเสมอ (Regular wave) จากผลการทดลอง ได้นำเสนอสมการเชิงประจักษ์การันในการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัด โดยที่ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความสูงคลื่น (Relative wave run-up height; R/H) เป็นฟังก์ชันของความชันของคลื่น (Wave steepness; H/L) และความลาดชันของหาดหรือโครงสร้างพื้นเอียง (Beach or Structure slope; $\tan \theta$) ค่าของ $\tan \theta / \sqrt{H/L}$ นี้ถูกเรียกว่า Surf similarity parameter (ξ) หรือค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัว ต่อมา Battjes and Roos [6] ทำการทดลองลักษณะเช่นเดียวกันนี้ซึ่งได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับสมการของ Hunt [1] เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและทำการ

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับงานวิศวกรรมชายฝั่งทะเล โดยเป็นตัวกำหนดการออกแบบความสูงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล [3] และเป็นตัวกำหนดขอบเขตบนของเขตที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนทั้งตามแนวชายฝั่ง (Alongshore sediment transport) และตามแนวขวางฝั่ง (Cross-shore sediment transport) ซึ่งส่งผลให้ชายฝั่งมีรูปร่างเปลี่ยนแปลง เช่น การกัดเซาะชายฝั่งทะเล หรือการทับถมทำให้เกิดพื้นที่งอก เป็นต้น [4] ดังนั้นการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่ถูกต้องแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการจัดการและการเตือนภัยบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ [5]

ทดลองหาความสูงคลื่นซัดโดยสร้างคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular wave) ซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบและน้ำขุ่นผ่านไม่ได้ จากผลการทดลองมีการนำเสนอสมการที่แตกต่างไปจากสมการของ Hunt [1] โดยทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์เชิงประจักษ์การัน (Empirical parameters) เข้ามาพร้อมทั้งแนะนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับความสูงคลื่นซัดแต่ละประเภท [3, 7] นอกจากนี้การศึกษาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบแล้วยังมีการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวขรุขระด้วย Van der Meer and Stam [8] ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงที่วางด้วยหินเป็นชั้นๆ ทั้งหมด 4 ลักษณะการเรียง พร้อมทั้งแนะนำค่าพารามิเตอร์การขุ่นผ่านที่แตกต่างกันสำหรับใช้พยากรณ์ความสูงคลื่นซัด ต่อมา Shankar and Jayaratne [9] ได้ทดลองหาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงที่เป็นลาดตาข่ายและกรวด ในปี ค.ศ. 2011 Rasmeemasuang [10]

ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นชดโดยใช้พื้นเอียงผิวหินเรียบ และนำเสนอสมการสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นชดอย่างง่ายที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระ โดยคำนึงถึงความสูงขรุขระของผิวโครงสร้าง (d) นอกจากนี้ Neelamani and Sandhya [11] ยังได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นชดโดยใช้พื้นเอียงผิวขรุขระที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมพร้อมทั้งทำเป็นกล่องขนาด $10 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ยื่นออกมาจากผิวลักษณะสลักฟันปลา (Serrated) และเป็นหลุมสลักฟันปลา (Dentated) เพื่อเปรียบเทียบกัน

นอกจากโครงสร้างพื้นเอียงที่ได้อ้างถึงข้างต้นแล้ว โครงสร้างที่เป็นพื้นเอียงแบบขั้นบันได (Stepped slopes) ดังแสดงในรูปที่ 2 ยังเป็นโครงสร้างที่พบเห็นและถูกใช้งานทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างพื้นเอียงแบบขั้นบันไดนี้อำนวยความสะดวกแก่ผู้ที่ต้องการเดินลงไปบนชายหาด แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดยังมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งพบเพียงผลการศึกษารื่องดังกล่าวใน Shore Protection Manual [12] ซึ่งนำเสนอแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นชดสัมพันธ์กับความชันคลื่น ณ ระดับความลึกของน้ำสามค่า สำหรับพื้นเอียงแบบบันไดเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น โดยไม่มีการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างบันไดต่อความสูงคลื่นชดเลย



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นเอียงแบบขั้นบันได บริเวณหาดบางแสน จ.ชลบุรี (ภาพถ่ายโดย วณิชช์ ชื่นใจ)

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงผิวเรียบและแบบขั้นบันไดในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงลูกตั้งซึ่งเสมือนเป็นความสูงขรุขระ

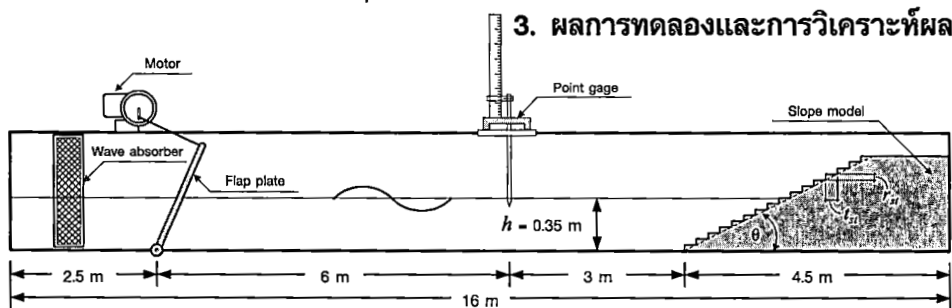
และอัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอนซึ่งเสมือนเป็นความลาดชันของโครงสร้าง ที่มีต่อความสูงคลื่นชด พร้อมทั้งใช้รูปแบบสมการของ Rasmeemasuang [10] ในการสร้างสมการทำนายความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดด้วย

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่น (Wave flume) ที่มีความยาว 16 ม. และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. ดังรูปที่ 3 ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีสองลักษณะ คือ แบบผิวเรียบและแบบขั้นบันได คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสมร่าเสมอ ที่สร้างคลื่นด้วยความถี่ 0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50 และ 1.67 เฮิรตซ์ ระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่น 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 มม. การตั้งความถี่ของคลื่นและระยะคันชักข้อเหวี่ยงของใบพัดคลื่นเช่นนี้ทำให้ได้คลื่นที่มีความชันของคลื่น (H/L) ระหว่าง 0.013 ถึง 0.192 ซึ่งอยู่ในช่วงความชันของคลื่นลม (Wind waves) ที่พบทั่วไปในพื้นที่ชายฝั่งทะเล ด้านหลังเครื่องกำเนิดคลื่นมีการติดตั้งตัวสลายคลื่น (Wave absorber) เพื่อลดคลื่นสะท้อนหลังใบพัดคลื่น ระดับความลึกของน้ำคงที่ตลอดหน้าตัดที่ 35 ซม. ความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) โดยทำการวัดความสูงคลื่นที่ตำแหน่งห่างจากฐานพื้นเอียง 3 ม. จำนวน 5 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยนำไปวิเคราะห์ผล สำหรับการวัดความสูงคลื่นชดก็ใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้ง เช่นเดียวกัน พื้นเอียงผิวเรียบสร้างโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีความยาว 255 ซม. กว้างเท่ากับความกว้างของรางจำลองคลื่น ทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15.0 องศา, 17.5 องศา, 20.0 องศา 22.5 องศา และ 25.0 องศา สำหรับพื้นเอียงแบบขั้นบันไดสร้างโดยใช้แผ่นเหล็กสังกะสีพับเป็นขั้นบันไดแล้วยึดติดกับแบบจำลองพื้นเอียง (Slope model) ที่ทำจากโครงไม้และอุดรอยต่อเพื่อไม่ให้น้ำซึมผ่าน ขนาดความสูงลูกตั้งของขั้นบันได (r_{st}) เท่ากับ 2.0, 3.0 4.0 และ 5.0 ซม. ในแต่ละขนาดมีการใช้อัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอน ($r_{st} : l_{st}$) 5 ค่า คือ 1:2, 1:2.5, 1:3.0, 1:3.5 และ 1:4 ซึ่งเทียบเท่ากับมุมลาดเอียงเท่ากับ 14.0 องศา, 16.0 องศา, 18.0 องศา,

22.0 องศา และ 27 องศา ($\theta = \tan^{-1}(r_{st}/t_{st})$) จากขนาดลูกตั้ง 4 ค่า และอัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอน 5 ค่า ทำให้ได้แบบจำลองพื้นเอียงชันบันไดจำนวน 20 รูปแบบ การทดลองนี้มีลักษณะคล้ายกับการศึกษาของ Rasmeemasuang [10] แต่แตกต่างกันที่พื้นเอียงผิวขรุขระ โดยในการศึกษาของ Rasmeemasuang [10] ใช้พื้นเอียงผิวขรุขระซึ่งทำ

จากหินเรียงขนาดต่างๆ แต่ในการศึกษานี้ใช้พื้นเอียงแบบชันบันได และพิจารณาความสูงลูกตั้งของชันบันได (r_{st}) เทียบเคียงกับความสูงขรุขระ (d) ในการศึกษาของ Rasmeemasuang [10] พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการทดลองนี้สรุปไว้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 1 ตารางสรุปพารามิเตอร์การทดลอง

พารามิเตอร์	พื้นเอียงผิวเรียบ	พื้นเอียงแบบชันบันได
มุมลาดชันของพื้นเอียง, θ (องศา)	$15^\circ, 17.5^\circ, 20^\circ, 22.5^\circ, 25^\circ$	$14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 22^\circ, 27^\circ$
ความลึกของน้ำ, h (ซม.)	35	
ระยะคันชักข้อเหวี่ยง (มม.)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200	
ความเร็วรอบของใบพัดน้ำ (รอบต่อนาที)	50, 60, 70, 80, 90, 100	
ความถี่ในการสร้างคลื่น (เฮิรตซ์)	0.83, 1.00, 1.17, 1.33, 1.50, 1.67	
คาบของคลื่น, T (วินาที)	1.20, 1.00, 0.86, 0.75, 0.67, 0.60	
ความสูงชันบันได, d (ซม.)	0	2, 3, 4, 5

ค่าความสูงคลื่นซัดที่วัดได้นั้นสามารถแสดงได้หลายรูปแบบ ได้แก่ ความสูงคลื่นซัดสูงสุด (R_{max}), ความสูงที่มีคลื่นซัดเพียง 2% มากกว่า ($R_{2\%}$), ความสูงคลื่นซัดสูงสุด $1/10$ ($R_{1/10}$), ความสูงคลื่นซัดสูงสุด $1/3$ ($R_{1/3}$), และความสูงคลื่นซัดเฉลี่ย (\bar{R}) ในทำนองเดียวกันค่าความสูงคลื่นที่วัดได้ก็สามารถแสดงได้หลายรูปแบบเช่นกัน สำหรับค่าความสูงคลื่นซัดและค่าความสูงของคลื่นที่ใช้ในการศึกษานี้คือค่าแบบเฉลี่ย เนื่องจากคลื่นที่ใช้ในการทดสอบเป็นคลื่นแบบสมำเสมอ

ในการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงนี้แบ่งเป็นสองกรณี คือ พื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบชันบันได ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสองกรณีตามตารางที่ 2 ค่าความสูง

คลื่นซัดได้ถูกบันทึกไว้รวมทั้งหมด 1,050 การทดสอบ แบ่งเป็นกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ 210 การทดสอบ และกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได 840 การทดสอบ

3.1 กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ

ในการศึกษาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบเป็นการศึกษาต่อเนื่องมาจาก Rasmeemasuang [10] ดังนั้น รูปแบบสมการที่ใช้จึงมีลักษณะคล้ายกัน (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก [10]) โดยมีแนวคิดมาจาก Mase [3] ที่ทำการทดลองและศึกษาความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ มีความลาดชันของพื้นเอียงน้อยคลื่นที่ใช้เป็นแบบไม่สมำเสมอ และได้นำเสนอสมการ

ความสูงคลื่นซัดที่มีค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

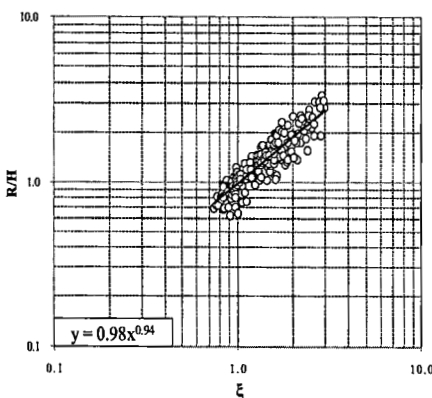
$$\frac{R}{H} = a\xi^b \tag{1}$$

สำหรับ $1.9^\circ \leq \theta \leq 11.3^\circ$, $0.007 \leq \frac{H}{L} \leq 0.1$, $0.1 < \xi < 3.0$ เมื่อ a และ b คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.88 และ 0.69 ตามลำดับ และ $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L}}$

สำหรับการศึกษานี้ ในกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ น้ำซึมผ่านไม่ได้ มีความลาดชันของพื้นเอียงน้อย คลื่นที่ใช้เป็นแบบสม่าเสมอ จากสมการที่ (1) ถูกนำมาประยุกต์โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัว (Surf similarity parameter : ξ) และความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ R/H ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่า a และ b ถูกคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) จึงได้สมการความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบสำหรับการศึกษานี้ คือ

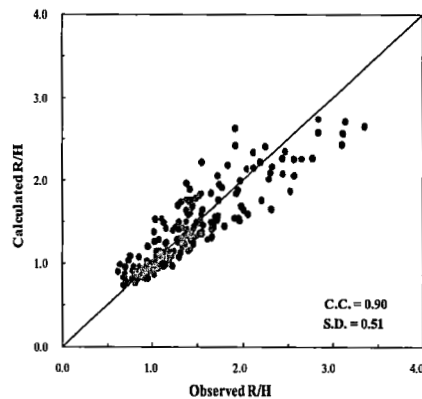
$$\frac{R}{H} = 0.98\xi^{0.94} \tag{2}$$

สำหรับ $15^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$, $0.012 \leq \frac{H}{L} \leq 0.150$ และ $0.7 < \xi < 3.0$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ (R/H) สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ

ค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) สามารถแบ่งการแตกตัวออกได้เป็น 4 ลักษณะ ได้แก่ การแตกตัวแบบ Spilling เมื่อ $\xi < 0.5$, การแตกตัวแบบ Plunging เมื่อ $0.5 < \xi < 3.0$, การแตกตัวแบบ Surging เมื่อ $\xi > 3.0$ และ การแตกตัวแบบ Collapsing เมื่อ $\xi > 3.3$ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก [13]) ในระหว่างการทดลองไม่พบการแตกตัวแบบ Surging และ Collapsing ที่ชัดเจน อีกทั้งเมื่อค่า ξ หรือค่า R/H มีค่ามาก จะพบว่าอยู่ในช่วงของการทดลองที่มีการกระจายตัวมาก ทำให้สมการความสูงคลื่นซัดอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เราจึงไม่ใช้ข้อมูลช่วงที่ $\xi > 3.0$ หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า สมการที่ (2) เป็นสมการสำหรับการแตกตัวแบบ Plunging นั้นเอง และปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้ยังพบในการทดลองของ Mase [3] และ van der Meer and Stam [8] อีกด้วย



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงผิวเรียบ

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองในท้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2) ซึ่งเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: C.C.) มีค่าสูงถึง 0.90 ซึ่งหมายความว่า ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันอย่างชัดเจน หรือกล่าวได้ว่า สมการที่ (2) สามารถทำนายความสูงคลื่นซัดที่เกิดขึ้นในการทดลองได้อย่างแม่นยำ

สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.) มีค่าเท่ากับ 0.51 แสดงให้เห็นว่าเซตของข้อมูลนี้มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยพอสมควร โดยจากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าข้อมูลกระจายตัวมากขึ้นเมื่อค่า R/H มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในการทดลองพบว่าเมื่อทำการสร้างคลื่นที่มีความสูงคลื่นน้อยมากๆ (H น้อย R/H มาก) จะเกิดความคลาดเคลื่อนสูงในการวัดข้อมูล

3.2 กรณีพื้นเอียงแบบชันบันได

ในกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได สมการทำนายความสูงคลื่นชนิดมีรูปแบบเหมือนกับสมการของ Rasmemasuang [10] ซึ่งเป็นสมการทำนายความสูงคลื่นชนิดบนพื้นเอียงผิวหินเรียงที่คำนึงถึงความขรุขระของผิวพื้นเอียงโดยรวมค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) ไว้ในสมการด้วย การศึกษานี้ได้พิจารณาความสูงลูกตั้งของชันบันได r_s เทียบเคียงกับความสูงขรุขระ d รูปแบบสมการความสูงคลื่นชนิดบนพื้นเอียงแบบชันบันไดที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ

$$\frac{R}{H} = a_1 \xi^{b_1} \left[1 - a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \right] \quad (3)$$

เมื่อ a_1 และ b_1 คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ มีค่าเท่ากับ 0.98 และ 0.94 ตามลำดับดังสมการที่ (2) และมีพารามิเตอร์ a_2 และ c ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อแสดงผลกระทบของความขรุขระของผิวโครงสร้างซึ่งหาได้จากชุดข้อมูลการทดลองในกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได จากสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่ามีการใช้พารามิเตอร์ของกรณีพื้นเอียงผิวเรียบร่วมด้วย ทำให้เกิดความสะดวกในการนำไปใช้ ซึ่งรูปแบบสมการสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบชันบันไดได้ทันที เมื่อโครงสร้างมีผิวเรียบหรือค่าความสูงขรุขระ d เท่ากับศูนย์ สมการที่ (3) จะกลับอยู่ในรูปสมการที่ (1) สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบเช่นเดิม

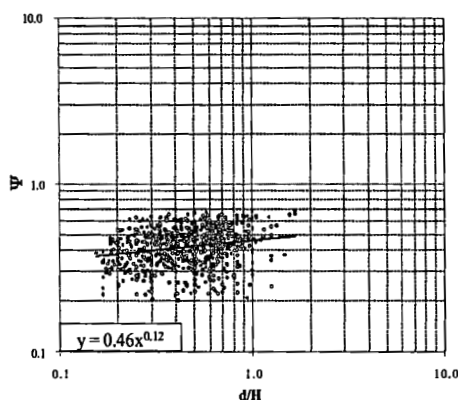
สมการที่ (3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปใหม่ได้เป็น

$$1 - \frac{R/H}{a_1 \xi^{b_1}} = \psi = a_2 \left(\frac{d}{H} \right)^c \quad (4)$$

จากนั้น ค่า ψ และ d/H ของการทดลองกรณีพื้นเอียงแบบชันบันไดจำนวน 840 การทดสอบ ถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ a_2 และ c ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6 เหมือนกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ ทำให้ได้สมการความสูงคลื่นชนิดบนพื้นเอียงแบบชันบันได จากการศึกษาี้ คือ

$$\frac{R}{H} = 0.98 \xi^{0.94} \left[1 - 0.46 \left(\frac{d}{H} \right)^{0.12} \right] \quad (5)$$

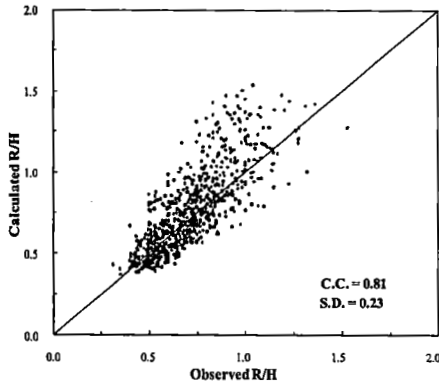
สำหรับ $14^\circ \leq \theta \leq 27^\circ$, $0.154 \leq \frac{d}{H} \leq 1.667$, $0.013 \leq \frac{H}{L} \leq 0.192$ และ $0.5 \leq \xi \leq 3.0$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ ψ กับความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) สำหรับกรณีของพื้นเอียงแบบชันบันได

สำหรับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความขรุขระของผิวพื้นเอียงหรือความสูงลูกตั้งของชันบันไดมีอิทธิพลต่อระดับความสูงคลื่นชนิดโดยกรณีพื้นเอียงแบบชันบันไดความสูงคลื่นชนิดจะมีขนาดน้อยกว่าความสูงคลื่นชนิดที่เกิดในกรณีพื้นเอียงผิวเรียบเนื่องจากขณะที่คลื่นเคลื่อนตัวอยู่บนพื้นเอียงแบบชันบันไดคลื่นจะปะทะกับความสูงของชันบันไดทำให้คลื่นถูกสลายพลังงานได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนใหญ่คลื่นมีการแตกตัวแบบ Plunging โดยตำแหน่งของการแตกตัวนั้นเกิดขึ้นบริเวณ

บนพื้นเอียงทั้งแบบผิวเรียบและแบบชั้นบันไดเนื่องจากอิทธิพลของระดับพื้นเอียงที่สูงขึ้นทำให้คลื่นเข้าสู่สภาพน้ำตื้นและแตกตัวในที่สุด



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงแบบชั้นบันได

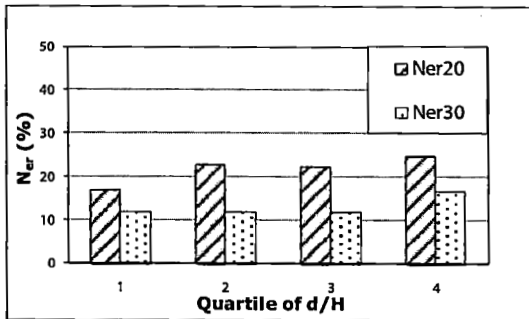
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) เท่ากับ 0.81 และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.23 แสดงให้เห็นว่าสมการที่ (5) สามารถทำนายความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์บนพื้นเอียงแบบชั้นบันไดในการทดลองในห้องปฏิบัติการได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ แม้ว่าบริเวณค่าความสูงสัมพัทธ์หลายๆ ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่เหนือเส้น 45 องศา ซึ่งหมายความว่า ความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) ให้ผลการทำนายที่มีค่ามากกว่าความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าของพจน์ $[1-0.46(d/H)^{0.12}]$ ของการทดลองทุกกรณีจะมีค่าอยู่ใน

ช่วง 0.512 ถึง 0.630 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) ซึ่งเป็นสมการสำหรับกรณีพื้นเอียงแบบชั้นบันได ให้ค่าความสูงคลื่นชดสัสมัทธ์ประมาณ 51 ถึง 63 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบตามสมการที่ (2)

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูลความสูงขรุขระสัมพัทธ์กับความสูงคลื่น (d/H) ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 8 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.154 ถึง 1.667 และถูกแบ่งออกเป็นสี่ช่วงเท่าๆ กัน พบว่าจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงขรุขระสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น หรือหมายความว่าที่ความสูงชั้นบันไดมากและความสูงคลื่นน้อยจะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก กลไกทางกายภาพที่ทำให้เป็นเช่นนั้นเนื่องจากเมื่อคลื่นที่มีความสูงน้อยชดเข้าสู่พื้นเอียงแบบชั้นบันไดที่มีความสูงชั้นบันไดมาก แทนที่คลื่นจะชดชั้นบันไดที่มีความลาดเอียงกลับกลายเป็นลักษณะที่คลื่นพัดเข้าปะทะกำแพงแนวตั้ง เพราะชั้นบันไดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่น ลักษณะเช่นนี้ทำให้ในการทดลองวัดค่าความสูงคลื่นชดได้น้อย เพราะมวลน้ำของคลื่นไม่สามารถพัดข้ามชั้นบันไดที่มีลักษณะเป็นกำแพงแนวตั้ง แต่สมการที่ (5) ทำนายความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงที่มีชั้นบันไดเป็นตัวสร้างแรงเสียดทาน ทำให้ได้ค่าที่มากกว่าค่าการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริง ชั้นบันไดของกำแพงกันคลื่นมีความสูงไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ความสูงคลื่นในการออกแบบเท่ากับ 2.0 เมตร ความสูงชั้นบันไดของกำแพงกันคลื่น 30 เซนติเมตร จะได้ค่า d/H เท่ากับ 0.15 ซึ่งอยู่ในควอไทล์ที่หนึ่งของการทดลองและมีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล d/H

d / H		จำนวนข้อมูลแต่ละช่วง (N)	จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 (N_{er20})		จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 30 (N_{er30})	
ควอไทล์	ช่วงของข้อมูล		จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
Q ₁	0.154 - 0.329	195	33	17	23	12
Q ₁	0.330 - 0.472	193	44	23	23	12
Q ₃	0.473 - 0.630	193	43	22	22	12
Q ₃	0.631 - 1.667	193	43	25	32	16

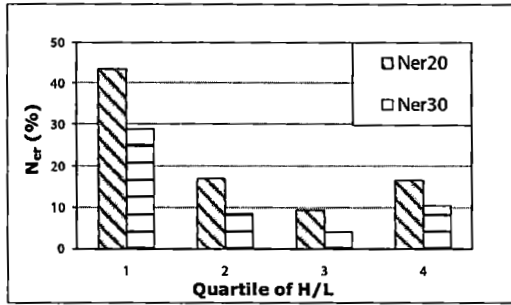


รูปที่ 8 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล d/H

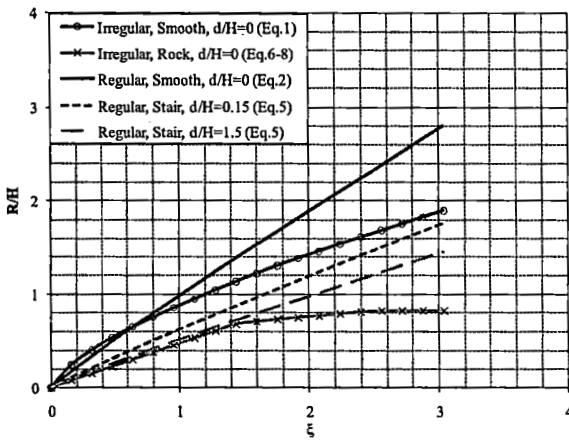
สำหรับความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูลความชันคลื่น (H/L) ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.192 พบว่าที่ความชันคลื่นน้อยๆ จะเกิดความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (5) กับข้อมูลการทดลองมาก โดยเฉพาะในช่วง Q₁ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีสูงถึงร้อยละ 43 และร้อยละ 29 ตามลำดับ เนื่องจากในการทดลองช่วงที่ความสูงคลื่นน้อยๆ (H น้อย H/L น้อย) จะทำการวัดข้อมูลได้ลำบากทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล

d / H		จำนวนข้อมูลแต่ละช่วง (N)	จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 (N_{er20})		จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 30 (N_{er30})	
ควอไทล์	ช่วงของข้อมูล		จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
Q ₁	0.013 - 0.045	198	86	23	57	29
Q ₂	0.046 - 0.089	190	32	17	16	8
Q ₂	0.090 - 0.117	193	18	9	9	5
Q ₃	0.118 - 0.192	194	32	17	20	20



รูปที่ 9 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์ (R/H) ของแต่ละสมการ

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์ (R/H) ที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังนี้ เส้นทึบที่มีจุดวงกลม คือ สมการของ Mase [3] สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบและคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ ดังสมการที่ (1) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ a เท่ากับ 0.88 และ b เท่ากับ 0.69; เส้นทึบที่มีจุดกากบาท คือ สมการของ Van der Meer and Stam [8] สำหรับพื้นเอียงแบบหินเรียงและคลื่นแบบไม่สม่ำเสมอ โดยสมการที่นำเสนอแบ่งตามค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) ดังนี้

$$\frac{R}{H} = a'\xi \quad \text{เมื่อ } \xi \leq 1.5 \quad (6)$$

$$\frac{R}{H} = b'\xi^c \quad \text{เมื่อ } \xi \geq 1.5 \quad (7)$$

$$\frac{R}{H} = d' \quad \text{คือ ค่าสูงสุด} \quad (8)$$

ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์แนะนำสำหรับความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์เฉลี่ย (\bar{R}) ดังนี้ a' เท่ากับ 0.47, b' เท่ากับ 0.60, c' เท่ากับ 0.34 และ d' เท่ากับ 0.82, เส้นทึบ คือ สมการความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์ของการศึกษานี้ สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบและคลื่นแบบสม่ำเสมอ ดังสมการที่ (2); เส้นประสั้นและเส้นประยาว คือ สมการความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์สำหรับพื้นเอียงแบบขั้นบันไดและคลื่นแบบสม่ำเสมอ คำนวณตามสมการที่ (5) เมื่อ d/H เท่ากับ 0.15 และ 1.5 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่ากรณีพื้นเอียงแบบหินเรียงเกิดความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์น้อยที่สุดแต่ไม่สามารถเปรียบเทียบกับการศึกษานี้ได้โดยตรงเนื่องจากการทดลองของ Van der Meer and Stam [8] ไม่ได้พิจารณาความสูงขรุขระลงในสมการที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาพื้นเอียงแบบขั้นบันไดซึ่งเกิดความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยที่ความสูงขรุขระสัมพันธ์ยิ่งมากจะเกิดความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์บนพื้นเอียงแบบขั้นได้น้อยกว่าความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์บนพื้นเอียงผิวเรียบ ร้อยละ 37 สำหรับ d/H เท่ากับ 0.15 และร้อยละ 48 สำหรับ d/H เท่ากับ 1.5 ดังนั้นในกรณีการออกแบบโครงสร้างที่มีพื้นเอียงแบบขั้นบันไดโดยใช้สมการความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์ที่พิจารณาความขรุขระของผิวพื้นเอียงย่อมทำให้ความสูงของโครงสร้างลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดวัสดุในการก่อสร้างด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองความสูงคลื่นชดสั้มพัทธ์บนพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบขั้นบันได ถูกดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่นแบบสม่ำเสมอทั้งหมด 1,050 การทดสอบ แบ่งเป็น

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ 210 การทดสอบ โดยทำการทดสอบ ที่มุมลาดเอียง 15 องศา ถึง 25 องศา มีความชันคลื่น (H/L) อยู่ในช่วง 0.012 ถึง 0.150 และค่าพารามิเตอร์ ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) อยู่ในช่วง 0.7 ถึง 3.0 และกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได 840 การทดสอบ โดยทดสอบที่มุมลาดเอียง 14 องศา ถึง 27 องศา ใช้ขนาด ความสูงขรุขระ (ความสูงลูกตั้งของชันบันได) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ซม. ความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) อยู่ในช่วง 0.154 ถึง 1.667, H/L อยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.192 และ ξ อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3.0

ผลของการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความสูงคลื่นชดบน พื้นเอียงแบบชันบันไดมีขนาดน้อยกว่าความสูงคลื่นชดบน พื้นเอียงผิวเรียบ โดยที่ ความสูงลูกตั้งของชันบันไดยิ่งมาก ความสูงคลื่นชดยิ่งลดลง เนื่องจากความเสียดทานระหว่าง มวลน้ำและผิวพื้นเอียงเพิ่มมากขึ้น และในการศึกษานี้ได้ ประยุกต์สมการทำนายความสูงคลื่นชดที่คำนึงถึงความ ขรุขระมาใช้กับกรณีพื้นเอียงแบบชันบันได โดยทำการ เปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชดสัมพัทธ์ (d/H) ที่ได้จาก สมการ และค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า สมการมีความ แม่นยำในเกณฑ์ดี ซึ่งสมการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้ง กรณีพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบชันบันได เพียงแค่ ระบุค่าความสูงขรุขระลงในสมการ ทำให้เกิดความสะดวก และเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมที่ต้องใช้การประมาณค่า ความสูงคลื่นชด สำหรับกำหนดความสูงของโครงสร้าง ทางชายฝั่งทะเล

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากทุน งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555 โดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขที่ โครงการ 2555A10802025 และผู้เขียนคนหนึ่ง ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรม โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุน ทุนการศึกษาระดับปริญญาโทของผู้เขียนคนหนึ่ง

6. เอกสารอ้างอิง

1. Hunt, I.A. (1959). Design of Seawalls and Breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours-*

Division, American Society of Civil Engineers, 85, 123-152.

2. U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).

3. 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.

4. Ahrens, J.P., and Seelig, W.N. (1996). Wave Runup on Beaches. *Proceeding of the 25th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers*, 981-993.

5. S.J. Na., K.D. Do., and K.-D. Suh. (2011). Forecast of wave run-up on coastal structure using offshore wave forecast data. *Coastal Engineering*, 58, 739-748.

6. Battjes, J.A., and 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.

7. Ahrens, J. P. (1981). Irregular Wave Runup on Smooth Slopes. *CETA 81-17*, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Va. 22060

8. Van der Meer, J.W., and C.J.M. Stam. (1992). Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 118(5), 534-550.

9. N.J. Shankar, and M.P.R. Jayaratne. (2003). Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures. *Ocean Engineering*, 30, 221-238.

10. Rasmeemasuang, T. (2011). A simple empirical formula for wave runup heights on smooth and rough slopes. *Proceeding of the 16th*

Civil Engineering Conference, 11 pages. (in Thai)

11. Neelamani, S. and Sandhya, N. (2004). Wave reflection, run-up, run-down and pressures on plane, dentated and serrated seawalls. *Coastal Engineering Journal*, 46(2), 141-169.

12. U.S. Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering

Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

13. 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.

ภาคผนวก ข
รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการ (NRPM 13 หลัก): 2555A10802025 สัญญาเลขที่ 57/2555
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ: ระดับคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดการศึกษาศักยภาพของแนว
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ รัศมีมาสเมือง
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2555 ถึง วันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557
ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2555

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ		
เงินงวดที่ 1 (90%)	เป็นจำนวนเงิน	342,000 บาท
	รวม	342,000 บาท

รายจ่าย

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	25,000.00	120,000.00	-95,000.00
2. ค่าจ้าง	289,000.00	224,000.00	65,000.00
3. ค่าวัสดุ	56,000.00	24,000.00	32,000.00
4. ค่าใช้สอย	8,000.00	12,000.00	-4,000.00
5. ค่าครุภัณฑ์	0.00	0.00	0.00
6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ			
- ค่าโทรศัพท์	2,000.00	0.00	2,000.00
รวม	380,000.00	380,000.00	0.00

.....
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....
ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ