

ความสูงคลื่นชดบนพื้นเอียงแบบชันบันได

วณิชย์ ชื่นใจ¹ นำพล พลเยี่ยม² สิทธิพงษ์ เพ็ชรดวง² และ ธรรมนูญ รัตมีมาสเมือง³
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 Rasmeeasmuang^{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

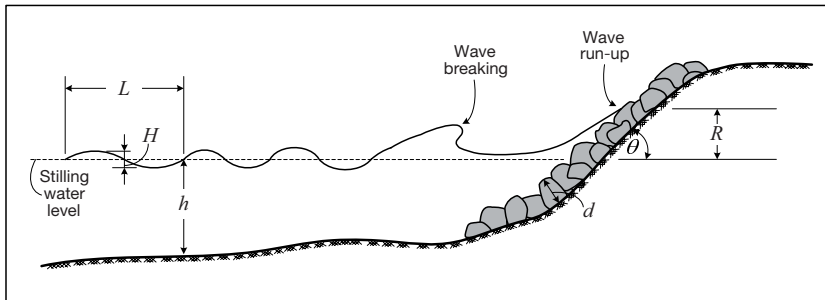
¹ Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

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 ระดับพื้นที่องทะเลที่ตื้นขึ้นส่งผลให้คลื่นเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 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 น้ำซึมผ่านไม่ได้และใช้คลื่นแบบสม่ำเสมอ (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] ดังนั้นการพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดที่ถูกต้องแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการจัดการและการเตือนภัยบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลเพื่อลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ [5]

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

ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดโดยใช้พื้นเอียงผิวหินเรียบ และนำเสนอสมการสำหรับพยากรณ์ความสูงคลื่นซัดอย่างง่ายที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงผิวขรุขระ โดยคำนึงถึงความสูงขรุขระของผิวโครงสร้าง (d) นอกจากนี้ Neelamani and Sandhya [11] ยังได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความสูงคลื่นซัดโดยใช้พื้นเอียงผิวขรุขระที่ทำจากแผ่นลูมิเนียมพร้อมทั้งทำเป็นกล่องขนาด $10 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ยื่นออกมาจากผิวลักษณะสลัฟฟันปลา (Serrated) และเป็นหลุมสลัฟฟันปลา (Dentated) เพื่อเปรียบเทียบกัน

นอกจากโครงสร้างพื้นเอียงที่ได้อ้างถึงข้างต้นแล้ว โครงสร้างที่เป็นพื้นเอียงแบบขั้นบันได (Stepped slopes) ดังแสดงในรูปที่ 2 ยังเป็นโครงสร้างที่พบเห็นและถูกใช้งานทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างพื้นเอียงแบบขั้นบันไดนี้อำนวยความสะดวกแก่ผู้ที่ต้องการเดินลงไปบนชายหาด แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาค้นคว้าความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดยังมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งพบเพียงผลการศึกษารื่องดังกล่าวใน Shore Protection Manual [12] ซึ่งนำเสนอแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์กับความชันคลื่น ณ ระดับความลึกของน้ำสามค่า สำหรับพื้นเอียงแบบบันไดเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น โดยไม่มีการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างบันไดต่อความสูงคลื่นซัดเลย



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

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบและแบบขั้นบันไดในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงลูกตั้งซึ่งเสมือนเป็นความสูงขรุขระ

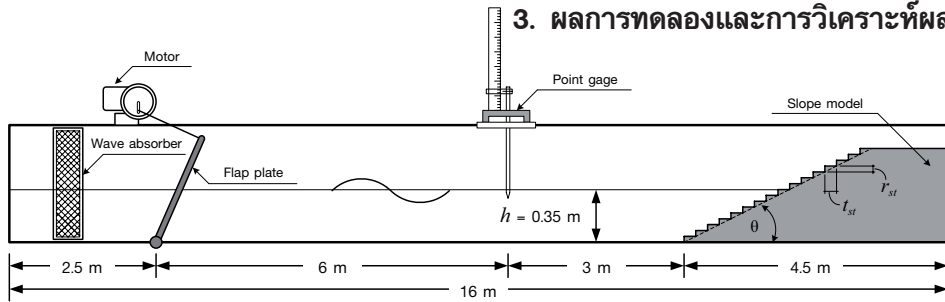
และอัตราส่วนลูกตั้งต่อลูกนอนซึ่งเสมือนเป็นความลาดชันของโครงสร้าง ที่มีต่อความสูงคลื่นซัด พร้อมทั้งใช้รูปแบบสมการของ Rasmeemasuang [10] ในการสร้างสมการทำนายความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดด้วย

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่น (Wave flume) ที่มีความยาว 16 ม. และขนาดหน้าตัดกว้าง 60 ซม. ลึก 80 ซม. ดังรูปที่ 3 ผิวของพื้นเอียงที่ใช้ทดลองมีสองลักษณะ คือ แบบผิวเรียบและแบบขั้นบันได คลื่นที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นแบบสม่ำเสมอ 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. ความสูงของคลื่นและความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงถูกวัดด้วยเครื่องวัดระดับน้ำแบบเข็มชี้ (Point gauge) โดยทำการวัดความสูงคลื่นที่ตำแหน่งห่างจากฐานพื้นเอียง 3 ม. จำนวน 5 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยนำไปวิเคราะห์ผล สำหรับการวัดความสูงคลื่นซัดก็ใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้งเช่นเดียวกัน 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 ($r_{st} : t_{st}$) 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 ($\theta = \tan^{-1}(r_{st}/l_{st})$) 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 เนื่องจากคลื่นที่ใช้ในการทดสอบเป็นคลื่นแบบสม่ำเสมอ

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 มีความลาดชันของพื้นเอียงน้อยคลื่นที่ใช้เป็นแบบไม่สม่ำเสมอ และได้นำเสนอสมการ

ความสูงคลื่นซัดที่มีค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์ที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

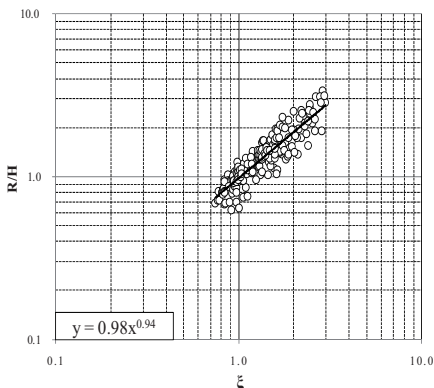
$$\frac{R}{H} = a\xi^b \quad (1)$$

สำหรับ $1.9^\circ \leq \theta \leq 11.3^\circ$, $0.007 \leq \frac{H}{L}$, $0.1 < \xi < 3.0$ 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

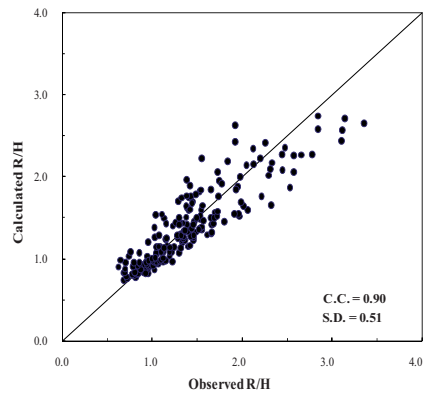
$$\frac{R}{H} = 0.98\xi^{0.94} \quad (2)$$

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 มีค่ามากจะพบว่าอยู่ในช่วงของการทดลองที่มีการกระจายตัวมาก 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 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (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 สมการทำนายความสูงคลื่นชัดมีรูปแบบเหมือนกับสมการของ Rasmeemasuang [10] ซึ่งเป็นสมการทำนายความสูงคลื่นชัดบนพื้นเอียงผิวหินเรียงที่คำนึงถึงความขรุขระของผิวพื้นเอียงโดยรวมค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) ไว้ในสมการด้วย การศึกษานี้ได้พิจารณาความสูงลูกตั้งของชันบันได r_{st} เทียบเคียงกับความสูงขรุขระ d รูปแบบสมการความสูงคลื่นชัดบนพื้นเอียงแบบชันบันไดที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ

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

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

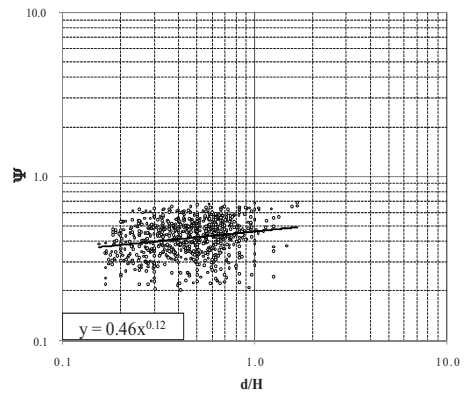
สมการที่ (3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบใหม่ได้เป็น

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

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

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

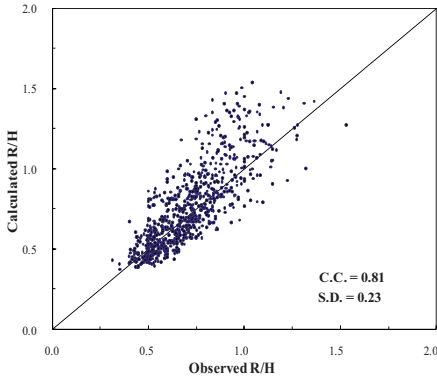
สำหรับ $14^\circ \leq \theta \leq 27^\circ$, $0.154 \leq \frac{d}{H} \leq 1.667$, $0.013 \leq \frac{H}{L} \leq 0.192$ และ $0.5 \leq \xi \leq 3.0$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ ψ กับความสูงขรุขระสัมพัทธ์ (d/H) สำหรับกรณีของพื้นเอียงแบบชันบันได

สำหรับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความขรุขระของผิวพื้นเอียงหรือความสูงลูกตั้งของชันบันไดมีอิทธิพลต่อระดับความสูงคลื่นชัดโดยกรณีพื้นเอียงแบบชันบันไดความสูงคลื่นชัดจะมีขนาดน้อยกว่าความสูงคลื่นชัดที่เกิดในกรณีพื้นเอียงผิวเรียบเนื่องจากขณะที่คลื่นเคลื่อนตัวอยู่บนพื้นเอียงแบบชันบันไดคลื่นจะปะทะกับความสูงของชันบันไดทำให้คลื่นถูกสลายพลังงานได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนใหญ่คลื่นมีการแตกตัวแบบ Plunging โดยตำแหน่งของการแตกตัวนั้นเกิดขึ้นบริเวณ

บนพื้นเอียงทั้งแบบผิวเรียบและแบบขั้บบันไดเนื่องจากอิทธิพลของระดับพื้นเอียงที่สูงขึ้นทำให้คลื่นเข้าสู่สภาพน้ำตื้นและแตกตัวในที่สุด



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ สำหรับกรณีของพื้นเอียงแบบขั้บบันได

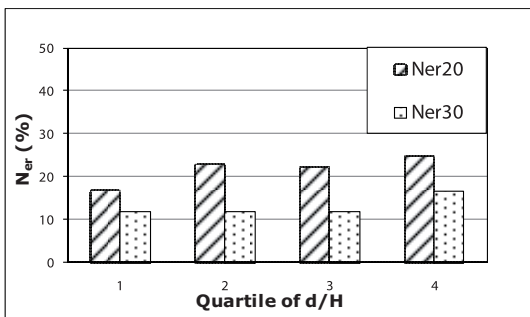
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (C.C.) เท่ากับ 0.81 และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.23 แสดงให้เห็นว่าสมการที่ (5) สามารถทำนายความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงแบบขั้บบันไดในการทดลองในห้องปฏิบัติการได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ แม้ว่าบริเวณค่าความสูงสัมพันธ์มากๆ ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่เหนือเส้น 45 องศา ซึ่งหมายความว่า ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) ให้ผลการทำนายที่มีค่ามากกว่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าของพจน์ $[1-0.46(d/H)^{0.12}]$ ของการทดลองทุกกรณีจะมีค่าอยู่ใน

ช่วง 0.512 ถึง 0.630 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (5) ซึ่งเป็นสมการสำหรับกรณีพื้นเอียงแบบขั้บบันได ให้ค่าความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ประมาณ 51 ถึง 63 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่ได้จากการคำนวณกรณีพื้นเอียงผิวเรียบตามสมการที่ (2)

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูลความสูงซุ้ระสัมพันธ์กับความสูงคลื่น (d/H) ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 8 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.154 ถึง 1.667 และถูกแบ่งออกเป็นสี่ช่วงเท่าๆ กัน พบว่าจำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงซุ้ระสัมพันธ์เพิ่มขึ้น หรือหมายความว่าที่ความสูงขั้บบันไดมากและความสูงคลื่นน้อยจะเกิดความคลาดเคลื่อนมากไกลทางกายภาพที่ทำให้เป็นเช่นนั้นเนื่องจากเมื่อคลื่นที่มีความสูงน้อยซัดเข้าสู่พื้นเอียงแบบขั้บบันไดที่มีความสูงขั้บบันไดมาก แทนที่คลื่นจะซัดขั้บบันไดที่มีความลาดเอียงกลับกลายเป็นลักษณะที่คลื่นพัดเข้าปะทะกำแพงแนวตั้ง เพราะขั้บบันไดค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่น ลักษณะเช่นนี้ทำให้ในการทดลองวัดค่าความสูงคลื่นซัดได้น้อย เพราะมวลน้ำของคลื่นไม่สามารถพัดข้ามขั้บบันไดที่มีลักษณะเป็นกำแพงแนวตั้ง แต่สมการที่ (5) ทำนายความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงที่มีขั้บบันไดเป็นตัวสร้างแรงเสียดทาน ทำให้ได้ค่าที่มากกว่าค่าการทดลองแต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริง ขั้บบันไดของกำแพงกันคลื่นมีความสูงไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ความสูงคลื่นในการออกแบบเท่ากับ 2.0 เมตร ความสูงขั้บบันไดของกำแพงกันคลื่น 30 เซนติเมตร จะได้ค่า d/H เท่ากับ 0.15 ซึ่งอยู่ในควอไทล์ที่หนึ่งของการทดลองและมีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล d/H

d / H		จำนวน ข้อมูล แต่ละช่วง (N)	จำนวนข้อมูลที่สมการ ทำนายได้ค่ามากกว่า ข้อมูลการทดลองเกิน ร้อยละ 20 (N_{er20})		จำนวนข้อมูลที่สมการ ทำนายได้ค่ามากกว่า ข้อมูลการทดลองเกิน ร้อยละ 30 (N_{er30})	
ควอไทล์	ช่วงของข้อมูล		จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
Q ₁	0.154 - 0.329	195	33	17	23	12
Q ₂	0.330 - 0.472	193	44	23	23	12
Q ₃	0.473 - 0.630	193	43	22	23	12
Q ₄	0.631 - 1.667	194	48	25	32	16

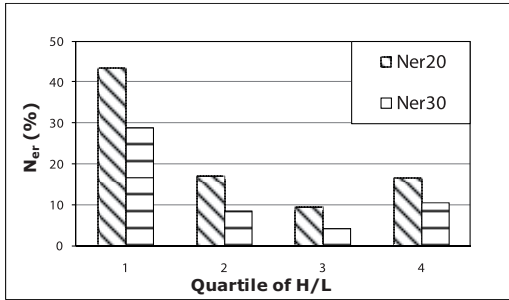


รูปที่ 8 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล d/H

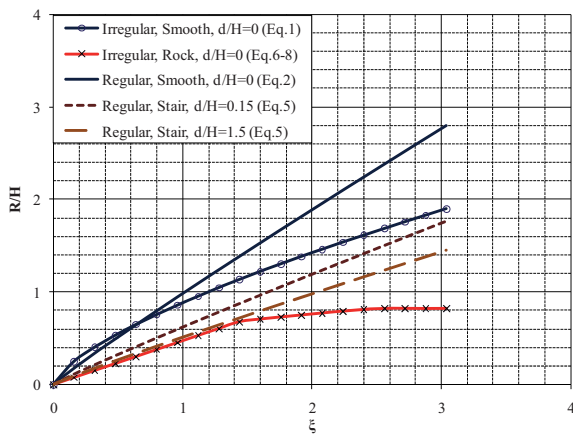
สำหรับความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูลความชันคลื่น (H/L) ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.192 พบว่าที่ความชันคลื่นน้อยๆ จะเกิดความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (5) กับข้อมูลการทดลองมาก โดยเฉพาะในช่วง Q₁ จำนวนข้อมูลที่สมการทำนายได้ค่ามากกว่าข้อมูลการทดลองเกินร้อยละ 20 และร้อยละ 30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

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล

H / L		จำนวน ข้อมูล แต่ละช่วง (N)	จำนวนข้อมูลที่สมการ ทำนายได้ค่ามากกว่า ข้อมูลการทดลองเกิน ร้อยละ 20 (N_{er20})		จำนวนข้อมูลที่สมการ ทำนายได้ค่ามากกว่า ข้อมูลการทดลองเกิน ร้อยละ 30 (N_{er30})	
ควอไทล์	ช่วงของข้อมูล		จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
Q ₁	0.013 - 0.045	198	86	43	57	29
Q ₂	0.046 - 0.089	190	32	17	16	8
Q ₃	0.090 - 0.117	193	18	9	8	4
Q ₄	0.118 - 0.192	194	32	17	20	10



รูปที่ 9 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนตามควอไทล์ของข้อมูล



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

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Surf similarity (ξ) กับความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ (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

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

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

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

ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์แนะนำสำหรับความสูงคลื่นซัดแบบเฉลี่ย (\bar{R}) ดังนี้ a' เท่ากับ 0.47, b' เท่ากับ 0.60, c' เท่ากับ 0.34 และ d' เท่ากับ 0.82, เส้นทึบ คือ สมการความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์ของการศึกษานี้ สำหรับพื้นเอียงผิวเรียบและคลื่นแบบสม่ำเสมอ ดังสมการที่ (2); เส้นประสั้นและเส้นประยาว คือ สมการความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์สำหรับพื้นเอียงแบบชันบันไดและคลื่นแบบสม่ำเสมอ คำนวณตามสมการที่ (5) เมื่อ d/H เท่ากับ 0.15 และ 1.5 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีพื้นเอียงแบบหินเรียงเกิดความสูงคลื่นซัดน้อยที่สุดแต่ไม่สามารถเปรียบเทียบกับการศึกษานี้ได้โดยตรงเนื่องจากการทดลองของ Van der Meer and Stam [8] ไม่ได้พิจารณาความสูงขรุขระลงในสมการที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาพื้นเอียงแบบชันบันไดซึ่งเกิดความสูงคลื่นซัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีพื้นเอียงผิวเรียบ โดยที่ความสูงขรุขระสัมพันธ์ยิ่งมากจะเกิดความสูงคลื่นซัดน้อยลง ความสูงคลื่นซัดสัมพันธ์บนพื้นเอียงแบบชันได้น้อยกว่าความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบ ร้อยละ 37 สำหรับ d/H เท่ากับ 0.15 และร้อยละ 48 สำหรับ d/H เท่ากับ 1.5 ดังนั้นในกรณีการออกแบบโครงสร้างที่มีพื้นเอียงแบบชันบันไดโดยใช้สมการความสูงคลื่นซัดที่พิจารณาความขรุขระของผิวพื้นเอียงย่อมทำให้ความสูงของโครงสร้างลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดวัสดุในการก่อสร้างด้วย

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองความสูงคลื่นซัดบนพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบชันบันได ถูกดำเนินการทดลองในรางจำลองคลื่นแบบสม่ำเสมอทั้งหมด 1,050 การทดสอบ แบ่งเป็น

กรณีพื้นเอียงผิวเรียบ 210 การทดสอบ โดยทำการทดสอบที่มุมลาดเอียง 15 องศา ถึง 25 องศา มีความชันคลื่น (H/L) อยู่ในช่วง 0.012 ถึง 0.150 และค่าพารามิเตอร์ความคล้ายคลึงในการแตกตัวของคลื่น (ξ) อยู่ในช่วง 0.7 ถึง 3.0 และกรณีพื้นเอียงแบบขั้นบันได 840 การทดสอบ โดยทดสอบที่มุมลาดเอียง 14 องศา ถึง 27 องศา ใช้ขนาดความสูงขรุขระ (ความสูงลูกตั้งของขั้นบันได) เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 ซม. ความสูงขรุขระสัมพันธ์ (d/H) อยู่ในช่วง 0.154 ถึง 1.667, H/L อยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.192 และ ξ อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3.0

ผลของการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความสูงคลื่นระดับบนพื้นเอียงแบบขั้นบันไดมีขนาดน้อยกว่าความสูงคลื่นระดับบนพื้นเอียงผิวเรียบ โดยที่ ความสูงลูกตั้งของขั้นบันไดยิ่งมาก ความสูงคลื่นชั้ยลดลง เนื่องจากความเสียดทานระหว่างมวลน้ำและผิวพื้นเอียงเพิ่มมากขึ้น และในการศึกษานี้ได้ประยุกต์สมการทำนายความสูงคลื่นชั้ยที่คำนึงถึงความขรุขระมาใช้กับกรณีพื้นเอียงแบบขั้นบันได โดยทำการเปรียบเทียบค่าความสูงคลื่นชั้ยสัมพันธ์ (d/H) ที่ได้จากสมการ และค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า สมการมีความแม่นยำในเกณฑ์ดี ซึ่งสมการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกรณีพื้นเอียงผิวเรียบและพื้นเอียงแบบขั้นบันได เพียงแค่ระบุค่าความสูงขรุขระลงในสมการ ทำให้เกิดความสะดวกและเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมที่ต้องใช้การประมาณค่าความสูงคลื่นชั้ย สำหรับกำหนดความสูงของโครงสร้างทางชายฝั่งทะเล

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555 โดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขที่โครงการ 2555A10802025 และผู้เขียนคนที่หนึ่งขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนทุนการศึกษาระดับปริญญาโทของผู้เขียนคนที่หนึ่ง

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*, 188(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.