長・短周期合成波における遡上域の範囲に関する実験的研究

Laboratory Study on Swash Zone Range of the Combined Short and Long Waves

重山智成¹・内山孝平²・水口 優³

Tomonari SHIGEYAMA, Kohei UCHIYAMA and Masaru MIZUGUCHI

Experiments on swash zone range by short waves, long waves and their combined waves respectively are conducted both on a steep and on a gentle slope. Long waves which form standing waves at the shoreline provide swash oscillation, and short waves which break and are partially reflected give both wave set-up and the small oscillation. Max run-up and max run-down height of the combined waves are evaluated by linear sum of those heights by component waves. In addition, the heights as well as the median of swash zone range of regular waves are expressed by functions of surf similarity parameter.

1. はじめに

汀線付近の地形変化を議論する上で、遡上域の範囲（最大打ち上げ高 maximum run-up（以下 R_u ）と最大打ち下げ高 maximum run-down（以下 R_d ））を知ることは重要である。なお、最大打ち下げ高 R_d は今まで工学的に注目される事の無かった量であるが、ここでは底面が露出する最沖地点と定義している。

現地観測において、重山ら（2012）は①高波浪時における遡上域の範囲の予測には、汀線付近の長周期波成分の考慮が重要である、②最大打ち下げ高 R_d は重複波となる長周期波成分の水位変動量のみからほぼ決まる、③最大打ち上げ高 R_u はそれに加えて碎波する短周期波が寄与するという結論に至った。

本研究では、長・短周期合成波を用いることにより、周期の異なる波が共存している波浪において、打ち上げ高及び打ち下げ高に対する長周期波及び短周期波の役割を実験的に検討するとともに、沖波情報から最大打ち上げ高 R_u 及び最大打ち下げ高 R_d の推定式をたてることを目的とする。

2. 実験概要

実験は緩勾配（ $\tan\beta=1/20$ ）と急勾配（ $\tan\beta=1/7.8$ ）の斜面を各々設置した吸収制御機能付き造波機を有する断面水槽を用いて行った。実験条件は両斜面とも水深 25.0cm、長周期波（ $T=3.5$ s）と短周期波（ $T=0.7$ s）の波高を各々 0.0cm から 2.5cm まで 0.5cm 刻みで変化させ合成した計 35 ケースずつ行った。各ケース造波時の緩起動時間は長周期波が 5 波、短周期波が 35 波とし、175 秒間造

波した。ただし、実測の入射波高値は目標値に対して長周期波では 83～102% 程度、短周期波では 86～102% 程度の値となり、解析にはその実測波高値を使用した。図-1 に実験概要図、表-1、2 に実験ケースを示す。なお、実験ケースの波浪条件は（長周期波の波高 H_l 、短周期波の波高 H_s ）として表記した。計測には分圧式波高計（正豊工学製）と容量式遡上計（中央工測製）を用いて、水面変動及び遡上波形をサンプリング周波数 100Hz で収録した。波高計は一様水深部（ $x=970$ cm 前後）に 5 本（ch.2～6）の波高計群、緩勾配斜面における単一周周期波の実験では各ケースの碎波地点に 1 本（ch.1）設置した。なお、波高計群の設置間隔は、入・反射波分離手法の適用範囲を考慮して波長の $1/16\sim 1/8$ に収まるように設定している。また、遡上計は容量線を斜面に沿うように設置したが、その際表面張力の影響を除くため、底面に幅 1.0cm、深さ 0.5cm の溝を切り、容量線が底面と同じ高さになるようにした。目視との計測誤差は平均で鉛直方向に

図-1 実験概要（図中の単位はcm）

表-1 実験ケース（目標値，単一周周期波）

case	波浪条件	case	波浪条件
I	(0.0, 0.5)	VI	(0.5, 0.0)
II	(0.0, 1.0)	VII	(1.0, 0.0)
III	(0.0, 1.5)	VIII	(1.5, 0.0)
IV	(0.0, 2.0)	IX	(2.0, 0.0)
V	(0.0, 2.5)	X	(2.5, 0.0)

1 修(工) 相模原市役所
2 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻
3 正会員 工博 中央大学教授理工学部都市環境学科

表-2 実験ケース (目標値, 合成波)

case	波浪条件	case	波浪条件	case	波浪条件	case	波浪条件	case	波浪条件
1	(0.5, 0.5)	6	(0.5, 1.0)	11	(0.5, 1.5)	16	(0.5, 2.0)	21	(0.5, 2.5)
2	(1.0, 0.5)	7	(1.0, 1.0)	12	(1.0, 1.5)	17	(1.0, 2.0)	22	(1.0, 2.5)
3	(1.5, 0.5)	8	(1.5, 1.0)	13	(1.5, 1.5)	18	(1.5, 2.0)	23	(1.5, 2.5)
4	(2.0, 0.5)	9	(2.0, 1.0)	14	(2.0, 1.5)	19	(2.0, 2.0)	24	(2.0, 2.5)
5	(2.5, 0.5)	10	(2.5, 1.0)	15	(2.5, 1.5)	20	(2.5, 2.0)	25	(2.5, 2.5)

※表-1, 2 中の表記は (長周期波の波高 H_l , 短周期波の波高 H_s) とした。

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-2 (a) 長周期波のみ (case 17) の遡上計データ:急勾配斜面

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-2 (b) 短周期波のみ (case 17) の遡上計データ:急勾配斜面

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-2 (c) 合成波 (case 21) の遡上計データ:急勾配斜面

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-3 (a) 長周期波のみ (case 17) の遡上計データ:緩勾配斜面

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-3 (b) 短周期波のみ (case 17) の遡上計データ:緩勾配斜面

(i) 0-240s (ii) 90-100s

図-3 (c) 合成波 (case 21) の遡上計データ:緩勾配斜面

0.2cm程度であった。

3. 遡上波形とその特徴

計測した遡上波形から単一周周期波と長・短周期合成波の特徴を読み取った。図-2 (a) ~ (c) に急勾配斜面, 図-3 (a) ~ (c) に緩勾配斜面における遡上波形の例を示す。まず図-2 (a) から, 急勾配斜面における長周期波のみの遡上波形は静水時の水深を境に上下の振幅がほぼ対称となっていることがわかる。そのため, 長周期波は反射率が高く重複波となっていると考えられる。次に図-2 (b) から, 短周期波のみの遡上波形では R_d が静水時の水深より上にきていることがわかる。これは, 短周期波が遡上の過程で碎波することにより波高が減衰し, またそれに伴って汀線付近で平均水位の上昇 (set-up) が生じることが原因だと考えられる。図-3 (a) から, 緩勾配斜面における長周期のみの遡上波形は放物型となっており, かつset-upも若干生じていることから遡上の過程で

部分碎波していると考えられる。また, 個々波の遡上波形に着目すると, 図-2 (b), 図-3 (a) 共に段波遡上の特徴である放物運動型形状となっている。次に図-3 (b) より, 緩勾配斜面における短周期波のみの遡上波形の振幅はほぼ0で一定となっていることから, 短周期波はほぼ完全碎波となっていると考えられる。最後に長・短周期合成波に関しては, 図-2 (c) より急勾配斜面における遡上波形は長周期波の波形に短周期波の波形が乗っているように見える。一方図-3 (c) からは, 緩勾配斜面における短周期成分の振幅が非常に小さいため, 長周期波のみの遡上波形とほぼ同じに見える。しかしながら図-2 (c), 図-3 (c) 共にその遡上波形は各々の短周期波のset-upと同程度上昇しているように見える。このことから, 長・短周期合成波の R_u 及び R_d はそれに対応する単一周周期波の和で推定できるのではないかと考える。

4. R_u 及び R_d の単一周期波の和と合成波の比較

長・短周期合成波の R_u 及び R_d とそれに対応する単一周期波における R_u 及び R_d の各実測値の和を比較した。また、長周期波と短周期波の合成にあたり、重なり方（位相）を変えた時の R_u 及び R_d の変化を調べるため逆位相での追加実験（60case）を行った。図-4（a），（b）に R_u 、図-5（a），（b）に R_d に関して比較したものを示す。図-4（a），図-5（a）から緩勾配斜面における合成波の R_u 及び R_d は対応する単一周期波の和とほぼ一致している。一方、図-4（b），図-5（b）から急勾配斜面において合成波（逆位相）の R_u は単一周期波の和と一致していないが、それ以外ではほぼ一致している。そこで、両勾配における長・短周期合成波の遡上波形を調べた。図-6（a），（b）に急勾配斜面、図-7（a），（b）に緩勾配斜面における同位相合成波及び逆位相合成波の遡上波形を示す。図-6（a），（b）から急勾配斜面では短周期波の碎波後における振幅が緩勾配斜面より大きく、合成波の遡上波形にまで影響を及ぼしていることがわかる。これは逆位相波では周期比があまり大きくないこともあり、単純な和が成立しなかったと考えられる。また、 R_d に関しては位相の効果が見られなかった。これは、長周期波の打ち下げ時は短周期波の進行を妨げているためだと考えられる。一方、図-7（a），（b）から緩勾配斜面では位相による R_u 及び R_d の変化はほぼ見られなかった。以上から、合成波の R_u 及び R_d は対応する単一周期波の和によりほぼ推定できるといえる。

5. 単一周期波の R_u 及び R_d の推定

本章では、単一周期波の R_u 及び R_d の推定の可能性を検討する。長周期波と短周期波から R_u 及び R_d を推定するには、碎波状態の考慮が必要と考え、surf similarity parameter ($\xi_0 = \tan\beta/\sqrt{H_0/L_0}$) で整理した。その際、set-up の代わりとして遡上域の中央地点 (R_m) を同様に整理した。図-8 に H_0 で基準化した R_u 、 R_d 及び R_m と ξ_0 の比較を示す。図-8 より、 $\xi_0 \geq 5.0$ では重複波になっていると考えられ3者は一定、 $\xi_0 < 5.0$ では R_u は直線、 R_d 及び R_m は2次曲線をあてはめ経験式を求めた。ただし、 $\xi_0 = 0$ では完全碎波し遡上振幅が0となり、またそれに伴う汀線における set-up は一般に沖波波高 H_0 の1～2割程度に達すると知られていることに加え、 ξ_0 が最小のケースにおける H_0 で基準化した R_u 、 R_d 及び R_m の値が0.1程度であることから、 $\xi_0 = 0$ では各々の値を0.1とした。また、 $\xi_0 \geq 5.0$ では $\xi_0 = 5.0$ として計算している。

$$\frac{R_u}{H_0} = \begin{cases} 0.769\xi_0 + 0.1 & (\xi_0 < 5.0) \\ 3.95 & (\xi_0 \geq 5.0) \end{cases} \quad \dots (1)$$

$$\frac{R_d}{H_0} = \begin{cases} -0.210\xi_0^2 + 0.435\xi_0 + 0.1 & (\xi_0 < 5.0) \\ -2.98 & (\xi_0 \geq 5.0) \end{cases} \quad \dots (2)$$

$$\frac{R_m}{H_0} = \begin{cases} -0.0669\xi_0^2 + 0.481\xi_0 + 0.1 & (\xi_0 < 5.0) \\ 0.831 & (\xi_0 \geq 5.0) \end{cases} \quad \dots (3)$$

図-9 は単一周期波の実測値と経験式から求めた値の比較、図-10（a），（b）は長・短周期合成波における R_u 及

図-4 単一周期波の和と合成波の比較（打ち上げ高 R_u ）

図-5 単一周期波の和と合成波の比較（打ち下げ高 R_d ）

図-6 急勾配斜面における合成波の位相が異なる場合

図-7 緩勾配斜面における合成波の位相が異なる場合

図-8 H_0 で基準化した R_u 、 R_d 及び R_m と ξ_0 の比較

図-9 実験値と経験式から求めた値の直接比較 (単一周期波)

び R_d の実測値とそれに対応する推定値の和を比較したものである。図-9, 10共に良い一致を示していることから、長・短周期合成波における R_u 及び R_d は、経験式から求めた単一周期波の値の和で推定できるといえる。

6. 完全反射域における R_u と R_d の比較

第3章において、急勾配斜面における長周期波のみの遡上波形は静水時の水深を境に上下の振幅がほぼ対称となっていると記した。しかしながら、図-8より $\xi_0 \geq 5.0$ すなわち完全反射となる範囲では、 $|R_u| > |R_d|$ となっていることがわかる。そこで本章では、 $|R_u| > |R_d|$ となる理由を検討する。急勾配斜面における長周期波は完全反射となり、斜面上に重複波が形成される。この解は線形の範囲内ではBessel関数を用いて式(4)で表せられる。この重複波の静水汀線における振幅が R_u と等しいとし、重複波と斜面の沖側の交点における鉛直方向距離を R_d と考え、 R_u と R_d を比較する。

$$y = aJ_0\left(\sqrt{\frac{4\sigma^2}{g \tan \beta}}x\right) \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$d = -x \tan \beta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 y ：静水汀線からの鉛直上向き距離、 a ：静水汀線位置での振幅、 J_0 ：0次のBessel関数、 $\sigma (=2\pi/T)$ ：角周波数、 g ：重力加速度、 t ：時間、 d ：斜面の鉛直方向距離、 x ：静水汀線からの沖向き距離である。重複波と斜面の交わりを示したものが図-11である。図-11より、

(a) 打ち上げ高 R_u (b) 打ち下げ高 R_d
図-10 実験値と経験式から求めた値の比較 (合成波)

図-11 斜面上の重複波と斜面の交わり ($\tan \beta = 1/7.8$, $T = 3.5s$)

$|R_d|$ は $|R_u|$ より2割程度小さくなっていることがわかる。実際に、完全反射域での R_u 及び R_d の実測値は同様の結果となっていることを確認できた。

7. 既往の研究との比較

(1) 現地自然海浜における経験則との比較

重山ら(2012)は、現地高波浪時において R_d は汀線付近で重複波となる長周期波成分の水位変動量のみからほぼ決まるが、 R_u はそれに加えて碎波する短周期波が寄与して長周期波成分による水位変動量の約2倍になるとしている。そこで、この結論と一致するか本研究の実験値で確認する。図-12に長・短周期合成波における実験値と現地解析により得られた経験則から算出した R_u 及び R_d の比較を示す。なお、汀線付近における長周期波成分の水位変動量は以下の2つの方法で求めた。1つ目の方法として、一様勾配斜面上への長波の打ち上げ高の推定式(式(6)；首藤・松村, 1965)を用いた。

$$\eta_{\max} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{\sqrt{\tan \beta} \cdot T_i} \cdot \left(\frac{h}{g}\right)^{1/4} \cdot \frac{H_i}{2} \approx -R_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\eta_{\max}$ ：長波の打ち上げ高 R_u 、 T_i ：入射波の周期、 h ：水深、 H_i ：水深 h における入射波高である。2つ目として、反射率が非常に高いと仮定した場合における斜面上の重複波と沖波との接続式(式(7)；例えばMei, 1983)を用いた。

$$a_s = \frac{H_{i,0}}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{\tan \beta}} \approx -R_d \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 a_s ：静水面からの変動量、 $H_{i,0}$ ：入射波の沖波換算波高である。また、 R_u に関しては短周期波成分を考慮

図-12 実験値（合成波）と現地経験則から得られた値の比較（円の径は H_s に比例）

図-13 急勾配斜面における遡上域の範囲（実験）と汀線付近の長周期波の関係

して式（8）とした。

$$R_u \approx -2R_d \dots\dots\dots (8)$$

図-12より、図中央部の急勾配かつ短周期波が長周期波より非常に大きい（現地の高波浪をよく再現している）ケースにおいては、重山ら（2012）の結論と同様の結果となることを確認できる。また、汀線付近における長周期波の算出方法の違いによる推定値の変化はほとんど見られなかった。図-13は急勾配斜面における遡上域の範囲と長周期波の水位変動量の比を示したものである。なお、遡上域の範囲は式（6）、（7）、（8）から長周期波成分による水位変動量の約3倍になると考えられる。図-13より、長周期波が小さく短周期波が大きくなるにつれて、遡上域の範囲は長周期波の水位変動量の3倍に近づいていることがわかる。以上から、重山ら（2012）による現地自然海浜における経験則は、反射率の高い長周期波がある程度あり、短周期波が非常に大きい時のみに適用可能と考える。

（2）既往の単一周周期波の R_u に関する推定式との比較

高田（1975、服部（1987）参照）はMicheの解を拡張したものを実験データを組み合わせることにより、斜面勾配が1/8より大きい場合における単一周周期波の打ち上げ高の推定式を提案している。図-14は単一周周期波の打ち上げ高に関して、式（1）及び高田（1975）の推定式から得られた値と実験値を直接比較したものである。緩勾配斜面（ $\tan\beta=1/20$ ）において高田（1975）の推定式か

図-14 単一周周期波の相対打ち上げ高に関する式(1)と既往の推定式から得られた値の比較

ら算出した値を除き、両推定値共に実験値と比較的良好一致を示している。この事より、今回の経験式（1）は既往の研究結果と一致する上に、簡単な式で緩勾配のケースも含むものになっていると言えよう。

8. 結論

長・短周期合成波における最大打ち上げ高 R_u 及び最大打ち下げ高 R_d について広範囲の条件で実験を行うことで、実験範囲内での長周期波と短周期波の役割について以下に示す結論を得た。

- ①長・短周期合成波の最大打ち上げ高 R_u 及び最大打ち下げ高 R_d は対応する単一周周期波の諸量の和によりほぼ推定できる。
- ②単一周周期波の最大打ち上げ高 R_u 、最大打ち下げ高 R_d 及び遡上域の中央地点 R_m はsurf similarity parameter ξ_0 を用いることにより推定できる。
- ③遡上域の範囲において反射率の高い長周期波は主に振幅成分、碎波する短周期波は減衰後の振幅とset-upを要素として考えることができる。

今後の課題として、短周期波の要素の一つとして考えられるset-upを精度よく測定し、その値の推定式をたてることが挙げられる。

謝辞：本研究の実験を行う際に、有限会社中央工測の小栗保二さんから多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 重山智成・島田奈緒・若荷孝仁・高橋香澄・水口 優（2012）：現地自然海浜における高波浪時の遡上域の範囲について，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.81-85。
 首藤伸夫・松村圭二（1965）：長波について——様傾斜斜面上への打ち上げ高—，第12回海岸工学講演会講演集，pp.176-179。
 高田 彰（1975）：規則波の打上げ高および越波量の定式化について，第22回海岸工学講演会論文集，pp.377-386。
 服部昌太郎（1987）：海岸工学，コロナ社，pp.175-178。
 Mei, C. C. (1983) : The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, pp.521-530.