

複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究

Random Wave Runup Formulae for Seawall with Composite Cross Section

玉田 崇¹・間瀬 肇²・安田誠宏³

Takashi TAMADA, Hajime MASE and Tomohiro YASUDA

The height of seawalls is designed based on allowable wave overtopping rate or wave runup height in design of surge and wave prevention facilities. Although a design method based on wave overtopping rate takes into account of wave randomness, a design method based on wave runup height does not consider the wave randomness but uses equations and figures from regular waves' theories and experiments. There is an urgent need for establishing estimation schemes of random wave runup height and incorporating the schemes into a seawall design. This study proposes equations for predicting random wave runup heights for seawalls with composite cross section installed near shoreline, aiming at elaborating a seawall design scheme.

1. はじめに

高潮防護施設の実務設計では、多くの場合において越波量か打上げ高を基にして天端高を設定する(土木学会海岸工学委員会, 2000; 海岸保全技術委員会, 2004)。越波量による設計法(例えば, 合田ら, 1975a)では不規則性の概念が反映されているが, 打上げ高による設計法は規則波に基づく算定式(例えば, 高田, 1970; 中村ら, 1972)や図表(例えば, 豊島ら, 1964, 1965)を使用しており, 波の不規則性が考慮されていない。

これまでも一部では不規則波による打上げ高の研究が行われてきた(例えば, de Waal・van der Meer, 1993; 間瀬ら, 2003a, 2006)が, 現地における多くの設計条件を網羅したものではない。また, 高潮防護施設を必要とする海岸は, 複雑な海底地形を有していたり, 設計対象箇所の堤脚水深が浅かったり, 現行の打上げ高算定法の適用範囲を満足しないことが多い。そのため, 複雑な海底地形や断面形状に対する不規則波を対象とした打上げ高算定法を確立し, 高潮防護施設の設計へ反映することは急務であるといえる。

そこで本研究では, 複合断面においても適用することが可能な「波の不規則性を考慮した打上げ高の算定式」を提案するものである。

2. 不規則波の打上げ高算定法

(1) 複合断面に対する打上げ高算定法

本研究で提案する打上げ高算定式は, 複雑な海浜断面や堤防形状での打上げ高の評価に広く用いられる「中村ら(1972)の改良仮想勾配法」の考え方を踏襲する(図-

1を参照)。中村ら(1972)の改良仮想勾配法は, 波の打上げ高と碎波水深地点の2点間の実断面の面積 A から, 図中の式により仮想勾配 β を決定するものである。そのため, 碎波水深の設定は, 打上げ高を算定する上で非常に重要な要素の一つである。

また, 既往の設計法では, 中村ら(1972)の改良仮想勾配法による打上げ高算定図が, 波の不規則性を考慮していないことを鑑み, 合田(1970)の規則波に対する碎波指標を用いて碎波水深の算定する。この合田(1970)の碎波指標は, 図表で整理されており汎用性が高いものの, 一様な海底勾配での実験結果をもとに作成しているため, 複雑な海底地形には適用することができない。一方, Mase・Kirby(1993)の波浪変形予測モデルは, 複雑地形に対して容易に不規則波の碎波変形計算を行うことができ, エネルギー減衰項の有無により, 複雑地形に対しても碎波水深を定めることに用いることができる。したがって, Mase・Kirbyモデルを用いて, 碎波水深を算定することとした。

(2) 不規則波の碎波水深算定図

不規則波に対する新たな碎波指標を検討するため, Mase・Kirby(1993)の波浪変形予測モデルを用いて, 波高, 周期および海底勾配等の諸条件を種々変化した全190ケースの数値実験を実施した。主要な計算条件は, 表-1に示す通りであり, 波形勾配 $H_0/L_0=0.002\sim 0.07$ の

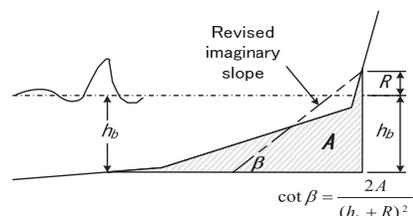


図-1 改良仮想勾配法の考え方

1 正会員 修(工) いであ(株)建設技術事業本部海岸部
2 正会員 工博 京都大学教授防災研究所
3 正会員 博(工) 京都大学助教防災研究所

範囲で、海底勾配が1/10, 1/20, 1/30および1/100の一樣傾斜海浜を対象とした。また、それらの結果を合田(1975b)の碎波指標と同様の方法でとりまとめることにより、施設設計の際の活用しやすさにも配慮した。なお、現地を対象とする非一樣傾斜海浜の場合には、その都度計算が必要である。

図-2には、Mase・Kirbyモデルを用いて作成した碎波水深算定図を示す。図中のプロットはそれぞれの条件での計算結果であり、それらにフィットするように引いた海底勾配ごとの曲線を示してある。また、参考として、合田(1975b)による碎波帯内における有義波高 $H_{1/3}$ が最大となる水深($h_{1/3}$)peakを碎波水深として定義した場合の碎波水深算定曲線も併せて示してある。

不規則波の碎波点は、Mase・Kirbyモデルにおいて碎波エネルギー減衰項を用いずに計算した有義波高の結果に比べ、碎波減衰項を入れた計算結果が7%減少する地点を碎波点と定義することとした(図-3を参照)。数値実験結果を整理するにあたり、波高減少率を3%~30%の範囲で変化させたが、波高減少率を7%とした場合の碎波水深算定結果が、わが国における高潮防護施設の設計条件として出現頻度の高い、海底勾配1/10~1/30かつ波形勾配 $H_0/L_0=0.02\sim 0.05$ の範囲において、合田(1975b)のものと良く適合したためである。なお、Mase・Kirbyモデルを用いて作成した碎波水深算定結果と、合田(1975b)の不規則波に対する碎波水深曲線は、海底勾配が1/100の場合と波形勾配 $H_0/L_0 < 0.02$ および $0.05 < H_0/L_0$ の条件において、両者の差が大きくなる傾向がみられた。特に、海底勾配が緩く、波形勾配が小さい場合、合田(1970)のモデルは単一規則波の非線形長波理論式を用いているので、単一規則波としての浅水変形による波高増大が顕著であるが、多数の成分波からなる不規則波では、分散性により浅水変形の波高増大に差が現れるためである。そのような差は、間瀬ら(1986)にも現れている。

3. 不規則波の打上げ高算定式の提案

(1) 不規則波の打上げ高算定式

間瀬ら(2003a, 2006)により、汀線近傍に0.5割および3割勾配護岸を設置した場合の不規則波の打上げ実験が実施されてきた。表-2は主要な実験条件を示しており、実験結果は表-3に示すケース名対応表により分類した。これらの打上げ高の実験結果(全105ケース)と、図-2で作成した碎波水深算定図から算出した改良仮想勾配 β を用いて、不規則波の代表打上げ高($R_{2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$)とsurf similarity parameterとの関係を整理した。

Mase(1995)によると、特に緩勾配斜面において、不規則打上げ波は長周期変動が卓越し、打上げ波は沖での

表-1 計算条件

入射波スペクトル		JONSWAP
入射波高	H_0 (m)	0.37~4.48
入射波周期	$T_{1/3}$ (s)	6.0~10.0
波形勾配	H_0/L_0	0.002~0.07
計算水深	h (m)	30, 60
海底勾配	i	1/10, 1/20, 1/30, 1/100

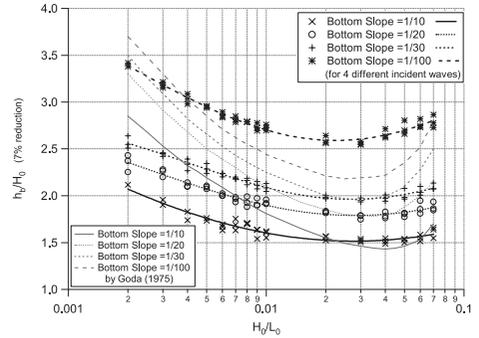


図-2 碎波水深算定図

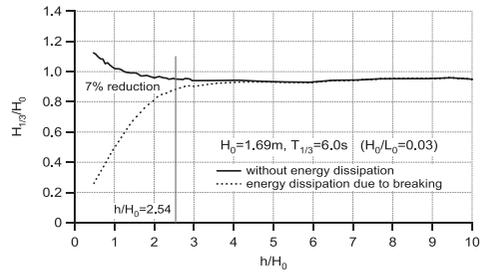


図-3 碎波点の定義図 (波高減少率7%)

表-2 実験条件

模型縮尺		1/45, 1/50
入射波スペクトル		JONSWAP
入射波高	$H_{1/3}$ (cm)	3.80~12.82
入射波周期	$T_{1/3}$ (s)	0.8~2.1
波形勾配	H_0/L_0	0.009~0.06
実験水深	h (cm)	40.0, 42.5, 43.0, 45.0
海底勾配	i	1/10, 1/20, 1/30
法面勾配	$\cot\alpha$	0.5, 3.0

表-3 実験ケース名

Case	h (cm)	i ($\tan\theta$)	$\cot\alpha$	Case	h (cm)	i ($\tan\theta$)	$\cot\alpha$
1	43.0	1/10	0.5	8	45.0	1/30	3.0
2	43.0	1/10	3.0	9	40.0	1/20	0.5
3	43.0	1/30	0.5	10	42.5	1/20	0.5
4	43.0	1/30	3.0	11	45.0	1/20	0.5
5	45.0	1/10	0.5	12	40.0	1/20	3.0
6	45.0	1/10	3.0	13	42.5	1/20	3.0
7	45.0	1/30	0.5	14	45.0	1/20	3.0

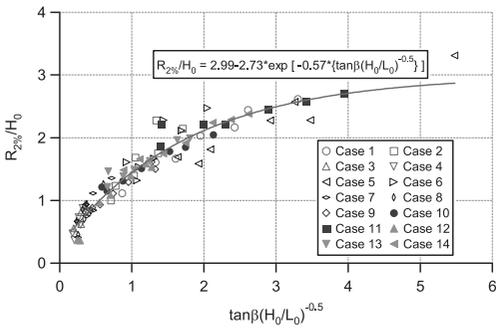


図-4 2%超過打上げ高

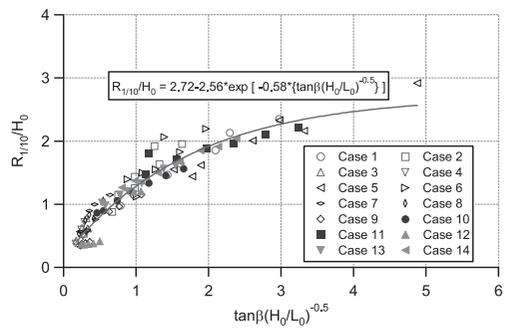


図-5 1/10最大打上げ高

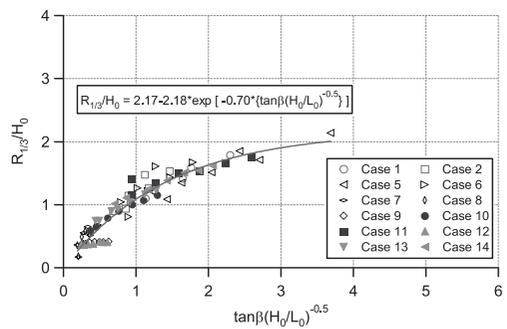


図-6 1/3最大打上げ高

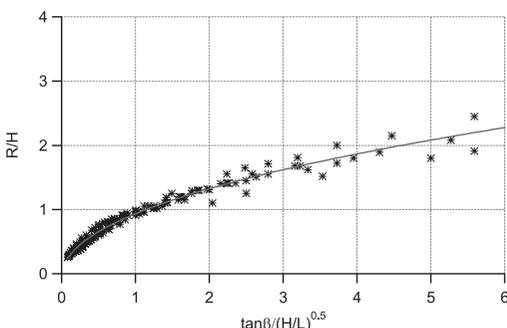


図-7 中村らの打上げ高算定曲線の再整理結果

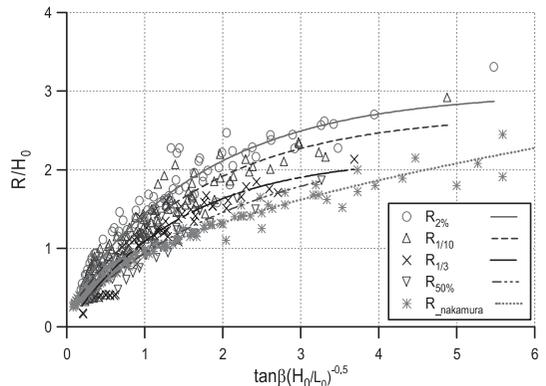


図-8 不規則波の代表打上げ高と規則波の打上げ高算定結果の比較

波の数に比べて減少することが報告されている。このため、打上げ波数に対して代表打上げ高を定義した場合には、代表値が過大となり適切な有義値を表しているとは言い難い。また、我が国には沖合での豊富な波浪観測データが蓄積されており、打上げ高を検討するうえで、沖波を使用することは実務的である。これらのことから、代表打上げ高を定義する際の波の数は、入射する波の数(入射波数)を基準とする。入射波数の2%の波数に対応する打上げ高を2%超過打上げ高 $R_{2\%}$ 、入射波数の1/10の数だけ平均した打上げ高を1/10最大打上げ高 $R_{1/10}$ 、入射波数の1/3の数だけ平均したものを1/3最大打上げ高 $R_{1/3}$ とする。このように代表打上げ高を入射波数に対して定義する方法は、EurOtop (2008) において採用されている。

図-4～図-6は、法先水深波高比 $h/H_0 = 0.37 \sim 0.53$ の範囲において、不規則波での代表打上げ高($R_{2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$)と surf similarity parameter の関係を整理した結果を示す。これらによると、いずれの代表打上げ高においても、法面勾配、海底勾配、潮位条件および波浪条件が異なる結果が混在しているにもかかわらず、横軸の surf similarity parameter に対してうまく整理することができる。

また、それぞれの図中の実線で示したものは、実験結果にフィットするように引いた代表打上げ高の算定曲線である。これらの算定曲線は次式で表され、不規則波の打上げ高算定式として提案するものである。

$$R_{2\%} / H_0 = 2.99 - 2.73 \exp(-0.57 * \tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0}) \quad \dots (1)$$

$$R_{1/10} / H_0 = 2.72 - 2.56 \exp(-0.58 * \tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0}) \quad \dots (2)$$

$$R_{1/3} / H_0 = 2.17 - 2.18 \exp(-0.70 * \tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0}) \quad \dots (3)$$

ただし、この打上げ高算定式の適用範囲は、

$$\left. \begin{aligned} 0 < \tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0} < 6.0 \\ 0.009 < H_0 / L_0 < 0.06 \\ -0.37 < h / H_0 < 0.53 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

である。ここに h は法先水深である。

両者の整合性は良好であった。砕波水深はほぼ1/10勾配の斜面法先であり、この節での実験条件は、本算定式の作成に用いた砕波後が複合断面であるという本実験条件とは異なっているものの、本研究で提案した不規則波の打上げ高算定式は複合断面において、十分に適用可能であることが確認できた。

c) 現行の設計法の問題点

本節で対象としている実験条件において、現行の高潮防護施設の設計法がどの程度実験結果を再現することが可能か検討した。図-11は、打上げ高の実験結果と本研究による提案式による算定結果および現行設計法による打上げ高の算定結果を比較したものであり、横軸に入射波周期、縦軸に打上げ高を整理した。なお、ここでは実験で用いた各周期の平均値を対象とした。ここに、現行の設計法による打上げ高とは、合田(1970)の砕波指標により砕波水深を算出したうえで、中村ら(1972)の改良仮想勾配法を用いて計算したものである。

図-11によると、周期が短い場合は、現行の設計法である規則波による中村ら(1972)の手法による打上げ高は、不規則波の $R_{1/10}$ 程度に相当するが、周期が長くなるにつれて、打上げ高は実験結果に比べて小さくなり、過小評価する傾向がみられる。一方、本研究で提案した打上げ高算定法による算定結果は、周期が長い場合には実験結果よりも若干小さかったものの、中村ら(1972)のものよりは精度良く実験結果を再現することができた。ただし、検証対象とした実験の条件では、1/10斜面法先で砕波してそのまま打ち上がるので、複断面による打上げ高減衰効果が小さいため、提案式より大きな打上げ高になったものと考えられる。このような提案式の適用範囲の境界にあり、護岸法先付近で砕波する条件に対しては、間瀬ら(2003b)の打上げ高算定式の適用範囲でもあるため、そちらを採用することにより、幾分大きな打上げ高算定結果を得ることができる。

4. おわりに

本研究は、海底地形や護岸断面が非一様である場合に適用できる「不規則波の打上げ高の算定式」を提案した。主要な結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) Mase・Kirby(1993)の不規則波変形予測モデルを用いて砕波水深算定図を作成した。この結果は、海底勾配 i が $1/10 \sim 1/30$ かつ波形勾配 $H_0/L_0=0.02 \sim 0.05$ の範囲において、合田(1975b)の砕波水深とほぼ一致する。
- 2) 法先水深波高比 $h/H_0=0.37 \sim 0.53$ 、surf similarity parameterが $0 \sim 6$ の範囲において、不規則波での代表打上げ高($R_{2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$)とsurf similarity parameterの関係から算定式を定式化した。法面勾配、海底勾配、潮位条件および波浪条件が異なる実験結果におい

ても、提案した算定曲線で表現することができた。

- 3) 規則波を対象とした中村ら(1972)の打上げ高算定曲線は、不規則波の $R_{50\%}$ (打上げ高を入射波の50%の波数で平均した値)に相当することを明らかにした。

謝辞：本研究の3.(3)で提案式の検証に用いた複合断面に対する打上げ実験は、(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チームの平山克也氏、加島寛章氏によって実施されたものである。実験結果を快く提供していただいたことをここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 海岸保全施設技術委員会編(2004)：海岸保全施設の技術上の基準・同解説。
- 合田良實(1970)：砕波指標の整理について、土木学会論文報告集、第180号、pp.39-49。
- 合田良實・岸良安治・神山豊(1975a)：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第14巻、第3号、pp.3-44。
- 合田良實(1975b)：浅海域における波浪の砕波変形、港湾技術研究所報告、第14巻、第3号、pp.59-106。
- 高田彰(1970)：波の遡上、越波および反射の関連性について、土木学会論文集、第182号、pp.19-30。
- 豊島修、首藤伸夫、橋本宏(1964)：海岸堤防への波の打上げ高-1/30-, 第11回海岸工学講演会論文集、pp.260-265。
- 豊島修、首藤伸夫、橋本宏(1965)：海岸堤防への波の打上げ高-1/20-, 第12回海岸工学講演会論文集、pp.180-185。
- 土木学会海岸工学委員会編(2000)：海岸施設設計便覧。
- 中村充・佐々木康雄・山田稔二(1972)：複断面における波の打上げ高に関する研究、第19回海岸工学講演会論文集、pp.309-312。
- 間瀬肇・松本明男・岩垣雄一(1986)：不規則波の浅水・砕波変形計算モデルに関する研究、土木学会論文集、第375号、II-6、pp.221-230。
- 間瀬肇・宮平彰・桜井秀忠・井上雅夫(2003a)：汀線近傍の護岸への不規則波の打上げに関する研究-算定打上げ高と不規則波の代表打上げ高の関係-, 土木学会論文集No.726/II-62、pp.99-107。
- 間瀬肇・Hedges, T. S.・Shareef, M.・永橋俊二(2003b)：波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定法に関する研究、海岸工学論文集、第50巻、pp.636-640。
- 間瀬肇・所良晃・目見田哲・桜井秀忠・今林敏明(2006)：汀線近傍の一樣勾配斜面への不規則波の打上げ高、土木学会論文集B, Vol.62, No.1, pp.163-168。
- de Waal, J. P.・van der Meer, J. W.(1993)：Wave run-up and overtopping on coastal structures, Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.758-1771。
- EuroTop(2008)：Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual (Die Kuste version)。
- Mase, H.・Kirby, J. T.(1993)：Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation, Proc. 23rd Int.Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.474-487。
- Mase, H.(1995)：Frequency down-shift of swash oscillations compared to incident waves, Jour. Hydraulic Res., Vo.33, No.3, pp.397-411。