滑動安定換算により評価した漁港の防波堤 の波力算定法について

大村 智宏¹・八木 宏²・中山 哲巖³・劔崎 聖生⁴
西崎 孝之⁵・門 安曇⁶・滑川 順⁷・佐藤 勝弘⁸

¹正会員 国立研究開発法人水産総合研究センター水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)
E-mail:ohmura@affrc.go.jp

²正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
E-mail:yagih@nda.ac.jp

³正会員 国立研究開発法人水産総合研究センター水産工学研究所 (〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)
E-mail:tetugen@affrc.go.jp

⁴水産庁漁港漁場整備部整備課 (〒100-8907 東京都千代田区霞が関1-2-1)

⁵前水産庁漁港漁場整備部整備課 (〒100-8907 東京都千代田区霞が関1-2-1)

⁶国際気象海洋株式会社 (〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9 U・Yビル4F)

⁷正会員 国際気象海洋株式会社 (〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9 U・Yビル4F)

⁸正会員 株式会社アルファ水工コンサルタンツ (〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9U・Yビル2F)

漁港・漁場の施設では直立壁に作用する波力の算定にあたり、重複波と砕波の各領域で波力式の使い分けが一般的に行われてきたが、同手法では各領域間で波力の不連続性が発生することが課題であった。また漁港の防波堤の被災実態調査からは、算定波力が過小であると推察される事例が確認された。

本研究では一様勾配斜面上の混成堤を対象に不規則波作用下の実験を行い、波力算定法について検討することとした。計測波圧を用いて直立部の滑動量が許容値に収まる滑動安定換算により評価した結果、現行の算定波力は浅海域における防波堤の作用波力を過小評価することが確認された。また合田式の補正係数に対して浅海域での修正を加えることにより、砕波帯内を含む幅広い水深帯において合理的な波力算定が可能となることを示した。

Key Words : wave pressure, composite breakwater, physical model test, expected sliding distance

1. はじめに

漁港・漁場の施設や漁港海岸保全施設の設計においては、直立壁の作用波力（壁面に波の山が作用する場合）の算定にあたり、重複波領域と砕波領域の各領域で波力式の使い分けが一般的に行われてきた¹⁾²⁾。また波力算定時には、砕波帯内では菅原・山本の砕波変形計算モデル³⁾⁴⁾に基づく波高変化図と平均水位上昇量が用いられることも特徴として挙げられる。これらの取扱いは1984年より始まり現在に至っている。

同手法に基づく消波工の有無にかかわらず、堤体前面における設計有義波高 $H_{1/3}$ と堤体前面水深 h （混成堤および直立壁底面に捨石を設ける場合は、マウンド上水深 d を堤体前面水深と見なす）の関係により、 $h > 2H_{1/3}$ では重複波領域として、他方は砕波領域として取扱われ

る。このため $h = 2H_{1/3}$ を境に波力の評価に不連続が発生することとなり、この波力の不連続性が施設の耐波安定性や構造諸元に及ぼす影響とその取扱いについて、漁港漁場関係者は長年悩まされてきた。また漁港の防波堤の被災実態調査からは、算定波力が実現象を過小に評価していると推察される事例が確認された。

これらの背景から砕波帯内における整備事例が多い漁港に適した合理的な波力算定法の構築が要望されていた。そこで一様勾配斜面上の混成堤を対象に、直立部の作用波力に関する実験的研究に取り組むこととした。ここでは実験の計測波圧を用いて直立部の許容滑動量から定まる滑動安定換算波力を算出し、これを作用波力として評価した。本報では滑動安定換算波力との比較による現行算定式および合田式の適用性や、補正係数の修正、現行式と提案式が実設計に及ぼす影響について論述する。

2. 断面実験による波力算定法に係る検討方法

(1) 長水路における実験方法

実験は長水路（長さ100m×幅1.0m×深さ1.5m）において行った。模型縮尺は1/50程度を想定し、1/30および1/10の一樣勾配斜面上に混成堤模型を設置した（図-1参照）。混成堤模型は直立部をアクリル製とし、マウンドを蛇籠に詰めた採石で構成した。作用波は修正Bretschneider-Mitsuyasu型スペクトルの不規則波とし、消波工の有無のそれぞれの防波堤について検討した。表-1に入射波と混成堤模型の実験条件を示す。表中では混成堤の設置水深 h とマウンド上水深 d の関係に加えて、実験波の換算沖波波高 H_0' とその周期 T_0 の組合せ、沖波諸元の波形勾配 H_0'/L_0 （ L_0 は沖波波長）について記した。計測項目は容量式波高計による沖側および堤体位置の水位変動と、半導体型動歪み式波圧計による直立部前面と底面の作用波圧である。作用波圧は波圧計アンプの最小サンプリングタイム0.04msでAD変換しデータを収集した。

(2) 滑動安定換算波力

計測された直立部前面の作用波圧は、実験波条件により衝撃砕波圧の発生が見られるとともに、波群の違いにより波圧分布のバラツキが確認された。また衝撃砕波圧の作用は短時間であり、計測波圧をそのまま使用して波力を算定することは適当でないと判断した。本研究では直立部の安定性について検討することを目的としており、

図-1 実験で用いた長水路と模型および計測機器の配置

表-1 実験条件

消波工	勾配	堤体設置条件			換算沖波		H_0'/L_0
		h (cm)	d (cm)	$h-d$ (cm)	H_0' (cm)	T_0 (s)	
なし	1/30	3~40	3~24	0~16	5.2~16.9	1.0~2.6	0.01~0.05
	1/10	6~30	6~19	0~11	5.8~12.5	1.3~2.6	0.01~0.03
付き	1/30	3~40	3~24	0~16	4.9~16.9	1.1~2.6	0.01~0.04

表-2 現行の漁港防波堤の波力算定式

消波工	重複波領域	砕波領域
なし	Sainflouの簡略式+部分砕波式	広井式
付き	Sainflouの簡略式+部分砕波式	森平らの式

作用時間の短い衝撃砕波圧が直立部の滑動に及ぼす影響評価が必要であることから、ここでは防波堤の滑動量の観点から波力を評価することとした。このため計測波圧から滑動安定換算波力を算定し実験波力と定義した。

滑動安定換算波力は直立部の滑動量を運動方程式により推定し、この滑動量が許容値以下となる波圧レベルとして求めた⁵⁾。具体的には計測波圧より求まる水平波力および揚力の時系列を作用させて滑動量を求め、許容滑動量となる堤体サイズから安定に必要な堤体滑動抵抗力を評価した。そしてこの滑動抵抗力に均衡するものとして滑動安定換算波力を出した。ここでは直立部と基礎マウンドの摩擦係数 $\mu=0.6$ とし、実機換算での許容滑動量を50年確率波に対する修復限界の10cmに設定した⁶⁾。

(3) 現行の波力算定式と合田式

滑動安定換算波力と比較・検討する波力公式（壁面に波の山が作用する場合）として、漁港の防波堤の設計において標準的に用いられる現行算定式と合田式について取り上げる。現行算定式は表-2に示すとおりであり、消波工の有無ともに $h=2H_{1/3}$ を境に重複波領域と砕波領域で波力算定式の使い分けが行われる¹⁾。一方の合田式は図-2に示す波圧分布形状をなし、消波工の有無を包括する式として表される。不規則波の波群中の最高波高 $H_{\max}$ と関係付けられたこれらの諸量は、次式により算定される^{7,8)}。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_{\max} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_{\max} \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\} \quad (7)$$

ここに、 η^* ：静水面上で波圧強度がゼロとなる高さ、

図-2 壁面に波の山がある場合の合田式の波圧分布

p_1 : 静水面における波圧強度, p_2 : 海底面における波圧強度, p_3 : 直立壁の底面における波圧強度, ρ_0 : 水の密度, g : 重力加速度, β : 波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な波圧を与える角度, λ_1, λ_2 : それぞれ波圧の補正係数, h : 直立壁の前面における全水深, L : 有義波周期による水深 h における波長, $H_{\max}$: 設計に用いる最高波の波高で, 砕波帯内では直立壁の前面から $5H_{1/3}$ 沖側までの区間の最大値, h_b : 直立壁の前面から $5H_{1/3}$ 沖側地点の水深, d : マウンド上の根固工または被覆ブロック天端のうち浅い方の水深, h' : 直立壁の底面の水深である.

合田式中の補正係数は, 消波工なしでは $\lambda_1=1.0$, $\lambda_2=1.0$ をとり, また消波工付きでは $\lambda_2=0$, λ_1 は次式で与えられる^{7,8)}.

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (H_{\max}/h \leq 0.3) \\ 1.2 - 2(H_{\max}/h)/3 & (0.3 \leq H_{\max}/h \leq 0.6) \\ 0.8 & (0.6 \leq H_{\max}/h) \end{cases} \quad (8)$$

(4) 算定波力の求め方

各波力算定式より算定値を求めるにあたっては, 水路沖側の計測値から H_0' , T_0 を算出し, これらの換算沖波波高 H_0' を用いて防波堤への入射波を算定することとした. 算定式中で $H_{1/3}$ を用いる現行式については, $h/H_0' \leq 4.0$ の水深帯では菅原・山本の砕波変形計算モデル^{3,4)}に基づく波高変化図⁹⁾を用い, $h/H_0' > 4.0$ では微小振幅波理論に

基づき入射波高を定めた. 一方の $H_{\max}$ を用いる合田式については, 砕波の影響を受ける水深帯では合田の砕波変形計算モデル⁹⁾を用いることで, 影響のない水深では $1.8H_{1/3}$ として入射波高を求めた. なお砕波の影響を受ける場合には直立壁前面から $5H_{1/3}$ 沖側までの区間の最大値として, 防波堤への作用波高 $H_{1/3}$ および $H_{\max}$ をそれぞれ算定した.

3. 断面検討の結果および考察

(1) 実験波力と算定波力の比較

図-3は消波工なしの場合について, 算定波力と滑動安定換算で評価した実験波力の関係を水深 h と換算沖波波高 H_0' の比, およびマウンド上水深 d と堤前有義波高 $H_{1/3}$ の比でそれぞれ整理して示したものである. 現行の算定式は勾配によらず, ほぼすべての水深帯にわたり実験波力よりも過小評価することが図より見て取れる. また重複波領域と砕波領域の境界にあたる $d/H_{1/3}=2$ で波力算定式が異なることから, 算定波力の不連続性が認められる. 一方, 合田式による算定波力は相対水深が浅い場合を除き, 概ね安全側の値を示すことがわかる.

図-4は消波工付きについて同様に, 算定波力と実験波力の関係を整理して示したものである. 図より現行の算定波力は安全側と危険側となるケースが混在しており, 実験波力を下回るケースも多く確認できる. 合田式に高

(a) 水深と換算沖波波高の比による整理

(a) 水深と換算沖波波高の比による整理

(b) マウンド上水深と堤前有義波高の比による整理

(b) マウンド上水深と堤前有義波高の比による整理

図-3 算定波力と実験波力の関係 (消波工なし)

図-4 算定波力と実験波力の関係 (消波工付き)

橋らの補正を施した算定波力は、相対水深が浅い場合で過小評価の傾向が見られるものの、幅広い水深帯において概ね安全側であることが認められる。

(2) 浅海域に適用するための合田式の補正

合田式による算定波力は、相対水深が浅い場合を除いて概ね妥当な結果を得ることが判明した。防波堤の設置水深が浅い場合の実務上の取扱いとしては、 $h/H_0' \leq 0.5$ の水深帯で $h/H_0' = 0.5$ として波力算定を行う方法がある¹⁰⁾。しかし本検討結果からは $h/H_0' \leq 2.0$ の水深帯で算定値が過小評価することとなり、漁港の防波堤が砕波帯内において施工事例が多い実態を踏まえると、本取扱いでは不十分であると判断された。そこで消波工の有無とともに同式中の補正係数 λ_1 の修正を試みた。

まず消波工なしに関する算定波力の修正例を図-5に示す。上段図は $1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0$ の領域で補正係数 $\lambda_1 = 1.4 - 1.0$

(a) 修正方法1

(b) 修正方法2 (三角形分布)

図-5 算定波力と実験波力の関係 (消波工なし)

図-6 算定波力と実験波力の関係 (消波工付き)

の範囲で線形変化させるとともに、 $h/H_0' \leq 1.0$ で $\lambda_1 = 1.4$ に設定した結果を表したものである。他方の下段の図は $1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0$ における λ_1 の取扱いは上段図と同様とし、 $0 \leq h/H_0' \leq 1.0$ において $\lambda_1 = 1.0 - 1.4$ の範囲で直線変化（三角形分布）させた結果を示したものである。これらの図から修正を施すことで、より浅い水深帯を含めた幅広い h/H_0' の領域において合理的な波力算定が可能となることがわかる。ただし $h/H_0' \leq 1.0$ の水深帯では、両修正方法ともに波力を過小評価するケースが散見される。特に修正方法2は修正方法1と比べて、過小に評価する傾向が認められる。

通常、砕波帯内に整備する防波堤は消波工で被覆するが、消波工を設けない場合も存在する。そこで漁港の防波堤の被災事例（平成16年災および平成18年災）を対象に、消波工なしの防波堤について調べた。当該調査結果からは $h/H_0' \leq 1.0$ の水深帯における被災事例は確認できなかった。修正後の合田式による算定波力は、図-3(a)で示した現行の算定波力の下限値を上回る傾向が見られ、実務上の観点からは本修正方法の有効性が示唆される。

消波工付きに関する算定波力の修正例を図-6に示す。ここでは $h/H_0' \leq 2.0$ の領域で消波工の波力低減効果を緩和し、波力が過小評価とならないように高橋らの補正係数 λ_1 に一部修正を加えた結果を表した。図より修正を施すことで、浅い水深を含めた幅広い水深帯において合理的な波力算定が可能となることがわかる。

以上、消波工の有無のそれぞれについて取りまとめると、合田式を浅海域に適用するための補正係数 λ_1, λ_2 は次式で与えられる。

a) 消波工なし (三角形分布)

$$\lambda_1 = \begin{cases} 0.4(h/H_0') + 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.4(h/H_0') + 1.8 & (1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0) \\ 1.0 & (2.0 \leq h/H_0') \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 1.0 \quad (9)$$

b) 消波工付き

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.2(h/H_0') + 1.2 & (1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0) \\ 0.8 & (2.0 \leq h/H_0' \leq 3.0) \\ 0.08(h/H_0') + 0.56 & (3.0 \leq h/H_0' \leq 5.5) \\ 1.0 & (5.5 \leq h/H_0') \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 0 \quad (10)$$

(3) 波力算定法が実設計に及ぼす影響

上述した波力算定法が実設計に及ぼす影響を把握するために実機換算で試算を行った。ここでは一様勾配斜面上の混成堤を想定し、設置水深毎の直立壁の水平波力を算出した。防波堤の天端高は漁港で標準的な静水面上 $1.0H_{1/3}$ に平均水位上昇量を加えて設定した。なお防波堤への作用波高および平均水位上昇量の算定においては、

現行波力算定式では手引¹⁾に記載の方法に準拠し、また合田波力式では合田の取扱い方法⁹⁾に拠った。

図-7, 8は海底勾配1/30の一樣勾配斜面上の混成堤に対し、換算沖波波高 $H_0'=5.5, 8.0, 10.5\text{m}$ 、周期 $T_0=13.0\text{s}$ の波が直入射した時の水平波力 P_H を消波工の有無のそれぞれについて示したものである。図中では現行算定式と合田式の補正係数として標準値および式(9), (10)に対応する波力を各々表示した。

まず消波工なしに着目すると、合田式による算定波力は重複波領域と碎波領域の境界で連続値となることが見て取れる。また λ_1 を式(9)に示すように大胆に直線変化(三角形分布)させたにもかかわらず、波力は滑らかな連続値を取ることがわかる。修正 λ_1 による合田波力は重複波領域では現行算定式と比較して大きい傾向が見られ、碎波領域では波条件や水深により増減が認められる。他方の消波工付きでも同様に、修正 λ_1 による合田波力は滑らかな連続変化をすることが確認できる。また碎波帯内では現行算定波力より小さい傾向が認められる。

(a) $H_0'=5.5\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.02$

(b) $H_0'=8.0\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.03$

(c) $H_0'=10.5\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.04$

図-7 消波工なし混成堤の直立壁に作用する水平波力
(海底勾配1/30, $h'/h=0.7$)

4. 平面実験による波力算定法に係る検討

(1) 平面水槽における実験方法

波の入射角が堤体の水平波力に与える影響について把握するため平面実験を実施した。ここでは模型縮尺1/36程度を想定して水槽内に1/30勾配の一樣勾配斜面を築き、混成堤模型 ($h=15.0\text{cm}, d=5.8\text{cm}$) を水槽中央に配置した。混成堤は採石による基礎マウンド上に耐水ベニヤ板製の堤体長3.0mの直立部を置いて製作した。作用波として沖波諸元 $H_0'=10.0\text{s}, T_0=2.6\text{s}$ の修正Bretschneider-Mitsuyasu型スペクトルの1方向不規則波 (20m幅) を沖側水深 $h_0=50.0\text{cm}$ で造波し、水位変動と防波堤中央の作用波圧を計測した。計測データの処理方法は先の断面検討で記した方法と同様である。

(2) 平面的な検討結果

波の入射角が直立壁の水平波力に及ぼす影響について、修正 λ_1 を用いた合田式と現行式による算定波力、実験波

(a) $H_0'=5.5\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.02$

(b) $H_0'=8.0\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.03$

(c) $H_0'=10.5\text{m}, T_0=13.0\text{s}, H_0'/L_0=0.04$

図-8 消波工付き混成堤の直立壁に作用する水平波力
(海底勾配1/30, $h'/h=0.7$)

図-9 消波工なし混成堤の直立壁に作用する水平波力 ($H_0=10.0\text{cm}$, $T_0=2.6\text{s}$, $d/H_{1/3}=0.6$, $h/H_0=1.5$, 斜面勾配1/30)

図-10 消波工付き混成堤の直立壁に作用する水平波力 ($H_0=10.0\text{cm}$, $T_0=2.6\text{s}$, $d/H_{1/3}=0.6$, $h/H_0=1.5$, 斜面勾配1/30)

力を消波工の有無別に図-9, 10にそれぞれ示す。

消波工なしの場合には、波の入射角が増大するにつれて波力は実験値および算定値ともに減少傾向が認められる。また合田式による算定波力は安全側の結果ではあるものの、いささか大きい値を示しており、入射角の取扱い方法に課題が残る結果となっている。この理由としては、実験波が1方向波であることから堤体の長手方向の作用水位が異なり、長手方向の波圧分布を考慮していないことなどが考えられる。図からは作用波の位相を変えた波群の違いにより、実験波力が異なることも見て取れる。他方の消波工付きの場合には、合田式による算定波力と実験波力の対応は良好であり、波の入射角の取扱い方法の妥当性が裏付けられた結果となっている。消波工なしの場合と異なり、入射角の増加に伴う波力の減少が顕著に見られないことが特徴として挙げられる。

5. まとめ

混成堤の直立壁に作用する波力について滑動安定換算の観点から検討し、以下の事項を明らかにした。

- 1) 実験波力と比較した結果、現行の波力算定法は防波堤の作用波力を概ね過小評価する傾向にある。
- 2) 実験的検討および被災実態調査の両結果を踏まえた修正 λ_1 による合田式により、砕波帯内を含む幅広い水深帯でより合理的な波力算定が可能となる。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、漁港漁場施設の性能規定化等技術検討委員会の委員長・磯部雅彦教授をはじめとして委員の先生方から有益なご助言を頂きました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水産庁監修：漁港・漁場の施設の設計の手引(2003年版), 全国漁港漁場協会, 1008p., 2003.
- 2) 水産庁監修：漁港海岸事業設計の手引(平成25年度版), 全国漁港漁場協会, 312p., 2013.
- 3) 菅原輝男, 山本正昭：規則波の浅水変形計算モデル, 農業土木試験場D(水産土木), 20, pp.1-21, 1978.
- 4) 山本正昭, 菅原輝男：不規則波の浅水変形—レーリー分布の場合—, 農業土木試験場D(水産土木), 20, pp.23-51, 1978.
- 5) 谷本勝利, 古川浩司, 中村廣昭：混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.846-850, 1996.
- 6) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法, 土木学会, pp.222-223, 256p., 2001.
- 7) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.12, No.3, pp.31-69, 1973.
- 8) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎：消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.1, pp.53-75, 1990.
- 9) 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.3, pp.59-106, 1975.
- 10) 土木学会海岸工学委員会海岸施設設計便覧小委員会：海岸施設設計便覧 2000年版, 土木学会, 582p., 2000.

(2015.3.18 受付)

STUDY ON THE WAVE FORCES ON COMPOSITE BREAKWATERS IN CONSIDERATION OF EXPECTED SLIDING DISTANCE

Yoshihiro OHMURA, Hiroshi YAGI, Akiyoshi NAKAYAMA, Masao KENZAKI,
Takayuki NISHIZAKI, Azumi KADO, Jun NAMEKAWA and Katsuhiro SATO

It is needless to say that the stability of breakwaters is so important to keep water calmness and to protect boats inside harbors from severe waves. In this study both of physical model tests and wave forces formulas used in Japan have been employed to investigate the wave forces exerted on the composite breakwaters. As a result, it is confirmed that the method adopted here in consideration of expected sliding distance, may give an appropriate wave forces acting on the front vertical walls. It is also affirmed that the modified Goda formulas presented here may be effective in the wide range of water depth to explain the influence of wave height, period and specifications of the composite breakwaters and so on.