

二重堤の越波流量算定法について

Estimation of the Wave Overtopping Rate for a Double Alignment Breakwater

山本泰司*・水野雄三**・鈴木孝信***・笹島隆彦****・松本英明*****・桑原幸司*****

Yasuji YAMAMOTO, Yuzo MIZUNO, Takanobu SUZUKI, Hideaki MATSUMOTO and Koji KUWAHARA

A double alignment breakwater is composed of a submerged reef structure and a conventional vertical structure. The sea area between the structures is relatively calm area where seawater exchange takes place, and can be utilized as an area for marine recreation and aquatic organisms propagation.

This study proposed a method to calculate wave overtopping rate for double alignment breakwater, based on the results of model experiments. This method takes into account the wave transmission and set-up by a submerged reef structure, and modified Goda's method for vertical seawalls.

Keywords: Double alignment breakwater, Wave overtopping rate,

1. まえがき

二重堤は、図-1に示すように消波ブロック被覆堤の消波部を直立部の前面から分離して設置し、面的に波浪制御を行う防波堤形式である。二重堤により創出される遊水部空間は、海水交換の盛んな低波浪海域である。この海域は海洋レクリエーションの場として、あるいは水産生物の生息、増殖の場として期待されており、二重堤はエコポートを形成する外郭施設の重要な構造形式の一つと言える。

二重堤の越波に関する研究には、山本ら(1984)および中山ら(1986)の消波部天端が静水面上にでている分離堤形式の実験研究と、笹島ら(1993)の二重堤の実験研究がある。しかし、これらの研究では、限られた実験条件についてのみ無次元越波流量算定図が示されているため、実用的な検討には不十分である。

本研究では、山本ら(1996)の二重堤直立部に作用する波力の算定に用いた「仮想換算沖波波高」の考えを採用して、笹島ら(1993)の二重堤の越波に関する実験結果を再整理し、合田ら(1975)の越波流量算定図を補正して二重堤の越波流量を算定する手法を提案する。

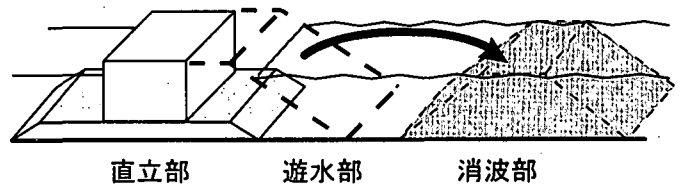


図-1 二重堤概念図

2. 模型実験

2. 1 消波部影響実験

二重堤に入射した波浪は、砕波などにより変形しながら消波部を通過する。山本ら(1996)が提案した「仮想換算沖波波高」は、波浪が消波部を通過する際の波高変化の影響をあらかじめ考慮した仮想の沖波波高である。仮想換算沖波波高を算出するためには消波部が波高変化に与える影響を定式化する必要がある。山本ら(1996)は砕石製消波部の波高影響係数を定式化した、

* 正会員 工修 北海道開発局港湾部港湾計画課 (前開発土木研究所水産土木研究室)

** 正会員 工博 北海道工業大学工学部土木工学科 (前開発土木研究所環境水工部)

*** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室 (062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

**** 正会員 北海道開発局農業水産部水産課

***** 日本データサービス株式会社

***** 株式会社西村組

ここでは消波ブロックを対象に実験的に検討する。

実験は、図-2のとおり2次元断面水路（長さ28m，幅0.8m，高さ1.0m）において行った。水路床勾配は消波部前まで1/30、消波部背後は水平とした。水平床における水深は $h=21.9\text{cm}$ で一定とし、通過波高は沖側の水深が61cmの位置、消波部港外側法肩および港内側法尻の位置でそれぞれ2点ずつ測定した。消波部設置時の波高は、沖側水深61cmの位置で2点と、消波部港内側法尻の位置から4分の1波長ごとに3点の計5点で、水位上昇量も合わせて測定した。

消波部の堤体は1個550gの消波ブロック（テトラポッド）で法勾配1:1.5に形成した。消波ブロックの空隙率は約50%である。消波部天端水深 h_{rc} は-3、0、3および8cmの4種類、天端幅 B_r は20および60cmの2種類に変化させた。実験波はブレッドシュナイダー・光易型の不規則波とし、周期 $T_{1/3}$ は1.31、1.63および1.96sの3種類、換算沖波波高 H_0' は5.3~11.0cmの範囲で4種類に変化させ計96ケースの実験を行った。

2. 2 越波実験

(1) 実験模型

笹島ら(1993)の行った二重堤の越波実験の概要を示す。実験は、図-3のとおり2次元断面水路(長さ27.0m×幅0.6m×深さ1.2m)において行った。水路床勾配は消波部前まで1/50、消波部後は水平とした。消波部は1個550gの消波ブロックで形成した。また、越波水による本堤背後の水位上昇を防止するため、水路床には循環用のパイプを埋め込んでいる。

(2)実験条件

実験波はブレッドシュナイダー・光易型の不規則波であり、換算沖波波高 H_0' は15.9~16.6cmの範囲で1種類、周期 $T_{1/3}$ も1.84sの1種類としている。本報において解析の対象とした実験ケースは表-1に示す合計198ケースである。なお、堤体の諸元を表す記号の意味は図-4のとおりである。

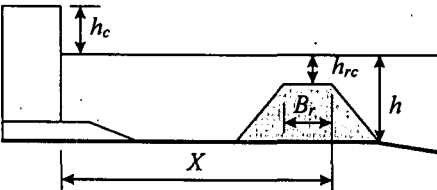


図-4 堤体諸元の記号

(3) 測定項目

波高および水位変動、越波量、越波状況について計測を行っている。波高は、沖波計測用に2箇所、消波部と本堤に挟まれた遊水部の水位変動を計測するために遊水部長に応じて1~4

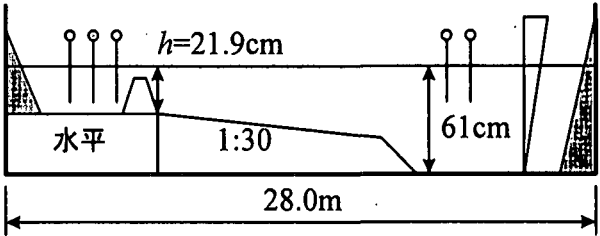


図-2 消波部影響実験水路

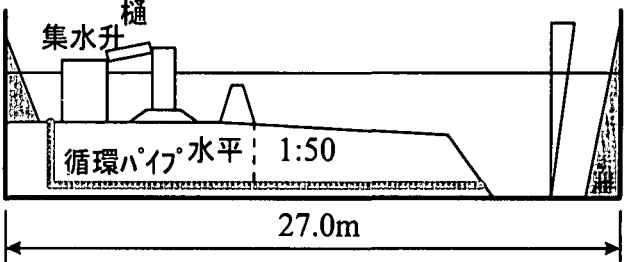


図-3 越波実験水路

表-1 実験条件

水深 h (cm)	遊水部長 Y (cm)	本堤天端高 h_c (cm)	消波部天端水深 h_{rc} (cm)	消波部天端 幅 B_r (cm)	ケース 数
24	168	7,10,14 17,20,24	6,3,0,-3,-8	21	30
			3	42,63	12
	224		6,3,0	21	18
			3	63	6
	280		6,3,0,-3,-8	21	30
			3	42,63	12
	336		6,3,0	21	18
			3	63	6
	392		6,3,0	21	18
			3	42,63	12
27	280	7,11,14 17,21,24	6,3,0	21	18
30		8,11,14 18,21,24	6,3,0	21	18

注)消波部天端水深 h_{rc} は+が潜堤（天端が水中）

箇所で容量式波高計を用いて測定している。越波流量は、越波水を直立部堤体上中央に設置した幅10cmの樋により本堤背後の集水升に取り込み計測した。

3. 消波部実験結果と考察

3. 1 波高影響係数 K_{HB}

消波部による波高の低減効果は、構造物前面の波高に対する背後の波高の比で定義される波高伝達率で一般に表せられる。しかしながら、ここでは山本ら(1996)が行った方法と同様に、波高影響係数 K_H で消波部による波高変化を検討する。この波高影響係数 K_H とは、消波部がない場合の波高に対する消波部を設置した場合の波高の比と定義し、換算沖波波高 H_0'/L_0 、相対天端幅 B_r/L_0 、相対天端水深 h_{rc}/H_0' の1次式として、消波部の天端が静水面上にある条件にまで拡張して算定式を検討する。

山本ら(1996)の碎石製消波部実験によると、消波部背後1波長間の測点の中で最大の最高波高と最大の有義波高の比 $H_{\max}/H_{1/3}$ は、消波部の天端が水中の場合は $H_{\max}/H_{1/3}=1.8$ 程度で値の変動も小さいが、天端が静水面上の場合は変動が大きく値も大きくなっていた。このため、有義波高と最高波高のそれぞれについて影響係数を求め、仮想換算沖波波高の算定に用いている。同様に、今回の消波ブロックによる影響係数についてもそれぞれ回帰式を求めた。

$$K_{HB1/3} = 2.545H_0'/L_0 - 1.189B_r/L_0 + 0.305h_{rc}/H_0' + 0.518 \quad (1)$$

$$K_{HB\max} = 2.927H_0'/L_0 - 1.247B_r/L_0 + 0.272h_{rc}/H_0' + 0.562 \quad (2)$$

3. 2 消波部背後の水位上昇量 η_B

消波部背後の相対水位上昇量 η_B/H_0' についても、山本ら(1996)と同様の無次元パラメータを用いて、天端が水中（静水面も含む）と静水面上のときそれぞれに求めた。

$$\eta_B/H_0' = \min(\eta_{B1}/H_0', \eta_{B2}/H_0') \quad (3)$$

ただし、

$$\eta_{B1}/H_0' = -0.922H_0'/L_0 - 0.133B_r/L_0 - 0.049h_{rc}/H_0' - 0.0014h/H_0' + 0.143 \quad (4)$$

$$\eta_{B2}/H_0' = 0.142H_0'/L_0 - 0.206B_r/L_0 + 0.026h_{rc}/H_0' + 0.0013h/H_0' + 0.068 \quad (5)$$

なお、 η_B の符号は水位が上昇するときを正とし、式の値が $\eta_B/H_0' < 0$ となるときは $\eta_B/H_0' = 0$ とする。

4. 越波流量推定法

4. 1 仮想換算沖波波高

高山ら(1988)の研究によると、潜堤透過後の波高は、水深が浅くなり砕波水深に達すると、再砕波によって再び波高が減少することが明らかにされている。

二重堤においても、遊水部の海底勾配によっては、波の浅水変形や再砕波を考慮しなければならない。今回の実験では、消波部背後の海底は水平としているため再砕波は生じていないと考えられるが、実用上は遊水部における波浪変形を考慮できることが望ましい。このため、山本ら(1996)が二重堤の耐波設計にあたり定義した「消波部の波高低減効果を沖波波高で表した仮想換算沖波波高 H_0'' 」を求め、これを二重堤の越波流量検討上の沖波とする。なお、 H_0'' は次の手順により計算する。

①消波部がない状態を仮定し、消波部背後の位置の有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 $H_{\max}$ を波浪変形計算で求める。

②消波部通過後の有義波高 $H_{1/3}'$ と最高波高 $H_{\max}'$ を次式から求める。

$$H_{1/3}' = H_{1/3} \times K_{HB1/3}, \quad H_{\max}' = H_{\max} \times K_{HB\max} \quad (6)$$

ここで、 $K_{HB1/3}$ 、 $K_{HB\max}$ は前出の式(1)および(2)から得られる。

③消波部がない状態を仮定し、砕波変形後の波高が求めた $H_{1/3}'$ と $H_{\max}'$ と等しくなるような換算沖波波高をそれぞれ求める。このうち、大きい方を仮想換算沖波波高 H_0'' と定義する。

4. 2 仮想換算沖波波高を用いた無次元越波流量

無次元越波流量は仮想換算沖波波高を用いて、 $Q=q/(2g(H_0''))^{3/2}$ と定義する。ここで q は単位長あたりの平均越波流量である。

実験から得られた無次元越波流量 Q_{exp} と、合田ら(1975)の越波流量算定図(直立護岸)から求めた無次元越波流量 Q_{goda} との関係を図-5に示した。同図によると Q_{exp} の方が、 Q_{goda} よりも大きくなる傾向にあり、また Q_{goda} が 10^{-4} より小さい領域ではばらつきが大きいことが分かる。これには二つの理由が考えられる。一つは、越波流量の小さな範囲の実験では、実験値そのものにばらつきが大きなことである。他の一つは、仮想換算沖波波高を用いているため本堤の天端高が相対的に高くなり、実験の範囲では仮想相対天端高 $(h_c - \eta_B)/H_0''$ が0.5から3.0程度まで広く分布したためである。合田ら(1975)の越波流量算定図には、相対天端高は0.5~2.0の範囲でしか図示されていないので、範囲外については外挿して Q_{goda} を求めたことによると考えられる。

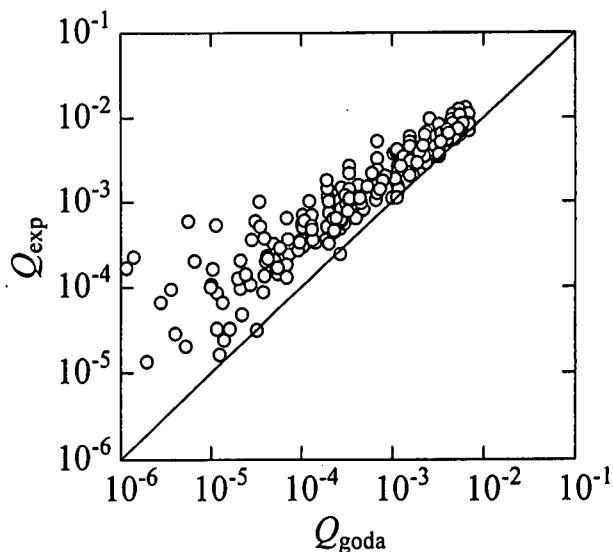


図-5 計算値と実験値の比較(補正前)

以上より、二重堤の無次元越波流量を合田ら(1975)の越波流量算定図から推定する場合、何らかの補正が必要となる。

4. 3 補正係数の検討

(1) 補正のパラメータ

補正のパラメータの検討には、精度がよいと考えられる仮想相対天端高 $(h_c - \eta_B)/H_0''$ が2.0以下のデータで検討することとした。なお、この値は Q_{goda} で概ね 5×10^{-4} より大きな領域のデータに相当している。

図-6は、横軸に相対遊水部長 $X/L_{1/3}$ を、縦軸に無次元越波流量比 Q_{exp}/Q_{goda} をとったもので、傾向としては $X/L_{1/3}$ が0.6のとき変動が大きい。また $X/L_{1/3}$ が大きくなるに伴い Q_{exp}/Q_{goda} は減少しており、補正のパラメータの一つと考えられる。

図-7は、横軸に仮想相対天端高 $(h_c - \eta_B)/H_0''$ を、縦軸に Q_{exp}/Q_{goda} を、パラメータに相対遊水部長 $X/L_{1/3}$ を用いてそれぞれの回帰線とともに図示したものである。同図によると、 $X/L_{1/3}$ が小さ

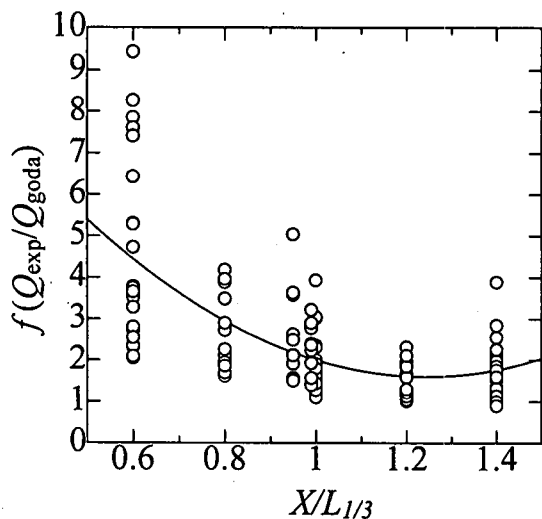


図-6 相対遊水部長の影響

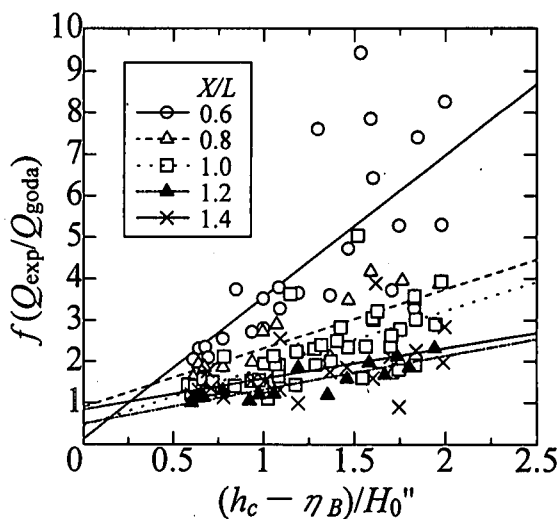


図-7 仮想相対天端高の影響

い領域では回帰線の傾きが急であるが、大きくなるに伴い勾配は緩くなり、相対遊水部長 $X/L_{1/3}=1.2\sim 1.4$ で極小値をとる傾向がある。

(2) 補正係数 f^* の推定式

二重堤の無次元越波流量 Q は、仮想換算沖波波高 H_0'' を用いて合田の流量算定図から求めた Q_{goda} に補正係数 f^* を乗じて求める。

$$Q = f^* \cdot Q_{\text{goda}} \quad (7)$$

前述の実験結果を用いて、 $f^* = Q_{\text{exp}}/Q_{\text{goda}}$ として f^* を推定する。 $X/L_{1/3}$ 、 $(X/L_{1/3})^2$ および $(h_c - \eta_B)/H_0''$ を無次元パラメータとして次の回帰式を得た。重相関係数は0.796である。

$$f^* = 1.629(h_c - \eta_B)/H_0'' - 16.20(X/L_{1/3}) + 6.433(X/L_{1/3})^2 + 9.775 \quad (8)$$

ただし、 $X/L_{1/3} \leq 1.4$

図-8は、 $(h_c - \eta_B)/H_0'' \leq 2$ の実験データに適用した場合の無次元越波流量 $f^* \cdot Q_{\text{goda}}$ と実験値の Q_{exp} との関係であり、精度良く二重堤の無次元越波流量を算定できることが分かる。図-9は、全実験データに適用した場合であるが、無次元越波流量が小さい範囲ではばらつきが大きくなっており、回帰式を求めた場合の重相関係数もかなり低くなった。なお、 $(h_c - \eta_B)/H_0'' > 2$ のデータであっても Q_{goda} を合田ら(1975)の越波流量算定図からある程度推定可能な場合は、式(8)による f^* を用いてもよいと考える。その場合、実用的には $f^* \cdot Q_{\text{goda}}$ が 10^{-4} 以上の範囲で適用可能と考える。

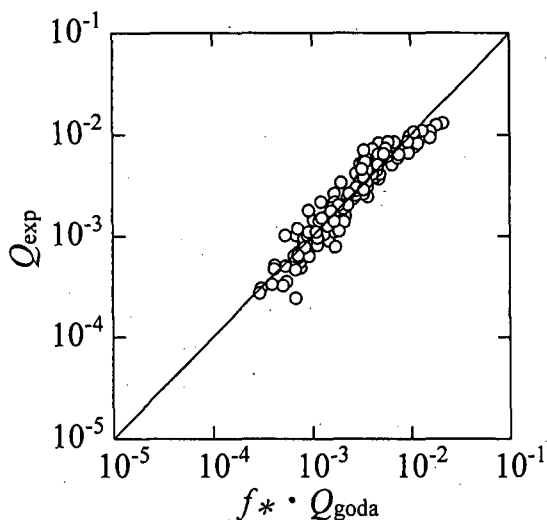


図-8 越波流量の計算値と実験値の比較
 $[(h_c - \eta_B)/H_0'' \leq 2]$

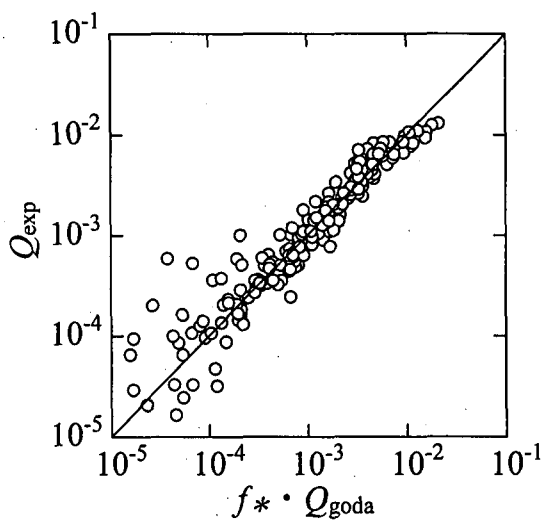


図-9 越波流量の計算値と実験値の比較
 [全ケース]

5. 結 論

本研究により以下のことが明らかになった。

- ① 消波部が消波ブロックで形成される場合の波高影響係数と消波部背後の水位上昇量は、式(1)～式(5)により算定できる。
- ② 二重堤の無次元越波流量は、仮想換算沖波波高を用いて合田ら(1975)の越波流量算定図から推定することができる。ただしこの場合、流量の補正が必要であり、補正係数 f^* は仮想相対天端高 $(h_c - \eta_B)/H_0''$ が2以下では式(8)で算定できる。ただし、 $(h_c - \eta_B)/H_0'' > 2$ で合田ら(1975)の図から外挿可能なときに拡大適用する場合、 $f^* \cdot Q_{\text{goda}}$ が 10^{-4} 以上の範囲で適用可能と考えられる。

6. あとがき

従来、二重堤は建設費が割高になると考えられ施工事例は少ないが、多機能防波堤の一つであり、設置条件によっては十分消波ブロック被覆堤の比較対象構造物となるため、本算定法が

実設計に活用されることを期待している。

今回は 2 次元的な検討に基づき越波流量推定法を提案したが、実海域では消波部端部からの回折波の影響を受ける部分が生じるため、本堤側への巻き込みなどの消波部端部処理方法や、消波部の波高低減効果や水位上昇量等に与える平面形状の影響を平面実験等によって検討することが必要である。

参考文献

- 合田良実・岸良安治・神山豊(1975): 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4号、pp.3-44.
- 笹島隆彦・山中浩次・木村克俊・水野雄三・菊地聡一(1993): 二重堤の水理特性について、海岸工学論文集 第40巻、pp.645-649.
- 高山知司・池田直太(1988): 広天端潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果、港湾技術研究所報告 第27巻 第4号、pp.63-92.
- 中山哲蔵・山本正昭・間辺本文(1986): 遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究、水産工学研究所技報 水産土木 第7号、pp.217-229.
- 山本正昭・西裕司(1984): 越波の少ない低天端堤の開発、第31回海岸工学講演会論文集、pp.537-541.
- 山本泰司・水野雄三・鈴木孝信・山中浩次・吉田稔(1996): 二重堤直立部に作用する波力の算定法について、海岸工学論文集 第43巻、pp.766-770.