

# 被災護岸の廃材を復旧に利用する越波低減工法

## A COUNTERMEASURE AGAINST WAVE-OVERTOPPING USING SCRAP CONCRETE OF DAMAGED SEAWALLS

藤原隆一<sup>1</sup>・榎木 亨<sup>2</sup>・三宅達夫<sup>3</sup>・松村章子<sup>4</sup>

Ryuichi FUJIWARA, Toru SAWARAGI, Michio MIYAKE and Akiko MATSUMURA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所 水域環境研究室長(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 (財)災害科学研究所 所長(〒530-0047 大阪市北区西天満2-6-8 堂島ビル)

<sup>3</sup>正会員 工博 東洋建設(株)鳴尾研究所 所長(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

<sup>4</sup> 東洋建設(株)鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

A lot of inundation of sea water has arisen at coastal zone in Japan recent years because of attacking larger tidal waves and storm surges than usual. Also there are many examples that a destruction of parapet could cause serious damage by increasing of overtopping to the coastal zone. When seawalls have been damaged, a lot of scrap concrete is generated. In this study, a countermeasure against wave overtopping using these scrap concrete of damaged seawalls is proposed and verified the validity of the facilities and equipments for countermeasures against disaster by hydraulic model tests. Furthermore a method for estimating overtopping over seawalls using CADMAS-SURF has applied to the model test and validated.

*Key Words : Wave overtopping, Disaster prevention, Re-use of damaged seawall, Scrap concrete, CADMAS-SURF*

### 1. 緒論

最近, 台風による高潮や高波による大規模な浸水被害が増加している。1900年~1970年にかけて2m以上の最大偏差を示した高潮は11例あり, その都度多くの人命・財産が失われてきた<sup>1)</sup>が, 1961年に発生した第2室戸台風以降, 高潮による直接の作用で人命が失われるような災害は発生してこなかった。しかし, 1999年の台風18号によって八代海に発生した高潮によって12名の方が溺れて亡くなられ, その後, 2004年には10個の台風が日本に上陸し, 日本各地に大きな被害をもたらしたことは記憶に新しい。

高山<sup>2)</sup>は, 1992年から1996年に発生した197件の護岸災害に対して統計解析を行い, 近年, 特に大きな台風が来襲して, 護岸が被災したことが災害の原因であること, 通常よく用いられている消波工による部分消波は, 高潮の発生しやすい海域で衝撃砕波圧を発生させる可能性があること, および護岸のパラペットが崩壊して, 耐越波機能が急激に低下するようなことがない粘り強い護岸の設計が必要であることを示すとともに, 護岸の性能照査の必要性を述べている。

被災した護岸は早急に復旧する必要があるが, 復旧工

事において被災した護岸から大量のコンクリートガラが発生し, その処分方法が大きな問題となる場合がある。そのため, 発生したガラの処分方法を考えておくことは社会的に意義があると考えられる。一方, 復旧される護岸は従来と同じ機能を持つだけでなく, 高山が示すように粘り強い性質を持つようにすることが重要であると考えられる。

本研究では, 被災で発生したコンクリートガラの利用が可能で, 粘り強い構造形式を持つ越波低減工法を提案し, 水理模型実験により提案する構造物の消波効果(越波量, 反射率)を明らかにした。また, 性能設計法としてCADMAS-SURFの適用性を, 越波量および反射率を通して検証した。

### 2. 実験方法

#### (1) 実験水路

実験は, 東洋建設(株)鳴尾研究所の不規則波長水路(長さ55.0m×高さ2.0m×幅1.0m/ピストン型・再反射波吸収装置)を用いて行った。実験では, 水路内に海底勾配が1/30となる仮設床を設け, その上に模型堤体を設

置した (図-1 参照) .

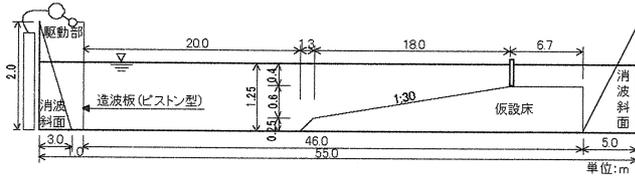


図-1 実験水路

(2) 検討断面

検討断面は、堤防・護岸の設計方法<sup>3)</sup>に示される消波工の考え方を参考に定めた。実験に用いた断面形状および各断面における堤体の諸元を、それぞれ図-2 および表-1 に示す。図中には、消波工としての諸元の定義を併せて示した。

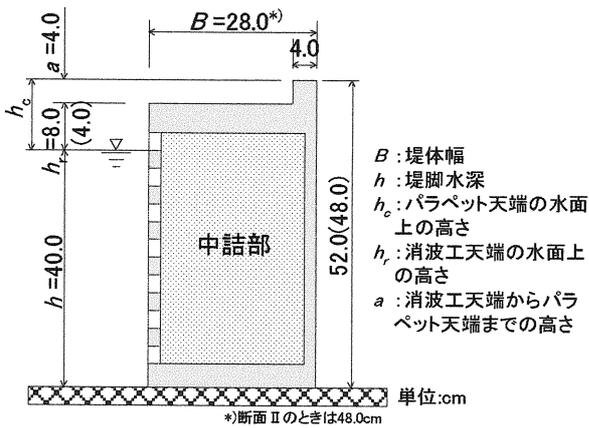


図-2 検討断面

表-1 堤体の諸元

断面	$h$	$h_t$	$h_c$	$a$	$B$
I-1	40.0	4.0	8.0	4.0	28.0
I-2		8.0	12.0		
II-1		4.0	8.0		48.0
II-2		8.0	12.0		

単位: cm

堤体幅  $B$  およびパラペット天端の水面上の高さ  $h_c$  はそれぞれ2ケース設定した。ただし、消波工天端からパラペット天端までの高さ  $a$  は一定とした。また、パラペットの位置は護岸の背面側とした。実験に用いた模型 (断面 I-1) を写真-1 に示す。

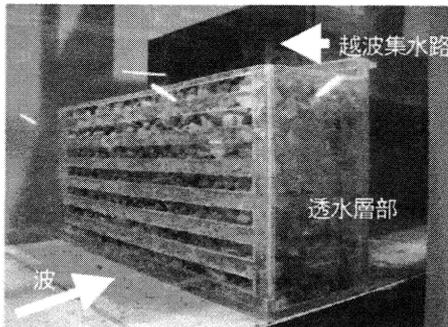


写真-1 実験に用いた模型 (断面 I-1)

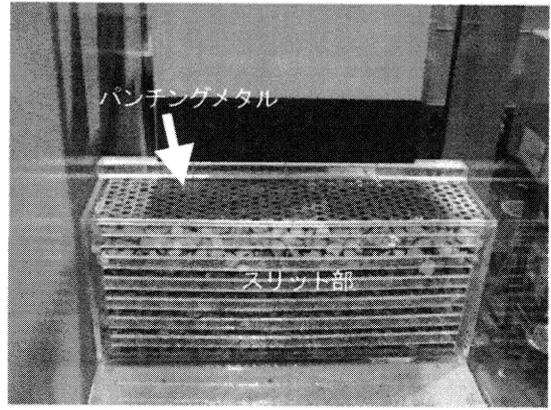


写真-1 (続き) 実験に用いた模型 (断面 I-1)

透水層部前面は、中詰材が流出しない程度の幅 (3cm) の横スリット構造とした。開口率 (スリット面積/前面投影面積) は0.39であった。なお、護岸天端部には中詰材の安定性を保つため、パンチングメタルをネジで固定した。

なお、直立堤 (不透過) との比較のために、スリット面をアクリル板で塞ぎ、不透過構造とした場合についても検討した。

(2) 中詰材

中詰材には砕石および異形ブロックを用いた。実際には被災した堤体のコンクリートガラを用いることを想定しているが、実験では適度な空隙を持つものであればよいと考えた。すなわち、消波工として必要な条件<sup>4)</sup>である表面粗度が大きいことおよび波の規模に応じた適度の空隙を持つことを満たしていればよいと考えた。そこで、実験では直径20~40mm程度の砕石を基本とし、中詰材の大きさが消波効果 (越波量) に及ぼす影響を確認するために一辺の長さが110mmとなる異形ブロック (テトラポッド、合掌ブロック) を用いた場合についても検討した。ただし、この実験は  $B/h=0.7$  (断面 I) の時だけ実施した。実験時の空隙率は、砕石および異形ブロックに対してそれぞれ0.45および0.50であった。なお、異形ブロックは乱積みとした。実験に用いた中詰材を写真-2 に示す。

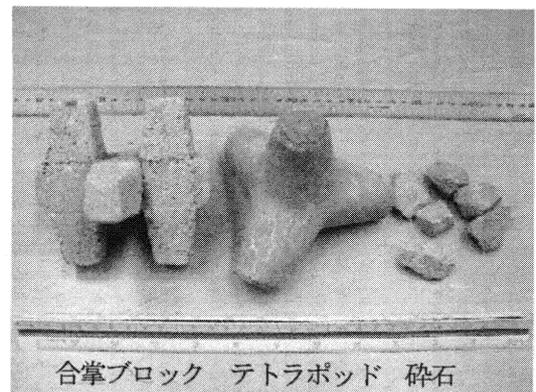


写真-2 中詰材

### (3) 波浪条件

実験では、式(1)に示す修正Bretschneider・光易型の周波数スペクトル $S(f)$ を有する不規則波を作用させた。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (1)$$

ここに、 $H_{1/3}$ :有義波高、 $T_{1/3}$ :有義波周期、 $f$ :周波数である。

また、それぞれの断面(I-1~II-2)に対して $T_{1/3}$ を2ケース設定し、それらの $T_{1/3}$ に対して換算沖波波高 $H_0'$ を3ケース変化させた。波浪条件をまとめて表-2に示す。

表-2 波浪条件

断面	$T_{1/3}(s)$	$H_0'(cm)$		
		8.4	12.9	16.5
I-1	1.6	8.4	12.9	16.5
	2.0	8.8	13.4	16.6
I-2	1.6	7.9	12.0	16.3
	2.0	8.0	12.0	15.4
II-1	2.0	8.8	13.3	16.5
	2.4	8.4	12.5	16.8
II-2	2.0	7.8	12.5	16.6
	2.4	8.7	12.6	16.6

### (4) 測定方法

模型堤体がない状態で入射波の検定を行い、式(1)に示す周波数スペクトルを目標とした造波信号を作成した。堤体設置時には、このようにして予め作成した造波信号を用いて、所定の入射波高が得られるように信号入力の大さを調整した。不規則波の解析は、入・反射波分離推定法<sup>5)</sup>を用いて行った。測定時間間隔は0.1s、測定個数は4096個として解析を行った。

越波量は、パラペット天端上に設けた集水路を通じて集水箱(長さ97.5cm×幅95cm×深さ38cm)に集めた越波水の重量を電子天秤で測定することで得た。越波量が少なきときは、バケツで集水することで測定精度を保つようにした。越波量の測定は、水路内の不規則波が安定したと考えられる造波開始後300sから410s間行った。集水路の幅は測定時間、集水箱の容量および実験精度を勘案して40cmとした。実験では波群の異なる2ケースの不規則波を作用させ、その平均値を実験値とした。

反射率は、堤体模型より4m沖側に設置した2台の波高計の記録を用いて、入・反射波分離推定法により求めた。

## 3. 実験結果

### (1) 透水層による越波低減効果

図-3は無次元越波流量 $q/(2gH_0^3)^{1/2}$ と相対天端高 $h/H_0'$ の関係を無次元周期別に表したもので、無次元堤体幅は $B/h=0.7$ である。図中には、透水層による越波量低減効果を確認するために、前面スリット部を塞いで不透過構造にした場合の結果を併せて示した。 $h/H_0'$ が0.6~1.0では、不透過とした場合に比べて越波量が小さ

くなっている。一方、 $h/H_0'$ が0.6より小さくなると、不透過とした場合とほぼ同じになる傾向が見られる。周期が長くなる場合においてその傾向が強く表れていることから、消波効果の低下が影響していることが考えられる。なお、 $h/H_0'$ が1.0より大きい場合、不透過とした実験は行っていないが、越波量の絶対値が小さくなるとともに相対天端高の増大に対する無次元越波流量の低減が緩慢になることから、透水層護岸と不透過の差異は実用上小さいと考えられる。

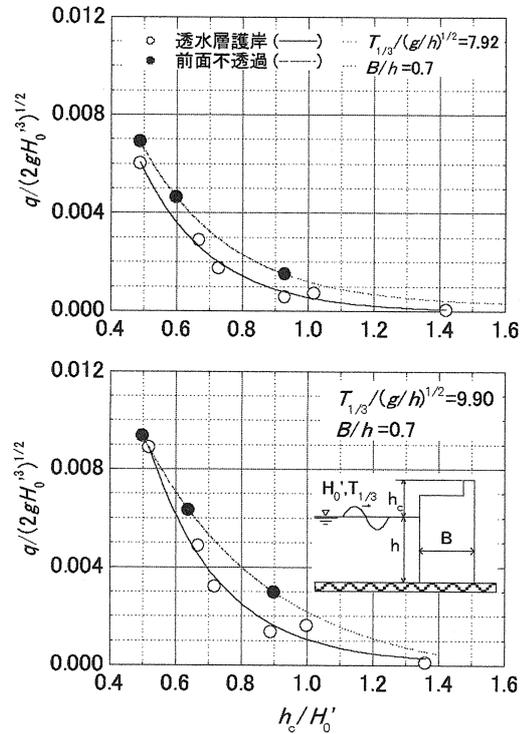


図-3 透水層による越波の低減

### (2) 消波ブロック被覆護岸の越波量との比較

越波低減効果が確認されたので、定量的な評価を行った。比較対象としては、消波ブロック被覆護岸の越波流量算定図<sup>9)</sup>に示される越波流量が適切と考えた。この消波ブロック被覆護岸は、天端をブロック2個並びとし、前出の図-2に示す $a$ を $0.1H_0'$ 程度にしたときのものである。構造形式が異なるため単純な比較はできないが、本検討断面の $a$ の範囲は概ね $(0.2\sim 0.5)H_0'$ であり、越波流量算定図に用いられた消波ブロック被覆護岸に比べてパラペット天端高が大きい構造になっている。

一方、パラペット天端高を同じにした場合に想定される消波ブロック被覆護岸の断面と実験断面を比較してみた(図-4参照)。図では、消波ブロックの天端を護岸のそれと合わせ、天端ブロックは2個並び程度を想定している。これより、断面Iは想定した消波ブロック被覆護岸より小さく、断面IIの場合には同程度の容量を有する断面となっていることが分かる。

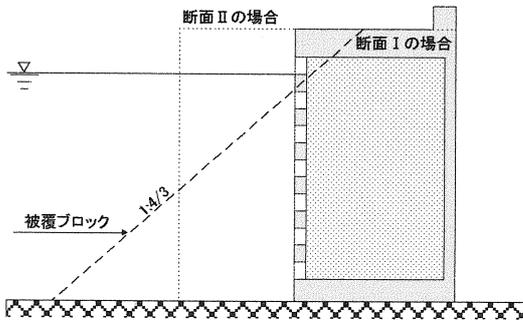


図-4 天端高さが等しい透水層護岸および消波ブロック被覆護岸の断面の比較

越波流量算定図から読みとった消波ブロック被覆護岸の越波流量および参考のため直立護岸のそれを図-3と併せて示すと、無次元周期 $T(g/h)^{1/2}=7.92$ では、透水層護岸の実験値と消波ブロック被覆護岸の算定値の一致度は高い(図-5参照)。また、前面スリットを塞いで不透過とした場合の実験値と直立護岸の算定値もほぼ同じである。一方、 $T(g/h)^{1/2}=9.90$ の場合、実験値は算定値より僅かではあるが、大きくなる傾向が見られた。

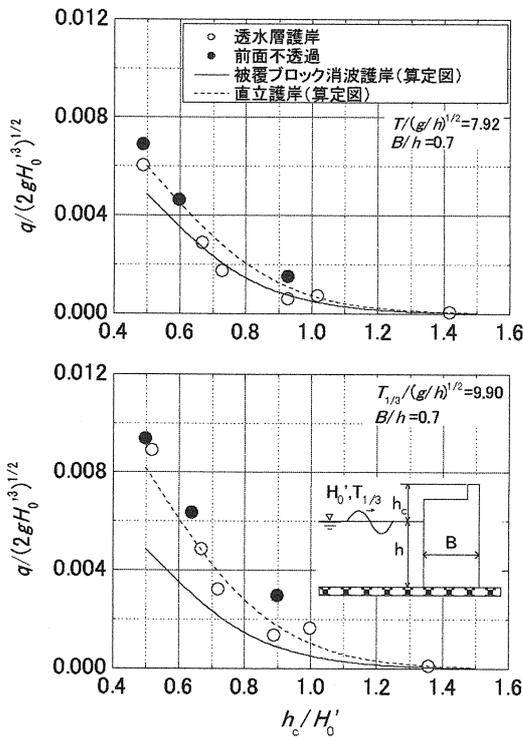


図-5 透水層護岸と消波ブロック被覆護岸の越波流量の比較 ( $B/h=0.7$ )

次に、無次元堤体幅 $B/h=1.2$ の場合について同様の比較を行ったものを図-6に示す。 $T(g/h)^{1/2}=9.90$ の場合、 $B/h=0.7$ に比べて実験値と消波ブロック被覆護岸の算定値の一致度が高まっていることが分かる。これは相対的な堤体幅が広がり消波効果が高まったことが反映された結果と考えられる。 $T(g/h)^{1/2}=11.88$ になると、実験結果は消波ブロック被覆護岸の算定結果より大きくなっており、この条件では再び消波ブロック被覆護岸に比べて消

波効果が小さくなったものと考えられる。

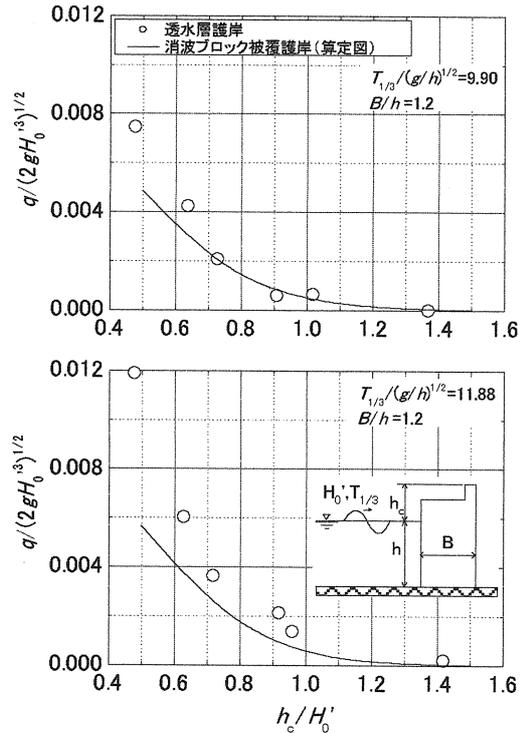


図-6 透水層護岸と消波ブロック被覆護岸の越波流量の比較 ( $B/h=1.2$ )

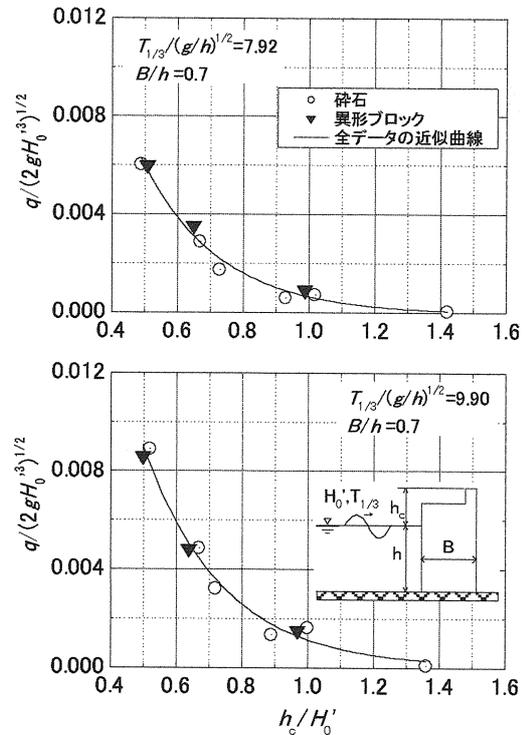


図-7 透水層護岸と消波ブロック被覆護岸の越波流量の比較

### (3) 中詰材の大きさが越波量に及ぼす影響

中詰材を異形ブロックとした場合の越波流量を調べた結果を図-7に示す。図中には、全データを用いた近似

曲線を併せて示した。中詰材を異形ブロックとした場合、表面粗度および空隙率は碎石に比べて大きくなるが、越波流量は碎石のそれとほぼ同じとなった。このことから、実験で行われた範囲であれば、中詰の大きさによって越波流量に大きな差異が生じる可能性は小さいと考えられる。

図-8は無次元越波流量  $q/(2gH_0^3)^{1/2}$  と相対天端幅  $B/L_0$  の関係を、相対天端高  $h_0/H_0'$  をパラメータとして整理した結果を表す。図中の曲線は、実験結果から得られた近似曲線である。 $q/(2gH_0^3)^{1/2}$  は、 $B/L_0$  および  $h_0/H_0'$  が大きくなるほど小さくなる。その低減の割合は、 $h_0/H_0'$  が小さいときは  $B/L_0$  に鋭敏に反応するが、 $h_0/H_0'$  が大きくなると反応が鈍くなる。すなわち、相対天端高が低いときには、透水層部の消波効果が越波量の低減に寄与する割合が高いが、相対天端高が高くなると消波効果よりも絶対的な高さで越波を押さえる効果が大きくなることを表している。 $h_0/H_0' \geq 1.0$  では、 $B/L_0$  の増加に対する越波流量の低減効果が小さくなることから、この条件を満たすように断面を設定すれば、入射波の周期が長くなった場合にも、越波流量の増大を小さくすることが可能と考えられる。また、そのときの堤体幅は、図から  $0.05 < B/L_0 < 0.07$  にすればよいと考えられる。すなわち、設計波の周期が6sの場合には  $B=3\sim 4\text{m}$ 、また周期が10sの場合には  $B=8\sim 11\text{m}$  とすればよいと考えられる。

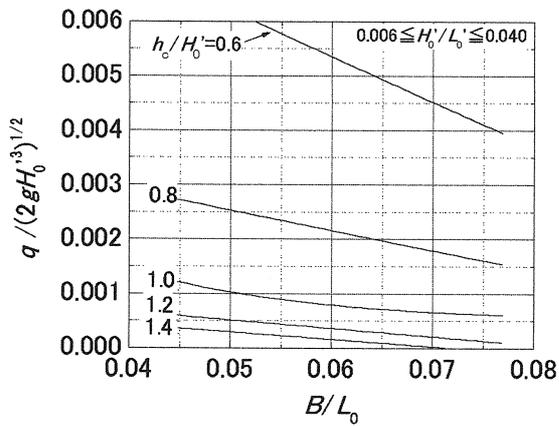


図-8 無次元越波流量と相対天端幅の関係

なお、護岸幅の天端幅は堤体の安定性の観点も考慮する必要があり、堤体幅の目安としては、設置水深と同程度を想定しておくのが妥当と考える。

(5) 反射率

越波流量に関連していると考えられる反射率  $K_R$  と相対天端幅  $B/L$  の関係を図-9 に示す。本構造形式では、中詰の表面や内部で発生するエネルギー減殺や不透過壁からの反射波が  $K_R$  に影響を及ぼすが、実験の範囲内では  $B/L$  の増大に応じて越波流量が低下する傾向が見られた。また、同じ相対天端幅のときには波形勾配が大きい場合に  $K_R$  が小さくなるようである。このことから、前述した相対天端幅の低下による越波流量は反射率

の増大と対応しており、天端高が低いときには相対的に天端幅の影響が大きくなることに留意する必要がある。なお、反射率の全データの平均値は0.69であった。

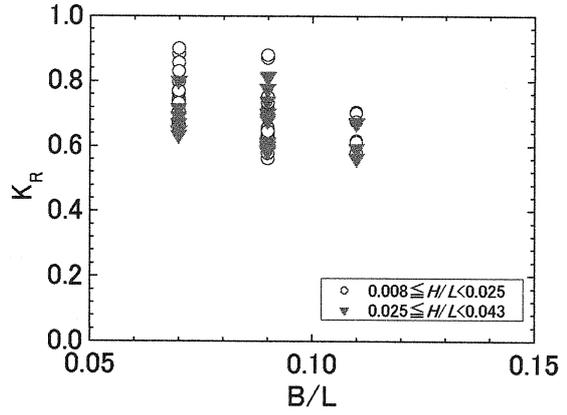


図-9 反射率と相対天端幅の関係

4. 越波量の推定

(1) 計算方法

著者の一人は、数値波動水路CADMAS-SURFを用いて不規則波を扱う場合の信号作成方法について検討し、その妥当性を水理模型実験によって検証した<sup>7)</sup>。越波量の検証には本実験の結果が用いられたが、一例だけが示された。ここでは、有義波の異なる条件についても計算を行ったので、それらの結果を併せて示す。計算ケースは表-3 に示すとおりである。また、CADMAS-SURFで用いた代表的なパラメータは表-4 のように入力した。

表-3 計算ケース

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$h_c$ (cm)	B(cm)	備考
11.2	1.6	8.0	28.0	断面 I-1
7.5	1.6	12.0		断面 I-2

表-4 CADMAS-SURFで用いたパラメータの入力値

バージョン	Ver.4.0
$\Delta x$ (m)	0.02
$\Delta z$ (m)	0.02
$\Delta x/L$	
差分スキーム	DONOR-0.1
ポラース下限値	0.01
造波モデル	造波ソース

減衰帯	DEGREE	2
	PARA-X	0.6
	PARA-Z	0.8
捨石マウンド	WIDTH(m)	15.0, 10.0
	空隙率	0.4
	$C_D$	0.9
	$C_M$	1.2

## (2) 計算結果

表-5 に示すように、計算値は実験値に比べて小さい傾向にある。一般に用いられる越波流量の算定図における越波流量の精度は、消波護岸の場合、無次元越波流量のオーダーが $10^{-3}$ の場合0.2~3倍、また $10^{-5}$ の場合0.05~10倍とされており、無次元越波流量が小さいほど推定精度は低下する。実験時の無次元越波流量が $1.87 \times 10^{-3}$ の場合は実験値の0.65倍であること、また計算では越波が生じなかったものの実験時の無次元越波流量のオーダーが $10^{-5}$ と小さい条件であったことなどから、計算値の推定精度は実用上十分であると言える。

表-5 計算結果

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	断面	$q/\sqrt{2gH_0^3}$	
			計算値	実験値
11.2	1.6	断面 I-1	$1.87 \times 10^{-3}$	$2.89 \times 10^{-3}$
7.5	1.6	断面 I-2	0.0	$5.22 \times 10^{-5}$

## 5. 結論

本研究では、被災構造物から発生するコンクリートガラを消波工として利用することが可能で、パラペットを本体と一体化させた粘り強い構造形式を持つ越波低減工法を提案し、その構造物の消波効果（越波量、反射率）を水理模型実験によって明らかにした。これらの結果より、越波低減工の設計方法について、堤体の諸元（堤体幅、天端高）の考え方を示した。

また、CADMAS-SURFを用いて水理模型実験の再現計算

を行い、実験結果との比較から越波量の計算値は妥当であり、実用上十分な精度を持つことを確認した。このことから、越波量を計算する手法としてのCADMAS-SURFの有効性を確認した。

**謝辞：**本研究を行うに際し、数値計算の実施に関しては、加藤直幸氏（東洋建設（株）土木本部技術部）に多大なるご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 岩垣雄一・榎木亨：海岸工学，共立出版，pp.207-234，1979.
- 2) 高山知司：護岸の被災特性と新たな防災護岸，地盤と建設，Vol.23，No.1，pp.31-39，2005.
- 3) 海岸保全施設技術研究会編：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，pp.3-1-3-154，2004.
- 4) 2)に同じ
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，24p，1976.
- 6) 海岸保全施設技術研究会編：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，pp.2-60-2-63，2004.
- 7) 藤原隆一：数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性およびその適用限界に関する一考察，海岸工学論文集，第52巻，pp.41-45，2005.