

小段を活用した越波低減型護岸の適用性に関する模型実験

平石 哲也* ・平山 克也**・丸山 晴広***
奥野 光洋***・富田 孝史*

1. はじめに

航空機の大型化に伴い, 十分な滑走路長を持たない空港では, 滑走路の延長が図られている。我が国では陸上における空港用地の確保に支障が多いため, 海岸に隣接する空港では, 幅数十 m, 長さ数百 m の滑走路と周辺用地が海岸より沖に向かって埋め立てにより造成される。この場合, 外海に面した埋め立て地の護岸は, 荒天時には高波に直接さらされるので, 越波流量が非常に大きくなる。越波を低減させる最も効果的な工法は, 護岸天端高を高くしたり, 滑走路地盤高を上げることである。しかしながら, 空港の場合には, 航空機の進路を妨害しないように護岸の高さが制限されているため, 沖合展開された護岸の天端高を従来の汀線上に位置していた外周護岸天端高より高くすることはできない。また, 滑走路の地盤高さを高くすることは空港用地全体の嵩上げにつながり, 莫大な工事費を必要とする。このような理由から, 空港護岸では, 護岸形状の工夫により越波量の低減を図ることが求められている。一方, 最近では, 被覆ブロック層の洗掘防止や小型生物の繁殖環境を確保するために, 消波ブロック層の法先に小型の消波ブロックを並べた小段が整形されることがある。このような小段は, 旧護岸の被覆ブロックを転用するなどして比較的安価に建設することが可能である。

本研究では, 経済的で, かつ環境にもやさしい消波ブロック層法先の小段の越波低減効果について, 断面 2 次元の水理模型実験により検討し, 小段の長さや護岸越波量の関係を波浪条件や潮位条件の観点から整理した。また, 越流公式を応用して護岸の越波流量を推定する方法(平石ら, 1996)を小段付き消波護岸に対して適用し, 越流係数に含まれる係数 C_0 の値を求めた。

2. 越波実験の方法

対象とした空港護岸の模型断面を図-1 に示す。この空港護岸は, 他の海域から転用された 25 t クラスの消波

ブロック層の上に, ハドソン公式から求められた安定重量を有する新設消波ブロック (50 t 型) が設置された構造 (天端列数: 3 列) となっている。消波工の法先には, 洗掘防止のために小段が設けられている。また, 護岸全体の円弧滑りを防止するための捨て石マウンドは, 小段先端より約 15 m 沖合まで設置されている。このような護岸を対象として, 図-2 に示す長さ 35 m の不規則波造波水路 (吸収造波機能付き) を用いて越波実験を実施した (富田ら, 1999)。護岸模型は 1/30 勾配斜面の法門部に設置され, 越波量は護岸背後に設置した集水升を用いて計測した。模型縮尺は, 1/50 である。護岸の沖合および前面における水位変動は, 容量式波高計 (サンプリング周波数: 20 Hz) を用いてそれぞれ 3 地点ずつ計測した (沖側: ch. 1~ch. 3, 岸側: ch. 4~ch. 6)。とくに, ch. 6 では, 護岸壁面と消波ブロック層の間に壁面に沿わせて容量式波高計を挿入 (写真-1) して, 護岸天端上の越流水深: $\eta - h_c$ を計測した。同時に, 水槽側面から越波の様子をビデオ撮影した。なお, 特に記さない限り, 以下の記

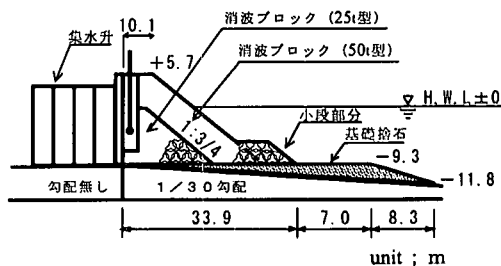


図-1 対象とした空港護岸 (現地量)

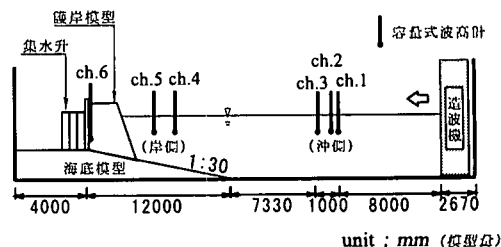


図-2 模型および計測機器の配置 (模型量)

* 正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** 正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
*** (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部

述では全て現地換算量を用いることとする。

越波実験で使用した波浪条件と潮位条件および護岸断面の小段長を表-1に示す。対象護岸の設計波は、有義波高： $H_{1/3}=6.6\text{ m}$ ，有義波周期： $T_{1/3}=12.73\text{ s}$ であり，H.W.L.における護岸前面の水深は $h=11.8\text{ m}$ である。実

験では、有義波高と有義波周期をそれぞれ $H_{1/3}=3.5\text{ m}$ ～ 6.6 m ， $T_{1/3}=8.49\text{ s}$ ～ 14.14 s のように変化させた不規則波を造波し、波浪条件による小段付き護岸の越波特性について考察した。不規則波のスペクトル形は、修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルとし、波群は3種類とした。また、地球温暖化による海面上昇(三村・原沢，2000)や地盤沈下による護岸天端高の低減、あるいは高潮生起時における越波量の変化に対応するために、高潮位時(H.W.L.+0.5 m～H.W.L.+1.5 m)における越波特性についても検討した。また、護岸模型は、図-3に示すように、護岸高さや消波ブロック層の形状は変えずに、消波ブロック層の法先の小段長のみを0.0 m(小段無し，TYPE-0)，3.8 m(TYPE-1)，7.6 m(TYPE-2)，19.1 m(TYPE-3)と変化させた。

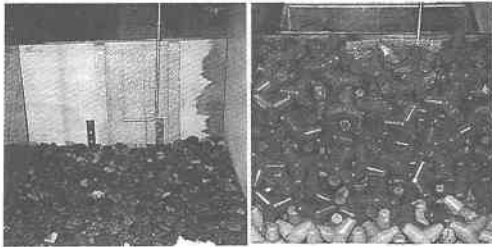
越波実験は次のように実施した。まず、入射波検定された波を造波すると同時に水位変動の計測とビデオ撮影を開始し、造波後60秒間は、集水升へ越波水が進入しないように護岸天端上に越波を防止する遮蔽板を設けた。その後、遮蔽板を取り除き、410秒間(200～300波に相当)越波量の計測を行った。

3. 小段長と護岸越波流量の関係

消波護岸の越波量について、波返工と根固工が設置されていない比較的単純な断面では、合田ら(1975)による越波流量推定図を用いて越波流量の概略値を知ることができる。本実験で用いた護岸断面では、小段を設置しないTYPE-0の断面がこれに相当する。そこで、本章では、この両者から得られる越波量の比較により実験の妥当性を検証しつつ、越波実験で得られた小段がある場合と無い場合における越波流量の違いについて考察をすすめていくものとする。なお、前述の越波流量推定図は、天端列数を2列として得られた実験結果をもとにして描かれているため、適用にあたっては換算天端高係数による補正を行った。また、越波実験で得られた護岸越波流量は、3種類の波群において観測された越波流量の平均により求めた。

(1) 波浪条件による越波流量の変化

護岸前面水深 $h=12.8\text{ m}$ (H.W.L.+1.0 m)，有義波周期 $T_{1/3}=10.6\text{ s}$ とし、有義波高を変化させた場合のTYPE-0(小段長0.0 m)とTYPE-1(小段長3.8 m)の護岸断面における越波流量の変化を、越波流量推定図から得られた値と合わせて図-4に示す。波高の増加に伴い、いずれの護岸断面における越波流量はともに大きくなり、その増加の割合も大きくなることが確認された。これは、越波流量の推定図から得られる傾向とよく一致した。ここで、TYPE-0の護岸断面における越波流量は、越波流量推定図から得られた値に比べて約70%程度小



(a) 捨石マウンド設置時 (b) 消波ブロック設置時

写真-1 越流水深計測用 (ch. 6) の波高計設置状況

表-1 実験ケース

No	従前波高 $H_{1/3}(\text{m})$	従前周期 $T_{1/3}(\text{sec})$	従前水深 $D(\text{m})$	潮位条件	波の種類	護岸タイプ
1	6.60	12.73	11.8	H.W.L.	一方 向不 規則 波	TYPE-0 小段無し
2			12.3	H.W.L.+0.5 m		
3			12.8	H.W.L.+1.0 m		
4			13.3	H.W.L.+1.5 m		
5	5.00	14.14	12.8	H.W.L.+1.0 m		
6		12.73				
7		10.61				
8		8.49				
9	4.50	10.61				
10	4.00					
11	3.50					
12	6.60	12.73	11.8	H.W.L.	波群3種類	TYPE-1 小段長=3.8 m
13			12.3	H.W.L.+0.5 m		
14			12.8	H.W.L.+1.0 m		
15			13.3	H.W.L.+1.5 m		
16	5.00	14.14	12.8	H.W.L.+1.0 m		
17		12.73				
18		10.61				
19		8.49				
20	4.50	10.61				
21	4.00					
22	3.50					
23	6.60	12.73	12.8	H.W.L.+1.0 m		TYPE-2 小段長=7.6 m
24	5.00					
25		14.14				
26	6.60	12.73	12.8	H.W.L.+1.0 m		TYPE-3 小段長=19.1 m
27	5.00					
28		14.14				

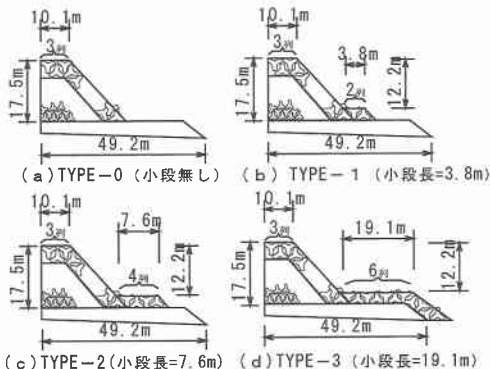


図-3 護岸模型の小段形状

さくなっている。しかしながら、越波流量推定図では、とくに消波護岸の場合、少なくとも0.5～2.0倍の推定誤差を含み、さらに、この誤差は越波量が少ないほど大きくなるが指摘されている(合田ら, 1975)。また、本実験のようにマウンドが碎石で成形されている場合には、推定図に比べ越波量が小さくなることから、この実験結果は妥当であると判断される。

同様に、護岸前面水深 $h=12.8$ m (H.W.L.+1.0 m)、有義波高 $H_{1/3}=5.0$ m とし、有義波周期を変化させた場合の TYPE-0 (小段長 0.0 m) と TYPE-1 (小段長 3.8 m) の護岸断面における越波流量の変化を、越波流量推定図から得られた値と合わせて図-5 に示す。周期の増加に伴い、いずれの護岸断面における越波流量はともに大きくなるが、周期が $T_{1/3}=12.73$ s から $T_{1/3}=14.14$ s に増加した際には、越波流量がそれほど増加しない傾向がみられた。これらも、越波流量推定図から得られた傾向と概ね一致した。

図-4 および図-5 において、TYPE-1 の護岸断面における越波流量を TYPE-0 のものと比較すると、越波流量が多いほど小段による越波量の低減効果が大きくなることから分かる。したがって、波高や周期の増加に伴う越波量の増加は、小段の設置により低減されることが明らかとなった。

(2) 潮位条件による越波流量の変化

設計波 ($H_{1/3}=6.6$ m, $T_{1/3}=12.73$ s) を対象とし、潮

位条件を H.W.L. ($h=11.8$ m) から H.W.L.+1.5 m ($h=13.3$ m) まで、0.5 m 刻みで増加させた 4 潮位を用いて、潮位の上昇による越波量の変化と小段の有無による越波量の変化について実験的に検討した。図-6 に、TYPE-0 (小段長 0.0 m) と TYPE-1 (小段長 3.8 m) の護岸断面における潮位と越波流量の関係を、越波流量推定図から得られた結果と合わせて示す。潮位の増加に伴い、いずれの護岸断面でも越波流量はともに大きくなり、越波流量推定図から予測された傾向とよく一致した。とくに、潮位が H.W.L. に加えて 1.5 m 上昇すると越波流量は約 5 倍に増加することが示された。TYPE-0 および TYPE-1 の護岸断面における越波流量を比較すると、潮位の増加に対しても、小段の設置による越波流量の低減効果が表れていることが分かる。潮位の増加に伴い小段による越波の低減量が小さくなるのは、ビデオ画像でも確認されるように、潮位の増加により小段上の水深が深くなり、碎波減衰する波の割合が小さくなったためである。

(3) 小段長による越波流量の変化

以上の検討から、消波ブロック層法先に設けられた小段は、波高や周期、潮位の増加による護岸越波流量の増加を低減させる効果を有することが確認された。そこで、本節では、小段長をさらに延長し、小段長を 2 倍にした場合 (7.6 m, TYPE-2)、捨て石マウンドの法先まで延長した場合 (19.1 m, TYPE-3) における越波流量の低減効果について検討した。護岸前面水深 $h=12.8$ m (H.

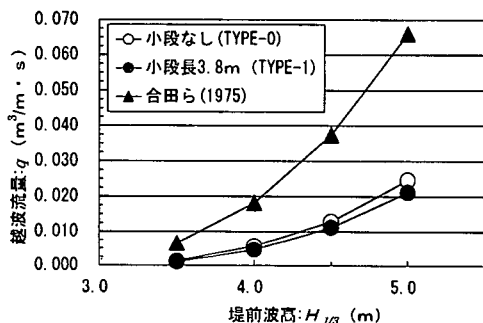


図-4 波高変化と越波流量の関係

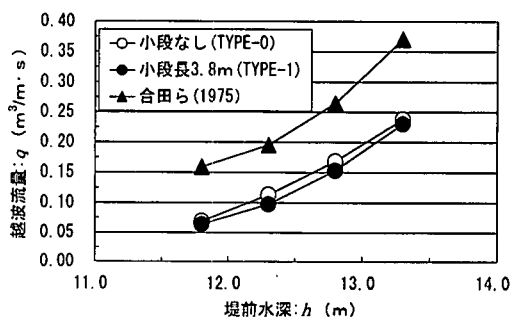


図-6 水位変化と越波流量の関係

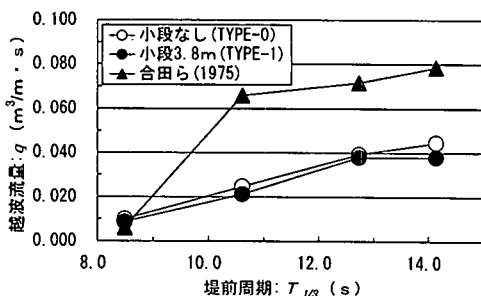


図-5 周期変化と越波流量の関係

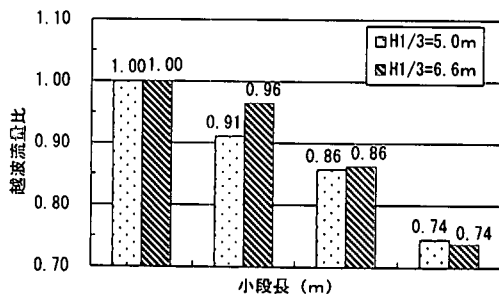


図-7 小段長変化と越波流量の関係

W.L+1.0 m), 有義波周期 $T_{1/3}=12.73$ s とし, 有義波高をそれぞれ $H_{1/3}=5.0$ m, 6.6 m とした場合において, 小段長の変化と越波流量の関係を整理した結果を図-7 に示す。図中, 横軸は小段の長さを示し, 縦軸は TYPE-0 (小段長 0.0 m) における護岸越波流量を 1 としたときの各段面における護岸越波流量の比率を示す。予想されたように, 越波流量は小段長の延長に伴って低減し, とくに, 小段長を 19.1 m 延長した TYPE-3 では, TYPE-0 に比べ, いずれの波高においても越波流量が約 30% 低減することが分かった。したがって, 本実験で対象とした空港護岸においては, 越波量の低減を図る手法の一つとして, 比較的安価に施工できる小段長の延長が有効であると考えられる。ただし, 消波護岸の越波流量は, 護岸の天端列数や小段高さによって大きく変化するため, 実際の施工にあたっては, より詳細な検討を必要とすることを付記しておく。

4. 越波流量に対する越流公式の適用性

前述のように, 波返工や根固工が無い場合の単純な直立護岸と消波護岸における越波流量は, 越波流量推定図を用いてオーダー的にほぼ妥当な値を知ることが可能である。一方, 平石ら (1996) は, 護岸天端上の越流水深: $\eta - h_c$ (η : 水位, h_c : 静水面からの護岸天端高) と推定越波流量: q_{cal} の関係は越流公式を用いて次式で表せることを示した。

$$q_{cal} = C_0 \sqrt{2g} (\eta - h_c)^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

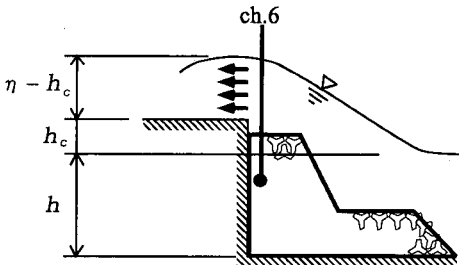


図-8 護岸越波の模式図

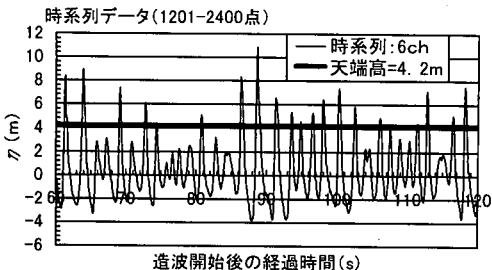
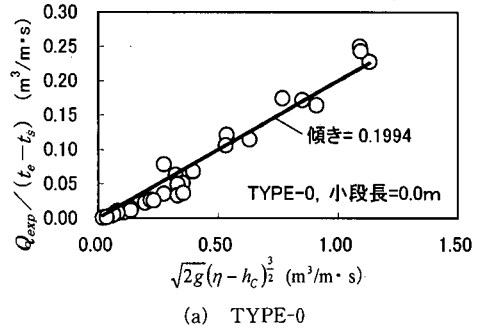
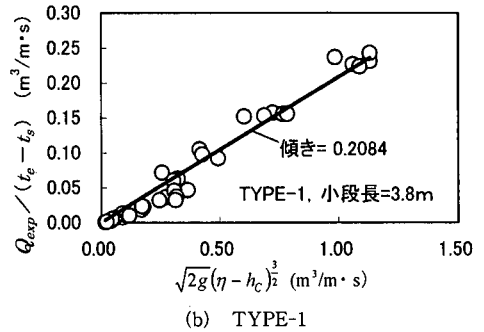


図-9 水位変動の時系列波形: ch. 6

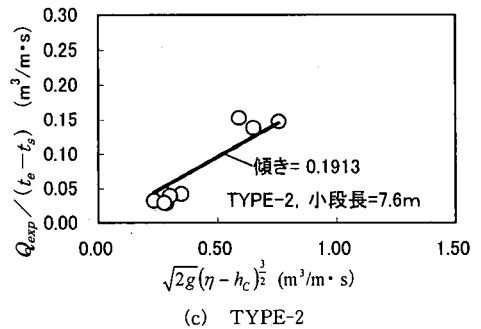
ここで, $C_0 \sqrt{2g}$ ($=C$) は越流係数と呼ばれている。彼らは, 平面水槽において直立護岸を対象とした越波実験を実施し, 単一方向不規則波の越波流量は, 係数 $C_0=0.3$ とした式 (1) によって表されることを示した。さらに, 多方向不規則波についても, 越波流量が大きい場合には,



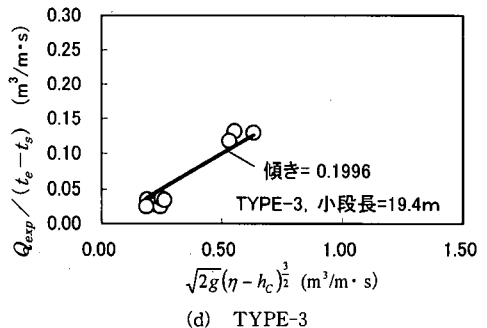
(a) TYPE-0



(b) TYPE-1



(c) TYPE-2



(d) TYPE-3

図-10 C_0 と越波流量の関係

表-2 小段長の違いによる係数 C_0 の算定結果

TYPE-0 (小段なし)	$C_0=0.20$
TYPE-1 (小段長 3.8 m)	$C_0=0.21$
TYPE-2 (小段長 7.6 m)	$C_0=0.19$
TYPE-3 (小段長 19.1 m)	$C_0=0.20$

同じ計算式を用いて比較的精度よく越波流量を推定できることを示した。そこで、本節では、ch. 6 で得られた護岸天端上の越流水深と集水升で計測された越波流量の関係を越流公式にあてはめ、消波護岸における C_0 を求めるとともに、消波ブロック法先の小段の有無による係数 C_0 の違いについて検討した。図-8 は、護岸における越波の模式図である。図-9 に、ch. 6 で造波開始 60 s 後から 120 s 後までに計測された水位変動の時系列波形を示す。図中、 $\eta=4.2$ m のラインに引いた太実線は護岸天端高： h_c を示したものである。つまり、このラインを超えた波形が護岸を越流していると推測され、このときの越流水深は $\eta-h_c$ で表される。この時系列波形とビデオによる記録画像を照合した結果、両者はよく対応しており、ch. 6 で計測された水位変動量は越波の様子をよく表していることが確認された。したがって、係数 C_0 は、式 (1) で計算される推定越波流量の総量 Q_{cal} が越波実験で得られた越波量： Q_{exp} に等しいとして式 (2) によって与えられる。

$$C_0 = \frac{Q_{exp}}{\sqrt{2g} \int_{t_s}^{t_e} (\eta(t) - h_c)^{3/2} dt} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\eta(t) < h_c$ のとき、 $\eta(t) - h_c = 0$

ここで、 t_s は越波量計測開始時刻、 t_e は越波量計測終了時刻である。

図-10(a)～(d) は、それぞれ小段長を 0.0 m (TYPE-0)、3.8 m (TYPE-1)、7.6 m (TYPE-2) および 19.1 m (TYPE-3) としたとき、それぞれ表-1 に示したすべての実験ケースについて、式 (2) に従って実験結果をプロットしたものである。各図において、近似直線の傾きが係数 C_0 を表している。図-10 より求められた係数 C_0 をまとめて表-2 に示す。消波ブロック層の法先に設けられた小段の長さによらず、係数 C_0 は約 0.2 と算定された。つまり、図-10 および表-2 から分かるように、本実験で対象とした護岸においては、入射波の波高や周期、潮位条件および小段長に関係なく、係数 $C_0=0.2$ とした式 (1) を用いて越波流量を精度良く算定することが可能である。さらに、本実験で求めた係数 C_0 は、直立護岸において平石ら (1996) が求めた $C_0=0.3$ に比べ、若干小さめの値となっている。同じ波浪条件でも直立護岸と

消波護岸では越波の様子や越流水深が異なるため、消波護岸において越波量が低減されることと C_0 値が小さくなったことを直接的に関連づけることは難しい。むしろ、式 (1) を用いて両護岸の越波流量を算定する際、本実験で対象としたように越波流量が大きい場合には、護岸形状によらず、係数 C_0 は 0.2～0.3 と設定できると考える方が妥当である。今後は、比較的越波量が少ないと予想される他の空港護岸に対しても同様な検討を行い、式 (1) の汎用化と実用化を図る予定である。

5. 結 論

本研究では、断面 2 次元の消波護岸模型を用いて波浪条件および潮位条件と越波量の関係を整理するとともに、消波ブロック層法先に設置された小段の延長による越波量の低減効果について検討した。さらに、実験結果に対して越流公式を適用し、さまざまな小段長を有する消波護岸に対する係数 C_0 を求めた。

得られた結果を要約するとつぎのようである。

- 1) 波高、周期が大きくなるに従って、越波流量は増加することが分かった。この傾向は、合田の越波流量推定図より求めた結果とよく一致していた。
- 2) 護岸前面の水深が大きくなるに従って、越波流量は増加することが分かった。とくに、対象とした消波護岸では、H.W.L+1.5 m のときには、H.W.L のときと比較して越波流量が約 5 倍に増加することが分かった。
- 3) 越波流量の低減を図る手法の一つとして、護岸の小段長を延長することが有効であることが確認された。とくに、小段長を 19.1 m 延長した場合には、小段なしに比べ、越波流量が約 30% 低減することが分かった。
- 4) 実験で計測された越流水深： $\eta-h_c$ と越波量： Q_{exp} を越流公式に当てはめると、対象とした消波護岸では、小段長の違いによらず C_0 は約 0.2 と推定された。

謝辞：本研究では、アルファコンサルタントの上原功氏、綿屋一氏、佐藤恵流悟氏、松本幸久氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す次第である。

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, Vol. 14, No. 4, pp. 1-44.
- 富田孝史・河合尚男・平石哲也・朝信英明 (1999): 複合断面消波護岸の越波特性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 751-755.
- 平石哲也・金澤 剛・榎本達也・佐藤一夫 (1996): 多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 716-720.
- 三村信男・原沢英夫 (2000): 海面上昇データブック 2000, 環境庁国立環境研究所地球環境研究センター, p. 128.