

複合断面消波護岸の越波特性

富田孝史* ・河合尚男** ・平石哲也*
朝信英明*** ・松葉秀樹*** ・海原敏明****

1. 緒 言

護岸の前面に異形ブロックを配置する消波護岸では、地盤条件によっては円弧すべりが生じないように通常の消波工の前にカウンターとして小段を設置しなければならない場合がある。この複合断面消波護岸の場合には、水面下に小段があると小段により小さな波高の波の碎波が励起されるため、小段の幅が長いと越波量は低減されるものと思われる。しかし、小段の幅が短い場合には碎波によって飛び出した水塊の厳しい打ち込みに伴って逆に越波量が増大する可能性もある。しかし、小段の効果を判断するためのデータは今のところ極めて少ないと言わざるを得ない。本研究では断面模型実験と平面模型実験を行って、複合断面消波護岸の越波特性、具体的には越波流量や越波流量の空間分布などを検討して、小段が越波に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。さらに、高波が生じるときには風も強くなっていることが多いため、波とともに風を作用させた断面実験を行って強風時における複合断面消波護岸の越波特性についても検討することとする。

2. 水理模型実験

(1) 断面実験

断面実験では片面ガラス張り 35 m 水路（水路内実寸法：長さ 35 m、幅 0.6 m、深さ 1.3 m）を使用した。模型縮尺は 1/25 である。なお、以下の記述において、次元量は断りが無い限り全て現地スケールである。実験で使用する消波護岸の模型は、図-1 に例示するように基礎捨石を 40 トン型テトラポッドで 2 層被覆したものであり、消波工の斜面勾配を 1:4/3 とし、護岸パラペット直下の消波工天端における上段ブロック列数（以下、天端列数）および小段部の上段ブロック列数（以下、小段列数）を表-1 のように変化させた。なお、ブロックの 2 列、3 列および 4 列の幅はそれぞれ 5.9 m、9.4 m および 12.9 m である。静水深 h は 12.1 m であり、パラペット

高、消波工天端部の高さおよび小段部の高さは、静水面を基準にしてそれぞれ +6.9 m、+6.4 m および -1.0 m である。作用波は合田 (1987) による修正プレットシュナイダー・光易型スペクトルの不規則波で、表-2 に示すように有義波周期 $T_{1/3}$ を 3 種類、有義波高 $H_{1/3}$ を 5 種類、初期位相 δ を 3 種類変化させた。越波量は護岸模型背後に 10 個並べて設置した越波箱（幅 12.5 m、奥行き 5 m、深さ 7.5 m）に貯まった水量を秤やメスシリンダーを

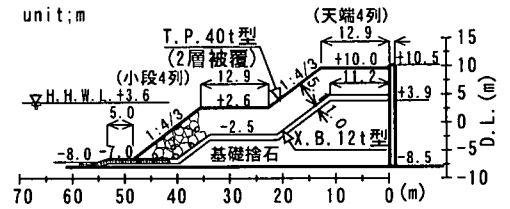


図-1 小段付き消波護岸の例 (TYPE-1)

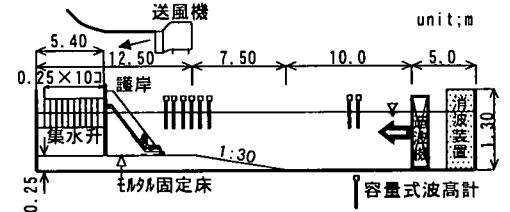


図-2 断面実験の概要 (実験スケール)

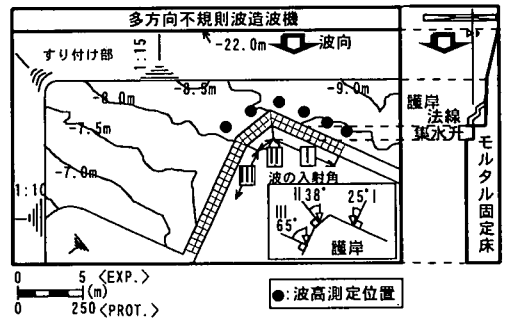


図-3 平面実験の概要

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所水工部
 ** 運輸省港湾技術研究所水工部
 *** 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所
 **** (株)エコー横浜事務所

表-1 対象とした消波護岸タイプ

護岸タイプ	天端列数	小段列数
TYPE-1	4	4
TYPE-2	4	2
TYPE-3	4	0
TYPE-4	2	4
TYPE-5	2	2
TYPE-6	2	0
TYPE-7	3	3

表-2 発生波の諸元

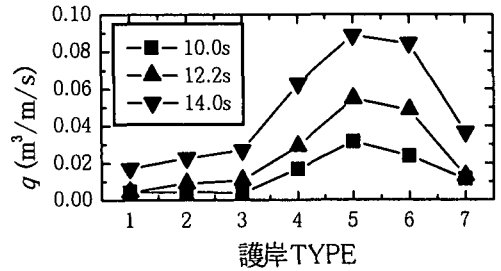
$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)
10.0	2.2	12.2	2.9	14.0	3.1
	3.2		3.9		4.1
	4.2		4.9		5.1
	5.2		5.9		6.1
	6.2		6.9		7.1

使用して計測した。越波の計測時間は各不規則波群中の200波程度の時間であり、越波計測時以外は護岸パラペット上部に越波防止板を取り付けて越波水が越波箱に入らないようにした。越波流量は、初期位相の異なる不規則波群毎に計測した越波量を計測時間で除して越波流量を算出し、それらを平均して求めた。さらに、実験では越波状況をデジタルビデオカメラを使って記録するとともに、図-2に示すように水面変動の計測を護岸汀線位置から $L_{1/3}/2$ ($L_{1/3}$ は水深12.1 mにおける有義波の波長) 離れた位置から沖合に向けて $L_{1/3}/4$ ずつ離れた6箇所と造波板前面の一樣水深部の $0.13L_{1/3}$ 程度離れた2箇所の合計8箇所まで電気容量式波高計を使って行った。

また、波浪と同時に送風機による風を作用させた実験を行った。この実験では、天端4列のTYPE-1、TYPE-2およびTYPE-3の護岸を対象として、 $T_{1/3}=12.2$ s、 $H_{1/3}=4.9, 5.9$ および 6.9 m、および δ が3種類の不規則波を作用させ、それらと同時に護岸前面で風速 F が10、20 および 30 m/s となるような風を作用させた。この実験の場合には、送風機からの風が発散しないように送風機から護岸法線までの範囲について越波を妨げないような高さまで木製の風制御板により水槽上部を覆った。

(2) 平面実験

平面実験の模型縮尺は1/50であり、水槽内に図-3に示すような地形を作成した。護岸は図中の基盤の目のように見える越波箱(幅25 m×奥行き25 m:ただし、隅角部を除く)の前面に設置した。本報告で対象とするのは図中の領域Iおよび領域IIの範囲であり、この領域にTYPE-1あるいはTYPE-3の護岸模型を設置した。越波

図-4 周期による越波流量の変化 ($H_{1/3}=6$ m程度)

量の計測方法は断面実験と同様に計測対象時間以外には越波箱に越波水が入らないようにした。発生波は断面実験と同じ方向不規則波であり、領域Iには約25 deg (0.44 rad)、領域IIには約38 deg (0.66 rad)で波が入射するように造波した。作用波は $T_{1/3}$ を12.2 sとし、 $H_{1/3}$ を4.9, 5.9 および 6.9 mの3種類、そして δ を3種類変化させたものである。

3. 実験結果と考察

(1) 護岸形状による越波特性の変化

図-4に $T_{1/3}=10.0$ sで $H_{1/3}=6.2$ m、12.2 sで5.9 m および14.0 sで6.1 mのほぼ波高が一致している入射波による各護岸タイプ毎の越波流量を示す。天端2列のTYPE-4, 5および6では、周期の変化に伴う越波流量の量的な変化が大きい。しかし、この場合には周期による越波流量の増加率は小段列数が0から4に変化してもほとんど変化せず、12.2 sの越波流量は10.0 sの1.8倍程度、14.0 sの場合には10.0 sの3.4倍程度多い。天端4列の場合には、周期の変化に伴う越波流量の量的な変化は小さいが、その増加率の変化は大きい。このことは、天端4列の護岸に設計波よりも周期の長い波が作用した場合には、許容している越波流量の4~7倍も大きな越波流量になる危険性があることを示している。ただし、その場合小段列数を増大させることによりその増加率を低減させることができる。また、図-4には合田ら(1975)と同様に周期が長くなると越波流量が増大する傾向も認められる。

図-5は断面実験から得られた越波流量 q について $h/L_0=0.052$ のデータを代表的に示したものである。図中の q の添字は護岸の天端列数(第1添字)と小段列数(第2添字)を表している。天端4列の越波流量は、たとえ小段が無くても他の護岸タイプに比べてかなり少ない。この少なさには周期に関係なく生じるので、越波流量を低減させる目的であれば小段列数よりも天端列数を増加させる方が有効である。一方、天端2列の場合には、小段4列であれば越波流量が低減して小段の有効性が認

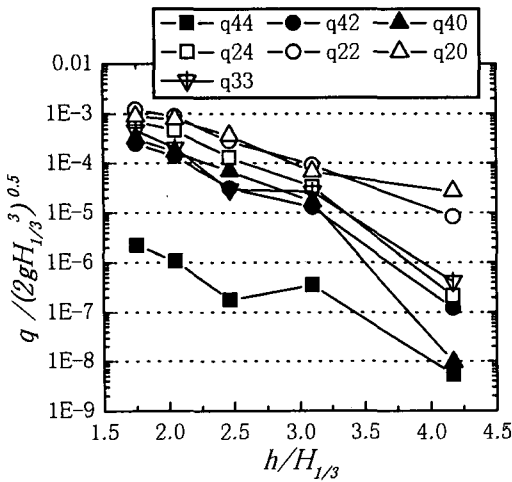


図-5 越波流量 ($h/L_0=0.052$)

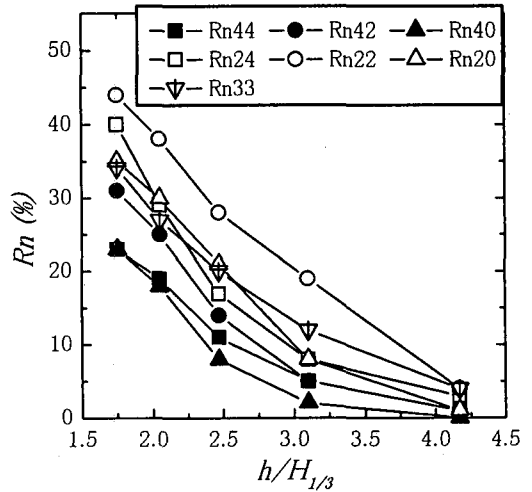


図-7 越波率 R_n ($h/L_0=0.052$)

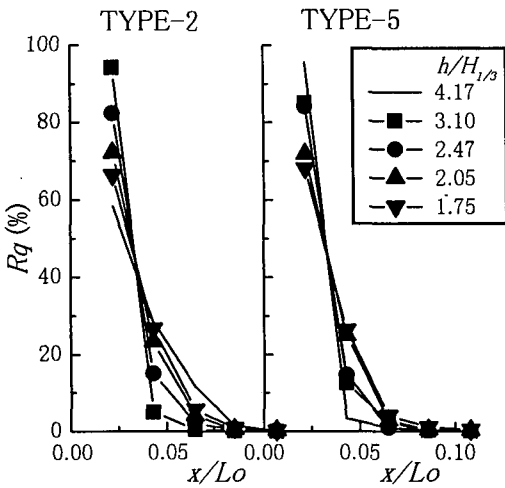


図-6 越波流量の空間分布 (断面実験: $h/L_0=0.052$)

められるが、小段2列ではほとんど小段の設置効果は認められず、 $h/H_{1/3}=2$ 程度するときにはかえって越波流量を増大させている。さらに、図-6に示すように天端2列小段2列のTYPE-5のみが他の護岸タイプと異なった越波流量の空間分布特性を示す。図-6は全越波流量に占める各越波箱の越波流量の割合 $R_q(\%)$ をTYPE-2とTYPE-5について示したものである。なお、全実験ケースを通じて護岸直後から10mの範囲に全越波流量の90%以上があることが明らかとなっている。越波流量の空間分布を護岸タイプ毎に比較すると、TYPE-5以外の護岸タイプでは、TYPE-2のデータに例示されるように波高の増大とともに護岸背後近くの越波流量の割合が多くなるが、遠くまで越波水は飛ばない。さらに波高が増大してある波高以上になると、それまでとは逆に越波水

が遠くまで飛ばようになり越波流量の空間的な変化率が緩やかになる。ただし、境界となる波高値は護岸タイプにより異なる。一方、TYPE-5の場合には波高が増大するほど越波流量は増大し越波水が遠くへ飛ばされる特性のみである。

このTYPE-5だけ越波特性が異なり小段の有効性が認められない理由を明らかにするために、まず越波する波数(越波数)を調べる。図-7は全波数に占める越波数の割合 $R_n(\%)$ を示したものであり、 $h/L_0=0.052$ のデータを示している。他の周期についてもほぼ同様な結果を得ている。同図より、天端4列では R_n は30%程度以下になっており、天端2列の場合には小段無しと小段4列とはほぼ同程度の R_n であるのに対し、小段2列のみ R_n が大きい。このことから天端2列小段2列の護岸は他の護岸に比べて越波しやすいといえる。

つぎに図-8に越波状況をTYPE-4、TYPE-5およびTYPE-6について示す。どの護岸タイプであっても越波の仕方には2種類ある。ほとんど碎波することなく重複波性の状況において越波する場合と著しい碎波により越波する場合である。天端2列小段無しのTYPE-6では、(e)に示すような重複波性の越波が多く、あたかも直立壁を越波するように上方への打ち上げが大きい。また、波高がかなり大きな波の場合には(f)のように斜面上で碎波し、越波数は少ないものの1回当たりの越波量が多い。このため、 $H_{1/3}$ の増大にともなって顕著な越波状況が(e)から(f)に変わるときに越波特性が変化する。一方、天端2列小段4列のTYPE-4では、小段があるために(a)の重複波性の越波は少なく(b)の碎波性の越波が多い。小段で碎波した波は長い小段上を打ち上がり天端にぶつかる前には小さくなり始めている。このため規模の大きな

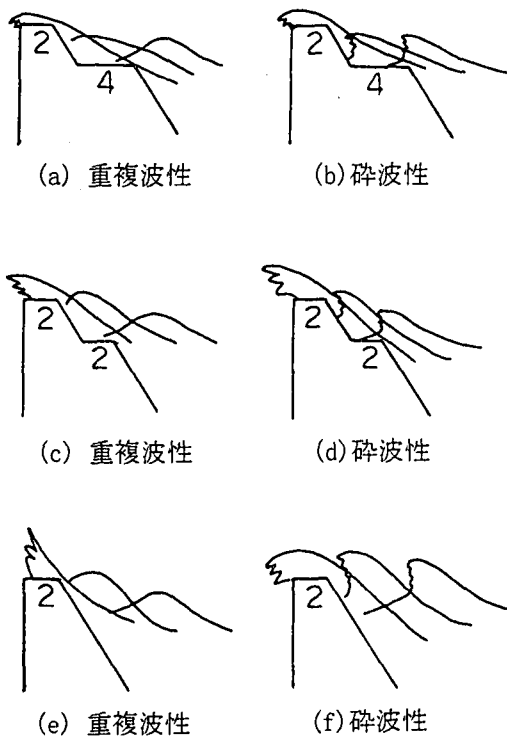


図-8 越波状況のイメージ

越波は少ないが、コンスタントに越波するようである。天端2列小段2列のTYPE-5でも、(d)の碎波性の越波が多い。このタイプでは碎波した水塊が小段上で大きくなりながら天端にぶつかるためにTYPE-4よりも規模の大きな越波を引き起こす。このようにTYPE-5では小段上での碎波と打ち上げ現象がより複雑な越波特性を生み出している。

(2) 風の効果

図-9は護岸の越波流量に及ぼす風の効果を示すものである。同図より、風が越波量に及ぼす効果は護岸タイプ毎に若干異なっているが、概略としては天端4列小段4列の場合には井上ら(1992, 1993)の緩傾斜護岸の実験結果と同様に風が吹くことにより越波流量は減少し、逆に天端4列小段無しの場合には井上ら(1992, 1993)の直立護岸の結果と同じように風により越波流量は増大する傾向にある。そして、それらの中間的な天端4列小段2列の護岸ではあまり風の影響を受けていない。これらの特性は、波にとって小段は消波工の平均的な勾配を緩くさせる存在であり、小段付き護岸はあたかも緩傾斜護岸のようになるためであると考えられる。

風による越波流量分布について、池野ら(1993)は消波護岸では風速の増大に対応して越波水はより遠くまで運ばれるといった実験結果を示している。しかし、本実

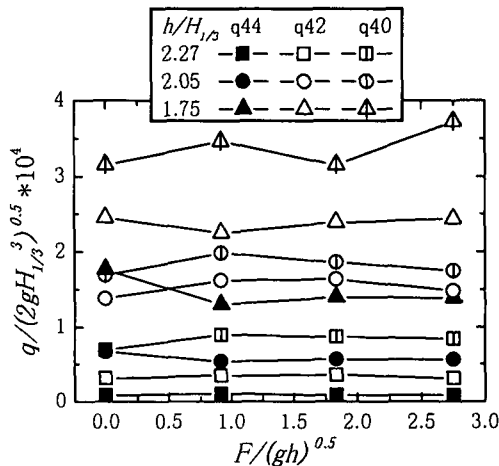


図-9 風による越波流量の変化 ($h/L_0=0.052$)

験では護岸タイプや波条件により飛散距離に及ぼす風の効果は複雑に変化している。例えば、風的作用により護岸直後近傍の越波量の割合が増大するケースが存在する。このような傾向になるのは、天端4列小段4列の護岸に比較的小さくて碎波率があまり多くない波 ($h/L_0=0.052$, $h/H_{1/3}=2.27$) が作用するときで越波状況としては図-8(b)の規模を小さくしたような場合である。風が吹いても越波水が遠くまで飛ばず、さらに越波流量も少ない現象は、小段により碎波した波が消波工の斜面を打ち上がる過程において風が打ち上げ水塊を前方へ押し出す作用により、打ち上げ水塊が十分に高く打ち上がる前に上段の消波工斜面にぶつかってしまつて波の本体が越波しないためである。

(3) 平面実験における回折波の影響

図-10は平面模型実験から得られた領域Iにおける越波流量の空間分布と波高分布の計算結果を示したものである。波高分布の計算には、ヘルムホルツ方程式に基づいた島や陸周辺の波高を計算するプログラム(三井・村上, 1967)を使用している。このため計算結果には屈折や碎波などは考慮されていない。計算では断面実験の結果から図-3の領域IおよびIIにおける護岸の反射率を0.4、領域IIIでは0.3とし、領域Iの右側の護岸の反射率の反射率は0.5とした。なお、 $x/L_{1/3} < 2$ であれば領域Iの右側の領域の反射率は波高比にほとんど影響を及ぼさないことを予備計算から確認している。図-10から、空間的な位相のずれはあるが、越波流量は波高分布と同様な変動をしている。このことは、平面模型実験では消波対策を施していても陸域端部から回折波が発生し、それが越波流量の空間分布に影響を及ぼしていることを示していると思われる。空間的な位相のずれを小段無しの場合の越波流量分布を基準として比較してみると、小段

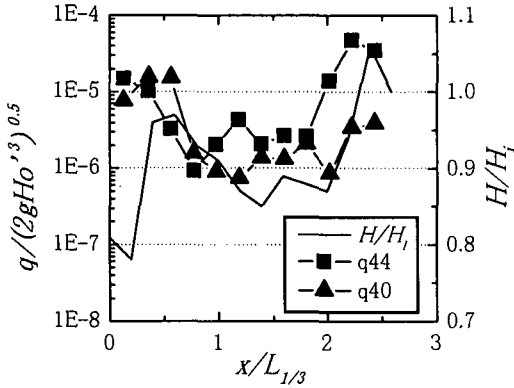


図-10 越波流量の空間分布(平面実験)と波高比

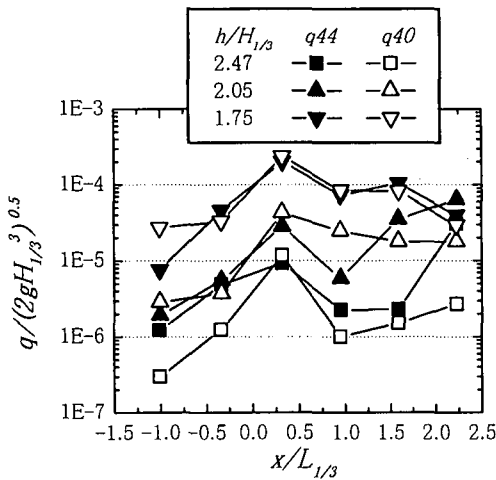


図-11 越波流量の空間分布(平面実験)

4列の場合には左側に、波高の計算結果は右側にシフトしている。波高の計算ではいわゆる直立消波護岸を対象としていることを考慮すると、この位相のずれは消波ブロックによる消波工の形状、すなわち天端列数や小段列数に起因していると考えることができる。

図-11は約80m区間の越波流量を平均したときの越波流量の空間分布の実験値を示している。 $x/L_{1/3}=0$ は領域Ⅰと領域Ⅱの境界であり、マイナス側は領域Ⅱ、プラス側は領域Ⅰである。断面実験データによると最も越波流量が小さな護岸断面は天端4列小段4列のTYPE-1であった。しかし、平面実験において斜め波を作用させたところ、波高の大きな $h/H_{1/3}=1.75$ の場合には小段4列の有効性は領域Ⅰではほとんど認められない。それよりも波高が小さな場合には、断面実験の結果とは逆に、

小段付き断面の方が小段無し断面に比べて越波流量が増大する場所が出現する。平面実験における小段4列の非有効性の理由はよくわからないが、平面実験において観察された護岸近傍にある沿い波や小段による回折波の変形などがその要因になるのではないかとと思われる。

4. 結 言

小段を有する消波護岸の越波特性について詳細な断面模型実験と平面模型実験から検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

- 1) 水面下に小段を有する消波護岸の越波量は、小段が無い場合よりも低減するとは必ずしもいえない。このため、海底地盤の円弧すべりに配慮して小段を設置する際にはその高さや幅には十分な配慮が必要である。
- 2) 越波量を低減させるには天端列数を増加させた方が小段列数を増加させるよりも効果大きい。
- 3) 護岸が有限長である場合には、消波工を施したとしても護岸端部からの回折波の影響を受けて、越波量は護岸端部から離れるにともなって波高分布と同様の変動性を有する。
- 4) 小段付きの消波護岸に斜め波が作用すると小段無しの場合よりも越波量は増大する。これは碎波率が比較的少ない波が入射する場合に認められ、碎波率が多い波の場合には小段の効果はほとんど無くなり小段無しの場合とほとんど同じ越波量になる。
- 5) 本実験では風が越波に及ぼす効果を明瞭に現すことができなかったが、小段4列の消波護岸は緩傾斜護岸と同様に風により越波量は減少する傾向を示す。

最後に模型実験の実施に際して(株)エコーの粥川章氏には多大な協力を得ました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

池野正明・阿部宣行・鹿島遼一・溝辺 哲・岡部成光 (1993): 強風作用下における護岸越波量の飛散距離分布特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 691-695.
 井上雅夫・島田広昭・円間弘起 (1992): 緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 586-590.
 井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘 (1993): 親水性護岸の越波防止機能, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 701-705.
 合田良実 (1987): 数値シュミレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 131-135.
 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.
 三井 宏・村上仁士 (1967): 海岸構造物不連続部の波高分布について(第2報)一隅角部付近の波高分布一, 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 53-59.