

急勾配斜面上の防波堤に作用する衝撃波力と消波ブロックの安定性について

Wave Forces and Armor Stability of Breakwaters on Steep Slopes

竹田英章*, 山本泰司**, 木村克俊**, 笹島隆彦**

Hideaki Takeda, Yasuji Yamamoto, Katsutoshi Kimura and Takahiko Sasajima

A design method for breakwaters on steep slopes has not been established, because the wave forces have been unable to be estimated accurately.

In this paper, the stability of wave dissipating blocks and wave forces acting on breakwaters on steep slopes have been investigated experimentally.

The common formula is applicable in estimating wave forces acting on breakwaters covered with wave dissipating blocks, but under some conditions, a stronger than usual wave pressure acts. When the incident wave height is large relative to the water depth, the blocks at the end of the slope suffer great damage.

Keywords: steep slope, wave force, stability of wave dissipating blocks

1. はじめに

混成防波堤に働く衝撃波力は耐波設計上の重要な課題である。これまでの研究により、マウンド形状による衝撃波力の発生条件が解明され設計法もほぼ確立した段階にある。しかしながら、急勾配斜面上の混成防波堤に関しては系統的な実験が行われていないのが現状である。消波ブロック被覆堤は、衝撃波力の発生を防止できる構造として一般に用いられているが、海底勾配が急な条件での波圧低減率 λ の値については未だ検討の余地がある。さらに、こうした条件下での消波ブロックの安定性に関しても不明な点がある。

本報告では、現地事例を対象として、急勾配条件における混成堤に働く衝撃波力特性と消波ブロック被覆堤の波力特性および消波ブロックの安定性について、模型実験結果に基づいて検討する。

2. 実験施設

実験対象とした大島漁港は北海道南西沖の渡島大島に位置する第4種漁港である。島の周囲は $1/2.5 \sim 1/10$ の非常に急峻な海底勾配となっている。図-1は、大島漁港周辺の地形である。防波堤は周囲に比べ比較的緩勾配の箇所に建設される。実験では、図-2に示すように $1/10$ と $1/2.5$ の複合勾配の海底床をモルタルおよび合板で製作した。この海底勾配は、図-1のA線に沿った縦断面に相当するものである。

実験に用いた水路は、ピストン式の不規則波発生装置を有する長さ85m、幅1.6m、深さ3mの2次元造波水路である。地形模型の深部には、実験中の越波による堤体背後の水位上昇を防止するため通水管を埋設してある。

模型縮尺は $1/46.4$ とし、フルードの相似則に従って実験を行った。

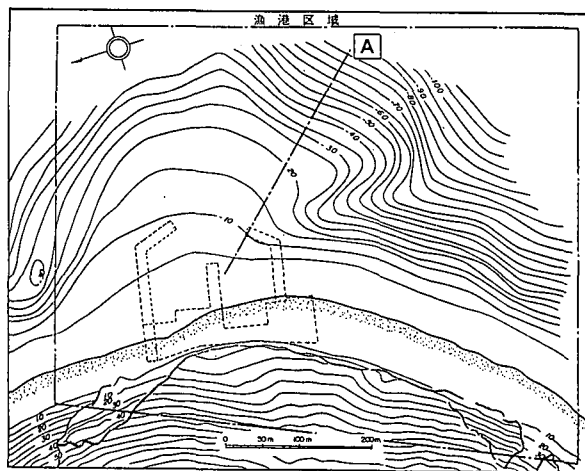


図-1 大島漁港周辺の地形

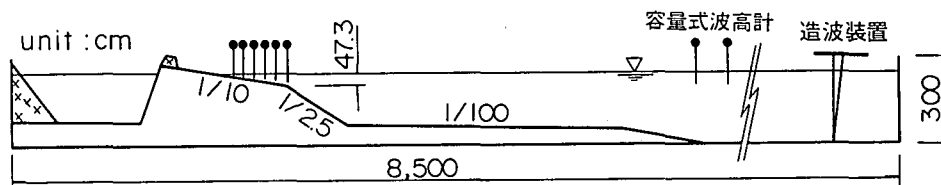


図-2 実験水路

* 正会員 北海道東海大学工学部海洋開発工学科 (〒005 札幌市南区南沢5条1丁目)

** 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)

3. 斜面上の波浪変形

3-1 実験の方法

前出の図-2に示すように、水路内8箇所において堤体を設置しない状態での通過波高を測定した。実験はすべて不規則波で行い、波群250波を標準とした。有義波周期 $T_{1/3}$ は1.65sの1種類とし、沖波波高は $H_0 = 3.1 \sim 19.7$ cmの5種に変化させた。水位は一定とし、水路勾配変化点水深は47.3cmである。

3-2 波浪変形特性

図-3は、斜面上の各測点における通過波高をプロットしたものであり、横軸を測定位置の水深として、有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 H_{max} を示している。実線は、1/10の一樣勾配条件での合田による計算曲線¹⁾である。

水深の大きい非碎波領域においては、 $H_{1/3}$ 、 H_{max} ともに波高レベルが高い場合は実験値が計算値をやや上まわり、波高レベルが低い場合は計算値をやや下回る傾向にある。計算値に対する実験値の比は有義波高で0.8~1.05程度である。水深の小さい碎波領域での波高は、1~5割程度計算値を上まわっている。

現在のところ、急勾配複合斜面上の碎波変形については計算法が確立していないので、以下に述べる波力に関する実験結果は、この測定値を入射波高として整理した。

4. 直立部に働く波力

4-1 実験の方法

(1) 波圧測定

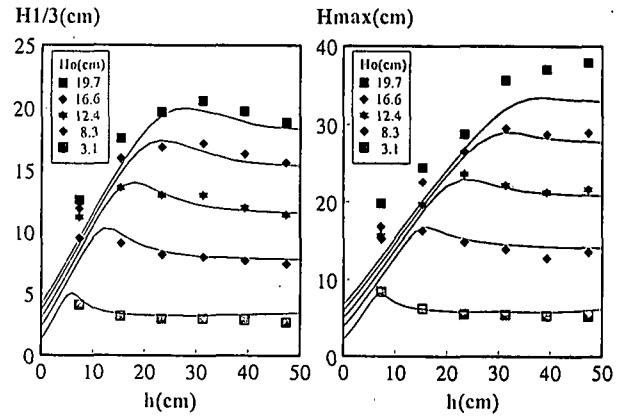
図-4に示すように勾配1/10の斜面上に直立堤と、消波ブロック被覆堤の堤体を設置して、直立壁前面の波圧を測定した。堤体模型はアクリル製で、堤体中央前面に波圧計を4~5本取り付け付けた。堤体の設置水深は、 $h = 10.8$ cmと21.6cmであり、波高の小さな波浪から順次大きな波浪を作用させた。消波ブロックの重量は589gで、天端幅はブロック2個並びで乱積みにより設置した。

堤体構造条件と測定項目を、次章以降の実験も含めて表-1に示す。

(2) 滑動実験

図-5に示すように、斜面上に重さ3~5gの碎石を用いてマウンドを形成し、その上にアクリル製の堤体模型を設置した。堤体とマウンド間の静止摩擦係数は、測定の結果 $\mu = 0.502 \pm 0.053$ となった。以下の実験結果の整理には平均値 $\mu = 0.5$ を用いる。

水路幅160cmを3分割し、中央の幅33cmの堤体模型を滑動可能な状態とした。堤体重量を2~3種類に変化させ、波浪による堤体の滑動状況を変位計により連続的に測定した。ただし、堤体の設置水深は $h = 10.8$ cmの1ケースのみとした。



(a) 有義波高 (b) 最大波高

図-3 斜面上の波高測定結果

表-1 実験条件

堤体構造	測定項目	堤体水深 h (cm)	波浪条件	
			T_0 (s)	H_0 (cm)
直立堤 (マウンド無)	堤体波圧	21.6 10.8	1.65	3.1~19.7 (5種)
	滑動量	10.8		8.3~19.7 (7種)
消波ブロック 被覆堤	ブロック被害率	32.3		3.1~19.7 (5種)
	ブロック被害率	21.6		8.3~19.7 (7種)
	堤体波圧	10.8		
	ブロック被害率 滑動量	10.8		

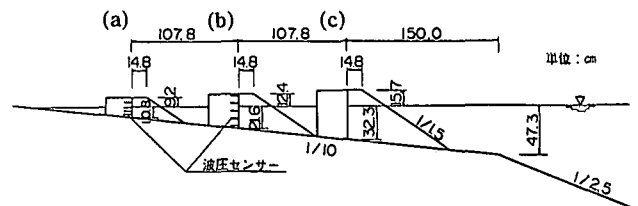


図-4 堤体設置位置

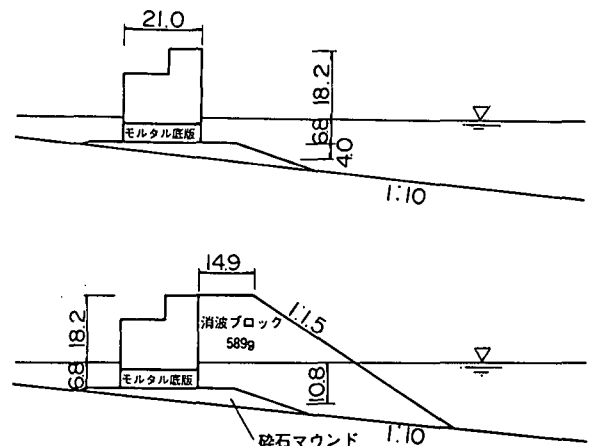


図-5 滑動実験に使用した堤体模型

4-2 波力特性

(1) 波圧分布

図-5は波圧分布の例であり、堤体設置水深が $h=10.8\text{cm}$ 、沖波波高が $H_0=3.1$ および 16.6cm の波浪での最大同時波圧分布を示しており、標準的な波力算定式²⁾による波圧分布も実線および破線で示してある。このとき消波ブロック被覆堤では、波圧低減率を $\lambda=1.0$ として計算している。

直立堤では波高が小さいときは計算値にほぼ等しいのに対して、波高が大きい場合は衝撃砕波力が発生し、計算値の2~4倍の値を示している。消波ブロック被覆堤の波圧分布は計算値にほぼ等しいかやや下回っている。

図-6は、堤体に作用する最大波圧を整理したものである。縦軸は波圧合力の実験値と計算値の比 P_{EXP}/P_{CAL} 、横軸は堤体水深に対する最大波高の比 H_{max}/h である。ここで波圧合力の実験値 P_{EXP} は、波圧センサーの分担割合に応じて最大同時波圧強度から計算したものである。

水深が $h=21.6\text{cm}$ の場合については、直立堤(図中●印)では、 $H_{max}/h=1.4$ の条件で発生波力がピークとなり、実験値は計算値の2.8倍となる。消波ブロック被覆堤(○印)では、比較的波高の小さな条件を除いて、 P_{EXP}/P_{CAL} は0.8以下であり、消波ブロックにより衝撃的な波力が抑えられていることがわかる。ここで P_{EXP}/P_{CAL} の値は波圧低減率 λ に等しいが、この水深条件に対しては急勾配条件ではあっても標準的な設計方法($\lambda=0.8$)が適用できる。

これに対し、 $h=10.8\text{cm}$ の場合は、直立堤(▲印)に働く衝撃波力が増大し、最大で計算値の3.6倍となる。△印は消波ブロックで被覆した場合の実験結果であるが、 $P_{EXP}/P_{CAL}=0.9\sim 1.0$ 程度であり、一般的な条件よりも波力が大きいことがわかる。

(2) 滑動実験結果

図-7は水深 $h=10.8\text{cm}$ の場合の堤体の滑動状況を示しており、縦軸は滑動量 S 、横軸は最大波高 H_{max} をそれぞれ滑動限界波高 H_{CG} で無次元化してある。なお、消波ブロック被覆堤の場合は波圧低減率を $\lambda=1.0$ として計算した。

混成堤では、衝撃砕波力が発生するため H_{max}/H_{CG} の比が0.5~0.6程度の波浪で滑動を開始する。消波ブロック被覆堤では、 $H_{max}/H_{CG}=1$ 付近が滑動限界と考えられる。

以上の波圧および滑動実験から、消波ブロック被覆堤には標準的な波力算定式が適用可能であるけれども、波圧低減率は $\lambda=1.0$ とする必要があると言える。

5. 消波ブロックの安定性

5-1 実験の方法

実験は、波高レベルの低い波浪から順次大きな波浪を作用させたときの消波ブロックの移動状況を目視により観測し、ブロックの高さ程度以上移動したブロックを被害を受けたとみなした。波高レベル毎のブロックの積み直しは行わず、被害個数を累計した。被害率 D は次式により計算した。

$$D = (n/N) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 n は検査域における被害ブロック数、 N は検査域における消波ブロックの総数である。検査域は、水

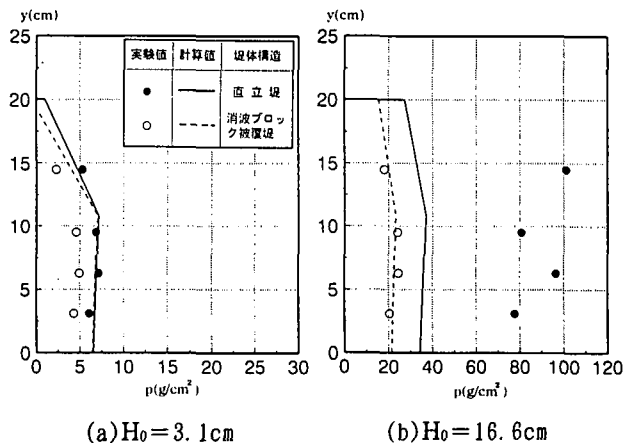


図-5 堤体に作用する波圧分布の一例($h=10.8\text{cm}$)

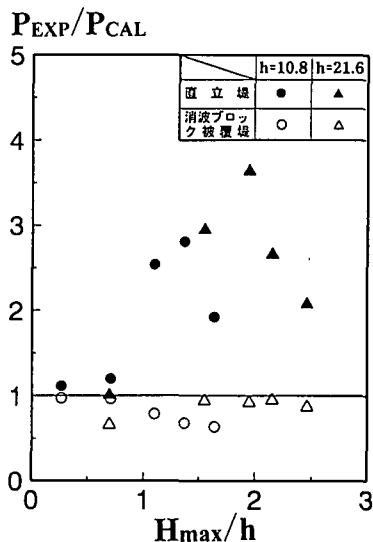


図-6 波圧合力

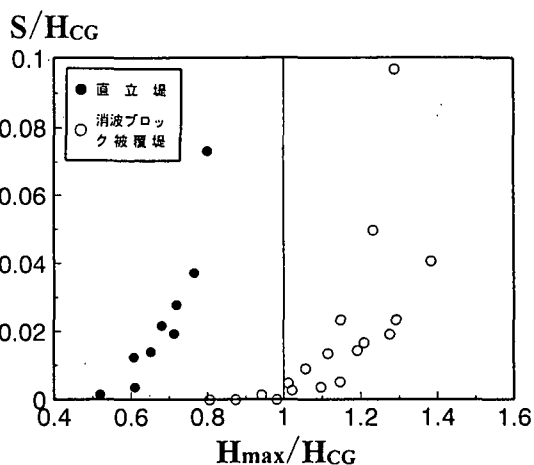


図-7 滑動実験結果

路側壁の影響を受けないよう、水路中央の幅80cmの範囲とした。また水深方向には、ブロック重量に対する波高 H_w をHudsonのブロック重量算定式から逆算し、静水面下1.5 H_w までとした。

5-2 消波ブロックの被害特性

図-9は、消波ブロックの被害率を示しており、横軸は式(1)で定義した被害率、縦軸はHudson式を変形した式(2)から求めた K_D 値であり、波高 $H_{1/3}$ の関数である。図には実験値の平均的な傾向を表す曲線をあわせて示してある。

$$K_D = \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{W(S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (2)$$

被害率 D を1%まで許容した場合、水深が $h=32.3\text{cm}$ および 21.6cm のときの K_D 値は約10であり、一般的に用いられている K_D 値($=8.3$)に近い。しかし、 $h=10.8\text{cm}$ では被害率が大きくなっており、 $D=1\%$ を基準にすると K_D 値は6程度となる。このとき、被害を受けたブロックは静水面より下側の部分に集中しており、図-10のように消波工のり先のブロックが沖側へ移動する被害が顕著であった。

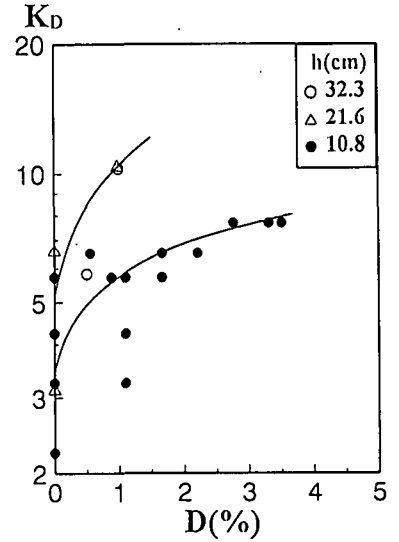


図-9 消波ブロックの K_D 値と被害率

5-3 K_D 値に及ぼす水深の影響

ブロックの被害は、入射波が巻き波となって、のり先あるいはのり先のやや上方に崩れ落ちる場合に、のり先に集中して発生する。ブロックと海底面の摩擦力がブロック相互のかみ合わせ力に比べ相対的に小さいことから、のり先に波力が作用すると被害が生じやすく、被害率は大きくなる。水深に対して波高が小さければ巻き波砕波となりにくく、また波力は主にブロック斜面に作用するため、静水面付近のブロックが被害を受け易く、のり先の被害は少ない。

図-11は、被害率 $D=1\%$ のときの波高水深比 $H_{1/3}/h$ と K_D 値の関係を示しており、図-9を再整理したものである。データ数は少ないが、 $H_{1/3}/h$ がおおむね1を越えたとのり先に被害が生じるため、結果として K_D 値が小さくなる傾向がある。



図-10 のり先被害の状態

6. 結 論

のり先に1/2.5勾配斜面をもつ1/10勾配斜面上における堤体波力ならびに消波ブロックの安定性について、不規則波を用いた2次元模型実験により検討した。主要な結論を以下に示す。

- ①直立堤では衝撃砕波が作用するため、計算値の約2~3.7倍の波力が生じる。
- ②消波ブロック被覆堤では衝撃砕波力の発生を抑えることができるが、条件によっては波圧低減率を $\lambda=1.0$ とする必要がある。
- ③消波ブロックは、堤体水深に対する入射波高の比 $H_{1/3}/h$ がおおむね1を越えたとのり先に被害が生じ、その結果 K_D 値が小さくなる傾向がある。

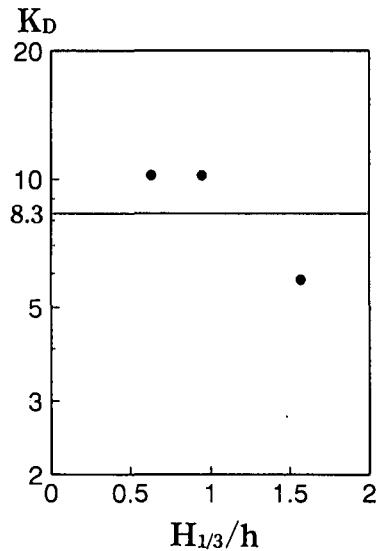


図-11 K_D 値に及ぼす水深の影響

参考文献

- 1) 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 第14巻 第3号、pp. 59-106、1975。
- 2) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版、社団法人 日本港湾協会、1989。
- 3) 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 第29巻 第1号、pp. 53-75、1990。