

# 海底勾配が急な浅い消波護岸のブロックの安定性について

(独)寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム

上久保勝美  
菅原 健司  
山本 泰司

海底勾配が急な浅い消波護岸では、法先の消波ブロックが不安定となり法崩れが生じやすく、消波ブロックが沈下している事例も少なくない。本研究では、不規則波を用いた2次元水理模型実験により、設計波に相当する波浪に着目した消波ブロックの波力実験を行った。検討の結果、海底勾配が  $i=1/20$ 、 $h/L_{1/3}=0.021$  の限られた条件ではあるが、安定限界質量の算定にあたって、堤体から沖側に  $5H_{1/3}$  および  $10H_{1/3}$  離れた地点での水深による波高を用いた計算手法を示した。

キーワード：急勾配，消波護岸，消波ブロック，水理模型実験

## 1. はじめに

海底勾配  $i=1/20$  の急な水深が浅い消波護岸では、法先の消波ブロックが不安定となり法崩れが生じやすく消波ブロックが沈下している事例も少なくない。高橋ら<sup>1)</sup>は、消波ブロック質量の新たな算定法として、波数、被災度(被害率)、砕波の程度を考慮できる算定法を提案している。しかしながら、海底勾配が  $i=1/20$  の急で水深が浅い  $h/H_o=0.5$  程度の条件では、必要質量が過小に評価される場合がある。また、竹田ら<sup>2)</sup>は、急勾配斜面上の消波ブロックの安定性について検討を行っているが、法先に  $1/2.5$  勾配をもつ  $1/10$  勾配斜面上であるため条件が異なる。

本研究では、海底勾配を  $i=1/20$ 、前面水深を  $h=4.2\text{m}$  とした条件に対して、設計波に相当する波浪に着目した消波ブロックの波力実験を行い、ブロックを被災させる波力の発生メカニズムを明らかにするとともに、安定実験により安定質量の算定手法について検討を行う。

## 2. 消波ブロックの散乱状況

写真-1 は、海底勾配が  $i=1/20$  の海底地形上に建設された消波護岸のブロックが沖側に散乱している状況を示したものである。

法先の消波ブロックが不安定になって、沖側に移動することによって法崩れを起こし、消波ブロックが沈下したものと推察される。通常、施工時には消波ブロックの法面勾配は  $1:4/3$  で施工されるのが一般的であるが、原形が保たれていない状況である。Katsumi Kamikubo, Kenji Sugawara, Yasuji Yamamoto



写真-1 消波ブロックの散乱状況

## 3. 波力実験

### (1) 実験方法

水理模型実験は図-1 に示す、長さ 28m、幅 0.8m、高さ 1.0m の 2 次元造波水路を使用し、海底勾配  $i=1/20$  の一様斜面に続く水平床を設けた。なお、実験縮尺は  $1/40$  を想定している。



図-1 2次元造波水路

図-2 に示すように分力計の先端に固定した波力測定用の消波ブロック模型(全高 9.7 cm, 589g 相当)に働く 3 方向の波力を直接計測した。測定位置は法

先、水面および法肩の3箇所について行った。なお、波力を測定するブロックが他のブロックと接触するのを防ぐために、写真-2に

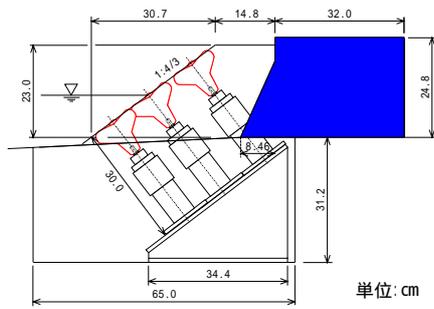


図-2 波力計の設置状況

示すように周囲を3個のダミーブロックで保護した。測定用の緑色のブロックの近傍には、波高計および流速計を設置して、水位および流速を測定した。波力計、波高計および流速計のサンプリング周期は200Hzとした。



写真-2 測定用ブロック(中央)とダミーブロック

実験水深は  $h=10.5$  cmで一定とした。実験波は Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波を用いた。周期を  $T_0=1.58, 1.90$  および  $2.21$ sの3種類、波高を  $H_0=12.5, 15.0, 17.5$  および  $19.3$  cmの4種類とした。一波群の作用波数は150波とした。水平波力  $F_H$  は波の進行方向を、鉛直波力  $F_V$  は鉛直上向きをそれぞれ正と定義した。

(2) 波力の時間変化

図-3は  $h/L_0=0.021, h/H_0=0.545$  での水平波力  $F_H$ 、鉛直波力  $F_V$ 、水位、法先ブロック近傍の水平流速  $U_H$ 、鉛直流速  $F_V$  の時間変化を示したものである。法先ブロックに最大合成波力が作用した108.56sに着目してみると  $F_H$  には、わずかではあるが沖側に向かう波力が作用し、 $F_V$  には、鉛直上向きに8N

$T_0=2.21$ s  $H_0=19.3$ cm

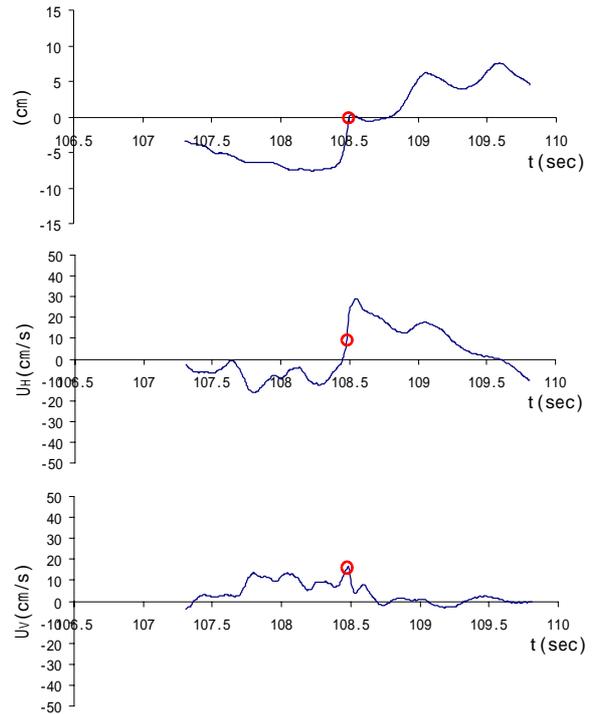
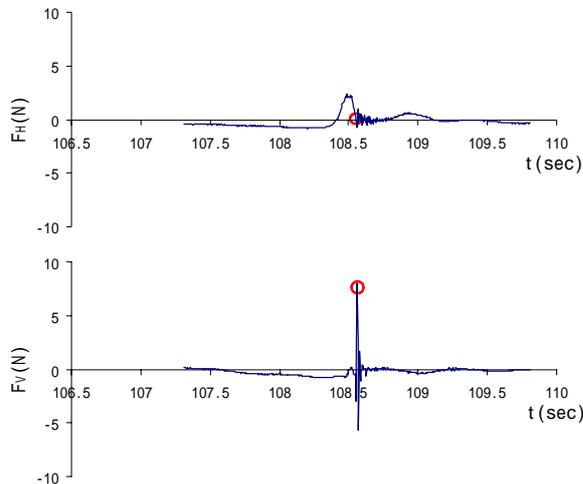


図-3 時系列データ

程度の大きな波力が作用していることが認められる。流速データからも鉛直上向きに15 cm/s程度の流速が生じていることが認められる。

図-4は、法先ブロックに作用する波力の時間変化を示したものである。は波が作用する直前の状態であり、消波ブロックに波力は作用していない。

の状態は、波が消波ブロックに作用した直後であり、急に水面が上昇することによって鉛直上向きの波力が発生する。この時、ブロックの噛み合わせが緩む。は波の峰が通過した後の状態であり、消波ブロックには鉛直下向きの波力が発生する。ここで一旦、ブロックは底着する。は沖に向かう波力が発生する。で噛み合わせが緩んだブロックは、作

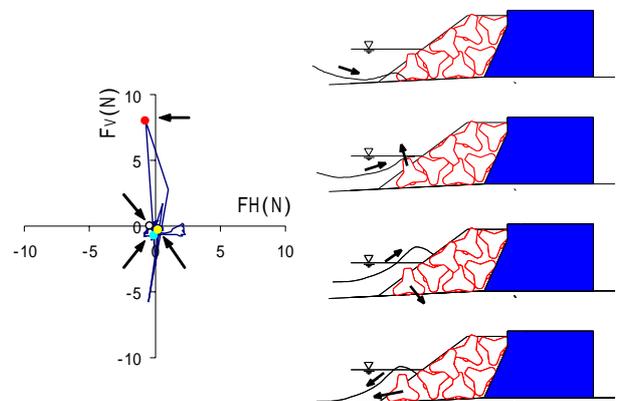


図-4 時系列データ

用波力は小さいものの、この時、沖側に移動する。この繰り返し作用によって、徐々に法崩れを起こしブロックが沖側に移動する。

(3) 波力の変化特性

波力の時系列データを用いて、法先、静水面および法肩の各法面位置において消波ブロックに作用する合成波力のピーク値を求めた。図-5は  $h/L_{1/3}=0.021$  での水深波高比  $h/H_0'$  と無次元波力  $F/W$  の関係を示したものである。ここで  $W$  は消波ブロックの水中質量である。ばらつきはあるものの、水面位置で大きく、次いで法肩、法先の順に減少する傾向が認められる。法先位置において  $F/W=1.0$  程度のブロック質量相当の波力が作用していることが認められる。法先ブロックには上方のブロックからの拘束力がないことから、移動しやすい条件であることが言える。

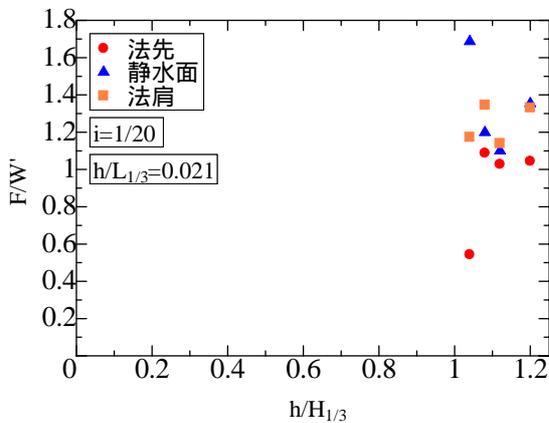


図-5 各法面位置での作用波力

図-6は、法先ブロックに着目した、周期の影響を示したものである。ばらつきはあるものの  $h/L_{1/3}$  が小さいほど、波力が大きくなる傾向にある。

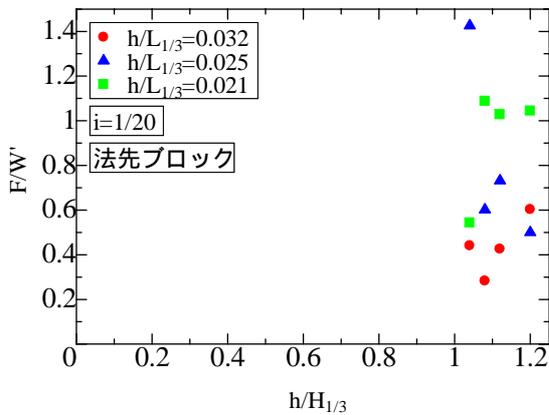


図-6 周期の影響

3. 安定実験

(1) 実験方法

実験水槽は波力実験で使用した2次元造波水路を用いた。実験波は Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波を用いた。周期を  $T_0=2.21s$  で一定として、波高を  $H_0'=7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 19.3$  および  $21.0$  cmの7種類とした。消波ブロックにはテトラポット (105 ~ 472g) を使用した。安定実験では1波群の作用波数は500波とし、ブロックの並び替えを行わず波高を段階的に大きくする段階波実験と、同一波群を繰り返し作用させる連続波実験の2種類を行った。

(2) 被災パターン

図-7に代表的な消波ブロックの被災パターンを示す。初期被災は、法先の消波ブロックが沖側に移動することによって法崩れが生じ、消波ブロックが散乱することが認められた。これは3.で記述したように、法先ブロックには鉛直上向きの波力が作用し、ブロックの噛み合わせが緩んだことで、沖に向かう流れによってブロックが移動することは、波力の時系列データからも一致する。

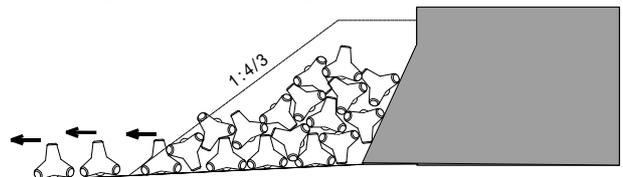


図-7 被災パターン

(3) 作用波数と被災度の関係

図-8は、 $h/L_{1/3}=0.021$ 、 $h/H_0'=0.7$  での波数  $N_w$  と被災度  $N_0$  の関係を示したものである。なお、 $N_0=0.3$  は従来の被害率1%程度となることが高橋ら<sup>1)</sup>によって確認されている。ブロック質量は計算質量の2.1倍のものを用いた。波数を2500波まで作用させると被災の伸びは鈍化するものの最終的な被災度は大きくなる傾向にある。

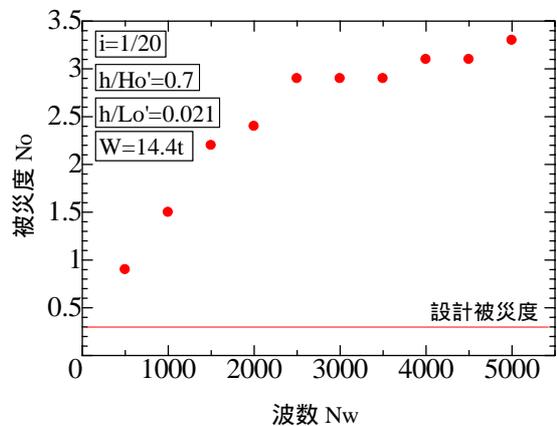


図-8 作用波数と被災度の関係

(4) 安定限界波高

消波ブロックの安定性については、同一波高レベルでの波の作用は 1000 波を標準とすることが、港湾施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>に示されている。

図-9 は、 $h/L_{1/3}=0.021$  において  $N_w=1000$  波に着目した時の各ブロック質量に対する波高と被災度の関係を示したものである。設計被災度  $N_0=0.3$  に相当する安定限界波高は、後述するハドソン式により求められる波高の 0.63 ~ 0.76 倍となっている。

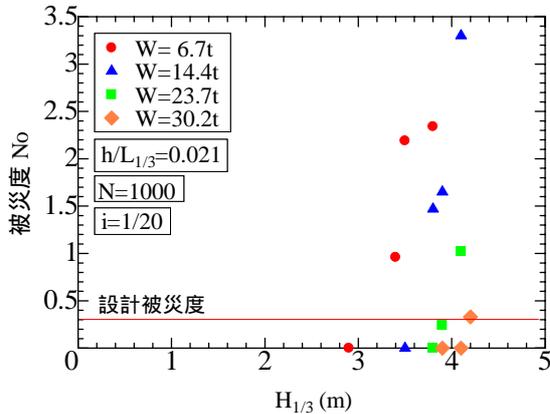


図-9 安定限界波高

(5) 必要質量と計算質量の関係

消波ブロックの所要質量の算定は、式(1)に示す安定数  $N_s$  によるハドソン式から求められる。

$$M = \frac{\rho_r H_d^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \dots (1)$$

ここで用いる  $H_d$  は、港湾施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>では、一般的に構造物設置位置における進行波としての有義波高  $H_{1/3}$  を用いることができる。また、水深が換算沖波波高  $H_0'$  の 0.5 倍以下の地点の場合には、 $H_0'$  の 0.5 倍の水深における  $H_{1/3}$  を用いると示されている。図-10 は、図-9 より求めた安定限界質量と計算質量を示したものである。計算で用いた  $H_{1/3}$  は、水深が  $0.5H_0'$  以上の条件であるため、構造物設置位置における  $H_{1/3}$  を用いた。また、 $N_s$  については高橋ら<sup>1)</sup>によって提案されている碎波および斜面勾配の効果を検討した  $N_s$  値とした。 $h/H_{1/3}=1.45$  の条件では計算値とほぼ一致する値となるが、波高が大きくなるとともに計算値が過少になることがわかった。そこで、危険な状態を想定して、堤体から沖側に  $5H_{1/3}$  および  $10H_{1/3}$  離れた地点での水深による波高を用いた計算を行った。 $5H_{1/3}$  を用いた計算値では  $h/H_{1/3}=1.20$  で実験値に近づくものの、 $h/H_0'=1.08$  および  $1.02$  では実験値に対して 1.3 ~ 1.5 倍の差が生じている。一方、 $10H_{1/3}$  を用いた計算値では、 $h/H_{1/3}=1.45$  および  $1.20$  でやや過大な値にはなるものの  $h/H_{1/3}=1.02$  および  $1.08$  では、概ね実験値に近づく傾向が認められる。

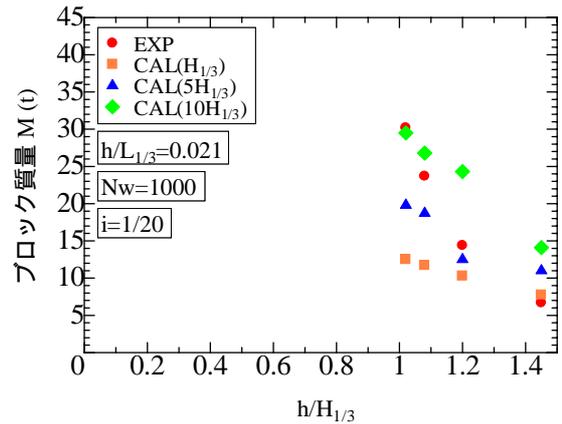


図-10 必要質量と計算質量の関係

図-11 は、 $h/L_{1/3}=0.021$  で堤体から沖側に  $5H_{1/3}$  および  $10H_{1/3}$  離れた地点での水深による波高を用いた計算値を示している。必要質量が 14.4t となる条件では、設計波高を堤体前面の  $5H_{1/3}$  沖だし波高を用いることで、23.7t および 30.2t のブロックが必要となる条件では  $10H_{1/3}$  沖だし波高を用いて算出することによって、実験値と計算値がほぼ一致することが認められる。

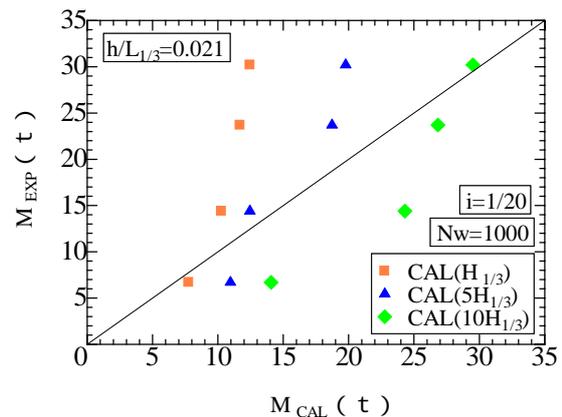


図-11 計算値と実験値の比較

(6) 法止めブロックの効果

被災のパターンは法先のブロックが不安定となり、沖側に移動して法崩れを起こすことから、図-12(1)および(2)に示すように、法先ブロックの保護として法線方向に 2 列、同規格の消波ブロックを設置した場合と被覆ブロックを設置した場合について安定実験を行った。図-13 は、

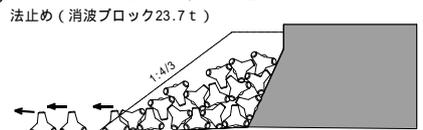


図-12(1) 法止め消波ブロック

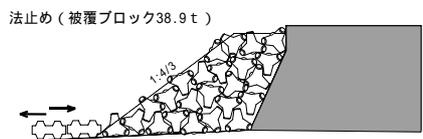


図-12(2) 法止め被覆ブロック

夫々の法止めブロックを設置した場合の波数と被災度の関係を示したものである。消波ブロックを設置した場合、図-12(1)に示すように2列のブロックは徐々に沖側に移動し始めて  $N_w=3500$  までは設計被災度  $N_o=0.3$  以下に抑えられていたが、5000波作用後には  $N_o=0.5$  となった。 $N_w=1000$  で設計被災度を0.3以下と見るならば、安定とみなせるが最終的な被災は大きくなることが考えられる。一方、被覆ブロックを設置した場合、5000波作用後においても法先のブロックの移動は確認されなかった。しかしながら、図-12(2)に示すように、沖側への一方的な移動は見られなかったものの、断面方向に左右の移動が認められているため、実験に用いた被覆ブロックよりも安定数の高いブロックについての検討も必要と考えられる。

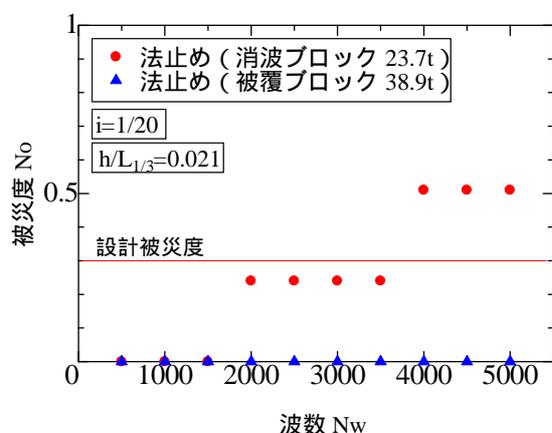


図-13 作用波数と被災度の関係

## 5. まとめ

海底勾配が  $i=1/20$  ,  $h/L_{1/3}=0.021$  の条件におけるブロックの安定性および作用波力について、不規則波を用いた2次元水理模型実験により得られた主要な結論を以下に示す。

消波ブロックに作用する波力の時間変化を示し、ブロックを被災させる波力の発生メカニズムを明らかにした。

$i=1/20$  ,  $h/L_{1/3}=0.021$  の条件における消波ブロックの安定限界波高について明らかにした。

安定限界質量の算定にあたって、堤体から沖側に  $5H_{1/3}$  および  $10H_{1/3}$  離れた地点での水深による波高を用いた計算手法を示した。

法止めブロックを用いた場合の安定性について明らかにした。

今回の検討では、海底勾配が  $i=1/20$  ,  $h/L_{1/3}=0.021$  の限られた条件ではあるが、安定限界質量の算定手法を示した。今後は、海底勾配を変化させた周期の影響についても検討を行っていく予定である。また、水理特性と同時にコスト面も考慮した検討が必要と考えている。

謝辞：本報告をまとめるにあたっては、室蘭工業大学大学院木村克俊教授に多大なご指導を頂いた。末筆ながらここに記して深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 高橋重雄・半沢稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量 - 消波ブロック被覆堤の設計法の再検討 第1報 - , 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp.3 ~ 28, 1998
- 2) 竹田英章・山本泰司・木村克俊・笹島隆彦：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, 海洋開発論文集, Vol.11, pp.287 ~ 290, 1995
- 3) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 社団法人日本港湾協会, p.552, 2007

