

急勾配海底条件下における消波護岸の ブロックの安定性

Armor Stability of Block Mound Seawall for Steep Foreshore Conditions

上久保勝美¹・山本泰司²・木村克俊³・清水敏明⁴・吉野真史⁵

Katsumi KAMIKUBO, Yasuji YAMAMOTO, Katsutoshi KIMURA,

Toshiaki SHIMIZU and Masafumi YOSHINO

正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

正会員 博(工) (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

正会員 博(工) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

非会員 日本データーサービス(株) (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

正会員 (株)アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

Wave force and stability of tetrapod for block mound seawalls were examined for steep foreshore conditions by two-dimensional hydraulic model tests. The damage mechanism was disclosed based on the time series of wave force acting on tetrapod by three-component dynamometer. For the condition of $h/L=0.021$ and $h/H_0=0.5$, the necessary mass of tetrapod becomes larger than the calculated mass by Hudson type design formula, and the modification methods were proposed. Furthermore, foot protection blocks with high density concrete were proved to be effective to stabilize tetrapods of block mound seawalls.

Key Words : block mound seawall, steep foreshore condition, armor block, model test

1. はじめに

海底勾配が急で水深が浅い消波護岸では、急激に碎ける巻き波状の碎波によって、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、消波ブロックが全体的に沈下している事例も少なくない。高橋ら¹⁾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)、碎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 $i=1/20$ の急勾配で、水深が浅い $h/H_0=0.5$ 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²⁾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 $1/2.5$ 勾配をもつ特殊な条件を対象としているため一般的な結論は得られていない。

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。通常、水深が深く海底勾配が緩い条件では、静水面付近のブロックが転落するが、従来の安定数 N_s を用いたブロック質量で被災した報告例は少ない。一方、海底勾配が急な条件では、急激に碎ける巻き波状の碎波が作用すること

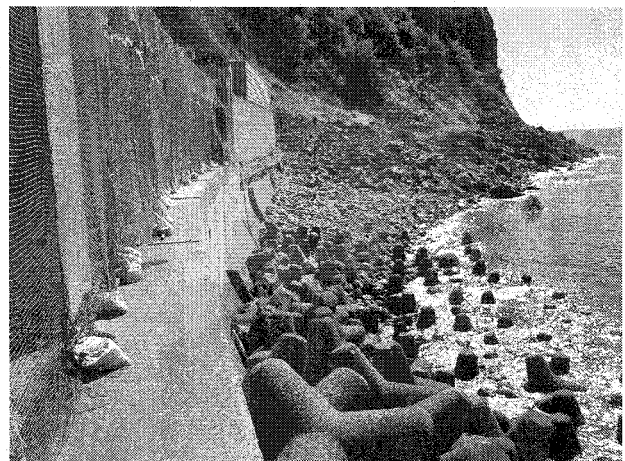


写真-1 消波ブロックの散乱状況

で、従来の N_s 値では、安定質量が過少に評価される場合がある。また、水深が浅くなることによって、砕けた波面が法先部に衝突し、法先の消波ブロックが不安定となる。さらに沖側に戻る波力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が少なくない。

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。

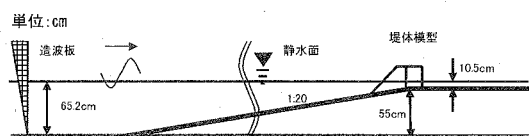


図-1 2次元造波水路

図-2に示すように波力測定用の消波ブロック模型（全高 9.7 cm、589g 相当）を分力計の先端に固定して 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 箇所とした。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、

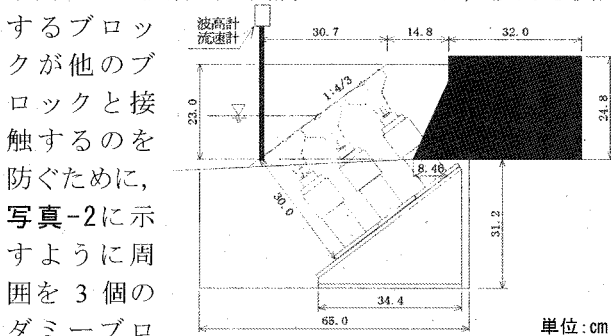


図-2 波力計の設置状況

写真-2に示すように周囲を 3 個のダミーブロックで保護した。測定用の中央部のブロックの直前には、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。

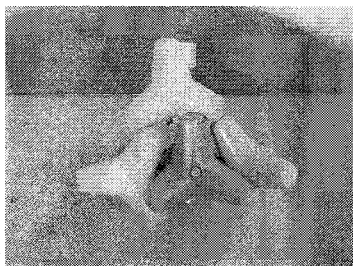


写真-2 測定用ブロック（中央）とダミーブロック

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、 $h/L_{1/3}=0.021$, $h/H_{1/3}=1.04$ での水平波力 F_H 、鉛直波力 F_V 、水位 η 、法先ブロック近傍の水平流速 U_H 、鉛直流速 U_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 108.56 s に着目すると 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 程度の大きな波力が作用している。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。

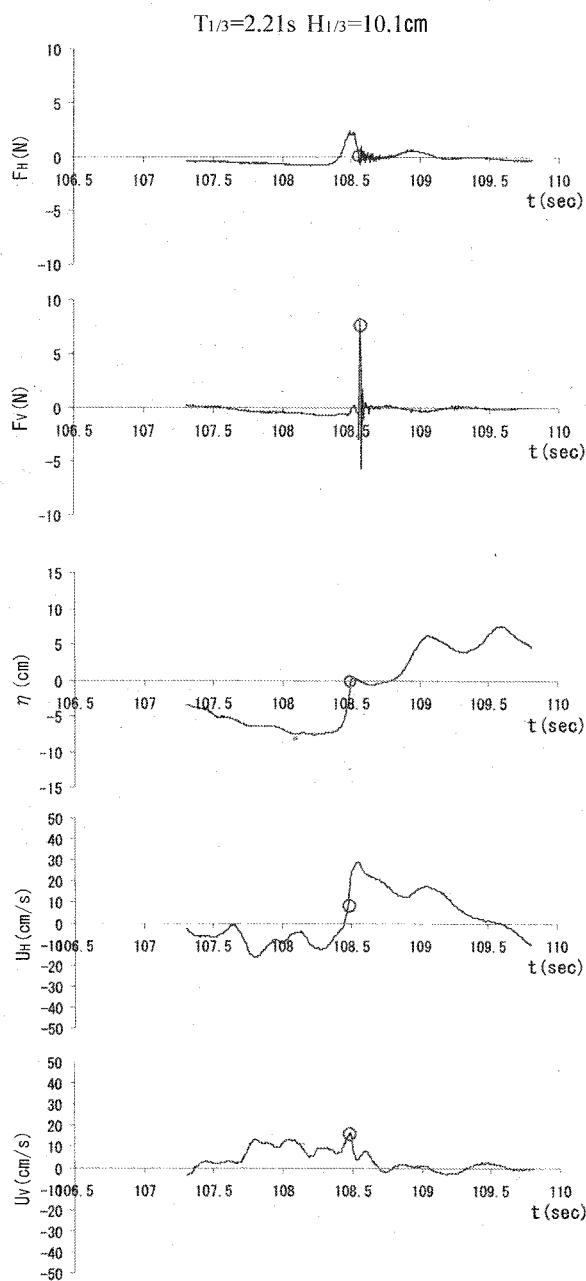


図-3 波力、水位、流速の時系列データ

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。①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。②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。③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。④は沖に向かう波力が発生する。②で噛み合わせが緩んだブロックは、作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。

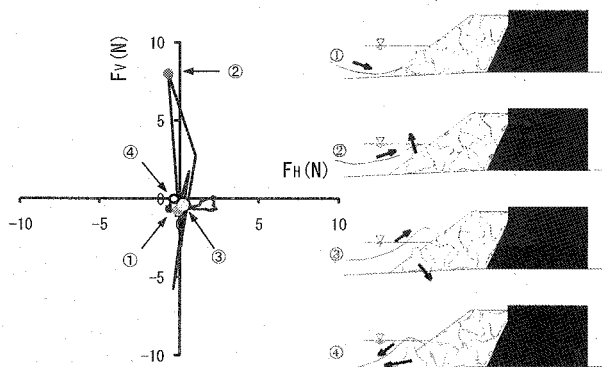


図-4 波力の時系列データ

(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 F 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 $h/H_{1/3}$ 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重量である。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。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

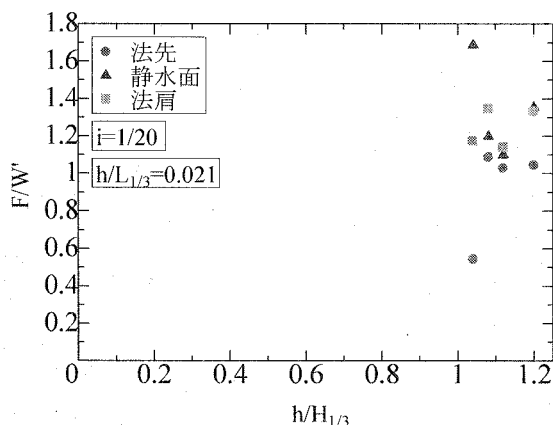


図-5 各法面位置での作用波力

とから、移動しやすい条件であることが言える。

図-6は、法先ブロックに働く波力に対する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がある。

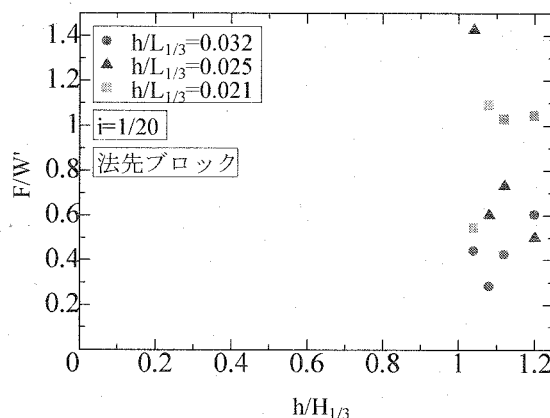


図-6 周期の影響

4. 安定実験

(1) 実験方法

安定実験に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。初期被災では、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したものであり、波力の時系列データの傾向とも一致する。

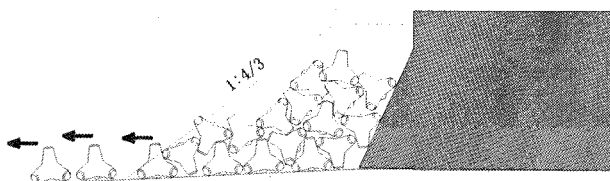


図-7 被災パターン

(3) 作用波数と被災度の関係

図-8は、 $h/L_{1/3}=0.021$, $h/H_{1/3}=1.12$ 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% 程度に相当することが高橋ら¹⁾ 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 倍のものをういた。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。

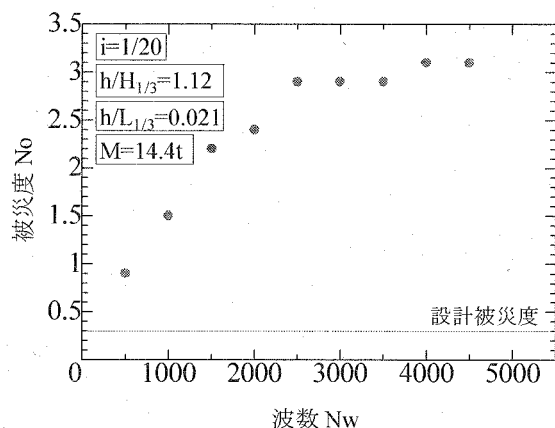


図-8 作用波数と被災度の関係

(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³⁾ 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。

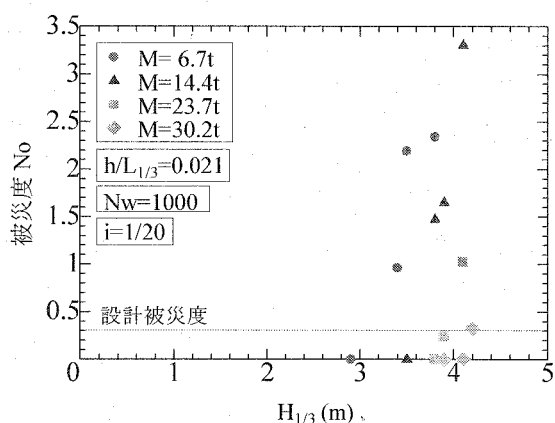


図-9 安定限界波高

(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。

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

ここに

M : ブロックの所要質量

ρ_r : ブロックの密度

S_r : ブロックの海水に対する比重

H_d : 安定計算に用いる波高

N_s : 安定数。主としてブロックの形状、勾配、被害率等によって決まる

ここで用いる H_d は、港湾施設の技術上の基準・同解説³⁾ 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。ここでは、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

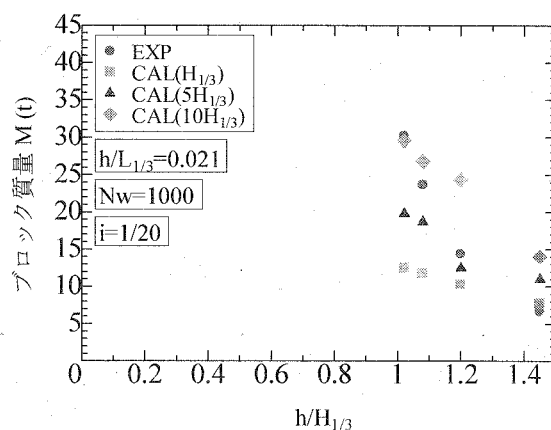


図-10 必要質量と計算質量の関係

橋ら¹⁾ によって提案されている碎波および斜面勾配の効果を考慮した値を用いた。 $h/H_{1/3}=1.45$ の条件では実験値 (EXP) と計算値 (CAL) は、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計算を行った。 $5H_{1/3}$ を用いた計算値 CAL($5H_{1/3}$) では $h/H_{1/3}=1.20$ で実験値に近づくものの、 $h/H_{1/3}=1.02$ および 1.08 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 CAL($10H_{1/3}$) 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-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 $5H_{1/3}$ 沖出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 $10H_{1/3}$ 沖出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している。

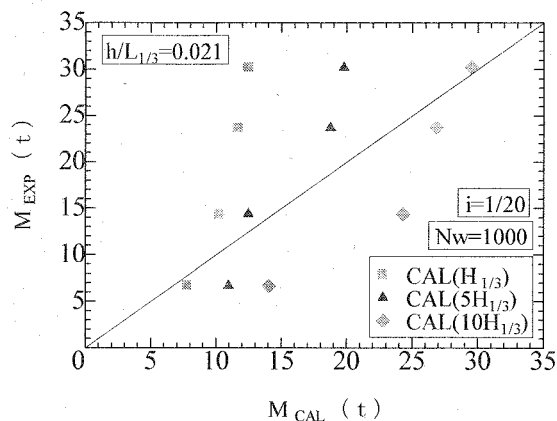


図-11 計算値と実験値の比較

(6) 法止めブロックの効果

法先部では不安定となったブロックが沖側に移動して法面全体の崩壊が確認されている。このため法先ブロックを保護する目的で、法止めブロックとして消波ブロックおよび被覆ブロックを設置した場合の効果を検討した。なお、何れの場合も法線方向に2列のブロックを設置した。図-12は消波ブロック(23.7t)を用いた場合、図-13は被覆ブロック(38.9t)を用いた場合の、ブロックの移動状況を示している。

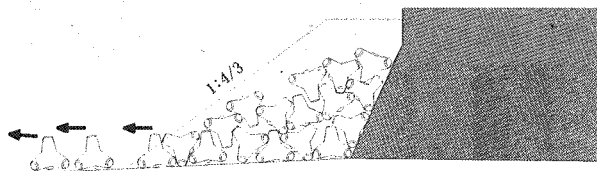


図-12 法止め消波ブロック(23.7t)の移動状況

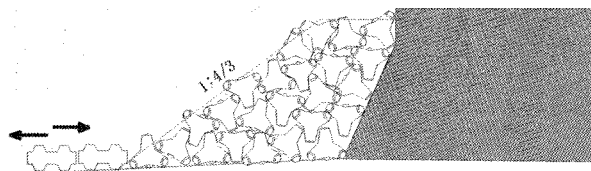


図-13 法止め被覆ブロック(38.9t)の移動状況

図-14は、これらの法止めブロックを設置した場合の、法面の消波ブロックの被災度と波数の関係を示している。法止めブロックとして消波ブロックを設置した場合、図-12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 $N_0=0.3$ 以下に抑えられていたが、4000波作用後には $N_0=0.5$ 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

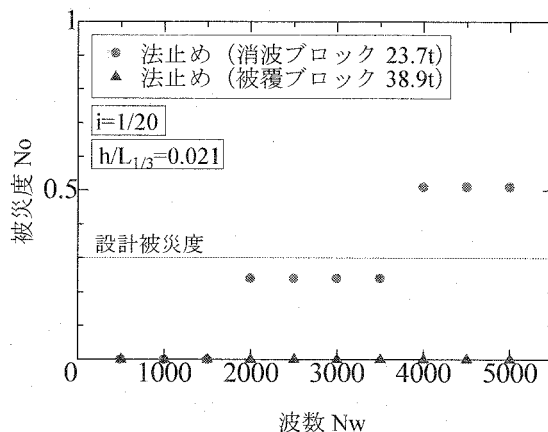


図-14 作用波数と被災度の関係

しながら、図-13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ることから、消波ブロックの法先に設置した被覆ブロックの安定性について実験を行った。

安定実験に用いた被覆ブロックは22個で壁面の左右4個については検査の対象から除外し、総数18個を検査の対象とした。移動または浮動した個数を総数で除して被害率を求めた。図-15は、消波ブロックの法先に設置した各質量における被覆ブロックの作用波数と被害率の関係を示したものである。図中の直線は設計の基準と考えられている被害率1%を示している。 $M=19.2t$ は、ハドソン式により求められた安定質量の4.0倍の質量を有しているが、40%を超える個数のブロックが移動した。 $M=32.0t$ についても4500波作用後には、40%を超える個数のブロックの移動が認められた。 $M=38.9t$ の被覆ブロックは、図-14に示したように消波ブロックの安定性は損なわれなかったものの、1500波作用後には被覆ブロックの移動および浮動が認められた。そこで、ブロックの厚さが増すことによって不安定になりやすいことを留意して1ランク小さい規格の M

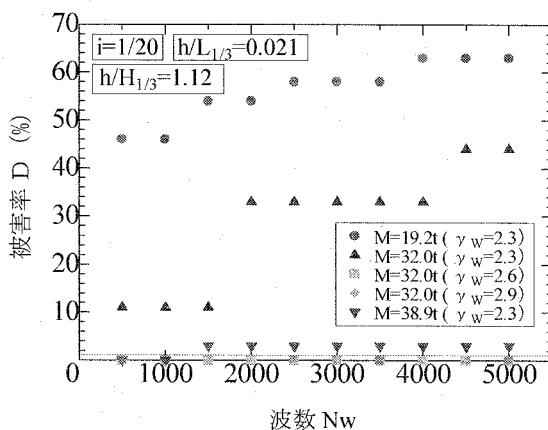


図-15 作用波数と被害率の関係

=32.0t 型の被覆ブロックを比重 $\gamma_w=2.6$ および 2.9 に変化させて行った。 $\gamma_w=2.6$ の被覆ブロックは、数mm 程度の浮動が確認されたものの水平方向の移動は見られなかった。 $\gamma_w=2.9$ については、浮動および移動の何れの動きも認められなかった。消波ブロック法止めの被覆ブロックは、ブロック厚の薄い規格で高比重化を図ることによって、より安定性を増すことが明らかになった。

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。

- ①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。
- ② $i=1/20$, $h/L_{1/3}=0.021$ 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。
- ③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消波ブロックの必要質量の割増方法を示した。

- ④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、海底勾配や周期の影響についても検討を行っていく予定である。

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.