

高耐波安定性消波ブロックの開発および性能照査に関する実験的研究

安田誠宏・間瀬 肇・高橋真弘*・松下紘資**・徳永誠之**

* 関西電力株式会社

** 日建工学株式会社

要 旨

種々の既存ブロックを対象に、単体空間占有率という観点から、耐波安定性に優れたブロックの形状について分析した。本研究で提案する高耐波安定性消波ブロックは、中心軸の両端に3本の放射状の脚を持つ形状である。水理模型実験により新型ブロックの安定数算定式を決定した。設計条件に対するブロックの所要重量について、既存の高耐波安定ブロックと比較した結果、ほぼ同じ機能を有することがわかった。加えて、新型ブロックの方が空隙率が大きいために、同条件での所要個数が少なく済み、経済性の面でも優れていることがわかった。

キーワード：高耐波安定性，単体空間占有率，安定数，所要重量，所要個数，経済性

1. はじめに

四方を海に囲まれている我が国において、消波ブロックは、国土保全上欠かすことのできないものであり、多くの地域で用いられている。近年の防波堤の大水深化や設計波の見直しに伴い、設計波高が大きくなり、消波ブロックの大型化が進んでいる。このような条件下においては、一般的によく用いられる放射型のブロックでは、所要重量が100tを超えるようなものが必要となる場合がある。しかしながら、大重量のブロックは、製造や設置時の安全面を考えるといくつかの課題があるため、所要重量を軽減できる耐波安定性に優れたブロックの開発が望まれる。

本研究では、種々の既存ブロックの分析を行うとともに、「単体空間占有率」というブロックの安定性の傾向を計るための特性値を用いて、ブロック相互のかみ合わせ効果が大きく、耐波安定性に優れたブロック形状の検討を行う。さらに、水理模型実験により新型ブロックの安定数算定式を決定し、消波工としての耐波安定性および経済性を評価する。

2. 既存ブロックの分析

2.1 既存ブロックの種類・分類

我が国および世界の消波ブロックの種類は様々で、

我が国だけでもその種類は100を超えている。これまで、多様な用途に応じて様々なブロックが開発されてきたが、それらを形状毎に大別したものをTable 1に示す。放射型、中空型、有脚軸型（軸がありその両端に脚部を持つ形状、もしくは軸がありその両端に加え軸部にも脚部を持つ形状）の3種類に分類した。なお、表中のブロック図は、代表的なものを任意にピックアップして掲載したものである（日本消波根固ブロック協会, 2009）。

2.2 各種数値と耐波安定性との関係

消波ブロックには、空隙率や K_D 値といった、各ブロック固有の数値が存在する。 K_D 値とは、その値が大きいほどブロックの安定性が高いとされる定数であり、詳しくは後述する。これらの数値は、ある決められた方法で同じ条件の下に算出されたものではなく、そのほとんどが各開発メーカーが独自に実験を行って算出したものであり、当然、その方法や条件は異なっている。まず、これらの値から傾向を見出すことを試みた。また本研究では、Fig.1に示すような、対象とするブロックの最大の縦 L 、横 B 、高さ H の長さの直方体のうち、ブロック体積の占める割合を単体空間占有率と定義し、同じ条件の下に表される特性値として検討に加えた。

Table 1. Type of wave absorbing blocks

radiation type				hollow type	axis having leg type					
										
No.1	No.2	No.4	No.5		No.13	No.14	No.17	No.18	No.19	No.20
										
No.7	No.9	No.10	No.11	No.12	No.21	No.22	No.24			

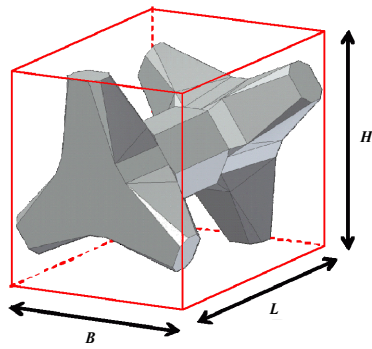
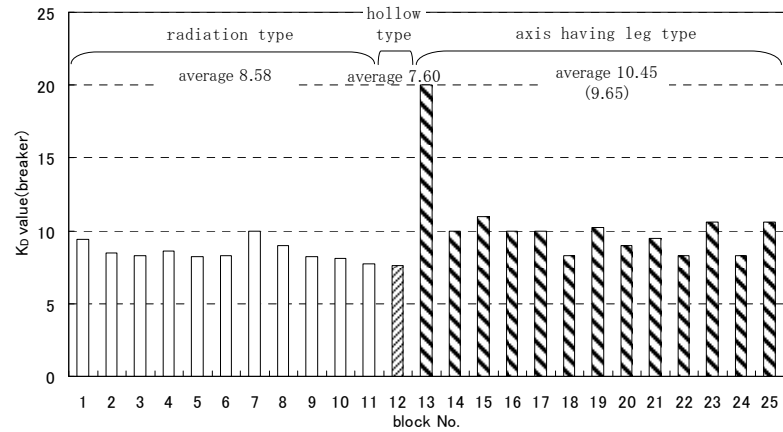


Fig.1 Occupancy space of unit block

Fig.2 Relationship between block type and K_D

ブロック形状の種類と K_D 値の関係をFig.2に示す。ここでは25種類のブロックを対象とした。放射型や中空型に比べ、有脚軸型の方がブロック相互のかみ合いが期待でき、安定性が高いことは周知であるが、図に示すようにそれぞれの形状における K_D 値の平均は、放射型8.58、中空型7.60、有脚軸型10.45となっており、やはり有脚軸型は安定性が高い傾向にあることがわかる。有脚軸型のブロックNo.13が突出して K_D 値が大きい、たとえこのブロックを除外したとしても、有脚軸型の平均値は9.65であり、他の種類よりも安定である。

Fig.3は、横軸に単体空間占有率をとり、左縦軸を K_D 値、右縦軸を脚数として、有脚軸型の値をプロットしたものである。消波ブロックは、端となる部材が先細り形状であるほど相互がかみ合い、安定性が高い傾向があるようである。例えば、放射型をみると、脚の太さが付根と先でほとんど変わらないNo.10および11のブロックの K_D 値はそれぞれ、8.1、7.7であるが、脚が先細り形状であるNo.1および2の K_D 値はそれぞれ、9.44、8.3であり、前者よりも K_D 値は大きい。有脚軸型も同様であり、No.18よりもNo.13や14の方が K_D 値は大きい。

部材が細長くなるほど単体空間占有率は小さくなるが、Fig.3左縦軸の K_D 値との関係を見ると、単体空間占有率が約15%と非常に小さいブロックの K_D 値はとても大きい、25%以上になると K_D 値に顕著な差はみられなくなる。次に、右縦軸の端部の脚数との

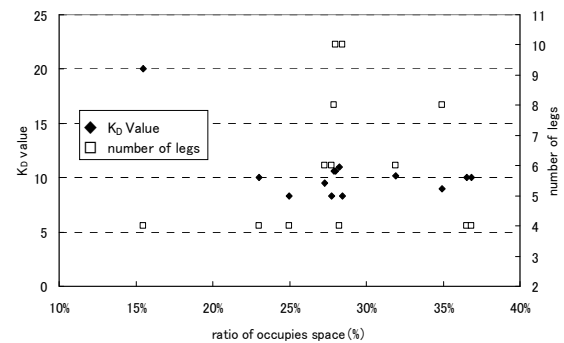
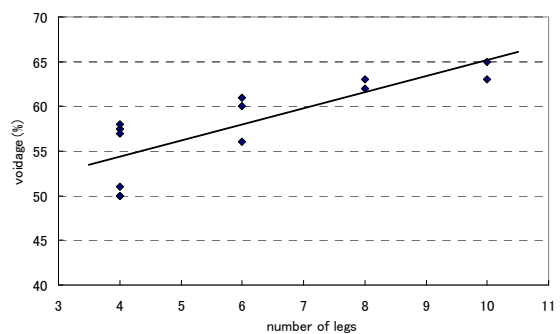
Fig.3 Relationship between occupancy space of unit block and K_D 

Fig.4 Relationship between number of block legs and voidage

関係に着目してみると、脚数と単体空間占有率に有意な関係は見出せなかった。さらに、 K_D 値と脚数にも目立った相関はなかった。

その他の様々な比較の中で傾向の現れたものとして、有脚軸型の脚数と乱積空隙率の関係をFig.4に示す。乱積空隙率は、その値が大きいほどブロック所要個数が少なくなり、コスト縮減や省資源化に繋がるので、経済性の評価において参考になる。図をみると、脚数が増えるほど、乱積空隙率は大きくなる傾向にあることがわかる。

3. 水理模型実験の方法および条件

3.1 新型ブロックの形状

前章の分析結果から得られた知見に加えて、施工性等の要求事項を考慮して、新型ブロックの形状を決定した。

プロトタイプはPhoto 1(a)に示すような有脚軸型で、両端の脚の数はそれぞれ3本である(3-3型ブロック)。さらに比較対象として、Photo 1(b)に示すような軸の両端脚数2本の形状も考案した(2-2型ブロック)。

上記2種類の新型ブロックについて水理模型実験を実施し、耐波安定性および経済性の評価を行った。

3.2 実験方法および条件

実験水路は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの長さ50m、幅1m、深さ1.5mの2次元造波水路を用いた。水路の一端には、反射波吸収型不規則波造波装置が設置されている。実験断面は、Fig.5に示すような勾配のない平坦な水平床地形上に、5～6層程度、乱積形式でブロック模型を設置した。中詰材は、ブロックと同程度の空隙となるように自然石を設置した。模型縮尺は1/50であり、プロトタイプの3-3型ブロックは12t型と16t型の2種類、2-2型ブロックは12t型である。模型のコンクリート比重は 2.3g/cm^3 、のり面勾配は1:1.5とした。

大水深を想定して、マウンド法先水深が50cm、ブロック被覆の法先水深が45cmとなるようにし、波が模型堤体に作用するまで碎波しないような波浪条件にした。作用波浪は、Table 2に示すような、沖波波形勾配が0.02～0.04となる不規則波で、スペクトル形はBretschneider-光易型スペクトルを有する。実験では波数Nが2000波まで行い、Photo 2に示すように、500波、1000波および2000波造波後にそれぞれブロックの移動個数をカウントした。

4. 耐波安定性検討実験結果

4.1 安定数算定方法

被覆石および被覆消波ブロック、消波ブロックの所要重量 M の算定にあたっては、Hudson式が用いられる。

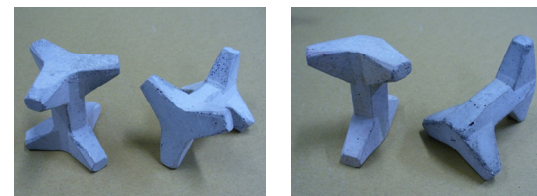


Photo 1. Shape of proposed block

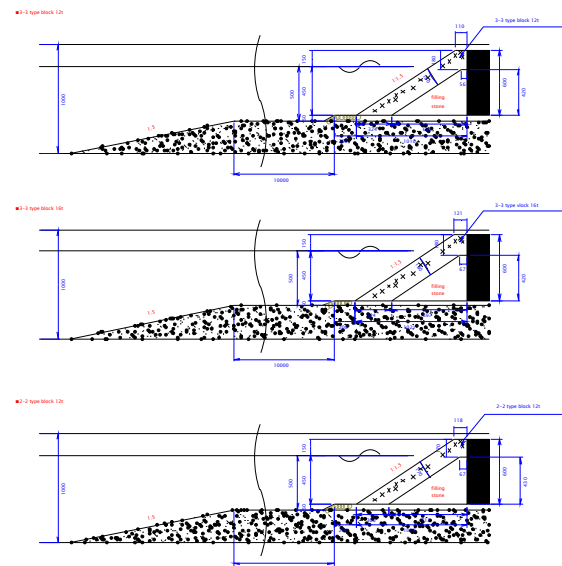


Fig.5 Cross sections of model experiments

Table 2. Experimental conditions

CASE	Wave Steepness H/L	Offshore Wave Height(cm) $(H_{1/3})_0$	Sig. Wave Height(cm) $H_{1/3}$	Wave period(s) $(T_{1/3})_0$
CaseH20HL4	0.04	22.83	17.63	1.7
CaseH15HL4	0.04	15.62	8.76	2.0
CaseH15HL3	0.03	13.06	12.60	2.0
CaseH15HL2	0.02	13.88	8.73	1.7
CaseH10HL4	0.04	10.29	8.69	1.3
CaseH10HL2	0.02	10.11	8.96	1.3

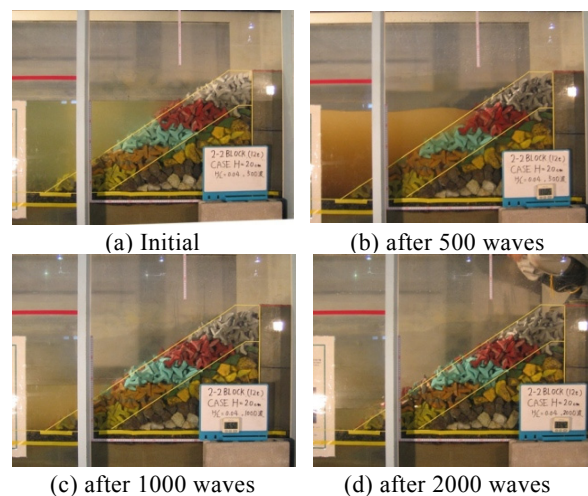


Photo 2. Cross sectional view of blocks movement

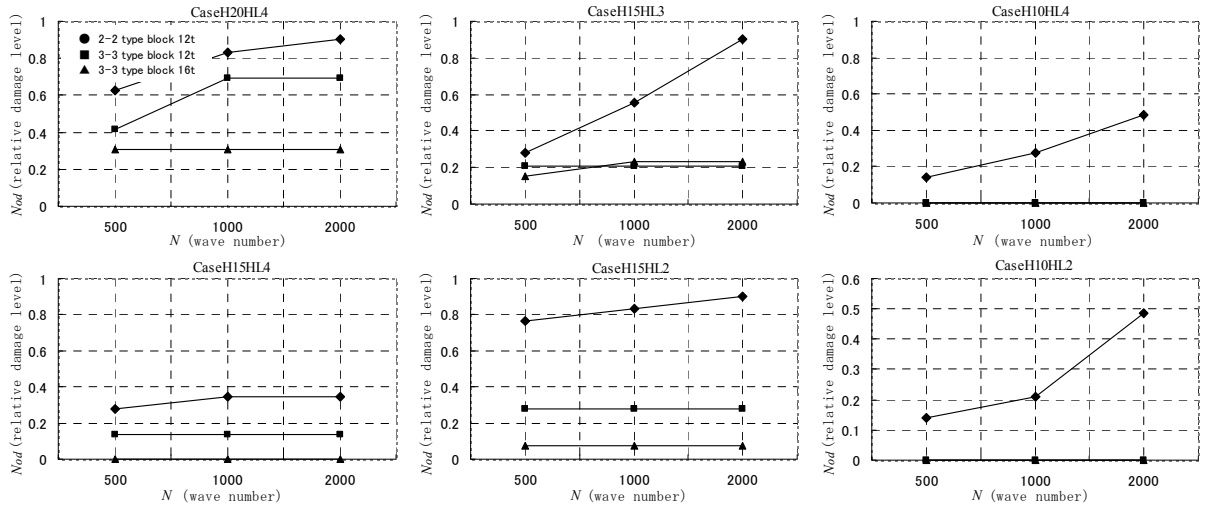


Fig.6 Relationship between wave number N and damage rate N_{od}

$$M = \frac{\rho_r \cdot H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (2)$$

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

ここで、 H は波高（不規則波の場合には有義波高を用いる）、 ρ_r は被覆石あるいはブロックの密度、 S_r は被覆石あるいはブロックの水に対する比重、 K_D は主として被覆材の形状および被害率等によって決まる定数、 α は被覆法面が水平面となす角、 N_s は被覆材の形状、勾配や被害率等によって決まる安定数である。式(1)は、式(3)を式(2)と考えることによって導かれた式である。

K_D 値を用いた式(1)は、斜面被覆材の所要質量算定式として使用実績も多い。ただし、従来、混成堤マウンドの被覆材算定式として用いられていることや、潜堤など他の施設の被覆材についても用いられていることなどから、安定数 N_s を用いた式(3)の方がより一般的な式とされている。

式(3)そのものを書き直せば、式(4)のようになる。

$$N_s = H / \left\{ (S_r - 1) (M / \rho)^{1/3} \right\} = H / (\Delta D_n) \quad (4)$$

直立壁の前面をほぼ全断面にわたって覆っている乱積み消波ブロックの安定性に関して、高橋ら(1998)は以下の式を提案している。

$$N_s = H_{1/3} / (\Delta D_n) = C_H \left\{ a (N_{od} / N^{0.5})^c + b \right\} \quad (5)$$

ここで、 N_{od} は被災度であり、防波堤法線方向の幅

D_n (=ブロックの代表径) における移動したブロックの個数を表す。また、 C_H は碎波状態を表す係数で、非碎波の場合 $C_H=1.0$ 、碎波の場合 $C_H=1.4 / (H_{1/20} / H_{1/3})$ である。 a および b はブロックの形状や斜面勾配によって定まる係数である。

式(5)では、被害の大きさについては、被災度 N_{od} を考慮することで取り入れられる。また消波工の変形は、高橋ら(1998)、van der Meer(1987)や鹿島ら(1993)によると、波の作用直後に大きく、時間の経過とともに落ち着く傾向があり、波の継続時間の1/2乗に近似的に比例するとされている。本研究でもそれにならない、 $N_{od}/N^{0.5}$ の形で安定数算定式へ取り込むものとした。

4.2 実験結果

波数 N と被災度 N_{od} との関係をFig.6に示す。通常、消波ブロックは初期の段階では表面のブロックが崩れやすいが、波が繰り返して作用し、ブロックが揺すられ微動を繰り返していくうちに、次第にブロック相互がかみ合い、被災度は小さくなり安定に向かう。2-2型ブロックは、波数の増加に伴って被災度も増加、または増加後一定となっていることから、こうした傾向が顕著に現れたものと考えられる。

3-3型ブロックにはこうした傾向はみられず、ほぼ一定の値を示している。このことから、3-3型ブロックは構造的にブロック相互のかみ合わせが良く、最初に積み上げた状態でもブロックが崩れにくく、安定していることがわかる。

縦軸に実験結果の波高とブロック代表径より求めた安定数 N_s を、横軸に被災度を波数の1/2乗で割った値 $N_{od}/N^{0.5}$ を取った結果をFig.7およびFig.8に示す。それぞれ3-3型ブロック、2-2型ブロックの場合の結果である。

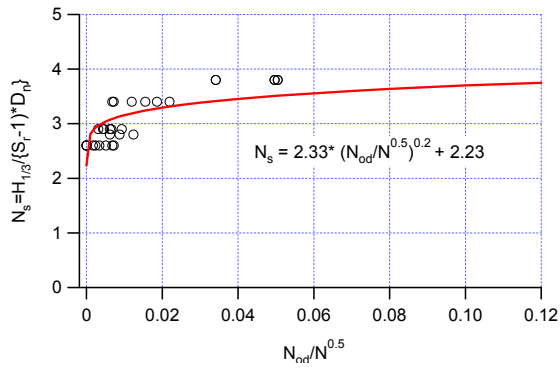


Fig.7 Relationship between stability number and damage rate for 3-3 type block

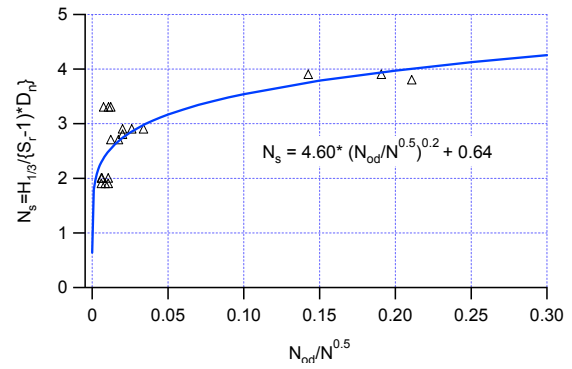


Fig.8 Relationship between stability number and damage rate for 2-2 type block

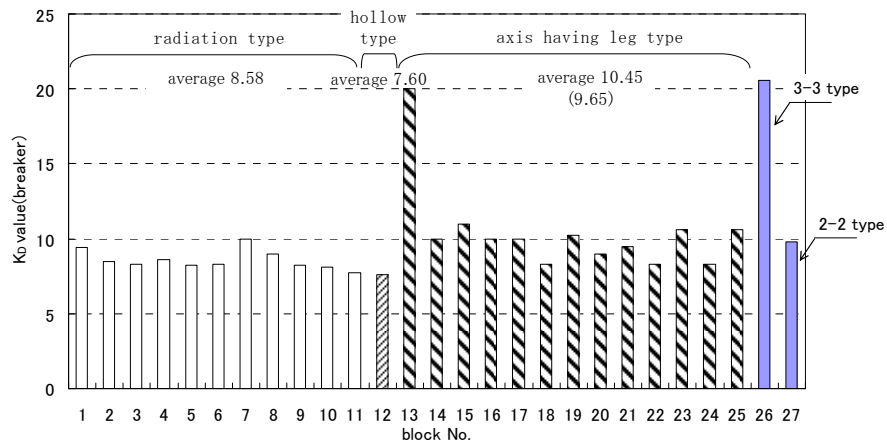


Fig.9 Relationship between block type and K_D

図中の近似曲線は、係数 c を0.20とし、係数 a および b を最小2乗法により求めたものであり、その係数および安定数算定式は以下のとおりである。

3-3型ブロック $a=2.33$, $b=2.23$

$$N_s = C_H \left\{ 2.33 \left(N_{od} / N^{0.5} \right)^{0.2} + 2.23 \right\} \quad (6)$$

2-2型ブロック $a=4.60$, $b=0.64$

$$N_s = C_H \left\{ 4.60 \left(N_{od} / N^{0.5} \right)^{0.2} + 0.64 \right\} \quad (7)$$

5. 耐波安定性および経済性の評価

5.1 所要重量による安定性評価

$C_H=1.0$ (非碎波) として、一般的な設計に用いられる被災度 $N_{od}=0.3$ 、波数 $N=1000$ の条件 (日本港湾協会, 2007) を適用して、前項で示された係数を式(6)に代入し、3-3型ブロックの安定数 N_s を求めると3.14が得られた。さらに式(2)より、 K_D 値を求めると20.6となった。同様に、式(7)と式(2)から2-2型ブロックの K_D 値を求めると、9.8となった。

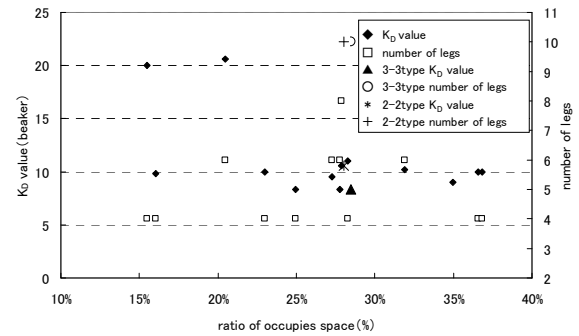


Fig.10 Relationship between cubic capacity, K_D and number of legs

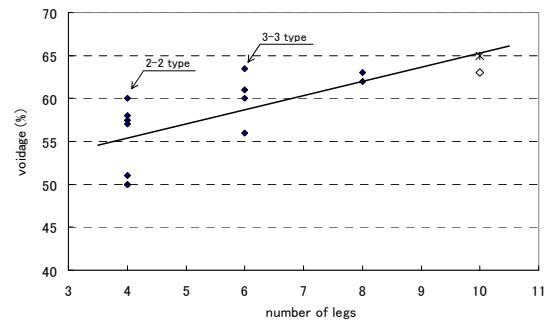


Fig.11 Relationship between number of legs and voidage

先に示したFig.2, 3および4に、3-3型ブロックと2-2型ブロックの値をプロットしたものを、Fig.9, 10および11に示す。

式(1)からわかるように、 K_D 値は、その値が大きいほど所要重量が小さくなるので、安定性が高いと判断される。Fig.2における既存の消波ブロックの中でも突出して K_D 値の大きい、No.13のブロック（以下、ブロックD）の K_D 値が20であることから、3-3型ブロックは消波ブロックの中でも最も安定性の高いものの一つであることがわかる。以下では、 K_D 値の近いブロックD（有脚軸型、脚数4、単体空間占有率15.5%、乱積空隙率57.5%）と3-3型ブロックの比較をしていく。

ρ_r を2.3、 S_r を2.23、斜面勾配を1:1.5として、式(1)より設計波高 $H_{1/3}$ に対する所要重量 $M(t)$ を比較したものをFig.12に示す。図より、3-3型ブロックの所要重量はいずれの条件においてもブロックDと同程度であり、同等の安定性を有していることがわかった。

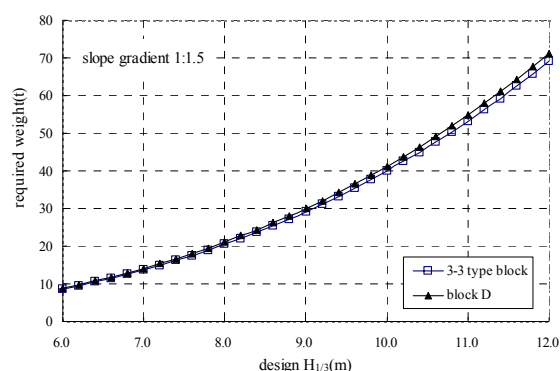


Fig.12 Required block weight against design wave height

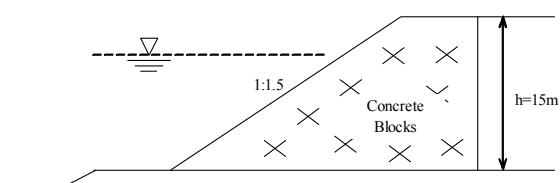


Fig.13 Cross section of model breakwater

5.2 経済性評価

消波ブロックのコストを評価するために、3-3型ブロックとブロックDの、空立米（ブロック設置容積）あたりの所要個数と、モデル防波堤を消波ブロックで被覆するとした際の所要個数を考える。ブロック規格は40t型とした。モデル防波堤の断面をFig.13に示す。天端幅は各ブロックの標準値、斜面勾配は1:1.5、水深 $h=15\text{m}$ とした。

計算結果をそれぞれFig.14および15に示す。いずれの比較においても、3-3型ブロックの所要個数はブロックDよりも少ないことがわかる。その割合は、いずれの条件においても空立米比較で0.83、モデル防波堤比較で0.76であることから、3-3型ブロックはブロックDよりも所要個数が少なく、経済性の面でも優れていることが確認された。

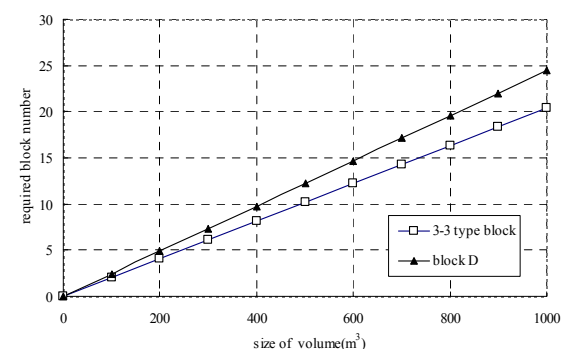


Fig.14 Required block numbers against ratio of occupies space

5.3 補修用被覆ブロックとしての有用性

消波ブロック被覆堤は、全断面に同一のブロックを設置したものが主流であるが、より経済的に施工を行うために、補修時に表層に安定性の高いブロックを用いる被覆形式も今後増えていくものと推測される。放射型のブロックNo.1 ($K_D=9.44$; Table 1およびFig.2参照)を全段面に設置した場合(安田ら, 2008)と、ブロックNo.1の表層に層厚 $2.2h$ で3-3型ブロックを設置した二層被覆形式の場合の耐波安定性を比較した。Fig.16にその結果を示す。全断面放射型ブロックの場合(破線)よりも、表層を3-3型ブロックで被覆した場合(実線)の方が、耐波安定性は非常に高いことがわかる。よって、被災した消波ブロック被覆堤を補修する場合、既存の放射型ブロックを積み

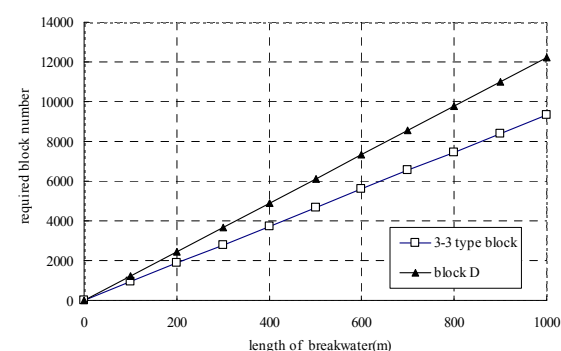


Fig.15 Required block numbers against model breakwater

増しするよりも、より安定性の高いブロックで被覆する方が、耐波安定性を格段に高めることができ、ライフサイクルコストを考えると経済的になる可能性が高い。

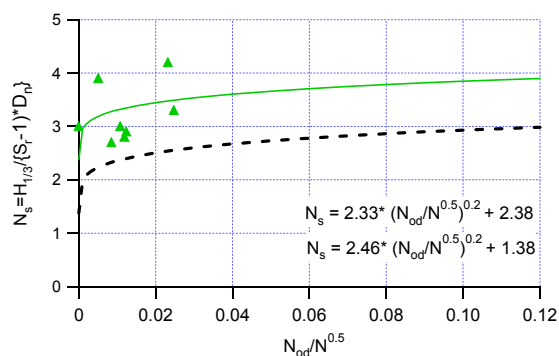


Fig.16 Comparison of stability curve between whole radiation type block No.1 and covered by 3-3 type block

6. おわりに

本研究では、既存の消波ブロックの分析から得られた知見等に基づき、耐波安定性に優れた新しい消波ブロックの開発を行い、水理模型実験を実施して安定数算定式として用いる係数を求め、耐波安定性および経済性を評価した。

その結果、有脚軸型で両端にそれぞれ3本の脚を持つブロックを考案した。また、実験結果から、既存の消波ブロックに比して、耐波安定性が非常に高いことがわかった。さらに経済性について、空立米比較およびモデル防波堤比較において、同程度の安定性を持つ従来ブロックよりも所要個数を減らすことができ、コスト縮減および省資源化に寄与することがわかった。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、現西日本旅客鉄道(株)の小西秀誉氏、関西大学の池田有希氏および西岡直樹氏をはじめ、京都大学防災研究所沿岸災害研究分野の学生諸氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 鹿島遼一, 榊山 勉, 清水琢三, 関本恒浩, 国栖広志, 京谷 修(1993): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.795-799.
- 社団法人日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説.
- 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(1998): 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 -, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp.3-32.
- 日本消波根固ブロック協会(2009): <http://www.shouha.jp/>.
- 安田誠宏, 間瀬 肇, 小西秀誉, 松下紘資, 徳永誠之(2008): 新しい消波ブロックの安定数算定実験および波形勾配と碎波の効果に関する一考察, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.519-524.
- van der Meer, J.W.(1987): Stability of breakwater armor layer design formulae, *Coastal Eng.*, Vol.11, pp.219-239.

Development and Performance Check of High Stability Wave Dissipation Block

Tomohiro YASUDA, Masahiro TAKAHASHI*, Hajime MASE,
Hiroshi MATSUSHITA** and Seishi TOKUNAGA**

* The Kansai Electronic Power Co., Inc., Japan

** Nikken Kogaku Co., Ltd., Japan

Synopsis

A new type of high stability wave dissipation block was developed by analyzing some existing blocks from the viewpoint of a volume ratio in a rectangular parallelepiped. The new high stability wave dissipation block has a shape with three legs at both ends of the axis. Hydraulic experiments were conducted to examine the block stability. The stability number formula was determined from the experiments. Required weight of present high stability block against design waves is almost the same as a typical standard high stability block due to the effective interlocking between the blocks. New high stability wave dissipation blocks are able to decrease a required number and contribute to the cost reduction since the void ratio is large.

Keywords: high stability wave dissipation block, ratio of occupies space, stability number, required block weight, required block number, cost reduction