

# 石炭灰を有効利用した消波ブロックの ライフサイクルコスト最小化設計

斉藤知秀<sup>1</sup>・内海博<sup>2</sup>・水流正人<sup>3</sup>・関本恒浩<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>正会員 工修 東北電力株式会社 土木建築部 (〒980-8550 宮城県仙台市青葉区本町1-7-1)

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

<sup>4</sup>正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

消波工断面の一部が波浪により被災したことを背景に、本研究では、部分被覆消波工の被災現象について、水理模型実験・数値解析および現地調査結果により定量的に評価し、水理模型実験により算定された安定数を設計に用いる際の波浪場評価の重要性を示した。これに基づき、消波ブロックの耐波安定性に対するライフサイクルコストを最小化することを目的として信頼性設計法を適用し、最適なブロックの体積、比重を選定した。さらに、石炭灰を大量に利用したコンクリートを使用した場合に懸念される凍害劣化現象について、凍結融解試験結果および期待被災度を反映した劣化確率評価を行い、ライフサイクルを考慮した最適配合を選定した。

**Key Words :** wave-dissipating concrete block, reliability design method, coal ash, stability number, lifetime damage estimation

## 1. はじめに

消波ブロックの設計法としては、設計有義波高に対して被害率1%程度を想定した所要重量をハドソン式から求めるという決定論的な手法がこれまで標準的に採用されていたが、近年では確率論を用いた信頼性設計法の研究<sup>1)</sup>が試みられている。信頼性設計法を適用することにより、消波工断面設計にライフサイクルコストの概念を導入することができるが、実設計への適用にあたっては、合理的な安定数の算定方法やコストの評価方法などの確立が課題とされていた。

安定数は、通常水理模型実験から求められるが、現地検証的な観点からは、十分に解明されていないのが現状である。そこで本研究では、まず消波ブロックの変形調査を実施し、数値解析・水理実験結果から現地検証を試みた。

一方、使用材料については、環境にやさしいリサイクル港湾を目指し、石炭灰を有効利用することとした。石炭灰の混合率が高いコンクリートは初期コストを低く抑えることが可能となるが、石炭灰中に含まれる未燃焼カーボンの影響により、耐凍害性に劣る場合があることが指摘されている<sup>2)</sup>。そこで、

次に石炭灰を大量に混入したコンクリートの凍結融解試験を実施し、試験結果と既往資料を基に当該地点における凍結融解による劣化現象を定量的に評価した。

最後に本研究では、耐用期間中に生じる被災復旧費(または補修費)と初期建設費の合計の期待値をライフサイクルコストとし、これらを最小化する観点から、消波ブロックの信頼性設計を適用し最適なブロックの体積・比重を選定するとともに、凍害劣化確率評価に基づく最適な配合を選定した。

## 2. 消波ブロックの被災状況

原町火力発電所(福島県原町市)港湾主防波堤には、反射波対策としてケーソンを被覆する消波ブロック(アクロポッド)が図-1のとおり、4箇所にわたり不連続に設置されており、設置後3年半を経過した段階で、ブロックの被災が確認された。

写真-1は、図-1の設置箇所のうち、N5区間の変形状況を示したものであるが、当初投入された消波ブロックのほとんどが水面下に沈み込み、一部のみが水面上に残存していることがわかる。

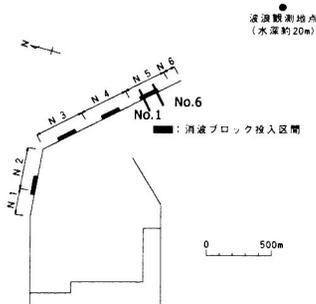


図-1 原町火力港湾平面図



写真-1 N5区間変形状況

消波ブロックが設置されている4箇所の変形状況を比較すると、防波堤先端に近いほど変形量が大きかった。これは、作用する外力の違いによるものと判断できる。

一方、期間中には設計波を越える高波浪は観測されておらず、消波工の不連続等に起因する複雑な外力条件が作用したものと想定される。

そこで各区間において、図-2のとおり断面変形調査を実施した。測線No.は防波堤基部側から先端部に向かってNo.1～No.6と定義し、代表的な断面として、N5区間の測線No.1, No.3, No.5の変形調査結果を図-3に示す。

N5区間の範囲内で比較すると、防波堤先端から最も遠い測線No.1の変形の程度が大きい。これは、波向の卓越方向(E～ESE)と主防波堤の角度より、波や流れ(3次元的な乱れによるものも含む)が主防波堤の基部へ向かう方向へ転換されることに起因すると考えられる。このため、消波ブロックが連続して平坦に設置されたところは安定性が高く、測線No.1のように背後に押さえがないところは安定性が低くなるものと考えられる。

さらに、標準断面図と変形調査結果との差分が消波ブロックの設置期間における変形の履歴であると仮定して実測被災度について検討を行った。

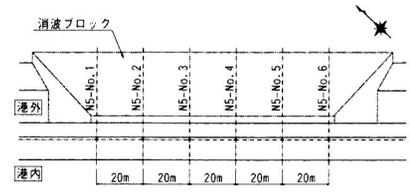
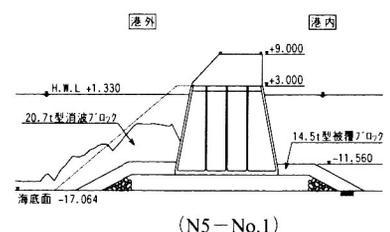
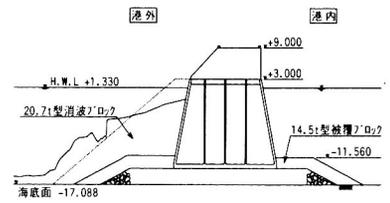


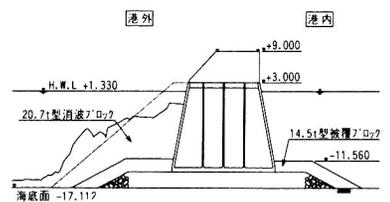
図-2 N5区間変形調査平面図



(N5-No.1)



(N5-No.3)



(N5-No.5)

図-3 N5区間変形調査断面図

ここで被災度とは、ブロックの代表径(体積の3乗根)の幅(法線方向)の断面内におけるブロックの移動個数であり、被害の程度を表す指標である。

実測被災度の算定にあたっては、防波堤基部側に位置する測線No.1とそれ以外の測線No.2～6(標準部)の2断面に分けて考えることにした。

N3区間における変形状況、消波ブロックの大きさ、さらに現地の海底地盤が砂層厚の薄い岩盤であることを考慮すれば、N3区間は重量不足による散乱・法尻沈下ではなく、消波ブロックがかみ合うことによる見かけ上の沈下が生じたものと判断される。

N5区間においては、見かけ上の沈下と重量不足による散乱が併発していると考えられることから、N3-No.2～5の断面を参考に消波ブロックの全断面積

に対する見かけ上の沈下の割合が等しいと仮定して、重量不足のみによる実測被災度を試算した。その結果、測線No.1の実測被災度は6.74、測線No.2~6（標準部）の実測被災度は2.61であった。

なお、消波ブロックの全断面積に対する見かけ上の沈下率は2%程度である。

### 3. 信頼性設計によるライフサイクルコスト最小化検討

信頼性設計は、耐用期間を通じた性能の変化を確率的に検討することができるため、ライフサイクルコストの最小化を図ることができる。本研究では、イニシャルコスト（初期建設費）と供用期間中のランニングコスト（被災復旧費または補修費）を加えたトータルコストをライフサイクルコストとして定義する。

今回の設計フローを図-4に示す。

まずはじめに水理模型実験から得られた消波ブロックの安定数 $N_s$ について、実測被災度と実測波浪データを用いて現地検証を実施する。次に、消波ブロックの体積・比重をパラメータとして、供用期間における期待被災度を算定し、波浪による被災復旧費を求める。また別途算定した初期建設費を加算することでライフサイクルコストを評価する。これより、

耐波安定性上ライフサイクルコストが最小となる消波ブロックの体積・比重を選定することができる。

さらに、算定された期待被災度および凍結融解試験結果から、配合条件をパラメータとして、供用期間における凍結融解劣化確率を算定し、耐凍害性の観点から補修費を求める。これについても初期建設費を加算してライフサイクルコストを評価することで、耐凍害性上ライフサイクルコストが最小となるコンクリートの配合条件を選定することができる。

#### (1) 現地被災状況を踏まえた安定数の検討

信頼性設計を実設計に導入するには、従来の $K_D$ 値に相当する安定数 $N_s$ の合理的な算定が重要である。安定数 $N_s$ は $K_D$ 値と同様、水理模型実験により求めることができるが、今回の被災状況を踏まえ、現地被災度と実測波浪データに基づく安定数をパラメータ・スタディにより求め、水理模型実験との比較検討を行った。

#### a) 水理模型実験に基づく安定数算定

高橋ら<sup>1)</sup>は本研究とは異なる種類の消波ブロック（テトラポッド）を対象とした安定数算定式について式(1)のように示し、斜面勾配 1:4/3,  $N_o=0.3$  の場合、ブロック特性値は  $a=2.32$ ,  $b=1.33$ ,  $c=0.2$ , 安定数は  $N_s=2.24$  であることを実験結果から求めている。

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \{ a(N_o / N^{0.5})^c + b \} \quad (1)$$

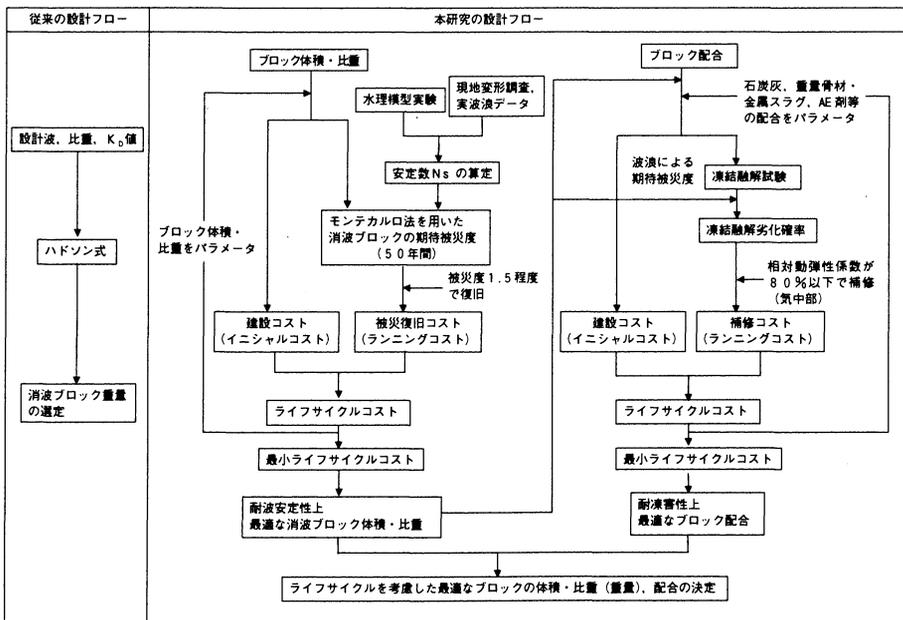


図-4 設計フロー

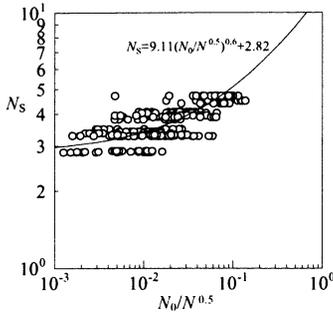


図-5 安定数と被災度の関係  
(高橋らの式)

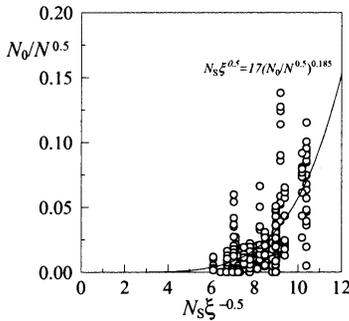


図-6 安定数と被災度の関係  
(鹿島らの式)

ここで、 $N_s$ ；安定数、 $a, b, c$ ；消波ブロックの種類（形状）や斜面勾配ごとに決まる定数、 $N_0$ ；被災度、 $N$ ；波数（1000 を標準）、 $C_H$ ；碎波効果係数（非碎波のとき 1.0）である。

本研究では、2 次元造波水路を用いた縮尺 1/50 の水理模型実験により、消波ブロックの安定数を算定した。その結果、本研究で用いたブロックの特性値は、 $a=9.11$ 、 $b=2.82$ 、 $c=0.6$  と求められ、式(1)で概ね良好に表された(図-5)。

安定数の実験値と計算値の比率は 0.993、標準偏差は 0.116 であり、被災度  $N_0$  が 0.3 のとき安定数  $N_s$  は 3.38 であった。

また、鹿島ら<sup>3)</sup>は、高橋らと同種の消波ブロックの安定数算定式について式(2)のように示し、斜面勾配 1:4/3 の場合、ブロック特性値は  $a=8.5$ 、 $b=0.16$  であることを実験結果から求めている。

$$N_s = a(N_0/N^{0.5})^b \xi^{-0.5} \quad (2)$$

ここで、 $\xi$ ；surf similarity パラメータ ( $\xi = \tan \theta / (H_i/L_o)^{1/2}$ )、 $\theta$ ；法面角度、 $H_i$ ；入射波高、 $L_o$ ；沖波

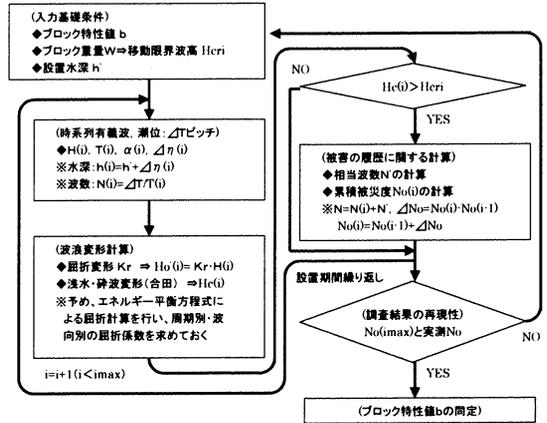


図-7 調査結果に基づく安定数  $N_s$  の推定フロー

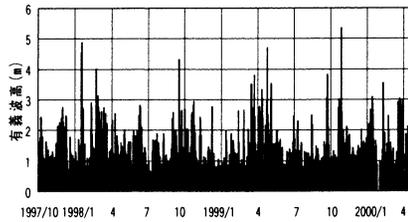


図-8 N5 区間における有義波高

波長である。

図-5 と同様に、本研究で用いた消波ブロックの特性値を算出すれば、 $a=17$ 、 $b=0.185$  と同定され、鹿島らの式についても概ね良好に表現できた(図-6)。

安定数の実験値と計算値の比率は 1.058、標準偏差は 0.157 であり、被災度  $N_0$  が 0.3 のとき安定数  $N_s$  は 3.00 であった。

以上のように、設計波に近い条件ではどちらの算定式も適用性が高いと判断できる。

#### b) 実測被災度に基づく安定数の推定

現地実測データを用いた安定数  $N_s$  の推定は、図-7 に示す高橋らの方法で行った。また、入力条件である波浪・潮位は、ブロック設置期間の実測データを用いることとし、その条件が観測ピッチである 2 時間継続すると仮定した（波数  $M$  は 7200 秒÷周期）。

沖合の波浪観測地点から堤体位置への波高換算は、エネルギー平衡方程式による計算結果から周期・波向別の屈折係数を予め算出しておき、変換された換算沖波波高から合田の浅水・碎波変形モデルにより堤体位置での進行波高を求めた(図-8)。

この外力条件に基づき、N5 区間標準部の実測被災度と等しくなる安定数をパラメータ・スタディで求

めたところ、 $N_s=1.4$  が得られた。

この同定値は、実験値と比べるとかなり小さい値である。言い換えれば、現地では、複雑な波浪場の影響により大きな変形が生じていることが想定される。

こうした現象については、これまでも指摘されているが、ここでは回折散乱波による波高増大、消波工が不連続なことによる波高増大、安定数の周期依存性による共振現象という点に着目し、以下に検討を行い、定量的な評価を行った。

## (2) 消波ブロック安定性に及ぼす影響分析

### a) 回折散乱波および消波工不連続による波高増大

(1) b) で用いたエネルギー平衡方程式による平面波浪場は屈折・浅水・碎波変形のみが扱われる。このため、回折散乱波による波高増大効果は考慮されず、また消波工が不連続なことによる波の集中効果や周辺非被覆部の反射波による波の増大効果についても考慮されていない。

そこで、上述した要因を取り入れた換算進行波を算定するために、浅水・屈折・回折・反射といった波浪変形が非線形性を考慮して計算できるブシネスク方程式<sup>4)</sup>を用いて、平面波浪場の影響を考察した。

計算領域は港湾エリアを含んだ東西方向 241 格子 × 南北方向 251 格子 (格子間隔 10m×10m) であり、計算結果の抽出点は防波堤前面の堤頭部から N4 区間を含む 35 点とした。計算に用いた波浪条件は通常波浪を想定し、有義波高 3.0m、周期 10.0s、波向 ENE、E、ESE の 3 方向、方向集中度  $S_{max}=25$  と設定した。また、防波堤沿いに消波工が不連続に設置されている現地の条件と消波工がない仮想の条件の 2 通りについて計算を行った。

ブシネスク方程式の計算結果の代表例として、波向 ESE における防波堤前面の波高分布を図-9 に示す。

本研究では、図-9 の「消波工なし」のケースとエネルギー平衡方程式による「消波工なし」のケー

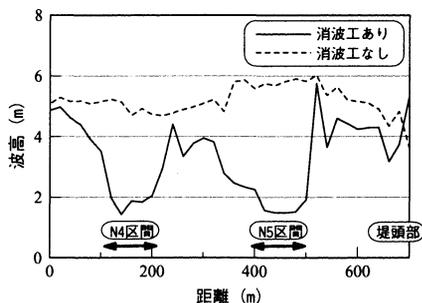


図-9 防波堤前面の波高分布 (波向 ESE)

スと比較することにより、回折散乱波による波高増大率を求め、図-9 の「消波工あり」のケースとエネルギー平衡方程式による「消波工なし」のケースと比較することにより、消波工が不連続に設置されることによる波高増大率を求めた。

具体的には、各測線における時系列データの比較値を平均化し、波向毎に整理した。

図-10 は N5 区間の各測線別における回折散乱波と消波工不連続による波の増大効果を示している。回折散乱波による波高増大率は 0~20%程度で防波堤先端部に近いほど大きい傾向を示している。消波工不連続による波高増大率は消波工の両端部で大きく、特に防波堤先端側では 40~100%の値を示している。波向別では防波堤に対して、より斜めから入射する波向 ESE の増大率が大きい。

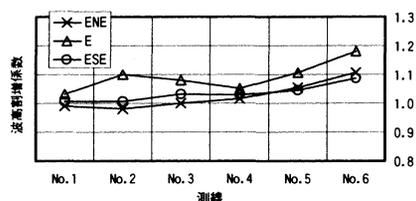
### b) 安定数の周期依存性による共振現象

Bruun and Gunbak<sup>5)</sup> や Sawaragi ら<sup>6)</sup> は、波の斜面上の up-rush と down-rush による共振現象によって、最大水粒子速度  $u_{max}$  が急激に増加し、被覆材に作用する波力が急増すると指摘している。

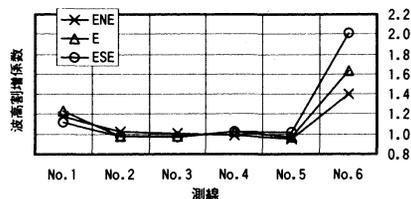
Sawaragi らは共振現象が surf similarity パラメタ  $\xi$  によって左右され、 $2 < \xi < 3$  の領域で生じていると述べている。

そこで本検討では、数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて周期依存性の検討を行った。

計算領域は、実施した水理模型実験を勘案し、水平方向に 1200m、鉛直方向に 50m とした (水平方向格子間隔:  $\Delta x=1.0m$ 、鉛直方向格子間隔:  $\Delta z=0.25m$ )。また、造波位置および堤体設置位置につ



回折散乱波による波の増大 (N5 区間)



消波工不連続による波の増大 (N5 区間)

図-10 消波工の平面配置に起因する波の増大

いても、実験と一致させた。

計算ケースは表-1 に示すように、波高と周期の影響を確認するため、通常波浪に相当する6ケースと設計波に相当する3ケースを設定した。

さらに、構造物の形状による影響について確認するため、堤体に斜面型の上部工がある場合とない場合のケースを設定した(図-11)。なお、流速の差分スキームはDONOR-0.2とし、固定面の流速・圧力の境界条件はslipとしている。

また、堤体前面に設置した消波ブロックの諸元は、榭山・今井<sup>7)</sup>に倣って消波工の空隙率を0.5で一定とし、慣性力係数 $C_M$ は1.5、抗力係数 $C_D$ は0.9とした。

計算結果として、図-12に surf similarity パラメタ $\xi$ と無次元化した斜面流速 $u_{max}/(gH)^{0.5}$ の関係を示す。

斜面の上部工の有無については、ほとんど有意な差は認められなかった。しかし、up-rushの無次元流速には明確な周期依存性が認められ、本検討においては $\xi=4$ をピークに共振現象が生じることが確認できた。 $\xi > 4$ の領域では無次元流速が $u_{max}/(gH)^{0.5} = 2.85 \xi^{-0.85}$ なる関係式で概ね表される。

Sawaragi らによると、捨石堤を対象にした実験では無次元流速のピークが1.4程度であるが、本検討では0.85程度とやや小さい値となった。これは堤体の構造や斜面勾配などの違いによるものと考えられる。

このように、up-rushの場合には、明確な周期依存性が認められ、共振現象が生じることが確認できた。

表-1 計算ケース一覧

ケース	波高 H(m)	周期 T(s)	$\xi$	上部工
case1	4.0	6.0	3.06	あり
case2	4.0	8.0	4.05	
case3	4.0	9.0	4.51	
case4	4.0	10.0	4.97	
case5	4.0	12.0	5.88	
case6	4.0	16.0	7.68	
case7	10.0	13.0	4.24	
case8	10.0	16.0	5.09	
case9	10.0	19.0	5.94	

\* H (m) は造波板位置での波高

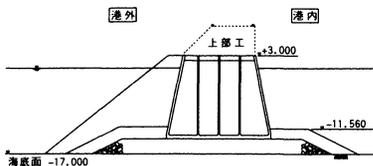


図-11 堤体モデル

### c) 消波工設置位置の平面的効果と周期依存性を考慮した安定数の推定

以上の結果から、ブロックの安定性には、回折散乱波による影響、消波工が不連続であることによる影響、および波の周期依存性が無視できないことがわかった。これより、消波工設置位置の平面的な効果および共振現象による波高増大は、エネルギー平衡方程式から換算された進行波に、それぞれ波高割増係数を乗じることで考慮することとする。

また、周期依存性については、堤体位置での波浪条件から $\xi$ を経時的に算出し、up-rushの無次元流速比率を波高比率へ換算するために二乗した値を用いて、波高割増係数を設定した。

このようにして割増された外力条件に基づき、実測被災度と等しくなる安定数をパラメタ・スタディで求めたところ、 $N_s = 3.43$  (実験値 3.38) が得られた。

以上のように、消波ブロックに関する水理模型実験結果および変形調査結果を基本とし、不足する検討を数値解析で補うことにより、消波工の不連続配置や波の周期による影響を定量的に把握し、信頼性設計への反映を可能とした。

また、測線 No.1 での顕著な変形は堤頭部と同様な発生要因であると思われるが、今回の検討では重量の割増率など定量的な評価にまでは至らず、今後の課題と考える。

### (3) 耐波安定上最適なブロックの検討

上記の結果を踏まえ、ライフサイクルを考慮した信頼性設計を行った。ここでは高橋ら<sup>1)</sup>の検討手法に倣ってモンテカルロ法を採用し、構造物の供用年数を50年間、外力となる波浪条件は沖波の極値分布に基づく高波が毎年来襲すると仮定した。

許容被災度 $N_c$ は、0.3~1.5が提案されており<sup>1)</sup>、これは従来の被害率で表すと1~5%に相当するも

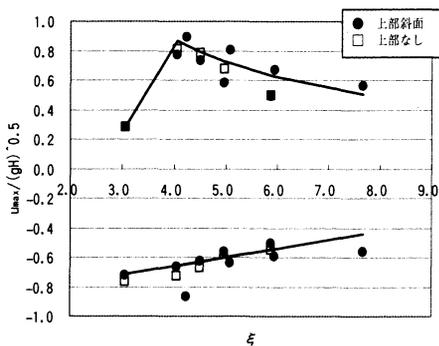


図-12 surf similarity パラメタ $\xi$ と無次元化した斜面流速の関係

のである。消波ブロック被覆式混成堤は、直立壁に作用する波力を消波ブロックによって低減させる目的で設置する場合が一般的であるが、当該地点においては反射波対策として防波堤完成後に消波ブロックが据え付けられている。そのため、消波ブロックが変形したとしてもケーソン堤の滑動・転倒安定性が損なわれることはないため、許容被災度  $N_0$  を 1.5 と大きめに設定した。計算上は累積被災度がこの許容被災度を越えた場合に消波ブロックを補充するという形で反映され、その後は累積被災度をゼロとして同様の計算を繰り返す。なお、ここで累積被災度とは、被害の履歴を考慮した被災度の累積値である。

また、本研究ではイニシャルコスト (IC) と供用年数におけるランニングコスト (RC) を加えたライフサイクルコスト (LCC) が最小となるケースを最適なブロックとして選定する。

ここで、ランニングコストの算定については、補充するブロックの製作費と据付費のみを計上することとした。これは、ブロック被災によるその他の間接的な影響は、反射波抑制を目的とした消波工の場合、無視しようと判断したためである。

具体的には、図-13 のような波浪を 5000 パターン作成し、それぞれの波浪条件について、図-14 のような被災状況が計算される。この被災状況を平均化することで、供用年数の期待被災個数が求まることとなる。

また本研究は、低比重である石炭灰を配合したブロックを対象としたことから、比重 2.3 の場合の他に、石炭灰の混合比率が高い場合を想定し比重 2.1 の場合についても検討を行った。

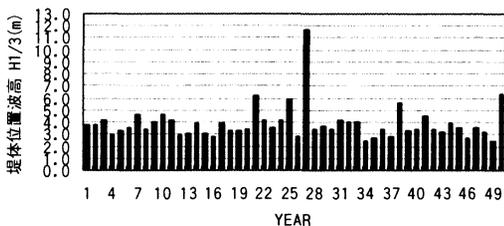


図-13 波浪条件の一例

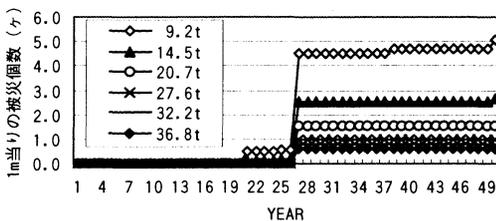


図-14 (図-13)の条件下の被災例

図-15、図-16 から、ブロックの体積や比重により、ランニングコスト (RC) が大きく変化することがわかる。イニシャルコスト (IC) については、本ケースの場合、陸上からの据付けがすべてのブロックで可能であるため、ブロックの大きさにより大きな変化は見られなかった。

これより、ライフサイクルコスト (LCC) を比較すれば、比重 2.3、12m<sup>3</sup>級 (27.6 t) のブロックがコストミナムとなる (従来設計; 比重 2.3、9m<sup>3</sup>級、20.7 t)。

#### (4) 耐凍害性上最適なブロックの設計

次に、上述の体積と比重を満足する最適な配合条件を選定する。検討にあたっては、石炭灰、重量骨材、A E 剤等の配合をパラメタとした。ここで、石炭灰を大量に利用したコンクリートは、初期コスト低減のメリットはあるものの、耐凍害性に劣ることがあるため、凍結融解試験を実施し、当該地点における劣化確率を算定し、消波ブロックのライフサイクルを考慮した合理的な配合設計を実施した。

##### a) 使用材料および試験ケース

配合試験における使用材料および凍結融解試験ケースを表-2 に示す。配合は、細骨材代替とした石炭灰とセメントの混練物に金属スラグや重量碎石を混入し、比重を 2.3 に改善したものである。

表-2 中の「海水練り」とは、硬化促進作用を有

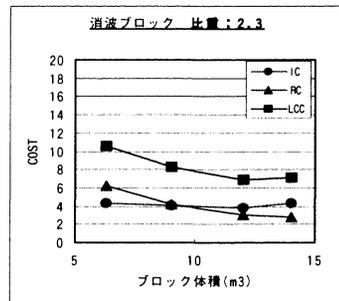


図-15 経済性比較 (比重 2.3)

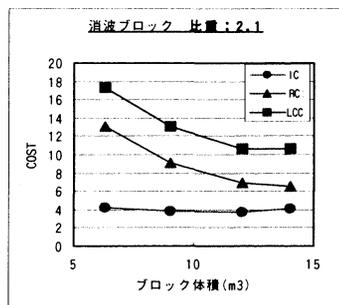


図-16 経済性比較 (比重 2.1)

表-2 使用材料および試験ケース

配合ケース		水粉体比 W/(C+F) (%)	セメント添加率 C/(C+F) (%)	水W (kg/m <sup>3</sup> )	セメントC (kg/m <sup>3</sup> )	石炭灰F (kg/m <sup>3</sup> )	銅スラグS (kg/m <sup>3</sup> )	重量碎石G (kg/m <sup>3</sup> )	硬化促進剤 NaCl (kg/m <sup>3</sup> )	AE剤 (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)
ケース1	海水練り	32.0	22.3	237	165	575	1,380 (0.40 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	—	7.8	1.04	6.8
ケース2	普通水練り	31.0	40.0	241	311	466	1,380 (0.40 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	—	0	0.62	6.6
ケース3	普通水練り	31.0	40.0	241	311	466	1,380 (0.40 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	—	0	1.09	13.2
ケース4	普通水練り	31.0	39.0	227	286	447	—	1,341 (0.45 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0	0.73	5.0
ケース5	普通水練り	31.0	39.0	227	286	447	—	1,341 (0.45 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0	1.03	7.8

(配合強度24N/mm<sup>2</sup>)

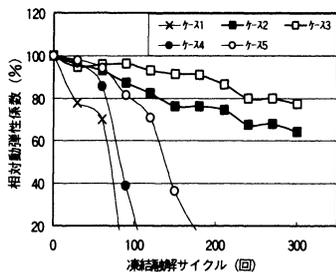


図-17 凍結融解試験結果

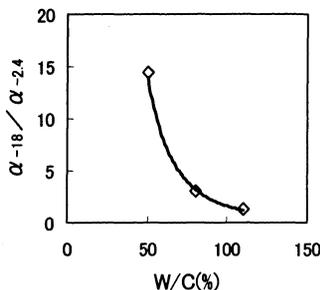


図-18 水セメント比と相対動弾性係数低下率の関係

表-3 期待被災度を考慮した凍結融解劣化確率

	相対動弾性係数が80%に低下するまでの年数 (n)	50年間に凍結融解により劣化する確率 (D)
ケース2 (銅スラグ:AE剤少)	32年	36%
ケース3 (銅スラグ:AE剤多)	49年	0%
ケース4 (重量骨材:AE剤少)	16年	100%
ケース5 (重量骨材:AE剤多)	24年	77%

する並塩 (NaCl) を混和剤として使用したことを示す。凍結融解抵抗性の改善を目的とした空気泡の連行には、フライアッシュ用の AE 剤 (主成分: 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体) を使用した。また凍結融解試験は、土木学会基準 (JSCE-G501) に則り実施し、相対動弾性係数、質量減少率を測定した。

b) 試験結果および考察

凍結融解サイクルによる相対動弾性係数の変化を図-17 に示す。

ケース1 (海水練り) とケース2 (普通水練り) を比較すれば、同程度の空気量にもかかわらず、ケース1の方が凍結融解抵抗性が低下していることがわかる。

これは、海水の硬化促進作用により、ケース1はケース2に比べてセメント量を少なく、石炭灰量を多く混入することが可能となり、この石炭灰量の違いから、コンクリート中の気泡組織に相違が生じ、ケース1はコンクリート中に安定した空気を確保することが困難となったことが原因として考えられる。

また、同じ普通水を使用した場合でも、ケース2~3 (銅スラグ; 比重 3.45) とケース4~5 (重量碎石; 比重 2.98) を比較すれば、銅スラグの方が効果があることがわかる。銅スラグと比較して、重量碎石のケースが凍結融解抵抗性に劣る理由としては、重量碎石の比重が銅スラグよりは小さく、コ

ンクリートとしての単位体積重量を確保するために骨材を多く混入しなければならないことにより、エントレインドエアーを確保するペースト成分が少なくなったためであると考えられる。

c) 期待被災度を考慮した凍結融解劣化確率の検討

耐凍害性に関する要求性能としては、コンクリート標準示方書 (維持管理編) に則り、相対動弾性係数80%以上とし、これ以下に低下する年数を試験結果から算出した。

凍結融解試験は、土木学会基準 (JSCE-G501-1986) に準拠し、-18~+5℃ (コンクリート供試体中心部温度) の温度サイクルで実施した。

しかし、極寒ではないが凍結融解作用を受ける可能性のある環境条件への適用を検討する場合、上記試験結果は過剰な配合になる可能性がある。

野本ら<sup>8)</sup>は、最低温度が高いほど凍結融解による劣化程度が緩和される傾向にあることについて、実験的に調べ回帰式を導き出している。

当該地点での凍結融解に影響を及ぼす日最低気温の平均値は-2.4℃であることから、これらの回帰式をもとに、相対動弾性係数の低下率の緩和を考慮し、相対動弾性係数が80%に低下するまでの年数を算定した (図-18, 表-3)。なお、図-18において、 $\alpha_{-18}$  は最低気温が-18℃の場合の相対動弾性係数の低下率 (低下勾配) を、 $\alpha_{-2.4}$  は最低気温が-2.4℃の場合の相対動弾性係数の低下率 (低下勾配) を示す。

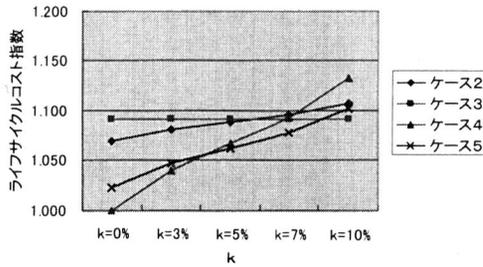


図-19 ライフサイクルコスト比較

さらに、凍結融解による劣化は、気中部に設置されたブロックのみが危険性を有するとした上で、当該地点における消波ブロックの安定性に関する信頼性設計により算出された期待被災度を用いて、供用年数(50年間)における凍結融解による劣化確率(相対動弾性係数が被災前に80%未満に低下)を求めた(表-3)。

本研究においては、凍結融解による劣化は気中部に設置されている消波ブロックに限定したため、凍害劣化が供用年間に発生する確率を求めるためには、波浪による被災により気中から水中に移動する確率を考慮する必要がある。既に算定された比重2.3、 $12\text{m}^3$ 級(27.6t)のブロックの期待被災度より、供用期間にすべて同確率で2回の被災があるとすれば、凍結融解劣化確率 $D$ は式(3)、(4)、(5)により算出される。

$$D = D_1 + D_2 \quad (3)$$

$$D_1 = \sum_{i=1}^{49-n} (i) / \sum_{i=1}^{49} (i) \quad (4)$$

$$D_2 = \begin{cases} \left\{ n \times (n+1) - \beta + \sum_{i=49-2n}^{48-n} (i) \right\} / \sum_{i=1}^{49} (i), & (n < 25) \\ \left\{ \sum_{i=1}^{48-n} (i) + \sum_{i=1}^{49-n} (i) \right\} / \sum_{i=1}^{49} (i), & (25 \leq n) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{ここで、} \beta = \begin{cases} \sum_{i=1}^j (i), & \{j = 2n - (49 - n) > 0\} \\ 0, & \{j = 2n - (49 - n) < 0\} \end{cases}$$

なお、 $D$ ；50年間に1回は凍結融解劣化する確率、 $D_1$ ；1回目の被災前に凍害劣化する確率、 $D_2$ ；1回目または2回目の被災以降に凍害劣化する確率、 $n$ ；相対動弾性係数が80%に低下する年数である。また、ケース4については供用年間に複数回の劣化が生じることがあるため、これを考慮した値に割増

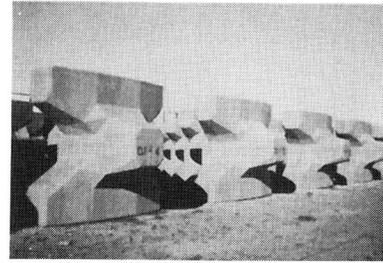


写真-2 製造後の消波ブロック

表-4 従来設計法とのコスト比較

	重量	IC	RC	TC
従来の設計(普通コン)	20.7 t	1.00	1.05	2.05
今回の設計(石炭灰)	27.6 t	0.83	0.68	1.51

を行い、補修コストの算出に反映させた。

#### d) 配合決定におけるライフサイクルコスト最小化

配合の決定にあたっては、設置されている防波堤断面における消波ブロックのライフサイクルコスト(単位奥行き)を指標とし、式(6)により評価した。

$$Z = AB(1+kD) \quad (6)$$

ここで、 $Z$ ；ライフサイクルコスト、 $A$ ；ブロック1個あたりの工事費、 $B$ ；断面全体のブロックの個数、 $k$ ；断面全体に対する気中部のブロック個数の割合、 $D$ ；凍結融解劣化確率を表す。また、式(6)におけるライフサイクルコスト $Z$ は、初期建設費と供用期間における凍害劣化による補修費を合算したものである。

さらに、ケース4による配合の場合のインシヤルコストを基準として指数比較を行った(図-19)。図-19から、気中部の消波ブロック個数の割合 $k$ が多くなるに従い、耐凍害性に弱いケース4の補修費が増加していることがわかる。当該地点においては、 $k=5\%$ 程度であるので、ケース5の配合がコストミナムとなる。

以上の結果から、耐波安定性および耐凍害性を考慮したライフサイクルコストが最小となる消波ブロックは、比重2.3、 $9\text{m}^3$ 級(20.7t)で普通コンクリートを使用したものであり、ここでは、この消波ブロックを用いた場合の

次に、ハドソン式に基づく従来設計とのコスト比較を表-4に示す。

従来設計による消波ブロックは、比重2.3、 $9\text{m}^3$ 級(20.7t)で普通コンクリートを使用したものであり、ここでは、この消波ブロックを用いた場合の

イニシャルコストを基準として指数比較を行った。

また、従来設計におけるランニングコストの算定には、波浪による被災復旧費のみを考慮し（比重 2.3, 9m<sup>3</sup>級の期待被災度）、凍害劣化による補修費は考慮していない。一方、信頼性設計におけるランニングコストの算定には、比重 2.3, 12m<sup>3</sup>級（27.6t）の消波ブロックにおける波浪による被災復旧費に加え、凍害劣化による補修費を考慮した。

これより、本研究での設計は、従来設計（普通コン）に比較し、イニシャルコスト（IC）で 17%、供用年数（50 年間）のライフサイクルコスト（LCC）で 26%のコストダウンが図られた。

#### 4. おわりに

本研究により、得られた成果は以下のとおりである。

- ・ 数値波動水路を用いた解析およびブシネスク方程式による平面波浪場の解析を実施することにより、設計波級の高波浪が来襲していないにも関わらず比較的著しい変形が生じた理由として、消波ブロックの安定性には、消波工配置の平面効果や波の周期依存性が無視できないことを明らかにした。
- ・ 現地調査、水理模型実験、数値解析により、回折散乱波、消波工不連続配置および波の周期依存性に起因する波高増大の影響を評価し、水理模型実験により算定された安定数を設計に用いる際の波浪場評価の重要性を定量的に示した。
- ・ 石炭灰を有効利用した消波ブロックに要求される性能である耐波安定性および耐凍害性を満足する最適な消波ブロックの選定に際し、ライフサイクルコスト最小化を指標とした信頼性設計法を適用するとともに合理的な配合設計へ反映させ、現地への適用を図った。

#### 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, 第一報-, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp.3-32, 1998.
- 2) 日本建築学会 フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案)・同解説, pp. 21-22, 1999.
- 3) 鹿島遼一, 榊山勉, 清水琢三, 関本恒浩, 国栖広志, 京谷修: 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, 海岸論文集, 第40巻, pp.795-799, 1993.
- 4) 金山進, 清水琢三, 磯部雅彦: ブシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸論文集, 第41巻, pp.61-65, 1994.
- 5) Bruun, P. and Gunbak, A.R.: Hydraulic and friction parameters affecting the stability of rubble mounds, *PIANC Bull.*, 24 pp.33-46, 1976.
- 6) Sawaragi, T., Iwata, K. and Ryu, C.: Consideration of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to the resonance phenomenon, 8<sup>th</sup> *Int. Harbor Congress*, pp.3.197-3.208, 1983.
- 7) 榊山勉, 今井澄雄: 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸論文集, 第43巻, pp.696-700, 1996.
- 8) 野本高憲, 江川頭一郎, 野口博章, 山下英俊: 最低気温が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1015-1020, 1992.

(2003.2.19 受付)

## THE OPTIMUM DESIGN CONSIDERING THE LIFE CYCLE COSTS OF WAVE DISSIPATING BLOCKS MADE OF COAL ASH

Tomohide SAITO, Hiroshi UTSUMI, Masahito TSURU  
and Tsunehiro SEKIMOTO

In order to perform the optimum design considering the life cycle costs of wave-dissipating blocks which are made of coal ash, the following two topics were discussed in this study.

One is the reliability analysis for the optimum design on the stability against the waves. The field investigation, the numerical simulation and the hydraulic model test were conducted in order to evaluate the stability number of the blocks. The other is the probabilistic design of the concrete-blocks for the durability against the freezing. The freezing and thawing tests were conducted and the relative elastic coefficient were estimated in order to evaluate the life cycle costs.