

消波ブロックへの信頼性設計法の適用

氏家久芳*・奥野敏彦**・鈴木 誠***・稲田 裕****

1. はじめに

消波ブロックを用いた傾斜堤を設計する場合には、その形状、寸法の他に、消波ブロックの所要重量を決定する必要がある。消波ブロックの重量は、設計外力（設計波高）やブロックの安定性を考慮して、所定の安全性を満たすように決められる。設計波高は、過去の台風や低気圧の通過に伴って防波堤設置地点に来襲した高波の統計資料から算出される。一方、ブロックの安定性は、水理模型実験によるばらつきの大きいデータを基に、損傷率と作用波高の関係から一義的に求められる。したがって、作用波高やブロックの安定性の評価には多分に確率的な要素が含まれ、その評価の精度が問題となる。また、傾斜堤の供用期間には、設計波高を越えるような高波によりブロックが損傷を受ける場合も少なくない。

そこで、本研究では「供用期間中にある程度の損傷を許容し、損傷を受けた場合に補修する」というライフタイムを考慮した設計法について検討を行なうこととした。この場合、消波ブロックの重量をパラメータとし、ブロック据付に要する直接的な工事費に加え、供用期間中のブロックの損傷確率と、それに伴う補修費が推定できれば、損傷を許容した新設計法の提案が可能となる。本手法により、安全性のみならず経済性も考慮した設計の最適化を図ることができると考えられる。

本論文では、ブロックの損傷確率の評価に基づき経済性を考慮する信頼性設計法を提案し、実際の防波堤への適用を行ない設計法の有効性を示す。

2. 信頼性設計法の概要

(1) 従来設計法とその問題点

従来の海岸構造物の設計法では、対象海域の波浪データについて統計処理を行ない、供用期間を考慮した再現期間に対応する設計波浪を決定し、この設計波浪に対して耐えうるように構造物の諸元を設計している。消波ブ

ロックの所要重量はハドソン式を用いて算出される。ここで、ハドソン式は次のように表わされる。

$$W' = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot \theta} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 W' ：消波ブロックの最小重量 (t)、 H ：設計波高 (m)、 γ_r ：ブロックの空中単位体積重量 (t/m³)、 S_s ：ブロックの海水に対する比重、 θ ：斜面が水平面となす角度 (°) である。 K_D はブロックの安定性を表わす指数で、波高、周期そして被害率に従って定められる。被害率 n はブロックの移動個数の割合

$$n = \frac{n_d}{N} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ただし、 N は最大遡上高を考慮した検査区間を含む総ブロック数（有効ブロック数）、 n_d はブロック 1 個長以上移動したブロックの累積数である。

設計波高を越えるような波浪条件による損傷を防ぐために、従来の設計法では安全率を設定するが、安全率および再現期間などの設定法は明確に定義されていない。したがって、十分な安全性を保証するために、経済的に不利となる可能性がある。そこで信頼性設計法を適用し、損傷とその補修を考慮した設計を行なえば、安全性と経済性の両者を保証した最適化を図ることができるが、従来の設計法ではこのような評価の基準は見られない。防波堤設計の最適化に対する信頼性設計法の適用は、Nielsen ら (1984) や鹿島ら (1989) により行なわれているが、変数の変動性の扱いなど問題点も少なくない。

さて、ブロックの重量の決定にハドソン式を適用するには、適切な設計波高と K_D 値を用いることが重要である。 K_D 値は、従来の設計法による場合、水理実験結果から被害率が 1% から 5% の間に相当する適当な定数として定められる。しかし、実際には K_D 値には未だ不確定な要素が多く、状況に応じて水理実験を行なう必要がある。また、実験により得られる K_D 値はブロックの被害率に対してばらつきを持ち、確定量ではなく確率変量として扱うことが望ましい。

一方、防波堤のような海岸構造物の場合、設計波高の決定は非常に重要である。ある地点における波高は、変

* 正会員 東北電力(株)電力技術研究所土木研究室長

** 正会員 東北電力(株)電力技術研究所

*** 正会員 工博 (株)大崎総合研究所

**** 正会員 工修 (株)大崎総合研究所

動性を持つ確率変数であり、 K_D 値と同様に、波高の変動性を考慮した設計を行なう必要がある。また、従来の設計法では得られた波浪統計の結果はある再現期間に対する期待値として用いられるのみであるが、極値波高の分布関数自体を用いればより詳細な損傷の評価を行なうことができる。また、 K_D 値と波高の両変数の変動性を考慮した設計法は、これまで提案されていない。

(2) 損傷確率の計算

本設計法では、 K_D 値と波高の2つの変数の変動性を考慮してブロックが損傷を受ける確率を評価する。消波ブロックの補修は1年に1度行なうものと仮定し、1年当たりのブロックの損傷の大きさを評価し、必要となる維持・補修費を計算する。また、損傷は毎年最大の波高により生じるとしてモデル化する。したがって、年最大波高 H とブロックの安定性 K_D 値を確率変数として表わし、ハドソン式に含まれる他の変数は確定値とみなすと、防波堤の破壊の条件を表わす性能関数は次のように定義される。

$$g(H, K_D) = W - \frac{\gamma H^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot \theta} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 W はブロックの実重量を表わす。性能関数が負、すなわち $g(H, K_D) < 0$ となると、防波堤に損傷が生じることになる。ここでは、1次ガウス近似法を用いて損傷の生起確率を計算する。収束計算により求められた安全性指標 β の値から、損傷確率 P_f が次のように求められる。ただし、 Φ は標準正規確率分布関数である。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad \dots\dots (4)$$

(3) 期待総費用を用いた評価手法

期待総費用 E_T は、想定する供用期間 k 年間に必要と予想される費用の合計と定義する。この値は、初期建設費を C_I 、1年間に予想される維持・補修費を E_M とすると、

$$E_T = C_I + k \times E_M \quad \dots\dots (5)$$

となる。また、1年当たりの維持・補修費は、1年間に受ける損傷の大きさから、ブロックの費用、および撤去・据付を含む設置費等を考慮して決められる。損傷の大きさは、全ブロック数のうち損傷を受けるブロック数の割合、すなわち損傷割合として定義する。予想される1年当たりの損傷割合 R_d (%) は、 $n\%$ の被害率が表わす損傷の大きさ r_n (%) (通

常は $r_n = n$ 、詳しくは後に述べる) と、その損傷を受ける確率 P_d の積を合計し、

$$R_d = \sum_{j=1}^m r_j \times P_{d_j}, \quad \dots\dots (6)$$

と表わされる。

ここで、 j は被害率が j (%) であることを、また、 m は考慮する最大の損傷のレベルに当たる被害率の値である。このようにして期待総費用を求める概念図を、図-1 に示す。

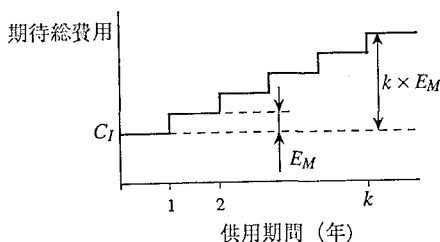


図-1 期待総費用の概念図

次に、この期待総費用を設計の指標とし、経済性を考慮して最適なブロックタイプを決定する。ブロックタイプが大きくなり重量が増加するに従って、初期建設費は増加する。一方、損傷確率は小さくなることから維持・補修費は減少する。したがって、2つの費用の合計である期待総費用は、あるブロック重量で最小値をとり、このときのブロック重量が経済性を考慮した場合の最適値となる。

3. 実際の防波堤への適用

(1) 防波堤と消波ブロックについて

検討を行なう防波堤の断面図を、図-2 に示す。防波堤は消波ブロック被覆傾斜堤であり、図中の影をつけた部分が、検討対象として損傷確率の計算を行なう消波ブロックである。以下、重量の異なるいくつかのタイプのテトラポッドを用いた場合の損傷確率の計算および経済性の検討により、最適なブロックタイプの選択を試みる。

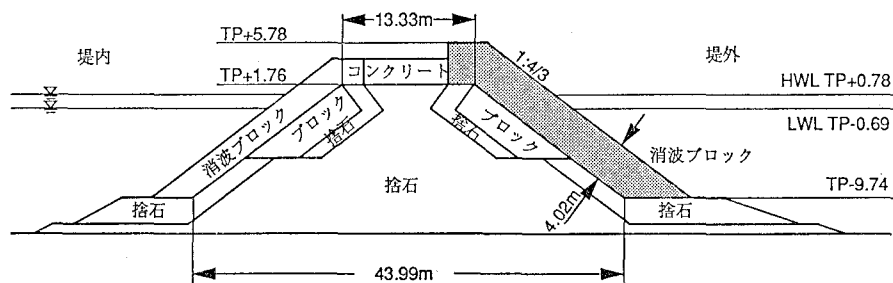


図-2 防波堤断面図

(2) ブロックの安定性実験について

K_D 値の統計解析は、消波ブロックの物理模型実験により得られた結果 (Okuno ら, 1989) を基に行なった。実験では、入射波の波高を徐々に大きくしながら作用させ、移動したブロック数を測定し被害率を求め、各被害率に対する K_D 値を求めている。実験結果からは、各被害率に対する K_D 値のばらつきが大きいこと、被害率が 5% を越えると K_D 値の変動性が小さいことがわかった。そこで、被害率が 5% を越えると K_D 値は一定値であると仮定した。

(3) 波高の観測値について

波高の統計解析では、防波堤前面海域 (水深約 15 m) に設置された超音波式波高計の波形記録を基にした有義波高に対する日最大波高を用いた。観測期間は 1980 年から約 10 年間である。図-3 に 1989 年度における日最大有義波高の変動の例を示す。対象海域の波浪の状況は比較的穏やかであり、有義波高が 2 m を越える記録はあまり多くない。また季節による変動についても、夏と冬の波高変動に大きな差は見られない。

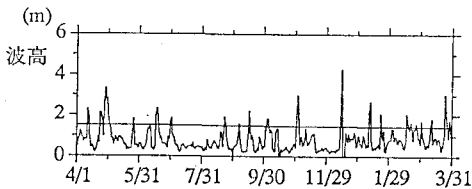


図-3 日最大波高変動 (1989)

4. 数値計算結果とその検討

(1) ブロックの安定性解析

K_D 値の評価に用いた実験の条件は、設置水深が 35 cm, テトラポッド重量が $W=118.9\text{ g}$, $\gamma_r=2.3$, $S_s=2.23$, $\cot\theta=1.33$ である。各被害率に対する K_D 値の分布は正規分布と仮定し、その平均と分散を推定する。実験で得られた K_D 値の平均値について、被害率に対

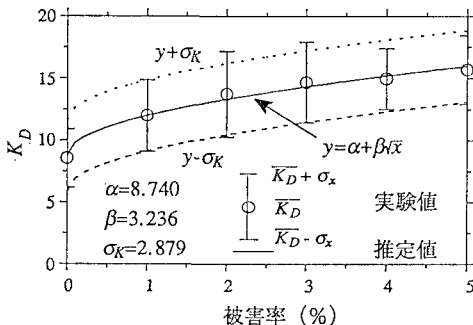


図-4 K_D 値の推定値と実験値の比較

して最小二乗法を用いた線形回帰を行なった。被害率 n に対して、 K_D 値の平均値に関する推定値 μ_K は、

$$\mu_K = 8.740 + 3.236 \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、各被害率 n に対する分散 $\sigma_{x=n}$ の変動はあまり大きくないことから、各被害率における K_D 値の分散の大きさは被害率にかかわらず一定値 σ_K であると仮定し、

$$\sigma_K = \sqrt{\sum_{j=1}^5 \sigma_{x=j}^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

とした。このようにして得られた K_D 値の推定値の分布と実験値の分布の比較を図-4に示す。

(2) 波高統計解析

波高の統計解析手法に関する研究は数多く発表されているが、実際の設計を目的とした統計解析では、用いるデータの選択等が適切に行なわれているとは限らない。ここでは、合田が提案した手法 (1989) を基に極値波高の確率分布を求める。

a) 極大値波高分布の推定 防波堤の損傷確率は、年最大波高の分布に基づいて求めることから、波高記録のうち 1 年間の最大波高を選び出し、その確率分布を推定することができればよい。しかし、与えられた観測値における年最大値資料としては約 10 個のデータしか得られず、十分な信頼性のある推定を行なうことができない。そこでここでは、まず、高波 1 時系列の記録から得た最大値をデータとして波高極大値の分布を求め、さらにそれを用いて年最大波高の分布を推定する。日最大波高変動のデータから、図-3 に実線で示した 1.5 m を超える波高データについて、天気図を参照し発生要因ごとの極大値を選び出しデータの独立性を保証する。得られた波高の極大値の頻度分布図は図-5に示ようになる。

分布関数の推定は、波浪の極値解析に適していると考えられている FT-I 型分布 (Gumbel 分布) とワイブル分布を用いて行なった。2 つの分布関数はそれぞれ次のように表わされる。

FT-I 型分布：

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left\{ -\frac{x-B}{A} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

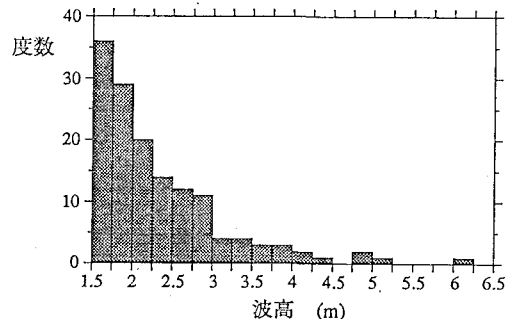


図-5 極大値波高の頻度分布

表-1 分布関数の推定

分布関数	A	B	r
FT-I 型	0.756	1.278	0.997
ワイブル (k=0.75)	0.465	1.415	0.991
(k=1.0)	0.829	1.030	0.999
(k=1.4)	1.421	0.438	0.984
(k=2.0)	2.300	0.430	0.984

ワイブル分布：

$$F(x)=\exp\left[-\left(\frac{B-x}{A}\right)^k\right] \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 x は極値を表す確率変量、 $F(x)$ は x の分布関数、また、定数 A, B および k は、それぞれ尺度母数、位置母数および形状母数である。これらの分布関数に対して、最小二乗法を用いて母数 A, B を求め、確率分布を推定した。ただし、ワイブル分布に関しては形状母数 k を 4 種類に固定し、残された母数を推定した。それぞれの分布関数に対する母数と相関係数を表-1 に示す。この結果から極大値波高の分布としては、相関係数の大きい $k=1.0$ のワイブル分布または FT-I 型分布が適していると推定される。2つの 確率分布について、図-6 に確率密度関数を比較する。

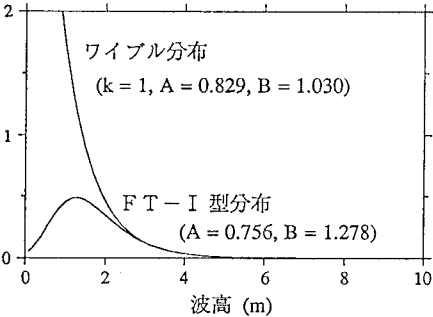


図-6 極大値波高の確率密度関数の比較

b) 年最大波高分布の推定 波高の極大値の発生回数がポアソン分布に従うものと仮定し、上で求められた極大値の分布関数を $F^*(x)$ とおき、年最大値の分布関数 $F(x)$ を $F^*(x)$ を用いて表わすと、

$$F(x)=\exp[-\lambda\{1-F^*(x)\}] \dots\dots\dots(11)$$

となる。ただし、 λ は極大値波高の年間の平均発生回数である。2つの極大値波高の分布関数に対する年最大波高の確率密度関数は、

FT-I 型分布：

$$f(x)=\frac{\lambda}{A} \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right) \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right\} \times \exp\left(-\lambda\left[1-\exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right\}\right]\right) \dots\dots\dots(12)$$

ワイブル分布 ($k=1.0$):

$$f(x)=\frac{\lambda}{A} \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right) \exp\left\{-\lambda \exp\left(\frac{x-B}{A}\right)\right\} \dots\dots\dots(13)$$

となる。図-7 に、2つの確率密度関数の比較を示す。この図より、年最大波高の確率密度関数は FT-I 型による結果の方がややピークの値が大きいが、全体としてはほぼ同じ傾向を示すことがわかる。

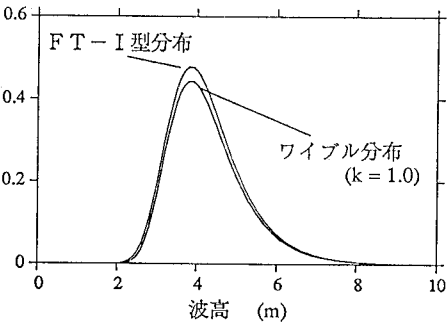


図-7 年最大波高の確率分布の比較

(3) 損傷確率の計算

式(3)の性能関数に、図-2 で示した対象防波堤における値 ($\gamma_r=2.3, S_g=2.23, \cos \theta=1.33$) を代入し、被害率とその被害を受ける損傷確率の関係を求めた結果を図-8 に示す。ただし、図-7 における2つの波高分布関数の差はあまり損傷確率に影響を及ぼさなかった。ここでは代表として FT-I 型に基づいて得られた波高分布を用いた結果を示した。

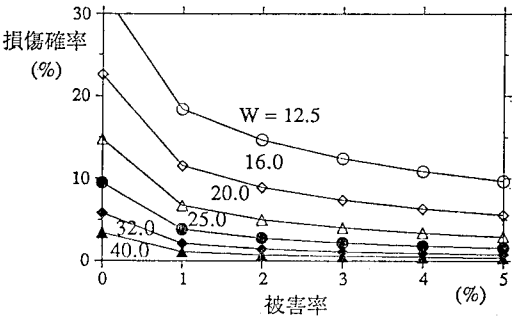


図-8 ブロックタイプによる損傷確率の比較

図中の被害率 $j\%$ に相当する損傷確率 p_j は、被害率が $j\%$ を超過する確率を表わす。したがって、 $j\%$ のブロックだけが損傷を受ける確率 P_j は

$$P_j=p_j-p_{j+1} \dots\dots\dots(14)$$

である。また、実験結果において被害率が 5% を越える範囲では K_D 値がほぼ一定となっていることから、被害率が 5% 以上になるとすべてのブロックが離脱してしまうものと仮定し、被害率 5% に対する損傷の割合

は 100% とした。したがって、 $j\%$ の被害率が表わす損傷の大きさ r_j は、

$$r_j = \begin{cases} j & (j=1, 2, 3, 4) \\ 100 & (j=5) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

となる。そして、1年間に受ける予想される損傷割合 $R_d(\%)$ は、式(6)より次のように表わされる。

$$R_d = \sum_{j=1}^4 j \times (p_j - p_{j+1}) + 100 \times p_5 \dots\dots\dots (16)$$

(4) 期待総費用の評価と最適ブロックの決定

a) 初期建設費、維持・補修費の計算 建設費および補修費は工事記録を参照し、簡単のためテトラポッドブロックの費用とその設置費をすべて含めてブロック重量 1 ton 当たり 1 万円と仮定した。したがって、対象とするブロック全体の重量が $W_A(t)$ であるとする、初期建設費 C_I は次のように表わされる。

$$C_I = W_A \text{ (万円)} \dots\dots\dots (16)$$

また、1年当りに予想される維持・補修費 E_M は、1年間の損傷割合 R_d を用いて次のように表わされる。

$$E_M = W_A \times R_d \text{ (万円)} \dots\dots\dots (18)$$

b) 期待総費用の評価 設計の指標となる期待総費用は、初期建設費とある供用期間を想定したときの維持・補修費の合計である。ここでは、単位長さ (15m) 当たりの初期建設費と維持・補修費を計算する。供用期間にともなう期待総費用の変化を、各ブロックタイプごとに比較したものを図-9に示す。小さなブロックタイプは供用期間が短い場合には期待総費用が少ないが、供用期間の増加にともなう期待総費用の増加の割合は大きい。そして、供用期間が長くなるにしたがって相対的に大きなブロックタイプの方が経済的に有利となる。

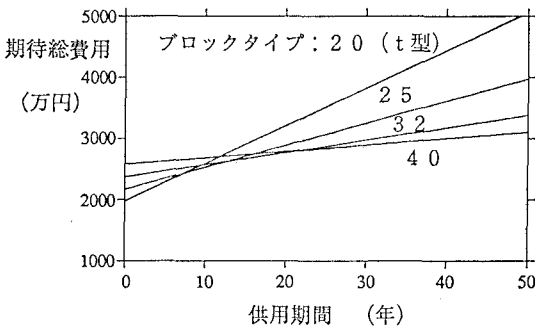


図-9 供用期間にともなう期待総費用の変化

c) 最適ブロックタイプの評価 本手法を用いて最適ブロックタイプを選択する場合には、まず防波堤の設置目的、諸元等から供用期間を定め、その期間における期待総費用が最小になるようなブロックタイプを最適とす

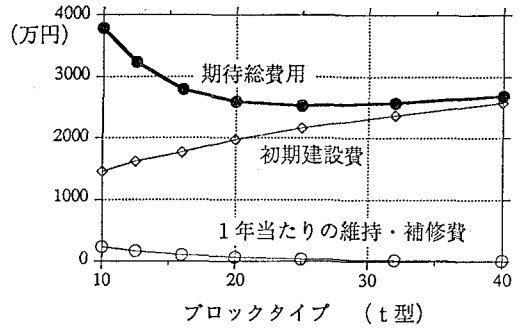


図-10 ブロックタイプによる期待総費用の比較 (供用期間 10 年の場合)

る。例として、供用期間を10年とした場合のブロックタイプの変化にともなう期待総費用の比較を 図-10 に示す。図よりこの設計例では、期待総費用が最小となる 25 t 型のブロックが、経済性を考慮した場合の最適値であると判断することができる。

5. 結 語

海岸構造物を設計する場合、作用する波高やその安定性の評価について、変動性を考慮することは重要である。また消波ブロックを用いた防波堤では、ある程度の損傷は許容し、その後補修するという考え方に基づいて設計を行なう方が経済的である。そこで、本論文では供用期間中の損傷確率と期待総費用の評価に基づいて、安全性と経済性を考慮することができる信頼性設計法を提案した。また、実際の防波堤の設計例に本手法を適用した結果、変数の変動性を考慮した最適設計が可能となることを示した。なお本論文では、波高およびブロックの安定性に関する統計処理、損傷の大きさと費用の評価について、いくつかの仮定を基に計算を行なった。今後、この設計法を実際の設計に適用する際には、これらについてより詳細な検討を行なう必要がある。

参 考 文 献

- 鹿島遼一・島田真行・山本正明・奥津一夫・今泉正次 (1988): ライフタイムコスト最小設計法—補修を考慮した防波堤の設計—, 第35回海岸工学論文集, pp. 727-731.
- 合田良実 (1989): 極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討, 港研報告, 27巻, 3号, pp. 31-92.
- Nielsen, S. R. K. and H. F. Burcharth (1984): Stochastic Design of Rubble Mound Breakwaters, Lecture Notes, Control Information Science, Vol. 59, pp. 534-544.
- Okuno, T., H. Uji-ie and M. Sawamoto (1989): Effects of Wave Grouping on the Stability of Breakwater Armour Units, Coastal Eng. Japan, Vol. 32, No. 1, pp. 69-89.