

モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度の計算

半 沢 稔*・高橋重雄**・下迫健一郎***

1. ま え が き

従来、標準的な消波ブロックの設計においては、ハドソン式 (Hudson, 1959) を用い、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算定するという、決定論的な設計法が採用されてきた。この手法は施工事例も数多くあり、実績のある方法であるが、安全率としては 1.0 に相当していると考えられ、消波ブロックが本来持っている被害のばらつきを考えた場合、従来の設計による構造がどの程度の安全度を持っているかについては不明である。

近年、港湾構造物の設計において、確率論を用いた信頼性設計の導入が試みられており、例えば、高山ら (1991, 1994)、長尾ら (1995) は混成防波堤を対象にケーソンの滑動確率の面から信頼性設計手法について検討している。また、下迫ら (1994) は、ケーソンの滑動に対してその発生確率だけではなく、滑動量の確率分布や期待滑動量の概念を取り込んだ信頼性設計への方向性を示唆している。

消波ブロックについては、十分な検討が進んでいないが、前述のように同一波浪条件に対しても被害のばらつきが大ききといった特徴を有するため、信頼性設計による経済性や信頼性の向上効果が期待されるため、早い機会の導入が考えられる。下迫らがケーソンの滑動量に対して指摘しているように、消波ブロックの場合にも被災の大きさの発生確率分布や、期待被災度が考慮できる手法が必要である。

本研究は、消波ブロック被覆堤の消波ブロックに対する信頼性設計法の導入を前提として、確率論を考慮した計算の一手法であるモンテカルロ法を用い、消波ブロックのライフタイムにおける被災度の期待値、想定した被害を超える確率等の検討を行ったものである。

2. 計 算 方 法

2.1 計算法の概要

信頼性設計は、構造物の設計過程における種々の不確定要因や、統計的な変動を考慮する設計である。港湾・海岸構造物については、外力である波浪の面からは、沖波波高の設定における統計的変動性、潮位を加味した水深の変動性、屈折、回折、浅水、碎波等の波浪変形計算過程での推定誤差等が考慮対象である。消波ブロックの設計においては、波高算定の次の段階として被害の発生確率だけではなく、被災の程度を検討する必要がある。従って、確率論的な取扱いとして、被害の変動性を考慮するのは勿論のこと、構造物のライフタイムの中での被害の進行をも考慮する必要がある。

以上を踏まえ、本計算法では消波ブロックの設計の各段階の内、①沖波波高、②潮位、③波浪変形、④被災度についての変動性および、⑤被害の進行を考慮し、構造物のライフタイムにおける累積被災度についてその確率分布と期待値等を求めている。

確率計算には、計算機の中で乱数を用いて現象を繰り返し試行し、その結果から統計処理することにより確率分布を求めるモンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法は複雑で多くの段階にわたる現象を取り扱うには適した方法 (例えば、星谷ら, 1986) とされており、現在の計算機 (パソコン) の高い能力によって十分実用性がある方法である。

2.2 具体的な計算手法

(1) 沖波波高

ライフタイムにおける沖波波高については、各年における年最大波を対象とするものとした。その沖波波高の年最大値のサンプル H_{0e} は、年毎に発生させた乱数を超過確率に対応させ、沖波の極値分布と超過確率の関係から求めるものとした。

沖波の推定値には統計的な変動性が含まれていることから、その変動性については高山らと同様に平均値 H_0 は推定値に対して、偏り α_{H0} を有し、標準偏差 σ_{H0} の正規分布に従うものとした。すなわち、

$$H_0 = (1 + \alpha_{H0}) H_{0e}, \quad \sigma_{H0} = \gamma_{H0} H_{0e} \cdots \cdots (1)$$

* 正会員 工修 株式会社テトラ応用水理研究所
 ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所耐波研究室長
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所耐波研究室

であり、 γ_{H0} は変動係数である。波浪変形計算に用いる沖波波高のサンプル値 H_{0c} は(1)式を前提に、正規乱数を利用して求めるものとした。

(2) 潮 位

潮位は低潮位と高潮位の間(潮位偏差)を正弦的に変化するものとし、 $0 \sim 2\pi$ の一様乱数から位相を決め、その位相に対応する潮位のサンプル値 η を求めるものとした。

(3) 波浪変形計算

沖波波高から堤体位置までの波浪変形計算は、合田(1975)による浅海域の波浪変形計算法を用いて到達波高 $H_{1/3e}$ を求める。沖波波高と同様に推定誤差を考慮し、平均値 $H_{1/3}$ は偏り $\alpha_{H1/3}$ を有し、標準偏差 $\sigma_{H1/3}$ の正規分布に従うものとした。すなわち、

$$H_{1/3} = (1 + \alpha_{H1/3})H_{1/3e}, \quad \sigma_{H1/3} = \gamma_{H1/3}\sigma_{H1/3e} \quad \cdots \cdots (2)$$

であり、 $\gamma_{H1/3}$ は変動係数である。

消波ブロックの安定性評価に用いる波高 $H_{1/3c}$ のサンプル値は沖波波高と同様に、正規乱数を用いて定めるものとした。

(4) 安定性評価式

前述のように消波ブロックの信頼性設計においては被害の程度や、被害の履歴が考慮できる算定式を用いる必要がある。半沢ら(1995)は以上を踏まえ、法面勾配が1:4/3のテトラポッドを対象に以下の評価式を提案している。

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = 2.32(N_0/N^{0.5})^{0.2} + 1.33 \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに $H_{1/3}$: 有義波高、 Δ : ブロックの水中比重 ($\gamma_s/\gamma_w - 1$; γ_s, γ_w : ブロックおよび水の単位体積重量)、 D_n : ブロックの代表長(体積の3乗根)、 N_0 : van der Meer(1988)による被災度、 N : 波数である。

本計算手法においては、設定された断面に対する被災度 N_0 を求めるので(3)式を変形した次式を利用する。

$$N_0 = \left(\frac{H_{1/3}/\Delta D_n - 1.33}{2.32} \right)^5 N^{0.5} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、消波ブロックの被害については、被災度の増分についてそのばらつきを考慮するものとした。谷本ら(1985)は同一波浪条件の実験を繰り返して実施し、被害のばらつきのデータを取得している。実験では6~7段階に波高ランクを変えて被害率を求めている。図-1はその実験結果を再整理し、被災度 N_0 の増分について頻度分布(確率密度)として表した例である。図中の実線は正規分布を示している。被災度の増分 ΔN_0 はおおまかに正規分布とみなすことができる。図-2は被災度の増分と標準偏差の関係を見たものであり、両者は、

$$\sigma_{\Delta N_0} = 0.36 \Delta N_0^{0.5} \quad \cdots \cdots (5)$$

の関係とみなせる。

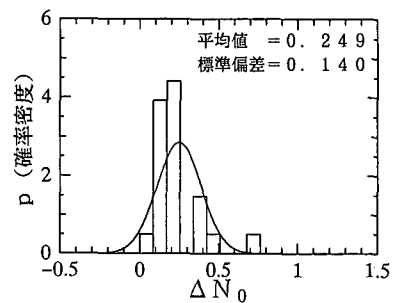


図-1 被災度の増分の確率密度

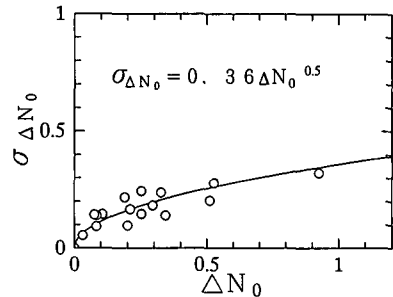


図-2 被災度の増分と標準偏差の関係

(5) 被害の履歴

消波ブロック構造では、ライフタイムを考えた場合には、何度かの大きな時化によって被害が進行していくため、本計算においては以下の方法によってこの被害の履歴を考慮するものとした。

当該年における到達波高を $H_{1/3c}(i)$ 、前年までの被災度が $N_0(i-1)$ とすると、(4)式を変形した次式、

$$N = \left(\frac{H_{1/3}/\Delta D_n - 1.33}{2.32} \right)^{-10} N_0^2 \quad \cdots \cdots (6)$$

において、 $H_{1/3} = H_{1/3c}(i)$ 、 $N_0 = N_0(i-1)$ として相当波数 $N = N'$ を求める。次に、当該年の波数 $N(i)$ を加えた $N = N' + N(i)$ と $H_{1/3c}(i)$ より(4)式で当該年の被災度 $N_0 = N_0(i)$ を求める。更に、 $\Delta N_0 = N_0(i) - N_0(i-1)$ として、前述の変動性を考慮した ΔN_0 を正規乱数により求め、それを前年までの被災度に加えて当該年までの累積被災度を求める。

(6) 計算フロー

以上がライフサイクル中のある1年に対する計算方法であり、これをライフサイクルの年数(通常50年)分繰り返すことによって、1ライフサイクルに対する最終的な被災度のサンプルが求まる。図-3に概略の計算フローを示すが、この一連の計算を繰り返して得られるデータを統計処理することによって期待被災度や、想定した被災度の発生する確率等を求めることができる。

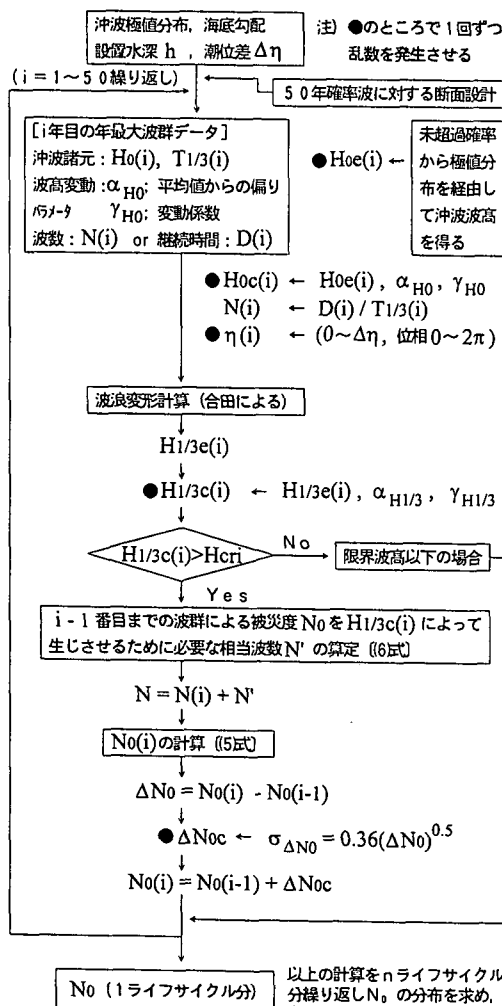


図-3 計算フローの概要

(7) 1 ライフサイクル分の計算例

図-4 は, 繰り返し計算の中からある 1 回 (50 年のライフサイクル) 分を例示したものである。この上段の図のように, 50 年間の各年の最大波 (沖波) をその極値分布から決定している。設計波である 50 年確率波は, $H_0 = 9.2 \text{ m}$, $T_{1/3} = 14.0 \text{ s}$ であり, これを超える波が 33 年目と 48 年目に発生している。中段の図は, 波の変形のばらつきを考慮した設置位置での波高であり, そこでの 50 年確率波高に対する設計波高 $H_{1/3} = 8.7 \text{ m}$ を超えるものは 33 年目に 1 回ある。下段の図は, ばらつきを考慮した消波ブロックの被害の累積を表すものであり, 33 年目に被災が大きく進行して設計被災度 $N_0 = 0.3$ を越すが, 2 年, 19 年, 48 年にも軽度の被災があり, 結果として 50 年間の被災度が 0.45 と計算される。

(8) 繰り返し計算の回数

図-5 は繰り返し計算の回数による期待被災度 N_0 と

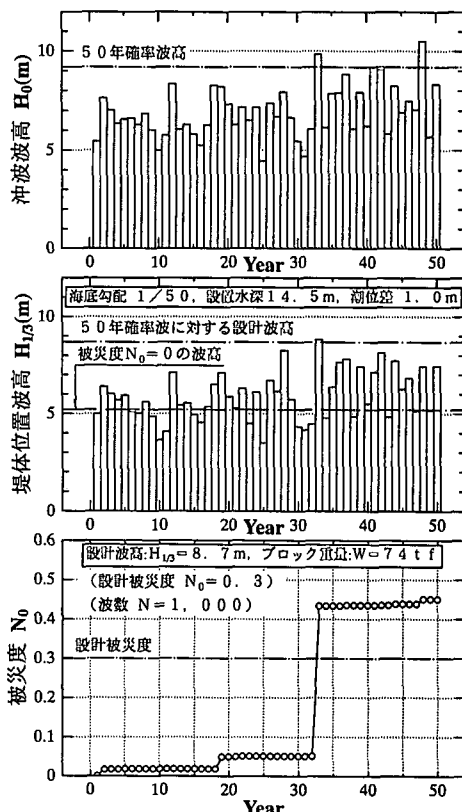


図-4 波高・被災度の履歴例

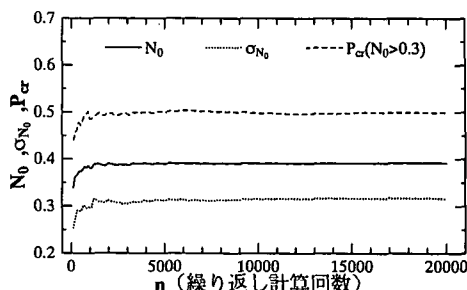


図-5 繰り返し計算の回数と統計量の変化

その標準偏差 σ_{N_0} および, N_0 が 0.3 を超える確率 P_{cr} の変化を, 図-4 で示した条件を例として示したものである。これより, 統計的に安定な結果が得られることおよび, 計算時間等の効率も考慮し, 繰り返し回数は 2000 回程度とすれば十分であると判断される。なお, 次項の計算例では統計的により安定な結果の基での検討を行うために, 繰り返し回数は 5000 回としている。

3. 期待被災度の計算例

上記計算手法に従った計算例を以下に示す。具体的な

計算条件は以下のとおりである。

- ① 沖波波高の極値分布は $k=2.0$, $A=2.23$, $B=4.78$ (50 年確率波高は $H_0=9.2$ m) のワイブル分布とする。
 なお、沖波波高および、波浪変形計算における変動性については高山らによるものを準用し、 $\alpha_{H0}=0$, $\gamma_{H0}=0.1$, $\alpha_{H1/3}=-0.13$, $\gamma_{H1/3}=0.09$ とした。
- ② 周期は、広瀬ら (1983) を参考にして、波形勾配の値が日本沿岸における高波時に一般的と考えられる 0.03 となるように定めた。(50 年確率波高に対しては 14.0 sec となる。)
- ③ 潮位は低潮位 ± 0.0 m, 高潮位 $+1.0$ m とした。
- ④ 断面設計上の被災度は $N_0=0.3$, 波数は $N=1000$ とした。(これは、従来のテトラポッドに対するハドソン式を用いた設計にほぼ対応する。)
- ⑤ 海底勾配は 1/50 と 1/10 の 2 種とした。
- ⑥ 堤体設置水深は 7, 9, 11, 13, 15 m の 5 種とした。

以上の条件に対する堤体位置での 50 年確率波高による設計波高及び、設計ブロック重量を表-1 に示す。

図-6 は 50 年分のライフタイムに対する 5000 回のサンプルについて、各ライフタイム内における到達波高の最大値 ($\max H$) を、それぞれの設計波高 H_0 で無次元化したものの期待値を示したものである。ここで、ライフタイム内での波高の最大値に着目したのは図-4 で見られるように、ライフサイクル内の被害の累積値は、波高の最大のものに左右されるからである。比率が 1.0 を下回るものが多いのは、波浪変形の計算において偏差を負の値としたためである。図-6 をみると海底勾配が 1/50 では水深の増加と共に $\max H/H_0$ の期待値は減少しているが、1/10 では設置水深 11 m 付近で最小となっている。これは、今回の条件に対して潮位差 1.0 m を加味した場合に、海底勾配が 1/50 では全て碎波域であるのに対し、1/10 ではこの水深帯が、沖波波高に対する到達波高が最大となる付近 (例えば、合田による波高算定曲線のピーク付近) に相当しており、この点が影響しているものと

表-1 設計波高およびブロック重量

ケース	1	2	3	4	5
海底勾配	1/50	1/50	1/50	1/50	1/50
設置水深 (m)	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0
堤体設置位置波高 (m)	5.57	6.64	7.59	8.34	8.81
ブロック重量 (tf)	18.7	31.8	47.6	63.0	74.3
ケース	6	7	8	9	10
海底勾配	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
設置水深 (m)	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0
堤体設置位置波高 (m)	8.16	9.41	10.18	10.31	10.13
ブロック重量 (tf)	59.0	90.5	114.5	118.9	112.9

考えられる。

図-7 は被災度の期待値と、被災度の標準偏差を示したものである。期待値は設計上の設定値 $N_0=0.3$ より大きいのが、これは図-4 で見たように、ライフサイクルの中の設計波高を超える波浪の出現の可能性および、被害の累積の効果が本手法において的確に考慮されているためである。また、条件によって設定した断面の安全度に違いがあること、また、計算条件内では期待値は設定値の 2 倍程度以下であることもわかる。被災度の変化傾向をみるとおおまかには図-6 の傾向と類似しており、設計波高に対する波高比率の大きい所で期待被災度も大きいという合理的な結果と考えられる。

図-7 には、1/50 勾配について重量を 1.1 倍、1.2 倍とした場合の計算結果も示しているが、水深の小さい所において重量を適宜割増すことにより、大きい水深での通常の計算重量とした場合と同レベルの期待被災度とできることがわかる。つまり、期待被災度を同レベルとした

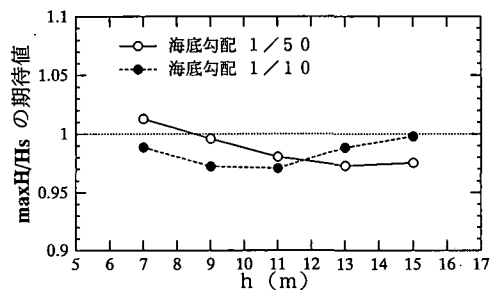


図-6 $\max H/H_0$ の期待値

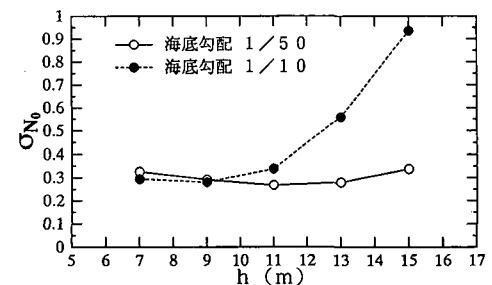
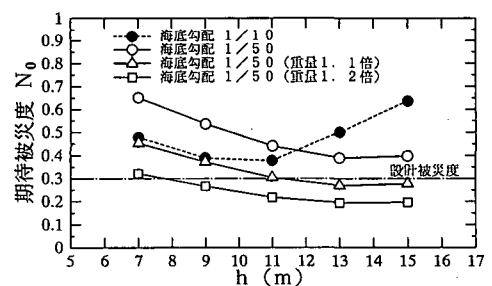


図-7 期待被災度および被災度の標準偏差

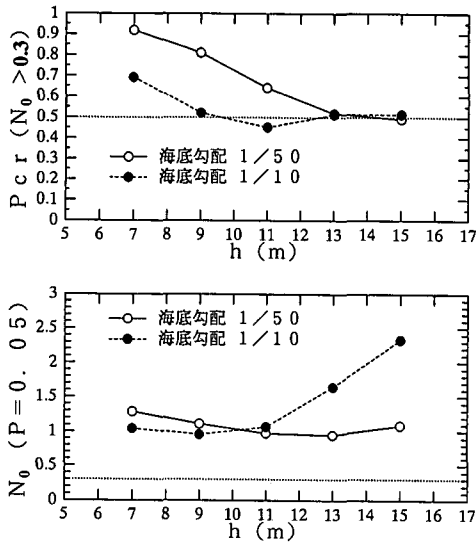


図-8 各種統計値

設計とするためには、条件によって設計重量が変わる可能性のあることがわかる。

標準偏差をみると、海底勾配が1/50ではその値は水深によらずほぼ一定であるが、1/10の場合には期待値の大きい水深の深いところで標準偏差も大きくなっている。これは、別途検討したライフサイクル内の最大波高の標準偏差の傾向と同様であり、波高の変動幅の大きさが、被災度 N_0 の変動の大きさに影響しているものと考えられる。また、被災度の変動係数は今回の条件では0.5~1.4程度あり沖波や、波浪変形における値と比べてかなり大きいことがわかる。これは、図-2で見たように、被災度の変動幅が大きいという消波ブロックの本質的な特徴が本手法に正確に取り込まれているためである。

図-8は、被災度が設計上の値 $N_0=0.3$ を超える確率 P_{cr} および、5%超過の被災度 N_0 を被災度の確率分布から得た結果である。 P_{cr} を見ると、ほとんどの場合50%を超えていること、また、変化傾向はやはり波高の変化傾向に近いことがわかる。この P_{cr} はケーソンでいうと滑動の遭遇確率に相当するものと考えられ、高山ら(1991)がこの遭遇確率は水深の増加と共に減少する傾向にあることを示唆しており、設計対象の波高の違いはあるものの、本検討の結果もそれと同様の傾向と考えられる。また、5%超過の被災度は全てのケースで設定値の3倍程度以上であり、特に海底勾配1/10で深い水深の場合には8倍程度にまで及ぶことがわかる。これは、この条件で確

率分布の裾が大きく、標準偏差も大きいことと対応している。

4. おわりに

モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度等の計算手法を提案した。これにより、構造物のライフサイクルにおける被災度の累積値を統計的に検討することができることがわかった。また、設定した被災度と累計被災度の関係から、設計条件によって安全度に差があること、逆に、同一の安全度とするためには、設計重量を変化させる必要性のあることが示唆された。

今後は今回検討した海底勾配、水深以外の種々の設計パラメータも含めて、それらが期待被災度等に及ぼす影響を詳細に検討していき、具体的な設計手法の確立をめざして行きたいと考えている。

本研究を実施するにあたり運輸省港湾局、同省各港湾建設局ならびに、北海道開発局開発土木研究所の各位から種々御意見を頂いた。また、埼玉大学建設工学科教授谷本勝利博士、京都大学防災研究所教授高山知司博士、ならびに、前運輸省港湾技術研究所水工部長（現国際臨海開発研究センター）小舟浩治博士からは貴重な御助言を賜った、ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 合田良實 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 756-760.
- 谷本勝利・原中祐人・山峯一雄 (1985): 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察, 港研報告, 第24巻, 第2号, pp. 85-121.
- 高山知司・藤井 久 (1991): 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港研報告, 第30巻, 第4号, pp. 35-64.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可 (1994): 防波堤の信頼性設計に向けて, 港研資料, No. 785, 36 p.
- 長尾 毅・門脇陽治・寺内 潔 (1995): 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第1報) - 滑動安全性に関する検討一, 港研報告, 第34巻, 第1号, pp. 39-70.
- 半沢 稔・佐藤弘和・高山知司・高橋重雄・谷本勝利 (1995): 消波ブロックの安定性評価式に関する研究, 海岸工学論文集第42巻, pp. 886-890.
- 広瀬宗一・高橋智晴 (1983): 沿岸波浪の出現特性 (その2), 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 168-172.
- 星谷 勝・石井 清 (1986): 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 208 p.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory Investigation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- van der Meer, J. W. (1988): Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode, Proc. Conf. Breakwaters '88, pp. 71-80.