

# モンテカルロ法による混成堤マウンド被覆石の移動のシミュレーション

松本 朗\*・半沢 稔\*・高橋 重雄\*\*

近年, 港湾構造物の設計において数値計算を適用した耐波設計の導入が試みられている。本研究は混成堤マウンド被覆材について数値計算に基づく新しい設計法を検討するものであり, 被災度の定量的な照査による被覆材の性能設計を最終的な目的としている。すなわち, 数値計算による流速場を求め, モンテカルロ法によって被覆材の被災度の確率分布を求める新しい性能照査方法を検討している。本報告で提案したシミュレーションモデルは, 波の継続による被害の進行や被害の履歴などの複雑なプロセスを取り扱うことのできる実用的な手法であり, 規則波による水理実験結果との比較によってその妥当性を検証した。

## 1. ま え が き

混成防波堤の捨石マウンド被覆材は, 海域構造物においては最も重要な部分の一つであり, 古くから実験的な研究が進められている。現在では, ハドソン式(Hudson, 1959), あるいはそのより一般的な式である安定数  $N_s$  を用いたハドソン式によって設計が可能となっている(谷本ら, 1982)。しかしながら, これらの方法は実施例も多く実用的であるが, その精度など問題点も数多く指摘されている。

筆者らは, 混成堤の捨石マウンド被覆材の新しい設計法の確立をめざして研究を進めている。すなわち, 数値計算による防波堤周辺の流速場に基づく新たな質量算定手法を考えており, マウンドやケーソンの形状, マウンド上の位置あるいは波の条件の違いを的確に考慮し, 被害の進展などの詳しい性能を照査することができる性能設計法を検討している。

すでに前報(松本・高橋, 2001)では, 水理模型実験によって被覆石の被害率が波やケーソンの条件に係わらず, そこでの流速から計算されるイスパッシュ数で説明でき, その流速は, 数値波動水路(CADMAS-SURF; 磯部ら, 1999)による計算結果とよく一致していることを示している。ただし, 具体的な被害の場所や被害率あるいはその進展については, 明確にする事はできていない。

本研究は, 新しい設計法の開発の第二段階として, 数値計算による流速分布を用いて, それぞれの場所の被害の程度とその進展を表すことを目標にしている。ただし, 被覆石の被害は変動性が大きく, それを考慮できるモデルを考案している。本報告では, モンテカルロ法によるシミュレーションモデルの基本的な考え方を示し, その妥当性を規則波による水理実験結果との比較によって検証する。

なお, 今回の検討は規則波を対象にしており, 実用上重要な不規則波への適用については, 今後の検討課題と

している。ただし, 本論文で用いている規則波列の個々の波の周期と波高を適切に変化させることにより不規則波の波列をモデル化することで, 不規則波への拡張が可能であると考えられる。

## 2. 水理模型実験とCADMAS-SURFによる流速計算

前報の水理模型実験結果およびCADMAS-SURFによる流速計算結果は, 今回の解析でも用いており, その概要を以下に述べる。詳細については前報を参照されたい。

### (1) 水理模型実験

図-1に模型堤体および計測器の配置を示す。マウンド被覆石は平均的な層厚 4.0 cm の 2 層被覆とした。模型堤体は静水面上天端高  $h_c = 8.0$  cm の矩形ケーソンを基本とし, 比較のために越波を許さない高天端ケーソンおよび, 反射波を低減する開口率  $\varepsilon = 0.25$  の横スリットケーソンを用いた。St. 1~3 で流速を, St. 2, 4 で水位を測定した。流速測定点は被覆石の表面から上方へ 2 cm の位置である。

実験では水路内に設置した防波堤模型に周期  $T = 1.5$  s の規則波を作用させ, 被覆石の挙動を観察した。使用した被覆石は平均質量 19.8 g, 標準偏差 0.60 g であり, 変動係数 3.0% の極めて一様な粒径のものとした。

被覆石の初期移動は, 押し波時に吸い出されようとした法肩付近の石が, 引き波時に法先方向へ運ばれるという形で発生していた。図-2は  $h_c = 8.0$  cm の矩形ケーソンに対する入射波高とマウンドの領域毎の被災度を示し

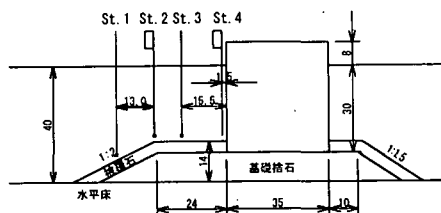


図-1 防波堤断面図 ( $h_c = 8.0$  cm の断面, 単位: cm)

\* 正会員 工修 (株)テトラ テトラ総合技術研究所

\*\* フェロー 工博 (独法)港湾空港技術研究所 統括研究官

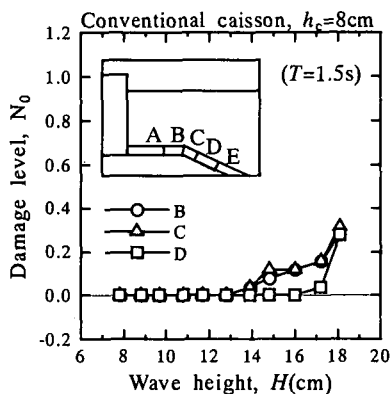


図-2 入射波高と領域毎の被災度の関係

たものである。被害は、主としてマウンド法肩近傍の領域に集中しており、隣接する部分がこれに続いている。

図-3 は法肩の冲向き水平流速に CERC の式（たとえば CERC, 1977）を適用して算定されるイスパッシュ数と被災度の関係をまとめたものである。被災度はイスパッシュ数の関数としてほぼ1本の線でまとまっており、被覆石の耐波安定性が、下記に示す CERC の式を用いてイスパッシュ数で判定できることがわかる。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^8 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $U$  は捨石上面における流速、 $g$  は重力の加速度、 $\theta$  は法面の傾斜角である。 $y$  はイスパッシュ定数と呼ばれ、定常流に対する移動限界のイスパッシュ数は、埋め込まれた石に対して 1.20、露出した石に対して 0.86 とされている。なお、式 (1) からは、流速と被覆石の質量が与えられれば作用するイスパッシュ数が計算でき、それが移動限界より小さければ移動しないことになる。

## (2) CADMAS-SURF による流速計算

図-4, 5 は  $h_c=8.0$  cm の矩形ケーソンに対するマウンド近傍における計算による水平流速の正負のピーク値

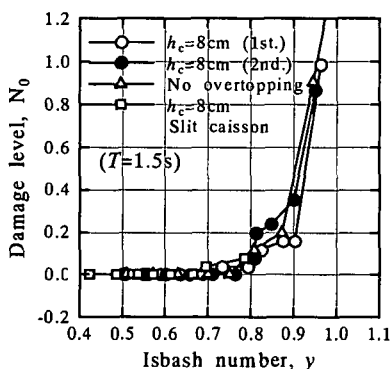


図-3 イスパッシュ数と被災度の関係

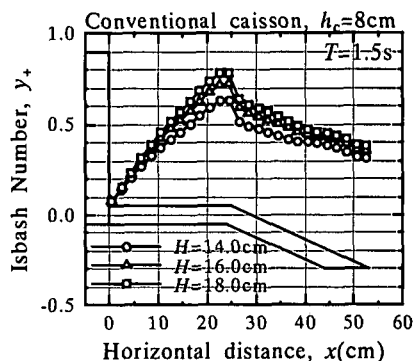


図-4 数値計算によるイスパッシュ数のピーク値の空間分布（押し波時）

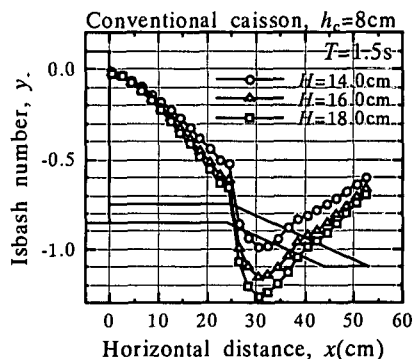


図-5 数値計算によるイスパッシュ数のピーク値の空間分布（引き波時）

を式 (1) に適用して算定される作用イスパッシュ数の空間分布を示したものである。ここで、マウンド法肩付近で天端に対する値と法面に対する値に大きな差が見られるのは、その位置でマウンド傾斜角  $\theta$  が不連続となるためである。岸向流速のピークは法肩のややケーソン側で、冲向流速のピークは法肩のやや沖側で発生し、ケーソン前面でゼロにすりつく分布となっている。このイスパッシュ数の空間的な分布形状は、先に示した被害率の場所的な差異と一致している。これらの押し波時、引き波時のイスパッシュ数の空間分布を、モンテカルロシミュレーションのデータとして用いた。

## 3. モンテカルロ法によるシミュレーション

### (1) シミュレーションの基本的考え方

前章で述べた水理実験結果および CADMAS-SURF による流速計算の結果を踏まえ、シミュレーションモデルを構築した。このモデルは、被覆石の各場所での被害率を予測するものであり、波の作用による被害の進行を予測するものである。

すなわち、捨石の質量や場所などに応じて移動限界の

イスパッシュ数を決めておき、それぞれの場所の流速から作用イスパッシュ数を計算し、それが移動限界を越した場合に、移動（被害）が発生したと考える。ただし、被覆石の質量や安定性は変動性が大きいため、被覆石の質量および移動限界イスパッシュ数の変動性を考慮した確率分布を仮定し、モンテカルロ法によって計算することによって各場所の被害の確率分布を求めている。なお、今回の検討の対象としているのは、全体の被害の期待値である。

なお、前述したように水理模型実験では、押し波によって動きやすくなった後、引き波によって動くことが多く、押し波流速に応じて移動限界イスパッシュ数を低減させている。また、被害の進行の程度を模擬するために、移動した被覆石に隣接する被覆石の移動限界イスパッシュ数を低減させている。また、法肩部分が構造上弱点となることから、その位置における移動限界イスパッシュ数を、周辺領域よりも低減させている。

## (2) 具体的なシミュレーション手順

図-6 に計算のフローチャートを示す。具体的な計算手順は以下のとおりである。

- ①計算基本条件(波の条件、構造断面、被覆石の質量(平均値と分布)、移動限界イスパッシュ数の初期値、繰返し計算回数、1回の計算における作用波数)を入力する。また、計算対象領域(被覆石の設置場所)を幅  $D_n$  ( $=v^{1/3}$ ,  $v$  は被覆石の平均体積) の格子状に分割する。
- ②CADMAS-SURF により流速場の計算を行う。
- ③正規乱数により個々のセルに対して被覆石の質量を与え移動限界イスパッシュ数を与える。
- ④法肩の特異性を考慮し、その位置における移動限界イスパッシュ数を、周辺領域よりも低減させる。
- ⑤流速分布から個々のセル上の被覆石に対する作用イスパッシュ数を計算する。
- ⑥押し波時の作用イスパッシュ数  $y_+$  に応じて移動限界イスパッシュ数  $y_{cr}$  を低減させる。
- ⑦引き波による作用イスパッシュ数  $y_-$  が移動限界イスパッシュ数  $y_{cr}$  を超える場合には当該セル上の被覆石が移動したものとす。なお、幅  $D_n$  で分割したセルの個数と表層の被覆石の個数は必ずしも一致しないため、それから定まる重み係数を考慮して移動個数の算定を行っている。
- ⑧被害の進行を模擬するために、移動した被覆石に隣接する被覆石の移動限界イスパッシュ数を低減させる
- ⑤～⑧を1回の計算における作用波数、③～⑧を計算の繰返し回数だけループさせて各場所の被災度の確率分布を計算し、期待被災度を求める。

## (3) シミュレーション方法の予備的検討

予備検討によりシミュレーション方法の基本的な特性

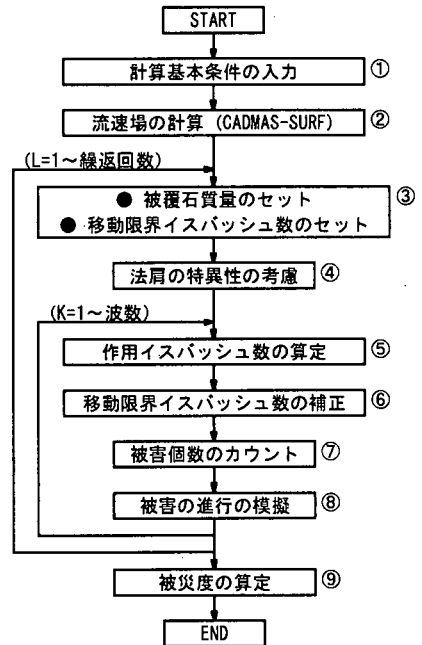


図-6 計算のフローチャート (●の箇所では乱数を発生させる)

について調べるとともに、本論文で対象とした水理実験結果を対象に、パラメータの同定を行った。その結果、以下のことがわかった。

- ①繰返し計算回数と期待被災度の関係を検討したところ、統計的に安定な結果を得るためには、繰返し計算の回数は1000回程度とすれば十分である。
  - ②移動限界イスパッシュ数の平均値  $\mu_y$  と変動係数  $\gamma_y$  が期待被災度  $N_0$  に及ぼす影響を調べたところ、当然であるが平均値の減少と変動係数の増加に伴い期待被災度が増加する。
  - ③実験による被災度と計算による被災度を比較したところ、 $\mu_y=1.85$ ,  $\gamma_y=0.17$  として計算した場合には、提案したシミュレーションモデルはほぼ実験結果を再現していることがわかった。
- さらに、紙面の関係で検討内容については述べないが移動限界イスパッシュの補正については、以下のようにすることにした。
- ④法肩近傍の被覆石については、以下の式で移動限界イスパッシュ数を補正した。

$$y_{cr}(i, j) = RS(i) \times y_{cro}(i, j) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで  $y_{cro}(i, j)$  は乱数により定まる移動限界イスパッシュ数、RS はマウンドの岸沖方向位置に応じた補正係数であり、添え字  $i, j$  は岸沖方向および防波堤延長方向の位置を表す。補正係数 RS は、試行錯誤の結

果, 以下の値を用いることとした。

$$RS(i) = \begin{cases} 0.5 & (\text{天端沖端部の被覆石}) \\ 0.7 & (\text{法面上端部の被覆石}) \cdots \cdots (3) \\ 1.0 & (\text{それら以外}) \end{cases}$$

- ⑤また, 被害の進行を模擬するために, 移動した被覆石の上下左右の4個の被覆石の移動限界イスパッシュ数を以下の式で低減させた。

$$y_{cr}(i, j) = RR \times y_{cr}(i, j) \cdots \cdots (4)$$

ただし,  $RR=0.85$  とした。

- ⑥図-7に, 押し波による移動限界イスパッシュ数の低減係数を示す。引き波に対する移動限界イスパッシュ数  $y_{cr}(i, j)$  を, 押し波のイスパッシュ数に応じた低減係数  $C$  により式(5)のように補正するものとし, 係数  $C$  を式(6)で与えた。

$$y_{cr}(i, j) = C(y_+) \times y_{cr}(i, j) \cdots \cdots (5)$$

$$C(y_+) = \max\{1 - ay_+^2, 0.5\} \cdots \cdots (6)$$

ここで  $\max\{a, b\}$  は  $a$  または  $b$  の大きな方の値を表す。式(6)中の定数  $a$  は2, 3の試行の結果0.3とした。

図-8に計算に用いた移動限界イスパッシュ数の確率密度関数  $p(y)$  および確率分布関数  $P(y)$  を示す。すでに述べたように, 定常流に対する決定論的な取り扱いでは, 移動限界イスパッシュ数は, 埋め込まれた石に対して1.20, 露出した石に対して0.86とされている。本研究で対象とした確率的な議論では, 移動限界イスパッシュ数の最適値  $\mu_y = 1.85$ ,  $\gamma_y = 0.17$  から定まる正規分布に対し

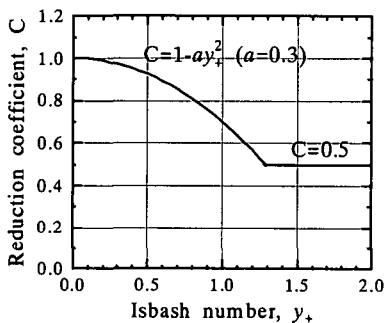


図-7 押し波による移動限界イスパッシュ数の低減係数

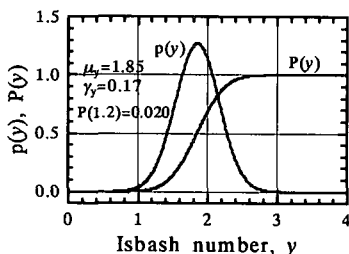


図-8 計算に用いた移動限界イスパッシュ数の確率分布

ては,  $y=1.2$  に対する未超過確率の値は非常に小さく0.020となった。この確率分布中で, 大きな  $y$  の値は実質的には被覆石の移動に無関係であるため, イスパッシュ数の分布形状を小さな  $y$  の値の未超過確率で与えることも可能であると思われるが, 詳細な検討は今後の課題としたい。

#### 4. 実験結果の再現計算

図-9は,  $h_c=8.0$  cmの矩形ケーソンに  $H=16.0$  cmの波を作用させた場合の計算による移動確率の空間分布である。実験結果(図-2)と同様に法肩近傍に被害が集中して分布しているのがわかる。

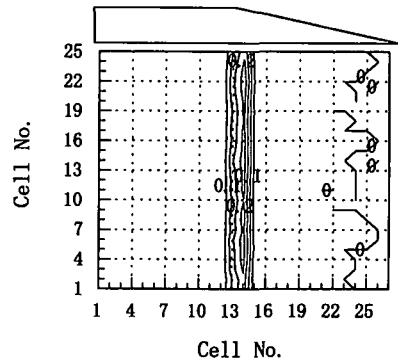


図-9 シミュレーションによる移動確率の空間分布

図-10は,  $h_c=8.0$  cmの普通ケーソンについて, 実験と計算による被災度を比較したものである。 $H=16, 17$  cmの条件で計算結果が実験結果を上回っているが, 実験結果自体もばらつきを有しており, 全体的に見れば計算結果は実験結果をよく再現している。

図-11は, 前章で述べたイスパッシュ数の補正を考慮しない場合の計算結果を示したものであり, 堤体条件は図-10に対応している。補正をした場合と比較して以下のようなことが分かる。

- ①移動した被覆石に隣接する被覆石の移動限界イスパッシュ数を低減させない場合( $RR=1.0$ )は被害が進行せず, 被災度は補正を考慮した場合の1/2程度となる。
- ②法肩の特異性を考慮しない場合( $RS=1.0$ )は, さらに被害の進展が遅くなる。
- ③押し波の影響を考慮しない場合( $C=1.0$ )も, 被害の進展は遅くなるが, 法肩の特異性を考慮しないときとほぼ同じ程度になる。

①から③の被害の進展の低下の傾向は, ほぼ補正係数に対応しており, 特に②の法肩による補正係数が0.5~1.0であり, ③の押し波の影響による補正係数が0.6~1.0と似ているために同程度となっていることが興味深い。いずれにしても, こうした事実は移動限界イ

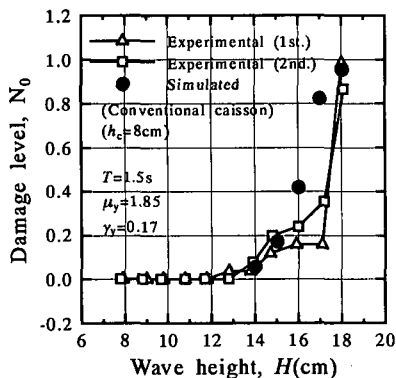


図-10 実験と計算による被災度 ( $h_c=8$  cm の普通ケーソン)

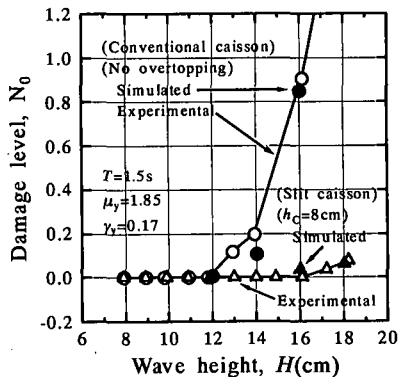


図-12 実験と計算による被災度 (非越波の普通ケーソンおよび  $h_c=8$  cm のスリットケーソン)

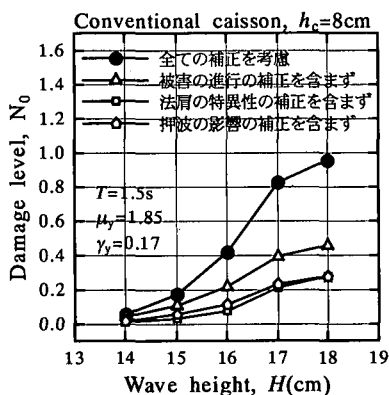


図-11 諸補正が期待被災度に及ぼす影響

スパッシュ数の補正方法や被害進展のモデル化の妥当性を示すものである。ここでは示さないが、こうしたパラメータを変えた計算による試行錯誤を経て、最終的に式(2)から(6)を決定している。

図-12は図-10と同様に実験と計算による被災度を比較したものであり、堤体の条件を変えた場合である。図-10の越波を許す普通ケーソン(直立壁)の場合に比べ、越波を許さない高天端の場合では、実験結果は流速が大きく被災度も高い。こうした傾向は計算値でもよく再現されている。特に  $H=14$  cm の条件では計算値は実験値をやや下回っているが、波高を増加させて  $H=16$  cm とした時の急激な被害の進行がよく再現されている。

また同図のスリットケーソンに対しても実験結果の再現性は良好であり、反射波の低減にともなうマウンド近傍流速の減少に対応して著しく小さな被災度となっている。

る。このように、提案したシミュレーションモデルは、ケーソンの構造条件による被害の傾向をよく再現できる。

## 5. む す び

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- ①混成堤マウンド被覆石の被害の進行を予測するための、モンテカルロ法による計算方法を提案した。
- ②計算モデルのパラメータの同定を行い、場所ごとの被覆石の移動限界イスパッシュ数の補正や、被害の進行のモデル化に用いる最適な定数を決定した。
- ③既存の水理模型実験結果との比較から、提案したシミュレーション手法の妥当性を検証した。
- ④以上の結果から、提案した計算モデルは、波の継続による被害の進行などの複雑なプロセスを取り扱うことのできる実用性のある手法である。

## 参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・嶺山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実 (1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, pp. 3-42.
- 松本 朗・高橋重雄 (2001): 流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 911-915.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- Coastal Engineering Research Center (1977): Shore Protection Manual, U. S. Army Corps of Engineers., Vol. II, pp. 7-215.