

確率論的手法を用いた人工リーフ被覆石の安定性の検討

荒木 進歩*・藤原 由康**・出口 一郎***

1. はじめに

現在, 海岸構造物の経済性と安全性を向上させることが重要な課題であるが, これは不確定変数のばらつきを定量的に評価する信頼性設計法を用いて安全性のレベルを統一することで可能である。現行の設計法では, すべてのパラメータは確定値として取り扱われ, それらの持つばらつきの程度は考慮されていない。また, Hudson 式における K_0 値や安全率などはパラメータの持つばらつきも含めて考慮された係数であるが, 過去の実績や経験をもとにして決められた値であり, ばらつきを定量的に評価するものではない。人工リーフや捨石防波堤は, 堤体を構成する捨石が大きさ・形状などに関してばらつきを持っており, 同一の入射波に対しても被災状況にばらつきがでることから信頼性設計の早期の導入が期待されている。

我が国において, 信頼性設計法の海岸構造物への適用に関する最初の研究は外山 (1985) によって行われ, 鈴木 (1987) がそれを受けて種々のパラメータが安全性に及ぼす影響を調べた。これらの研究は混成堤の直立部を対象としたものであったが, その後も混成堤に対しては高山ら (例えば 1989, 1994) や長尾ら (1995) が信頼性設計法の適用を行った。高山らは波浪変形計算や波力計算の推定誤差の評価 (1989) や, 費用便益分析 (1994) も行っている。一方, 捨石構造物の信頼性設計に関する研究は Mizumura *et al.* (1988) や半沢ら (1996) によって行われているが, まだ始まったばかりである。そこで本研究では, 捨石構造物への信頼性設計法の導入の足がかりとして, 捨石の粒径と捨石間の摩擦係数を測定することにより, 人工リーフ被覆石の移動確率の算定を試みる。

2. 摩擦係数と粒径の測定

本研究では, 捨石間の摩擦抵抗力と粒径のばらつきを考慮することを主眼とし, これら 2 つを確率変数とする

ため, まず初めに, 摩擦係数と粒径を実際に測定することによりその分布形状を求めた。

捨石間には滑り摩擦力のほかに, かみ合わせによる抵抗がはたらく。しかし, 捨石間のかみ合わせによる抵抗力はもちろんのこと, 摩擦力の摩擦係数についても議論がほとんどなされておらず, 適切な評価手法はない。そこで本研究では, 簡易的に摩擦力とかみ合わせの抵抗を区別せずに両者を合わせて抵抗力として評価することにした。

最大静止摩擦力 F_1 は垂直抗力 N_n に比例する形で次式で表される。

$$F_1 = f_1 N_n \dots \dots \dots (1)$$

ここに, f_1 は摩擦係数である。

一方, かみ合わせの抵抗自体は垂直抗力 N_n には依存せず, 捨石の形状, 石積み of 整形の度合いの関数であると考えられるが, ここではかみ合わせの抵抗力 F_2 も垂直抗力 N_n に比例するものと仮定し, 移動に対するかみ合わせの抵抗力が次式で表されるとした。

$$F_2 = f_2 N_n \dots \dots \dots (2)$$

ここに, f_2 はかみ合わせの抵抗による抵抗係数。

したがって, 捨石の総抵抗力 F を次式で表すことができる。

$$F = F_1 + F_2 = (f_1 + f_2) N_n = f N_n \dots \dots \dots (3)$$

このように仮定することにより, 図-1 のように捨石を貼り付けた平板を徐々に傾け, 捨石が移動・転落し始める角度 θ を測定し, その正接をとることで抵抗係数 f を求めることができる ($f = \tan \theta$)。また, これは, 凹凸のある捨石斜面上での抵抗を, 凹凸のない一様なざらざらした斜面上での静止摩擦係数に置き換えることも意味している。

この方法で 210 回の試行を行い, 図-2 に示す頻度分布を得た。横軸は抵抗係数の値, 縦軸は出現頻度 n を全

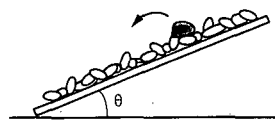


図-1 抵抗係数 f の測定方法

* 学生会員 工修 大阪大学大学院工学研究科
** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科
*** 正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科

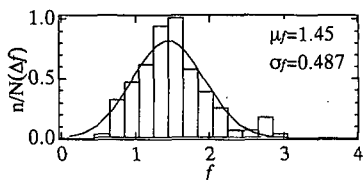


図-2 抵抗係数の分布形状

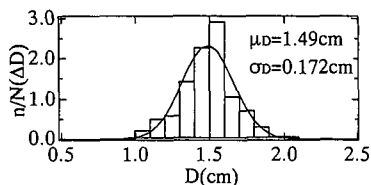


図-3 粒径の分布形状

試行回数 N と横軸の区間幅 Δf で除した値である。 f の平均値 μ_f は1.45、標準偏差 σ_f は0.487で、正規分布を当てはめた。図中に正規分布曲線を実線で示す。

捨石の粒径は200個の碎石の重量を測定し、次式から算定した。

$$D = (W/\rho_s g)^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 D は捨石の代表粒径、 W は捨石の重量、 ρ_s は捨石の密度($=2.65 \text{ g/cm}^3$)、 g は重力加速度である。図-3は捨石の粒径分布である。横軸は粒径、縦軸は出現頻度 n を全測定個数 N と横軸の区間幅 ΔD で除している。分布形状は抵抗係数と同様に正規分布を当てはめた。平均値 μ_D は1.49 cm、標準偏差 σ_D は0.172 cmで、図中に実線で示す。

なお、抵抗係数 f と粒径 D は必ずしも独立ではないが、簡単のために両者は独立であると仮定し、粒径の測定を行う碎石は無作為に抽出した。

3. モンテカルロ法による移動確率の計算

捨石の移動確率を算定するためには、捨石の運動の状態(静止・移動)を表現する算定式(性能関数)が必要である。性能関数は実際の現象を十分に説明できるものでなければならないが、今回測定した抵抗係数 f は摩擦力とかみ合わせの効果を含んだものである。ここでは捨石を質点と考え、図-4に示すように、捨石の運動を摩擦のある平板状での運動に置き換えて簡単な性能関数を設定することとした。

捨石の移動に関わる力は、かみ合わせの効果を含んだ摩擦力、波浪外力および捨石の重量である。外力は抗力項のみとし、斜面方向の力のつり合いを考えることにより性能関数 Z を次式で表す。

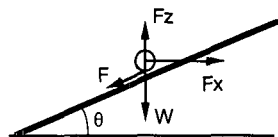


図-4 捨石の運動のモデル化

$$Z = fN_n + k \frac{1}{6} \pi \rho_s g D^3 \sin \theta - (F_x \cos \theta + F_z \sin \theta) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 θ は捨石法面の勾配である。また、 k は捨石の運動方向を表す係数で、向岸方向移動のときは+1、離岸方向移動のときは-1をとる。

N_n は斜面への垂直抗力、 F_x は水平方向の波力で次式により示される。

$$N_n = \frac{1}{6} \pi \rho_s g D^3 \cos \theta + F_x \sin \theta - F_z \cos \theta \dots\dots\dots (6)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \rho_w U_{\max}^2 \cdot \frac{1}{4} \pi D^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 C_D は抗力係数、 U_{\max} は水粒子速度振幅である。

水平方向波力は隣接する捨石による遮蔽の影響を受けるが、ここでは遮蔽状況は考慮せずに抗力の算定を行った。また、鉛直方向波力 F_z は水平方向波力 F_x と同位相とし、 α を比例定数として次式を仮定した。

$$F_z = \alpha F_x \dots\dots\dots (8)$$

なお、高山(1989)は波力算定式の計算値が真の値のまわりに正規分布にしたがってばらつくとし、そのずれを確率変数として考慮しているが、ここでは抗力の計算値は確定値とした。また、 U_{\max} 、 ρ_s 等の変数も確定値とし、ばらつきは考えなかった。

確率変数は測定した抵抗係数 f と粒径 D の2つであり、測定した f と D の分布形状を持つように正規乱数を発生させ、モンテカルロ法により計算を行った。ある一組の f と D に対して、 $Z < 0$ であれば移動、 $Z > 0$ であれば移動せず、として捨石の移動確率を求めた。繰り返しの回数は、安定な結果を得るために 10^4 回とした。ここで、捨石の移動とは、抵抗係数 f の定義により、捨石間のかみ合わせによる抵抗を上回って転動を始める限界であるので、捨石間でのRocking運動は移動には含まれないことになる。また、 C_D は水谷ら(1991)にしたがい0.7とした。

4. 妥当性の検討と計算結果

まず、計算結果の検証のために水理実験を行った。図-5に示すように、2次元造波水槽内の勾配1:20の水路床上に天端幅が150 cm、天端水深5 cm、法面勾配が1:

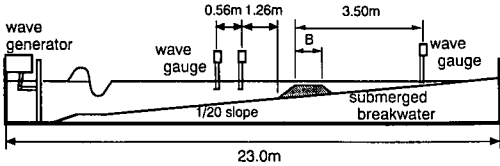


図-5 実験装置

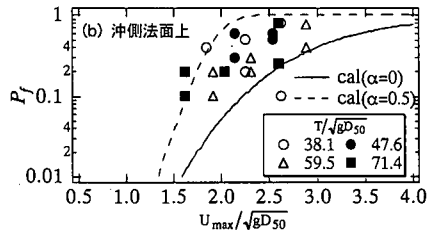
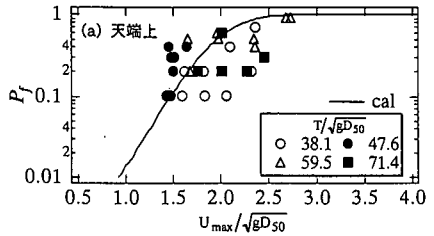


図-7 実験結果と計算結果の比較

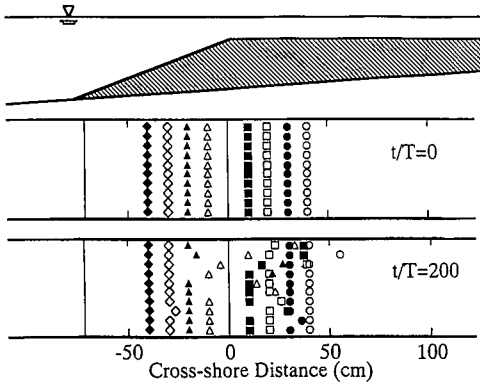


図-6 トレーサーの初期配置と移動状況

3の人工リーフを作成した。法先水深は25cmとした。この人工リーフの天端上と沖側斜面上の8つの地点にトレーサーを配置し、波高約15cmの規則波を200波入射させた後、その移動量を測定した。トレーサーの初期配置と周期2.0秒の波を入射させた後のトレーサーの移動状況を図-6に示す。トレーサーは同一地点の水槽横断方向に10個配置している。その後、捨石が動かないようにして、トレーサーの初期位置での水平方向水粒子速度を電磁流速計により測定した。測定位置は人工リーフ表層から4cm上方とした。

図-7に実験結果と計算結果との比較を示す。横軸は水平方向水粒子速度の無次元量で、縦軸が移動確率である。(a)が天端上、(b)が沖側法面上での比較である。実験結果は同一地点に配置した捨石のうち、移動したものの割合を示している。図中の実線が計算結果であり、 $\alpha=0$ として計算を行った。また、沖側法面上のトレーサーはすべて向岸方向に移動したので $k=1$ としている。天端上での計算値は、実験結果のほぼ平均を、また沖側法面上での計算値は実験結果のほぼ下限を与えている。これは、実際には鉛直方向波力が捨石の移動に寄与しており、その差が沖側法面上において実験結果の下限を与えることになったものと考えられる。図中には、参考に $\alpha=0.5$ とした場合の計算結果を破線で示している。天端上、沖側法面上ともに実験値の傾向はほぼ再現されているので、この手法により各確率変数が移動確率に及ぼす影響を十分に議論できるものと思われる。

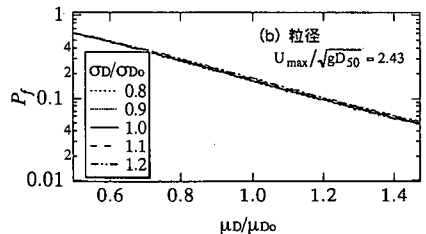
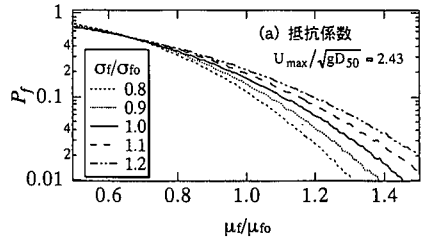


図-8 平均値及び標準偏差が移動確率に及ぼす影響

平均値および標準偏差の変動が沖側法面上の捨石の移動確率に及ぼす影響を図-8に示す。図中の添字 o は実験に用いた砕石による値であることを示す。(a)は抵抗係数による影響を示しているが、平均値の増加に伴って移動確率 P_f が減少し、また標準偏差の減少に伴って P_f が減少している。(b)は粒径による影響であるが、平均値の増加とともに P_f は減少するが、標準偏差の変動による P_f の変化はほとんど見られない。これは、測定した粒径の標準偏差は0.172cmであり抵抗係数の標準偏差0.487よりかなり小さいので、 P_f の計算はばらつきの大きい抵抗係数に大きく影響され、粒径のばらつきの影響は計算結果に現れにくいと考えられる。また、平均値の増加に対する移動確率の低減の割合も抵抗係数の方が大きい。

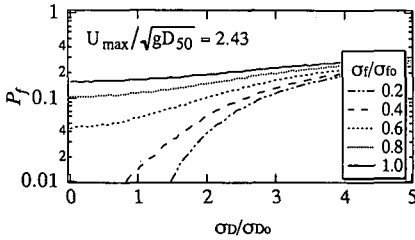


図-9 粒径の標準偏差が移動確率に及ぼす影響

図-9は粒径の標準偏差 σ_D が移動確率 P_f に及ぼす影響を示したものである。測定された抵抗係数の値 $\sigma_f/\sigma_{f0}=1.0$ の場合は、 σ_D の変動に対して P_f はほとんど変化しないが、 σ_f が小さくなるにつれて、 σ_D の及ぼす影響が大きくなっていく。これは、標準偏差の大きく異なる2つの確率変数に関わる場合、標準偏差が小さい確率変数のばらつきをさらに小さくしても、移動確率の低下にはつながらないことを意味している。また、これらのことから図-8(b)の傾向を理解することもできる。

5. 三球体モデルとの比較

移動確率の算定を行うためには、性能関数を精度よく決定する必要がある。前章までは簡易的なモデルから性能関数を決定したが、ここでは青木ら(1994)や荒木ら(1996)による三球体モデルをもとにして移動確率の算定を行い、簡易モデルとの比較を行う。

三球体モデルは図-10に示すように、2つの下部捨石上での捨石の動的挙動を解析するモデルである。捨石の運動は、左方移動、右方移動、静止および浮き上がりの4つがあるが、一例として左方移動をする場合の運動方程式を以下に示す。ただし、簡単のために捨石は球体とする。

接線方向

$$M(a+b) \frac{d^2 \theta_A}{dt^2} = R_T \cos(\alpha - \theta_A) + (R_L - Wg) \sin(\alpha - \theta_A) + k_2 F_s \dots (9)$$

法線方向

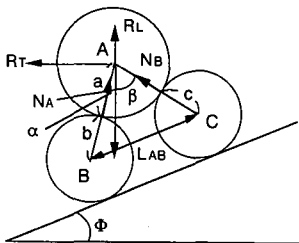


図-10 三球体モデル

$$M(a+b) \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 = -R_T \sin(\alpha - \theta_A) + (R_L - Wg) \cos(\alpha - \theta_A) + N_A \dots (10)$$

回転

$$\frac{2}{5} M(a+b) \frac{d^2 \theta_A}{dt^2} = k_1 F^* - k_2 F_s \dots (11)$$

ここに、 a は上部捨石の半径、 b および c は下部捨石の半径、 N_A 、 N_B は下部捨石との接点における垂直抗力、 W は上部捨石の水中重量、 M は上部捨石の質量、 g は重力加速度、 R は作用波力、 R_T 、 R_L はそれぞれ R の水平方向成分、鉛直方向成分、 F_s 、 F^* はそれぞれ滑りおよび転がり摩擦力、 θ_A は移動角、 k_1 、 k_2 はそれぞれ転がり方向、移動方向により決まる係数である。数値計算には Runge-Kutta 法 4 次公式を用いた。

下部および上部捨石の半径を、測定した粒径の分布を持つように正規乱数で与え、下部捨石の間隔 L_{AB} は $b+c$ とした。また、抵抗係数そのものはモデル中に組み込むことができないので、実験での測定方法に基づいて次のように摩擦係数を決定した。測定された分布形状に従って発生させた粒径を持つ上部、下部捨石に対して、上部捨石が転落を始めるまで法面勾配 ϕ を増加させる試行を繰り返す(転落する角度を ϕ とする)、その角度の正接が抵抗係数の平均値 1.45 に等しくなるように静止転がり摩擦係数の値を選んだ。さらに、静止転がり摩擦係数が正規分布すると仮定して、 $\tan \phi$ の標準偏差が抵抗係数の標準偏差 0.487 に等しくなるように静止転がり摩擦係数の標準偏差を決めた。なお、このモデルでは上部捨石の初期移動は転がり摩擦係数に大きく影響を受ける。

作用波力 R は抗力項のみとし、水粒子速度を正弦的に与えることで算出した。鉛直方向波力 R_L についても簡易モデルの場合と同様に $R_L = aR_T$ で与えられるものとし、ここでは $\alpha=0$ として計算した。また、三球体モデルにおける捨石の移動(性能関数の定義)の判定は、上部捨石が隣接する捨石を乗り越えて下部捨石の粒径に相当する変位が生じたときとした。

図-11に天端上の捨石を対象とした三球体モデルと前章までの簡易モデルの計算結果の比較を示す。横軸は

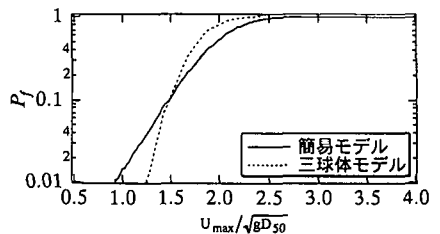


図-11 簡易モデルと三球体モデルとの比較

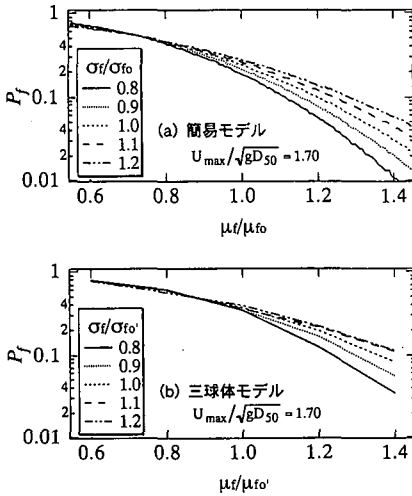


図-12 計算方法による相違

水粒子速度の無次元量、縦軸が移動確率 P_f である。捨石が転落し始める角度（抵抗係数）を両者間で一致させたがやや相違が見られ、三球体モデルによる計算結果は、簡易モデルによる計算結果よりも傾きが急である。したがって、三球体モデルでの計算は簡易モデルでの計算と比較すると、摩擦係数や粒径のもつばらつきがそれほど移動確率の算定に影響を与えていないと考えられる。なお、水理実験の際に用いた実験波の周期内では、三球体モデルにおいても周期の影響は見られなかった。

図-12は摩擦係数（抵抗係数）が移動確率 P_f に及ぼす影響を示したものである。ここで、 μ_{f0} は $\tan \phi$ の平均値と標準偏差が抵抗係数 f のそれらと一致するように選んだ静止転がり摩擦係数である。図-11で示されたように、定量的には移動確率 P_f に差が見られるが、摩擦係数が移動確率に及ぼす影響の傾向は両者とも同様である。

6. まとめ

本研究では、人工リーフ被覆石の移動に影響を及ぼす不確定要因として粒径および摩擦係数とかみ合わせの抵抗をひとまとめにした抵抗力を取り上げて、それらの分布形状を実際に測定し、簡易的なモデルと三球体モデルを用いて被覆石の安定性を確率論的に議論した。以下に、得られた主要な結果をまとめる。

(1) 静的な力のつり合いに基づいた簡易的な捨石の移動確率算定モデルでも、実験結果の傾向を十分に再現できた。

(2) 粒径の標準偏差は抵抗係数の標準偏差よりかなり小さかったので、粒径の持つばらつきは移動確率にはそれほど影響を与えなかった。すなわち、標準偏差が異なる2つの確率変数に関わる場合、標準偏差が小さい確率変数のばらつきをさらに小さくしても、移動確率の低下にはつながらない。

(3) 動的応答を考慮できる三球体モデルで移動確率の算定を行ったが、天端上の捨石に対しては動的な影響は見られず、基礎式（性能関数）の違いによる相違のみしか見られなかった。

本研究では捨石の移動を確率論的に議論したが、今後は構造物全体の安定性を議論するため、構造物全体系としての破壊の定義、モデル化および性能関数の設定を行っていく所存である。

参考文献

- 青木伸一・榎木 亨・伊藤慎和 (1994): 振動外力を受ける斜面上の捨石の挙動に関する数値的検討, 第49回年次学術講演会概要集, pp. 826-827.
- 荒木進歩・伊藤慎和・出口一郎 (1996): 動的応答を考慮した捨石防波堤の平衡勾配について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 826-830.
- 鈴木慎也 (1987): 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用 (その2), 港湾技研資料, No. 582, pp. 1-37.
- 高山知司 (1989): 信頼性理論による防波堤滑動の安定性に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 673-677.
- 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, 港湾技研資料, No. 785, pp. 1-36.
- 外山進一 (1985): 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用, 港湾技研資料, No. 540, pp. 1-49.
- 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), 港湾技術研究所報告, Vol. 34, No. 1, pp. 39-70.
- 半沢 稔・高橋重雄・下迫健一郎 (1996): 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, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 796-800.
- 水谷法美・岩田好一朗・Teofilo Monge Rufin, Jr.・倉田克彦 (1991): 幅広潜堤上の被覆材に作用する波力の特性と移動限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 591-595.
- Mizumura, K., M. Yamamoto, T. Endo and N. Shiraishi (1988): Reliability analysis of rubble-mound breakwater, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., ASCE, Vol. 3, pp. 2053-2062.