

人工リーフ被覆ブロックの被災確率について

木村 晃*・小林一光**・佐藤弘和**

1. はじめに

人工リーフは水面下に構築される構造物で、構成材として捨て石を用いることが多い。天端水深の深さに関する議論もまだ十分ではないと考えるが通常 1.5 から 2.0 m 程度とすることが多い。このような水深では波の作用により構成材が散乱する可能性があるため、被覆石、方塊あるいはコンクリート製異形ブロック等の被覆材を用いて保護する。リーフ被覆ブロックの開発は特に最近目覚ましいものがあるが、それが機能を果たすために必要な要件については現状でも十分な基準が与えられている訳ではない。宇多ら (1988) は碎石を用いた実験結果をもとに人工リーフ構造材の安定重量に関する実験式を与えている。建設省の手引き (1992) では被覆ブロックの場合には水理実験で安定重量を定めることが基本とされているが、現場では宇多らの式がそのまま用いられることも多い。

彼らの研究では安定性の評価の判定に構成材 (碎石) がある程度移動している結果も用いられており、これが許される構成材に対する安定性と、1 個の移動が周囲のブロックの被災ひいてはマウンドの破損につながるコンクリート被覆ブロックに要求される安定性とは異なるはずである。この研究では新たな評価式を開発するのではなく、ブロックに作用する力の基本つりあい式に立ち返り、被覆ブロックの重量とそれが波の作用で被災する確率との関係を明らかにして、ブロックの重量決定の一助とすることを目的として実施したものである。このためまず基本式を構成する変数が不確定性を持つことを示し、さらに変数の値をいくらに選べば合理的であるのか、それを用いて計算したブロックの重量と被災確率の関係はどうなるのかなどを計算する方法を示す。

2. 基本変数の不確定性に関する実験

2.1 ブロックの被災モード

被覆ブロックおよびそれに作用する波力に関する諸元の不確定性について実験する前に人工リーフ上の前法

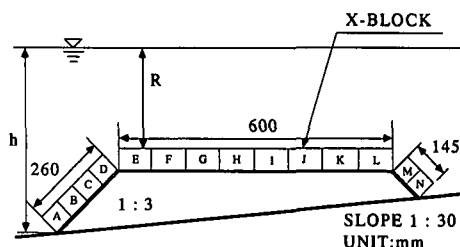


図-1 人工リーフとブロックの設置位置

面、天端面および後法面の各点に設置したブロックに作用する波力を測定した。実験に用いた水槽は長さ 29 m、幅 50 cm、深さ 75 cm のガラス張り水槽で、この水槽に 1/30 の塩ビ製スロープを置き、この上に図-1 に示す人工リーフの模型 (アクリル製：不透透) を設置した。リーフの前後の法面勾配は 1/3、法面の長さは前法面が 26 cm、後ろ法面が 14.5 cm で天端の長さは 60 cm である。この模型全面に図-2 に示すブロック模型を波の進行方向に 14 列、直角方向に 7 列並べた。波の進行方向の中央の列のブロックには図-2 に示すように L 字型のバネに囲みゲージを貼り付けた波力測定装置を取り付け、水平および鉛直力が同時に測定できるようにした。波力測定用以外のブロックはすべてリーフ模型に貼り付け、測定用のブロックとの間にはわずかに隙間を空けて隣接ブロックとの間に摩擦力が作用しないようにした。実験に用いた波の波高 H_0 、周期 T およびリーフの天端水深 R を表-1 に示す。

実験の結果、水平、鉛直方向力とも前法面付近の C、D、E、F (図-1) の 4 つのブロックに作用する力が他の位置にあるものに比して大きい。図-3 は $R=4$ cm とした場合の (a) C、D および (b) E、F に作用する鉛直力のピーク値 F_L を比較したもので、横軸は沖波波形勾配である。

表-1

H_0 (cm)	6.5, 7.5, 8.5, 8.5, 10.5
T (s)	1.0, 1.5, 2.0
R (cm)	2.0, 3.0, 4.0

* 正会員 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

** 正会員 株式会社 テトラ

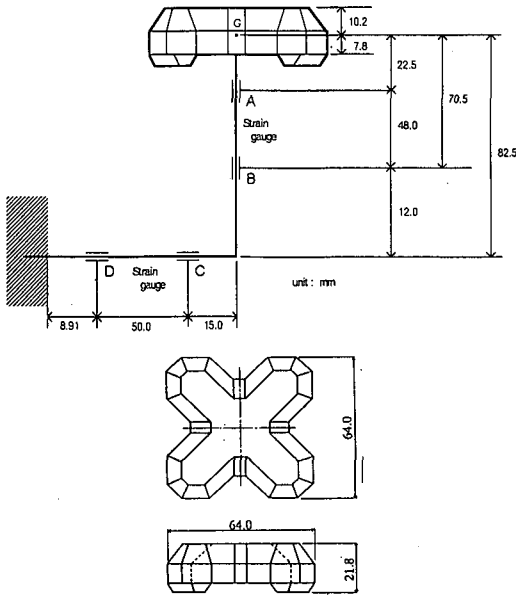
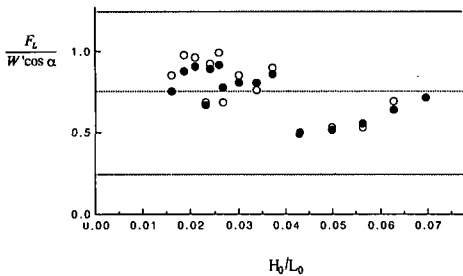
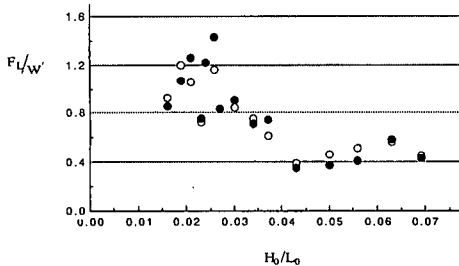


図-2 波力測定装置とブロック



(a) ブロック C(○印), D(●印)



(b) ブロック E(○印), F(●印)

図-3 揚力の最大値と波形勾配の関係

W' はブロックの水中重量, α は法面勾配である。両図からもわかるように E あるいは F の方が C, D に比べて大きい。したがってここではリーフ天端面前端部特に E に設置されたブロックを対象として検討を行うこととした。

ブロックの被災等に関する観察をほぼ同じ実験装置を

用いて行った。この場合には波力測定装置をはずし、すべてのブロックはリーフ面に接着せずに動くことができるようにした。ビデオを用いた観察によればブロックの移動の開始には (1) 浮き上がり, (2) ブロック後端を中心とした回転の 2 つのモードが存在する。リーフ模型に置いたブロックのうち一番最初に移動するブロックは (1) によるものが多く、2 番目以後は最初に被災したブロックに隣接するものが (2) のモードで被災することが多かった。そこでここでは (1) の被災モードについてブロックの安定性を検討することとした。

2.2 力の釣り合い式と基本変数

浮き上がりによりブロックが移動を開始する瞬間、ブロックに作用する力の釣り合い式は

$$f(W, B, F_L, F_F) = (W - B) - F_L + F_F \quad \cdots (1)$$

となる。ここに W, B, F_L, F_F それぞれブロックの空中重量およびブロックに作用する浮力、揚力、隣接するブロックとの間に働く鉛直方向の摩擦力である。ブロックが移動を開始する際には隣接するブロックとの間に隙間が観察されることが多いので F_F を無視すると (1) 式は

$$f(W, B, F_L) = (W - B) - F_L \quad \cdots (2)$$

となる。ここで揚力は

$$F_L = (1/2) \rho_w C_L A u^2 \quad \cdots (3)$$

を用いて評価する。 ρ_w は流体の密度, C_L は揚力係数, A は流体が作用する部分のブロックの投影面積, u は水粒子速度である。コンクリートブロックの場合, W, B は定数と考えて良い。良好な施工管理下での竣工時には C_L, A とほぼ定数と考えられるが、マウンドの表面の仕上げ状態が良好でなかったり、竣工後長期間が経過して沈下等により表面に凹凸が出来た場合 C_L, A は定数と考えられない状況となる。その場合、同じ波の条件下でも u は場所ごとに变化する。したがってこの研究では C_L, A, u を不確定性を持つ基本変数と考えて検討を行った。

3. 基本変数の不確定性

3.1 A の不確定性

ブロックの投影面積 A の不確定性について次のような検討を行った。すなわち、19 mm 目のふるいと 16 mm のふるいの間に残る碎石を平坦な面に厚さ約 5 cm となるようにほぼ一様に敷き詰める。碎石の平均径は約 17.5 mm でこの粒径は図-2 の被覆ブロックを並べた場合に隣接するブロックとの間に出来る孔の径より少し大きい。碎石の表面は極端に飛び出た石を取り除く以外は整形をしない。この碎石層の上に 1000 個のブロック模型を並べてそれぞれのブロックの傾きを測定した。横軸に傾きの角度 θ をとってその頻度分布を示したものが図-4 である。図中の実線はデータから計算した平均値 $\mu(\theta)$ 、標準偏差 $\sigma(\theta)$ を用いて計算した正規分布曲線である。こ

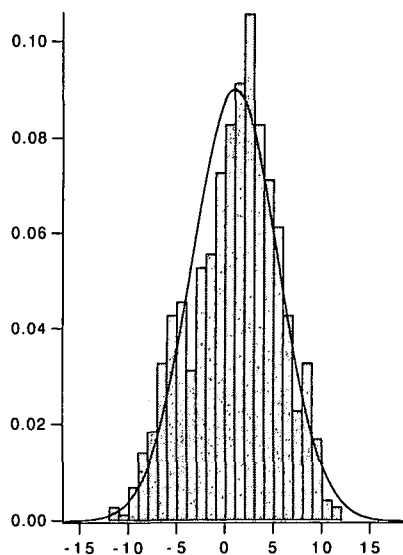


図-4 ブロックの傾きの頻度分布 (度)

ここに $\mu(\theta)=1.01^\circ$, $\sigma(\theta)=4.36^\circ$ であった。

いま E 点に置かれたブロックが波の進行方向に対して θ (流れに対して仰角となる方向が正) だけ傾くとブロックの沖側の先端部は $L/2 \sin \theta$ だけ重心位置より高くなる。ここに L はブロックの 1 辺の長さである。一方 D 点 (法面上端) に置かれたブロックが θ だけ傾くとこのブロックの岸側の先端部は $L/2 \sin \theta \cos \alpha$ だけ元の位置より下がる。ここに $\tan \alpha$ は法面勾配である。図-4 のデータを用いると、傾きによる E 点のブロック沖側先端部の鉛直シフト量の標準偏差は 3.0 mm, D 点岸側先端部の鉛直シフト量は 2.8 mm である。ブロック模型の厚みは 22 mm であり、これらの量は厚みのそれぞれ 13.6% および 12.9% となる。リーフに設置された状態でもブロックの傾きが上と同じ統計量をもつものとする。流れの上手側から水平にリーフ上のブロック E を見た場合、ブロック D の上に見えている部分の面積を A , ブロック自体の側面積を A_* とし、

$$A = C_A A_* \quad \dots\dots\dots (4)$$

なる面積係数 C_A を導入すると D, E 両点のブロックの傾きが独立であれば C_A の標準偏差は

$$\sqrt{(0.136)^2 + (0.129)^2} = 0.187 \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。D, E のブロックで $\theta=0^\circ$ の場合, C_A の平均値は 0.20 であった。すなわち $\mu(C_A)=0.2$, $\sigma(C_A)=0.187$, $\mu(A)=0.2A_*$, $\sigma(A)=0.187A_*$ である。

3.2 C_L の不確実性

C_L の不確実性を測定するためここでは次のような実験を行った。すなわち、実験に用いた水路は深さ 60 cm, 幅 50 cm, 長さ 5.7 m の循環水路である (図-5)。この水

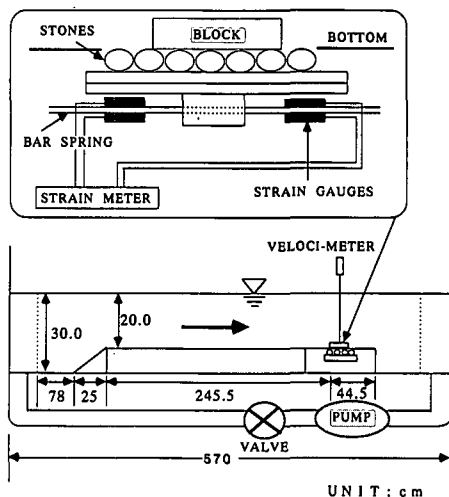


図-5 循環水路と揚力測定装置

槽の一部に台をおいて底面を 10 cm 嵩上げし、この台に四角な穴をあけて図に示すような揚力の測定装置を埋め込んだ。これとは別に 15 cm (流れの方向) $\times$ 20 cm (流れと直角方向) の四角なアクリル板に図-4 の解析で用いた碎石を 1 層貼り付けたものを 100 枚用意した。このプレートを上の揚力測定装置の上に置き、さらにその上に図-2 のブロックを流れと直角方向に 2 枚並べて 20 cm/s と 30 cm/s の 2 種類の一樣な流れを当てて揚力を測定した。図-5 に示すように碎石の面と嵩上げた水路の底面を一致させて ($C_A=1.0$) ブロックを置かない状態では装置に揚力が作用していないことを確認して測定を行った。30 cm/s の流れを当てた場合の揚力の測定値の分布を示したものが図-6 である。図中の実線はデータの平均値と標準偏差を用いて計算した正規分布曲線である。この結果をもとに計算した C_L の平均値および標準偏差は $\mu(C_L)=2.21$ および $\sigma(C_L)=0.44$ であった。

さらにブロックが上下した場合の C_L の値の変化を図-5 の揚力測定部だけを取り替えて測定した。アクリルプレートはブロック 1 つ分の大きさのものに替え、上に 1 つだけブロックを貼り付けて揚力を測定した。この装置は上下に高さが調節できて、 C_A の値が変えられるようになっている。流れの速さは 20 cm/s と 30 cm/s の 2 ケースを使い $C_A=0$ から 1.0 まで変化させた。その結果 C_L の値にはほとんど変化がなかった。したがってマウンドの凹凸によるブロックの上下方向のシフトは C_L には影響しないものと考えた。ブロックの傾きが C_L に及ぼす影響についても同じ装置を用い、ブロックの傾きを流れ方向に対して $\theta=\pm 6^\circ, \pm 3^\circ$ と変えて揚力を測定した。その結果、 θ を負から正に変えていくと C_L が θ に対して緩やかに増加する傾向が見られるが、変化量そのものの

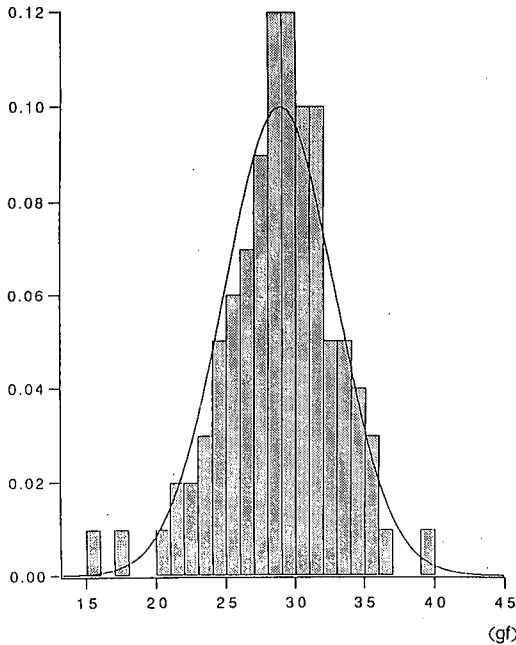


図-6 揚力の頻度分布

は小さいのでここでは C_L の値は θ に対して独立であるとした。

3.3 u の不確定性

波高が非常に大きい場合には人工リーフに達する前に砕波し、小さければリーフを通過して海岸に達する。したがってリーフ上の被覆ブロックに最大の水粒子速度をもたらすのはこれらの中間の波高を持つ波であり、この意味でブロックに作用する水粒子速度には最大値が存在し、砕波あるいはその前後の状態にある波によりもたらされる。リーフの上の水深が非常に小さく、砕波による気泡の混入なども相まって u を正確に測定することは非常に困難である。この研究でも何種類かの流速計を用いて測定を試みたが信頼できる値が得られなかったため、ここでは宇多ら (1988) の測定値を利用する。宇多らはここで対象としたものと同じ 1/30 のスロープ上に設置した人工リーフ (前法面勾配 1/3) 上での水粒子速度の最大値 $u_{\max}$ を次式で与えた。

$$u_{\max}/\sqrt{gR} = 8 \exp\left\{-1.5 \frac{H_0}{h} - 2.8 \frac{R}{H_0}\right\} + 0.2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに h は前法面先端位置での水深である。彼らは 28 個の実測データも併せて示して (6) 式と比較している。それによると $u_{\max}$ の実測値と (6) 式の値の比の平均値は 1.16、標準偏差は 0.24 であった。(6) 式は

$$H_0/\{(2.8/1.5)Rh\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

の時に与えられた R, h 条件下での最大値をとるので

(6) 式にこれを代入した、

$$u_{\max}^* = 1.16\sqrt{gR}\{8 \exp(-\sqrt{16.8R/h}) + 0.2 \dots\dots (8)$$

を与えられた R, h の条件下での u の評価式とした。この式の不確定性の標準偏差は宇多らのデータから計算した $\sigma(u_{\max}^*) = 0.24 u_{\max}^*$ とする。平均値 $\mu(u_{\max}^*)$ は (8) 式で与える。

4. 信頼性解析

ここでは Hasofer and Lind (1974) の方法を用いてレベル 2 法で安全性指標を計算する。まず破損関数を (2) 式より

$$F = (W - B) - (1/2)\rho_w C_L A u^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

とする。つぎに基本変数を正規化する。

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= (C_L - \mu(C_L))/\sigma(C_L) \\ Z_2 &= (A - \mu(A))/\sigma(A) \\ Z_3 &= (u - \mu(u_{\max}^*))/\sigma(u_{\max}^*) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

このように置くと破損関数 (9) 式は 3 次元の関数

$$F = f(Z_1, Z_2, Z_3) = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

に変換される。 $f(Z_1, Z_2, Z_3) \geq 0$ を満たす Z_1, Z_2, Z_3 の組の内、原点 $Z = (0, 0, 0)$ までの距離を最小とするものが設計点となり、その距離が安全性指標となる。すなわち

$$\beta = \min\{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

である。破損関数 (9) 式が非線形であるのでここではくり返し計算法で β を求める。この際 $Z_i (i=1, 2, 3)$ をさらに

$$Z_i = \gamma_i \beta, \quad (i=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (13)$$

とおく。 γ_i は単位ベクトルの Z_i 軸方向の成分であり、

$$\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

なる関係がある。 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ および β に対して適当な初期値を仮定し、

$$\gamma_i = \frac{\frac{\partial f(Z)}{\partial Z_i}}{\left[\sum_{i=1}^3 \left\{\frac{\partial f(Z)}{\partial Z_i}\right\}^2\right]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

($j=1, 2, 3$)

を用いてくり返し計算を行う。ここに

$$Z = (Z_1, Z_2, Z_3) \quad \dots\dots\dots (16)$$

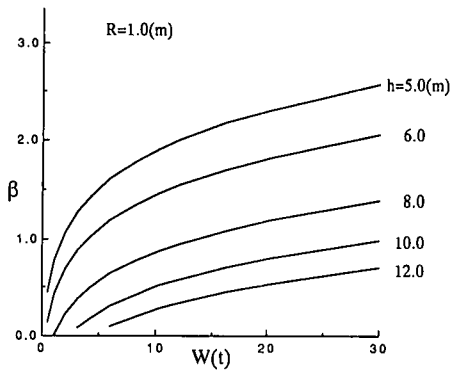
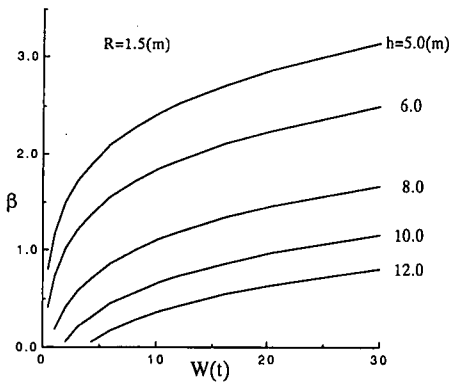
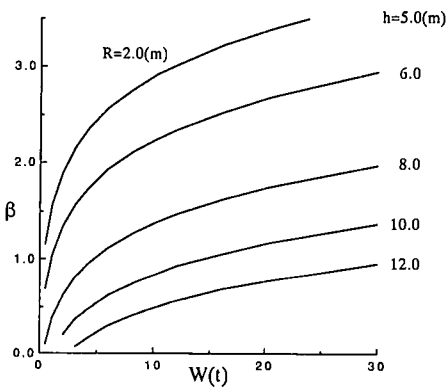
である。計算された Z の組み合わせを (12) 式に代入して β を決めると、設計点での破損確率は

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta} \exp(-x^2/2) dx \quad \dots\dots\dots (17)$$

で計算できる。

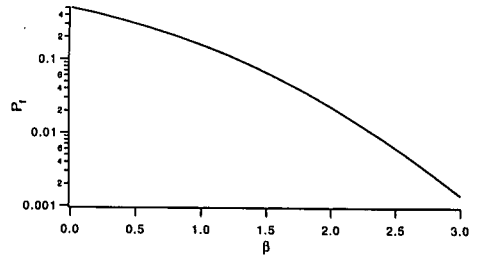
5. 計算結果と考察

4. までの結果をもとにプロトタイプ的人工リーフ被覆ブロックの破損確率を計算した。計算にあたり海底勾配ならびにリーフの法面勾配は模型と同じく 1/30 およ

(a) $R=1.0$ m(b) $R=1.5$ m(c) $R=2.0$ m

図一七 安全性指標とブロックの重量の関係

び $1/3$ とした。被覆ブロックとしては図一七に示すもののプロトタイプを用いて計算した。計算にあたっては天端水深 R を 3 種類、法先水深 h を 5 種類変えて、

図一八 安全性指標と破損率 P_f の関係

それぞれの R, h の組み合わせを (8) 式に代入して u_{max}^* を求めてくり返し計算に用いた。計算結果を示したものが図一七である。天端水深は (a) $R=1.0$ m, (b) 1.5 m, (c) 2.0 m とした場合の結果である。縦軸の安全性指標 β は破損率 P_f と図一八に示す関係がある。図一七に示したブロックのプロトタイプは 0.5 t から 30 t まで 12 種類のタイプがある。形状は相似であるのでそれぞれのタイプの諸元を用いた結果を実線で結んで示した。図からもわかるように天端水深が小さくなるほど、また法先水深が大きくなるほど、ブロックの重量を大きくしても安全性指標が大きく改善されにくくなる。つまり破損率が低下しにくくなる。

6. おわりに

ブロックに作用する力の釣り合い式に含まれる変数は実験をもとに決定されるものが多いが、変数が不確定性を持つことは避けがたいのでその程度について十分な認識を持って式を利用する必要がある。すなわち、不確定性が非常に大きな場合、ブロックの重量を多少大きくするだけでは安定性の十分な向上にならない場合もあることを認識し、十分大きな安全率を用いて安定重量を計算することが必要である。通常の状態ではブロックが図一七に示すほど大きく傾くことはないと考えが、施工管理が良くなかったり、長期の維持管理、保全が十分でなければこれに近い状態となる可能性がある。

参考文献

- 宇多高明, 小俣 篤 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第 2696 号, 79 p.
- 建設省河川局海岸課 (1992): 人工リーフの設計の手引き, 全国海岸協会, 94 p.
- Hasofer, A. M. and N. C. Lind (1974): たとえば Thoft-Christensen, P. and M. J. Baker (1982): Structural reliability theory and its application, Springer-Verlag.