

動的応答を考慮した捨石防波堤の平衡勾配について

荒木 進歩*・伊藤 禎和**・出口 一郎***

1. はじめに

捨石や異形ブロックを用いて作られた構造物は透水性に富み、反射率の低下、遡上高の低減や維持補修が容易であるなどの工学的に有利な面だけでなく、水質の浄化や生態系の復元、育成にも役立つものと考えられている。捨石防波堤はこれらの構造物を代表するものであるが、高波により捨石が移動、転落することで防波堤としての機能を失う場合がある。より安全でかつ経済的な防波堤を設計するためには捨石防波堤の破壊機構を解明し、防波堤としての機能損失限界を明らかにすることが必要であるが、そのためには捨石堤斜面上での流況および捨石に作用する波力の特性を把握しなければならない。しかし、捨石防波堤斜面上での流体運動や作用波力は、構造物の透水性、砕波、入射波の遡上等、多くの複雑な現象を含むため完全な解明はなされておらず、その結果、捨石防波堤の破壊につながる波力は明らかにされていない。捨石防波堤の安定設計に関する研究では、Iribarren 式 (1938)、Hudson 式 (1959) をはじめとして数多くの研究がなされ、様々な安定重量算定式が提案されてきた。しかし、これらの算定式のほとんどにおいて堤体に作用する波力を誘導するにあたり何らかの仮定がなされており、実際の防波堤に作用する波力から導かれたものではない。

本研究では、水理実験を行い捨石防波堤斜面上の水粒子速度および表面の捨石に作用する波力を測定することによりその特性を検討し、捨石の移動に寄与する波力を明らかにし、より精度の高い安定設計手法を提案するうえで必要となる流況および波力の算定法について検討する。さらに得られた結果に基づいて捨石の動的挙動シミュレーションを行い、移動限界、崩落限界についての解析を行うことによって平衡勾配の推定法を提案する。

2. 水理実験

実験は図-1 に示すように長さ 26.6 m、幅 1.5 m、高さ

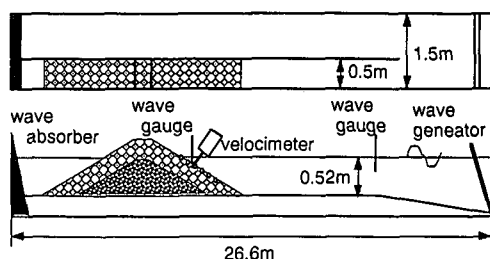


図-1 実験水槽図

1.8 m の屋外片面ガラス張りの 2 次元大型水槽を用いた。捨石防波堤は、出口らの研究 (1988) により透水係数および乱流抵抗係数が既知である砕石を用いて作成し、被覆層と core 部の平均粒径はそれぞれ $D_{50}=4.0$ cm, $D_{50}=1.35$ cm である。また、捨石防波堤の斜面勾配は 1:2, 1:3 の 2 種類、被覆層厚は 15 cm、堤脚水深は 52 cm とし、実験波は波高 8~24 cm、周期 1.0~3.5 秒の間で変化させた。実験では静水面から水深約 5 cm 間隔に設定した斜面上の 6 点で水位変動、超音波ドップラー流速計により斜面および垂直方向の流速、キャンティレバー型波力計により捨石に作用する斜面および垂直方向の波力の測定を行った。

計測された水位変動、流速、波力の時間波形はサンプリング間隔 0.05 秒で記録し、計測時間は 25.6 秒とした。また、波力のデータにはキャンティレバー型波力計の固有振動数の成分 (約 15 Hz) が含まれているので、あらかじめこれを測定しておき、得られた波力のデータから固有振動数以上の成分を cut off した。また、静水面付近では測点が水面から露出することにより波力計に浮力が作用しないので、波力のデータに波力計自身の重量が含まれている。よって、水位変動から波力計の水面露出量を計算することによりこの成分を取り除いた。

3. 実験結果とその考察

3.1 水粒子運動に関する検討

流速の正負は斜面方向流速 u は斜面下向きを正、また斜面垂直方向流速 w は上向きを正としている。流速は斜面上の 6 点で測定したが、静水面付近では流速計プロ

* 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科

** 正会員 工修 日本国土開発(株)

*** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

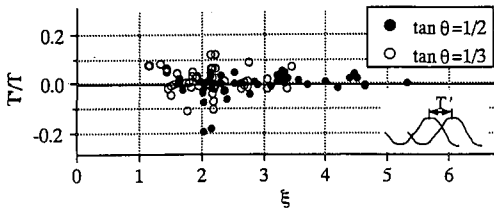


図-2 流速位相差と碎波帯相似パラメータの関係

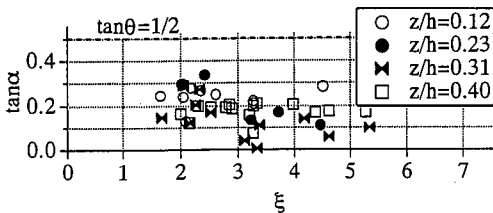


図-3 水粒子運動方向と碎波帯相似パラメータの関係

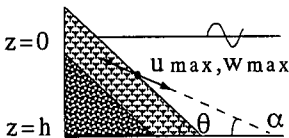


図-4 水粒子運動方向定義図

ブが空気中に出してしまい正確なデータが得られなかったので、静水面下 5 cm 以下のデータで検討を行う。

まず、水粒子速度の楕円軌道の扁平率とその方向を調べることで、透水層斜面上の水粒子の運動特性について検討した。図-2 に斜面方向流速と斜面垂直方向流速との位相差 T'/T と碎波帯相似パラメータ ξ の関係を示す。この図より、 ξ が 2 前後では若干のずれがみられるが、流速位相差は ξ の値に関わらずほぼ 0 とみなすことができ、 u と w はほぼ同位相であるといえる。これは、水粒子の楕円軌道の扁平率が 0 であり、運動が直線的であることを表している。

水粒子の運動方向は図-4 で定義し、その方向 α を次式で求める。

$$\alpha = \theta - \tan^{-1}(w_{\max}/u_{\max}) \quad (1)$$

図-3 に水粒子の運動方向 α と碎波帯相似パラメータの関係を示す。図中の点線は防波堤斜面勾配を示す。この図より、水粒子は斜面勾配よりも小さい角度で運動していることが分かる。また $2.0 < \xi < 3.0$ のとき α が大きくなっていることから、 $2.0 < \xi < 3.5$ では斜面方向の流れが卓越し、 $\xi > 3.5$ では斜面方向流に対する透水層の透過流の割合が大きくなっていくと考えられる。

3.2 作用波力に関する検討

波力の正負は流速と同様に斜面方向波力 F_x は斜面下

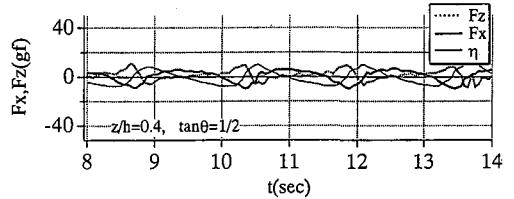
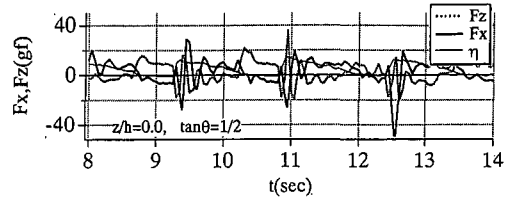


図-5 作用波力の時系列

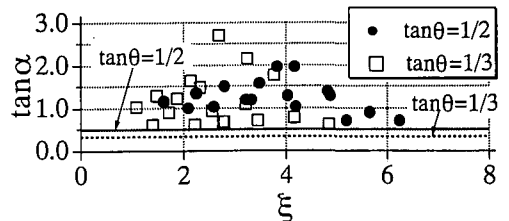


図-6 衝撃的な波力の作用方向

向きが正、斜面垂直方向波力 F_z は上向きが正である。

全ケースの測定値から、測定された波力は測定位置 (z/h) により大きく異なることが分かった。図-5 は入射波高 20 cm、周期 1.6 秒における $z/h = 0.0$ と $z/h = 0.40$ の波力時系列を示したものである。この図から、 $z/h = 0.0$ における波力は不規則性が顕著に表れ、測定点が空気中から水中に入る瞬間に衝撃的な波力が作用していることが分かる。この衝撃波力の最大値は $z/h = 0.23$ 以下にみられる基本周波数成分が卓越した波力の最大値の 3~6 倍の値を示しており、その作用方向については図-6 に示すように斜面勾配よりも大きな角度で作用していることが分かる。この衝撃波力は球体の付加質量の時間変化に基づく衝撃力と考えることができる。捨石構造物の被覆捨石の初期移動を生じさせる波力はこの衝撃波力であり、より信頼性の高い安定重量算定式および断面変形予測を提案するうえでこの衝撃波力の考慮は必要不可欠である。一方、 $z/h = 0.40$ における波力は基本周波数成分の波力が卓越しており、流速との相関もよい。

図-7 に斜面方向の岸向き最大波力と斜面上位置、碎波帯相似パラメータの関係を示す。衝撃波力が岸向きに作用しており岸向きの波力が大きな値を示しているの、ここでは冲向きの最大波力は図示しない。図-7 は $z/h = 0.1$ 、 $2.5 < \xi < 3.5$ の範囲において鋭い peak を示し

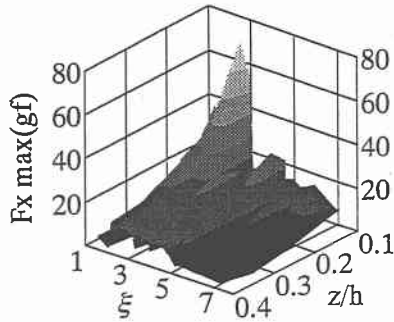


図-7 $\xi, z/h$ に対する最大作用波力 (斜面勾配 1:2)

ており、樫木ら (1982) の研究による最大流速が peak をとる範囲と一致している。よって、防波堤の安定性において最も危険度の高い入射波特性は $2.5 < \xi < 3.5$ であると言える。また、最大波力が静水面付近で急激に大きくなっていることもこの図から分かる。また図示しないが、斜面垂直方向最大波力は正の向き (上向き) が大きく、斜面方向波力に比べて不規則性が強いので値にばらつきが見られた。

4. 捨石斜面上の流速の予測および波力の算定

4.1 流速の予測

捨石堤斜面上の流速および水位変動の予測は、榊山ら (1992) によって提案されている Porous Body Model を用いて数値計算を行った。このモデルは Navier-Stokes 方程式中に volume porosity (多孔性) γ_v と surface permeability (透水性) γ_x, γ_z を導入し、領域内の流速 u, w と圧力 $p (= \rho\phi, \rho$: 流体密度) を未知数として解くものであり、基礎式は次のようになる。

連続方程式

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

運動量方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ - R_x + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\gamma_x \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{xz})}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \lambda_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{\partial \phi}{\partial z} - \gamma_v g \\ - R_z + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\gamma_x \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{zz})}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_v) C_M \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

C_M は慣性力係数、 R_x, R_z は抗力項、 g は重力加速度であ

る。また底面での境界条件はフリースリップとした。計算領域は水平方向に 2 波長の区間を取りメッシュ間隔は $\Delta x = h/36, \Delta z = h/12$ 、時間ステップは $t = T/100$ とした。

図-8 に、斜面勾配 1:3、波高 $H=9$ cm、周期 $T=2.0$ 秒のケースにおける斜面上の最大流速の実験値と計算値の比較を示す。実験では自由表面付近の流速が測定できなかったが、実験値が得られた範囲内では両者は良い一致を示す。また計算値では、 $z/h > 0.4$ では底面に近づくにつれて一様に減少しており、透水層に入射する波動が乱れることなく透水層へ伝播していることが推測される。一方、 $0.0 < z/h < 0.4$ では最大流速が位置により変動している。これは、透水性斜面上での波の遡上、戻り流れ、透水層による乱れなどの影響であると考えられる。

また、図-9 に同じケースにおける水粒子運動方向の実験値と計算値の比較を示す。この図から、水粒子運動方向についても実験値と計算値の一致度は比較的良好である。

以上のことから、捨石防波堤斜面上での流速と水粒子運動方向はほぼ再現できたが、Porous Body Model によ

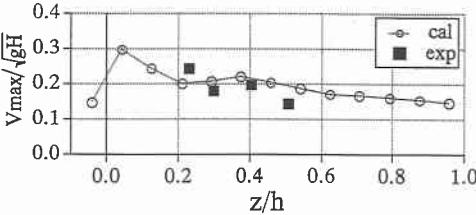


図-8 斜面上の最大水粒子速度比較

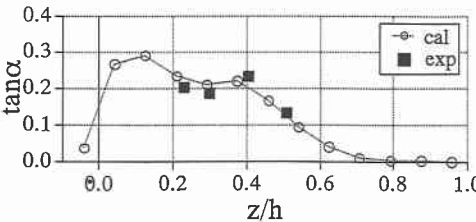


図-9 斜面上の水粒子運動方向の比較

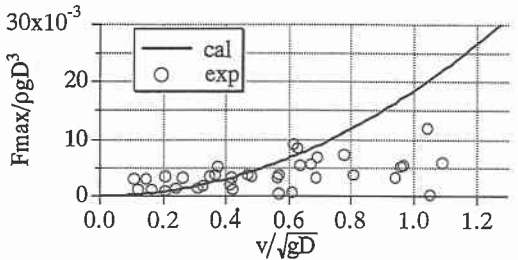


図-10 衝撃的な波力の算定結果

る解析では碎波現象は取り扱えないので、自由表面付近の水粒子の運動に関してはさらに検討が必要である。

4.2 波力の算定

静水面付近での衝撃的な波力は付加質量の時間変化に基づく衝撃力として算定する。球体の場合、この衝撃力は次式で算定される（例えば樫木，1991）。

$$F = 2\pi\rho r^2 v^2 \left(\frac{2t}{\tau} - \frac{t^2}{\tau^2} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 r は球体の半径、 v は水位変動の時間変化率、 τ は衝撃力の作用時間、 t は球体が水面に接触してから時間である。図-10に式(6)で算定される衝撃波力と実験値との比較を示す。この図から、横軸が0.8以下では比較的良好に再現できているが、それ以上では計算値の方が大きくなっている。これは v が増加するにつれて衝撃波力の周波数成分が波力計の固有振動成分に近づき、測定波力の解析にあたって固有振動数以上の高周波数成分をcut offしたためと考えられる。

一方、基本周波数成分が卓越する波力はMorison式により算定が可能であると考えられるが、流速と波力の時間波形から求めた抗力係数および慣性力係数は大きくばらつた。

5. 捨石防波堤の平衡勾配の予測法

まず水理実験により、斜面勾配1:2の捨石堤に波高20 cm、周期2.0秒の波を入射させ、断面の変形をビデオカメラにより撮影した。図-11にその様子を示す。この図から、静水面直下の捨石が下方に移動し、堆積することで平衡断面が形成されていることがわかる。また実験の際の視察から、静水面付近の捨石が衝撃的な波力によってlift-upされて不安定になり、その後、捨石自体の重力やdown-rush時の戻り流れなどの周期的な波力により下方に移動していく様子が確認された。

次に、青木ら（1994）によって提案されている捨石単体の動的挙動シミュレーションを行った。これは図-12に示すように捨石防波堤斜面上の捨石3つを取り出したモデルを設定し、上部捨石の動的挙動特性について解析を行うもので、簡単のため捨石は球体とする。ここに、 R は作用波力、 R_T 、 R_L はそれぞれ作用波力の水平方向成

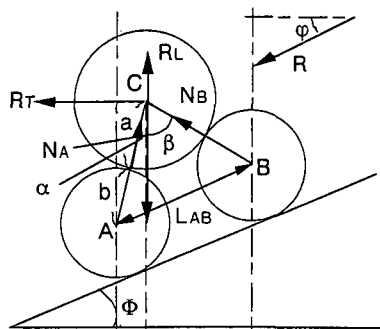


図-12 捨石球体モデル

分、鉛直方向成分、 a 、 b はそれぞれ上部、下部捨石の半径、 W は上部捨石の水中重量、 g は重力加速度、 N_A 、 N_B は2接点における垂直抗力であり、次式で示される。

$$N_A = \frac{(Wg - R_L)\tan\beta + R_T}{\sin\alpha + \tan\beta\cos\alpha} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$N_B = \frac{(Wg - R_L)\tan\alpha - R_T}{\sin\beta + \tan\alpha\cos\beta} \quad \dots\dots\dots (8)$$

捨石の運動は $N_A > 0$ かつ $N_B < 0$ のとき左方移動、 $N_A < 0$ かつ $N_B > 0$ のとき右方移動、 $N_A > 0$ かつ $N_B > 0$ のとき静止、 $N_A < 0$ かつ $N_B < 0$ のときlift-upとなる。左方移動をする場合の運動方程式は次のようになる。

接線方向

$$M(a+b)\frac{d^2\theta_A}{dt^2} = R_T\cos(\alpha - \theta_A) + (R_L - Wg)\sin(\alpha - \theta_A) + k_2F_s \quad \dots\dots\dots (9)$$

法線方向

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

回転

$$\frac{2}{5}M(a+b)\frac{d^2\theta_A}{dt^2} = k_1F^* - k_2F_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 M は上部球体の質量、 θ_A は移動角、 F_s は滑り摩擦、 F^* は転がり摩擦力、 k_1 、 k_2 はそれぞれ転がり方向、移動方向により1または-1をとる係数である。右方移動の場合の運動方程式は、移動、回転方向を逆に考えることで同様に求められる。捨石の運動形態は回転のみの運動と回転と滑りを伴う運動の2つが考えられ、これらについて条件式を適用し移動角 θ_A を算出した。数値計算法はRunge-Kutta法4次公式を用い、時間ステップは $T/200$ とし、1ステップ前の計算によって得られた θ_A 、角速度 ω 、移動速度 v により運動形態を選択した。また、図-11の下部球体A、Bの中心を結んだ領域で解を求め、それを越えた場合は次の領域に入ったものとして計算を行った。

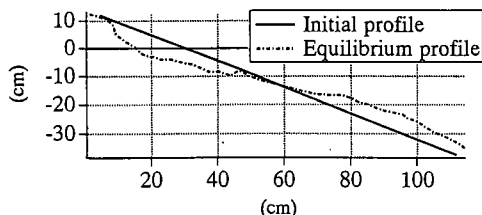


図-11 防波堤の平衡断面

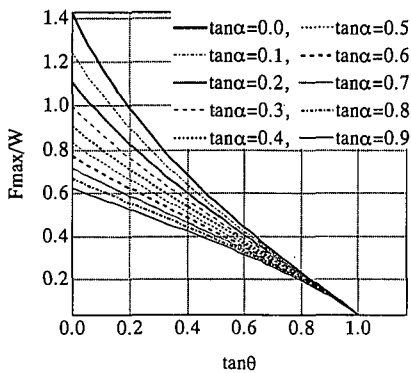


図-13 作用波力の最大値と作用方向に対する平衡勾配

この挙動シミュレーションを捨石防波堤斜面全体に適用することにより、平衡勾配の予測を行う。平衡勾配は静水面付近の捨石が衝撃的な波力により lift-up され捨石自体の重力もしくは周期的な波力によって下方に運ばれることによって形成されることが確認できたので、基本周波数成分が卓越した周期的な波力によって平衡勾配が形成されると考える。この波力は Morison 式によって算定が可能であると考えられるが、前述したように実験データから求められた抗力係数および慣性力係数の値が大きくばらついたことから、本モデルでは、抵抗係数から求められる抗力は付加質量力より卓越することから作用波力を抗力のみと仮定する。図-13 に本解析で得られた捨石単体が崩落する限界の外力の無次元量と捨石防波堤の斜面勾配の関係を示す。ここに $\tan \alpha$ は外力の作用方向である。この図から、捨石防波堤の初期斜面勾配と波力の作用方向が分かれば捨石単体が崩落する限界の波力が決定されることになる。逆に、作用波力の最大値とその作用方向が分かれば、捨石が崩落せず、断面が安定する斜面勾配が求められることになる。

次に、実験値との比較を行う。断面変形実験を行ったケースでは静水面下 10 cm 付近の斜面勾配変化が最も大きく、 $\tan \theta = 0.5$ から $\tan \theta = 0.4$ に変化している。この測点での変形後の作用波力は 28.9 gf であり、その作用方向を水粒子が斜面方向に運動すると仮定すると $\tan \alpha = 0.4$ である。これらの値を用いて図-12 から捨石単体が崩落しない斜面勾配を求めると、 $\tan \theta = 0.44$ となり、実験での平衡勾配 $\tan \theta = 0.4$ とほぼ一致している。

捨石防波堤の断面が変形すると、碎波点が沖側へ移動し作用波力にも変化が生じる。つまり、変形が進行するとともに作用波力も変化していくので、より厳密に平衡勾配を算出するには断面変形に伴う波変形および作用波力の変化を詳細に把握する必要があると考えられる。また、構造物の特性を表すパラメータ任意に与えたが、適切なパラメータの値を検討することも必要である。

6. 結 語

本研究で得られた主要な結果をまとめる。

- 1) 捨石防波堤斜面上の水粒子はほぼ直線的に運動し、 $2.0 < \xi < 3.0$ のとき斜面方向の流れが卓越する。
- 2) 捨石に作用する波力は、静水面付近では衝撃的な波力が卓越し、水深が深くなるにつれて基本周波数成分の波力が卓越する。また、最大波力は碎波帯相似パラメータが 2.5~3.5 の範囲の波が入射した場合に極大となる。
- 3) 捨石防波堤斜面上の波動解析として Porous Body Model を用いることにより、透水性斜面上の戻り流れや非線形な波変形および最大流速と水粒子の運動方向もほぼ再現できる。
- 4) 捨石は、静水面付近の衝撃的な波力により lift-up されて不安定になった後、捨石自体の重力の効果および基本周波数成分が卓越した波力により移動し、平衡勾配を形成する。
- 5) 捨石単体の動的挙動シミュレーションから形状変化予測モデルを構築し、作用波力の最大値と作用方向に対する平衡勾配を求めた。この結果は実験結果とある程度の一致が見られた。

参 考 文 献

- 青木伸一・樫木 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 回年次学術講演会講演概要集, pp. 826-827.
- 韓山 勉・鹿島遼一 (1992): ポーラスボディモデルによる透水性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究所研究報告, U91048.
- 樫木 亨・柳 青魯・大西明徳 (1982): 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 428-432.
- 樫木 亨 (1991): 波と稜砂と構造物, 技報堂出版, pp. 134.
- 出口一郎・樫木 亨・白谷宏司 (1988): 透水層上の波浪変形に対する非線形ダルシー即の適用性について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 487-491.