

均一球からなる二次元捨石防波堤の表層粒子移動に関する数値計算

NUMERICAL SIMULATION ON SURFACE PARTICLES DISPLACEMENT OF 2-D UNIFORM SPHERE RUBBLE MOUND BREAKWATER

Dinar C. ISTIYANTO¹・佐藤 道郎²・河合 智昭³
Dinar C. ISTIYANTO, Michio SATO and Tomoaki KAWAI

¹学生会員, 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

²正 会 員, 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³学生会員, 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

A basic study to assess the displacement process of surface particles of rubble-mound-structure armor layer under normally incident monochromatic waves has been conducted. The present study tries to investigate the relation among wave-induced pressures, velocities, and forces acting onto the armor particles of rubble mound breakwater slope, and accordingly the reaction of the particles against those forces. At the same time, the relation among wave height, wave period, and slope angle of the structure on the particle initial movement has been assessed. A two-dimensional numerical reshaping-model of uniform sphere particles breakwater was developed to study this phenomena. The simulation involved two separate models, i.e. wave model and displacement model, which are linked by iteration.

It was observed that the maximum resultant wave forces always exist close to the water line during wave run-up or run-down and cause considerable displacement of particles at this area.

Key Words : Rubble mound, armor-layer, wave-induced forces, particle initial movement, displacement, stability

1. まえがき

捨石被覆層の安定性に関する研究はこれまでに数多く行われてきた。主として、その安定性は、ある構造上のパラメータについて、ある波の条件下で耐えることが出来る被覆材の所要重量を決定する問題と直接関連づけられてきた。これまで提案された設計公式の多くは室内実験もしくは現地実験による経験則に基づいている。それらは実際の設計にとって有用であることは言うまでもないが、波との相互作用による被覆材粒子の変位過程を再現できるわけではない。この過程を明らかにしようという研究は限られている。

Kobayashi & Greenwald¹⁾ は不透水基板上に礫を貼りつけた 1:3 の勾配を持つ斜面上の礫の移動をモデル化した。Norton & Holmes²⁾ は直角に入射する規則波による捨石防波堤の平衡断面に至る被覆材変位の数値計算モデルを開発した。入射

波の計算は Kobayashi³⁾ によるものを用い、波力は Morison 型の式を用いた。また、荒木と出口⁴⁾ は捨石の挙動を表す運動方程式を、モデル化した波力の時間変化と静水面からの上下方向の分布に対して逐次積分し、各捨石の運動を追跡し断面変化を計算している。これらの研究では各捨石に作用する荷重の時間変化については十分説明されているわけではない。

本論文では捨石防波堤に垂直に入射する規則波により生じる、捨石周辺の速度場、圧力場、捨石に作用する力の時間的空間的变化とそれに対する捨石の挙動の関係を調べ、表層粒子の初期移動について主として考察している。

2. 計算の概要

一様な球形粒子からなる防波堤の断面変形に

関する数値モデルを構成した。このモデルは、波変形モデル、堤体内の浸透流モデル、捨石の移動モデル、の三つのサブモデルからなり、入射する波、堤体内の流れの計算結果により捨石の挙動が計算され、その結果としての捨石防波堤の変形が入射波の計算に反映されるようにリンクされている。

(1) 波の計算

堤外の波と堤内の流れの間で特別なカップリングの問題もなく、同時に計算できる利点を有することから、堤体に作用する波の計算には SOLA-VOF コード⁵⁾を用いた。これは Navier-Stokes の方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} - \nu_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g = 0 \quad (2)$$

及び、連続方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

に基づいている。 x 軸は静水面に沿ってとられ、 z 軸は鉛直上方にとられる。 (u, w) は (x, y) 方向の流速成分、 t は時間、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 ν_t は乱流粘性係数を表す。

(2) 堤体内の流れの計算

$Re \sim 150$ 程度の porous な構造物内部の流れに対する次式 (Van Gent⁶⁾) を用いた。

$$\frac{1+c}{n} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} - gau + gbu \sqrt{u^2 + w^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1+c}{n} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} - gaw + gbw \sqrt{u^2 + w^2} + g = 0 \quad (5)$$

これらの式における (u, w) は浸透層流れの平均流速成分である。また、 a, b, c は Forchheimer の式

$$I = au + bu|u| + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6)$$

で用いられる係数で以下のとおりである。

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{gD_{n50}^2}$$

$$b = \beta_c \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{gD_{n50}}$$

$$c = \frac{1 + \frac{1-n}{n} \left(0.85 - \frac{0.015}{A_c} \right)}{ng}$$

ここで KC 及び A_c は次で与えられる。

$$KC = \frac{\hat{U} T}{nD_{n50}}, \quad A_c = \frac{\hat{U}}{ngT} > \frac{0.015}{\frac{n}{1-n} + 0.85}$$

これらの式中、 I は動水勾配、 n は空隙率、 $\hat{U}$ は堤体内の最大流速、 T は波の周期、 ν は粘性係数、 $D_{n50} = (W_{50} / \rho_a)^{1/3}$ 、 W_{50} 捨石の質量分布における 50% の値である。 α 及び β_c は Van Gent⁷⁾ にならいそれぞれ 900 及び 1.1 とした。

これらの計算によって水位、流速、圧力の各瞬間における値が計算され、水表面の変形が計算される。

(3) 捨石に作用する力

水中の物体に作用する波による力は抗力 F_D 、慣性力 F_I 、揚力 F_L の三つである⁸⁾。捨石の挙動に関係する力として、さらに、浮力 F_B 、捨石重量 W を考慮しなければならない。その算定に当たって次の表現が用いられた。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D C_{SD} \frac{\pi}{4} D^2 u |u| \quad (5)$$

$$F_I = \rho_w C_I C_{SI} \frac{\pi}{6} D^3 \frac{du}{dt} \quad (6)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w C_L C_{SL} \frac{\pi}{4} D^2 u^2 \quad (7)$$

$$F_B = \rho_w g C_{SI} \frac{\pi}{6} D^3 \quad (8)$$

$$W = \rho_s g \frac{\pi}{6} D^3 \quad (9)$$

ρ_w, ρ_s はそれぞれ水と球の密度、 D は球の径である。係数 C_D, C_I, C_L は部分的に水没している場

合にはそれぞれ C_{SD} , C_{SI} , C_{SL} をとるものとする。
 C_{SI} は排水容積に関係するが、 C_{SD} と C_{SL} は力に平行な方向への射影面積の減少量と関係する。 C_D , C_L の値は Reynolds 数 Re に関連し、現在計算している条件下では Re はおよそ 4×10^4 程度で、Shore Protection Manual (1984) によれば、 $Re < 1 \times 10^5$ に対して $C_D = 1.2$ を、また、 $Re < 2.5 \times 10^5$ に対して $C_L = 2.0$ の値を示しているののでこれらの値を用いた。揚力係数 C_L は Norton と Holms²⁾ にならって $C_L = 0.2$ を用いた。
 なお、浮力の作用方向は波の各位相に応じた水面に垂直な方向である⁹⁾。

(4) 波力と捨石の移動開始

Norton と Holms²⁾ は Den Brecker の研究に基づき、捨石の移動のメカニズムは滑動や浮遊よりも転動であることを結論づけた。そして、この点を考慮して、捨石の移動の開始は転動を可能ならしめる点でのすべての力によるモーメントの釣り合いを考えるのが妥当と思われることから、表層のある粒子とそれを支えている粒子の接触点でモーメントの釣り合いを考え、外乱によるモーメントが復元モーメントをある指定した最小の継続

時間にわたって続いたときに移動が開始するものとした。図1は単一粒子に作用する力を表している。 F_x , F_z はそれぞれ水平波力成分と鉛直波力成分、 $F_z (= \sqrt{F_x^2 + F_z^2})$ はそれらの合力で、 F_B は浮力、 W_A は捨石重量を表す。また、EH, EB, EW は隣接する捨石の接触点におけるそれぞれの力の moment arm を表す。

まず、捨石断面を決め表面の捨石に番号をふり、座標データを波の計算に用いる(図2)。波一周期の計算を行い、斜面に沿って必要に応じて設けた sampling station における水位、流速、加速度、水表面の傾きの計算結果を蓄えておく。

捨石の移動については、外部の流れに晒されている表面の捨石だけが移動すると考える。その捨石は多くて三個の隣接する捨石と接して支持されている。各表面の捨石(SP:surface particle)に対する支持している捨石(CP:contact particle)をデータとして与えておく。

次に、防波堤斜面の下端に最も近い SP から各 SP について安定について調べていく。SP の重心における速度、加速度の値は近くの sampling station における値から内挿して決められる。それらから波力が計算され、移動の条件に達していれば波力の作用方向で最も抵抗の小さい方向に d_{min} で与えられる距離移動するものとする。最も抵抗の小さい方向として外乱のモーメントと復元モーメントの比が最大となる方向が取られる。二次元の場合には上か下に転がるものとする。その大きさとして Norton と Holms が示した $d_{min} = 5D_{n50}$ を用いた。この距離移動後に静的に安定な位置にあれば転動は止み、そうで無ければさらに転動を続ける。

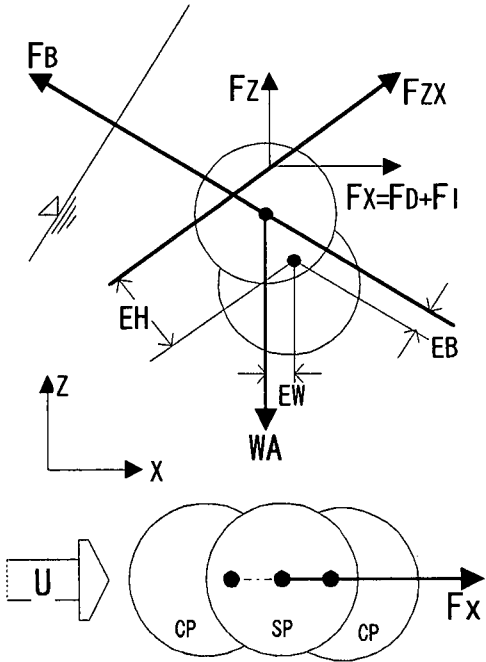


図1 粒子に作用する力

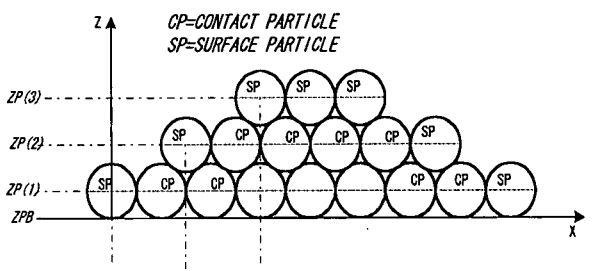


図2 粒子の配置

全ての表面粒子について調べた後、結果としての断面形は続く波のサイクルの計算に用いられる。このような繰り返しを必要な波数だけ繰り返す。この計算法は捨石が転がるという前提でかなり単純化されたもので、実際の捨石がこのように単純化されたモデルで記述できるものかはさらに検討を要すると思われ、より厳密には荒木・出口のようなモデル化に基づくほうが良いと思われるが現時点でそこまで手が回っていない。

3. 計算結果と考察

水深 0.6m のところに設けた 0.03m の直径を有する均一球形粒子からなる斜面勾配が 1:1.75、1:3、1.5、1:9 の四種類の捨石防波堤に波高 0.18m、周期 1.93 秒の波が作用する模型実験の条件で計算を行っている。

まず、図 3 に堤体の内外における水面、圧力場の計算例を示した。図 4 は速度場の計算例である。図 5 は粒子の移動の計算例である。どの勾配でも粒子の移動の始まるのは波の run up と run down の生じている間の部分で、そこから粒子が転がった様子が示されている。数サイクルの波の作用で、中には上方に移動する粒子もあり、斜面勾配が緩やかな場合には上方で落ち着いてしまうことも考え得る。しかし、ここで計算した範囲では、結局は多くの粒子は下方に移動する。

このあたりの状況を見るために、粒子を動かす駆動力である波力の斜面に沿う分布の波位相に伴う変化を図 6 に示した。この図から水面付近の粒子に作用する合力が局部的にかなり大きくなっており、それから外れると急速にその大きさは小さくなっ

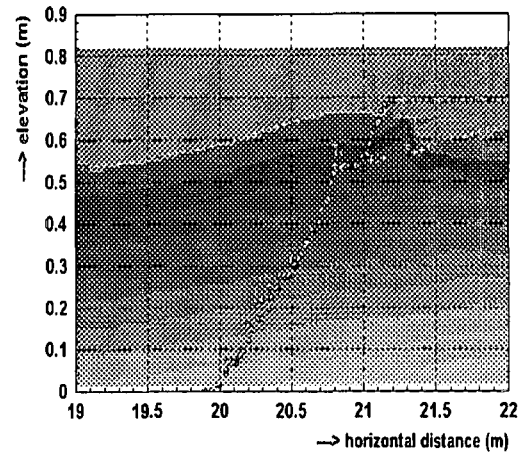


図 3 堤体内外の水位と圧力の計算例

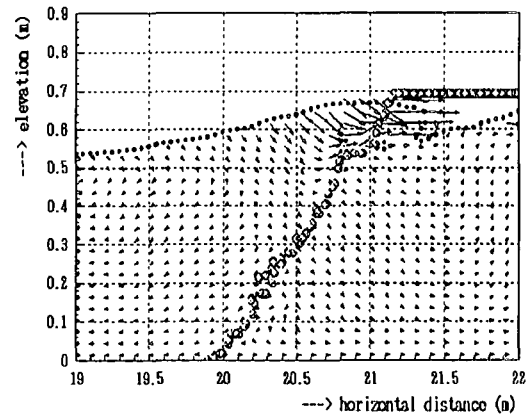


図 4 流速の計算例

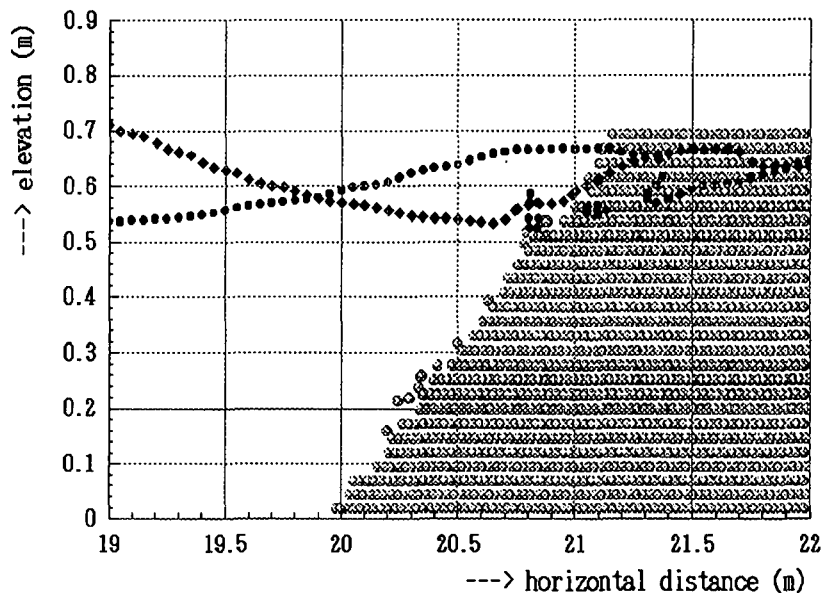


図 5 捨石の移動計算の例

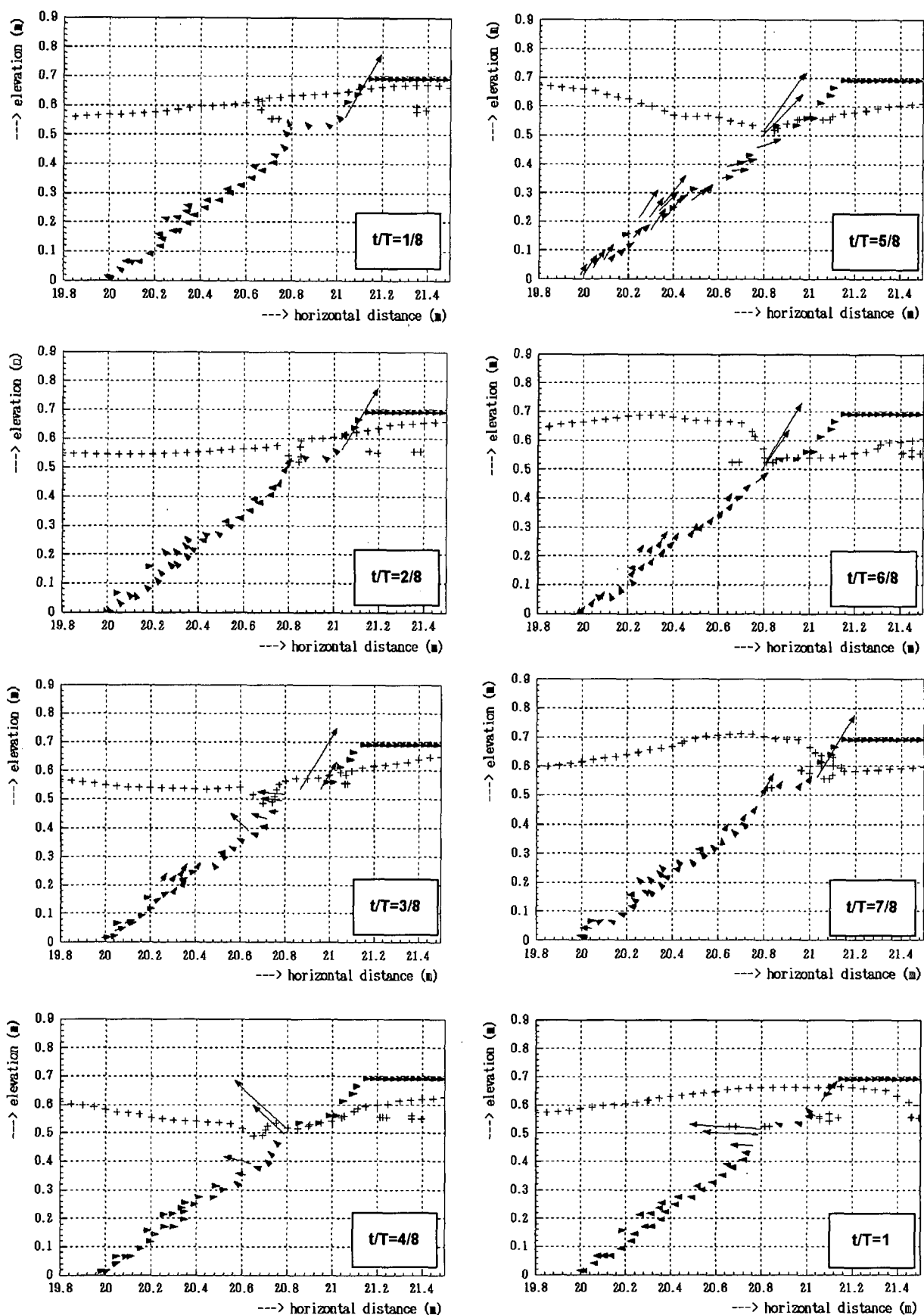


図6 捨石に作用する波力の斜面上の分布と位相による変化

ている。また、その方向も波の位相によって変化しており、波が斜面に打ちつけるときに斜面にほぼ沿ってかなり大きな力を及ぼしており、捨石を上方に押し上げることは容易に想像できる。しかし、谷に向かう位相で力の向きは海側となっており、この間に下方へ転がることが考えられる。

実現象を忠実に再現するには更に超えるべき課題があるが、物理実験ではなかなか把握が難しい点に、このような計算はイメージを与えてくれるものとして有用である。

4. あとがき

均一球からなる二次元捨石防波堤の捨石移動に関する数値計算の試みについて述べた。こういった計算で球粒子の移動の定性的な傾向はシミュレートできそうなことがわかった。そして、被覆粒子の移動過程の理解に役立つと思われる。今後、計算の詳細について議論できるデータとの比較による検討が一つの課題である。また、動き始めた粒子の移動過程についてはもっと厳密な扱いも望まれる。しかし、現時点でこの計算でもケースの計算にかなり長時間を要し、計算環境の改善に応じて改善していきたい。

参考文献

- 1) Kobayashi, N., Greenwald, J.H.: Water Oscillation and Riprap Movement, Coastal Engineering Journal, 1988.
- 2) Norton, P.A., Holmes, P.: Armor Displacement on Reshaping Breakwaters, ICCE Proceeding 1992, pp. 1448-1460.
- 3) Kobayashi, N. and Wuryanto, A.: Numerical model for waves on rough permeable slopes, Journal of Coastal Research, SI 7, pp.149-166
- 4) 荒木進歩・出口一郎: 捨石防波堤の断面変形に関する研究、海岸工学論文集、第 44 巻、pp.531-535, 1997
- 5) Nichols, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R.S.: SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355, 1980
- 6) Van Gent, M.R.A., Tonjes, P., Petit, H.A.H., Van den Bosch, P., Wave Action on and in Permeable Structures, Proc. of ICCE 24th, 1994.
- 7) Van Gent, M.R.A.: Permeability Measurement for The Modeling of Wave Action On and In Porous Structure, Proc. of Coastal Dynamics, 1992.
- 8) Brebbia, C.A., Walker, S., 1979, Dynamic Analysis of Offshore Structures, Newnes - Butterworths, pp. 112-132.
- 9) Brandtzaeg, A., The Effect of Unit Weights of Rock and Fluid On The Stability of Rubble Mound Breakwaters, Proc. of ICCE 10th, 1966.