

VOF法とDEM法による捨石構造物変形予測モデル とその適用性に関する研究

A STUDY FOR ANALYSIS ON DEFORMATION OF RUBBLE MOUND STRUCTURE USING VOF AND DEM METHOD

金 美錦¹・黒岩正光²・松原雄平³・村中亮太⁴

MiKum KIM, Masamitsu KUROIWA, Yuhei MATSUBARA and Ryota MURANAKA

¹非会員 博(工) 韓国海洋大学校 海事大学 (〒606-791 大韓民国 釜山廣域市影島區太宗路1番地)

²正会員 博(工) 鳥取大学准教授 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工博 鳥取大学教授 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

⁴非会員 福井県 (〒910-0005 福井市大手3丁目17番1号)

A numerical model for computing the deformations of rubble mound, composed of various size materials, was proposed. In the numerical model, wave field into the mound structure was computed by CADMAS-SURF. And the deformation of the structure was computed using DEM. Interaction of wave and sectional deformation of structures was considered, and to present the variation of behavior caused by various properties, computation was carried out with random coefficients by Monte Carlo simulation for contact stiffness and friction angle. The validity of the model was investigated by comparing with laboratory tests. The experiments were carried out using rubbles and glass balls with the diameters of 2.9cm, 2.6cm and 1.5cm. Furthermore, the deformation characteristics of rubble mound composed of various size materials were clarified. The applicability of the model was discussed by comparing with the experimental results.

Key Words : DEM, CADMAS-SURF, Rubble mound, Contact stiffness, Monte Carlo simulation

1. はじめに

巨石を捨て込んで防波堤として波浪を制御する方式は、捨石堤あるいは傾斜堤と呼ばれ古くから用いられて来た形式で、防波堤の原型ともいえるものであり、現在でもなお盛んに用いられている。特に、地盤の形状に応じた施工ができること、反射波を減じ周辺海域を航行する船にあまり影響を与えないこと、被害を受けても全面破壊に至らず維持補修が容易であることなどから、諸外国ではなお防波堤の主流となっている¹⁾。

また、最近では、景観の面からも優れているということで、透過性潜堤を用いた施工例が増えつつあるが、捨石などを用いて潜堤を施工する場合、潜堤の安全性を確保するのが極めて重要である。繰り返して襲来する大波浪による潜堤の破壊を防止するためには個々の捨石同士の衝突と干渉、そして捨石と波との相互作用を考慮して波力による構造物の挙動を正確に予測する必要がある。

捨石などによる透過性潜堤の沈下、被覆石あるいはブロックなどの転倒などによる断面変形解析にお

いては、個別要素法 (DEM) を用いた解析がなされている (藤井ら²⁾, 荒木ら³⁾, 高山ら⁴⁾)。著者ら⁵⁾は混合粒径から構成される捨石構造物に対するVOF法とDEMによる変形解析モデルを提案したが、実験結果との比較が十分でなく、モデルに含まれるパラメータの設定方法や適用性が十分に議論されていないという問題があった。本研究では、まず、模型実験により混合粒径から構成されるマウンドの変形特性について把握するとともに、数値計算結果と模型実験結果と比較し、モデルの適用性を検討し、各種パラメータの設定方法などを検討した。

2. 模型実験

(1) 実験方法及び実験条件

実験に用いた粒子の重量はハドソン公式によって算出した。その際、比重としてはガラスの平均比重2.5を、波高は12cm、斜面の勾配は30度、安定係数としては水理公式集⁶⁾を参考に10とした。その結果に基づき、平均粒径2cmの砕石で構成されたマウン

ドと2.9cmと2.6cm, 2.6cmと1.5cmの混合粒径のガラス球で構成されたマウンドの三種類を用いて行った。

図-1中の上図は実験装置の概要を、下図はその詳細を示したものである。実験に用いた波動水槽は長さ25m, 幅0.5m, 高さ0.6mで、水路の一端にはフラップ式造波機が、他端に消波工が設置されている。実際の実験では、横断方向の影響を出来る限り少なくするため、模型を設置する領域の水路幅を隔壁板で仕切り15cmとした。そこに、下部長さ100cm, 高さ20cm, 天端長20cm, 幅15cmのマウンドを作成した。マウンドの下には、平均直径1cmの砕石を敷き海底地盤とした。水深と流体力の関係を調べるため、各々のマウンドに対して天端水深を5cm(水深25cm)と2cm(水深22cm)の2つのケースに分けて実験を行った。マウンド模型の設定条件、天端水深および波浪条件を表-1に示す。水面波形は、容量式波高計を用いて測定し、マウンドの沖側に2台を設置した。また、マウンド通過後の波高を測定するため、マウンド岸側に1台設置した。測定された水面波形より、各点における波高および周期を算定した。

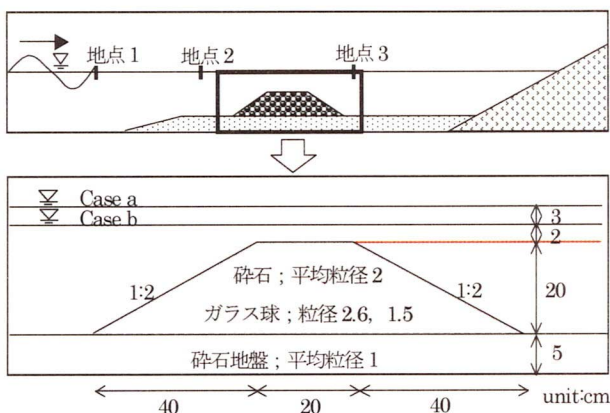


図-1 実験装置の概要

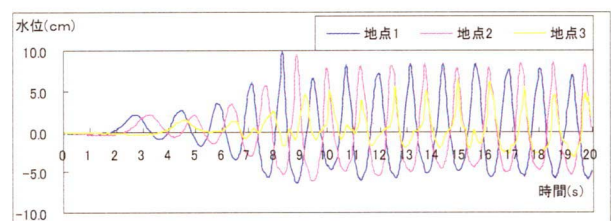
表-1 実験条件

Case	1		2		3	
	a	b	a	b	a	b
天端水深 (cm)	5	2	5	2	5	2
波浪条件 波高 (cm), 周期 (s)	11.8 1.2	11.7 1.2	14.5 1.2	12.0 1.2	13.8 1.2	11.4 1.2
材料と 粒径	砕石 (平均粒径 2cm)		ガラス球 (2.9cm, 2.6cm)		ガラス球 (2.6cm, 1.5cm)	
測定時間	3分					

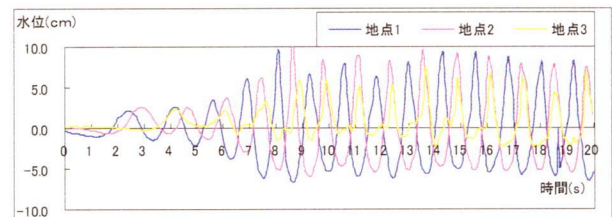
(2) 実験結果

図-2 および図-3は、天端水深5cmでの造波開始から20秒間のマウンド前面とマウンド背後の水面形状の測定結果とマウンド変形実験結果を示したもので

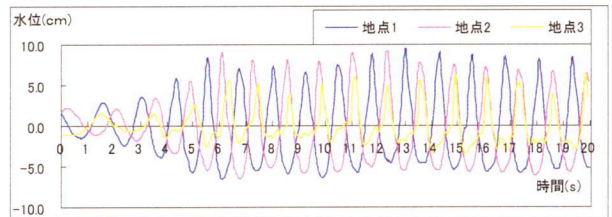
ある。図-2に示すCase1の結果から、マウンドから沖側に2m位離れた地点1における平均波高は11.8cmであったが、マウンド前面の地点2における平均波高は11.9cm, また、マウンド背後の地点3では、砕波の影響で、平均波高7.95cmとなっている。Case2では平均波高11.16cmであったが、地点2では平均波高12.5cm, また、地点3では、砕波の影響で、平均波高8.8cmである。また、Case 3では、地点1では、平均波高13.84cmであったが、マウンド直前では波高12.57cmとやや小さくなっている。マウンド通過直後である地点3では、Case 1と2の結果同様に、砕波の影響により、9.23cmに減衰した。



a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3

図-2 時系列波形分布 (Case a; 天端水深 5cm)

図-3のCase1のマウンド変形結果を見ると、わずかであるが、マウンド沖側の法肩の砕石が岸側に移動し、岸側のマウンド上部と法尻部分に堆積していることがわかる。しかし、Case2の場合には、沖側のマウンド法肩におけるガラス球の波による往復運動は確認されたが、断面が変形するまでは至らなかった。また、Case3では、沖側のマウンド法肩の要素が岸側に移動し、岸側のマウンド法尻部分に堆積している。そして、岸側の法肩の要素が法尻へ移動しているが、侵食量は岸側の方が多い。これは、マウンド岸側法肩部分で生成された強い乱れによるものと考えられる。

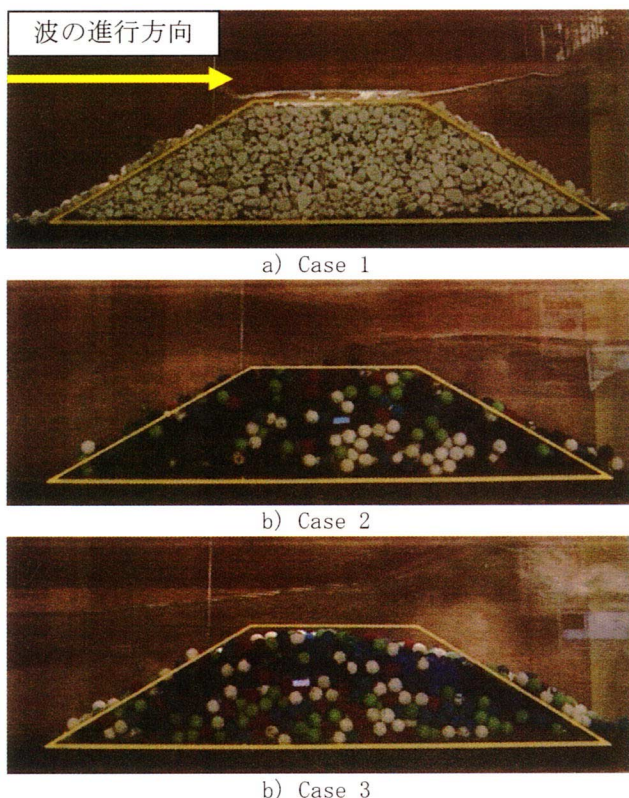


図-3 マウンドの変形実験結果(実験開始3分後)

図-4および図-5は、天端水深2cmでの水面形状の測定結果とマウンド変形実験結果を示したものである。図-4に示した結果より、天端水深5cmの場合と同様に、すべてのケースにおいて、マウンド上で碎波が発生し、マウンド背後の地点3では、波高が減衰しているのが明らかである。Case 1 では、地点2で波高12.44cmであったのが、地点3では、碎波の影響で、6.97cmであった。Case2における地点2および3ではそれぞれ10.33cmおよび5.82cmである。また、Case3では、マウンド前面で12.0cmであり、マウンド背後では、他のケースと同様に、碎波し6.68cmに減衰している。天端水深5cmのケースと比較して、天端上での波高減衰率が高い。

つぎに、図-5に示された Case1 のマウンド変形結果から、マウンド沖側の法肩の碎石が岸側に移動し、岸側のマウンド上部と法尻部分に堆積したことがわかる。また、図-3のa) に比べて移動数が増加した。Case2の場合には、わずかであるが、沖側のマウンド法肩の要素が動き始め反対側の法面へ移動した。Case3を見ると、沖側のマウンド法肩の要素が岸側に移動し始め、岸側のマウンド法尻部分に堆積した。マウンド岸側での波の乱れによる侵食が発生したが沖側から侵食され運ばれた要素の堆積によって、結果的には、沖側の法肩が侵食され、岸側の法面に堆積した。図-3の断面変形とは定性的に反対の結果となった。

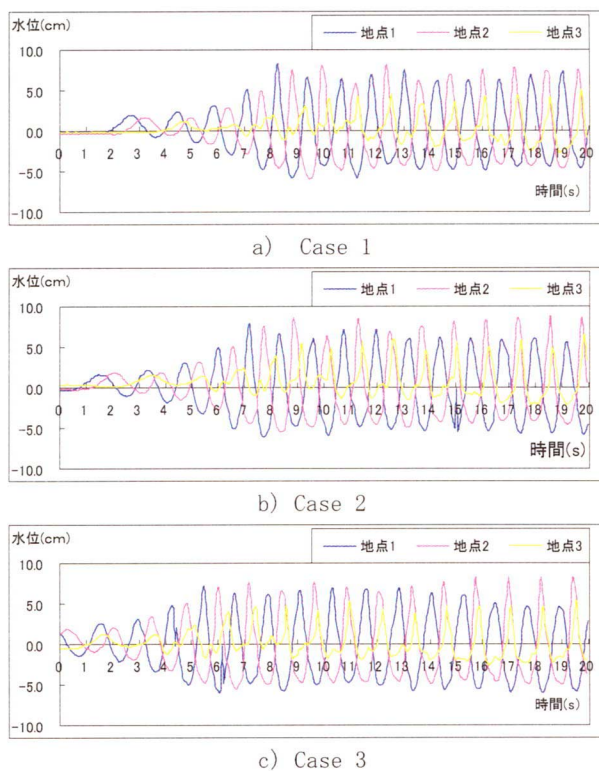


図-4 時系列波形分布(Case b ; 天端水深 2cm)

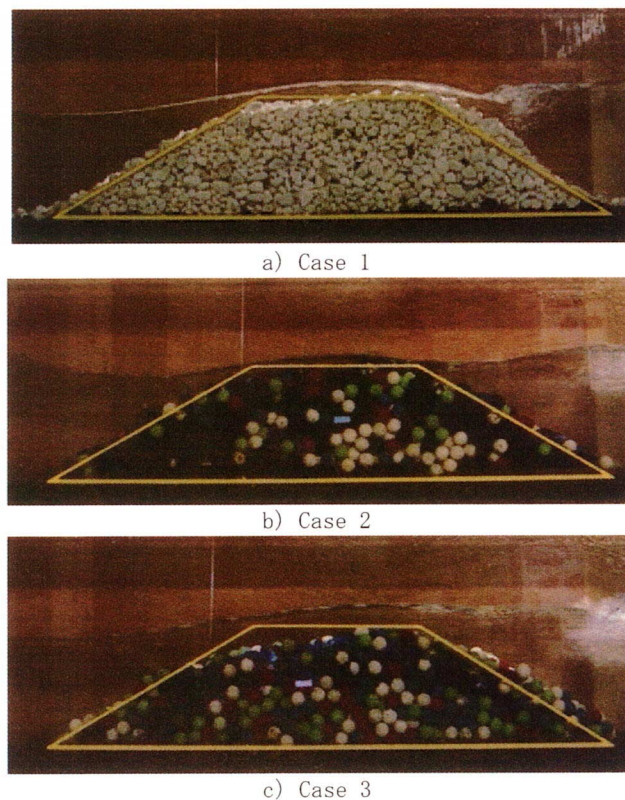


図-5 マウンドの変形実験結果(実験開始3分後)

3. 数値解析

(1) 数値解析モデルの概要

a) 波動場解析

波動場の計算には、自由表面を比較的良好に再現可能なHirt⁷⁾により提案されたVOF法を基に開発された数値波動水路(CADMAS-SURF)⁸⁾を用いる。海岸域における流動場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。そのため、数値波動水路の基礎方程式は、2次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式(1)～(3)である。

連続式は

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

運動方程式は

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_z g \quad (3)$$

ここに、 t は時間、 x, z は水平、鉛直座標、 u, w は流速の水平、鉛直成分、 ρ は密度、 p は圧力、 v_e は分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g は重力加速度、 γ_v は空隙率、 γ_x, γ_z は水平、鉛直方向の面積透過率である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ は C_M を慣性力係数とすると式(4)のように表され、右辺第2項が構造物から受ける慣性力の効果である。

$$\begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \quad (4)$$

D_x, D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_p, S_u, S_w は造波ソースのためのソース項である。また、 C_D を抵抗係数として多孔質体からの抵抗力 R_x, R_z は、次のように流速の2乗に比例する形でモデル化する。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (5)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta z$ は水平、鉛直方向の格子間隔である。

b) 粒状体解析

粒状体の計算にはCundall⁹⁾により提案されたDEM法を用いた。

2つの岩塊が接触あるいは衝突するとき、岩塊は弾性体ではなく、また接触点近傍の局所的な塑性変形や破損などが生じるために完全弾性的衝突とはならない。そこで、岩塊を剛体とみなし、岩塊のもつ弾性的および非弾性的性質は接点間に挿入した弾性スプリング(弾性係数 K)と粘性ダッシュポット(粘性係数 η)で表現する。この時、2つの岩塊(質量 m 、慣性モーメント I)に注目すれば、並進($\mathbf{X}$)及び回転(ϕ)に関する運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{\mathbf{X}} + \eta\dot{\mathbf{X}} + K\mathbf{X} = 0 \quad (7)$$

$$I\ddot{\phi} + \eta r^2 \dot{\phi} + Kr^2 \phi = 0 \quad (8)$$

これらは、減衰振動を表し、与えられたすべての岩塊について同じような運動方程式を連立して解くことによって、運動状態から静止状態に至る岩塊の挙動を解析できる。式(7)、(8)を時間増分 Δt によって差分近似すると共に、未知変位 $\mathbf{X}$ と ϕ (直接には加速度 $\ddot{\mathbf{X}}$ と $\ddot{\phi}$)を陽に含む式で近似する逐次解法で計算する、 $\mathbf{X}$ についてそれを示すと、式(7)を変形して、

$$m[\ddot{\mathbf{X}}]_t = -\eta[\dot{\mathbf{X}}]_{t-\Delta t} - K[\mathbf{X}]_{t-\Delta t} \quad (9)$$

とおき、新しい加速度 $[\ddot{\mathbf{X}}]_t$ (これを数値積分して新しい変位 $[\mathbf{X}]_t$ が求まる)を前回の変位 $[\mathbf{X}]_{t-\Delta t}$ に基づく接触時の作用力(右辺)の陽関数とみなして逐次計算する方法である。

d) VOF法とDEM法の連成

粒状体の解析は各要素間の作用力をバネとダッシュポットで表現するDEMを用いる。粒状体を構成する個別要素は円柱体と仮定する。運動方程式は次式である。

$$(M_i + M'_i) \ddot{x}_p = \sum_j [F_x]_{ij} + [f_x]_i \quad (10)$$

$$(M_i + M'_i) \ddot{z}_p = \sum_j [F_z]_{ij} + [f_z]_i + v_i (\rho_p - \rho) g \quad (11)$$

$$(I_i + I'_i) \ddot{\omega}_p = \sum_j [M]_{ij} \quad (12)$$

ここで、 M_i, M'_i は要素 i の質量及び付加質量、 $\ddot{x}_p, \ddot{z}_p$ は要素 i の x, z 軸方向の加速度成分、 F_{xij}, F_{zij} は要素 i に接触している要素 j から受ける要素間作用力の x, z 方向成分、 f_{xi}, f_{zi} は要素 i に作用する波力の x, z 方向成分でモリソン式で計算する、また、 I_i, I'_i は要素 i の慣性モーメント及び付加慣性モーメント、 $\ddot{\omega}_p$ は要素 i の各軸方向の角加速度、 M_{ij} は要素 i に作用する各軸回りのモーメントである。

(2) 解析領域と解析条件

本研究では構造物を構成する要素群を円形要素と設定する代わりに、要素に与えるバネ係数と粘性減

衰係数，そして，摩擦係数を表-2の値を基準にモンテカルロ法を使ってランダムに与えることによって，要素構成のばらつきを表現した．

VOFによる波動場の解析の場合には，計算時間の短縮のため， $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ s とし，天端水深は2cmに設定する．外力としては数値波動水路と同じ条件で周期1.2 s，波高0.12mの波を作用させる．構造物内部の流れを解析するためにマウンド構造物の空隙率を，前野ら¹⁰⁾を参考にして0.35とし，抗力係数と慣性力係数は各々0.5と1.5とした．また，揚力係数に対しては，伊藤ら¹¹⁾の研究を参考にて0.5にした．

粘性減衰係数については，水中での挙動であることを考慮して，収束を早めにするため，各々の要素に対し $\eta = 2\sqrt{mk}$ （木山ら¹²⁾，Nishimuraら¹³⁾）の値を計算し，解析を行った．表-2に示されている値は法線方向に対する値であって，接線方向に対してはその25%とする．また，流体力はマウンドを構成する要素にだけ与え，海底砂地盤は，マウンドを構成する要素の動きに反応するようにした．

構造物は流体力を受けて断面が変化し，その変化した断面によって波動場が変わるので，その構造物断面変化と波動場との相互作用を考慮するのが重要である．それで，本研究では，計算を3つのステップに分けてフィードバック解析を行った．すなわち，初期マウンド断面を用いて計算した流体力をDEM計算に外力として与え，要素移動を計算し，断面を修正，変形されたマウンド断面を用いて流体力を再度計算する．このような計算を3回繰り返した．各ステップ間隔は波浪の3周期分である3.6秒にした．そしてDEM解析における時間間隔 Δt は 1.0×10^{-5} sにした．

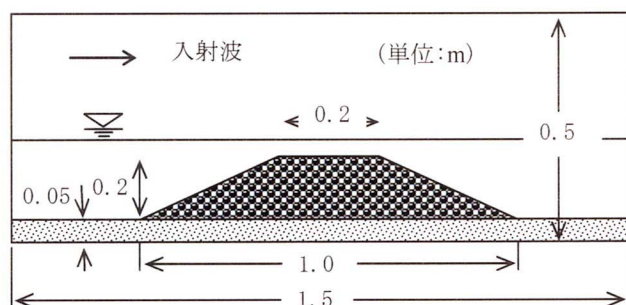


図-6 解析領域

表-2 入力パラメータの平均値

バネ係数 (N/m)	粘性減衰係数 (Ns/m)	摩擦係数 (degree)
1×10^4	$2\sqrt{mK}$ m : 質量, K : バネ係数	45

(3) 解析結果

図-7はそれぞれの地点での模型実験で得られた波形と数値波動水路によって得られた波形の比較図である．a)とb)から，数値解析による波形と模型実験による波形がほぼ一致していることが分かる．また，マウンド岸側である地点3ではややずれはあるが，定性的には一致していると考えられる．地点3で見られる模型実験と数値解析波形の若干の差違は，数値解析におけるマウンド内部の空隙率の設定差によるものだと考えられる．

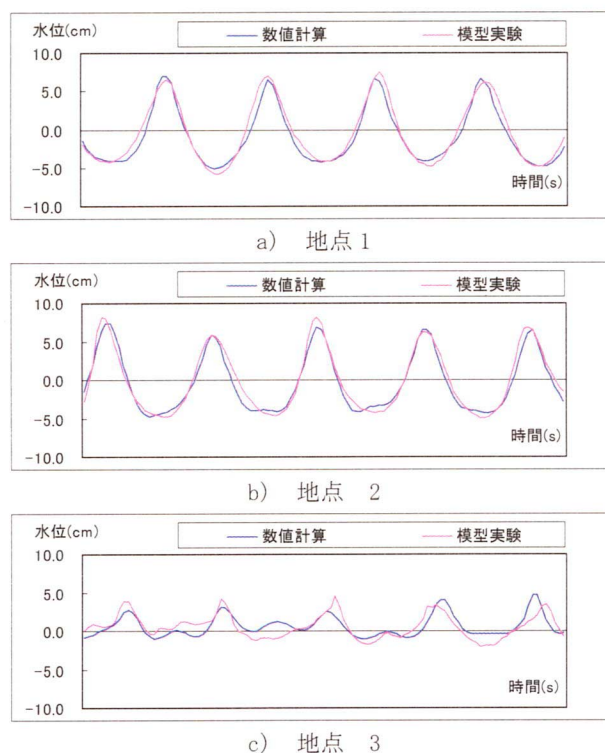


図-7 数値解析と模型実験による波浪の波形比較

図-8は粒径2cmの同一粒径要素で構成されたマウンドの断面変形解析結果（Case1）で図-9は粒径2.6cmと1.5cmの混合要素で構成されたマウンドの断面変形解析結果（Case3）である．図-8から，初期断面に比べ，マウンド天端部分の全体に掛けて侵食が発生していることや岸側の法面から法尻まで堆積が発生している．実験結果と比べると，沖側の法肩部分で侵食し法面から法尻までにかけて堆積したことは一致しているが，模型実験では，岸側の法肩部分での侵食は見られなかった．実験で使われた碎石の場合，粒径の偏差が大きく，また，楕円形の要素が多かったため揚力の影響を受けやすく，波力によって反対側の法肩まで移動した碎石がそのまま堆積し，法尻までは到達しなかったが，計算で用いられた要素は円形であるから，反対側まで移動した要素が，さらに波力と重力によってマウンド法尻まで移動したからと考えられる．

つぎに、図-9の結果から、両法肩が侵食され岸側の法尻部分で堆積している。侵食の量は沖側の方が多し。実験結果と比べると、マウンド天端部分の全体に掛けて侵食が発生していることや岸側の法面から法尻まで堆積が発生していることは一致している。

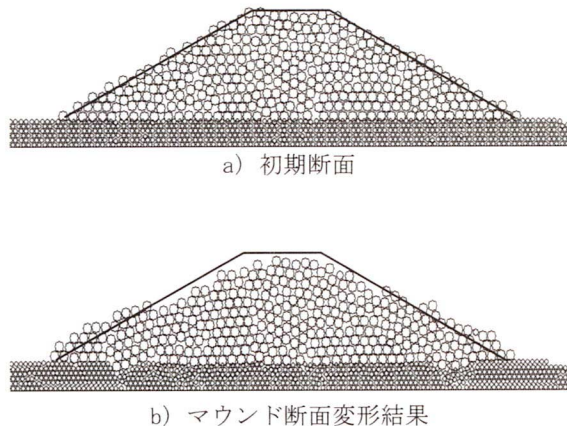


図-8 同一粒径で構成されたマウンド

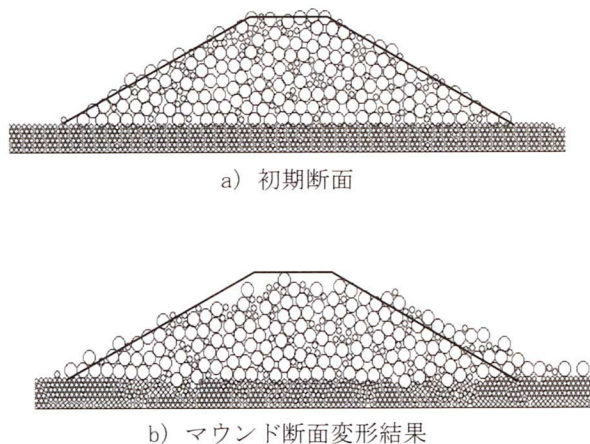


図-9 混合粒径で構成されたマウンド

4. 結論

本研究では、混合粒径を持つ要素で構成されたマウンド構造物の波による破壊の特性と構造物周辺の波動場の特性を実験的に明らかにするとともに、VOF法とDEM法を使って数値解析を行い、実験結果と比較することによって、その妥当性について検討した。得られた結果は以下のとおりである。

1) 天端水深を5cmと2cm、また、マウンドを構成する要素を平均粒径2cmの捨石と粒径2.6cm、1.5cm混合要素の2種類で構成し、水理模型実験を行い、天端水深とマウンド構造物を構成する要素の大きさや形状による破壊・変形過程を明らかにした。

2) VOF法とDEM法を使ってマウンド構造物の断面変形を計算した。この時、実験結果との比較のため、粒径2cmの同一要素と粒径2.6cm、1.5cm混合要素の2種類でマウンドを構成し解析を行った。また、モンテカルロ法を使って係数をランダムに入力させることで要素構成のばらつきを表現した。その結果得られた断面変形の様子が実験結果とよく一致することが分かった。

参考文献

- 1) 榎木亨：波と漂砂と構造物，技報堂出版，pp.203-213,1991.
- 2) 藤井直樹，興野俊也，大熊義夫：個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算，海岸工学論文集，土木学会，Vol.48，pp.801-805，2001.
- 3) 荒木進歩，柳原哲也，出口一郎：3次元個別要素法による捨石潜堤の変形予測の試み，海岸工学論文集，土木学会，Vol.50，pp.831-835，2003.
- 4) 高山知司，高橋通夫：ケーソンを単一要素とした個別要素法による混成堤の挙動計算，海岸工学論文集，土木学会，Vol.53，pp.841-845，2006.
- 5) 金美錦，黒岩正光，西村強，松原雄平：VOF-DEMモデルを用いた混合粒径砂礫から構成される捨石潜堤の挙動解析に関する研究，海洋開発論文集，Vol.23，pp.913-918，2007.
- 6) 土木学会：水理公式集，土木学会編，pp.523，1985.
- 7) Hirt, C. W. and Nichols, B. D. : Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 8) 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF)，沿岸開発技術ライブラリー No.12, (財)沿岸開発技術センター，2001.
- 9) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Symposium on rock mechanics, Nancy, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 10) 前野詩朗，小川誠，Bierawski, L. G. : VOF-DEM-FEM連成モデルによる潜堤の挙動解析，海岸工学論文集，土木学会，Vol.53，pp.886-890，2006.
- 11) 伊藤一教，樋口雄一，東江隆夫，勝井秀博：個別要素法に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法，海岸工学論文集，土木学会，Vol.48，pp.806-810，2001.
- 12) 木山英郎，藤村尚，西村強：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の実現と考察，土木学会論文集，第394号/III-9，pp.37-44，1988.
- 13) T. Nishimura, M.K. Kim, H. Kiyama and Y. Taniguchi : Rockfall path analysis using a three-dimensional numerical method, Proceedings of international conference on landslide risk management, 2005.