

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

伊藤一教*・樋口雄一**・東江隆夫***・勝井秀博****

1. 緒 言

海岸・海洋構造物の性能設計を確立するためには、構造物の変形を明らかにすることが重要である。また、施工途中の構造物は低耐力かつ不安定であるため、施工時のリスク回避対策や工程を合理的に見積もる必要がある。したがって、性能設計や施工対策の観点から構造物の変形予測手法の開発は重要である。構造物の中でも捨石構造物は性能設計に適しているとともに、施工対策を要する場合が多い。そこで、捨石潜堤を対象とした変形予測手法について検討した。

本研究では、個別要素法 (DEM) と VOF 法を用いた捨石潜堤の変形計算手法における流体力の評価、DEM のパラメタの設定および適用性について、基礎的実験と比較することによって検討した。そして、検討結果に基づき捨石のランダムな形状を考慮した計算手法を提案した。

2. 捨石の変形予測手法

捨石の変形予測手法 (伊藤ら, 2000) は、流体解析にはポーラスメディア法と VOF 法を用いた数値波動水路 (磯部ら, 1999) を用い、捨石解析には DEM を用いた。解析手順は以下ようになる。捨石構造物をポーラスメディアとすることで構造物内の流れ場を求め、捨石に作用する流体力をモリソン式で算出する。流体力を外力として DEM により捨石の挙動を解析し、捨石の移動に伴ってポーラスメディアの位置を変化させ、次のステップの流体解析を実行する。

流体力は、抗力、慣性力、揚力および流体が捨石に及ぼす回転モーメントを考慮し、上流側の捨石による遮蔽効果も考慮した。抗力、揚力の算定には捨石と流体の相対速度を用い、慣性力は相対速度の時間変化を用いて算出した。また、揚力は捨石構造物の表層の捨石を対象とし、流体による回転モーメントは、捨石を上下左右に区別してモリソン式を適用した。

3. 水理模型実験

水理模型実験は伊藤ら (2000) と同様に、図-1 に示す実験装置を用いた。潜堤は直径 17 ミリ、比重 2.45 のガラス球と碎石を用いた。本装置は、水槽左端に設置した空気室を負圧にすることで水柱 H を発生させ、バルブを開放することにより、水深程度の波高を有する孤立波的な波が発生し、砕波により段波が発生する。潜堤は水槽中央部に配置し、ガラス球を用いた実験では最下層を固定し 8 層積み上げた。各実験は潜堤の変形過程をビデオで撮影し、画像解析によりデータを得た。また、捨石背後の遮蔽効果に関する基礎データを得るため、固定したガラス球の上に複数のガラス球を配置し、各ガラス球の間隔を変化させて遮蔽効果の基礎データを得た。また、ガラス球潜堤を固定し、電磁流速計を用いて潜堤周辺の流速変化を測定した。

$H=60$ cm に対するガラス球潜堤の変形過程を図-2 に示した。球の動きは水槽幅方向にバラツキがあるため各図で球の数は異なる。また、水位と砕波に伴う空気巻き込みをハッチングで示した。ガラス球の移動は砕波による波の突っ込み時に始まり、沖側法肩部のガラス球が移動を開始する。著しい粒子の移動は砕波後の段波が岸側法肩を過ぎた時刻に発生した。

次に、捨石背後の遮蔽効果に関する基礎実験の結果を図-3 に示す。 $H=55$ cm の場合、TYPE 1 ではロッキングする程度で移動はなかった。TYPE 2 の球 a は 1D 移動するが、球 b の移動はなかった。ここで、D は球の直径である。TYPE 3 では球 a, b とともに 3D 移動した。TYPE 4 では球 a が 2D 移動し、球 b, c は移動しなかった。以上より、遮蔽効果は球の中心間距離がおおよそ 2D 以内にあるときに出現することがわかった。

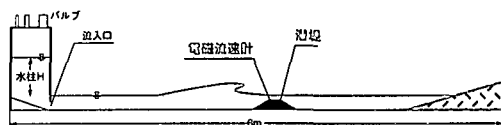


図-1 水理模型実験の説明図

* 正 会 員 工 務 大成建設(株)技術センター

** 正 会 員 博 士 大成建設(株)技術センター

*** 正 会 員 M.S. 大成建設(株)技術センター

**** フェロー 工 務 大成建設(株)技術センター

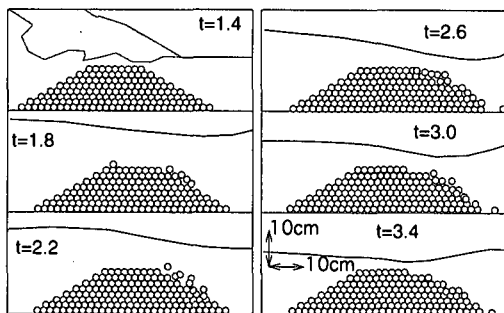
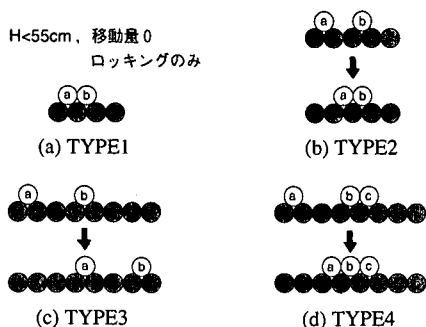
図-2 ガラス球潜堤の変形過程の実験結果 ($H=60$ cm)

図-3 遮蔽効果に関する実験結果

4. 潜堤周辺の流速変化の比較

図-4 はガラス球潜堤を固定した潜堤沖側法肩の水平流速に対する実験と計算の比較である。条件は水柱 H が60 cmで、潜堤の空隙率を0.44, 抵抗係数0.5, 慣性力係数1.5とした。計算格子は $\Delta x = \Delta z = 1.7$ cmとした。図より、流れ場が比較的精度良く再現されていることがわかる。後述の連成解析では、上記のパラメタを用いた。

5. ガラス球潜堤の変形計算

図-5 は、図-2 に示した実験に対する計算結果である。計算条件は空隙率を0.44, 抵抗係数0.5, 慣性力係数1.5, 揚力係数0.25として抗力, 慣性力, 揚力, 外力モーメントおよび遮蔽効果を考慮した。遮蔽による抗力は、実験結果を基に球直径の2倍まで作用させた。2つの球が接する場合は流れと逆向きに0.5 Cdで作用させ、中心間距離が2Dとなった時に0となるように、中心間距離に対して線形に与えた。DEMの計算条件としては、伊藤ら(2000)がガラス球の物性値と反発実験から決定した数値を用い、法線方向に対してバネ定数 $k=3.5 \times 10^7$ N/m, 減衰定数 1.5×10^2 Ns/mをとした。接線方向については法線方向の25%とした。摩擦係数は静止摩擦や動摩擦の区別することなく0.05とした。計算時間間隔はVOFの計算では $\Delta t=1 \times 10^{-6}$ s以上、DEMは $\Delta t=1 \times$

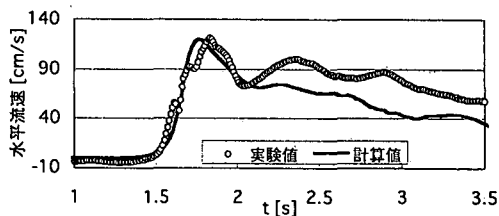
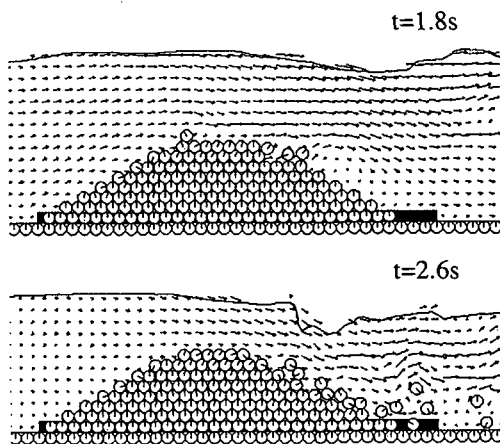


図-4 法肩部の流速比較

10^{-6} sとした。

計算結果は、沖側法肩部の球の初期移動や、段波が通過し岸側法肩部の球が転がり落ちて行く様子を精度良く再現している。ただし、 $t=2.6$ 秒の岸側法肩部から転落した球について実験と計算を比較すると、実験では法面に着定したのに対して、計算では着定していない。段波が潜堤を通過した後、潜堤背後の水面に小さな跳水が発生する。本計算で採用した計算格子ではこの跳水を精度よく表現することができないため、差異が生じたものと考えられる。

次に、流体力の揚力、外力モーメントおよび遮蔽効果の影響について検討した。図-5の計算条件から揚力、外力モーメントおよび遮蔽効果をおのおの除去した計算を行い、図-5と比較した。その結果、揚力と外力モーメントの影響は、沖側法面および法肩部に現れるが、岸側法肩部では顕著な差異がなかった。しかし、遮蔽効果を見視した場合は、図-6に示すように天端上の一層が押し出され、変形規模が過大評価された。この結果より、流体力評価に及ぼす遮蔽効果の影響は重要であることがわかった。特に、混合粒径となる捨石構造物の場合には、小さな捨石であっても遮蔽効果によって移動が抑制される。ゆえに、捨石挙動に及ぼす遮蔽効果の影響は変形量

図-5 ガラス球潜堤の変形計算結果 ($H=60$ cm)

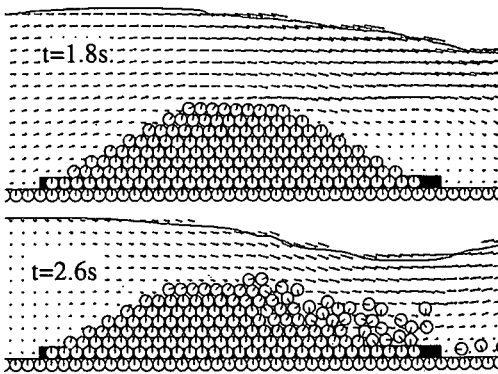


図-6 遮蔽効果を無視した計算結果

に直接影響する重要な要因である。

6. DEMに基づく捨石モデル

6.1 DEMパラメタの設定に関する考察

DEMで用いるバネとダッシュポットは要素間の力の作用を計算するための仮想的なモデルであり、バネ定数と減衰定数をDEMパラメタとすれば、これはチューニングパラメタと解釈できる。

DEMパラメタの設定方法に関する研究には、主に材料の物性に基づく方法、数値解析における解の安定性に主眼をおく方法に大別できる。

バネ定数や摩擦係数の決定法としては、木山・藤村(1989)が示した弾性理論に基づく方法がある。また、伯野(1997)は、パラメタ設定のためのモデルを作成し、試行錯誤的に求める方法を提案した。DEMの発展形といえる不連続変形法(Shi and Goodman, 1985)ではペナルティ法を採用し、解の安定性に着目した方法が提案されている。

一方、減衰定数の決定には、実際の材料を自由落下させたときの反発係数から求める方法(Sawadaら, 1991)、一質点モデルにおいて臨界減衰となる値を選ぶ方法(Cundall, 1971)が用いられる。

準静的な問題に限れば減衰定数は解を安定させる役割のみを担うため、解を速やかに収束させるため臨界減衰条件を与えればよい。しかしながら、本論で対象とする捨石の挙動は動的であり、DEMパラメタの設定方法は確立されていないのが現状である。

そこで、バネ定数、減衰定数および摩擦係数が計算結果に及ぼす影響を検討する。検討は斜面状に積み上げた円形要素のうち法面中央部の要素を除去し、重力のみによって要素が崩壊する現象を対象とした。法線方向のバネ定数はガラス球と同じ値を用い、減衰定数を変化させた。接線方向のDEMパラメタは法線方向の25%とし、摩擦係数は静止摩擦係数 μ と動摩擦係数 μ' で区別した。

図-7は、ガラス球の反発係数 r が0.23となるように設定した場合(弱い減衰)と $r=0$ とした場合(臨界減衰)の計算結果の比較で、 $\mu=0.03$ 、 $\mu'=0.003$ 、 $\Delta t=10^{-6}$ とした場合の崩壊過程である。

両者の差異は崩壊過程の時間変化に現れ、弱い減衰の場合には $t=0.4$ 秒後に変形がほぼ終了するのに対し、臨界減衰の場合には $t=0.4$ 秒後も変形が継続する。この結果は、法肩の左端要素について鉛直座標の時間変化を示す図-8が明瞭に示している。ガラス球を用いた模擬実験を観察したが、崩壊の経時変化は弱い減衰の場合に近かった。したがって、DEMパラメタを臨界減衰のような強い減衰で設定すると、数値的な粘着力(以下、数値粘着力と記す)が現れ適切ではないと判断できる。

6.2 捨石のDEMパラメタ設定と流体力評価

捨石の形状はランダムであるため噛合せの効果を評価する必要がある。捨石の斜面崩壊を想定すると、変形過程の時間変化は図-7(a)に類似すると考えられるため、DEMパラメタは弱い減衰($r>0$)を設定することが望ましい。逆に、噛合せの効果を数値粘着力でモデル化することも考えられる。しかし、噛合せの効果は形状の違いによって生じるものであって、質量とバネ定数から決まる強い減衰を選択することは合理的でない。したがって、捨石形状に起因する噛合せの効果は、摩擦係数として設定することが適切と考えられる。

図-9は $r=0.23$ の条件で、 $\mu=0.5$ 、 $\mu'/\mu=0.1, 0.5$ および0.9とした場合の斜面崩壊計算の結果である。 μ'/μ の違いに応じて崩壊過程が異なり、 μ'/μ が大きいほど変形が終了するのに要する時間が短く、変形量も小さい。この結果から、捨石の噛合せの効果を摩擦係数で評価できることが確認できた。

また、捨石の場合には、それぞれの質量が異なるため、バネ定数一定の条件で r 一定 >0 となるように減衰定数を設定すると、捨石毎に減衰定数が異なる。質量の異なる捨石間の作用力を算定する場合、減衰係数として平均値を採用すると、大きい捨石はより弱い減衰となり、小さい捨石はより強い減衰となる。それゆえ、小さい捨石では必然的に数値粘着力が発生する傾向になる。そこで、図-5に示したガラス球の場合に臨界減衰(反発係数0)を設定して変形計算した結果が図-10である。

沖側法肩部の球はいったん浮き上がるものの、DEMパラメタが強い減衰であるため、大きな移動はなくもとの位置にもどる。しかし、岸側法肩部は外力が十分大きいため、臨界減衰を設定しても実験結果を再現できた。この結果は、外力が十分大きければ、DEMパラメタが臨界減衰であっても瞬時に要素間の貫入がなくなり、要素が離れようとする状態にブレーキを掛ける数値粘着力の影響が弱くなることを示している。それゆえ、変形量が

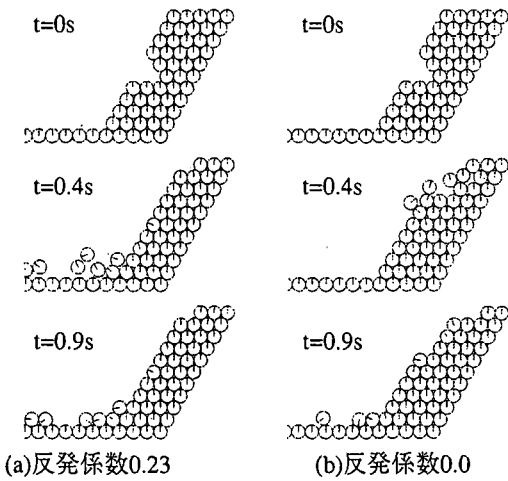


図-7 斜面変形に及ぼす DEM パラメタの影響

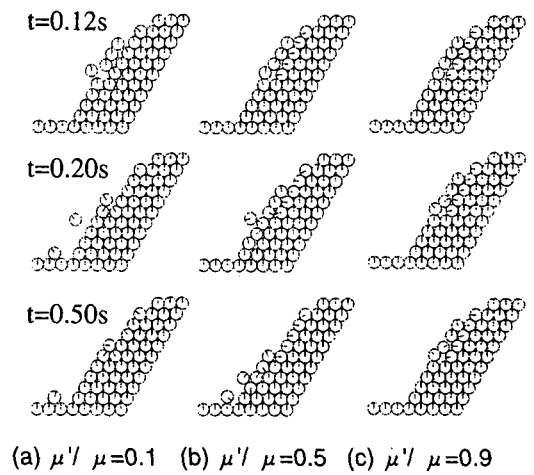


図-9 斜面変形に及ぼす摩擦係数の影響

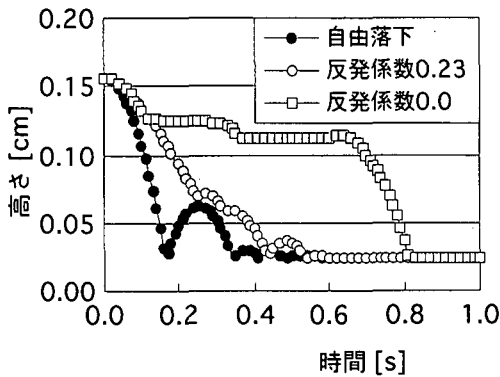
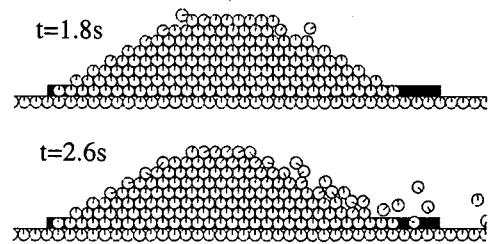
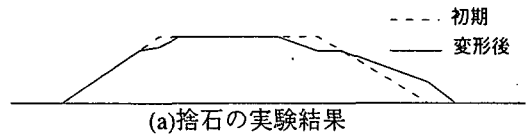
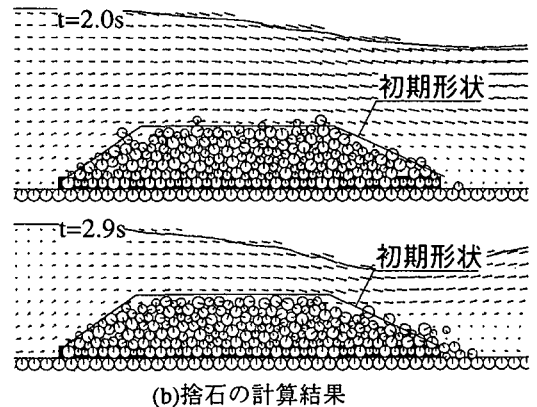


図-8 斜面上法層の左端要素の時系列変化

図-10 臨界減衰を設定した変形過程 ($r=0$)

(a) 捨石の実験結果



(b) 捨石の計算結果

図-11 捨石の変形計算結果 ($H=70$ cm)

大きいと容易に想定される条件では、強い減衰を設定することも可能である。しかし、変形予測で重要なことは、変形量が収束する状態であるから、外力規模に依存したパラメタ設定は合理的ではない。前述のように、各捨石の DEM パラメタを弱い減衰に設定しても、小さな捨石に対しては DEM の計算アルゴリズムから必然的に数値粘着力が生じる。しかし、大きな捨石に比べて小さな捨石に対する外力の影響は相対的に大きく、大きな捨石の移動限界付近の外力を例にとれば、小さな捨石に対して十分大きい外力となるため、数値粘着力の影響が弱まると推察される。したがって、捨石の DEM パラメタとしては弱い減衰になるように設定することが重要である。

次に、捨石に作用する流体力を評価する場合にも、捨石の形状を考慮することが重要である。そこで捨石の流体力評価においては、各捨石を円形要素として表現する代わりに、抗力係数、慣性力係数、揚力係数および摩擦係数をランダムに設定することにより、抗力係数は大き

いが揚力係数が小さいものや、抗力係数は小さいが揚力係数が大きいものを設定することができる。

図-11 は、上述の捨石モデルで計算した結果である。

捨石モデルは、平均値が $C_D=0.5$, $C_M=1.5$, $C_L=0.5$ で±10%のバラツキをもち、 $\mu=\mu'=0.05\sim 1$ となるように一様分布として与え、DEM パラメタは各捨石の r が 0.23 となるよう設定した。計算結果は、法肩の侵食変形と下流側法尻への堆積変形を良く再現している。このことより、本論で提案する捨石モデルは簡便で有効な手段であることがわかった。

7. 結 論

DEM に基づく捨石の変形計算手法について、流体力の評価法と DEM パラメタの設定および適用性について検討した。その結果、流体力として遮蔽効果を考慮することが重要であることを明らかにした。ついで、捨石構造物を対象とするモデルとしては、DEM のバネ・ダッシュポットは弱い減衰条件を設定することが重要で、捨石の噛合せ効果は摩擦係数で制御できることを示した。また、捨石に対する流体力は、各捨石を円形要素として形状を表現する代わりに、抗力係数、慣性力係数および揚力係数をランダムに設定する簡便なモデルを用いると実験結果を精度よく再現できることを示した。

参 考 文 献

- 荒木進歩・藤原由康・宮崎敏弘・出口一郎 (2000): 個別要素法を用いた捨石潜堤の断面変形計算, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 761-765.
- 磯部雅彦・高橋重雄・余 鈞平・柳山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 伊藤一教・東江隆夫・勝井秀博 (2000): VOF 法と DEM 法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 746-750.
- 木山英郎・藤村 尚 (1989): カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文集, Vol. 333, pp. 137-146.
- 伯野元彦 (1997): 破壊のシミュレーション, 森北出版, 230 p.
- Cundall, P. A (1971): A Computer Method for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rock System, Proc of Int'l Symposium on Rock Mechanics, Vol 2, pp. 129-136.
- Sawada, S., T. B. S. Pradhan and Y. Iwasaki (1991): Simple Shear Simulation of Sand using DEM, Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp. 511-516.
- Shi, G.-H. and R. E. Goodman (1985): Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis, Int'l J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 9, pp. 541-556.