

ケーソン-捨石構造の挙動に関する個別要素法を用いた再現解析の妥当性

豊橋技術科学大学 学生会員 ○田村 謙太郎, 上田 竜也, YAP YEE XIAN

豊橋技術科学大学 正会員 松田 達也, 内藤 直人

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって多くの防波堤が被災した。被災パターンとして基礎捨石や原地盤の洗掘に伴い破壊に到るケースが多く見られた¹⁾。そこで洗掘などの大変形に適用可能な解析手法である個別要素法(以下, DEM.)を用いてケーソン-捨石構造の破壊挙動を精度よく再現できれば, 実験コストが削減でき, 様々な条件をもとに詳細な検討を行うことが容易となる。

本研究では2次元DEMにより縮尺模型実験(以下, 模型実験.)の再現解析を行い, ケーソン捨石構造の挙動や荷重変位関係を比較することで解析精度について検討した。

2. 模型実験とDEM解析の概要

a) 模型実験の概要

本研究の再現解析の対象となる実験は想定する実物スケールに対して1/25縮尺のモデルを想定している²⁾。模型実験では幅6,600mm, 高さ1,500mm, 奥行き400mmの実験装置内に砕石6号(粒径5~13mm混合: 粒子密度2650kg/m³)を用いて形成した捨石マウンドと奥行き390mm, 重量4.27kNの無筋コンクリート製のケーソンを使用する。模型実験では水平荷重によるケーソン-捨石間の摩擦係数を測定する目的の摩擦係数計測試験(Case0)と偏心荷重によるケーソン-捨石の変状を確認するための偏心荷重荷重試験(Case1~4)を実施している。

摩擦係数計測試験は捨石マウンド層厚を300mmで水平に敷設し, 変状を拘束するためマウンド両端部をブロックで固定している。荷重位置はモーメントが作用しないようケーソン下端から約25mmの高さとしている。偏心荷重荷重試験は図1に示す通りマウンド肩幅 W_{ToM} とマウンド層厚 H_M を変化させた4種の寸法で実施している。

b) DEM解析の概要

解析モデルは摩擦係数計測試験と偏心荷重荷重試験の両ケースについて模型実験と同スケールで

再現を行っており, マウンド層厚や荷重位置についても実験寸法と同様である。捨石マウンドは砕石6号の粒径をもとに5, 9, 13mmの3粒径を均等な発生確率によって生成し, ケーソンは粒径10mmの剛体結合モデルで表現した。荷重方法は強制的に変位する粒子を所定の荷重位置に配置し, ケーソンを押し込むように水平荷重した。模型実験を参考に荷重速度は30mm/sに設定し, ケーソンに作用する荷重はケーソンの底面と前面の粒子に作用する力の合計とした。また, 底面摩擦の影響を考慮するため, 粒径9mmの粒子を底面境界として設置した。その他, 解析条件は表1に示す通りである。

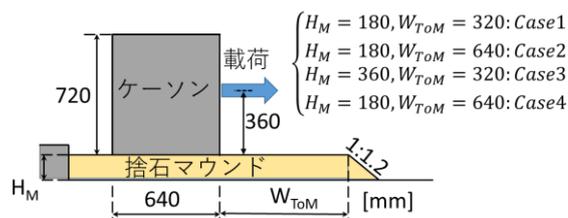


図1 縮尺模型実験のケース対応

表1 解析条件一覧

計算ステップ(回)	1.0~3.0×10 ⁷
計算時間刻み(s)	1.0×10 ⁻⁶
法線方向バネ定数(N/m)	1.0×10 ⁷
接線方向バネ定数(N/m)	2.5×10 ⁶
減衰定数	1.0
粒子間摩擦角(°)	27
粒子壁面間摩擦角(°)	22
回転摩擦	0.2

3. 解析結果の考察と模型実験との比較によるValidation

a) 摩擦係数計測試験

図2に解析の結果と模型実験の無次元水平荷重-換算水平変位関係を示す。水平荷重は前述の合力をケーソンの自重で除した無次元水平荷重, すなわち摩擦係数を示している。また, 変位はケーソンの傾きの影響が少ない重心位置の値を示している。

本解析ではケーソンと捨石間の摩擦係数は最大で0.662程度になっており、縮尺模型実験では0.646程度であり、概ね一致しているが無次元水平荷重の立ち上がりや最大値の現れ方に差異が生じている。この要因としてマウンドの均し方法や締固め具合、解析におけるケーソン表面の粗度が影響していると考えられる。

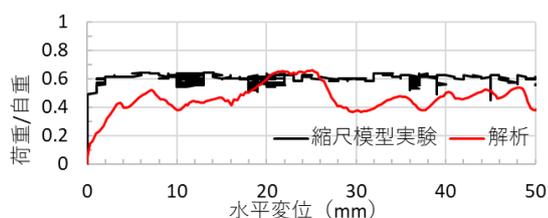


図2 水平荷重による無次元水平荷重-換算水平変位関係

b) 偏心荷重載荷試験

図3は実験中に撮影した写真とケーソン重心位置の変位量が一致した解析画像を重ねた画像で Case1 と Case4 について示している。図内の黄色実線は模型実験におけるマウンドの法面形状を表す。比較画像より Case3 は荷重後の法面形状やケーソンの移動位置が概ね一致しているが、Case4 についてはケーソンの傾きやマウンドの法面形状、ケーソン下部マウンドの削れ量に差異が確認できる。この傾向は全ケースを通してマウンドが大きくなるほど顕著に表れ、Case4 で最も差異が大きくなった。この要因として模型実験ではマウンドが大きいかほど拘束圧の影響も顕著になり変状に対する抵抗が生まれているが、2次元解析では奥行方向を考慮していないため差異が生じたと考えられる。

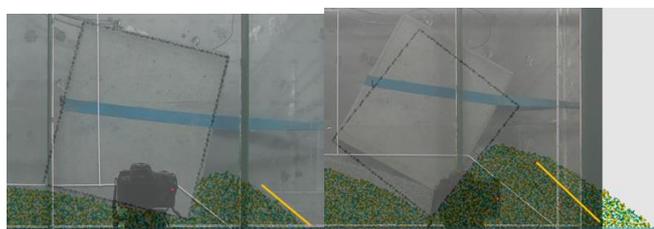


図3 縮尺模型実験と解析結果の挙動比較 (左図: Case1, 右図: Case4)

図4にはケーソンの無次元水平荷重-換算水平変位関係を示している。模型実験に比べ解析結果は値の揺れが大きいが Case1, 2, 3 については荷重の発

現傾向は概ね一致している。Case4 については荷重初期の発現荷重が大きく、その後減少している。この要因のとしてはマウンドを構成する3種の粒子の発生確率を等しくしたため、粒径の大きい粒子の質量割合が高くなり粒度が悪く、破壊に対して脆弱になっていることが考えられる。また、模型実験に比べ初期の変形が大きいためケーソン前面の粒子に作用する力が過大になっていることが考えられる。

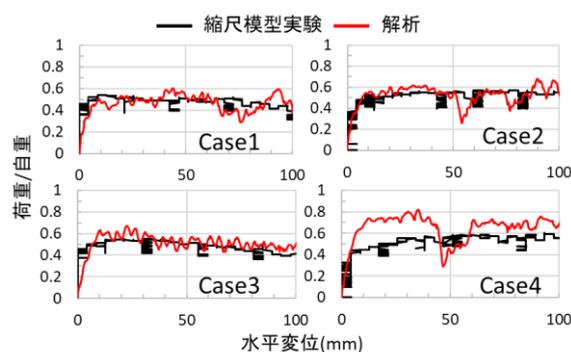


図4 偏心荷重による無次元水平荷重-換算水平変位関係

4. まとめ

本研究では、縮尺模型実験を参考に2次元DEMで再現解析を実施し解析モデルの適用性を検討した結果、次の結論を得た。

- ・摩擦係数計測試験の結果、模型実験と解析の間の摩擦係数の発現に若干の差異が生じたが、ケーソンの粗度やマウンドの締固め方法等の影響が考えられる。
- ・偏心荷重試験の結果として、マウンド層厚の小さいCase1はケーソン捨石の変状や荷重の発現傾向は精度よく再現ができていたが、マウンド層厚や肩幅が大きくなるにつれ拘束圧の影響も顕著になり、解析側の変状範囲が大きくなる傾向が得られた。

本研究の結果、マウンド層厚の小さいケースにおいてはDEM解析による再現性を確認することができたが、拘束圧の影響を考慮できるパラメータの導入や捨石マウンドの粒度を改良する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局：東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 資料3, 2011.
- 2) 松田達也, 上田竜也, 田村謙太郎, 内藤直人, 栗原直範, 前田健一：土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, pp.I_769-I_774, 2021.