

単調荷を受ける防波堤マウンドの部分固化に伴うケーソン挙動の分析

豊橋技術科学大学 学生会員 小林 泰基, 上田 竜也
豊橋技術科学大学 正会員 松田 達也, 内藤 直人

1. 緒言

東北地方太平洋沖地震による津波で多くの防波堤が倒壊した。これを契機に、津波に対して粘り強い構造の防波堤が求められるようになった。

本研究は粘り強い構造の防波堤を築造するため、ケーソンを支える捨石マウンドに可塑性グラウトを注入して部分固化させる方法¹⁾に着目し、ケーソン後趾付近の捨石を固化させることで、荷重時にケーソン後趾の沈み込みを低減させ、支持力破壊から滑動主体の挙動を誘発できると考えた。本稿は、個別要素法 (Distinct Element Method) を用いて部分固化させたマウンド上のケーソン挙動を解析的に分析した。

2. 個別要素法の概要

個別要素法は Cundall and Strack(1979)²⁾により提案された離散体解析手法であり、個々の粒子運動を計算する。粒子の運動は、粒子に作用する外力と粒子間力から加速度を計算して求める。具体的には、法線方向の粒子間力は反発力や摩擦力を発揮させるバネと、エネルギーを減衰させるダッシュポットを用いて計算する。接線方向の粒子間力は上記の2つに加え、摩擦力の大きさを決めるスライダーを用いて計算する。粒子は剛体で重なることはないが、オーバーラップを許可することでバネやダッシュポットの効果が発揮される。

3. 縮尺模型実験の概要

個別要素法の妥当性を確認するため、縮尺模型実験の再現解析を実施した。模型実験では砕石6号を用いて捨石マウンドを作製し、捨石マウンド上に矩形形状のケーソン(幅640mm, 高さ400mm, 奥行き390mm, 質量約218kg)を設置した(図-1)。ケーソンに牽引ロープを介して巻取ウィンチによる引張力を荷重した。実験時はロードセルを取り付けて引張力を計測し、ケーソンにワイヤ式変位計を設置して荷重に伴うケーソンの変位を計測した。

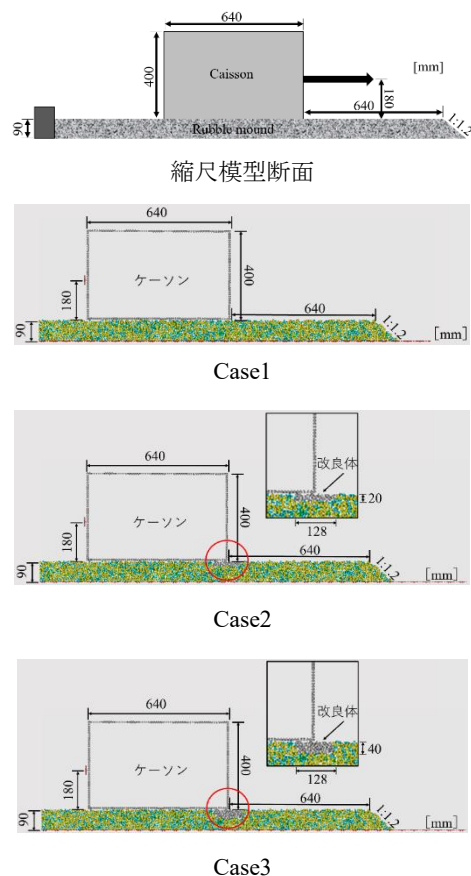


図-1 縮尺模型断面と解析モデル

4. 解析モデルの作成

本研究で実施した解析モデルを図-1に示す。捨石を固化しない防波堤を Case1 とし、基本断面は先述の縮尺模型実験の通りである。一方、ケーソン後趾付近の捨石を固化して幅128mm, 高さ20mmの改良体を設けた防波堤を Case2, 改良体の高さを Case2 の2倍とした幅128mm, 高さ40mmの改良体を設けた防波堤を Case3 とした。

解析モデルの作製手順の詳細は、田村(2021)³⁾を参考にした。まず、所定の形状となるように捨石マウンドを作製した。捨石材は砕石6号を踏まえ、粒径5mm, 9mm, 13mm, の粒子がほぼ均一な数になるよう堆積させた。砕石形状による回転抵抗は回転抵抗モデルで再現し、回転摩擦は0.2とした。その後、剛体モデルを導入し、外枠を粒径10mmの粒子を並

べて作製したケーソンをマウンド上に設置した。その他、解析条件の詳細は表-1に示す。

5. 解析結果

図-2に縮尺模型実験と各ケースにおける載荷後のケーソン変位が80mm, 300mmのときの状態を示す。模型実験とCase1を比較すると、両ケースとも載荷に伴いマウンドにケーソンが沈み込む挙動が確認でき、定性的に一致している。変位80mmのとき、Case2とCase3ではケーソンはマウンドに沈み込むことはなく、改良体の上を滑動した。変位が300mmのときは改良体の有無や大きさに関係なく、すべてのケースでケーソンはマウンドに沈み込んだ。

図-3は各ケースにおけるケーソンの角度と変位関係を示す。ケーソンの傾きは時計回りを正とする。Case1は改良体を有さないため、荷重が載荷されるとケーソンが傾斜し、マウンドに沈み込む支持力破壊モードが誘発された。Case2とCase3における載荷初期は改良体の上をケーソンが滑動したため、マウンドに沈み込みが生じなかった。Case2ではケーソンが改良体の上を滑動すると同時に改良体ごとマウンドに沈み込んだのに対し、Case3では改良体が大きいため、沈み込みが抑制され、ケーソンは滑動を続けた。変位112mmを超えるとケーソン後趾部分が改良体の右端まで滑動し、その後、ケーソンが改良体から滑落したため傾斜が拡大した。

6. 結論

個別要素法を用いてケーソン後趾付近の捨石を固化した防波堤の挙動を分析した結果、載荷初期ではケーソンが改良体の上を滑動することでケーソン後趾の沈み込みが低減することを確認した。改良体が小さい場合、ケーソンが滑動と同時にマウンドへ沈み込み、改良体の有無や範囲によって載荷を受けたケーソンの挙動が変化することが明らかとなった。

参考文献：1) 小笠原ら (2018)：土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp I_390-I_395.

2) P.A.Cundall and O.D.L.Strack (1979)：Géotechnique, Vol.29 (1), pp.47-65.

3) 田村謙太郎 (2022)：豊橋技術科学大学修士論文。

表-1 解析パラメータ

計算ステップ (回)	2.5×10^7
計算時間刻み (s)	1.0×10^{-6}
粒子密度 (kg/m ³)	2.65×10^3
ケーソン密度 (kg/m ³)	2.30×10^3
法線方向のバネ定数 (N/m)	1.0×10^7
接線方向のバネ定数 (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
ケーソン設置時間 (s)	2.0
載荷速度 (mm/s)	24
ケーソン粒子径 (mm)	10
敷設粒子径 (mm)	5

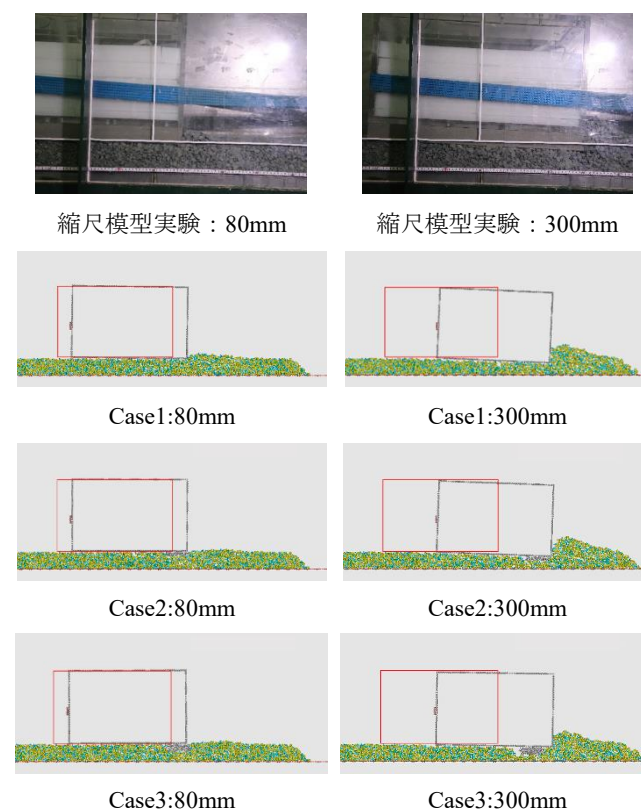


図-2 変位挙動

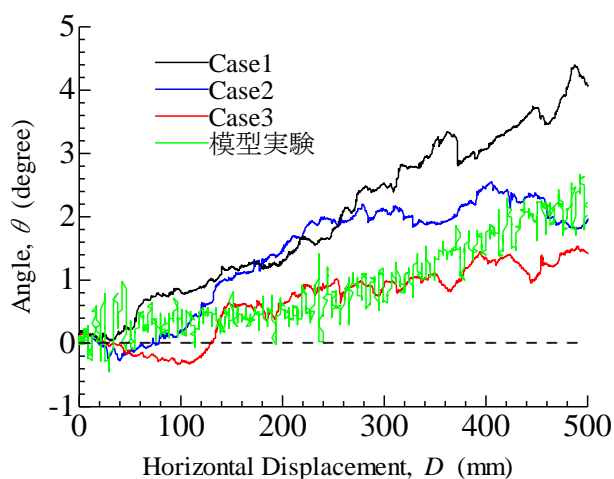


図-3 ケーソンの角度-変位関係