

個別要素法を用いた重力式係船岸増深工法の解析的検討

東亜建設工業(株) 正会員 ○五十嵐 大騎 三枝 弘幸
 東洋建設(株) 正会員 和田 眞郷 合田 和哉
 五洋建設(株) 正会員 小笠原 哲也

1. はじめに

近年の国際的動向である船舶大型化に伴い、既設重力式係船岸の増深検討事例が増加している。この背景の中、捨石マウンドの一部を固化し、改良体を構築することで、法線位置を変更せずに増深が可能となる工法(以下、増深工法)が水谷らによって開発された¹⁾。これまで実用化に向けた多くの検討が行われており、設計面に関しては改良体を剛体と見なした場合での解析が実施されている²⁾。著者らは、個別要素法(Discrete Element Method, 以下DEM)を用いて改良体を粒状体と見なした場合の解析を行い、増深工法の改良効果を検証したので、その結果を報告する。

2. 解析条件

1) 解析モデル: 解析ソフトは、非線形的な挙動や物体の局所的な挙動の解析が可能である PFC2D(ITASCA 社製)を使用した。DEM の解析モデルを図-1 に示し、同図中にモデル作成フローおよび解析条件も併せて示している。改良体はケーソン前趾直下 5m×5m の範囲とし、マウンド部の増深はケーソン前面の 2m とした。また、改良体を構築せずに増深を行ったケースの解析も比較検討として実施している。

2) パラメータ設定: DEM 設定パラメータの一覧を表-1 に示す。捨石マウンド部は、粒子間の剛性および摩擦係数のみの結合条件とし、土丹部は粒子間抵抗が引張りとせん断によって寄与する結合条件(コンタクトボンディング)、改良体は引張り・せん断に加えモーメントにも抵抗する結合条件(パラレルボンディング)とした。なお、捨石マウンド部の粒子は家島産捨石³⁾を参考に楕円形とし、実際の粒形加積曲線を考慮して粒径をばらつかせた。また、改良体強度に直接寄与する粒子間結合の引張強度 σ_t とせん断強度 τ は、捨石間のグラウト充填率を 80%に制御した直径 $\phi 100\text{mm}$ ×高さ $h 200\text{mm}$ の供試体を用いた圧縮試験と引張試験結果⁴⁾に基づいて固定値とし、それ以外は実験結果のシミュレーションに基づき決定した。圧縮試験の試験結果と解析結果の比較(応力-ひずみ曲線)を図-2 に示す。DEM 解析結果は弾性領域でも比較的精度良く再現されており、ピーク強度も同程度の結果で一致している。なお、DEM 解析は強度発現に寄与している粒子間結合が切れた段階で大きく低下する傾向が顕著なため、ピーク強度後の挙動はシミュレーション対象として除外している。

3) 外力設定: 設定外力の一覧を表-2 に示す。ケーソンへ作用させる外力はケーソンの外部安定照査結果²⁾を参考とし、常時と地震時について、ケーソン安定に最も影響が大きいケースの作用力を重心に作用させる方法を採用した。

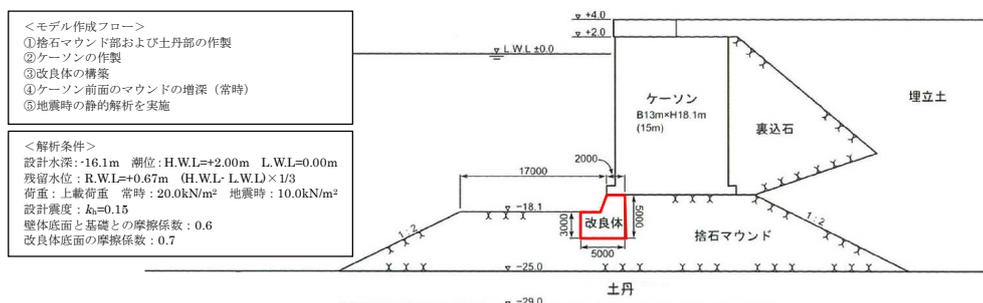


図-1 DEM 解析モデル

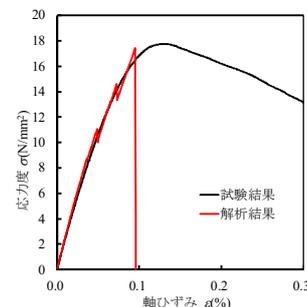


図-2 圧縮試験結果比較

表-1 DEM 設定パラメータ

	平均粒径 (mm)	ボンディングモデル	法線ばね係数 k_n (N/m)	接線ばね係数 k_s (N/m)	摩擦係数 μ	ボンディング力 (N)	パラレルボンディングパラメータ			
							法線ばね係数 pbk_n (N/m)	接線ばね係数 pbk_s (N/m)	半径比 λ	引張強度 σ_t (N/m²)
捨石マウンド部	258	—	4.50E+07	2.25E+07	0.60	—	—	—	—	—
土丹部	129	コンタクト	4.50E+07	2.25E+07	0.60	1.25E+07	—	—	—	—
改良体	258	パラレル	4.50E+07	1.35E+07	0.70	—	1.20E+12	3.00E+11	1.00	1.78E+06 / 8.88E+06

表-2 外力設定

	ケーソン背面に作用する主働土圧+慣性力 P_a (kN)	ケーソン自重+上載荷重の合力 W (kN)
常時	690.0	3546.5
地震時	1862.9	3495.0

キーワード: 個別要素法, 捨石, 注入工(グラウト工)

連絡先 〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1丁目3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター TEL 045-503-3741

3. 解析結果

- 1) 増深後の変位比較(常時):各ケースでの増深後の変位を図-3に示す. 改良体を構築したケースで増深後の変位はほとんど見られていないが, 改良体を構築しないケースでは, ケーソンの前趾圧で直下のマウンドの一部に崩壊が見られており, 大きな変位こそ確認されていないものの, 不安定な状態にあることがわかる.
- 2) 増深後の変位比較(地震時):地震時の変位を図-4に示す. 改良体を構築したケースでは, 地震時の変位は増深後の変位と同様にほとんど見られず, 安定状態にある. 一方, 改良体を構築しないケースでは, ケーソン前趾直下のマウンド部が完全に崩壊しており, ケーソンの傾斜が確認された.
- 3) 地震時に改良体天端に作用する応力:改良体天端に作用する荷重と作用方向を図-5に示し, 鉛直荷重成分と荷重作用幅 2m で応力を算出して同図中に記した. この結果, 改良体天端の作用応力は 0.7MPa 程度で圧縮強度 (17.8MPa) 以下であることから, 支持力としての照査も満足した. なお, 剛体とした支持力の安定照査結果²⁾も同程度の結果であり, 本 DEM 結果と良く整合している.
- 4) 地震時に改良体内部に作用する引張応力:改良体内部に作用する引張応力と改良体を構成している粒子の結合状態を図-6に示す. 一部で粒子間の結合が外れているのが確認されるが, 全体として平均 0.8MPa 程度の引張応力で引張強度 (1.78MPa) 以上の応力発生は見られず, 改良体内部も安定していることが確認された.

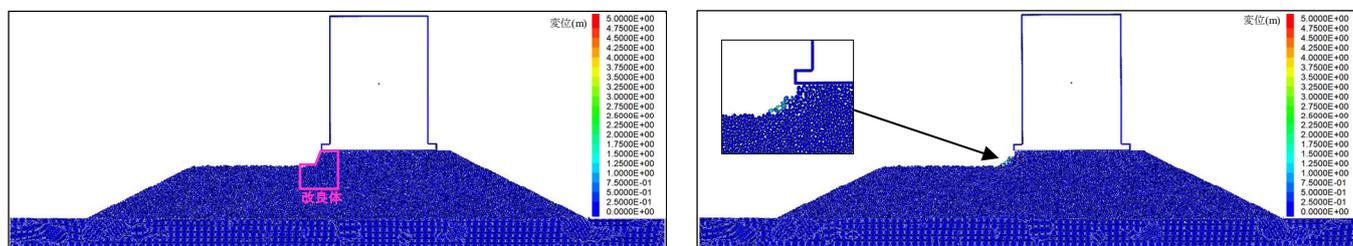


図-3 増深後の変位(左:改良体有り, 右:改良体無し)

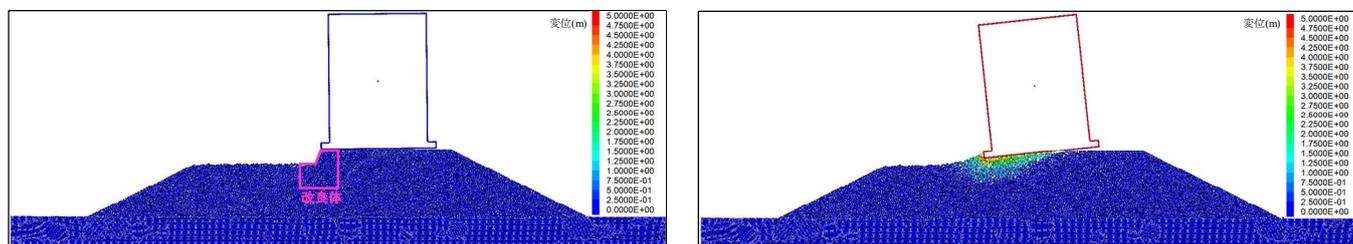


図-4 地震時の変位(左:改良体有り, 右:改良体無し)

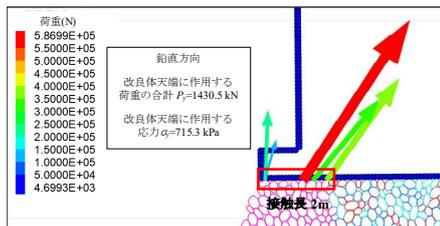


図-5 改良体天端に発生する反力

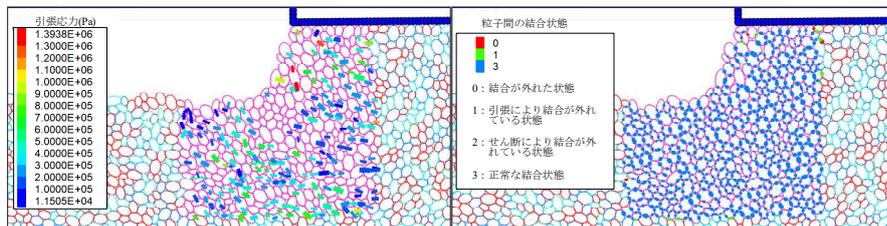


図-6 改良体内部に作用する引張応力と粒子間の結合状態

4. おわりに

増深工法の改良効果を検証するため, 個別要素法を用いた粒状体解析を実施した. その結果, 未改良では安定性が損なわれてしまう状況でも, 改良体を構築したケースではケーソンの転倒や滑動は見られず, 支持力としての照査も満足することが確認された. また, 改良体内部の応力状態からも, 改良体が安定していることが示された.

本論文を執筆するにあたり, 名古屋工業大学の前田健一教授に多大なるご指導とご協力を頂いた. ここに記して謝意を表す.

【参考文献】1) 水谷ら: 重力式係船岸の新しい増深工法の開発, 港湾空港技術研究所資料 No.1277, 2013. 2) 一般社団法人日本埋立浚渫協会: 重力式係船岸増深のための基礎構造に関する共同研究報告書, 2013.11. 3) 荘司喜博: 大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察, 港湾空港技術研究所報告 VOL.22, No.4, 1983. 4) 小笠原ら: 礫材空隙への可塑性グラウト充填による改良体の強度特性—その2: 中型供試体による評価, 第74回土木学会年次学術講演会, III-515, 2019.9.