

捨石マウンドの部分固化範囲が単調載荷を受ける防波堤の挙動に及ぼす影響の分析

Investigating the influence of partial solidified region in rubble mound on the breakwater deformation under monotonic loading

松田達也¹, 小林泰基², 内藤直人³

- 1 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科建築・都市システム学系・matsuda.tatsuya.mp@tut.jp
- 2 豊橋技術科学大学・工学部建築・都市システム学専攻
- 3 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科建築・都市システム学系

概 要

耐津波性能を高めた「粘り強い」防波堤を築造する方法として、ケーソン後趾付近の捨石マウンドに可塑性グラウトを注入し、部分固化させて改良体を作製する工法に着目した。ケーソン後趾付近の捨石を固化させることで端趾圧への抵抗が増加し、津波による波力を受けた際にケーソンの沈み込みを低減させ、ケーソンを支持力破壊から滑動主体の挙動に誘発できると考えた。本稿は対策工の有用性について検討するため、個別要素法を用いてケーソン-捨石構造を対象に単調載荷による挙動の分析を行った。本検討では改良深度を変えた検討を行った。その結果、改良深度に関係なく、改良体を設けることで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を低減し、ケーソンの傾きを抑制できることが明らかになった。一方で、改良体を設けた場合、改良体より港内側の捨石が一体として後退することで、ケーソン下に空洞を形成することも明らかとなった。

キーワード：津波，防波堤，粘り強さ，固化工法，個別要素法

1. はじめに

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。本震災を契機に、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。震災後、多くの研究機関において粘り強い構造形式に関する検討が行われてきている。最も検討事例が多い対策として港内側のケーソン背後に腹付工を設置する構造形式が挙げられる¹⁾⁷⁾。

例えば、高橋ら(2014)²⁾は石材やブロックなどをケーソン直背後に設置した防波堤の抵抗メカニズムと耐力増加特性を調べ、腹付工の規模に応じて耐力や支持力が増加することを明らかにした。宮本ら(2014)³⁾は混成堤を対象にケーソン背後の腹付工の効果をマウンド内浸透や基礎地盤の安定性の観点から調べ、マウンドが浸透に対し安定を保ち、ケーソンの変状を著しく抑えることを示した。有川ら(2015)⁴⁾は腹付工の他、中詰め・鋼管杭による対策を検討しており、越流により港内側の洗掘が拡大した場合、鋼管杭は傾斜するがケーソンの完全な倒壊を防ぐことを示した。三井ら(2016)⁵⁾は、腹付工に消波ブロックを用いた滑動抵抗力を検討し、その補強効果を確認するとともに抵抗力の算定方法を提案している。宮本ら(2017)⁶⁾は、腹付工に袋状ユニットを用いることで、捨石で形成された腹付工よりも洗掘等による変状が抑制され、耐力がよ

り向上することを示した。

腹付工による対策効果については、既往の研究で明らかにされつつあり、その有用性が認められる。一方で、破壊モードに着目すると、ケーソンに偏心荷重が作用した場合は、端趾圧が増加して支持力破壊モードへの進展する。Takahashi et al. (2021)⁷⁾は腹付工による端趾圧の低減効果について分析を進めているが、より粘り強い構造の防波堤を築造するためには、端趾圧に対する抵抗力を増加させる工夫が必要と考える。

本研究では端趾圧に対する抵抗力を強化するため、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固化工法⁸⁾に着目し、ケーソン後趾付近の捨石を固化させることで、載荷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: DEM)⁹⁾を用いてケーソン-捨石構造を対象とした模型実験の再現解析を通して、解析精度に関する検討結果を示すとともに、捨石マウンドの一部を部分固化させた際のケーソン挙動を解析し、対策効果を分析した結果を示す。

2. 個別要素法

個別要素法はCundall and Strack (1979)⁹⁾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。以下に、粒子の並進と回転の運動方程式を示す。

$$m_i \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{F}_i \quad (1)$$

$$I_i \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \mathbf{M}_i \quad (2)$$

ここで、 m_i ：着目粒子 i の質量、 \mathbf{u} ：着目粒子 i の変位速度ベクトル、 \mathbf{F}_i ：着目粒子 i に作用する外力ベクトル、 I_i ：着目粒子 i の慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}$ ：着目粒子 i の角速度ベクトル、 \mathbf{M}_i ：着目粒子 i に作用するモーメントを示す。

粒子の運動は、粒子に作用する外力と粒子間で生じる接触力から加速度を求める。粒子間で生じる接触力について、法線方向は反発力や摩擦力を發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を用いる。粒子は剛体とし、実現象では重なることはないが、本解析手法ではオーバーラップを許容し、発生したオーバーラップ量に応じてバネやダッシュポットの効果が發揮される。

本検討では2次元解析を実施する。粒子は円要素を用いているが、通常、円要素を用いると実際の地盤材料のような回転抵抗が再現できない¹⁰⁾。そのため、土らしさを表現するために、複数の円要素を結合し非球形要素を用いる方法¹¹⁾や回転抵抗モデルを導入する方法¹²⁾がある。本研究では回転抵抗モデルを導入して、転がり摩擦のような回転抵抗を再現した。回転抵抗モデルには幾つかの提案式があるが、Fukumoto (2015)¹²⁾の式を適用した。

$$M_r = -\text{sgn}(\boldsymbol{\omega}) \cdot |F_{ij}^N| \cdot b_r \cdot r \quad (3)$$

ここで、 M_r ：着目粒子 i の転がり摩擦モーメント、 F_{ij}^N ：着目粒子 i と接触粒子 j 間に生じる法線方向の粒子間力、 r ：着目粒子 i の粒子半径、 $\boldsymbol{\omega}$ ：着目粒子 i の角速度ベクトル、 b_r ：転がり抵抗係数である。

ケーソン防波堤を対象とした挙動分析について、個別要素法を用いた検討が既往の研究で実施されている。ケーソンモデルの取り扱いとして、中瀬ら (2002)¹³⁾や澤田ら (2015)¹⁴⁾は円要素と辺要素を用いた多角形要素としている。一方で、Iwamoto et al. (2019)¹⁵⁾は粒子を剛結したモデル (以下、粒子剛結モデルと称す。) を用いている。本研究では、計算アルゴリズムが比較的単純な後者の粒子剛結モデルを適用する。

3. ダムブレイク現象の再現解析による碎石挙動と転がり抵抗の検討

先述のとおり、碎石の要素に転がり抵抗を導入する。本研究では、碎石を用いたダムブレイク実験を対象に個別要素法による再現解析を行い、転がり抵抗係数 b_r に伴う現象の再現性を検討した。

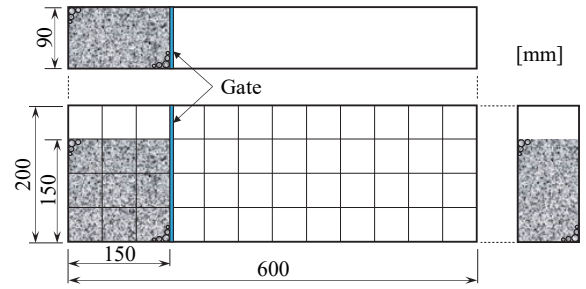


図1 ダムブレイク実験の概略図 (初期状態)



図2 碎石6号

表1 個別要素法における主なパラメータ

Parameters	Value
Normal stiffness, k_n (N/m)	1.0×10^7
Shear stiffness, k_s (N/m)	2.5×10^6
Local damping factor, h	1.0
Inter-particle friction angle, ϕ_{p-p} (deg.)	27
Friction angle between particle-wall, ϕ_{p-w} (deg.)	22
Rolling resistance coefficient, b_r	0.0, 0.1, 0.2, 0.3
Particle density, ρ_s (kg/m ³)	2,650
Time step, Δt (s)	1.0×10^{-6}

3.1 検討条件

ダムブレイク実験の概略図を図1に示す。アクリル製の装置を用い、その内部にアクリル製のゲートで仕切られた所定の領域に碎石を堆積させた。本実験ではその領域を高さ0.15m、幅0.15mとした。碎石は後述する縮尺模型実験の捨石マウンド材として用いる碎石6号 (粒径5~13 mm 混合) を使用した (図2)。堆積後、ゲートを鉛直方向に急速で引き抜き、碎石を重力崩壊させた。実験時は高速度カメラを使用して崩壊の過程を撮影した。撮影した画像をもとにPIV (Particle Image Velocimetry) 解析を行い、移動する碎石群の速度を分析した。

解析では、実験と同じ領域に粒径5mm、9mm、13mmの粒子を均等に発生させ、乱数によって初期位置を決定した。表1に解析パラメータを示す。本解析では、転がり抵抗に関するパラメータ b_r を0.0、0.1、0.2、0.3と変化させた際の挙動について分析する。

3.2 解析結果と実験結果の比較

図3に碎石が崩壊する過程を可視化した結果を示す。崩壊過程に着目すると、 b_r の値によって粒子挙動に差異が生じていることが確認できる。例えば、崩壊が停止した地点

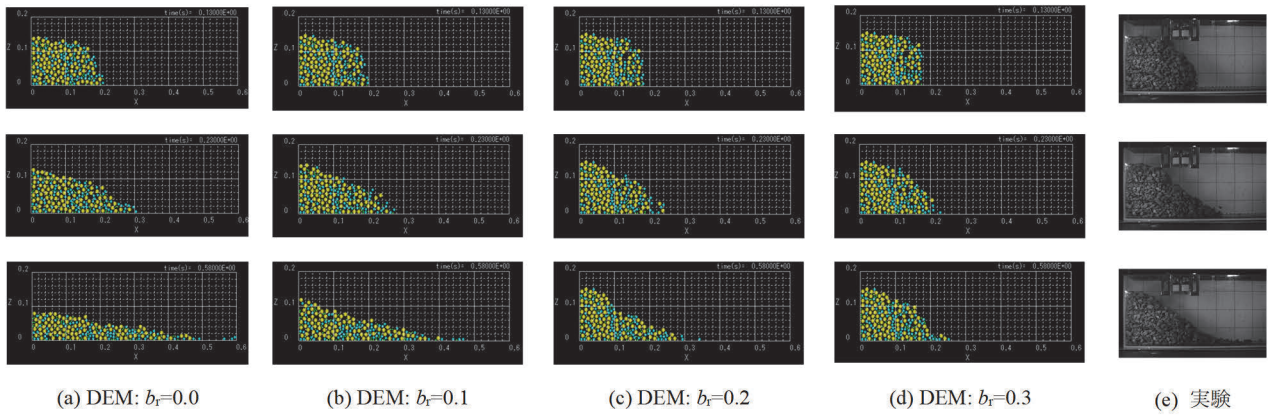


図 3 転がり摩擦係数に応じた碎石の崩壊現象の比較：上から、 $t = 0.13, 0.23, 0.58$ s時の様子

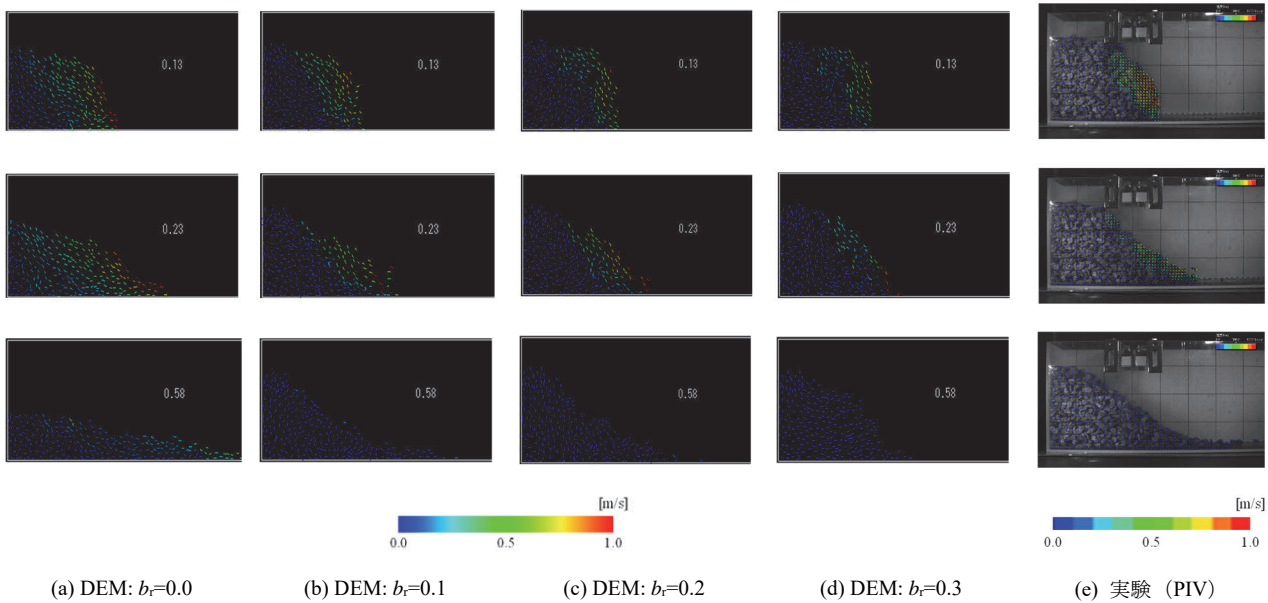


図 3 崩壊する碎石の流速分布：上から、 $t = 0.13, 0.23, 0.58$ s時の様子

での崩壊粒子の到達距離は b_r が 0.0 から順に 0.60, 0.47, 0.34, 0.25 m と、 b_r が大きくなるに従って到達距離が短くなった。例えば、 b_r が小さい場合は堆積させた粒子が全体的に流動しているのに対して、 b_r が大きくなるに従い、初期堆積時の形状が保たれたまま、ゲート開放により側方からの拘束がなくなった領域付近のみが崩壊していることが分かった。よって、 b_r が大きくなるほどせん断に対する抵抗が増加すると考える。

図 4 に解析による各粒子の速度ベクトルを可視化したものと模型実験結果を PIV 解析した結果を示す。先述のとおり、 b_r が大きくなるに従って粒子の移動領域が局所化されていることがわかる。崩壊領域における速度をみると、 b_r が 0.2 の場合、大凡、模型実験における PIV 解析の結果と定量的な整合性を有していると考えられる。

崩壊形状や崩壊過程等を踏まえて、本研究で用いる碎石 6 号の挙動の再現に関して、転がり摩擦係数 b_r は 0.2 が妥当と判断し、以降の解析では 0.2 と設定する。

4. 縮尺模型実験をベンチマークとした個別要素法

による解析結果の妥当性検討

4.1 検討条件

松田ら (2021)¹⁶⁾は、菊池ら (2011)¹⁷⁾の大型実験 (実物に対する縮尺比 1/10) を参考に、縮尺比 1/25 の模型実験により、破壊モードに着目した重力場における Modeling of Models の検討を実施した。その結果、ケーソン-捨石マウンド間の摩擦係数、ケーソンの挙動およびそれに伴う捨石マウンドの変状を大凡定量的に評価できることを明らかとした。

本研究では、松田らの方法を援用して実施した模型実験をベンチマークとして、個別要素法による解析結果の妥当性を検討した。ここでは、ベンチマークとして実施した模型実験の概要を示す。ケーソンはアクリル製で幅 640mm、高さ 400mm、奥行き 390mm の矩形形状である。ケーソン底盤は捨石材との摩擦を考慮して、コンクリート版を用いた。実物との相似性を考慮して、ケーソン重量が 2.136 kN となるように、鉛ブロック等で重量調整した。マウンド材

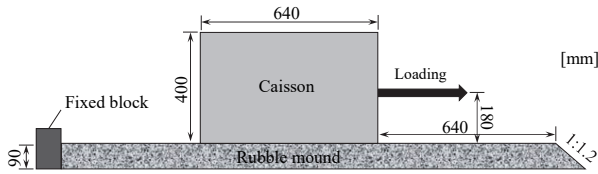


図 4 ケーソン-捨石構造断面 (Case0)

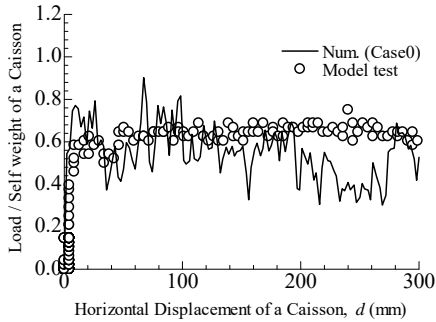


図 5 ケーソンへの無次元水平荷重とケーソンの水平変位の関係

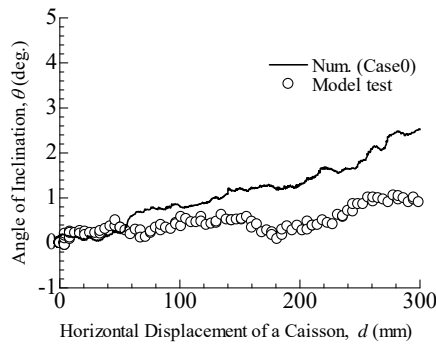
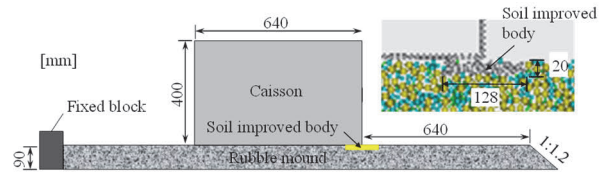


図 6 ケーソンの傾斜角と水平変位の関係

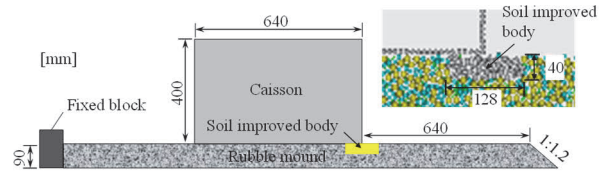
には砕石 6 号を用いた。荷重方法は、牽引ロープと巻取ウインチによる簡易的な引張荷重方法で実施した。荷重は引張型ロードセルを用いて計測し、ケーソンの変位は巻込型変位計を用いて計測した。

次に、個別要素法による解析条件を説明する。図 4 に解析モデルを示す。主な解析パラメータは表 1 と同様である。

解析モデルの作製手順は、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 5 mm, 9 mm, 13 mm の粒子がほぼ均一な粒子数になるよう堆積させた。転がり摩擦係数は 0.2 とした。その後、外枠を粒径 10 mm の粒子を配列して作製したケーソンモデルをマウンド上に設置した。本解析ケースを Case0 とした。構造物を作製後、模型実験の荷重位置と同位置に強制変位する粒子を配置し、模型実験の荷重速度を踏まえ、水平荷重を行った。



(a) Case1 : 改良体の幅128mm, 高さ20mm



(b) Case2 : 改良体の幅128mm, 高さ40mm

図 7 改良体を設けたケーソン-捨石構造断面

4.2 実験結果と解析結果の比較

ケーソンに荷重した水平荷重とケーソンの水平変位の関係を図 5 に示す。水平荷重については、得られた水平荷重をケーソン重量で除した無次元水平荷重を示している。模型実験における荷重初期の立ち上がりにおいて、無次元水平荷重は 0.6 程度になったのに対し、解析結果では 0.78 程度となった。その後、模型実験では緩やかに上昇し、ケーソンの水平変位が 200 mm 以降で減少に転じた。解析結果では模型実験に比べて変動が若干大きいのが、これは、数値解析におけるケーソンは円要素の粒子を結合しており、模型実験で用いたケーソン模型と面の平滑さが異なるため、このような影響によるものと考えられる。しかしながら、大凡のトレンドが一致していることがわかった。

次に、ケーソンの傾斜角とケーソンの水平変位の関係を図 6 に示す。傾斜角は時計回りを正とする。ケーソンの水平変位 50 mm 程度までは模型実験と数値解析で概ね一致していることがわかる。その後、水平変位の増加に従い、差異が生じ、水平変位が 300 mm の際の差は約 2° 程度となったが、概ね、ケーソン挙動も再現されていることを確認した。

5. 捨石マウンドの部分固化による対策効果の検討

5.1 検討条件

前章において個別要素法を用いた数値解析により模型実験との再現性が確認されたため、個別要素法を用いて、ケーソン後趾付近の捨石マウンドに可塑性グラウトを注入し、部分固化させて改良体を形成した際の挙動分析を行った。

ケーソン-捨石構造は前章と同じ断面とした。そのうえで、改良領域が異なる 2 パターンの断面による検討を実施した(図 7)。ケーソン後趾付近における改良体の幅 128mm, 高さ 20mm とした条件を Case1, 改良体の高さを Case1 の 2 倍とした幅 128mm, 高さ 40mm の条件を Case2 とした。通常、改良体は強度以上の外力が作用した際に破壊するが、

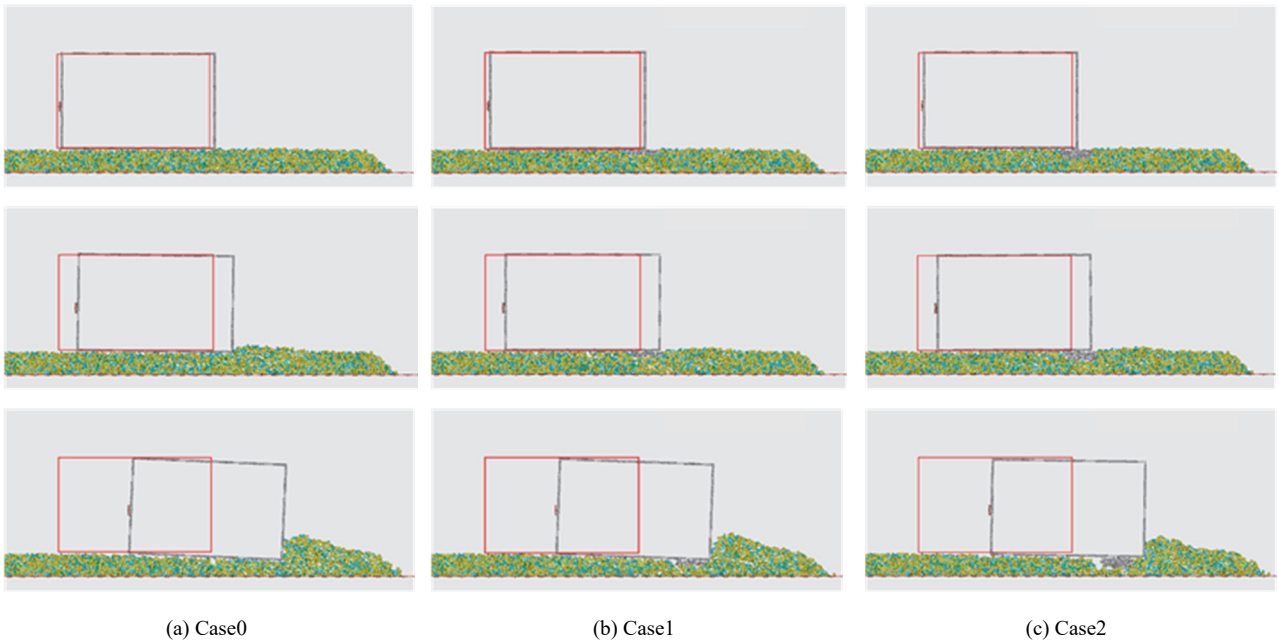


図 8 ケーソンへの载荷に伴う変状の様子 (赤枠はケーソンの初期位置) : 上から, ケーソンの水平変位が 20, 80, 300 mm のときの様子

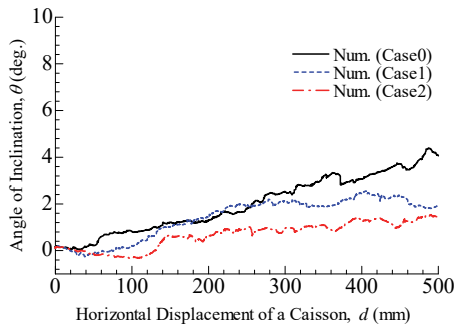


図 9 ケーソンの傾斜角と水平変位の関係

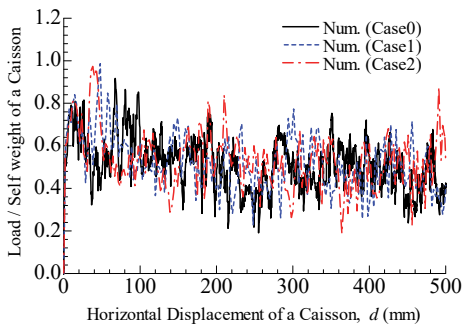


図 10 ケーソンへの無次元水平荷重とケーソンの水平変位の関係

本解析では厳密なモデル化は行わず, ケーソンモデルと同様に粒子を剛結した剛体モデルを適用している。これは, 改良体を設けた際のケーソン挙動を分析しやすくするた

めである。

5.2 解析結果と対策効果の分析

図 8 に各解析ケースにおける载荷後のケーソン変位が 20, 80, 300 mm のときの状態を示す。捨石マウンドを固化していない Case0 では水平荷重の载荷に伴いマウンドにケーソンが沈み込む挙動が生じ, 支持力破壊モードが誘発された。一方で, 捨石マウンドを固化した Case1 と Case2 では, ケーソンの水平変位 80 mm のとき, 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。ケーソンの水平変位が 300 mm のとき, 改良体の有無や改良深度に関係なく, すべてのケースでケーソンはマウンドに沈み込んだ。また, 改良体を設けた場合, 改良体より港内側の捨石が一体として後退することで, ケーソン下に空洞が形成した。

図 9 は各ケースにおけるケーソンの傾斜角と水平変位の関係を示す。改良体を有さない Case0 は, 先述のとおり, 荷重の载荷とともにケーソンが傾斜している。Case1 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が, Case2 では改良体が大きいので, 沈み込みが抑制され, ケーソンは滑動を続けた。ケーソンの水平変位が 120 mm 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ながら変位を継続したため, 傾斜角が拡大した。

図 10 にケーソンに载荷した水平荷重とケーソン水平変位の関係を示す。ここで, 水平荷重は無次元水平荷重を示す。Case0 は载荷初期に水平荷重が最大になり, その後, ケーソンの水平変位が大きくなるにつれ水平荷重が低下した。Case1 はケーソンが傾斜し始めた後, ケーソンの水平変位が 50 mm 以降で水平荷重が低下した。Case2 も同様

に、ケーソンが改良体から滑落して傾斜した水平変位 120 mm 以降で水平荷重が低下した。改良体を設けた Case1 と Case2 は水平荷重が低下した後は再び増加し、耐力の向上が確認された。

6. 結言

本研究では、耐津波性能を高めた「粘り強い」防波堤を築造する方法として、ケーソン後趾付近の捨石マウンドを部分固化させた際の挙動について、個別要素法を用いて分析し、以下の結論を得た；

- ・ 捨石マウンドを固化していない場合、水平荷重の載荷に伴いマウンドにケーソンが沈み込む挙動が生じ、支持力破壊モードが誘発された。
- ・ 捨石マウンドを固化した場合、ケーソンの水平変位が小さいとき、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。その後、ケーソンの水平変位が増加すると、改良体の有無や改良深度に関係なく、ケーソンはマウンドに沈み込んだ。
- ・ 改良体を設けた場合、改良体より港内側の捨石が一体として後退することで、ケーソン下に空洞を形成した。

謝辞

日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 20K14824 の助成、日比科学技術振興財団の助成を受けております。また、模型実験および数値解析の実施にあたり、豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士前期課程修了生の田村謙太郎氏、上田竜也氏の両氏には在学中に多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 辻尾大樹, 安田誠宏, 間瀬肇, 森信人, 前田恭兵, 山口佑太: 設定を超える津波に対するケーソン防波堤の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp. I_473-I_478, 2013.
- 2) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹, 青木亮介, 丸山憲治: ケーソン式防波堤の腹付工による耐力増加に関する遠心模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp. I_870-I_875, 2014.
- 3) 宮本順司, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 角田紘子, 前田健一, 松田達也: 津波越流時の防波堤基礎の不安定化と腹付工の効果, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_1011-I_1015, 2014.
- 4) 有川太郎, 及川森, 森安俊介, 岡田克寛, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 八尋明彦, 下迫健一郎: 鋼杭による防波堤補強工法の津波越流時における安定性に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp. I_623-I_628, 2015.
- 5) 三井順, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔: 津波に対する防波堤背後の腹付工の滑動抵抗力の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I_1039-I_1044, 2016.
- 6) 宮本順司, 鶴ヶ崎和博, 岩本哲也, 中瀬仁, 松田達也, 前田健一: 遠心模型実験による腹付工を設置した防波堤基礎マウンドの粘り強さの確認, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, pp. I_7-I_21, 2017.
- 7) Takahashi, H.: Stability of composite-type breakwaters reinforced by rubble embankment, *Soils and Foundations*, Vol. 61, No.2, pp. 318-334, 2021.
- 8) 小笠原哲也, 和田眞郷, 野口孝俊, 管崇: 京浜港ドックにおける重力式係船岸増深工法の実用化に向けた実証試験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp. I_390-I_395, 2018.
- 9) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 10) Maeda, K., Sakai, H., Kondo, A., Yamaguchi, T., Fukuma, M. and Nukudani, E.: Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, *Granular Matter*, Vol. 12, pp. 499-505, 2010.
- 11) 羽柴寛文, 前田健一, 内藤直人, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp. I_443-I_454, 2012.
- 12) Fukumoto, Y.: Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials, Doctor Dissertation, Kyoto University, 2015.
- 13) 中瀬仁, 宮田正史, 長尾毅, 本田中, 興野敏也, 安田勝則, 菅野高弘: 個別要素法によるケーソン式防波堤の挙動解析, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 461-472, 2002.
- 14) 澤田豊, 三宅達夫, 宮本順司, 河端俊典: 補強体を有する混成堤の津波外力作用下の安定性に関する解析的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 71, No. 4, pp. 352-364, 2015.
- 15) Iwamoto, T., Nakase, H., Nishiura, D., Sakaguchi, H., Miyamoto, J., Tsurugasaki, K. and Kiyono, J.: Application of SPH-DEM coupled method to failure simulation of a caisson type composite breakwater during a tsunami, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 127, 2019. Doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105806
- 16) 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: ケーソン捨石構造の破壊モードに着目した重力場における模型実験でのモデリング・オブ・モデルズ, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, pp. I_769-I_774, 2021.
- 17) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也: 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 67, No. 4, pp. 474-487, 2011.