

〈特別研究課題〉 マウンドの部分固化によるケーソン式防波堤の  
粘り強い構造構築に関する研究  
助成研究者 豊橋技術科学大学 松田 達也



## マウンドの部分固化によるケーソン式防波堤の 粘り強い構造構築に関する研究

松田 達也  
(豊橋技術科学大学)

### A Study on the Construction of Resilient Structures for Caisson- Type Breakwaters Using Partial Solidification of the Rubble Mound

Tatsuya MATSUDA  
(Toyohashi University of Technology)

#### Abstract :

This study focuses on a solidify method of inject grout into a rubble mound under a caisson. In this study, analyzed the behavior of a caisson-type breakwater under monotonic loading when part of the rubble mound is partially solidified. This analysis was conducted using both centrifuge model experiments and numerical simulations employing the Distinct Element Method (DEM). The results indicated that although the dimensionless horizontal load slightly increased under certain conditions, there were no significant differences with or without the countermeasure. However, in terms of caisson tilt progression, the tilt increased with loading in the absence of the countermeasure. Conversely, the countermeasure effectively suppressed the tilt, with broader improvement widths yielding better results. This indicates that applying countermeasures with a certain width can maintain wave resistance performance even under external forces. Finally, to better replicate damage and failure of the improved body, this study conducted a simulation of the uniaxial compression test using a bond model, which successfully reproduced the peak strength at failure. Future work will involve sensitivity analysis of parameters related to the bond model to better reproduce the load-displacement relationship.

## 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。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た。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。例えば、高橋ら(2014)<sup>1)</sup>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)<sup>2)</sup>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。

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進展する。Takahashi et al. (2021)<sup>3)</sup>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固化させる工法に着目し、ケーソン後趾付近の捨石を部分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、遠心力荷装置を用いた模型実験ならびに個別要素法(Distinct Element Method: DEM)を用いた数値実験により、ケーソン-捨石マウンドで構成するケーソン式防波堤を対象として捨石マウンドの一部を部分固化させた際の単調載荷に伴うケーソン挙動を分析し、対策工の有用性を検討した結果を述べる。

## 2. 遠心力荷装置を用いた模型実験

### 2.1 模型実験の概要

東洋建設株式会社鳴尾研究所が所用する、ビーム型遠心力荷装置を用いて遠心力場における模型実験を実施した。遠心力場で模型実験を実施する理由は次のとおりである。土粒子の集合体から成る地盤のような粒状体材料を対象として模型実験を行う場合、粒状体材料は拘束圧に依存した力学的挙動を示すため、単純に縮尺した模型では実物の挙動を適切に再現することができない。この問題を解決するため、模型に遠心加速度を付加し、遠心力を載荷することで、縮尺模型においても実物と同等の応力状態を模擬することができ、実物と等価な挙動を観察することができるためである。

本実験は遠心力場60gで実施した。プラットフォームに搭載する実験土槽の概要を図1に示す。対象とす

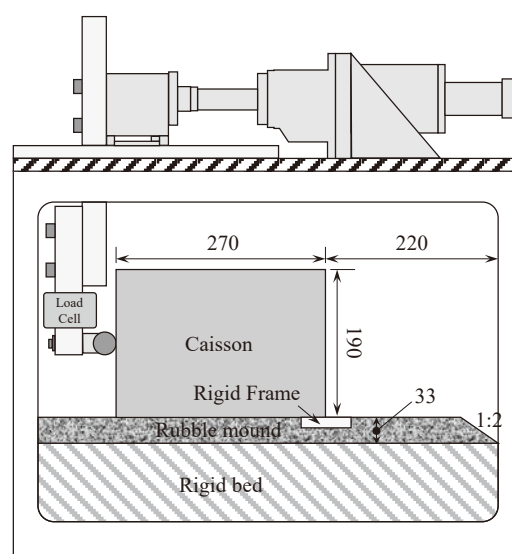


図1 遠心力場における模型実験の概略

る防波堤はケーソンと捨石から成るケーソン式防波堤で、ケーソンはアルミ製の模型を用い、中詰砂で密度を調整している。捨石材は実物質量を踏まえて模型サイズで4.75~9.50mmの範囲の粒径の礫材を使用し、空隙率40%となるように締めながら堆積厚さ3.3cm(実物換算1.98 m)で作製した。その後、港内側の端部を勾配1:2となるように法面を形成した。海底地盤は再現せず、剛地盤としている。対策工としての改良体は現象を観察しやすくするため、アルミ製の角材を用いた。改良体の範囲による違いを把握するため、改良体幅 $b$ が模型サイズで3.3 cmと6.6 cm(実物換算3.96 m)の2パターンとし、厚さは1.7 cm(実物換算1.02 m)で統一した。改良体幅の設定については、既設の防波堤に対して本対策を施す場合、ケーソン端からケーソン下に向けて注入管を挿入してグラウトを注入することになり、現状の施工技術では改良体を形成できる範囲がケーソン端から水平距離で2 m程度であることを踏まえて、現状の幅に設定している。

実験手順として、まず、重力場において所定の条件となるようにケーソン式防波堤モデルを作製した。ケーソンと改良体模型の断面には、壁面との摩擦を低減するため、グリスを塗布したスポンジテープを貼った。作製したモデルを遠心力载荷装置にセットアップして、遠心加速度60gとなるように装置を稼働させた。その後、スクリュージャッキを介して、ケーソン高中央に1.0 mm/minの速度で強制的に単調载荷を行った。実験中は载荷用フレームに設置したロードセルで荷重を計測した。また、ケーソンの水平変位を2台のレーザー変位計で、鉛直変位を接触型変位計でそれぞれ計測した。载荷に伴うケーソン式防波堤の変状は、スマートフォンカメラにて撮影した。

## 2.2 模型実験の結果

### (a) ケーソンに作用する無次元水平荷重とケーソンの水平変位の関係

図2に実物換算した無次元水平荷重—水平変位の関係を示す。無次元水平荷重とは、実験時に得られた水平荷重をケーソンの自重で除した値を示す。まず、無対策のケースに着目すると、水平変位0.1 m程度で0.4程度まで達している。水平変位0.5 mあたりまでは微量に耐力の増加が見られるものの、その後は若干減少傾向を示したのち大凡一定の値で推移した。対策を施した場合について、改良体幅3.3 cmのケースでは変位とともに荷重が増加し、最大で0.46となり対策を施していない場合よりも耐力が大きくなった。その後、徐々に増加し、水平変位2 m程度で無対策と同程度に収束した。一方で、改良体幅6.6 cmのケースでは、無対策のケースと同程度まで耐力が上昇したのち、若干、下回る値で推移した。

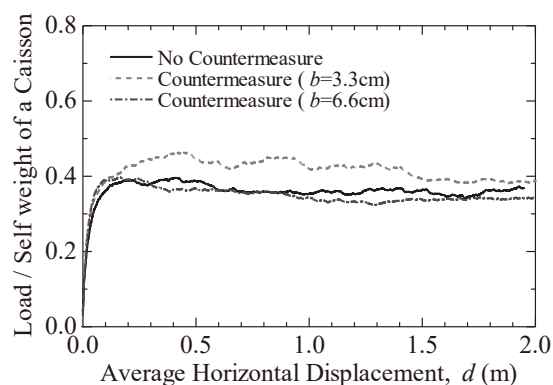


図2 模型実験による無次元水平荷重—水平変位の関係

### (b) ケーソン傾斜の進展

ケーソンの上部と下部を計測した水平変位のデータをもとにケーソンの傾斜角を算出した。正值は時計回りの回転を示し、载荷と反対側(港内側)のケーソン後趾がマウンドへ沈み込むような現象が生じていることを意味する。図3にケーソンの傾斜角と水平変位の関係を示す。無対策のケースでは初期の変位に伴って0.2 deg.程度まで傾斜した。その後、水平変位の増加に伴い、傾斜角も単調に増加していることがわかる。一方、対策を施したケースでは改良体幅に関わらず、初期の変位

で生じた傾斜角は無対策のケースの凡そ半分の0.1 deg.程度となった。また、水平変位0.3 m程度までは傾斜角が変化しなかったが、その後、改良体幅3.3 cmでは無対策と同様な傾きでケーソンの傾斜角が増加した。改良体幅6.6 cmのケースでは傾斜角は増加せず、若干減少傾向を示しながら推移した。

### (c) ケーソン式防波堤の構造体としての変状

図4に実験終了後のケーソン式防波堤の様子を示す。無対策と改良体幅3.3 cmの対策を施した場合については、港内側のケーソン背後に捨石材が盛り上がり堆積している様子が分かる。これは、ケーソンの傾斜移動に伴ってマウンドに変状が生じた結果を示している。改良体幅6.6 cmの対策についても、それらの変状は若干見られるものの、前者と比較して小さい変状となった。対策を施したケースで比較すると、改良体幅3.3 cmの場合、改良体と碎石の間に隙間が生じていることが確認できる。これは、ケーソンの変位に伴って改良体も後退することで隙間が生じる結果となった。一方で、改良体幅6.6 cmの場合は、改良体の上をケーソンがスムーズに滑動したため、ケーソン下に隙間が生じなかったと考える。

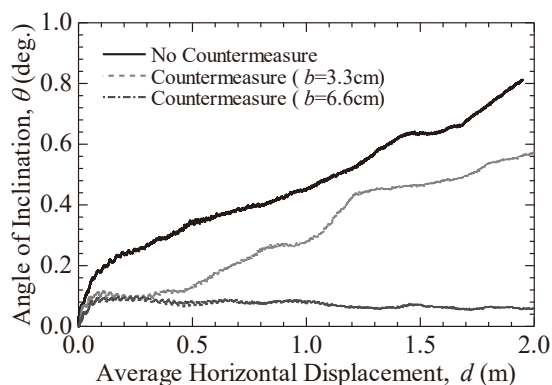
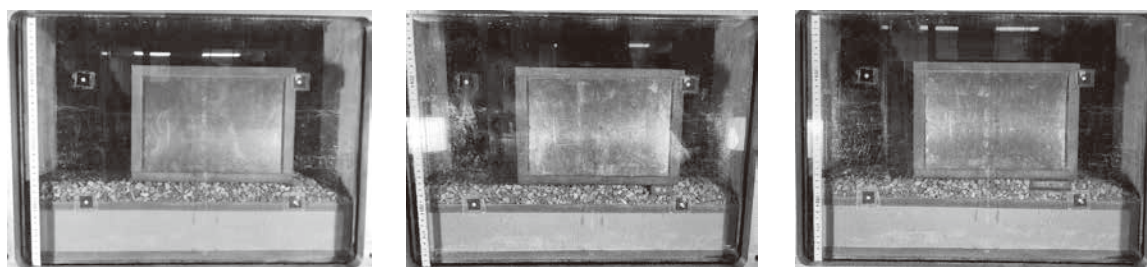


図3 模型実験によるケーソン傾斜角-水平変位の関係



(a) 無対策

(b) 対策 (b = 3.3 cm)

(b) 対策 (b = 6.6 cm)

図4 模型実験による荷終後のケーソン式防波堤の変状

## 3. DEMを用いた数値実験

### 3.1 数値実験の概要

本研究では、個別要素法(以下、DEM)を用いた数値実験による検討を実施した。個別要素法はCundall and Strack (1979)<sup>4)</sup>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、 $\omega$ ：着目粒子 $i$ の角速度ベクトル、 $M_i$ ：着目粒子 $i$ に作用するモーメントを示す。

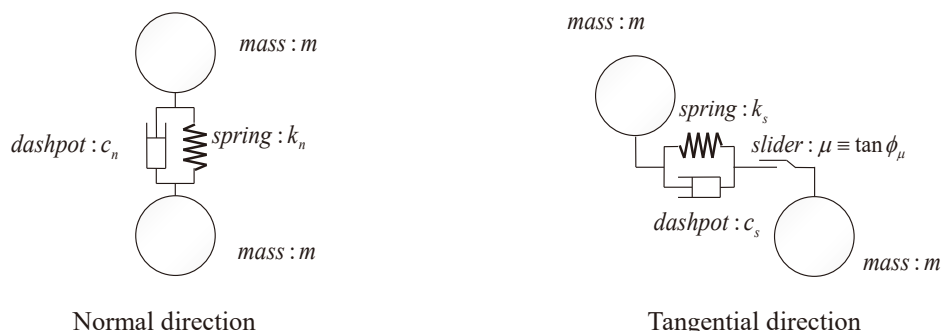


図5 個別要素法 (DEM)における法線方向と接線方向のモデル

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を総和して、式(1)、(2)より加速度を求める。粒子間で生じる接触力は図5に示すとおり、法線方向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発揮される。本検討は計算コストを低減させるため、回転抵抗モデル<sup>5)</sup>を導入し、粒子に転がり摩擦のような回転抵抗を再現した。

数値実験では、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て部分固化させる範囲の捨石粒子を剛結した。検討断面は模型実験における無対策と改良体幅6.6 cmのケースを参照したモデルによって検討した。

### 3.2 数値実験の結果

#### (a) ケーソンに作用する無次元水平荷重とケーソンの水平変位の関係

ケーソンに作用する無次元水平荷重とケーソンの水平変位の関係を図6に示す。模型実験と同様に対策の有無に関わらず、トレンドの傾向に大きな差異は見られなかった。数値実験では、初期における無次元水平荷重が0.8以上に発現されているが、これはケーソンと捨石間の摩擦によるものである。既往研究<sup>6)</sup>より捨石マウンドの均し方法

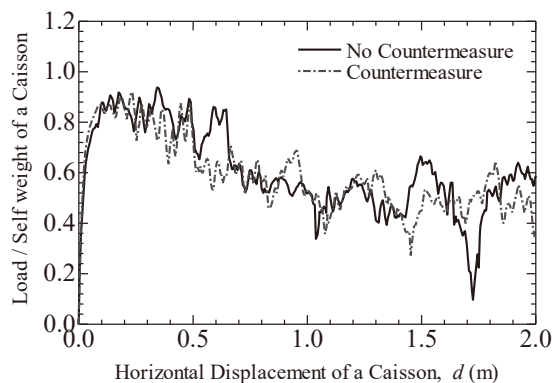


図6 数値実験による無次元水平荷重-水平変位の関係

や密度が摩擦に影響することが知られており、これらの知見を踏まえて摩擦の妥当性を評価し、現象を分析する必要がある。

#### (b) ケーソン傾斜の進展

図7に各ケースにおけるケーソン傾斜角と水平変位の関係を示す。傾斜角は初期の姿勢をゼロとして、初期からの変化を示している。無対策の場合、ケーソンの水平変位1.7 m程度までは傾斜角が微量に増大し、それ以降で急激に傾斜した。水平変位2.0 mの地点では傾斜角が約0.8 deg.に達し



た。一方、対策を施した場合は、ほぼ傾斜が生じることなく、ケーソンが滑動する状態が継続した。傾斜角の変化は模型実験と同等であることがわかった。

### 3.3 改良体のモデル化に向けた検討

実際の改良体は捨石内にグラウトを注入し、固化させる。改良体は所定の強度を持ち、強度以上の外力が作用することで損傷、破壊に至る。本研究では、DEMによる数値実験において、破壊現象予測の高精度化を実現するため、改良体のモデル化を検討する。

#### (a) 土砂崩壊シミュレーション

まず、捨石材に用いる礫材の流動挙動の再現性を検討した。本検討では、図8に示す縦0.2 m、幅0.6 m、奥行き0.09 mの装置内に高さ0.15 m、幅0.2 mとなるように礫材を堆積させ、固定していたゲートを急開することで、礫材の崩壊現象を考察した。事前に実施した模型実験における崩壊後の形状をトレースし、数値実験で得られた結果と比較することで、改めて、礫材における回転抵抗パラメータ $b_r$ を検討した。

図9に土砂崩壊後の最終形状を比較する。回転抵抗パラメータが大きくなるほど、粒子の回転を拘束する働きがある。この結果から、回転抵抗がゼロの場合、崩壊が大きくなり、緩やかな形状となることがわかる。回転抵抗が大きくなるほど、崩壊が切り立った形状となる。模型実験と比較すると、回転抵抗パラメータ $b_r$ を0.1程度に設定すると、礫材の流動形状を定量的に再現できることがわかった。

#### (b) 改良体の一軸圧縮シミュレーション

次に改良体の一軸圧縮シミュレーションを実施した。グラウトによる礫材の固結を模擬するため、Bondモデル<sup>7)</sup>を適用した。Bondモデルは、図10に示すとおり、粒子同士を結合するモデルで法線方向と接線方向にボンド強度を持ち、最大引張応力が法線方向のボンド強度を超えた場合、もしくは、最大せん断応力が接線方向のボンド強度を超えた場合に結合が破断すると判断される。

一軸圧縮シミュレーションを行うにあたり、礫材

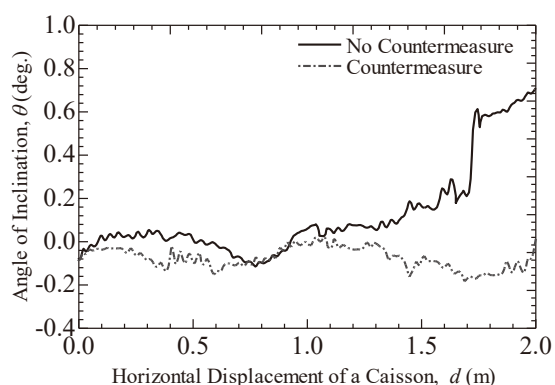


図7 数値実験によるケーソン傾斜角ー水平変位の関係

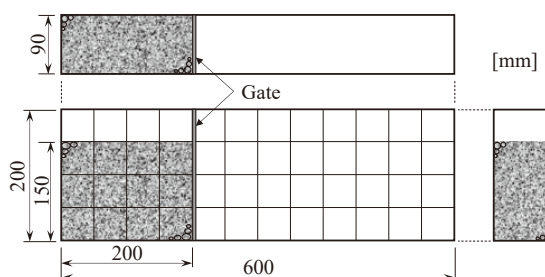


図8 土砂崩壊シミュレーションの概略

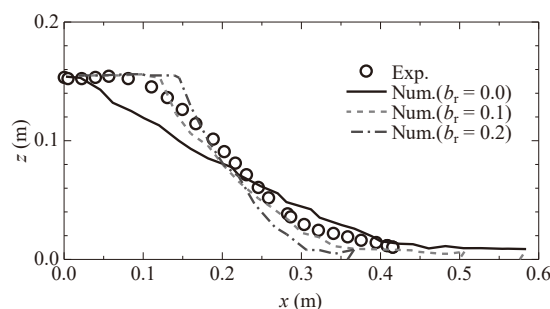


図9 土砂崩壊後の最終形状

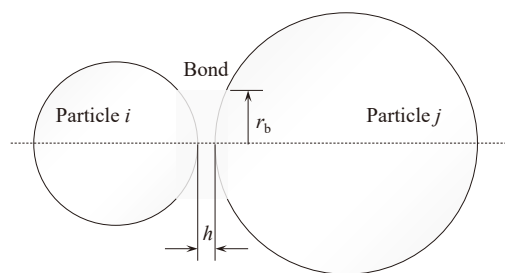


図10 Bondモデルの概略

の粒径を考慮して供試体寸法は直径0.05 m、高さ0.10 mの円柱形とした。供試体作製時は円柱領域内に粒子を密に配置し、所定の高さとなるように堆積させた。堆積後にBondモデルを導入して粒子を固結し、供試体を載荷板上に自立させた。その後、下部の載荷板は固定し、上部の載荷板を1秒間に軸ひずみ0.1%となるように強制的に変位载荷を与えた。シミュレーションにおけるボンド強度はせん断・引張りともに10 N/mm<sup>2</sup>と設定した。

図11に供試体載荷時の絶対速度の分布を示す。载荷に伴い、供試体内に斜めの速度分布が発生しており、せん断による変位が進展している様子が伺える。和田ら<sup>8)</sup>の検討では、礫材の種類・粒径、供試体寸法、供試体への载荷速度が異なるが、圧縮強度が23 N/mm<sup>2</sup>となっている。一方で、シミュレーションの結果は凡そ43 N/mm<sup>2</sup>程度となり、オーダーが一致した。現在、シミュレーションの結果が若干大きく出ているが、今後はBondモデルのパラメータに関する感度分析を進め、再現性を向上させる。

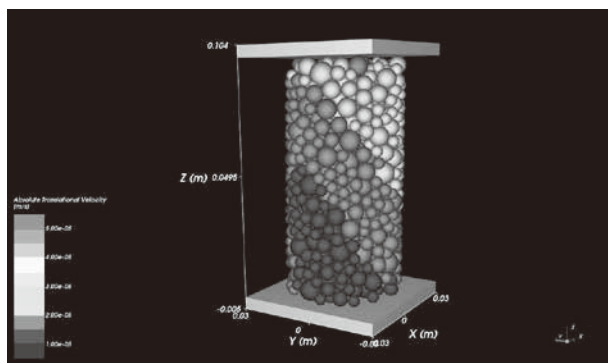


図11 一軸圧縮シミュレーションによる載荷時の絶対速度分布

#### 4. 結言

本研究では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固化させる工法に着目し、遠心力载荷装置を用いた模型実験ならびに個別要素法(DEM)を用いた数値実験により、ケーソンー捨石マウンドで構成するケーソン式防波堤を対象として捨石マウンドの一部を部分固化させた際の単調载荷に伴うケーソン挙動を分析した。その結果、以下の結論を得た；

- ・ 対策の条件により無次元水平荷重が若干増加するものの、対策の有無に関わらず、大きな差異が生じていない。
- ・ ケーソン傾斜の進展を見ると、対策なしの場合は载荷に伴って傾斜が増加するが、対策を施した場合は傾斜を抑制することができ、改良体の幅が広いほどその効果が得られた。
- ・ ある程度の幅の対策を施すことで外力が作用しても天端高を確保し、耐波性能を保持できる。

最後に、改良体の損傷、破壊を再現し、より高精度な予測を実現するため、ボンドモデルを導入した改良体モデルの一軸圧縮試験の再現シミュレーションを実施した結果、改良体の破壊時の圧縮強度を概ね再現することができた。今後は、ボンドモデルに関連するパラメータの感度分析を進め、荷重－変位関係が適切に再現できるように取り組むことが課題である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

- 3) Takahashi, H.: Stability of composite-type breakwaters reinforced by rubble embankment, *Soils and Foundations*, Vol. 61, No.2 , pp. 318-334, 2021.
- 4) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular asseblies, *Géotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 5) Fukumoto, Y.: Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials, Doctor Dissertation, Kyoto University, 2015.
- 6) 森平倫生, 木原力, 堀川洋 : 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp.337-341, 1978.
- 7) Potyondy, D. O. and Cundall, P. A.: A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 1329-1364, 2004.
- 8) 和田真郷, 合田和哉, 小笠原哲也, 三枝弘幸 : 礫材の空隙に可塑状グラウトを充填した改良体の強度変形特性, *土木学会論文集B3(海洋開発)*, Vol. 75, No. 2, pp. I\_851-I\_856, 2019.