

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和 7 年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和 7 年 2 月 25 日付 第 15 - 1 号

研究開発項目 : (番号③) 港湾、海岸及び空港における大規模災害
対策に関する研究に関するもの

防波堤の耐津波化に向けた後趾近傍の
マウンド部分固化範囲の検討

令和 8 年 4 月 30 日

豊橋技術科学大学

松田 達也

目 次

1. 緒言	1
1.1 研究背景	
1.2 研究目的	
2. 改良体モデルの高精度化	3
2.1 一軸圧縮試験	
2.2 Bond モデルを導入した個別要素法による改良体の一軸圧縮シミュレーション	
3. 改良体の変形・破壊を考慮した遠心模型実験	5
3.1 検討概要	
3.2 実験結果	
4. 個別要素法を用いたマウンド部分固化による改良範囲とマウンド肩幅がケーソン防波堤の安定性に及ぼす影響評価	9
4.1 検討概要	
4.2 解析結果	
5. 総論	16
5.1 改良体モデルの高精度化に関する成果	
5.2 改良体の変形・破壊を考慮した遠心模型実験による成果	
5.3 改良体範囲およびマウンド肩幅に関する個別要素解析による成果	
5.4 本研究の総括と今後の課題	
参考文献	17

1. 緒言

1.1 研究背景

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が、これまでに多くの研究機関において被災メカニズム解明に向けた研究が行われてきた。例えば、ケーソン下の捨石や支持地盤の安定性に着目した研究として、三宅ら（2009）¹⁾は遠心力場模型実験により津波作用時の捨石への浸透や支持地盤における間隙水圧応答を分析し、安定性について評価した。宮本ら（2014）²⁾は三宅らが開発した遠心力場模型実験装置を改良し、遠心力場での津波越流実験を行った。その結果、浸透によるマウンド不安定化に伴うケーソンの転倒過程において、マウンド内の浸透による局所的な動水勾配の増大に伴って捨石がボイリングし、ケーソンがマウンドにめり込みながら傾斜していくことを示した。笠間ら（2013）³⁾は重力場水理模型実験により津波作用下での浸透力を考慮した捨石マウンドの支持力特性を検討し、浸透力を考慮した支持力低減率を提案した。有川ら（2013）⁴⁾は比較的縮尺比が大きいスケールの重力場の水理模型実験により複数断面の防波堤について津波越流時の破壊モードを検討し、支持力破壊と転倒に対する安全率が基礎部である捨石や支持地盤に洗掘が生じることで減少することを示した。高橋ら（2013a⁵⁾, 2013b⁶⁾）は遠心力場模型実験により実物スケールの地盤応力を考慮した検討を行い、2種類の粒径が異なる砕石を用いて支持力破壊のモードの違いを示した。松田ら（2021）⁷⁾は津波による防波堤の被災メカニズムを明らかにするため、地盤工学的視点に立ち、ケーソン式防波堤を対象とした波外力による大変形に至るまでのプロセスを重視した破壊モード分析を実施した。その結果、ケーソンが滑動後（または、それと同時に）にマウンドへ沈み込むことでケーソンが傾斜し、耐力が低下しながら支持力破壊を伴う大変形へ進展することを明らかにした。

これらの成果を踏まえ、津波が作用する防波堤において想定される破壊モードを図-1に示す。

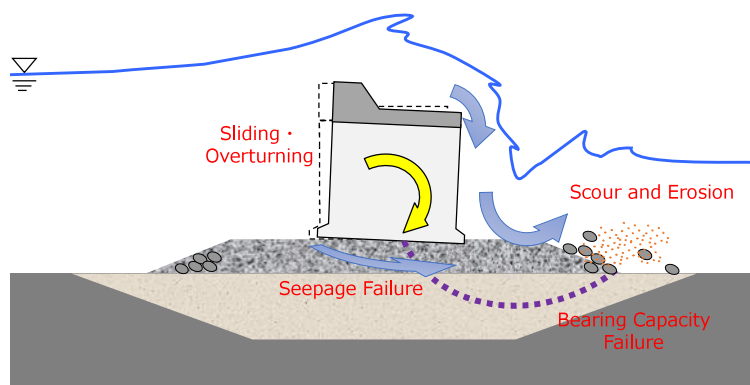


図-1 津波が作用するケーソン防波堤の破壊モード

一方で、東北地方太平洋沖地震以降、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り、粘り強い構造形式に関する検討が行われてきた。特に港内側のケーソン背後に腹付工を設置する構造形式については、平成30年に改定された港湾の施設上の基準・同解説⁸⁾において、腹付工による耐津波効果の確認手法が明確化された。

Takahashi et al. (2021)⁹⁾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。

この解決方法の一つとして、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た部分固化工法を導入することで粘り強い構造を構築できる可能性を考えた。我が国では、重力式岸壁下の捨石マウンド固化による増深化等を目的として、可塑性グラウトの活用が検討されている^{10)・11)}。これまでのところ、防波堤下の捨石マウンドへ可塑性グラウトを注入し、固化させることを目的とした検討事例はないが、重力式係船岸の増深工法に関する施工の手引き（案）¹²⁾では、防波堤下のマウンドへ可塑性グラウト注入を注入固化させ、“粘り強い構造”の補強工法としての可能性が記載されており、本方法を防波堤の粘り強い耐津波化技術に援用できる可能性が示唆されている。しかしながら、具体的な対策効果を検討した事例はこれまでにない。

1.2 研究目的

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た部分固化工法を導入することで、防波堤の耐津波性を向上させる粘り強い構造を提案することが最終目的である。

本工法における防波堤の対策効果は、次のことが期待できる；

- ① ケーソンに作用した津波力による捨石マウンドへの端趾圧に対する抵抗とケーソン沈み込みの防止
- ② ケーソンを隔てた港内外水位（水頭）差に伴う捨石マウンド内浸透による支持力低下の防止

上記の2つの対策効果の可能性を踏まえて、本工法の研究開発を進めている。既往の研究において、①の対策効果に焦点を当てた個別要素解析ならびに遠心模型実験により、単調載荷に伴う防波堤の破壊挙動を分析してきた。そのうえで、津波作用時の可塑性グラウトにより固化した改良体に作用する外力特性を明確とし、防波堤の構造形状に応じた本対策工における有用な改良範囲を規定する必要がある。

当該年度は、改良体モデルの高精度化ならびにケーソンー捨石マウンドからなる防波堤モデルについて改良体を設置する場合の改良体の設置位置および改良体範囲に応じた挙動の違いを分析した。

2. 改良体モデルの高精度化

2.1 一軸圧縮試験

模型実験で用いる改良体モデルの高精度化を図るため、モデルの要素試験を実施した。具体的には、セメントペーストによるモデル（セメントペースト単体モデル）とセメントペーストにマウンド材として用いる礫材を混合したモデル（セメントペースト＋礫材混合モデル）の2ケースを対象に、一軸圧縮試験を実施した。礫材は4.75－9.5 mm 粒径で、圧密排水三軸圧縮試験の結果、粘着力 c_d が 21 kN/m²、内部摩擦角 ϕ_d が 42.3° である。供試体サイズは、直径 0.05 m、高さ 0.10 m であり、礫材の供試体作製時の目標空隙率は 40 %とした。実物におけるグラウト強度 24 N/mm² を目標値とし、水セメント比（W/C）による各モデルの強度の違いを確認した。

表-1 にセメントペースト単体モデル、表-2 にセメントペースト＋礫材混合モデルにおける水セメント比ごとの一軸圧縮強度を示す。各条件で 3 供試体を用いて実験を実施した平均値である。

表-1 セメントペースト単体モデルの一軸圧縮強度

W/C (%)	55	45	35
Unconfined compression strength (N/mm ²)	23.8	35.4	49.6

表-2 セメントペースト＋礫材混合モデルの一軸圧縮強度

W/C (%)	55	45	35
Unconfined compression strength (N/mm ²)	8.5	19.9	29.2

セメントペースト単体モデルの結果より、水セメント比を 55%より小さくすることで、実物におけるグラウト強度 24 N/mm² を満足することがわかった。さらに、セメントペースト＋礫材混合モデルでは、セメントペースト単体モデルに比べて、約半分程度の強度となっており、和田ら¹¹⁾が実施した一軸圧縮試験と類似した強度特性を示すことがわかった。

図-2 に試験後の供試体の様子を示す。どちらのモデルも縦方向にクラックが生じるような破壊形態を示した。セメントペースト＋礫材混合モデルについては、セメントペーストと礫材が付着する境界面で剥離するような破壊も見られた。



(a) セメントペースト単体モデル



(b) セメントペースト＋礫材混合モデル

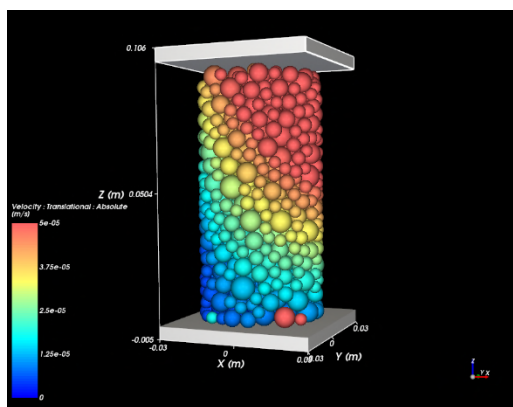
図-2 一軸圧縮試験後の供試体の破壊状況

2.2 Bond モデルを導入した個別要素法による改良体の一軸圧縮シミュレーション

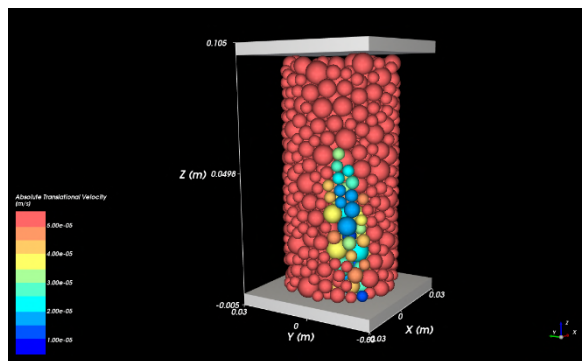
昨年度の実績に基づき、Bond モデルを導入した個別要素法による改良体モデルの検討を行った。Bond モデルは、粒子同士を結合するモデルで法線方向と接線方向にボンド強度を持ち、最大引張応力が法線方向のボンド強度を超えた場合、もしくは、最大せん断応力が接線方向のボンド強度を超えた場合、結合が破断すると判断する。

本検討では、改良体の一軸圧縮シミュレーションを実施した。一軸圧縮シミュレーションを行うにあたり、礫材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させ、供試体を載荷板上に自立させた。その後、下部の載荷板を固定し、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載荷を与えた。ボンド強度はせん断・引張りともに 10, 20 N/mm² と設定し、ボンド強度と破壊モードを調べた。

図-3 に供試体載荷時の絶対速度の分布を示す。ボンド強度によらず、載荷に伴って鉛直方向に速度の伝播が発生した。この際、速度伝播のグラデーション境界面は水平を成していたが、その後、図-3(a)に示すような斜めのコンターが出現し、破壊した。一方で、ボンド強度が大きいと図-3(b)に示すように、一部で鉛直方向に速度分布が異なる領域が出現した。このことから、ボンド強度の違いにより破壊モードが変わる可能性が示唆された。ただし、現段階ではボンド強度と実験で得られた一軸圧縮強度との対応関係が十分に整理されていない。今後は、今年度取得したセメントペースト単体モデルおよびセメントペースト+礫材混合モデルの一軸圧縮試験結果に基づき、Bond モデルのパラメータ同定を行うとともに、破壊モードの再現性を検証する必要がある。



(a) ボンド強度 10 N/mm²



(b) ボンド強度 20 N/mm²

図-3 一軸圧縮シミュレーションによる供試体の変位速度

3. 改良体の変形・破壊を考慮した遠心模型実験

3.1 検討概要

本実験は、東洋建設株式会社鳴尾研究所が所有するビーム型遠心力载荷装置を使用して、ケーソン後趾のマウンドを部分固化した際の対策効果を端趾圧の観点から調べた。具体的には、遠心力場の実応力条件において、部分固化を模擬したケーソン式防波堤に水平外力を作用させる模型実験を実施した。

実物に対し、1/60 スケールの縮尺模型を用い、遠心力 $60g$ 場で実験を行った。防波堤の検討断面を図-4 に示す。本研究で示す寸法等諸量は、 $60g$ 場における実物換算である。ケーソン模型はアルミ製であり、重心が躯体の中心となるように中詰材で密度を調整し、接地圧を実物に合わせた。高さ、幅、密度は、それぞれ 11.4 m 、 8.1 m 、 $2,140\text{ kg/m}^3$ である。マウンドは、粒径 $285\text{ mm} \sim 570\text{ mm}$ 、密度 2.61 g/cm^3 の礫材を使用し、空隙率 40% 、厚さ 1.98 m となるように締め固めて作製した。その後、港内側の法面勾配を $1:2$ に形成した。マウンド以深の支持地盤については剛地盤とした。

グラウトによる部分固化は、幅 3.96 m 、厚さ 1.02 m の直方形の改良体で再現し、アルミ製とセメントペースト製（一軸圧縮強度 $30 \sim 40\text{ N/mm}^2$ ）の2種類で実施した。後者は改良体の変形や破壊を考慮するために行った。

実験は、無対策 (Case1)、アルミ製の部分固化 (Case2)、セメントペーストの部分固化 (Case3) の3種類で検討した。また、Case3 の追加検討として、セメント改良体内部にひずみゲージを複数設置して内部のひずみを計測した (Case3')。改良体の位置は、ケーソン後趾を基点として左右対称となるように設置した。

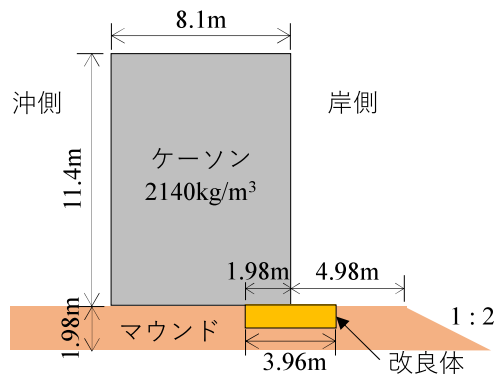


図-4 ケーソン式防波堤モデル（実大寸法）

土槽上部のモーターとジャッキに接続した载荷アームを用いて、载荷速度 1 mm/min で水平方向に単調载荷した（図-5）。载荷位置はケーソン沖側側面の中央高さとした。载荷アームに付属するロードセルで水平荷重、土槽岸側に設置した2基のレーザー式変位計でケーソン上下の水平変位を計測し、平均水平変位と傾斜角を算出した。

今年度の研究では、ケーソン底面に生じる接地圧を計測するため、底板を3つの板で分割し、底面の3方向測線（沖側、中心、岸側）に荷重計を3箇所ずつ設置した。底板は可動式であり、底板を介して载荷に伴う接地圧を荷重計で計測した（図-6）。

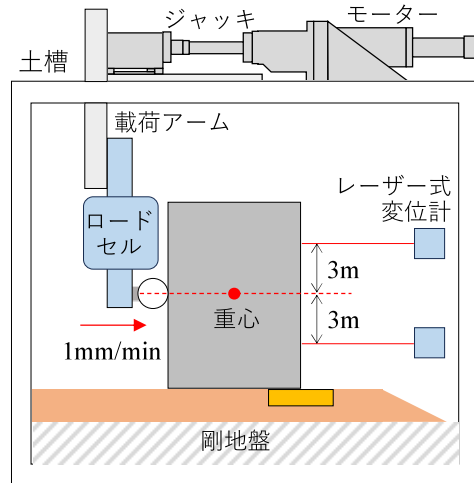


図-5 実験装置概略図

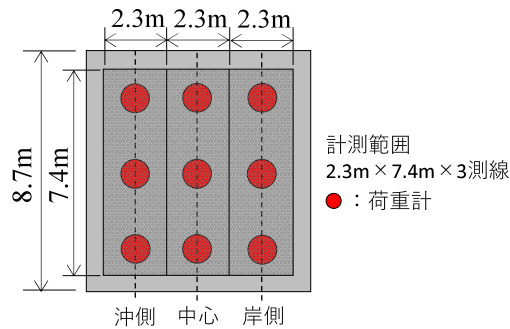


図-6 接地圧測定のためのケーソン底面における荷重計設置位置

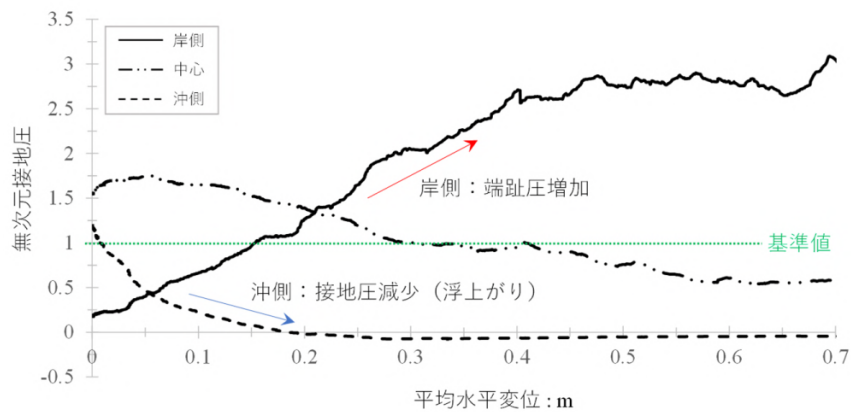


図-7 ケーソンの水平変位と接地圧の関係

3.2 実験結果

3.2.1 载荷に伴うケーソン式防波堤の変状と接地圧の変化

無対策（Case1）における支持力破壊の過程を接地圧の観点から観察する．図-7 はケーソンの水平変位と接地圧の関係である．接地圧は各測線の荷重値合計を理想値（自重が一様に作用した場合の荷重）で除した無次元量であり，数値 1 が増減の基準となる．

ケーソンの水平変位に伴い、接地圧が変化した。具体的には、沖側の接地圧が徐々に減少し、水平変位 0.2 m 付近からゼロになった。これは、ケーソン沖側が浮き上がり、水平変位 0.2 m 付近でマウンドとの接触が無くなったことを示す。一方で、岸側の接地圧は増加傾向を示した。これは、水平荷重により偏心荷重が徐々に大きくなり、マウンドへの端趾圧が増加したことを示す。なお、端趾圧が 0.4 m 付近から横ばいとなっており、これは支持力破壊に伴うマウンド斜面崩壊が要因と考えられる。実際、水平荷重も変位 0.4 m 付近でピークを迎えた後、横ばいとなっていた。加えて、中心方向の接地圧変化は比較的小さく、ケーソン中心測線付近を支点として傾斜したと考える。

3.2.2 ケーソン傾斜角の推移

各ケースにおけるケーソンの傾斜角を図-8 に示す。Case1 は荷重とともに傾斜が増加し続け、水平変位 0.7 m 付近で傾斜角が約 2.4 deg に達した。一方で、Case2 および Case3 の改良体を有するケースでは、傾斜角の増加が抑制された。水平変位 0.7 m 付近における Case2 および Case3 の傾斜角は、Case1 と比較してそれぞれ約 85%、約 57%低減した。

図-9 は Case3 における荷重後の様子を示す。図中の白点線は、荷重前におけるケーソン、改良体、マウンドの状態を表す。改良体の設置により、ケーソンが水平に変位していることがわかる。また、水平変位に伴うマウンド、改良体の大きな変位も見られなかった。しかし、実験終了後に改良体を確認すると、改良体にはクラックが生じ、破壊していた。このことから、改良体には荷重途中でクラックが発生し、最終的に破壊に至ったと想定する。

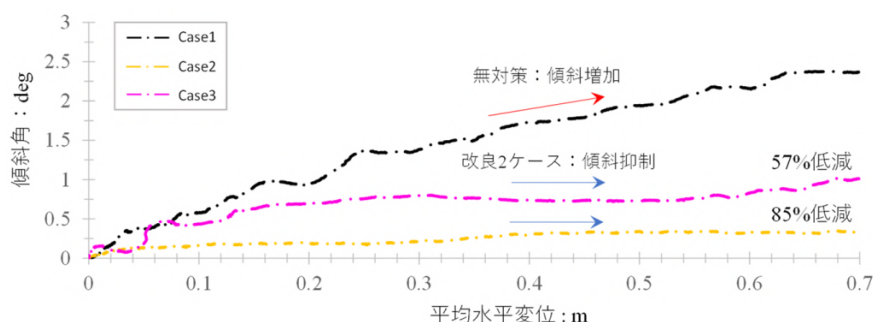


図-8 ケーソンの水平変位と傾斜角の関係

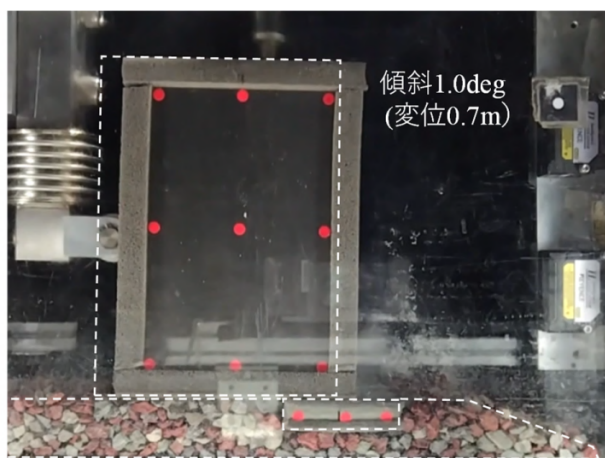


図-9 セメントペーストの部分固化 (Case3) を有するケーソン式防波堤の変状

先述した Case2 と Case3 でケーソン傾斜角に関して低減が異なるのは、Case2 は改良体がアルミ製（剛体）で変形が生じない一方で、Case3 の改良体はセメントペースト製で端趾圧によって変形を伴うためと考えられる。

3.2.3 改良体によるケーソン端趾圧の低減効果

各ケースにおける端趾圧（岸側接地圧）の結果を図-10 に示す。Case1 は荷重とともに端趾圧が増加した。一方、改良体を設けた Case2, Case3 においては、端趾圧の増加が抑制されていることがわかった。これは、改良体により端趾圧が分散されたためと考えられる。しかし、Case3 においては、端趾圧が抑制されているにもかかわらず、改良体にクラックが発生している。この点について、以降の改良体内部への作用応力の観点から考察する。

Case3' の改良体に作用した垂直応力を図-11 に示す。垂直応力 σ は、改良体内部の中心および沖側と岸側（中心から 0.9m の位置）のひずみから求めており、 $\sigma = E\varepsilon$ （ E : ヤング係数、 ε : ひずみ）で表される。 E は一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線の傾きから求めた（ $E = 4.0 \times 10^6$ kPa）。上面はケーソン接触側、下面はマウンド接触側であり、荷重前をゼロとしている。中心において上面は負値、下面は正值の対称性を示し、それぞれ圧縮応力、引張応力が作用していることがわかる。一方で沖側と岸側の応力は比較的小さいため、中心部に局所的な応力が作用していることがわかる。この局所的な作用により、改良体が変形し、破壊に至ったと考えられる。

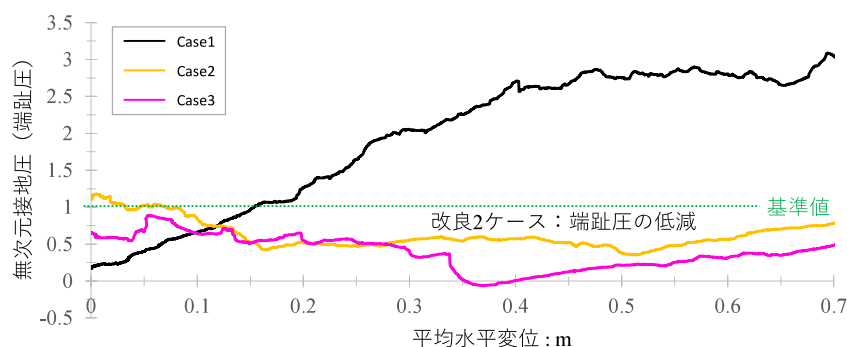


図-10 ケーソンの水平変位と無次元接地圧の関係

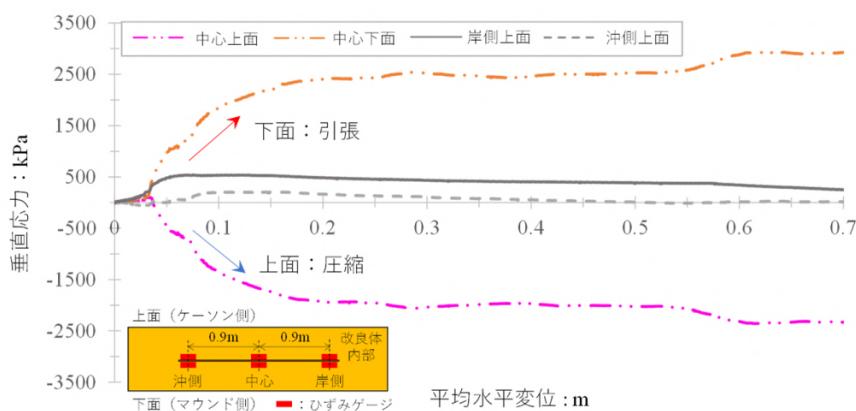


図-11 改良体内部に生じた垂直応力の変化

4. 個別要素法を用いたマウンド部分固化による改良範囲とマウンド肩幅がケーソン防波堤の安定性に及ぼす影響評価

4.1 検討概要

本章では、端趾圧がより顕著に増加する縦横比が大きいケーソンを対象に、マウンド部分固化による改良範囲とマウンド肩幅がケーソン挙動に及ぼす影響を、個別要素法を用いて分析した。本解析は、松田ら¹³⁾の解析モデルや設定パラメータを援用して検討を進めた。主な解析パラメータを表-3に示す。本解析モデルは実物に対し、1/25縮尺のモデルを対象とした。

図-12に解析モデルを示す。ケーソン防波堤は、ケーソン幅 320 mm、高さ 400 mm とした。捨石材は、粒径 5 mm, 9 mm, 13 mm の粒子がほぼ均一な粒子数となるようにランダム配置で発生させ、マウンドを形成した。捨石材は回転抵抗モデルを適用し、碎石崩壊の再現解析を踏まえ、転がり摩擦係数を 0.2 に設定した¹³⁾。マウンド層厚 90 mm とし、マウンドの肩幅（以下、マウンド幅と称す。）160, 320, 640 mm とした。

改良体のモデル化は、マウンドを形成後、改良体範囲に含まれる碎石粒子をグルーピングして剛体指定した。改良体は幅 64, 96, 128 mm の 3 パターン、層厚 20, 40 mm の 2 パターンとした。改良体の設置位置は改良体の幅方向における中心線上にケーソンの港内側の側面が一致するように配置した。これに加え、改良体幅 96 mm については、改良体の配置条件を変更した検討も行った。具体的には、ケーソンの港内側の側面の延長線を基準とし、改良体幅の 1/3 がケーソン下に入るように設置した 1:2 と称するケース、改良体幅の 2/3 がケーソン下に入るように設置した 2:1 と称するケースである。

全 33 ケースの検討を実施しており、各ケース名は「Case ケーソン幅-マウンド幅-改良体有無（有：C，無：NC）と改良体層厚-改良体幅」の情報を含むように明記した。ケーソンへの载荷は、ケーソン鉛直方向の中央に変位制御が可能な载荷粒子を配置し、载荷粒子を水平方向へ一定速度 24 mm/s で移動させ、単調载荷を行った。

本解析では円要素の粒子を用いるが、実際の地盤材料のような回転抵抗を再現し、粒状体としてのせん断抵抗特性を表現するため、回転抵抗モデル¹⁴⁾を捨石に導入する。ケーソンは、Iwamoto et al. (2019)¹⁵⁾が用いている比較的単純な計算アルゴリズムの粒子剛結モデルを適用した。また、本モデルを改良体にも導入した。

表-3 解析パラメータ

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	0.2
Particle density, ρ_s (kg/m ³)	2,650
Time step, Δt (s)	1.0×10^{-6}

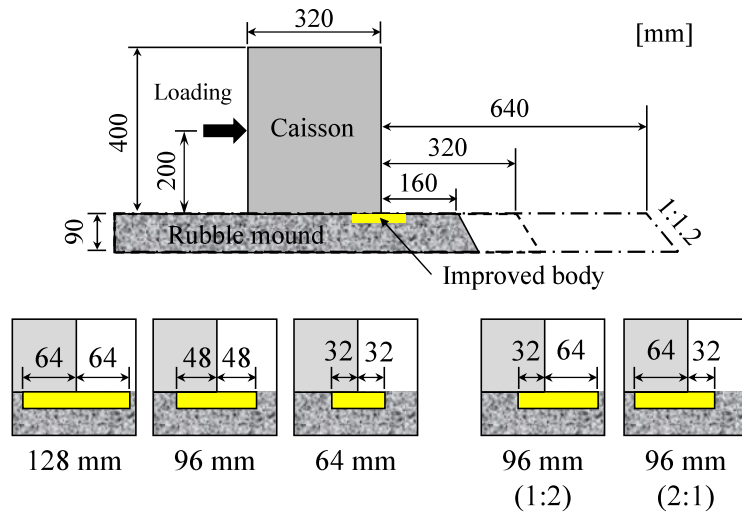


図-12 検討断面の概略

4.2 解析結果

4.2.1 改良体幅による挙動の違い

図-13 に载荷に伴いケーソン重心での水平変位がケーソン幅の 1/4 となる 80 mm に達した際の状況を示す。カラーコンターは初期からの累積変位量 [mm] を示す。すべてのケースのケーソン下で変位有無による境界が明確に生じており、すべりを伴う支持力破壊モードが発生したことがわかる。マウンド幅が狭いほど移動する土塊の変位量が多い。また、改良体を有することで土塊内の変位量が増加した。これは、ケーソンの移動に伴いケーソンと改良体の摩擦に起因して改良体が移動したためである。

図-14 にケーソン傾斜角と水平変位の関係を示す。対策を施さない場合は、マウンド幅に関わらず载荷に伴って傾斜角が増大し、最大で 15 deg. 付近に達した。一方で、対策を施すことでケーソンの傾斜を大幅に抑制した。特に、改良体層厚が 40 mm の場合は、20 mm と比較して傾斜角をより抑制する傾向が示され、この傾向はマウンド幅に依存しなかった。一方で、20 mm の場合は、改良体幅が狭く、かつ、マウンド幅も狭い場合はケーソンの傾斜を十分に抑制できなかった。

図-15 に無次元水平荷重の累積値と水平変位の関係を示す。無次元水平荷重とは、水平方向の载荷荷重をケーソン自重で除した値である。また、累積値とは無次元水平荷重-水平変位曲線の面積であり、累積値を示す理由は、無次元水平荷重と水平変位の関係を図示した場合、荷重変動が激しいことから比較がしづらく、累積値の方が耐力を把握しやすいと判断したためである。改良体を施さないケースと比較して、改良体を施したすべてのケースで耐力が増加した。微量ではあるが、改良体幅が大きく、かつ、マウンド幅も大きいほど、耐力が増加した。

4.2.2 改良体設置位置による挙動の違い

前節の結果より、改良体幅が大きいほど傾斜角が抑制され、本検討の範囲では改良体幅 96 mm（ケーソン幅 320 mm に対して約 1/3 程度）以上を有する場合は一定の改良効果がみられた。そこで、本節では改良体幅を 96 mm で固定し、改良体の設置位置を変えて、その影響を調べた。

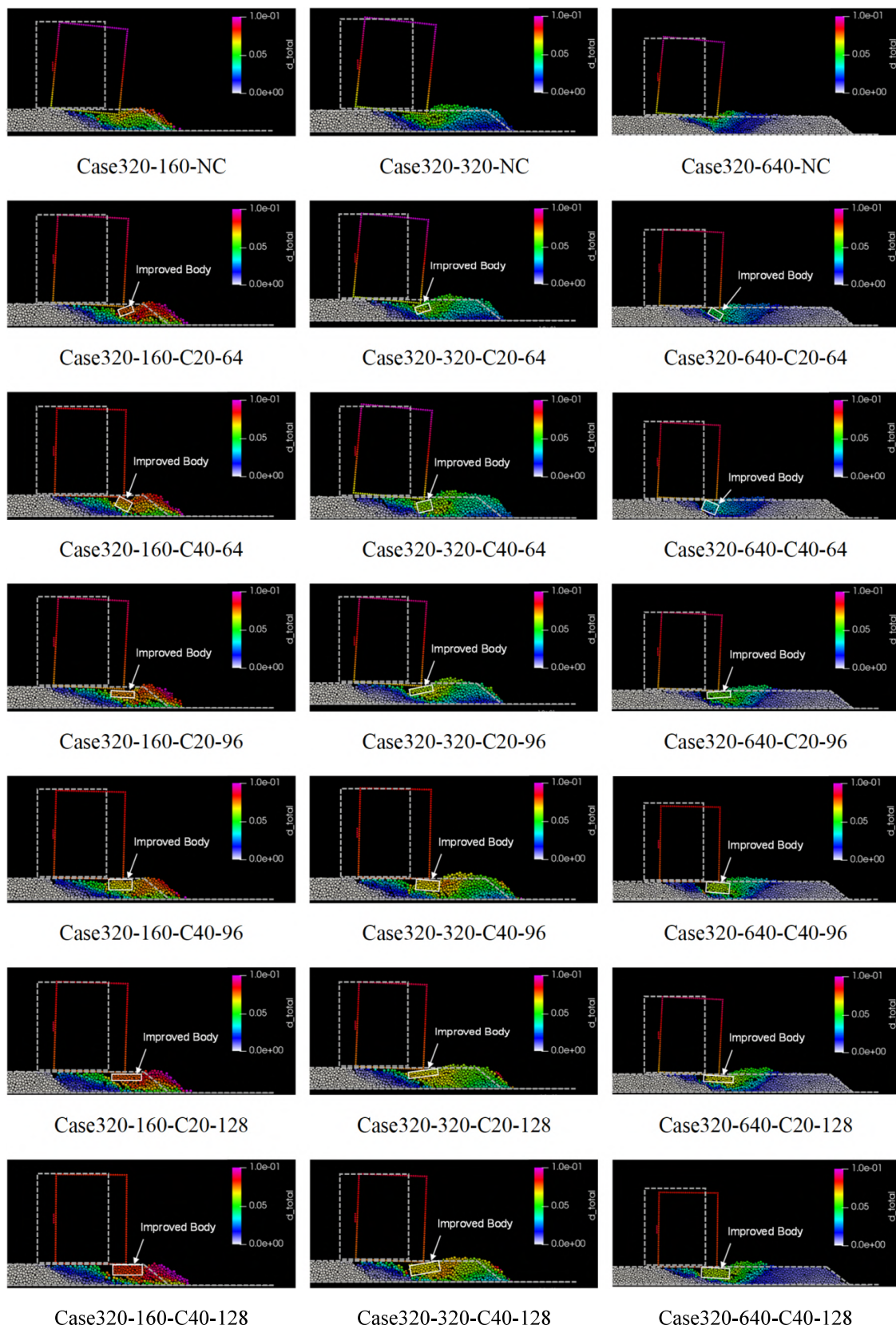


図-13 ケーソン重心での水平変位が80 mmに達した際の状態（点線はケーソン式防波堤の初期形状）

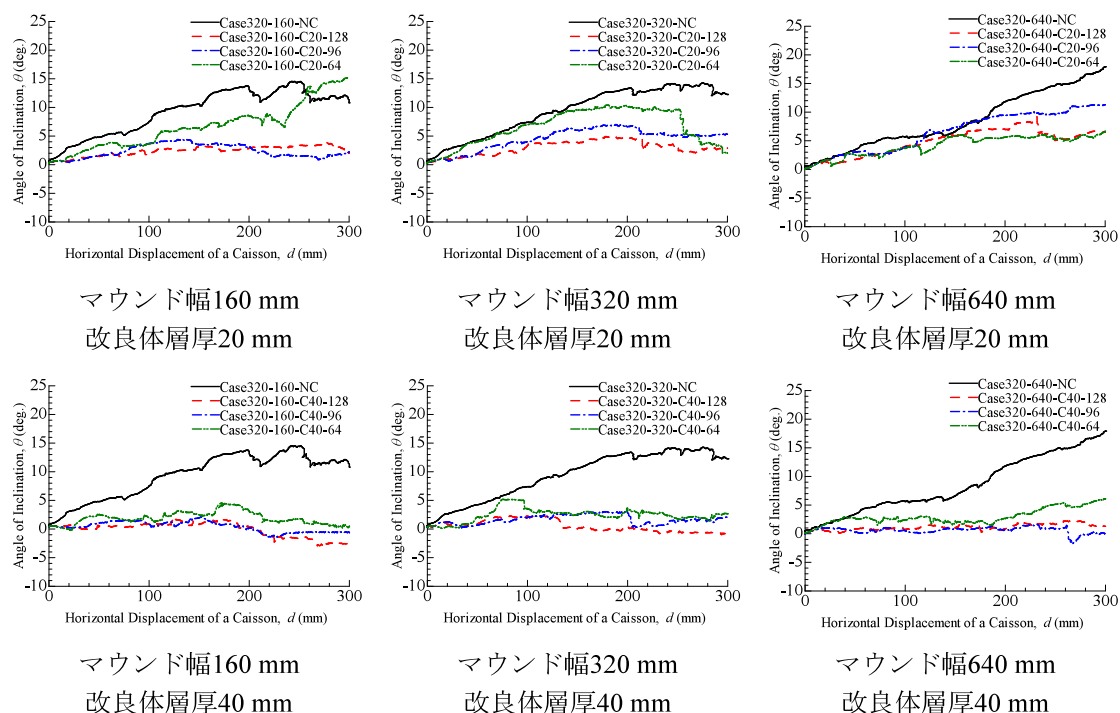


図-14 ケーソンの傾斜角と水平変位の関係：改良体幅による違いの比較

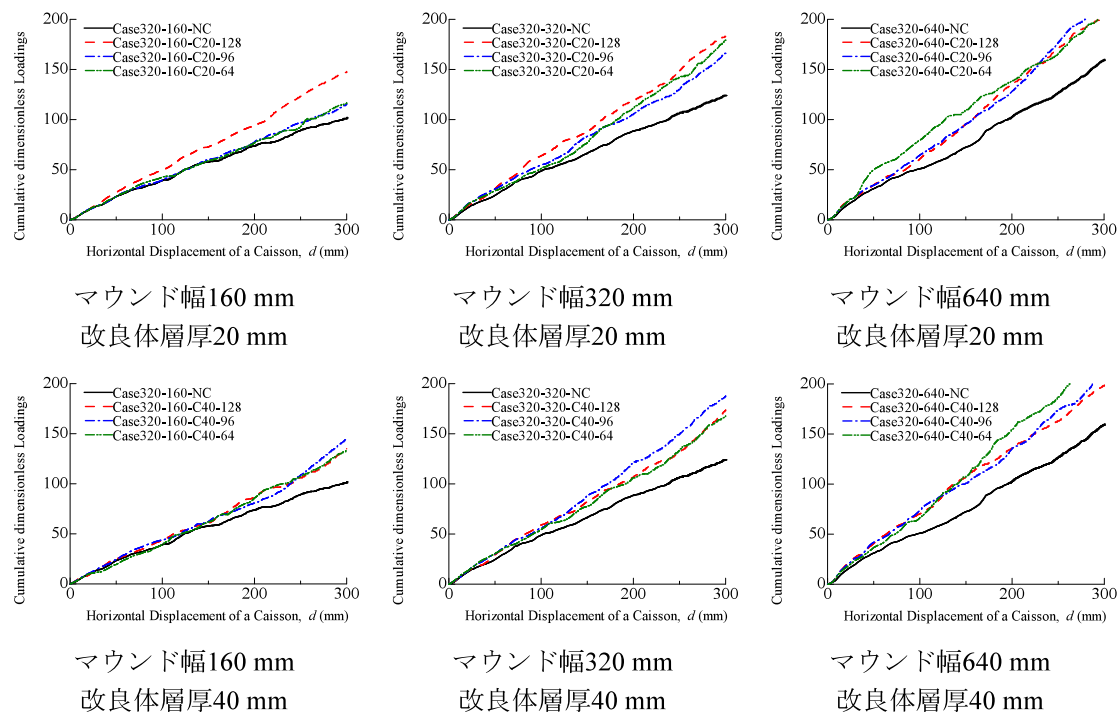


図-15 無次元水平荷重の累積値とケーソンの水平変位の関係：改良体幅による違いの比較

図-16 にケーソン重心の水平変位が 160 mm に達した際の様子を示し、図-17 にケーソン傾斜角と水平変位の関係を示す。改良体幅の 1/3 がケーソン下に入るように設置した 1:2 の条件では、Case320-640-C40-1:2 を除いてケーソンの水平変位の増加とともに端趾圧の作用を受けて改良体が反時計まわりに回転しながら後退し、改良体がケーソンを支持できずに多くのケースでケーソンの傾斜が増加した。特に、改良体層厚が 20 mm ではマウンド幅がケーソン幅以下の 160, 320 mm の条件においては対策を施していないケースと同等の傾斜が生じた。一方、改良体幅の 1/2 以上（ケーソン幅に対して約 1/6 以上）がケーソン下に入るように設置した条件では、改良体層厚によらずケーソンの傾斜を抑制した。マウンド幅 640 mm で改良体層厚 20 mm の各ケースではケーソン変位 180 mm 程度まで対策を施さないケースと傾斜角が同等であった。それ以降では改良体を有する場合は傾斜を抑制したが、改良体の変位がマウンドにより拘束された後、ケーソンが改良体を乗り越えるような挙動を示したため、支持力が低下し、傾斜角がわずかに増加したと考えられる。

図-18 に無次元水平荷重の累積値と水平変位の関係を示す。改良体を設けることで耐力の向上がみられたが、改良体の設置位置による違いは顕著に表れなかった。

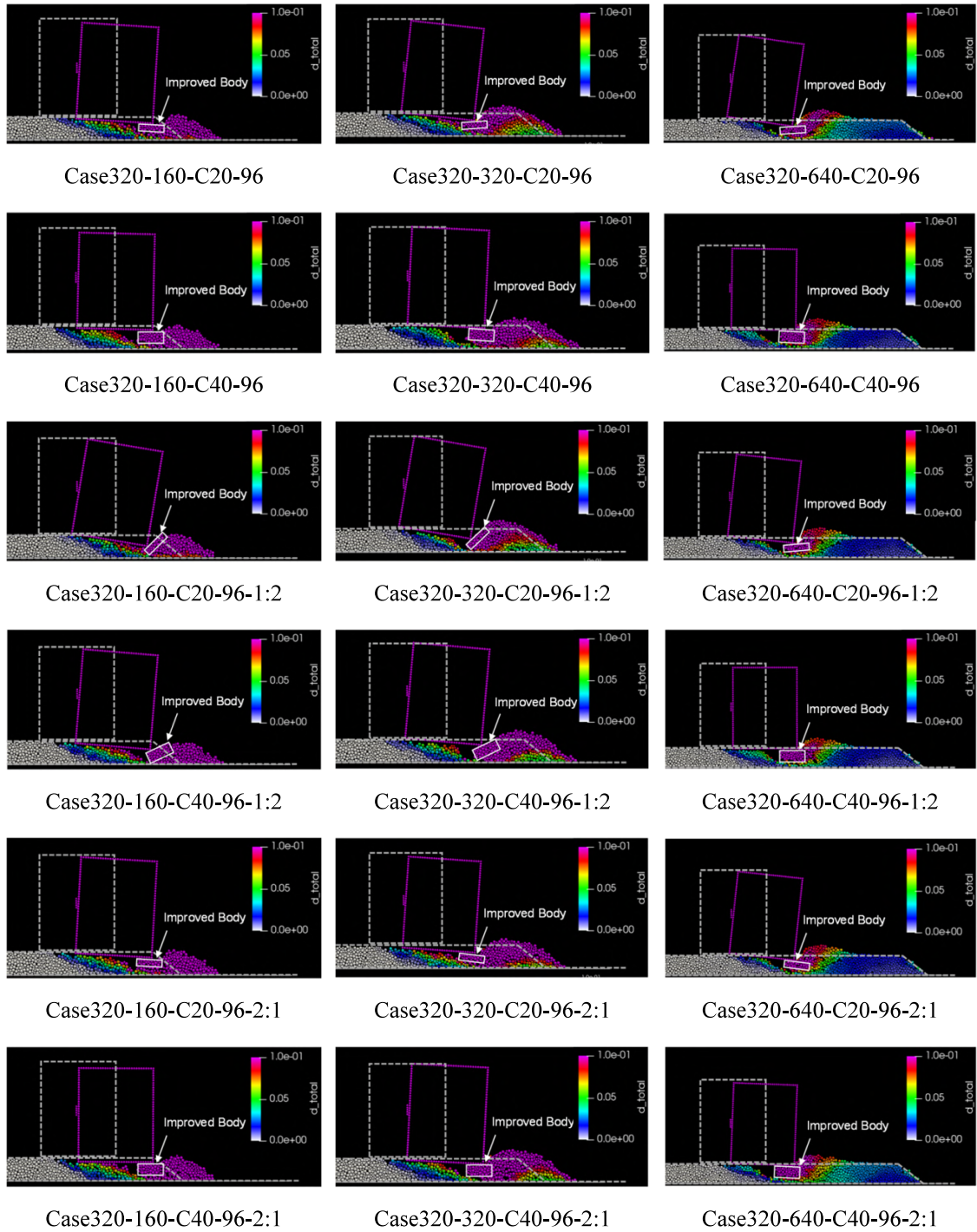


図-16 ケーソン重心での水平変位が160 mmに達した際の状態（点線はケーソン式防波堤の初期形状）

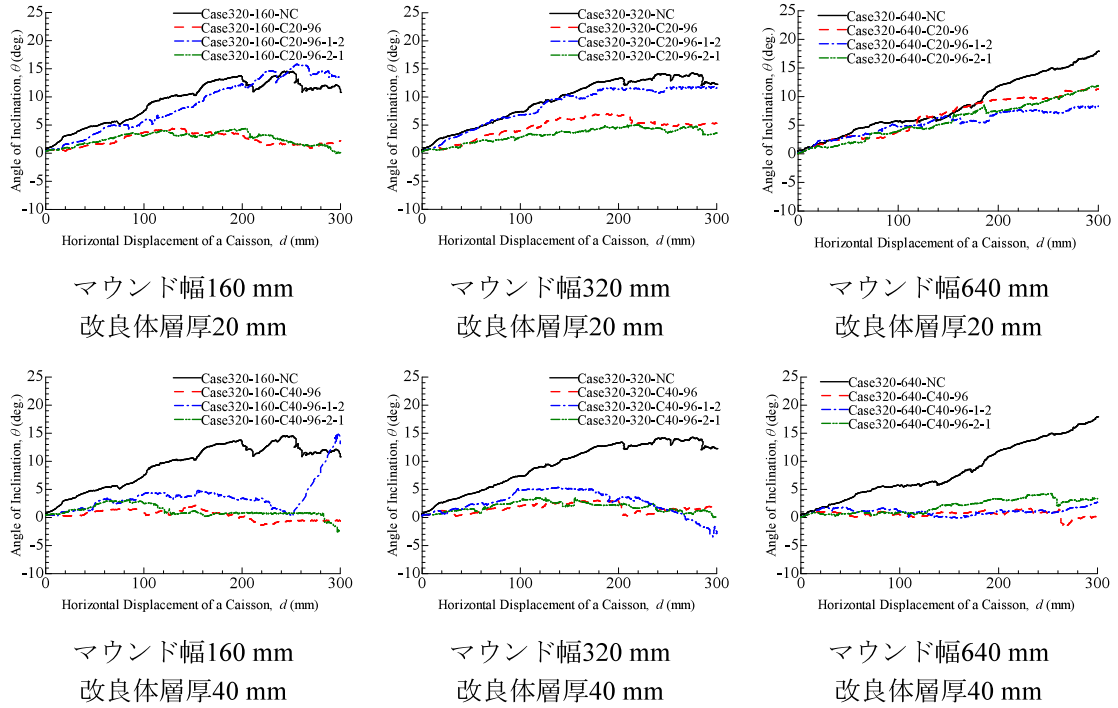


図-17 ケーソンの傾斜角と水平変位の関係：改良体設置位置による違いの比較

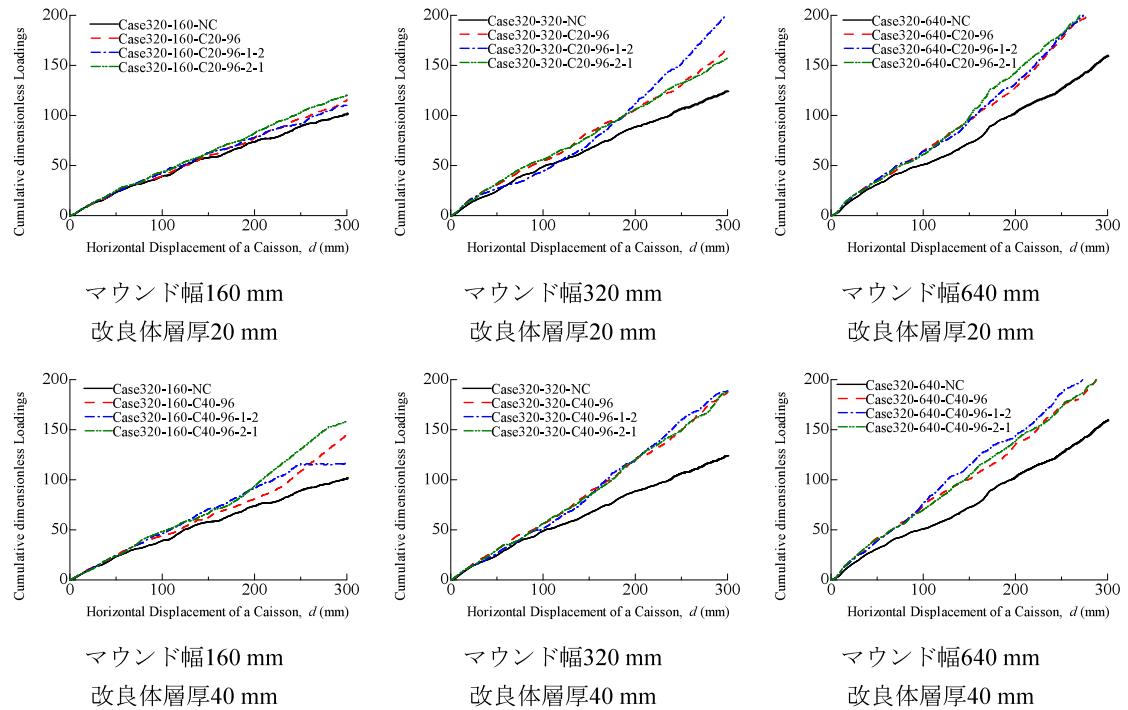


図-18 無次元水平荷重の累積値とケーソンの水平変位の関係：改良体設置位置による違いの比較

5. 総論

本研究では、ケーソン式防波堤の耐津波性向上を目的として、ケーソン後趾近傍の捨石マウンドを可塑性グラウトにより部分固化する対策工に着目し、改良体モデルの高精度化、改良体の変形・破壊を考慮した遠心模型実験、および改良体の設置位置および改良範囲を考慮した個別要素法による検討を実施した。

5.1 改良体モデルの高精度化に関する成果

改良体モデルの基礎特性を把握するため、セメントペースト単体モデルおよびセメントペーストと礫材の混合モデルを対象に一軸圧縮試験を行った。その結果、礫材を含む混合モデルではセメントペースト単体モデルと比較して一軸圧縮強度が低下し、改良体の力学特性を評価する際には、グラウト材そのものの強度だけでなく、礫材との複合体としての強度特性を考慮する必要があることが示された。また、Bond モデルを導入した個別要素解析により、一軸圧縮時の破壊モードを再現するための基礎的検討を行い、ボンド強度に応じた破壊モードが異なることを示した。

5.2 改良体の変形・破壊を考慮した遠心模型実験による成果

遠心力場における水平載荷実験により、改良体の変形・破壊を考慮したマウンド部分固化によるケーソンの傾斜抑制効果および端趾圧低減効果を検討した。その結果、改良体を設置したケースでは、無対策ケースと比較してケーソン傾斜角が低減し、端趾圧の増加も抑制された。一方で、セメントペースト製の改良体では内部に局所的な応力が発生し、載荷後にクラックが確認された。このことから、部分固化工法の効果を適切に評価するためには、改良体を単なる剛体として扱うのではなく、変形および破壊を考慮することが重要であり、適切な改良範囲を設置する必要があることが示唆された。

5.3 改良体範囲およびマウンド肩幅に関する個別要素解析による成果

改良範囲とマウンド肩幅がケーソン挙動に及ぼす影響を分析した。その結果、改良範囲によらず、マウンド幅が大きいほど改良範囲の違いによる影響が相対的に小さく、ケーソンの傾斜を抑制した。また、ケーソン幅に対し約 $1/3$ 以上の改良体幅を有する場合はケーソンの傾斜を抑制できるが、ケーソン直下の改良範囲が短く（ケーソン幅に対して約 $1/6$ 以下）、かつ、マウンド幅がケーソン幅以下の場合は端趾圧により改良体が反時計まわりに回転しながら捲れ上がる等により、ケーソンの傾斜を抑制できなかった。

5.4 本研究の総括と今後の課題

以上より、ケーソン後趾近傍の捨石マウンドを部分固化することにより、水平外力作用時に生じる端趾圧の増加を抑制し、ケーソンの傾斜および支持力破壊の進展を抑える効果が期待できることが示された。特に、改良体幅、改良体層厚、ケーソン直下への入り込み長さ、およびマウンド肩幅は、対策効果を左右する重要な要因であると考えられる。一方で、セメントペースト製の改良体では局所的な応力集中によりクラックが発生することが確認されたため、実設計への適用にあたっては、強度・変形・破壊特性を考慮した評価が必要である。今後、改良体の破壊挙動をより詳細に評価するため、一軸圧縮試験結果に基づく Bond モデルのパラメータ同定を行い、改良体の破壊挙動を再現可能な数値解析モデルの高度化を目指す。

参考文献

- 1) 三宅達夫, 角田紘子, 前田健一, 坂井宏隆, 今瀬達也: 津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.87-92, 2009.
- 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) 笠間清伸, 善功企, 春日井康夫: 浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_966-I_970, 2013.
- 4) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港研究所資料, No.1269, 2013.
- 5) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹, 丸山憲治: 遠心力場における防波堤基礎地盤に対する津波浸透実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_365-I_370, 2013.
- 6) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹, 丸山憲治: 津波による浸透作用下の防波堤基礎マウンドの支持力発現特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_371-I_376, 2013.
- 7) 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: ケーソンー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・モデルス, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.2, pp.I_769-I_774, 2021.
- 8) 公益財団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (中巻), pp.933-938, 2018.
- 9) Takahashi, H.: Stability of composite-type breakwaters reinforced by rubble embankment, Soils and Foundations, Vol. 61, No.2, pp. 318-334, 2021.
- 10) 石井裕泰, 羽生剛, 北詰昌樹: 捨石マウンドを対象とした可塑性グラウト注入工法の施工と適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.4, pp.327-339, 2016.
- 11) 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度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), 第 75 巻, 2 号, I_851-I_856, 2019.
- 12) 一般社団法人日本埋立浚渫協会, 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所: 重力式係船岸の増深工法に関する施工の手引き (案), 48p, 2018.
- 13) 松田達也, 小林泰基, 竹原歩, 内藤直人, 宮本順司, 牧野凌弥, 前田健一: 単調載荷下でのケーソン幅が広い防波堤の傾斜抑制に対する捨石マウンドの部分固化効果の分析, 地盤工学ジャーナル, Vol.20, No.1, pp.205-214, 2025.
- 14) Fukumoto, Y.: Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials, Doctor Dissertation, Kyoto University, 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