

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7年度研究開発助成 成果報告会

2026.07.17(金)

於 港湾空港総合技術センター

松田 達也

MATSUDA TATSUYA

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
地盤・防災講座：地盤力学研究室

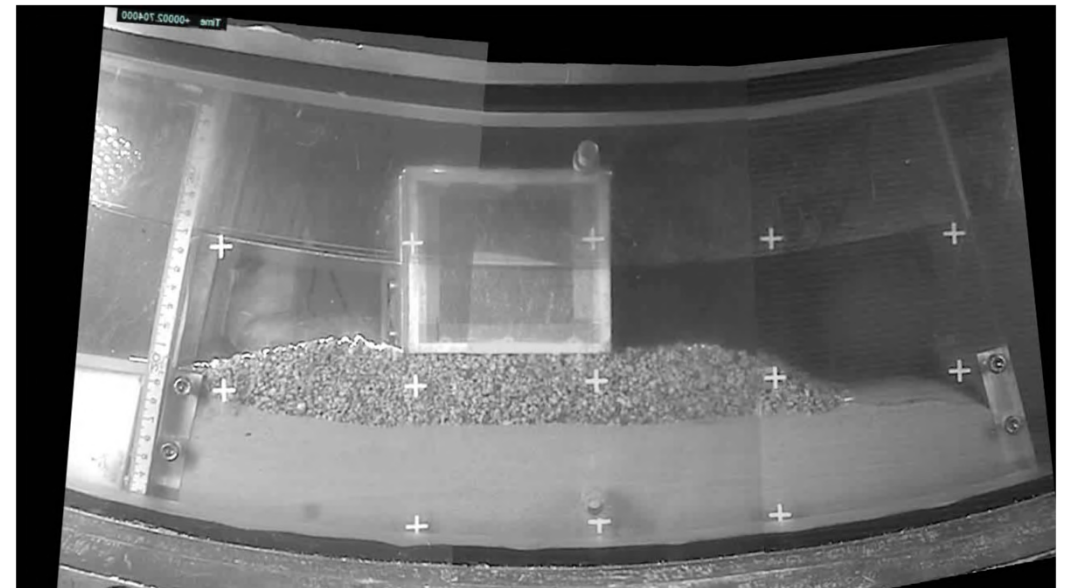
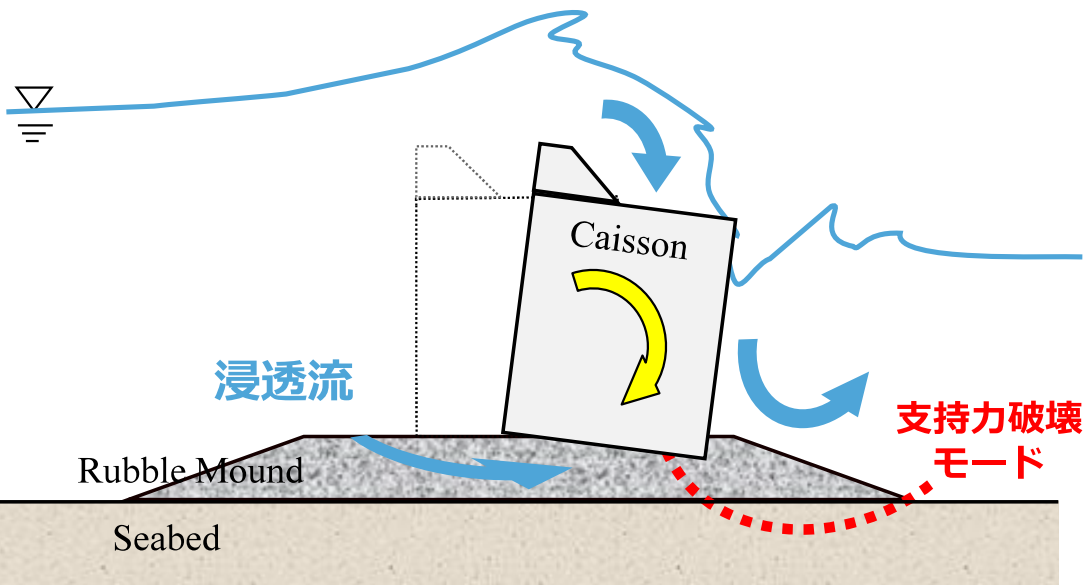


Toyohashi Univ. of Technology, Dept. of Architecture and Civil Engineering
Division of Geotechnology and Disaster Prevention, GeoMechanics Laboratory

背景



津波によるケーソン式防波堤の被災メカニズム



 東洋建設

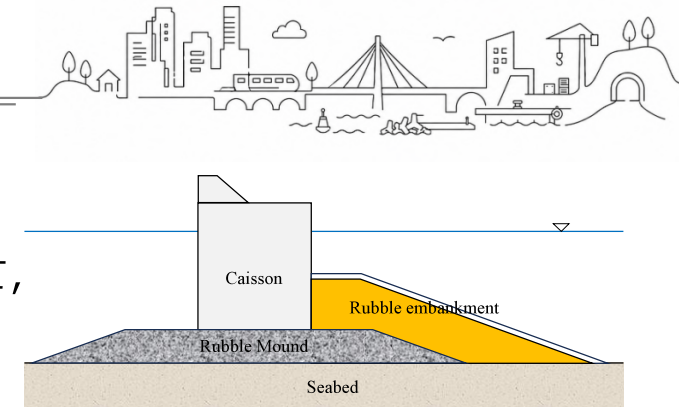
- ① 津波力による端趾圧への抵抗力の増加
- ② 浸透流に対する耐力低下の抑止

目的

「現行の粘り強い構造：腹付工による補強」

研究成果をもとに、平成30年に改定された港湾の施設の技術上の基準・同解説において、腹付工による耐津波効果の確認手法が明確化された。

(懸念) 越流に伴い腹付工が洗掘されると効果を喪失する。端趾圧抵抗が課題。

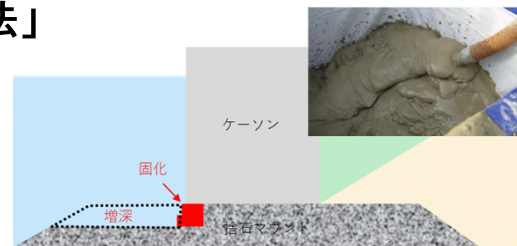


「ケーソン後趾付近の捨石マウンドを部分的に固化する工法」

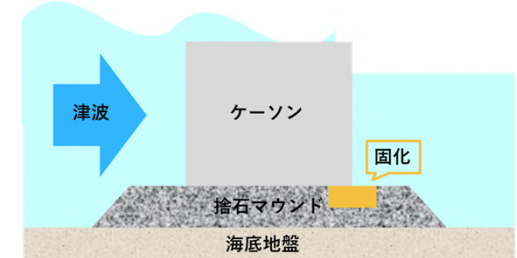
- ・マウンドの端趾圧抵抗力を増加
- ・ケーソンを転倒から滑動主体の挙動に誘発

重力式係船岸の増深工法を援用し、マウンドに可塑性グラウトを注入して改良体を作製

可塑性グラウト: セメント、水、可塑剤を配合した懸濁液



重力式係船岸の増深工法



マウンドの部分固化

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, ol.11, No.4, 327-339

小笠原哲也, 合田和哉, 加藤繁幸, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 寺内潔:

重力式係船岸増深のための基礎構造に関する研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.70, No.2, ppl_882-887, 2014

本研究の目的

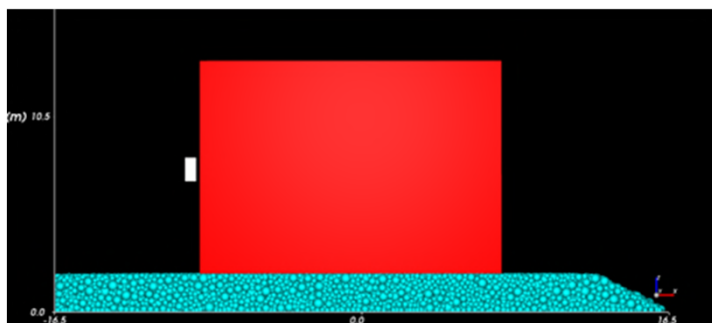
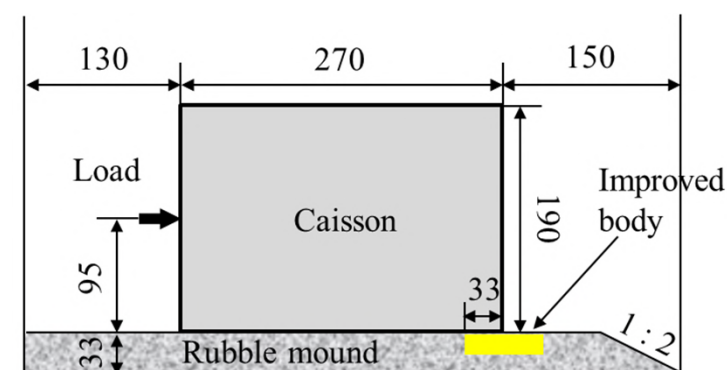
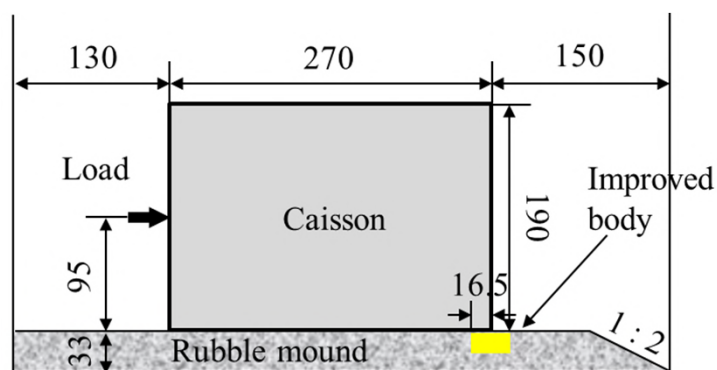
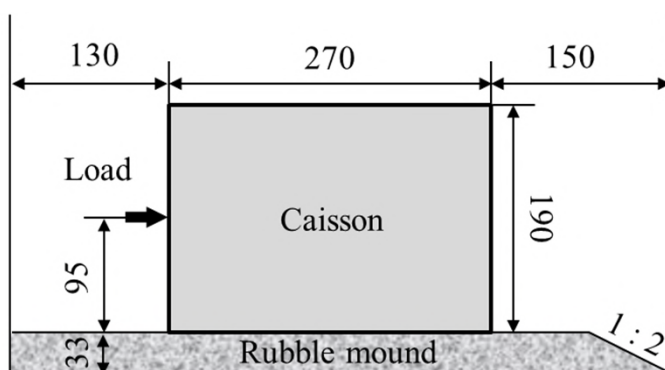
津波作用時の可塑性グラウトにより固化した改良体に作用する外力特性を明確にする。
防波堤の構造形状に応じた本対策工における有用な改良範囲を規定する。
⇒ まずは、遠心模型実験・数値実験（個別要素法）により現象を解明

2024年度研究開発助成の成果



【対策工試験の再現解析】

解析モデル



改良体なし



改良体幅33 mm (1.98 m)

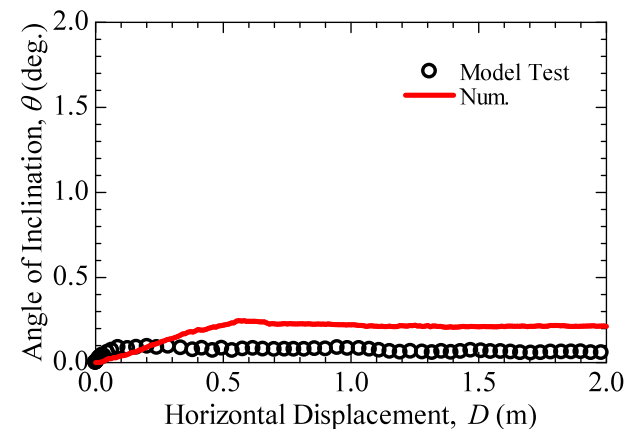
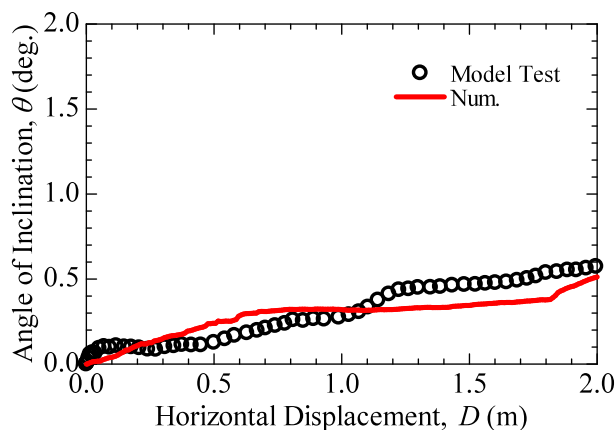
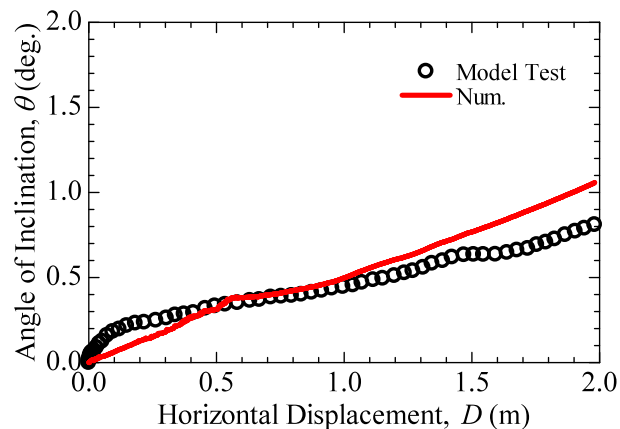


改良体幅66 mm (3.96 m)

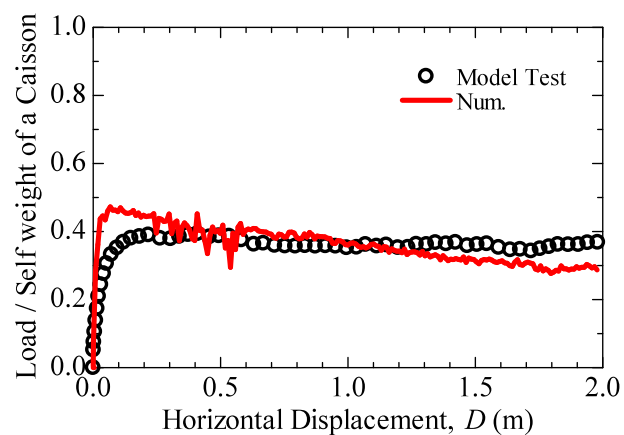
2024年度研究開発助成の成果



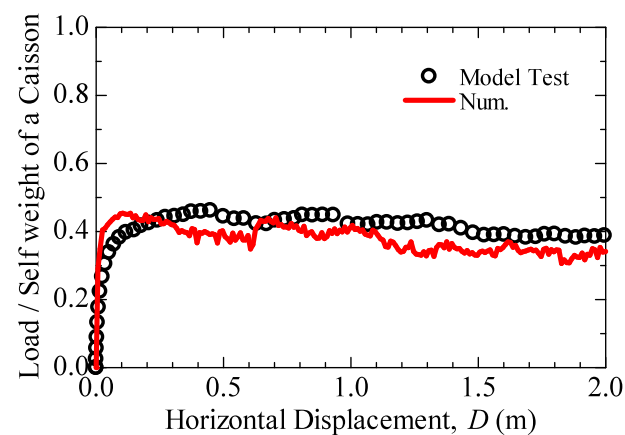
ケーソン傾斜角－水平変位関係



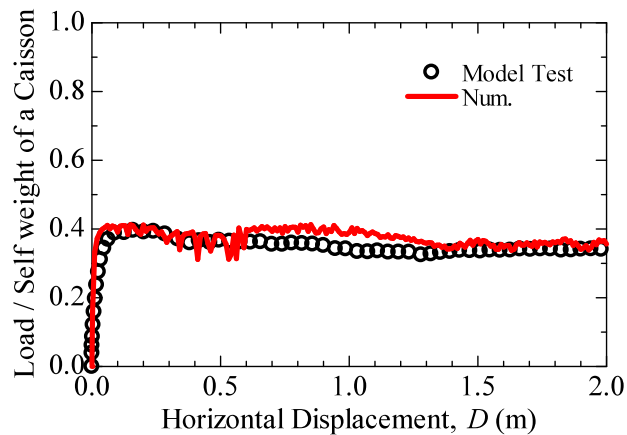
無次元水平荷重－水平変位関係



改良体なし



改良体幅33 mm (1.98 m)



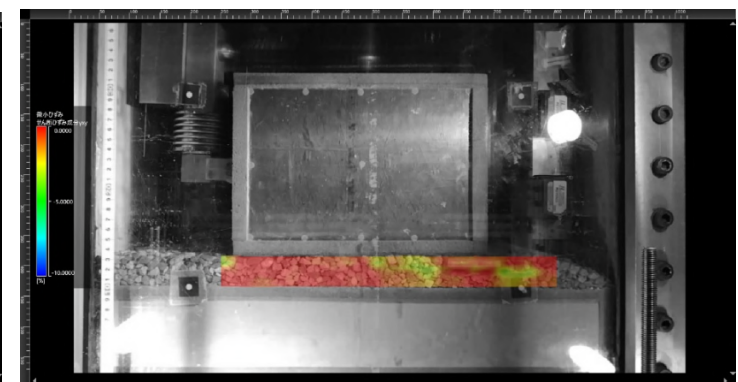
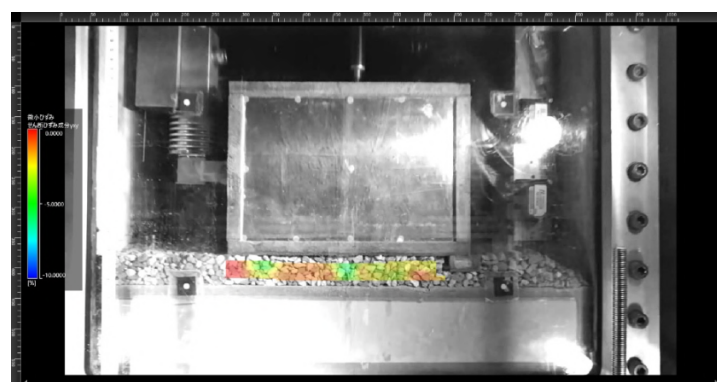
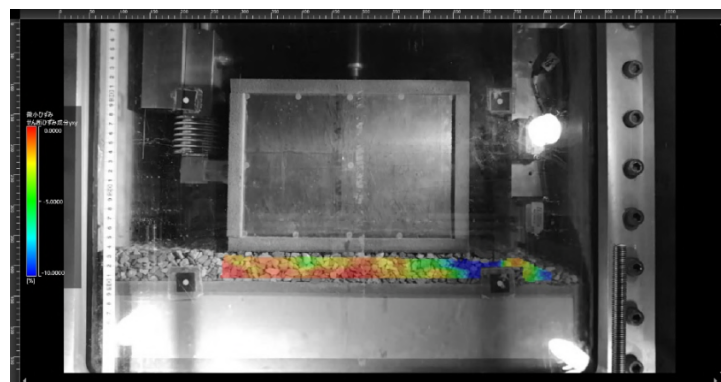
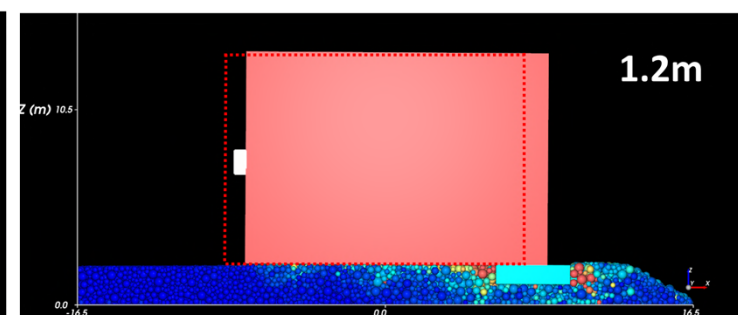
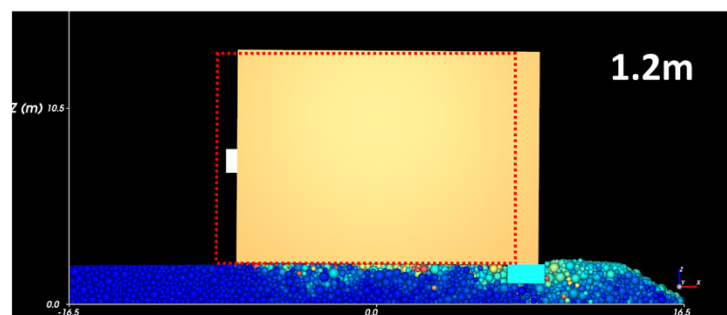
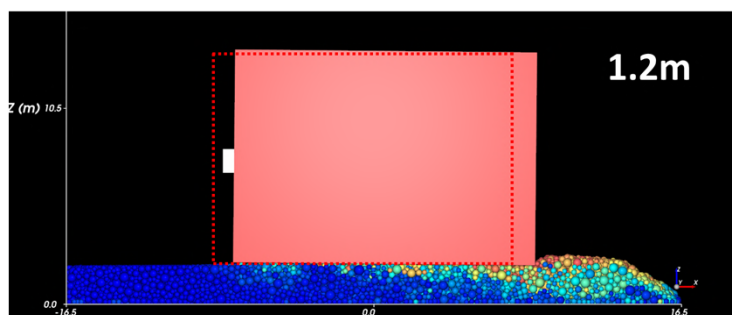
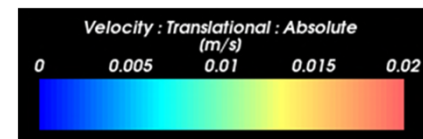
改良体幅66 mm (3.96 m)

2024年度研究開発助成の成果



【対策工試験の再現解析】

ケーソン変位1.2 m時点の様子(移動速度分布)



※実験はケーソン変位1.0 m程度のせん断ひずみ分布

改良体なし

改良体幅33 mm (1.98 m)

改良体幅66 mm (3.96 m)

2025年度研究開発助成における課題



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にする。
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。
⇒ まずは、遠心模型実験・数値実験（個別要素法）により現象を解明

【個別要素解析を用いた数値実験】

（課題1）**ボンドモデルを導入した改良体要素**に対して、詳細な要素試験を実施し、**ボンドモデルに必要なパラメータの感度分析を通してパラメータ決定方法の高度化**を行う。

（課題2）ケーソン-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し、**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**する。特に、改良体の設置位置については、これまでケーソン後趾を対象としていたが、港外側にも改良体を設けるなどをする。また、改良体範囲についても改良体幅と厚さをパラメータに複数パターンで検討する。

【遠心力载荷装置を用いた模型実験】

（課題3）ケーソン-捨石マウンドからなる防波堤モデルの後趾付近もしくは港外側に改良体を設置し、変形挙動や耐力発現機構の分析から、改良体による対策効果を検討する。また、改良体については、これまで用いたアルミ角材に加え、より**現実に近い改良体モデルを用いることで改良体の強度－変形を考慮した分析**を実施する。

課題1への取り組みと研究成果



改良体のモデル化と一軸圧縮試験によるモデルの妥当性検証

セメントペースト単体モデル

セメントペースト+礫材混合モデル

礫材：4.75－9.5 mm粒径

CD試験（粘着力 c_d ：21 kN/m²，内部摩擦角 ϕ_d ：42.3°）

供試体サイズ：直径0.05 m，高さ0.10 m，目標空隙率40 %

※実物におけるグラウト強度24 N/mm²を目標値

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．



セメントペースト単体モデル

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



セメントペースト+礫材混合モデル

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

課題1への取り組みと研究成果



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

改良体の一軸圧縮シミュレーションを実施

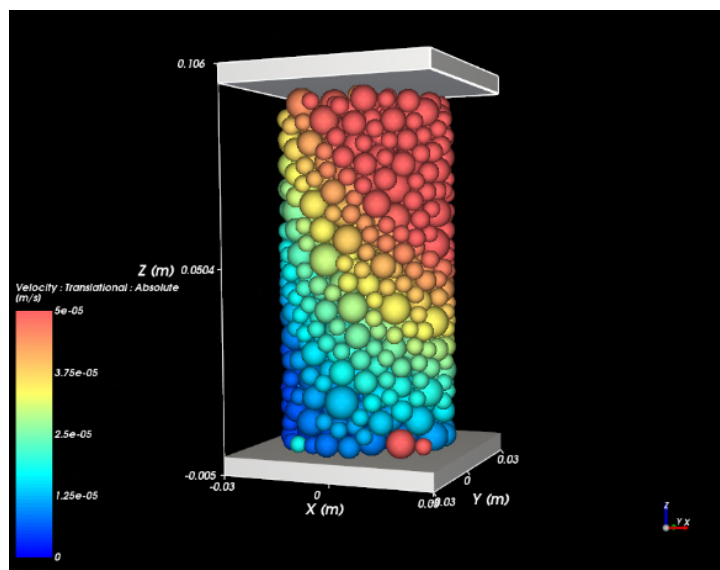
供試体寸法：直径0.05 m, 高さ0.10 mの円柱形

※ 供試体作製時は円柱領域内に粒子を密に配置

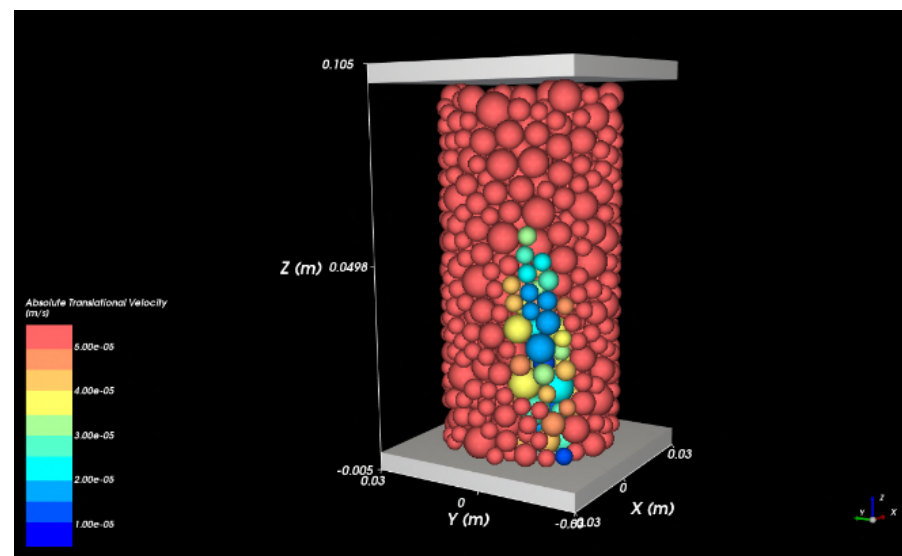
下部の載荷板：固定

上部の載荷板：1秒間に軸ひずみ0.1 %となるように強制的に変位載荷

ボンド強度：せん断・引張りともに10, 20 N/mm²に設定

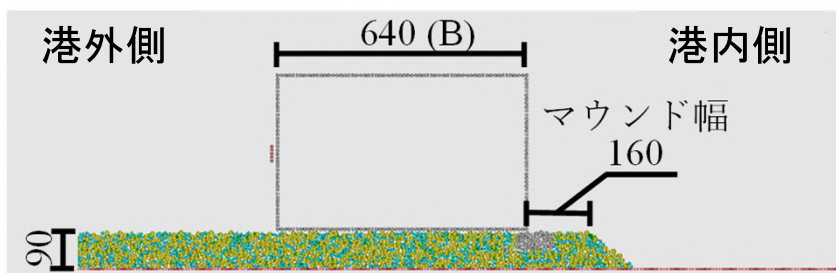
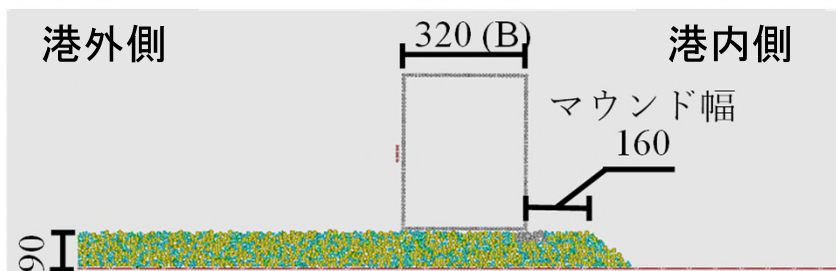


ボンド強度10 N/mm²



ボンド強度20 N/mm²

課題2への取り組みと研究成果



捨石マウンド

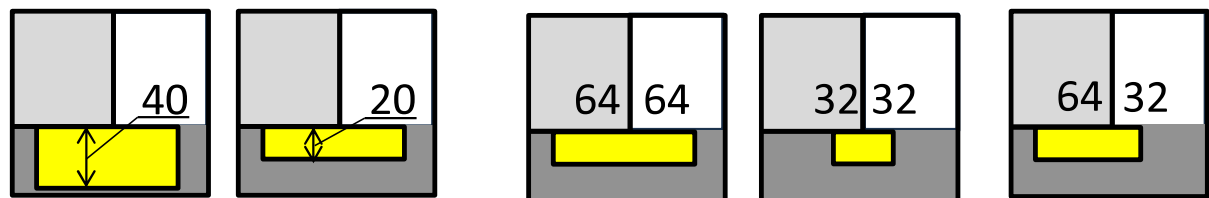
粒径 5 mm, 9 mm, 13 mm
マウンド幅 160 mm, 320 mm, 640 mm

載荷

載荷速度 24 mm/s

改良体

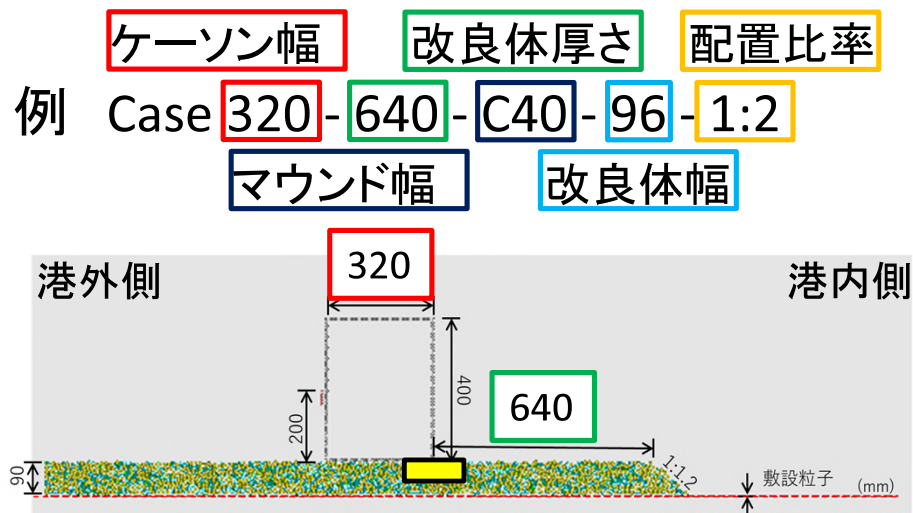
厚さ 20 mm, 40 mm
幅 128 mm, 64 mm, 96 mm
96 mm(2:1), 96 mm(1:2)



128 mm

64 mm

96 mmの一例
(2:1)

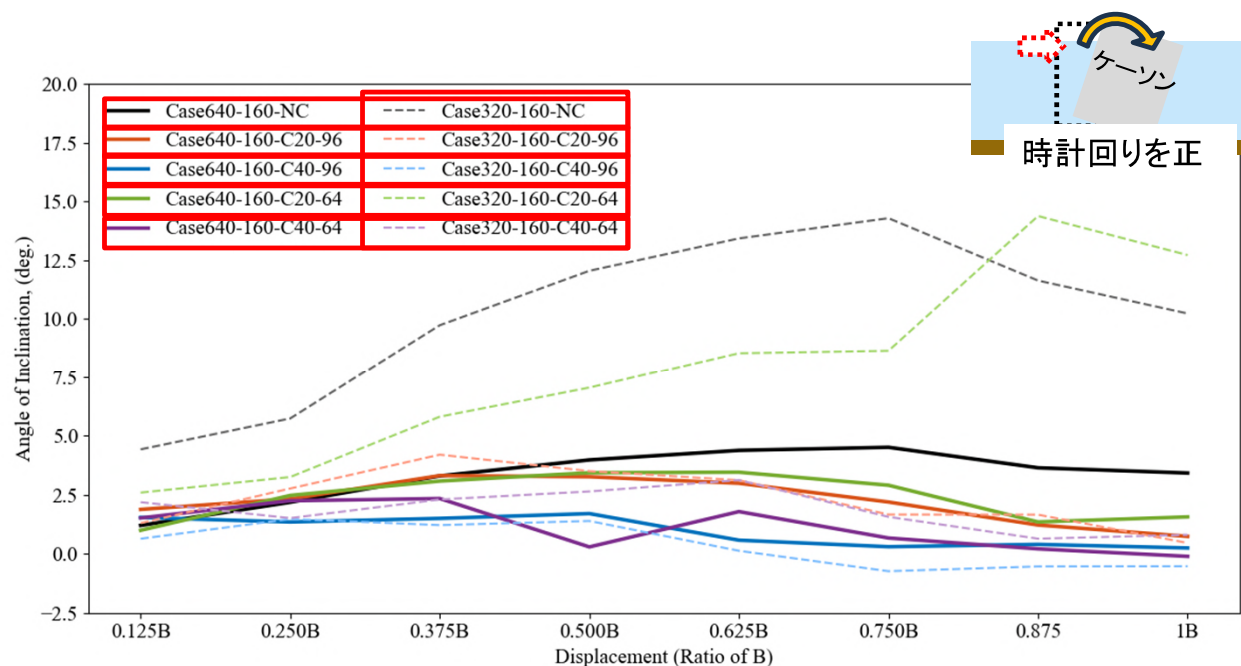


課題2への取り組みと研究成果



傾斜角-変位関係

載荷時のケーソンの水平変位をケーソン幅Bに対する割合で表し、ケーソンの傾斜角との関係を検討



マウンド幅160 mmでの傾斜角-変位関係

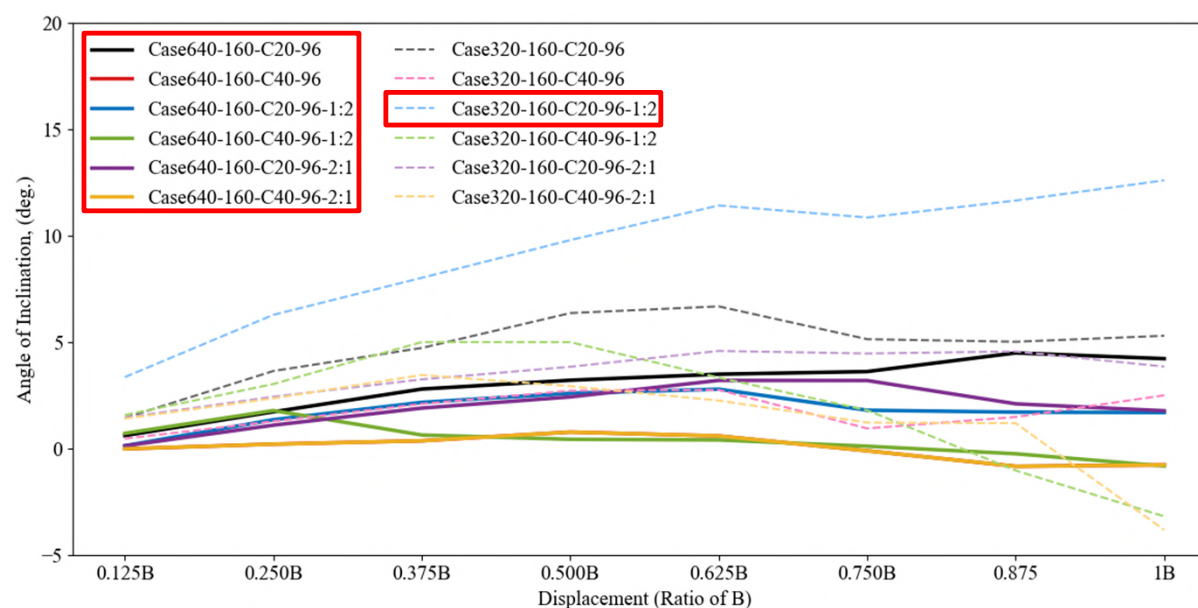
- NC、C20、C40の順で傾斜角を抑えた
- ケーソン幅320 mmでは転倒モードが卓越し、ケーソン幅640 mmと比較し、改良体による改良効果が顕著に表れる

課題2への取り組みと研究成果



傾斜角-変位関係

改良体幅96 mmでの配置条件の違いによる傾斜角-変位関係の比較を行った



マウンド幅160 mmでの傾斜角-変位関係

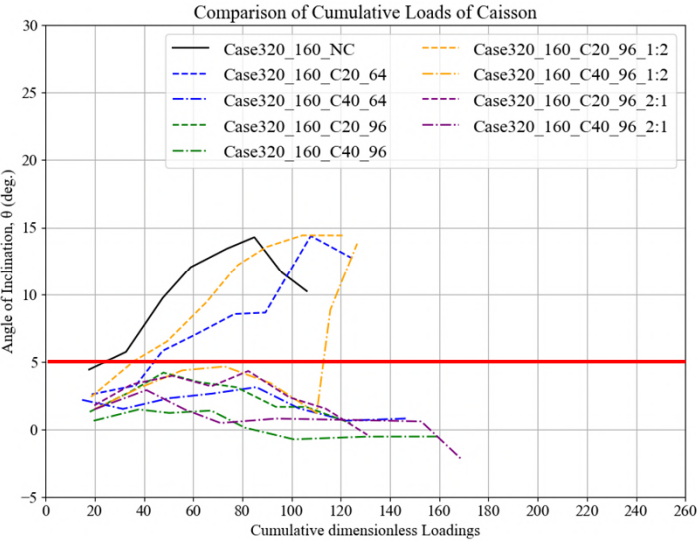
- ・ ケーソン幅320 mmでは、1:2の配置時に、2:1と比較し傾斜角が増大
- ・ ケーソン幅640 mmでは、配置による傾斜角の差は、あまり見られなかった

課題2への取り組みと研究成果

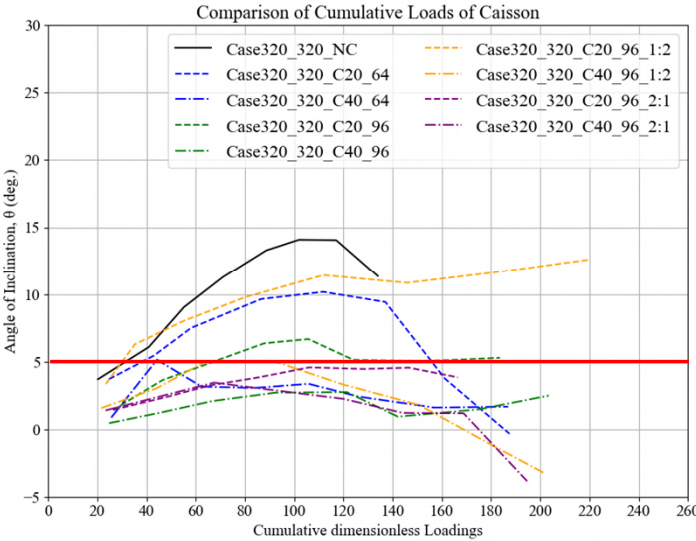


傾斜角-累積荷重関係（ケーソン幅320 mm）

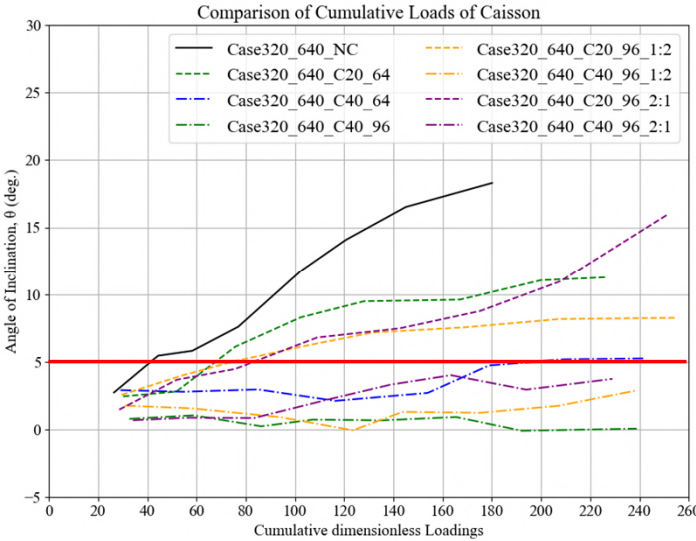
ケーソンに載荷した水平荷重の累積値とケーソンの傾斜角の関係について検討



マウンド幅 160 mm



マウンド幅 320 mm



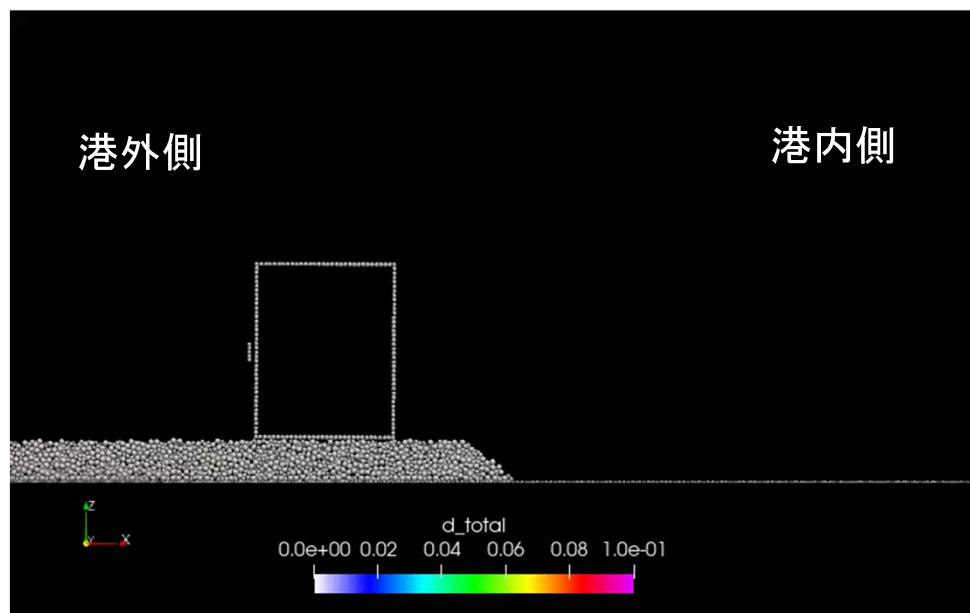
マウンド幅 640 mm

傾斜角を **5°** 以内に抑制するケースと、上昇するケースに分かれた

課題2への取り組みと研究成果

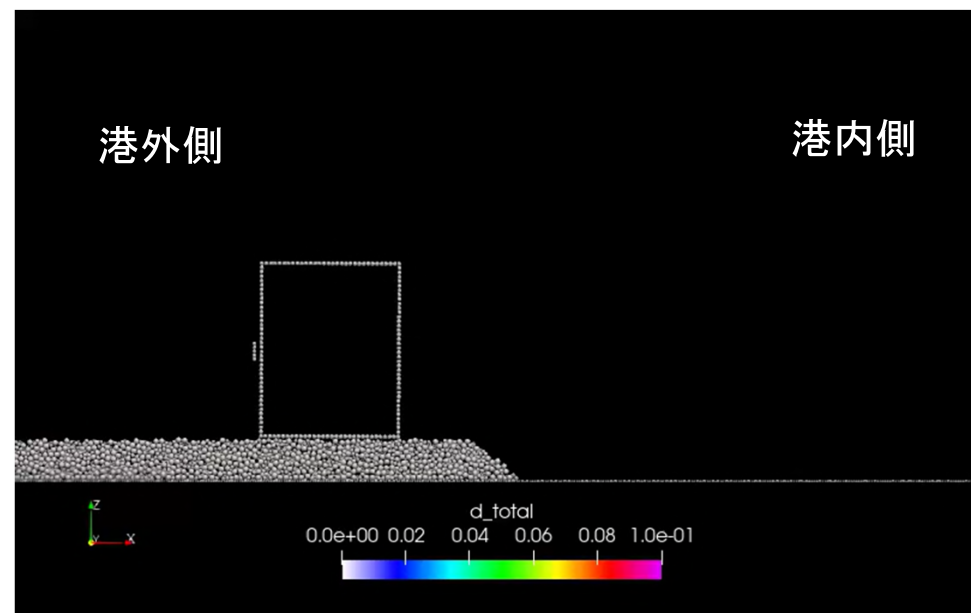


5°以内に抑制できなかったケース



Case320_160_C20_96_1:2
変位0~320 mm

5°以内に抑制したケース



Case320_160_C20_96_2:1
変位0~320 mm

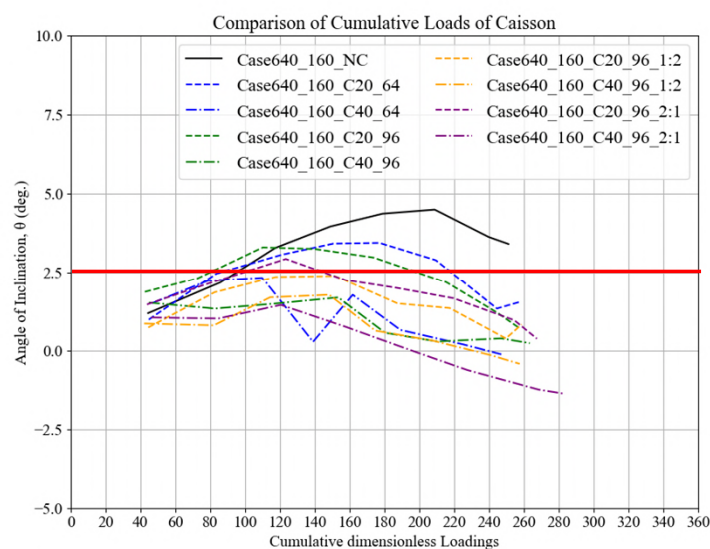
1:2の配置をしたケースでは、ケーソンと改良体の間に生じた隙間に
ケーソンが沈み込み、滑動主体から転倒主体の挙動に移行した
→累積荷重の低下

課題2への取り組みと研究成果

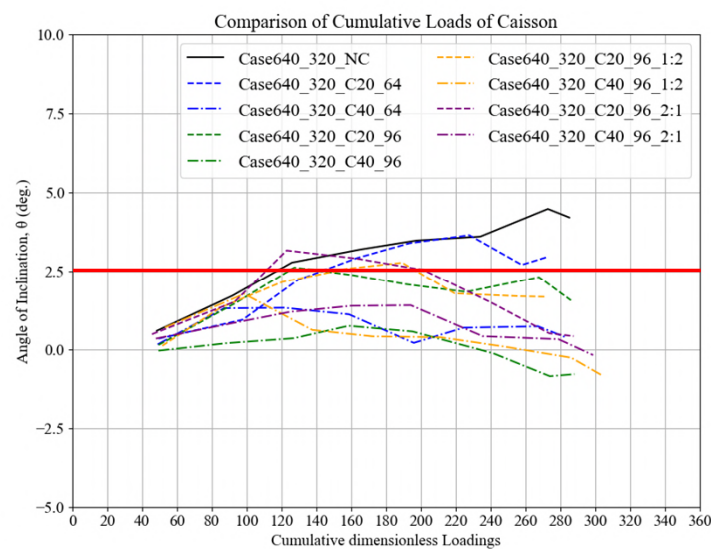


傾斜角-累積荷重関係（ケーソン幅640 mm）

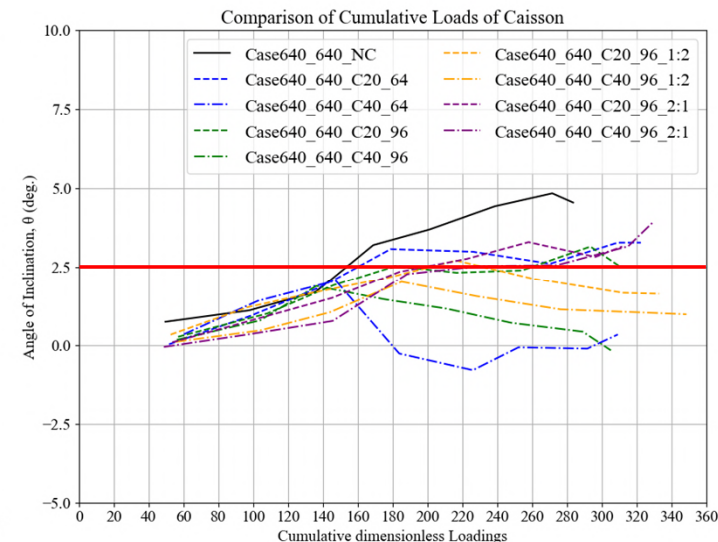
ケーソンに載荷した水平荷重の累積値とケーソンの傾斜角の関係について検討



マウンド幅 160 mm



マウンド幅 320 mm



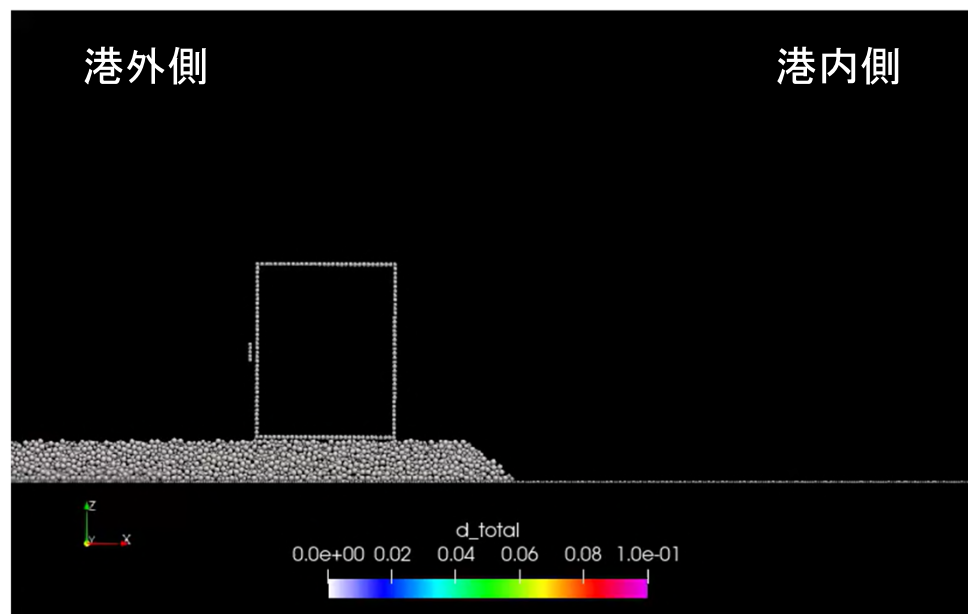
マウンド幅 640 mm

傾斜角を **2.5°** 以内に抑制するケースと、上昇するケースに分かれた

課題2への取り組みと研究成果

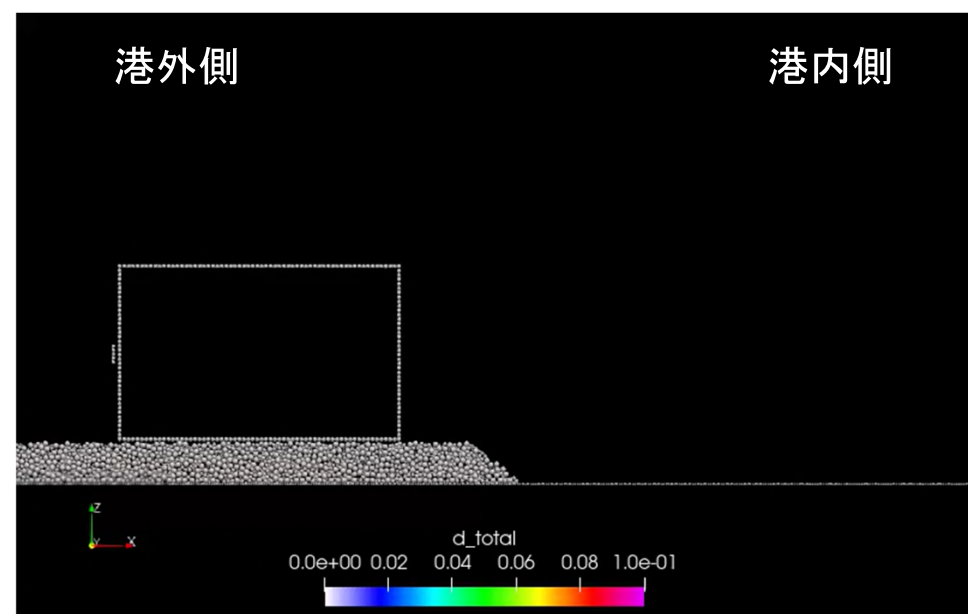


ケーソン幅320 mmのケース



Case320_160_C20_64
変位0~320 mm
滑動主体から転倒主体の挙動に変化

ケーソン幅640 mmのケース



Case640_160_C20_64
変位0~640 mm
滑動主体の挙動を続ける

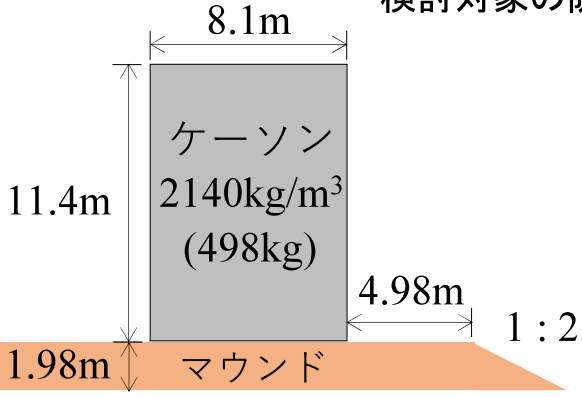
ケーソン幅によってマウンド変形の進み方や支配的な挙動が異なる

課題3への取り組みと研究成果

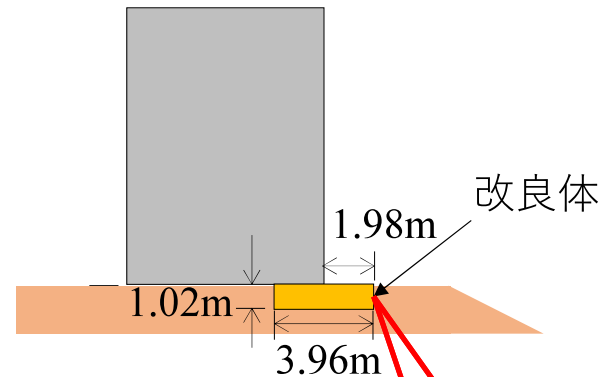


実験概要

検討対象の防波堤の標準断面(数値は60g場の実物換算)



Case1 : 無対策



Case2,3 : 改良

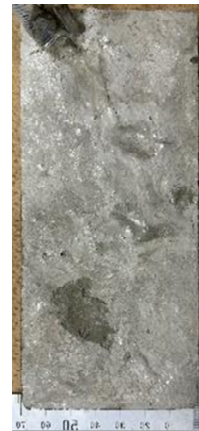


作製模型

平面写真



アルミ製



セメントペースト

ケーソン

- 中詰材で密度調整 (重心 = 躯体中心)

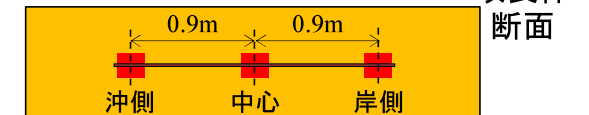
マウンド

- 粒径: 285~570mm (4.75~9.5mm)
- 空隙率 40%

改良体

- 剛体 (アルミ製), セメントペースト (30~40N/mm²)
- 後趾を基点に対称設置 (改良体幅の中心に後趾)
- ひずみゲージ設置 (下図, Case3')

上面(ケーソン側)



下面(マウンド側)

■ : ひずみゲージ

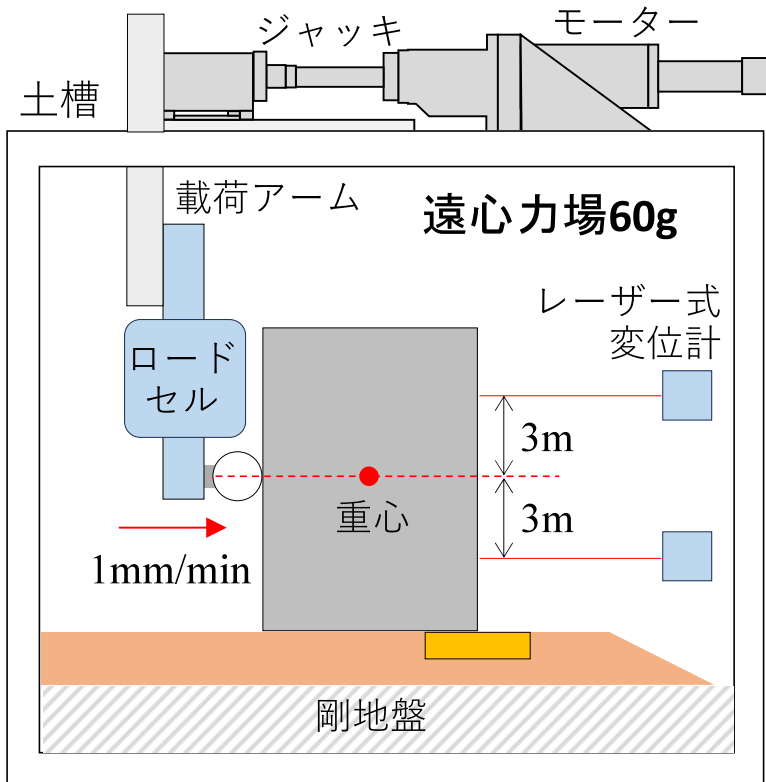
Case3'改良体断面

(上面と下面でひずみを計測)

課題3への取り組みと研究成果



実験概要



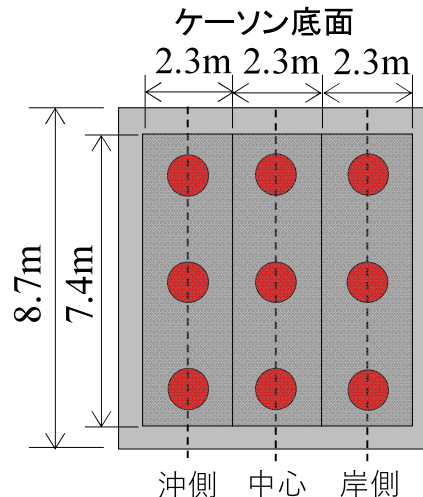
荷重機構

荷重方法

- ジャッキによる静的荷重(1mm/minの変位制御)
- 荷重点:鉛直・奥行方向の重心

計測項目

- 荷重荷重:ロードセル
- 水平変位・傾斜角:レーザー変位計 2基
- 端趾圧:荷重計 9基 (下図)



● : 荷重計

計測範囲: 2.3m × 7.4m × 3測線

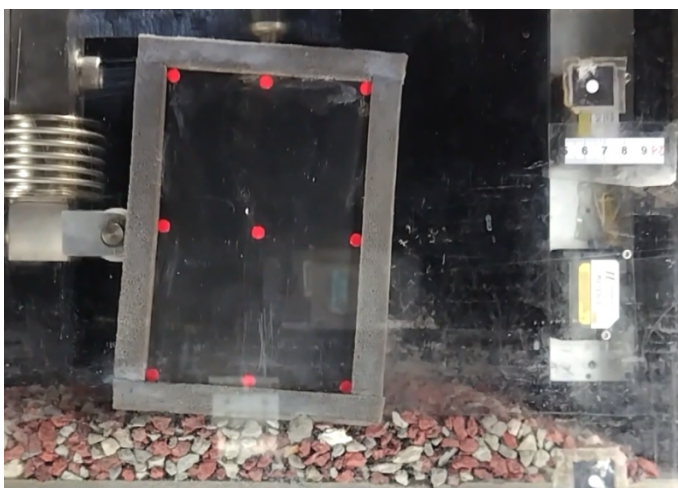
- 接地圧→3測線 (沖・中心・岸)に分けて評価
→荷重合計(3基) / 計測範囲
- 端趾圧=岸側接地圧として評価
- 各測線の接地圧をケーソン重量(1/3)で正規化した無次元値で評価(接地マウンドが不均質の為)

課題3への取り組みと研究成果



実験結果：防波堤の変状

Case1：無対策

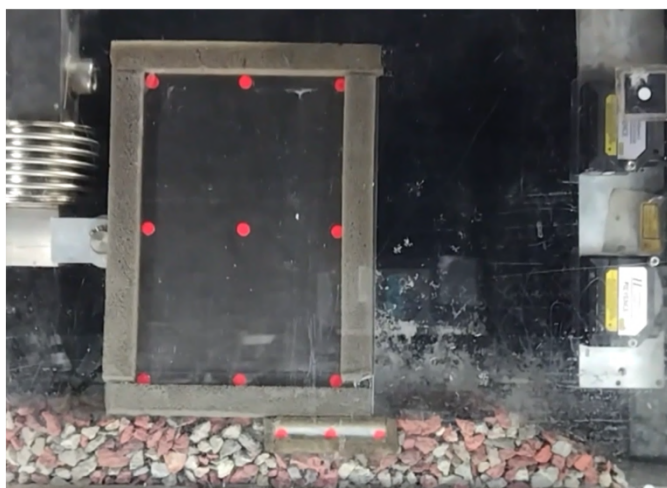


- マウンド沈み込み
- 法尻が水平に変位
- ケーソン傾斜



支持力破壊

Case 2：剛改良体

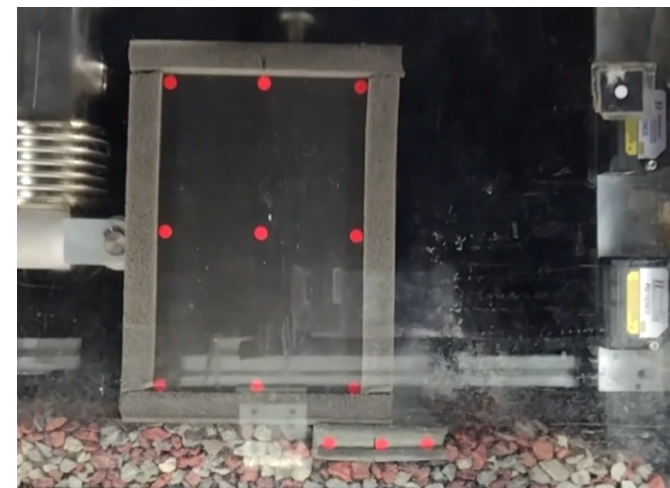


- マウンド変形無し
- ケーソンが水平に変位



滑動 (理想)

Case3：セメントペースト改良体



- マウンド微小変形 (初期)
- ケーソンが水平に変位
- 改良体にクラック発生



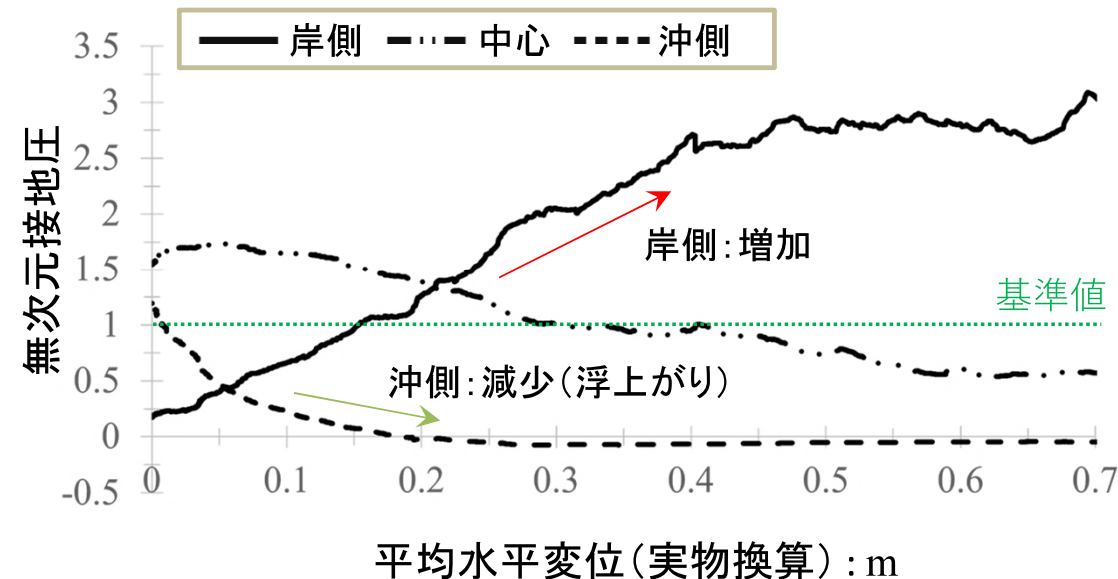
滑動→支持力破壊

課題3への取り組みと研究成果



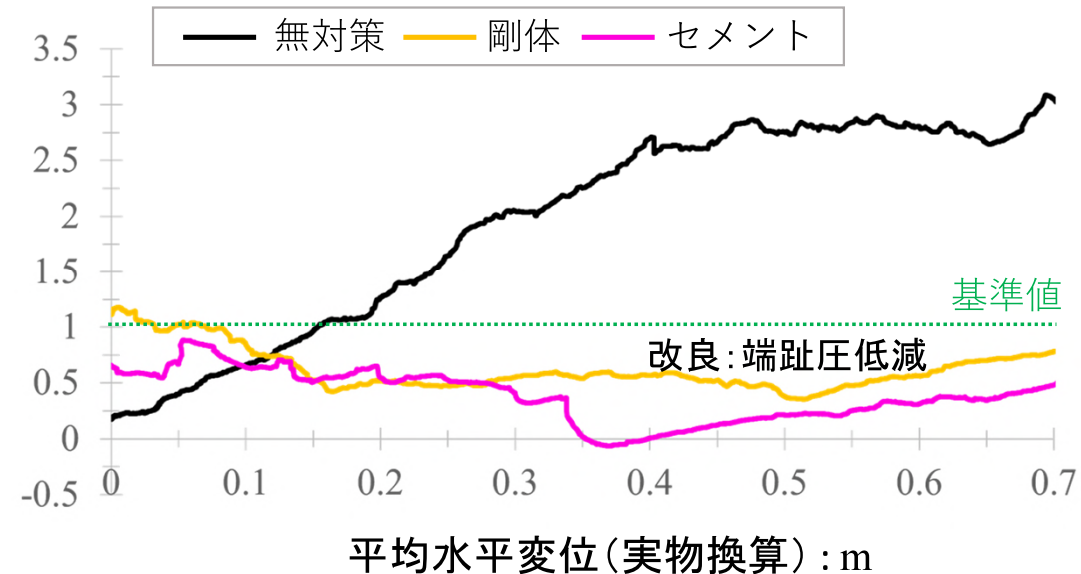
実験結果：水平変位と接地圧の関係

◆ 無対策：ケーソン水平変位－接地圧グラフ



- 岸側：増加
- ➡ 载荷による端趾圧の増加
- 沖側・中心：減少
- ➡ ケーソン傾斜による浮上がり

◆ ケーソン水平変位－端趾圧 (岸側) グラフ



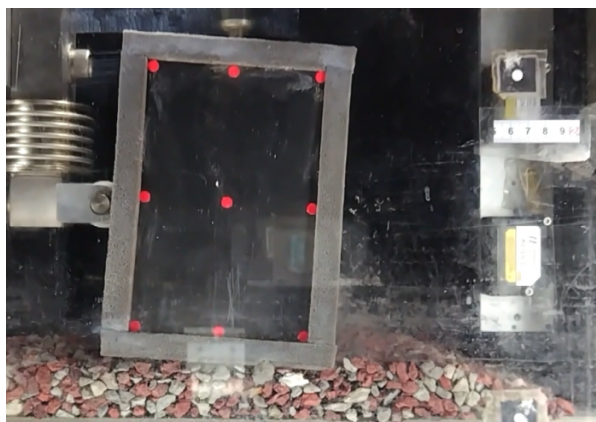
- 改良体が，端趾圧を低減(増加抑制)
- ➡ 改良体による局所作用の分散

課題3への取り組みと研究成果

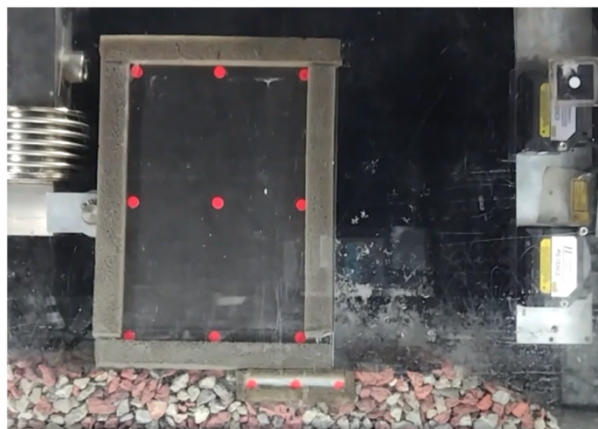


実験結果：ケーソン変位と傾斜角の関係

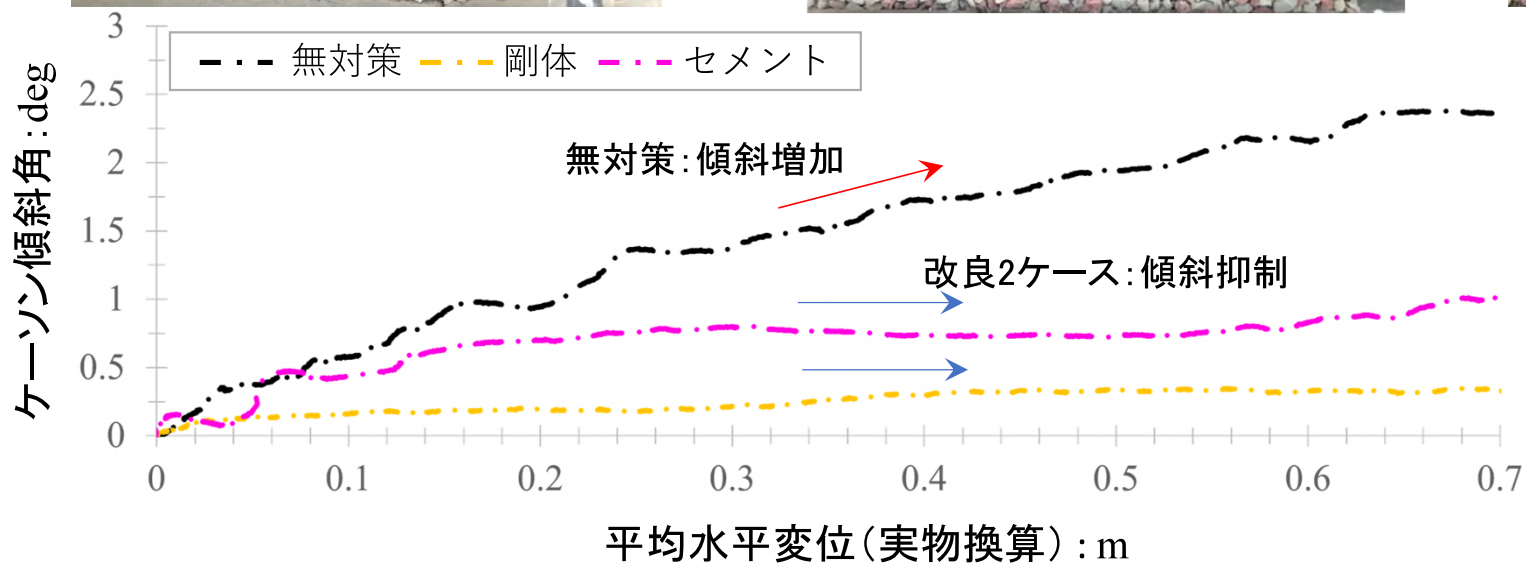
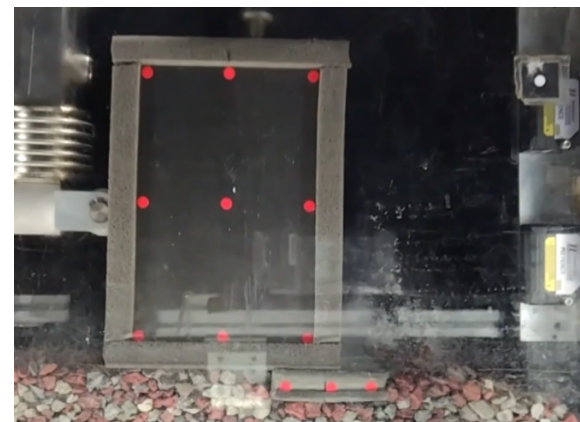
Case1：無対策



Case 2：剛体



Case3：セメントペースト改良体



端趾圧の低減



支持力破壊抑制
(滑動に遷移)



傾斜の抑制



【個別要素解析を用いた数値実験】

（**課題1**）ボンドモデルを導入した改良体要素に対して、詳細な要素試験を実施し、ボンドモデルに必要なパラメータの感度分析を通してパラメータ決定方法の高度化を行う。

（**成果1**）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。

（**課題2**）ケーソン-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し、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する。特に、改良体の設置位置については、これまでケーソン後趾を対象としていたが、港外側にも改良体を設けるなどをする。また、改良体範囲についても改良体幅と厚さをパラメータに複数パターンで検討する。

（**成果2**）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。



【遠心力載荷装置を用いた模型実験】

（**課題3**）ケーソン-捨石マウンドからなる防波堤モデルの後趾付近もしくは港外側に改良体を設置し，変形挙動や耐力発現機構の分析から，改良体による対策効果を検討する．また，改良体については，これまで用いたアルミ角材に加え，より現実に近い改良体モデルを用いることで改良体の強度－変形を考慮した分析を実施する．

（**成果3**）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．