



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

SCOPE研究開発助成(令和6年度実施)成果報告会

2025.07.11(金)

於 (一財)港湾空港総合技術センター

松田 達也(Tatsuya MATSUDA)

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(松田・内藤)研究室

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

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

- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- 能登半島地震による飯田港の被害調査

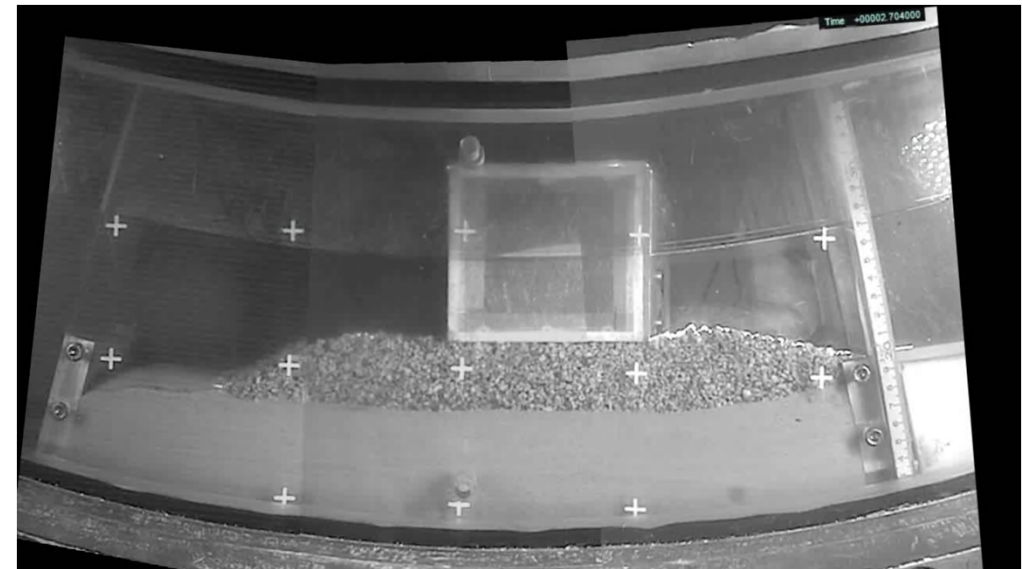
防波堤の耐津波化に向けた後趾近傍のマウンド部分固化範囲の検討

- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- 能登半島地震による飯田港の被害調査

緒言

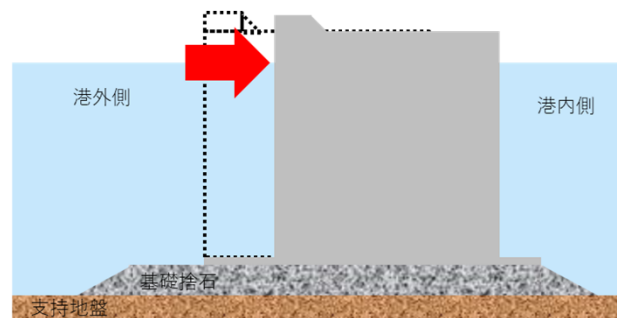
東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、多くの防波堤が損壊した。震災後は「**粘り強い構造**」の防波堤が提唱された。

⇒ **移動・変形しても耐波機能を保ち続ける構造**

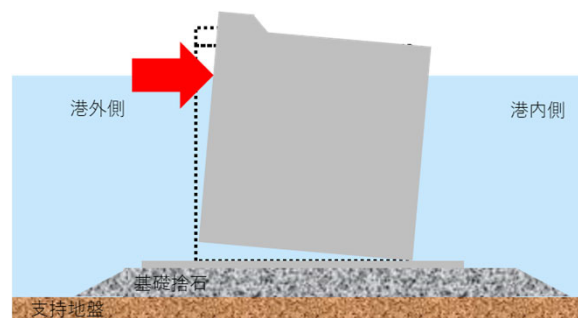


防波堤 破壊メカニズム

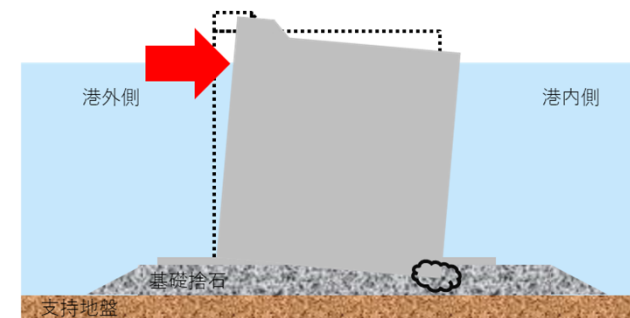
@東洋建設



滑動



転倒



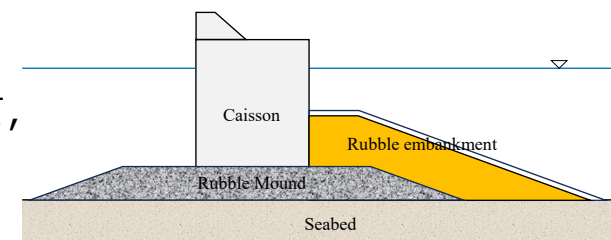
支持力破壊

緒言

「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。

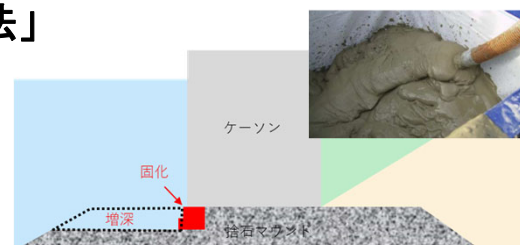


「ケーソン後趾付近の捨石マウンドを部分的に固化する工法」

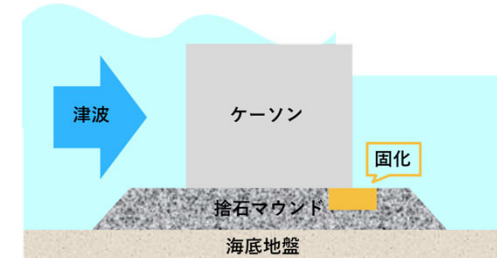
- ・マウンドの**端趾圧抵抗**を増加
- ・ケーソンを**転倒**から**滑動**主体の挙動に誘発

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、可塑性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

緒言

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

（課題1）

ボンドモデルを導入した個別要素法により、改良体の要素試験を実施する。ボンドモデルに必要なパラメータを同定するため、既往で実施されている実際の改良体の一軸圧縮試験の再現解析を行う。

（課題2）

捨石材を球形粒子で再現するため、転がり摩擦モデルを導入する。捨石材のダムブレイク試験を別途実施し、試験データをベンチマークとして転がり摩擦モデルのパラメータ同定を行う。

（課題3）

ケーソン-捨石マウンドからなる防波堤をモデル化する。同モデルに単調載荷を行い、ケーソン-捨石間の摩擦係数の妥当性を確認する。

（課題4）

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に改良体を設置し、改良体範囲に応じた挙動分析を行う。この際、遠心模型実験の結果を合わせた分析を行う。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にアルミ角材等で改良体をモデル化し、ひずみ計等の設置により、改良体に作用する端趾圧から変形挙動を分析する。

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

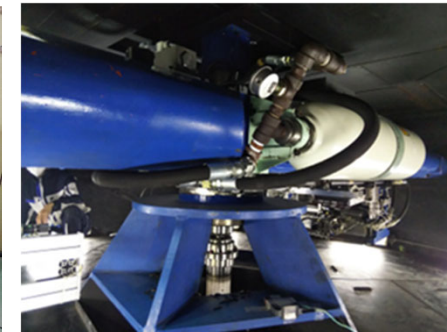
- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- 能登半島地震による飯田港の被害調査

遠心模型実験による検討

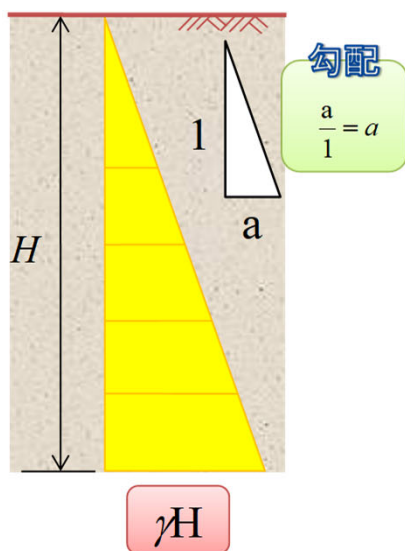
実験概要

ビーム型遠心力载荷装置 @東洋建設株式会社鳴尾研究所

- ・ 縮尺模型を回転させて遠心力を発生させる装置
- ・ 小型模型で地盤の力学的挙動を再現可能

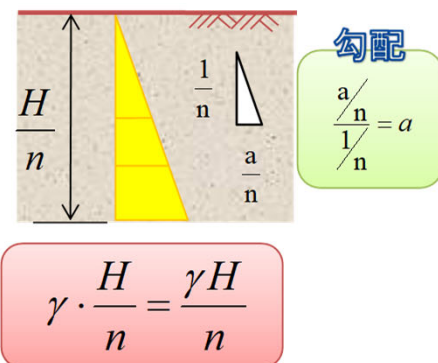


実地盤

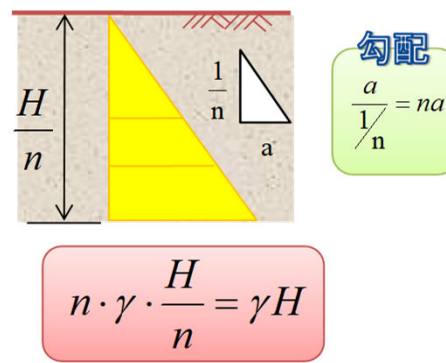


模型地盤

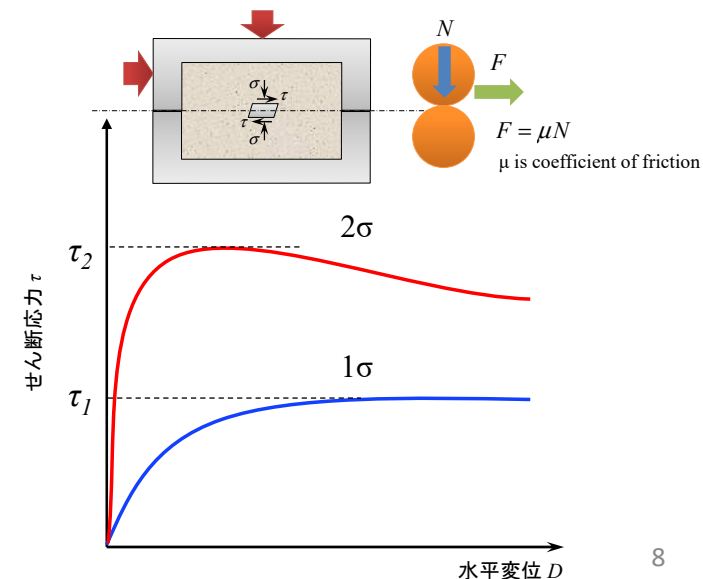
重力場実験 (1g)



遠心力場実験 (ng)



ビーム型遠心力载荷装置



遠心模型実験による検討

【摩擦係数試験】



ケーソン

- アルミ製
- 飽和砂で重量や重心を調整

※八戸港八太郎北防波堤の寸法を参考

砕石

粒径	4.75 ~ 9.50 mm
密度	2.61 g/cm ³
空隙率	40 %

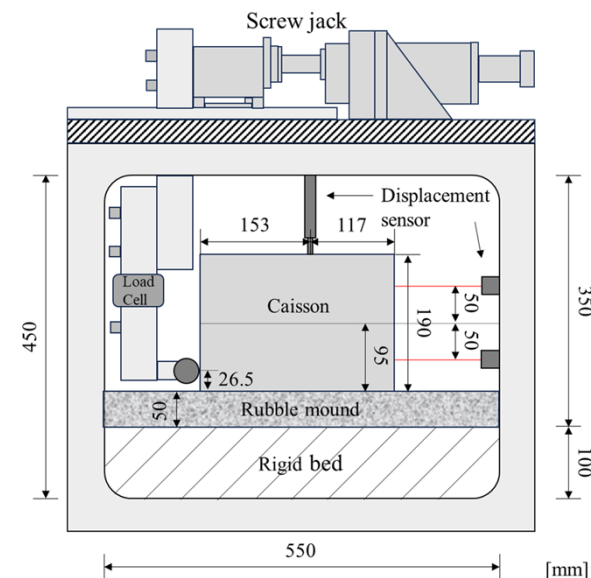


載荷条件

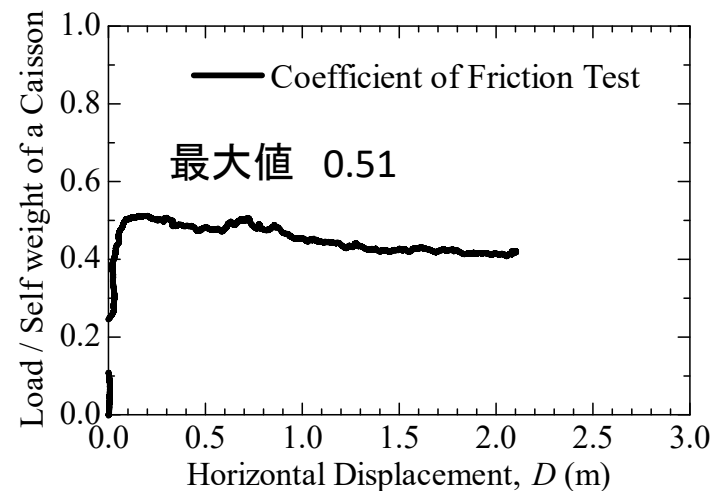
- 載荷位置はケーソン下端
- 載荷速度は1.0mm/min

計測機器

ロードセル	荷重
レーザー変位計	水平変位
接触型変位計	鉛直変位



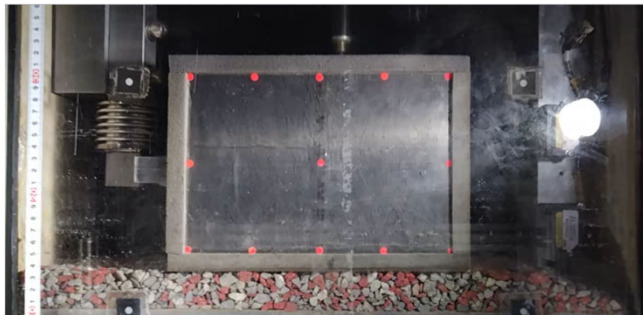
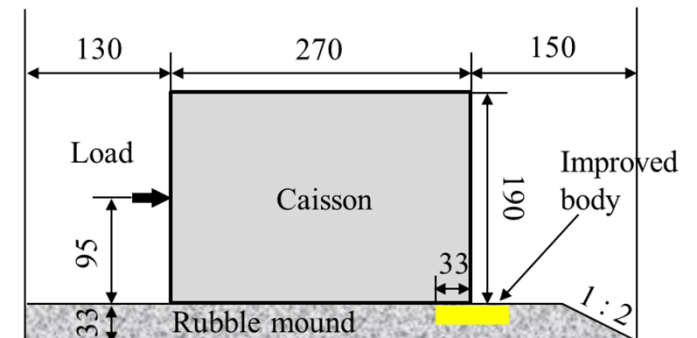
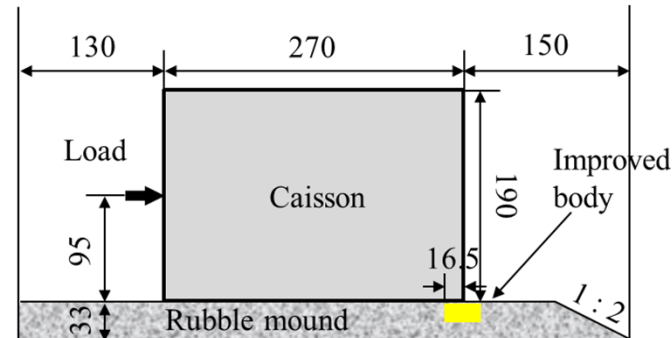
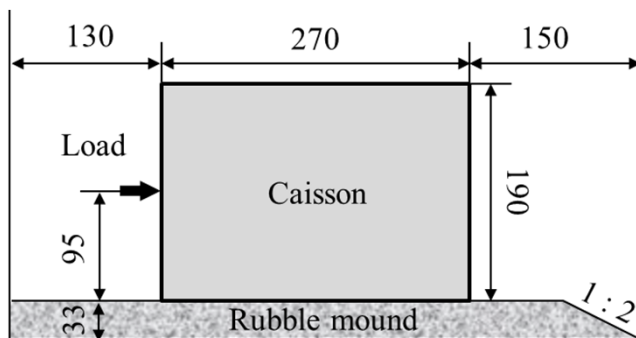
模型寸法



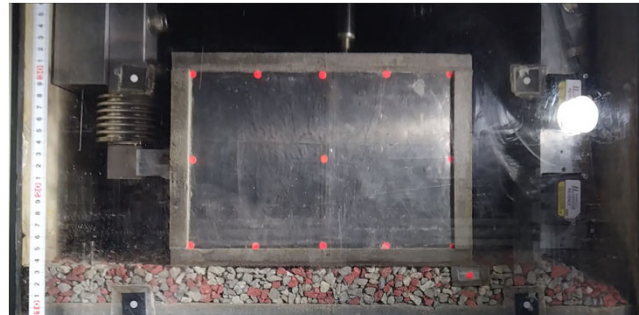
遠心模型実験による検討

【対策工試験】

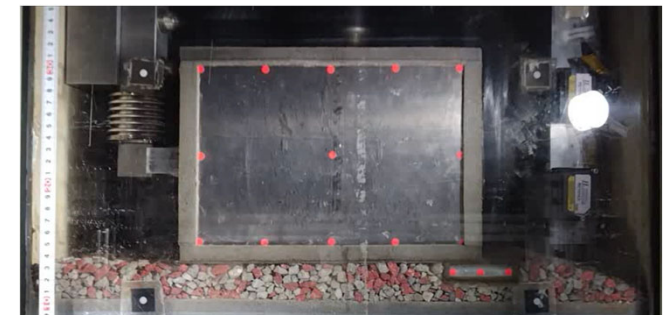
- マウンド層厚33 mm (1.98 m)
- マウンド端部は1 : 2の法面形成
- 載荷位置はケーソン中央
- 改良体はアルミ製
- 改良体高さ17 mm (0.96 m)



改良体なし



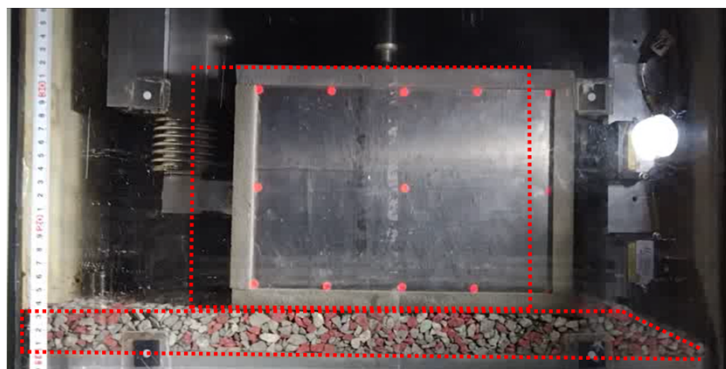
改良体幅33 mm (1.98 m)



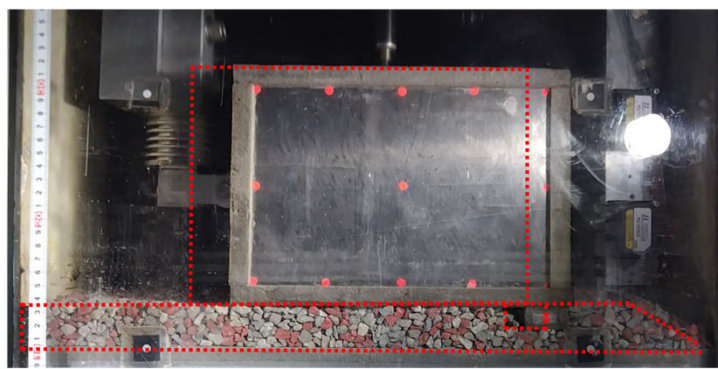
改良体幅66 mm (3.96 m)

遠心模型実験による検討

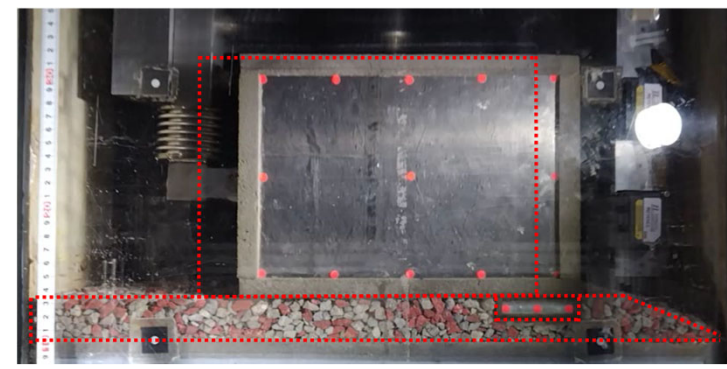
【対策工試験】
実験終了後の様子



改良体なし



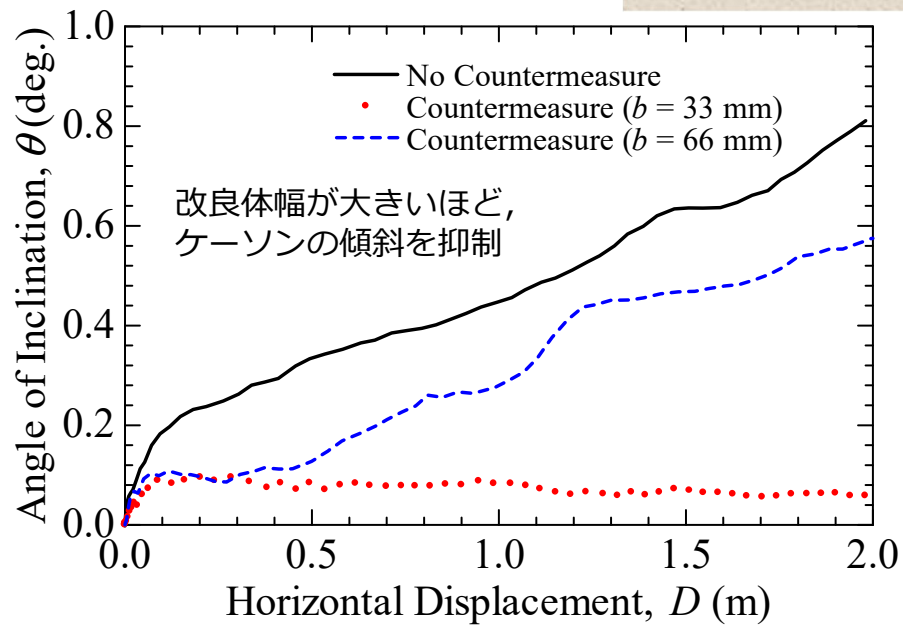
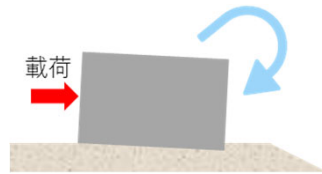
改良体幅33 mm (1.98 m)



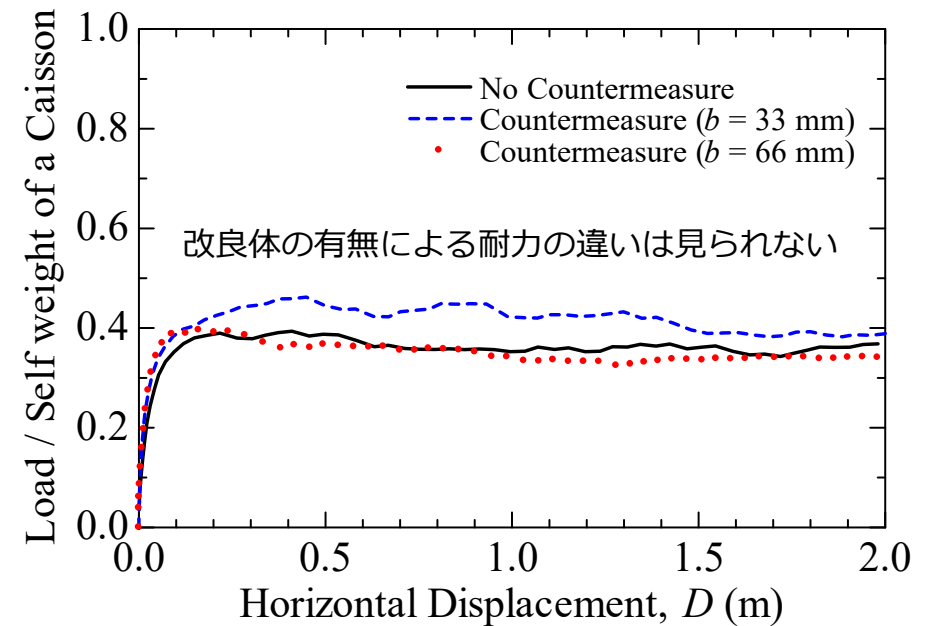
改良体幅66 mm (3.96 m)

遠心模型実験による検討

【対策工試験】



ケーソン傾斜角－水平変位



無次元水平荷重-水平変位

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

- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- （番外編）能登半島地震による飯田港の被害調査

数値実験 (DEM) による検討

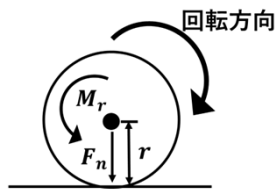
【個別要素法: Distinct Element Method (DEM)】

運動方程式 (並進・回転)

$$m_i \ddot{u}_i + c_i \dot{u}_i + F_i = 0 \quad (\text{並進}) \quad I_i \ddot{\phi}_i + D_i \dot{\phi}_i + M_i = 0 \quad (\text{回転})$$

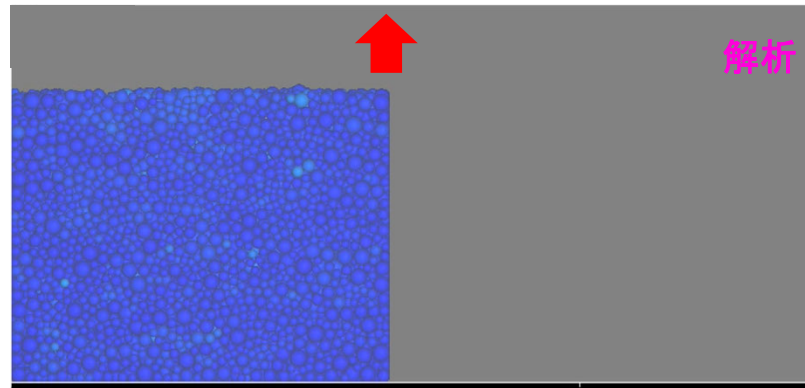
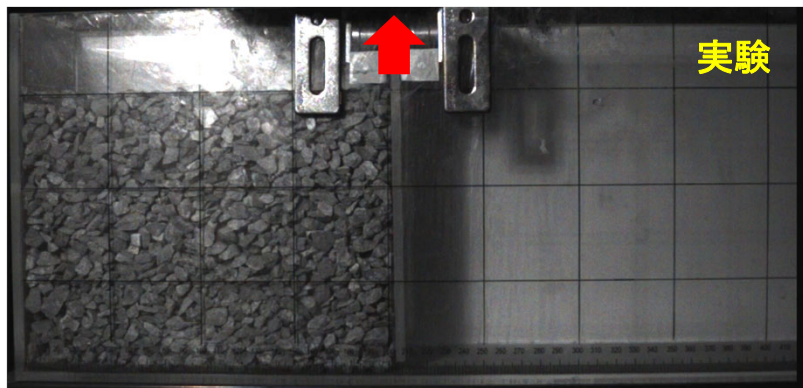
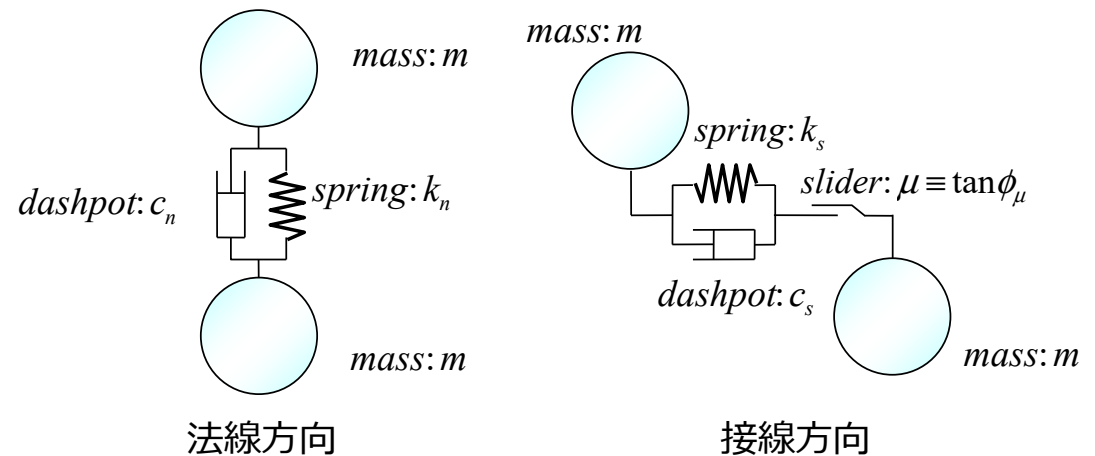
【捨石 (碎石) のモデル化】

回転抵抗係数



$$\mathbf{M}_r = -\mu_r |\mathbf{r}| F_n$$

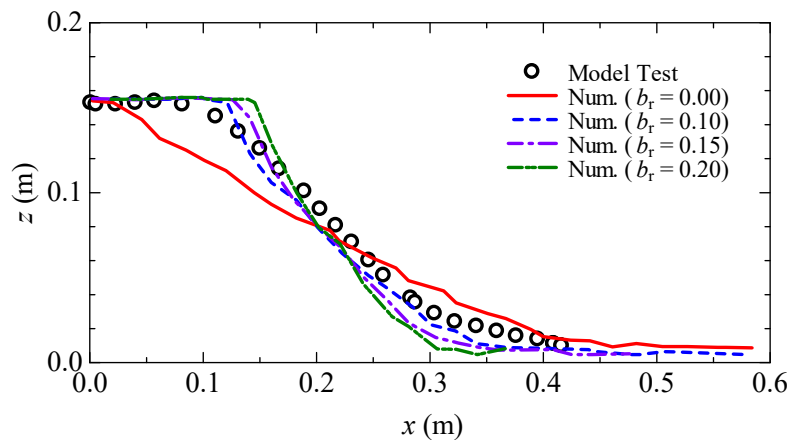
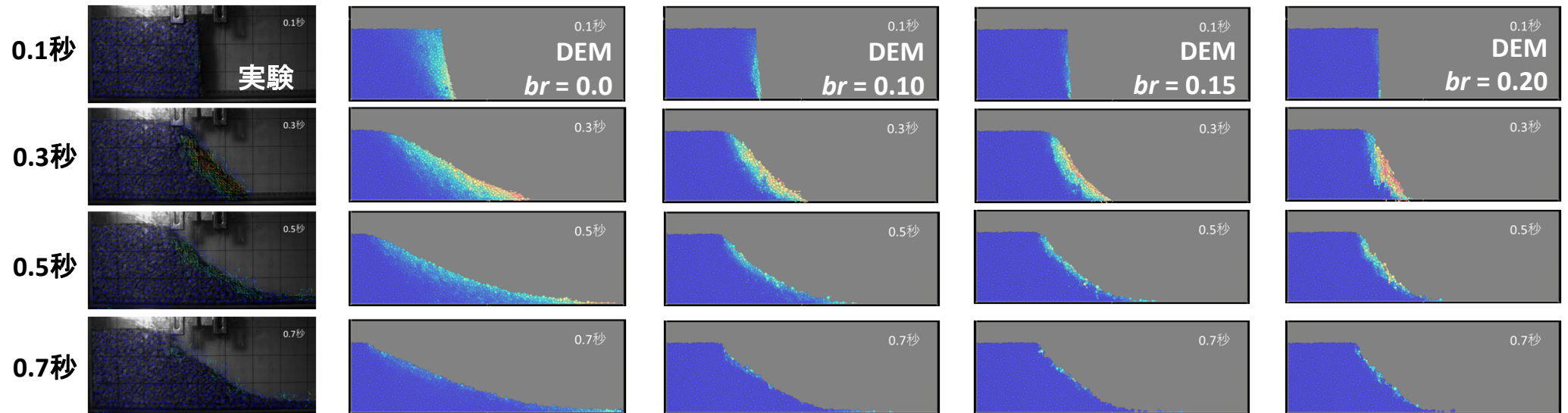
$\mathbf{M}_r$: 回転摩擦, μ_r : 回転抵抗係数, r : 回転半径, F_n : 接触法線力, ω : 粒子角速度



- 実験と同様のモデルを作成
- 回転抵抗係数を4ケース実施 (0.0, 0.1, 0.15, 0.2)

数値実験(DEM)による検討

【捨石(碎石)のモデル化】



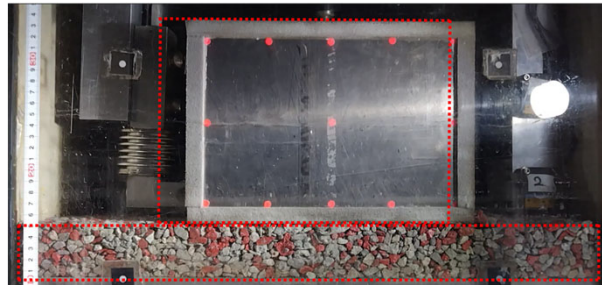
ダムブレイク後の最終堆積形状

回転抵抗を導入することで、崩壊後の傾斜が急こう配となる。

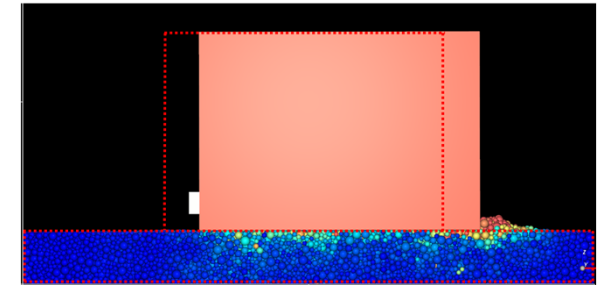
数値実験 (DEM) による検討

【摩擦係数試験の再現解析】

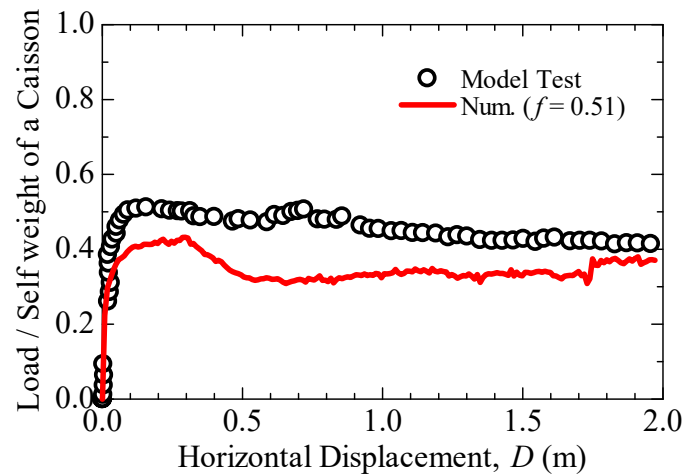
ケーソン-捨石の相互作用



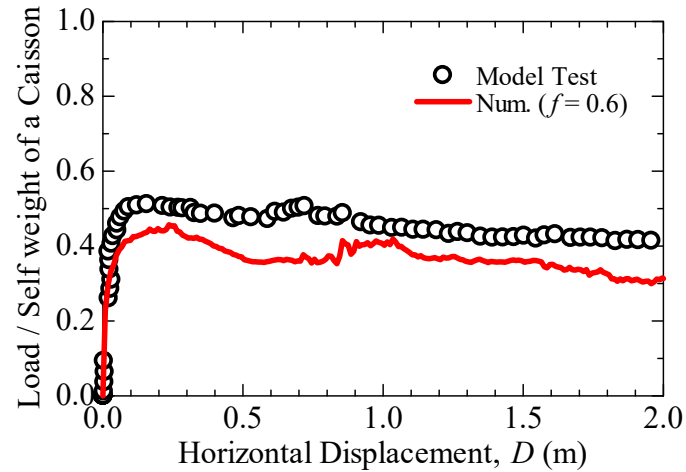
実験終了時



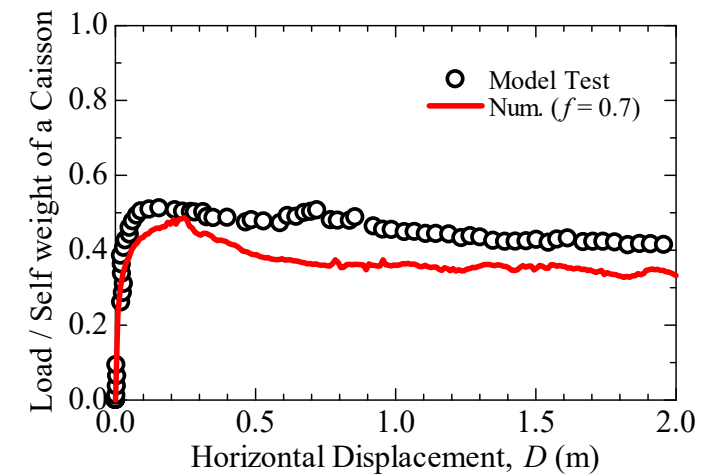
解析終了時 摩擦係数0.7



粒子-ケーソン摩擦係数0.51



粒子-ケーソン摩擦係数0.6

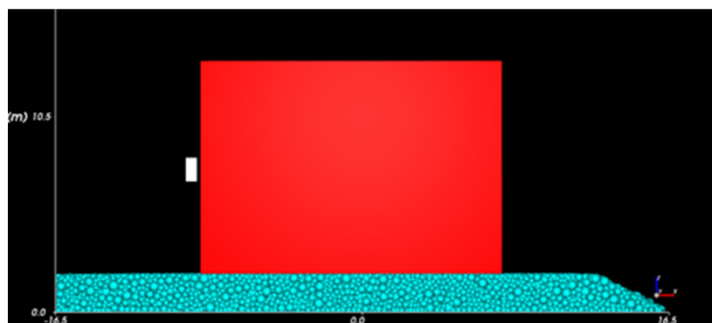
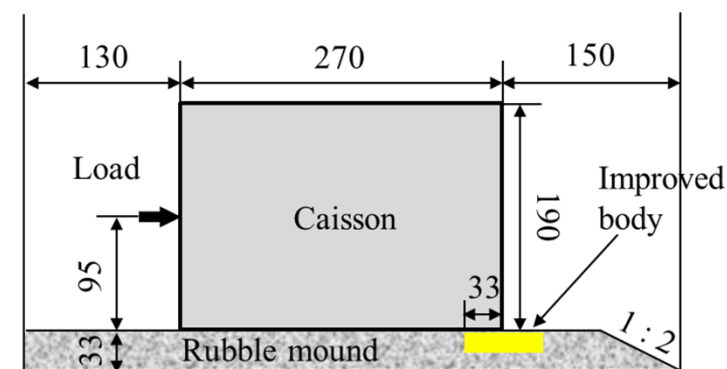
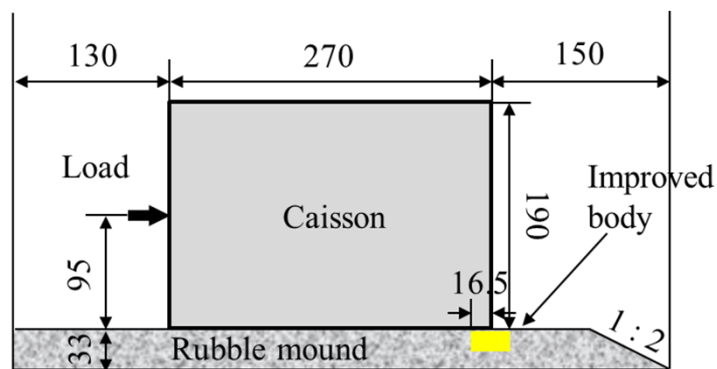
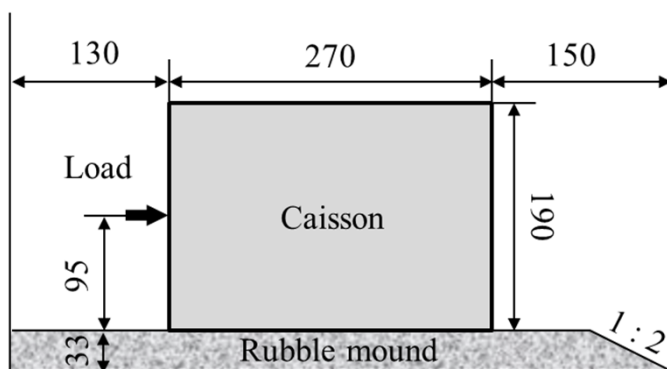


粒子-ケーソン摩擦係数0.7

数値実験 (DEM) による検討

【対策工試験の再現解析】

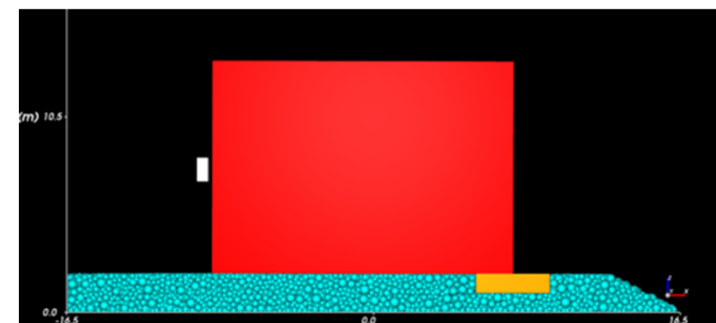
解析モデル



改良体なし



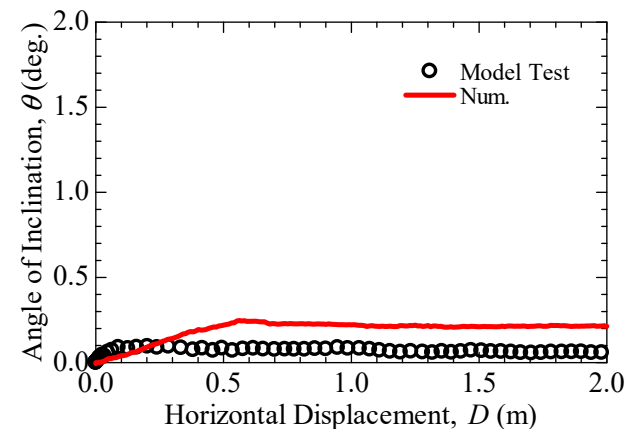
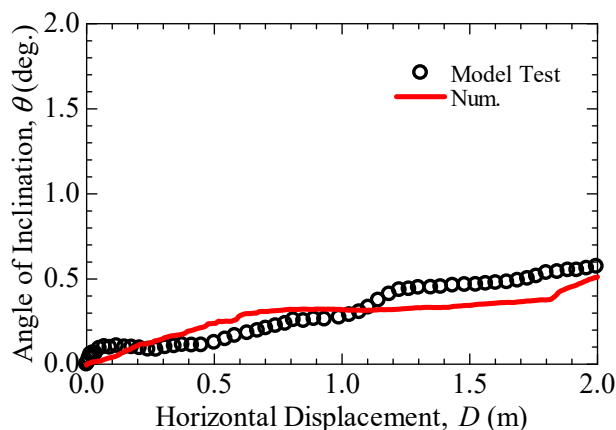
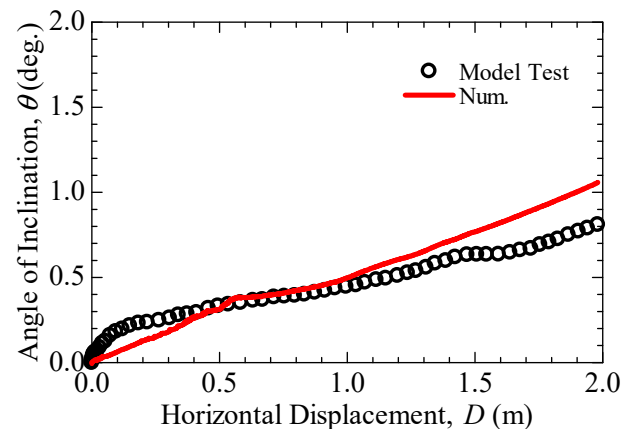
改良体幅33 mm (1.98 m)



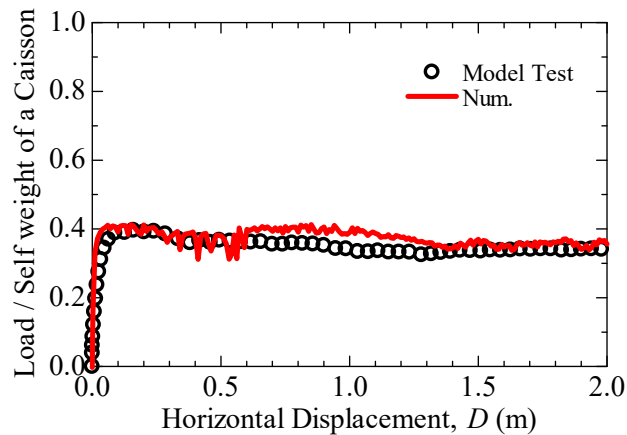
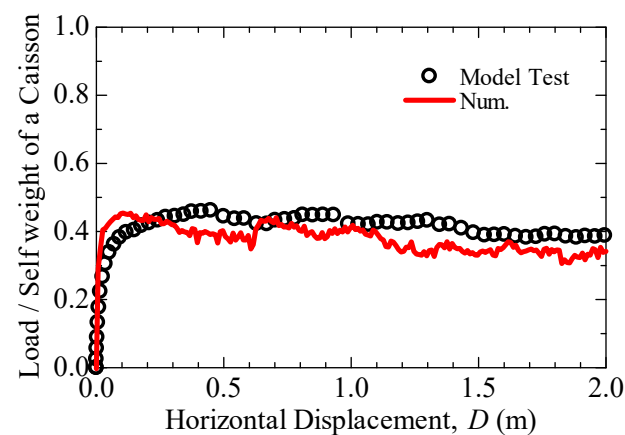
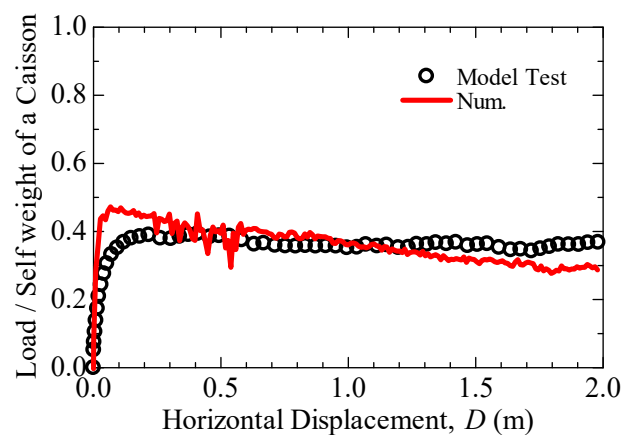
改良体幅66 mm (3.96 m)

数値実験 (DEM) による検討

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

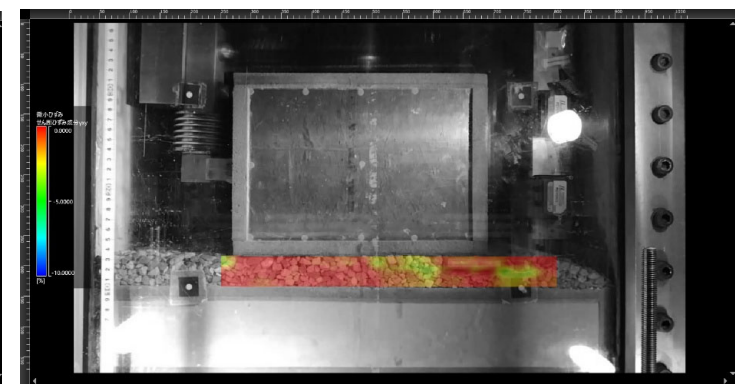
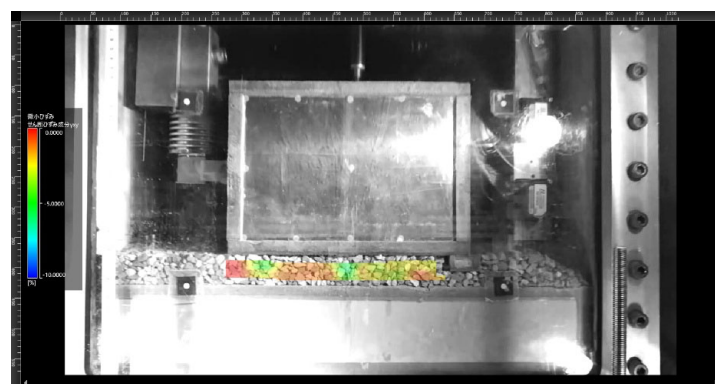
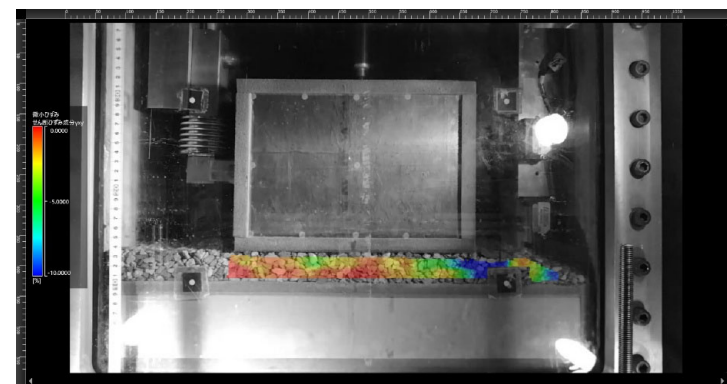
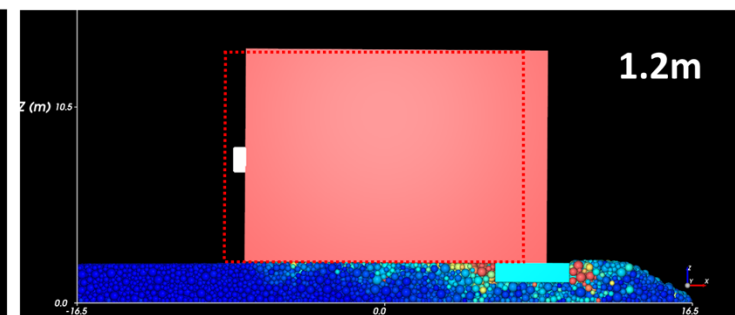
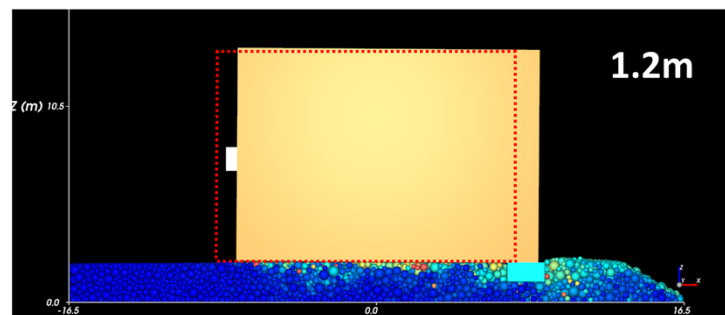
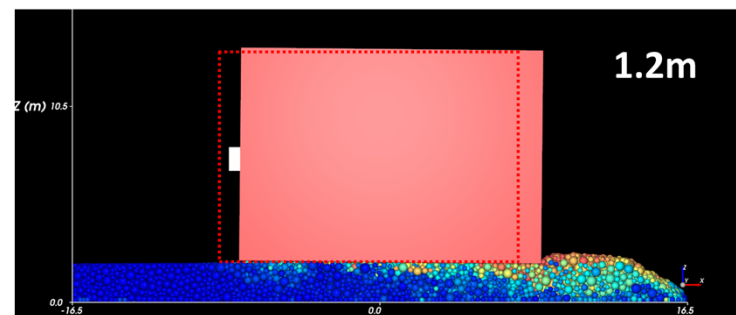
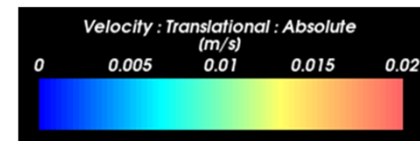
改良体幅33 mm (1.98 m)

改良体幅66 mm (3.96 m)

数値実験(DEM)による検討

【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)

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

- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- 能登半島地震による飯田港の被害調査

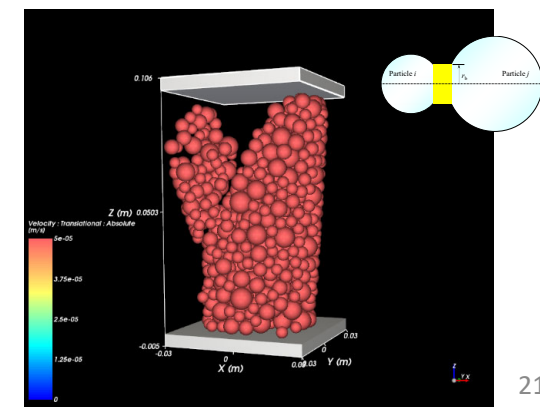
結言

本研究では、個別要素法を用いた数値実験と遠心模型実験の両者により改良体有無および改良体範囲がケーソン式防波堤の挙動に与える影響について分析した。その結果、以下の結論を得た；

- 水平荷重と水平変位の関係から、改良体の有無や改良体幅に関係なく、荷重の挙動は全体的に類似した傾向を示した。よって、**改良体がケーソンの耐力性能に影響を及ぼすことはない**ことがわかった。
- 改良体を設けていないケースでは載荷とともにケーソン中心付近から後方にかけてマウンド内で塊として移動していることが確認でき、マウンド内にすべり面が形成された。改良体を設けたケースでは、マウンド表面の粒子は移動しているものの、マウンド下部の粒子はほとんど移動せず、ケーソンが改良体の上を滑動する形で移動した。このため、**改良体が載荷荷重を受けることで、マウンドに伝わる端趾圧を低減させ、粒子の移動を抑制している**と考える。
- 改良体がないケースではケーソンの傾斜が大きく、改良体幅が大きくなるに従い、傾斜角が小さくなる傾向が明らかとなった。特に、載荷初期では改良体を設けていないケースでは急激に増加するが、**改良体を設けることで傾斜角の増加が抑制**された。

以上のことから、改良体範囲を適切に設定することで、**ケーソン式防波堤の当初の性能を変えずに**、荷重を受けるケーソン式防波堤の挙動を支持力破壊から滑動主体の破壊モードに誘導できる可能性を示した。

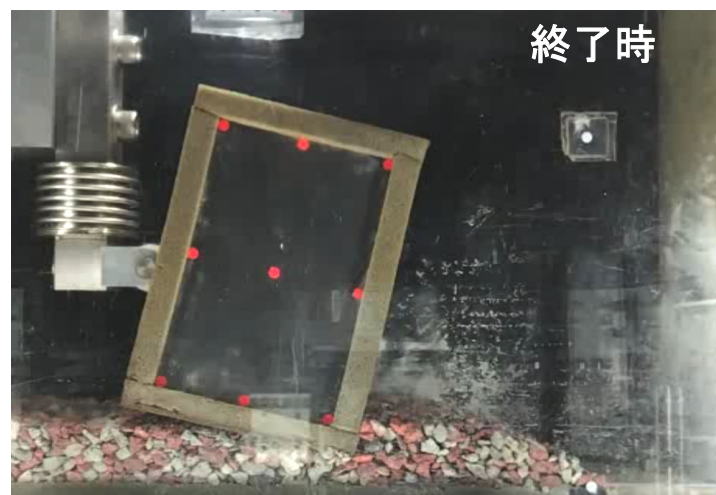
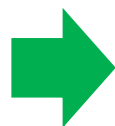
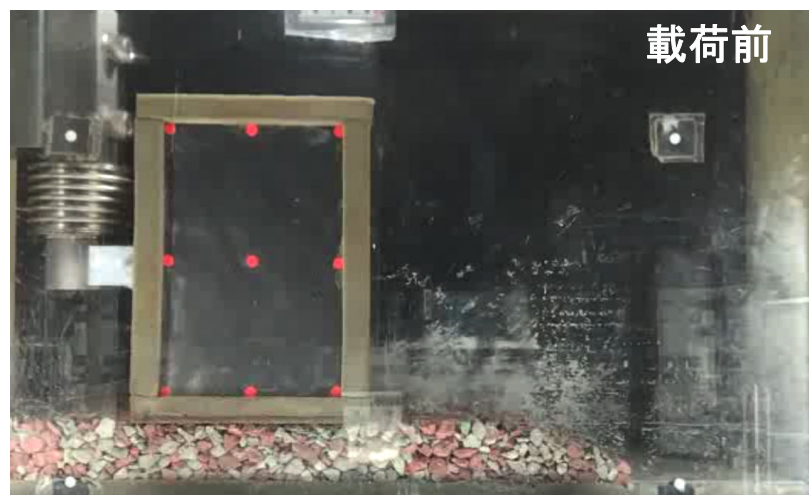
個別要素解析では、Bondモデルを導入して可塑性グラウトで固化した改良体のモデル化を行っており、今後は改良体が荷重を受けて変形を伴う場合に改良体範囲がどのような影響を及ぼすのか、今回の知見を踏まえて分析を進める。



実験結果概要: 無対策ケース (Case0)



◆ Case0 (Case2-1を更に載荷)



最大傾斜角: 27deg
マウンド変位: 1.8m

◆ Case2-1



載荷継続により支持
力破壊が更に進行

実験結果概要: 改良ケース



◆ Case1-2 (ケーソン幅: 広い, 改良体: 小さい)



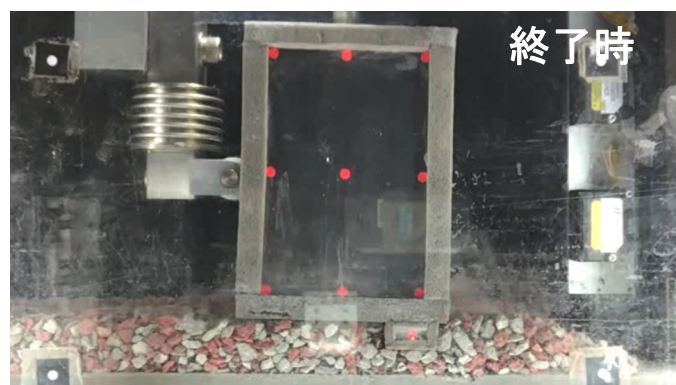
最大傾斜角: 0.6deg
改良/無対策: 0.73

◆ Case1-3 (ケーソン幅: 広い, 改良体: 大きい)



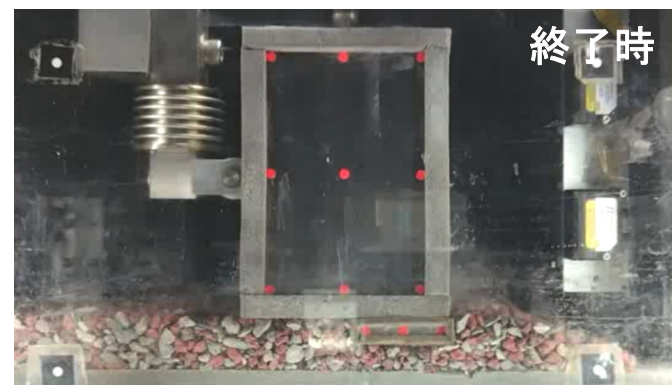
最大傾斜角: 0.1deg
改良/無対策: 0.12

◆ Case2-2 (ケーソン幅: 狭い, 改良体: 小さい)



最大傾斜角: 2.0deg
改良/無対策: 0.43

◆ Case2-3 (ケーソン幅: 狭い, 改良体: 大きい)



最大傾斜角: 0.6deg
改良/無対策: 0.12

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

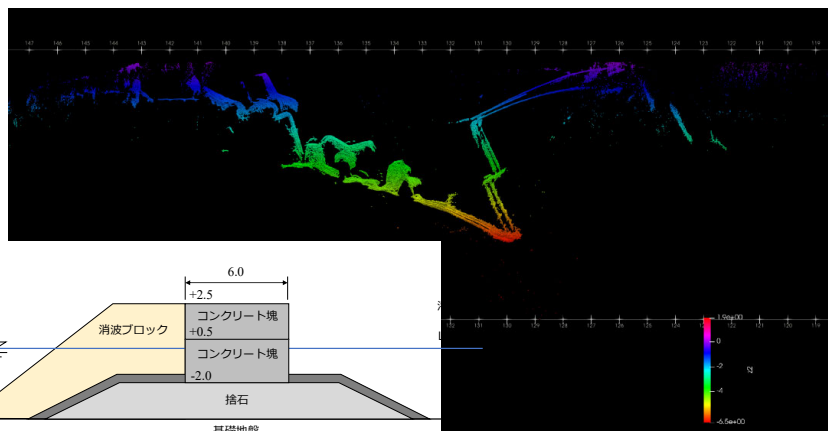
- 緒言
- 遠心模型実験による検討
- 数値実験（DEM）による検討
- 結言
- 能登半島地震による飯田港の被害調査

能登半島地震による飯田港の被害調査

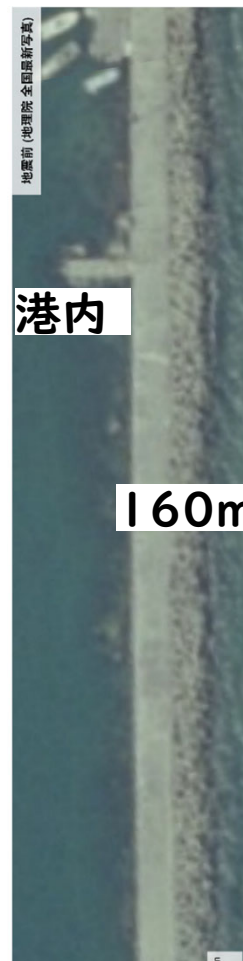
地盤工学研究発表会@旭川
特別セッション「令和6年能登半島地震」



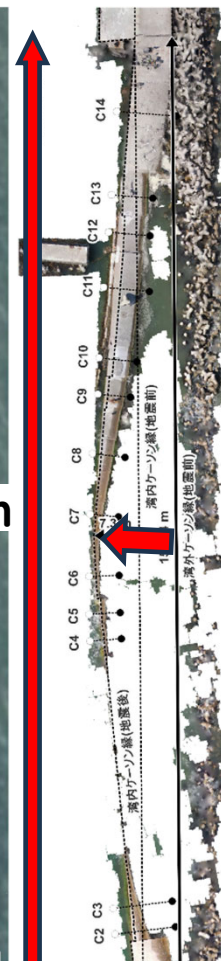
<https://kitalink.co.jp/post/2024-01-25-154220>



大坪ら (2025)



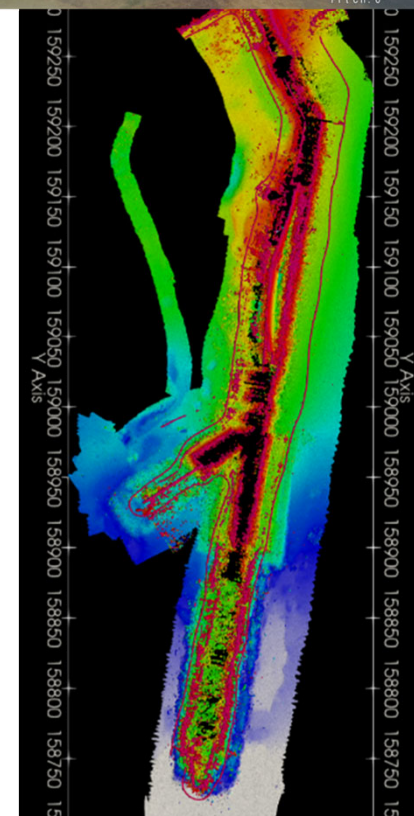
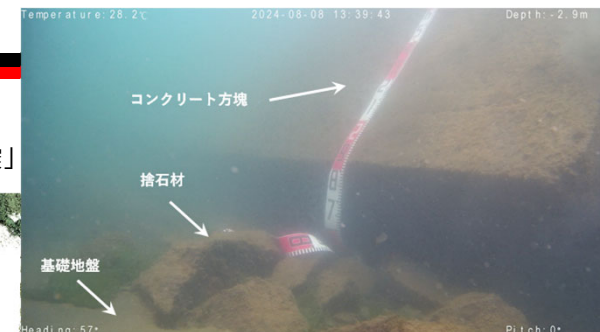
地震後
(標高分布)



地震後
(正射画像)



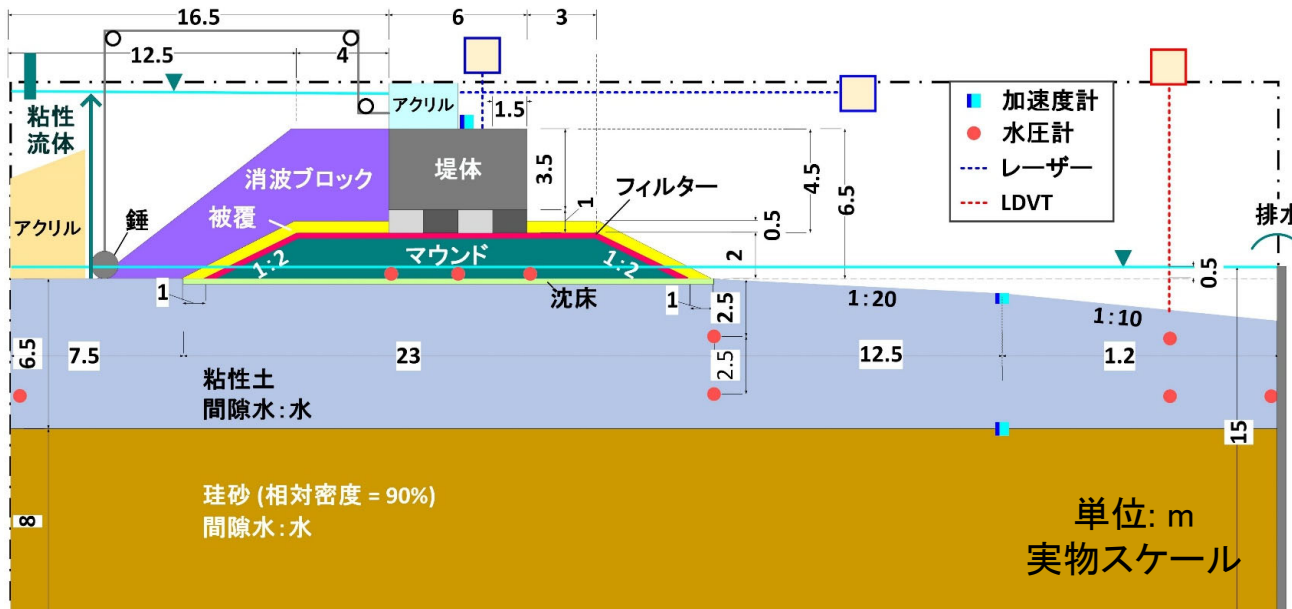
地震前
(国土地理院)



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
PARI Port and Airport Research Institute

遠心模型実験

1/50模型に対し、50Gの遠心加速度を作用させて、現場の応力状態を再現

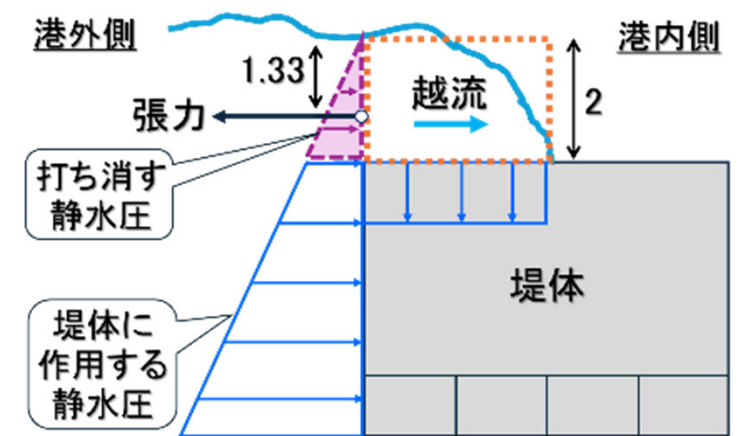
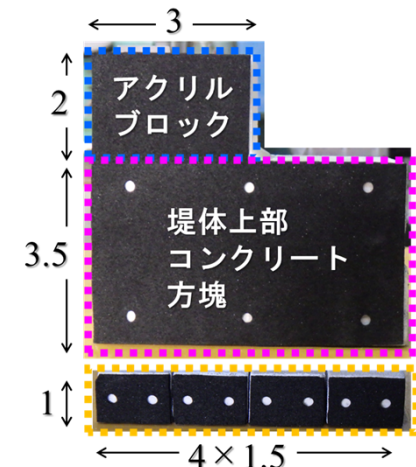


実験ケース

CASE 1: 地震後に津波

CASE 2: 津波のみ

堤体模型

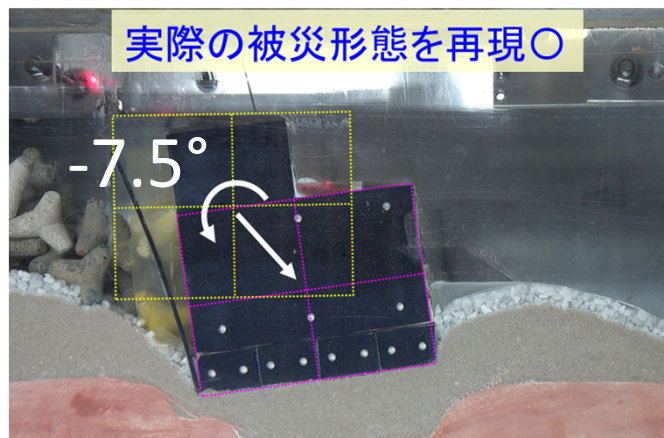
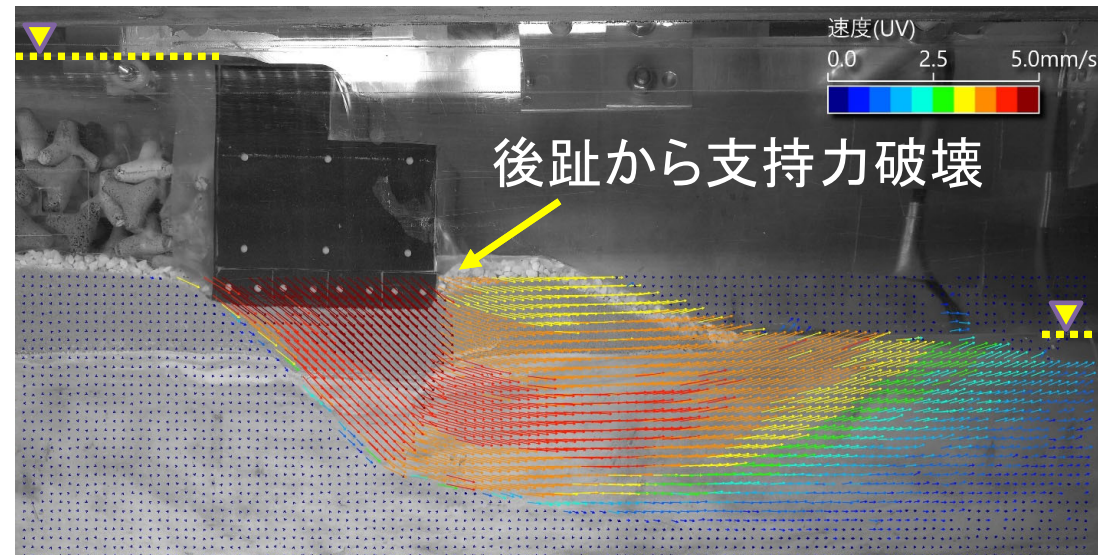
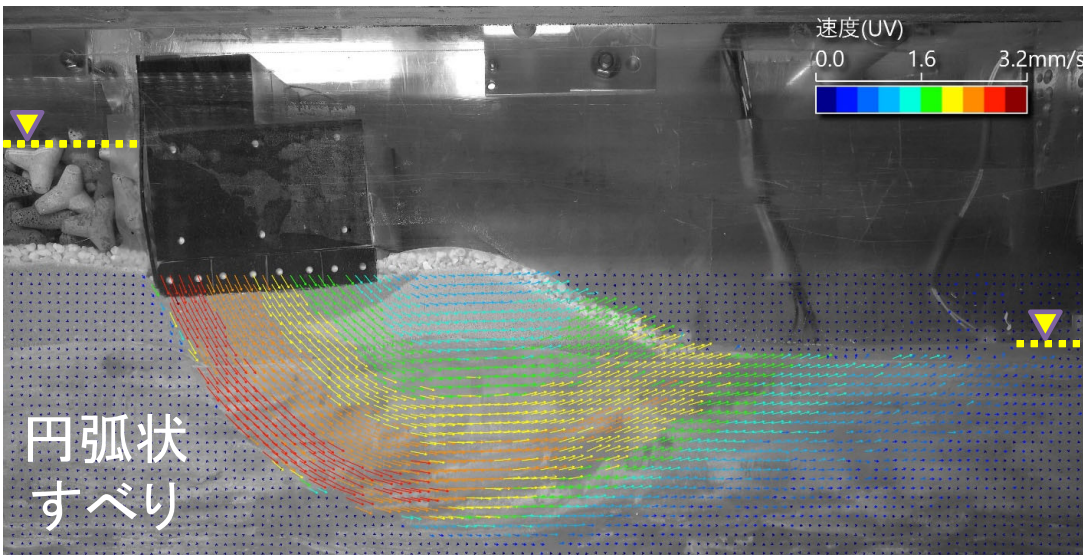


大坪氏（港空研）@第50回海洋開発シンポジウム

PIV解析結果 比較

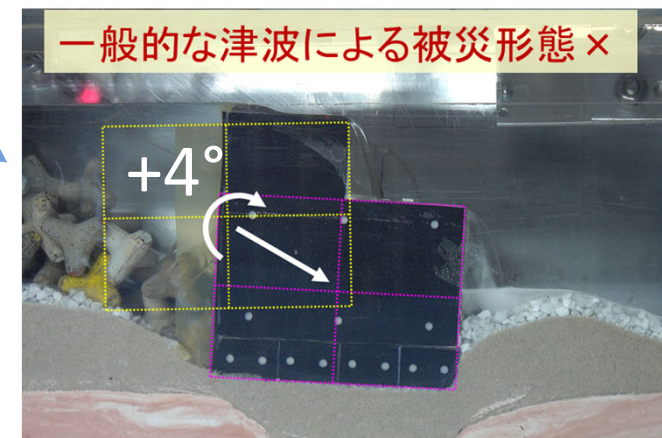
CASE 1: 地震後に津波

CASE 2: 津波のみ



堤体の回転方向が反対

再現実験の目的達成



研究成果の公表

- 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, 20(1), pp. 205-214, 2025.
- 牧野 凌弥, 松田達也, 宮本順司, 小林泰基, 内藤直人, 前田健一：水平外力が作用する防波堤のマウンド部分改良による挙動制御に関する遠心模型実験, 土木学会論文集, 2025.
- 大坪 正英, 高橋 英紀, 栗原 大, 佐藤 樹, 松田 達也, 内藤 直人, 志賀 守：飯田港東防波堤の被災調査と遠心模型再現実験, 土木学会論文集, 2025. ※海洋開発優秀論文賞受賞