

捨石堤越波時の流速に対する OpenFOAMの適用性

正会員 酒井 大樹 （東洋建設(株)）

正会員 金澤 剛 （東洋建設(株)）

フェロ-会員 辻本 剛三 （熊本大学大学院）

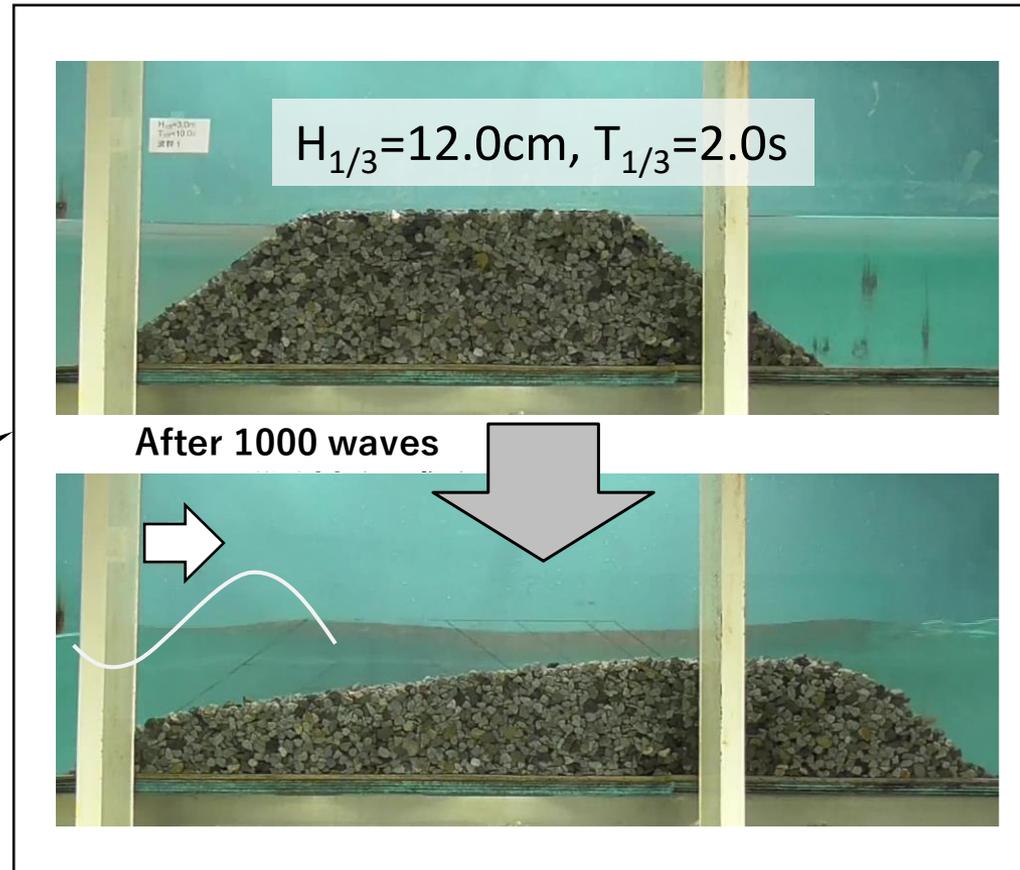
1. はじめに - 研究背景 -

【捨石護岸施工中】

- 台風等による高波浪が来襲
- 施工中の捨石堤が被災
- 天端高が低下
- 工事の手戻り

予備実験より

- 繰り返し波が作用
- 徐々に天端の石材は岸側へ



【被災対策】

捨石堤にフィルターユニットや方塊ブロックを臨時的
あるいは常時設置

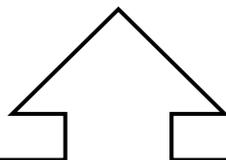
1. はじめに - 研究背景 -

【問題点】

- 波浪条件に対して施工中の捨石堤が受ける影響が不明確
- 対策が過大あるいは過小なのか不明確

【アプローチ】

- 施工中の捨石堤の安定性を評価することが重要
- 捨石堤天端直上の流速の評価が必要



オープンソースの3次元流体解析ツール
“OpenFOAM” の適用性の検討

1. はじめに - 研究レビュー -

国内の海岸工学分野におけるOpenFOAMの適用事例

- 斜面崩壊による土砂流入に対して三層流解析¹⁾
- 段波および津波と構造物の衝突問題²⁾³⁾⁴⁾
- 大規模な3次元津波解析⁵⁾⁶⁾
- 津波による被覆ブロックの安定性⁷⁾⁸⁾⁹⁾
- 造波ソルバーを使用した流体解析¹⁰⁾¹¹⁾

精度検証

造波ソルバー



多孔質体モデル



事例なし

捨石堤天端直上の流速を評価するための一歩
捨石堤を多孔質体として再現した場合の

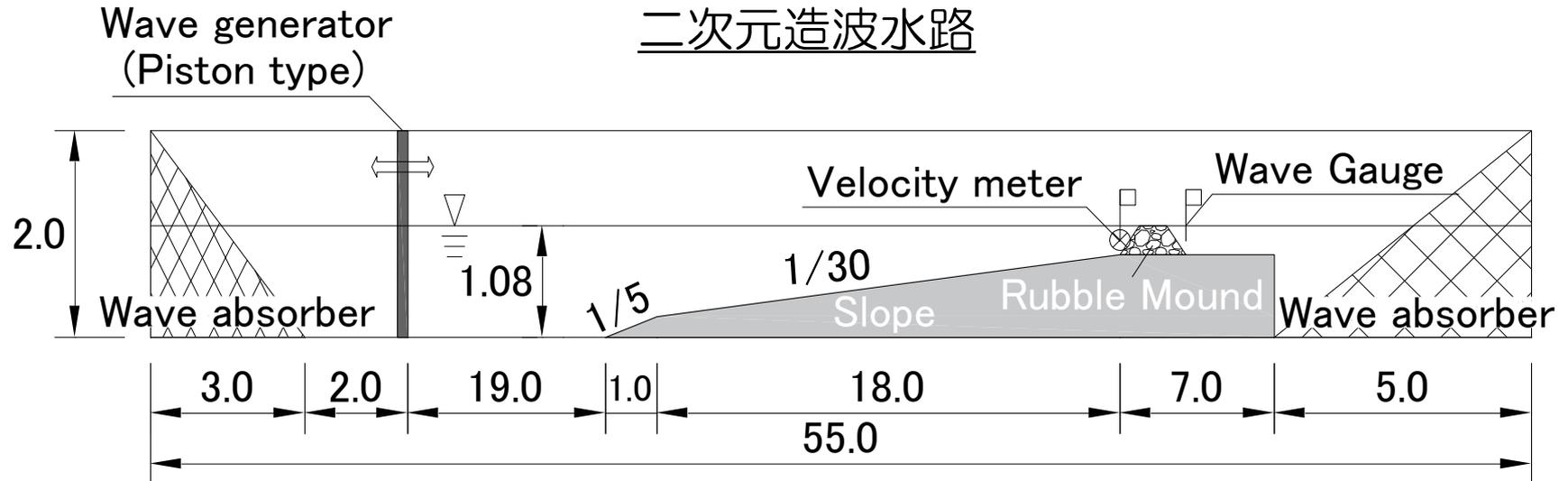
OpenFOAMの適用性について検討

実験と解析の比較

2. 水理実験

- 二次元造波水路
 - 長さ55m×高さ2m×幅1m
- ピストンタイプ
- 使用機器
 - 容量式波高計, ドップラー式流速計

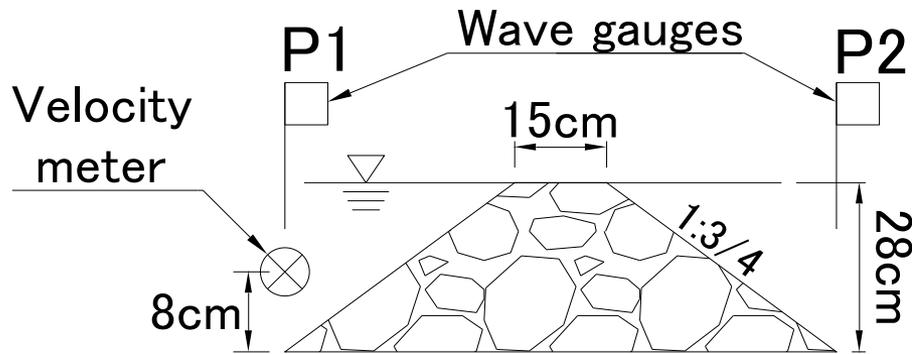
レーザー変位計で造波板の動きを計測→数値解析に使用



2. 水理実験

- 捨石堤模型
 - 堤体高さ 28 cm, 天端幅 15 cm
 - 法面勾配 1:3/4
 - 碎石 中央粒径 $d_{50} = 13$ mm, 平均質量 3.4 g

捨石堤模型&計測機器設置



- 水位は捨石堤天端高と同じ
- 捨石堤は金網で被覆
(石材が動かないように)



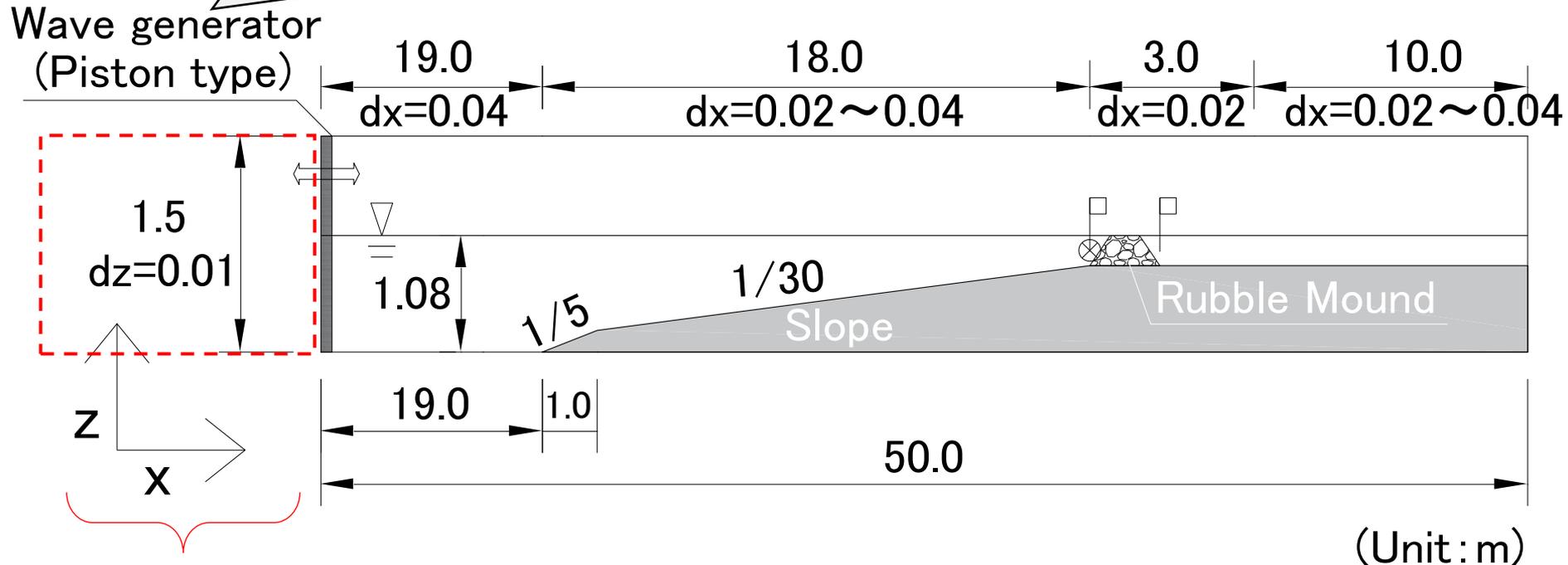
実験ケース

	H (cm)	T (s)
CASE1	12.0	2.0
CASE2	11.0	3.0

3. 数値計算 -OpenFOAM-

- 二次元造波水路
 - 長さ50m×高さ2m×幅1m
- 造波方法：**ピストン**
- 捨石堤：実験と同様規模，**多孔質体モデル**

実験で得た動きを再現



- **造波板背後5mは省略**

3. 数値計算 -計算条件-

OS	Ubuntu 18.04 LTS
OpenFOAM version	v1806
Solver	OlaDyMFoam
Mesh size	dx=0.02m~0.04m
	dz=0.01m
Total mesh	181,204
Calculation time interval	Auto
Turbulence model	kOmegaSSTStable
Boundary condition	Left wall: Dynamic
	Bottom: Close
	Right wall, Upper: Open

Linux環境

2018年6月リリース

- 造波機能
- 動的メッシュ
- 多孔質体モデル

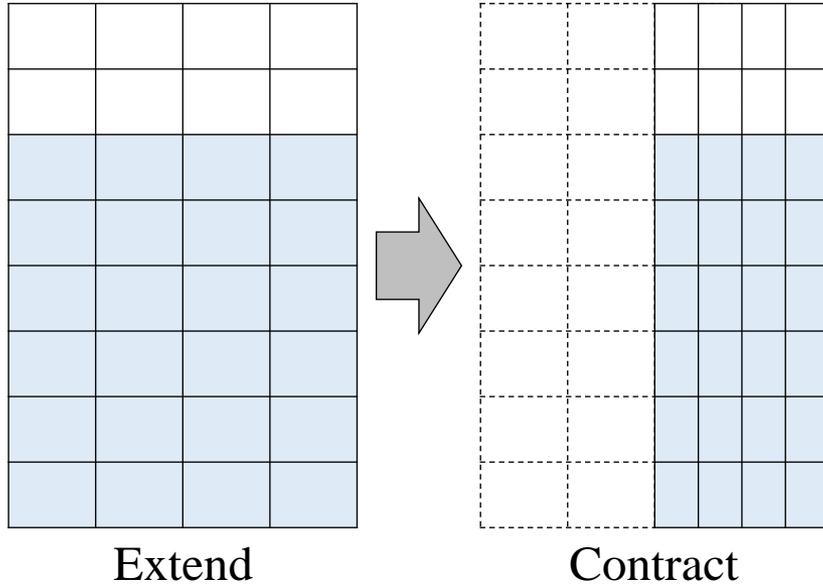
可変格子

乱流モデル

動的メッシュ

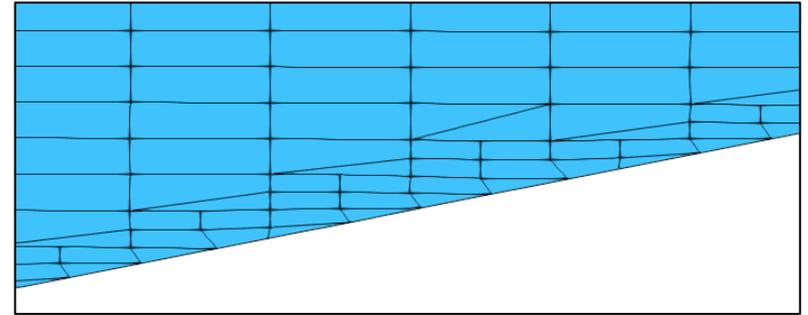
3. 数値計算 -造波方法と斜面モデリング-

造波方法：ピストン



計算格子の伸縮によって
ピストン運動を模擬

斜面モデリング



CADソフト等を用いて
斜面をSTLファイルでモデリング



標準ユーティリティ
「snappyHexMesh」を使用



非構造格子で斜面を再現
(三角形格子+四角形格子)

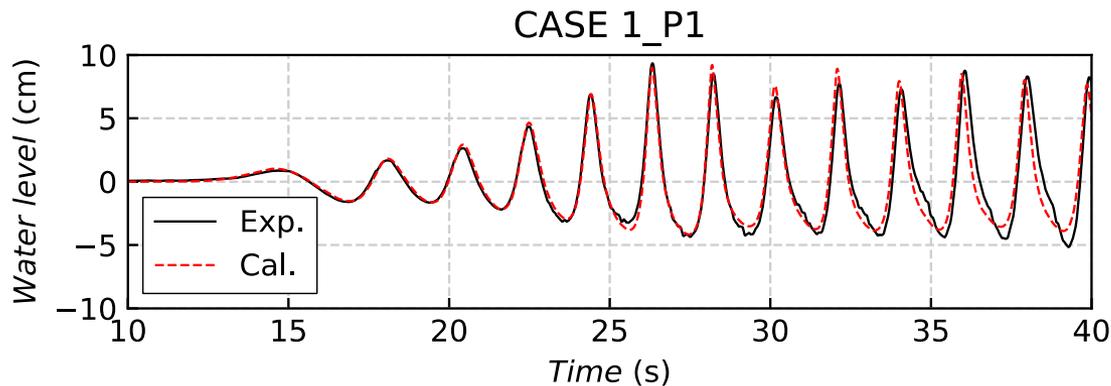
3-1. 通過波検定

安定した5波分の平均値

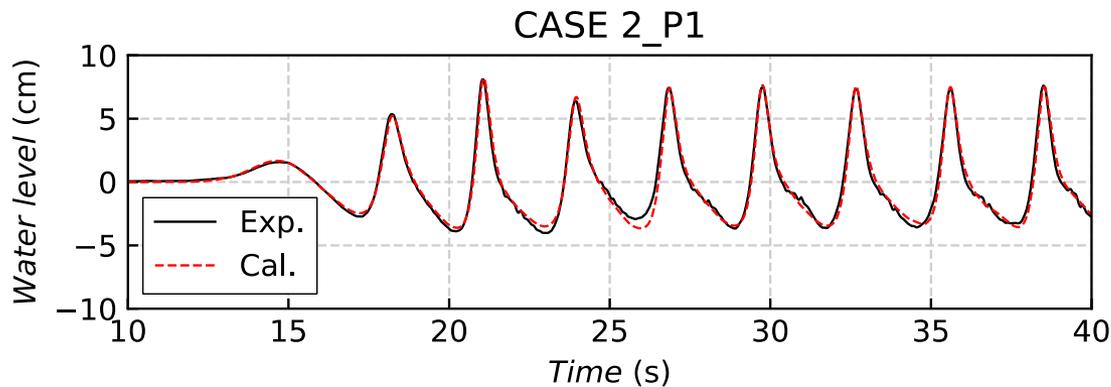
捨石堤模型を設置していない状態で波の通過波検定を実施

⇒波高, 周期は良好に再現

		H(cm)	T(s)
CASE1	Exp.	12.1	1.95
	Cal.	12.1	1.94
CASE2	Exp.	10.9	2.92
	Cal.	11.0	2.92



初期波形の立ち上がりから良好に再現



⇒造波板の動きを再現したため

3-2. 捨石堤空隙率の検討

多孔質体のパラメータ

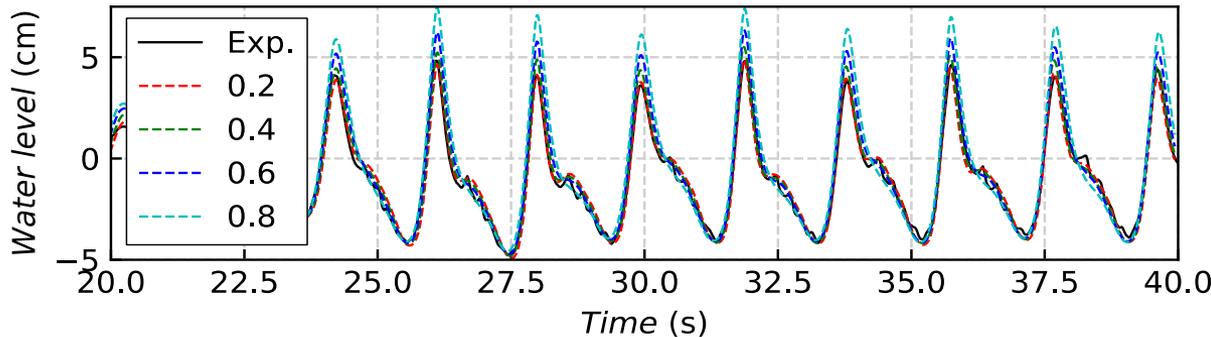
- 中央粒径 d_{50}
- 空隙率
- 係数 a および b
- 摩擦係数 c



(a, b, c は推奨値)

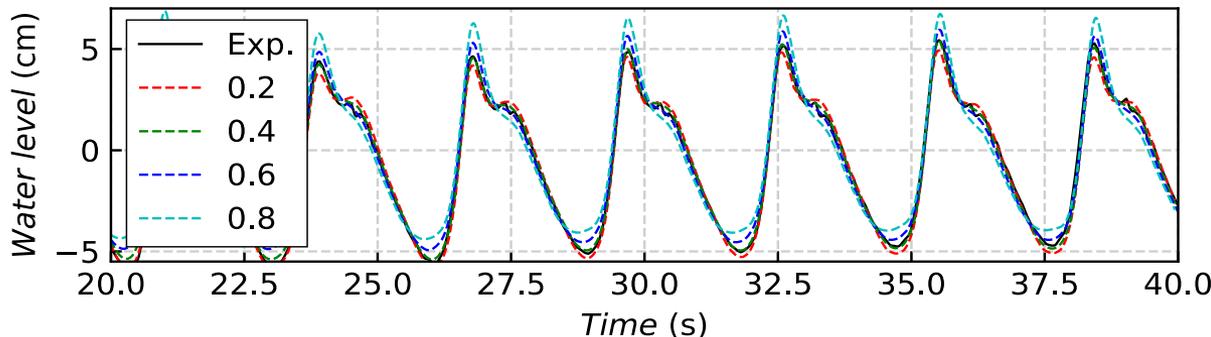
- 中央粒径 $d_{50} = 13\text{mm}$
- 空隙率 = $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$
- 係数 $a = 50$, $b = 1.2$
- 摩擦係数 $c = 0.34$

$H=12.1\text{cm}$, $T=1.94\text{s}$ CASE 1_P1



空隙率が大い
⇒ 水位のピーク値
が大い

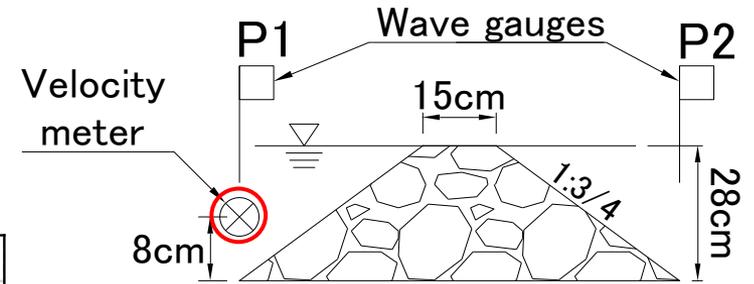
$H=11.0\text{cm}$, $T=2.92\text{s}$ CASE 2_P1



最適空隙率
CASE1では 0.2
CASE2では 0.4

3-2. 捨石堤空隙率の検討

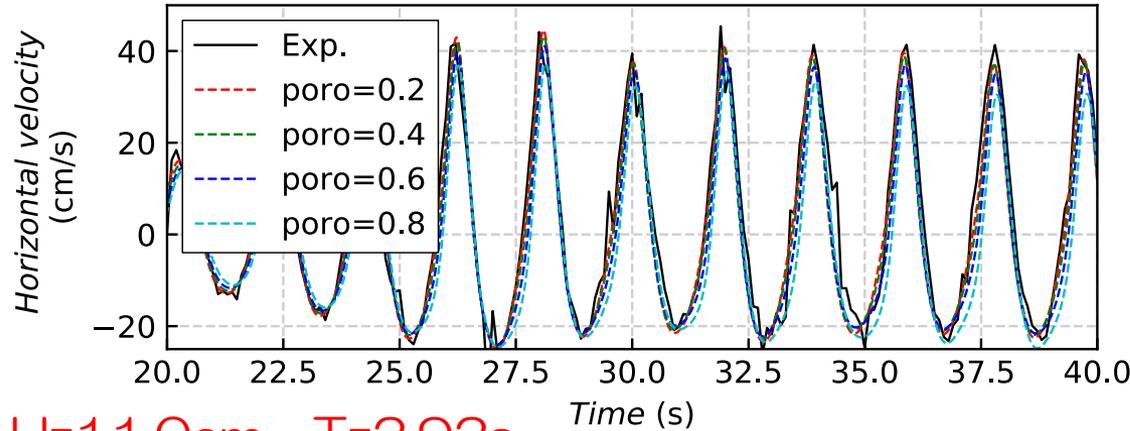
捨石堤前面流速



空隙率の違いはほとんど見られない

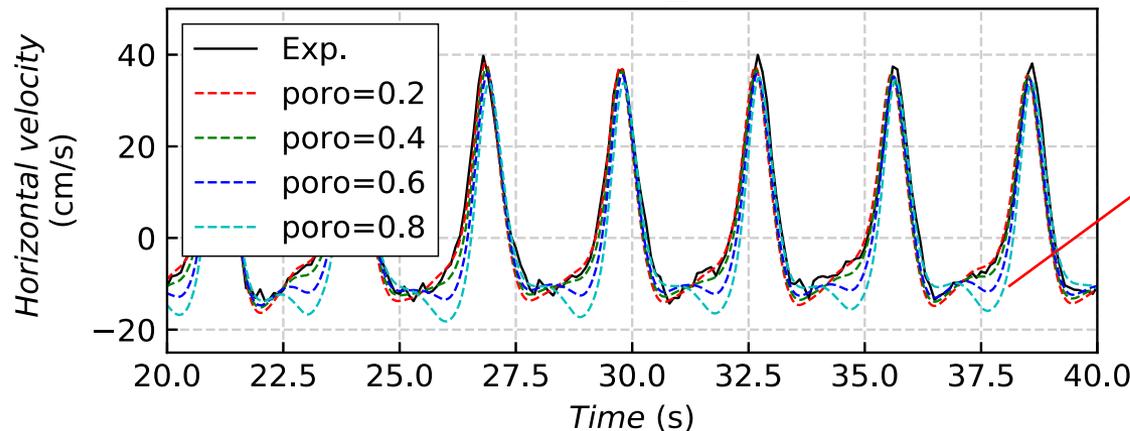
$H=12.1\text{cm}$, $T=1.94\text{s}$

CASE 1_P1



$H=11.0\text{cm}$, $T=2.92\text{s}$

CASE 2_P1



負の流速で違い
空隙率が高いほど再現性低い

最適空隙率
0.2~0.4

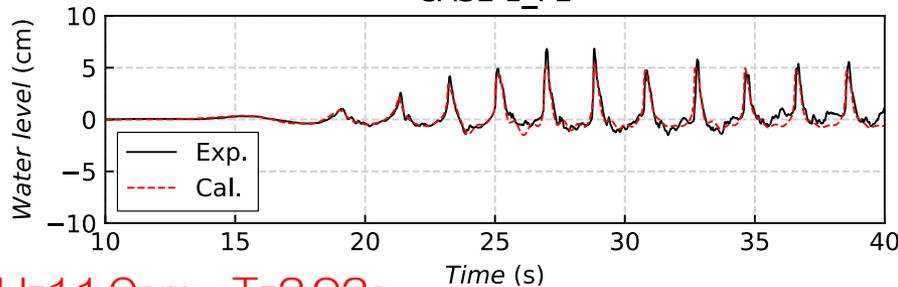
4. 水理模型実験と数値計算の結果の比較

捨石堤の空隙率 0.4 に設定

捨石堤背後水位

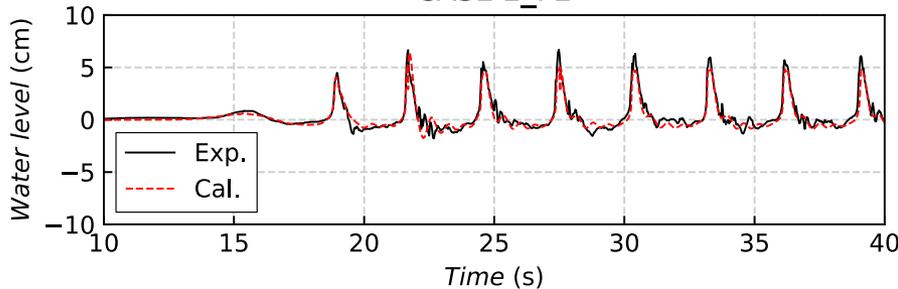
$H=12.1\text{cm}$, $T=1.94\text{s}$

CASE 1_P2



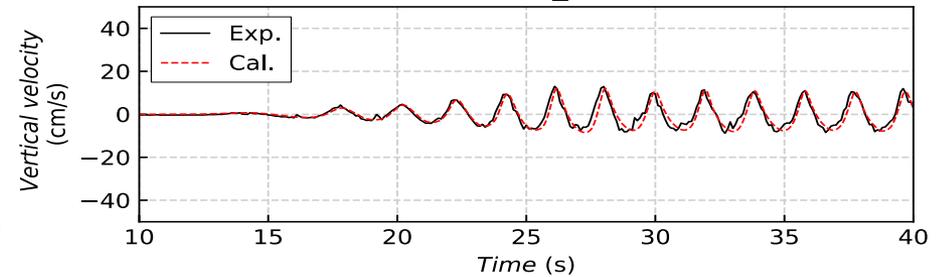
$H=11.0\text{cm}$, $T=2.92\text{s}$

CASE 2_P2

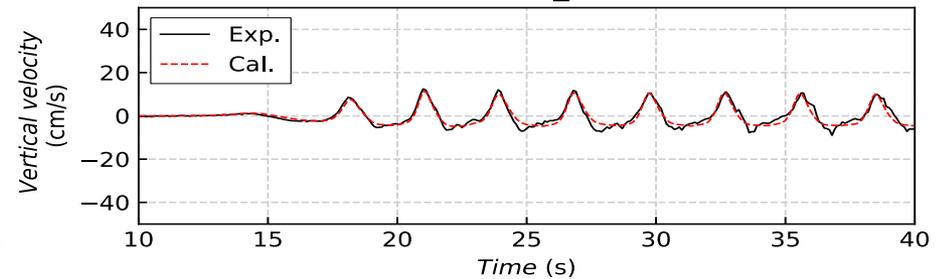


捨石堤前面鉛直流速

CASE 1_P1



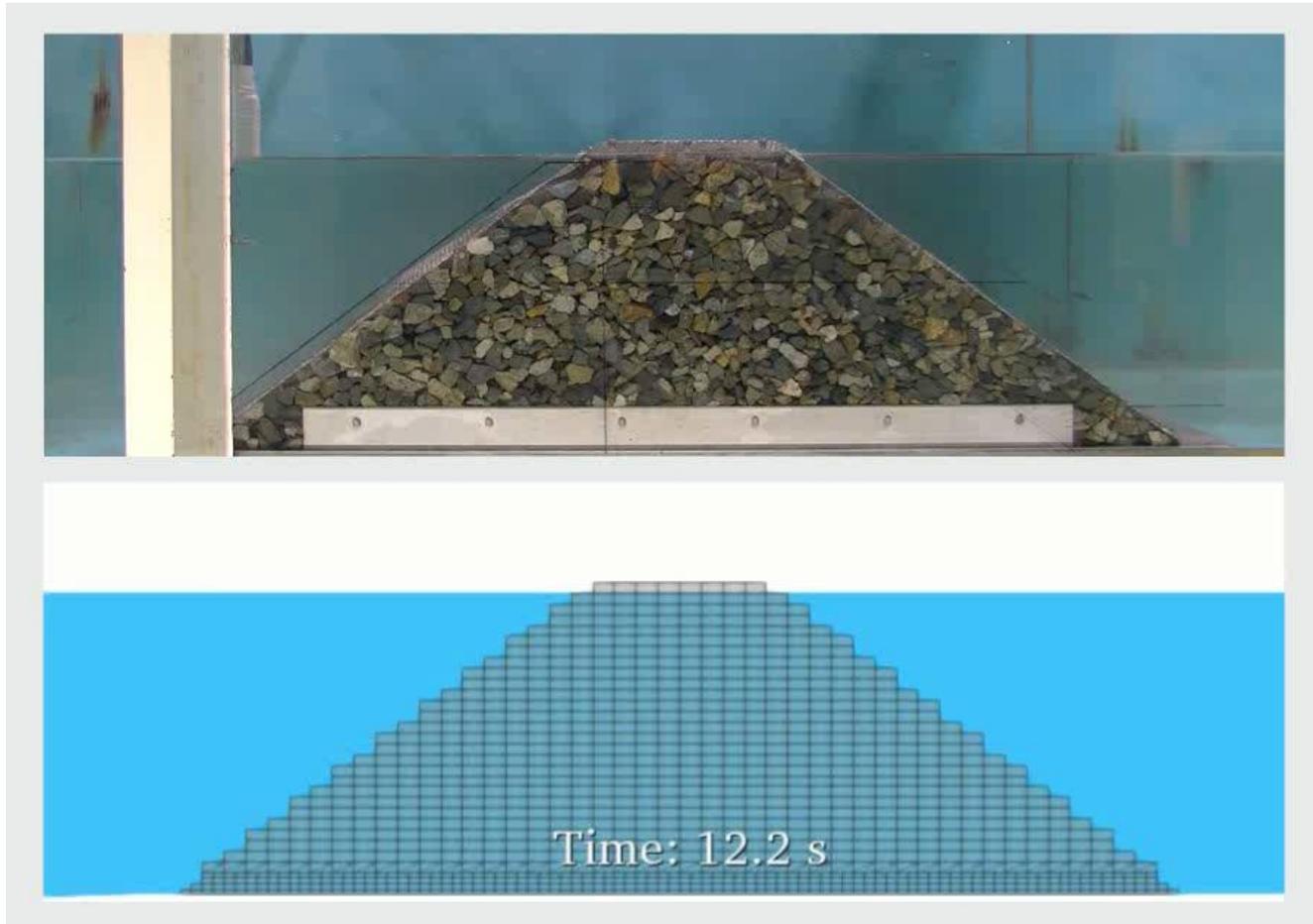
CASE 2_P1



ピーク値が実験より低い
⇒砕波によって再現性が低下

良好に再現できている

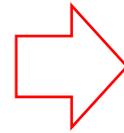
4. 実験と数値計算の比較(動画)



- 越波前の捨石堤沖側の水位低下
- 越波時の碎波の様子
- 捨石堤岸側の水位変動
- 捨石堤内部水位の再現

5. 捨石堤天端直上流速の検討

通過波検定
捨石堤を設置した再現計算



良好な再現性

天端直上流速の評価

天端高さを変えた数値実験

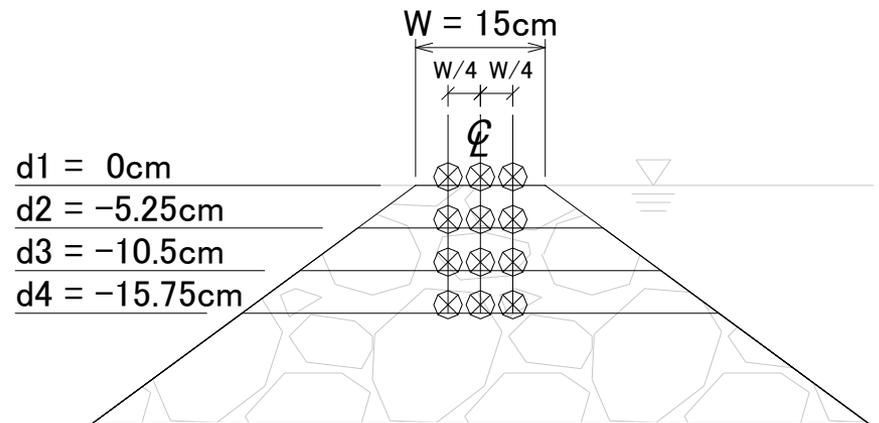
天端高さ4パターン

d1 = 0 cm

d2 = -5.25 cm

d3 = -10.5 cm

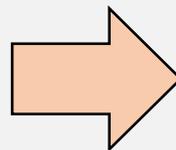
d4 = -15.75 cm



予備実験（不規則波）

$T_{1/3} = 2.0\text{s}, 3.0\text{s}$

$H_{1/3} = 10.0\text{cm}$

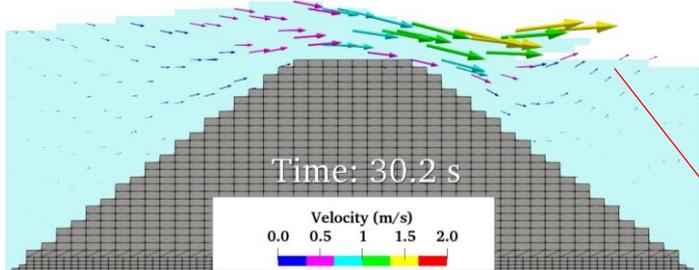


現地換算24時間作用

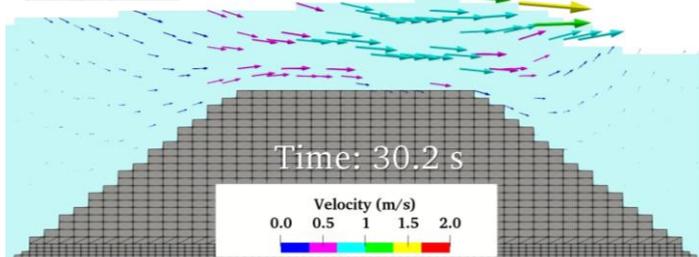
⇒ 最終天端高 d3 相当

5. 捨石堤天端直上流速の検討

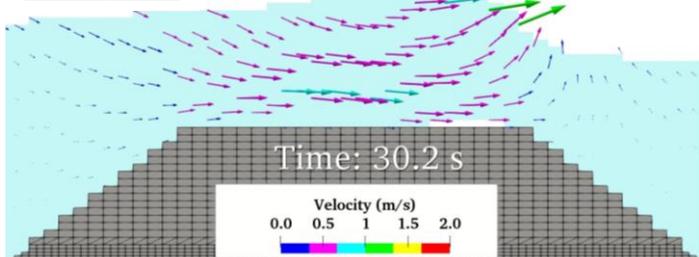
天端高 : d1



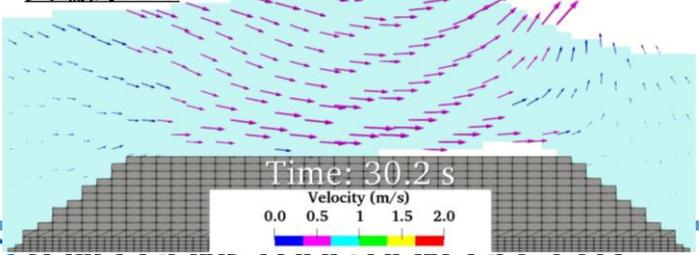
天端高 : d2



天端高 : d3



天端高 : d4

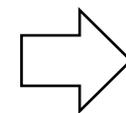


作用波 : CASE2

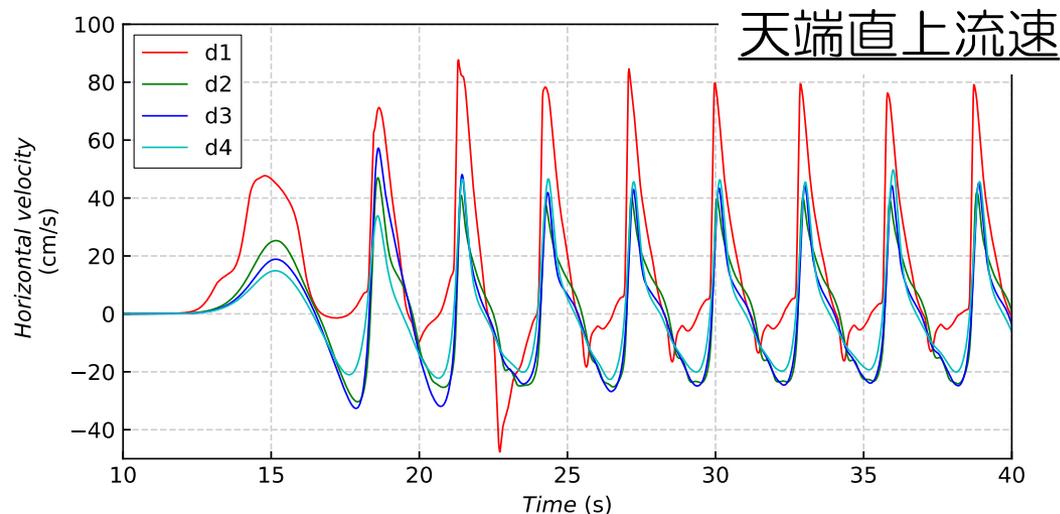
H = 11.0cm

T = 2.92 s

岸側方向への
流速が卓越



天端の石材が
岸側へ



d2~d4で差が小さい

不規則波の検討必要

5. おわりに

- (1) 通過波検定より、実験での造波板の動きをそのまま数値計算で再現することで初期波形から水位変動を良好に再現できることが分かった。また、流速に関しても、水平流速と鉛直流速で良好な再現性が得られた。
- (2) 捨石堤を多孔質体として忠実に再現するには空隙率の設定が重要であることが分かった。本研究における捨石堤の実験条件に対しては空隙率0.2~0.4程度が妥当な値であった。
- (3) 捨石堤の内部水位についても再現ができることが分かった。
- (4) 岸側に捨石堤が変形するのは越波時に岸方向への流速が卓越することが要因と考えられる。しかし、規則波ではある高さより天端高を下げても天端上流速に違いが見られなかった。そのため、被災過程を検討するには不規則波による計算が必要であることが示唆された。

今後は不規則波を対象として、被災過程に応じて捨石堤の形状を考慮した検討を考えている。

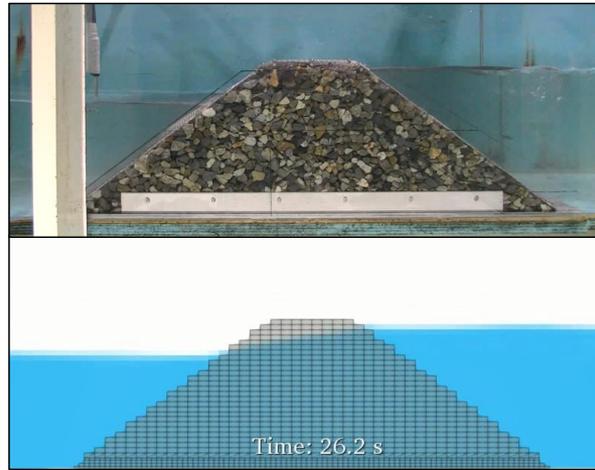
参考文献

1. 酒井大樹, 辻本剛三, 柿木哲哉, 石原莉輝, 金澤剛: OpenFOAMを用いた土砂の流入に伴う静水域に生じる流動・波動に関する検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 74, No. 2, pp. I_205-209, 2018.
2. 川崎浩司, 松野哲弥, 坂谷太基, 有光剛: オイラー表記に基づく自由表面单相流・多相流解析モデルの比較検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_26-30, 2013.
3. 川崎浩司, 松浦翔, 坂谷太基: 3次元数値流体力学ツールOpenFOAMにおける自由表面解析手法の妥当性に関する検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_748-753, 2013.
4. 高橋研也, 前田勇司, 西畑剛, 古牧大樹: 陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_306-310, 2014.
5. ファムバンフック, 長谷部雅伸, 高橋郁夫: VOF法を用いた3次元津波解析に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_71-75, 2012.
6. ファムバンフック, 今津雄吾, 佐川隆之, 長谷部雅伸: VOF法を用いた東北地方太平洋沖地震津波の再現と建物の転倒メカニズムの解明, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_56-60, 2014.

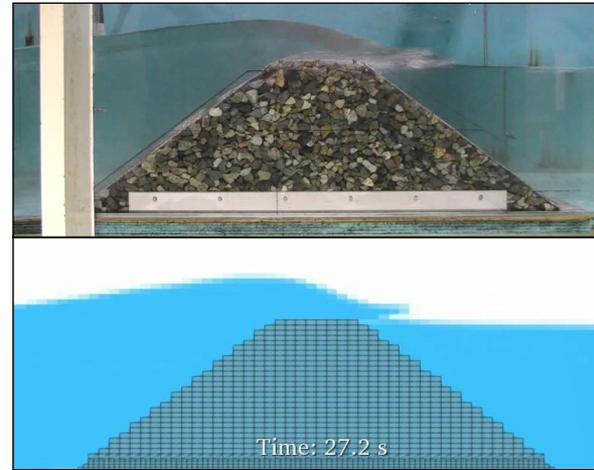
参考文献

7. 松本朗, 真野明, 三井順, 半沢稔: 数値解析に基づく人工リーフ被覆ブロックの安定性の評価手法, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_861-865, 2012.
8. 三井順, 丸山草平, 松本朗, 半沢稔: 防波堤を越流する津波に対する港内側マウンド被覆材の安定性に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_881-885, 2012.
9. 三井順, 松本朗, 半沢稔, 灘岡和夫: 防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_956-960, 2013.
10. 長山昭夫, 犬飼直之, 松島康太, 浅野敏之: OpenFOAMを利用し新潟県上下浜水難事故時の遡上域における流れ場の検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_73-78, 2016.
11. 関口翔也, 高木泰士: 不規則波を考慮した3次元流体解析の木杭消波工設計への応用, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp. I_48-53, 2017.
12. Pablo Higuera, Javier L. Lara, Inigo J. Losada: Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: Formulation and validation, Coastal Engineering, Vol. 83, No. 2, pp.243-258, 2014.

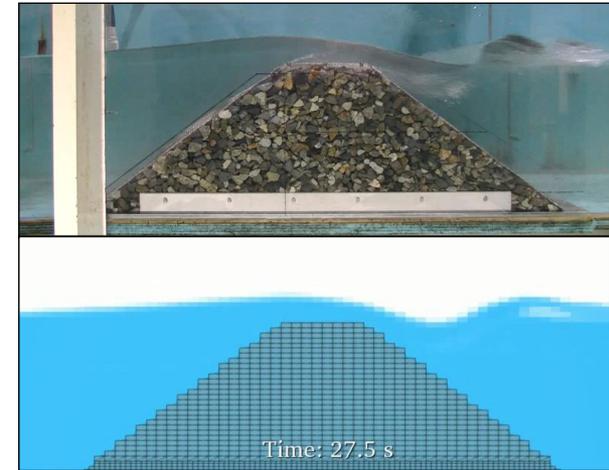
補足. 実験と数値計算の比較(スナップショット)



(a) 越波前



(b) 越波時



(c) 越波後

- 越波前の捨石堤前面の水位低下
- 越波時の砕波の様子
- 捨石堤背後の水位変動
- 捨石堤内部水位の再現