

一般財団法人 港湾空港総合技術センター
研究開発助成（令和6年度実施）成果報告会

係留式越波対策工の 実現に向けた基礎的検討

助成番号：第18－5号

九州大学大学院 ○山城 賢
東亜建設工業株式会社 武田将英

気候変動による海面上昇 → 越波災害増加



パラペットの嵩上げ



消波工



防波柵

一般的な対策のデメリット

- ・高コスト
- ・景観の阻害
- ・地形や空間の制約

係留式越波対策工

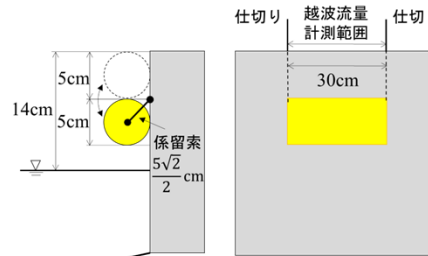
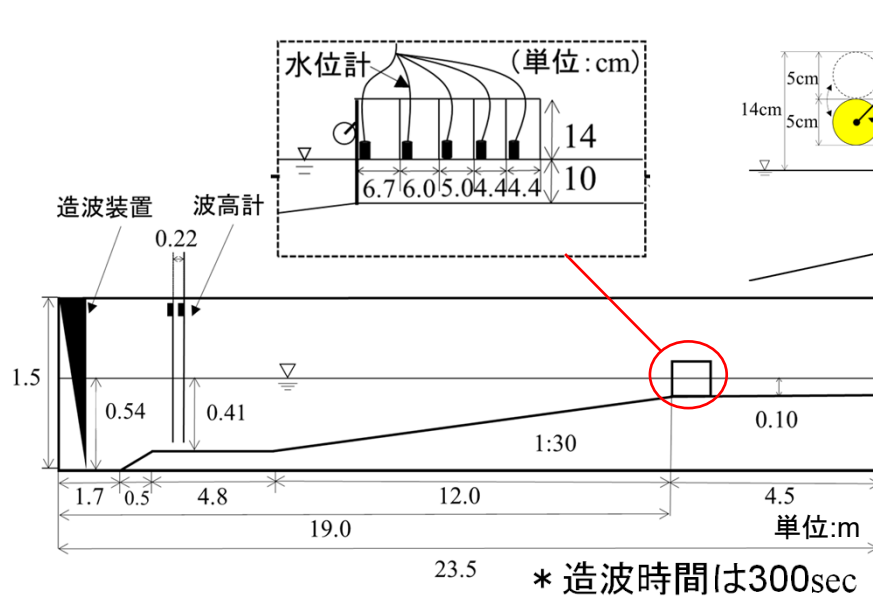
メリット

- 設置，維持管理が容易
- 低コスト
- 陸側からの景色を妨げない

対象と目的

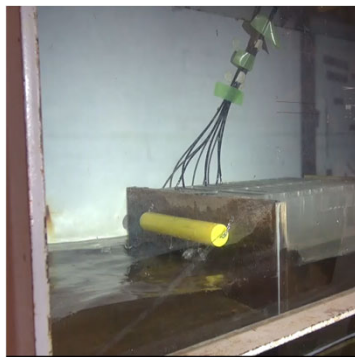
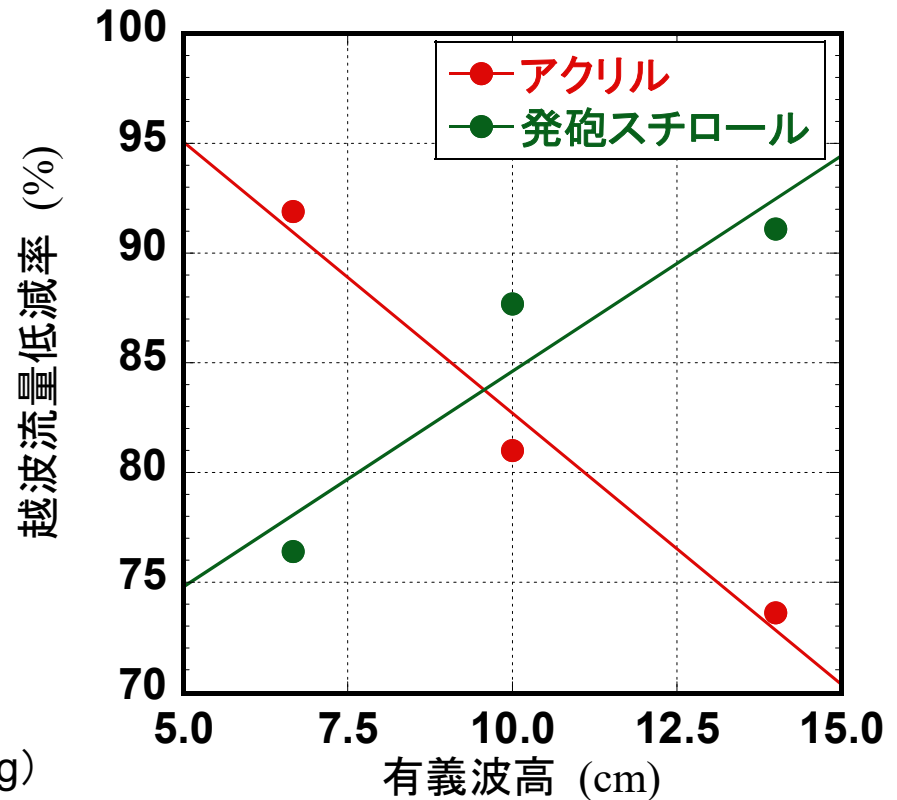
- 小規模な越波
- 許容越波流量内に抑える





波①	$H_{1/3}$	14cm
	$T_{1/3}$	1.58sec
波②	$H_{1/3}$	10cm
	$T_{1/3}$	1.33sec
波③	$H_{1/3}$	6.67cm
	$T_{1/3}$	1.09sec

* 波は不規則波



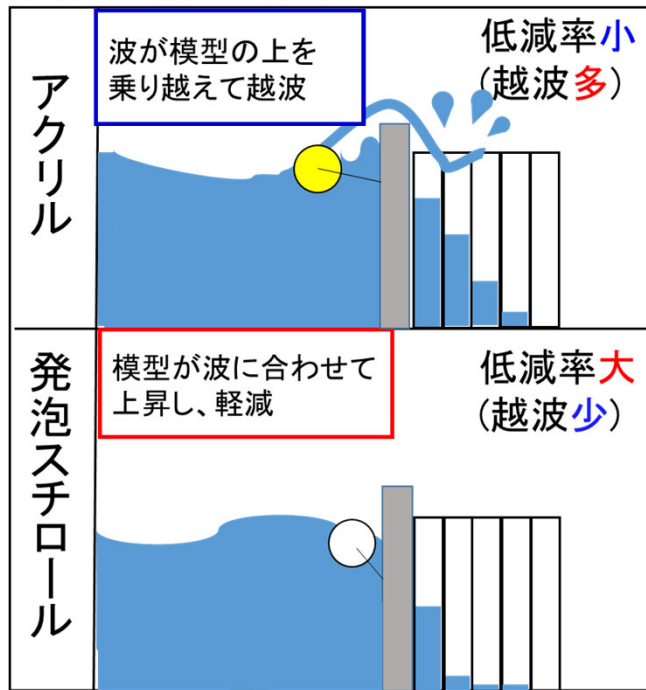
・アクリル(300g)



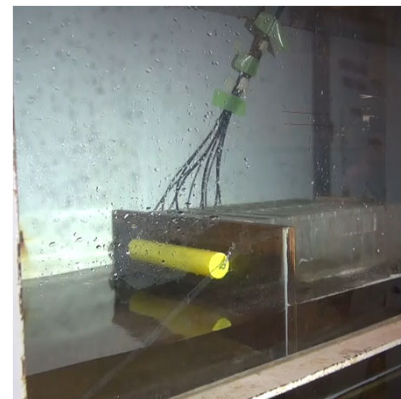
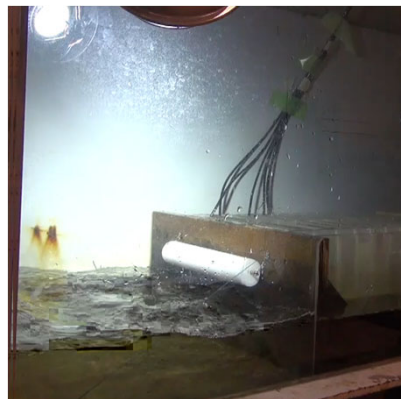
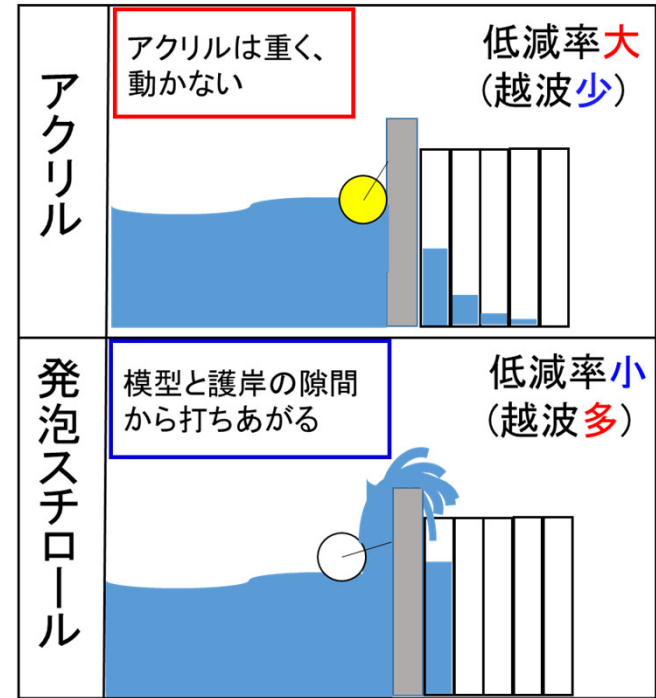
・発砲スチロール(38.74g)

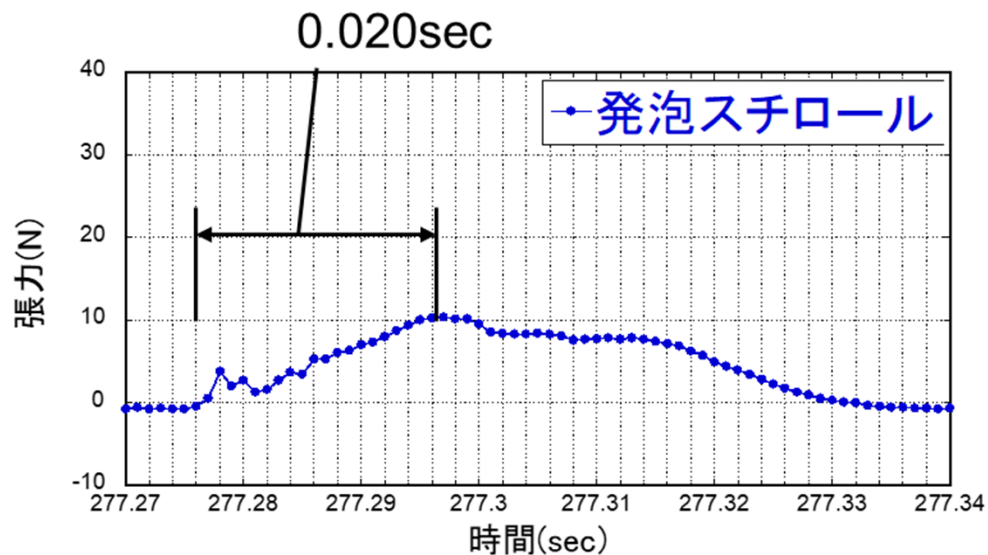
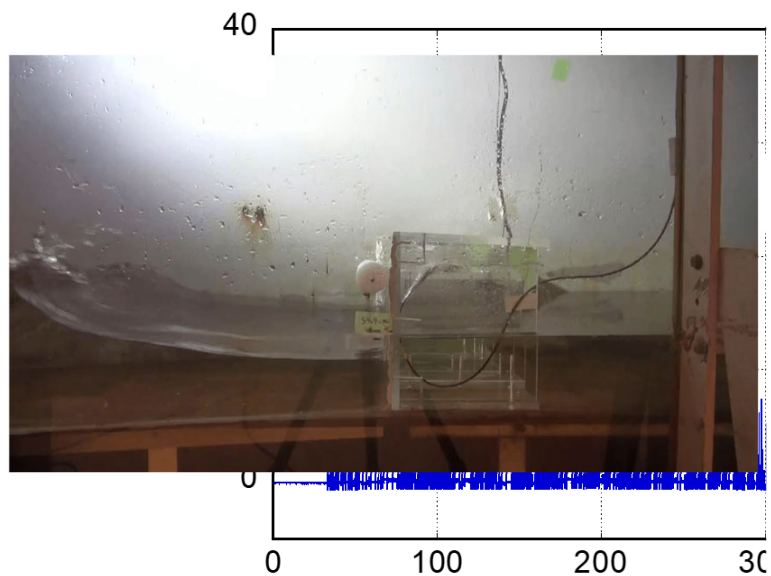
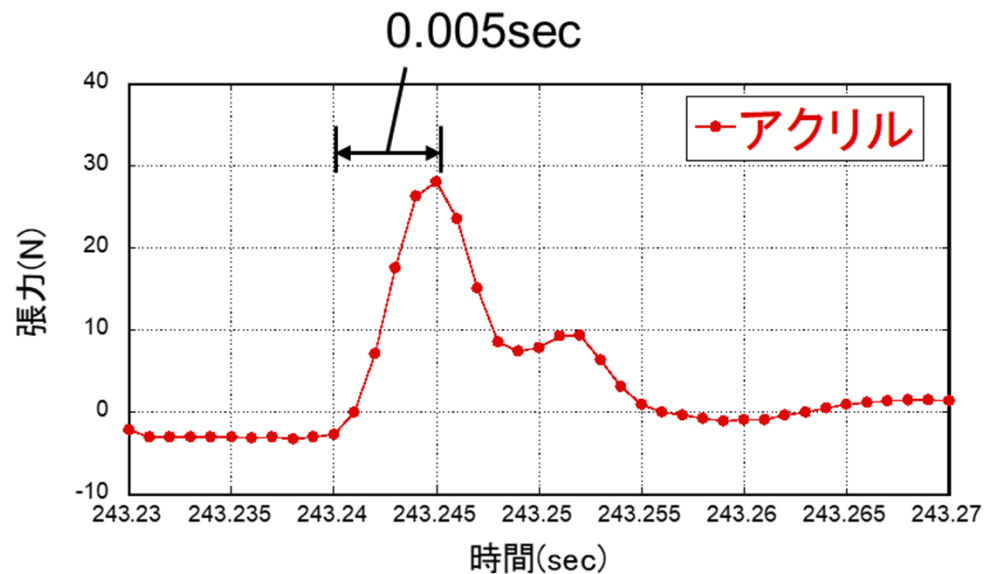
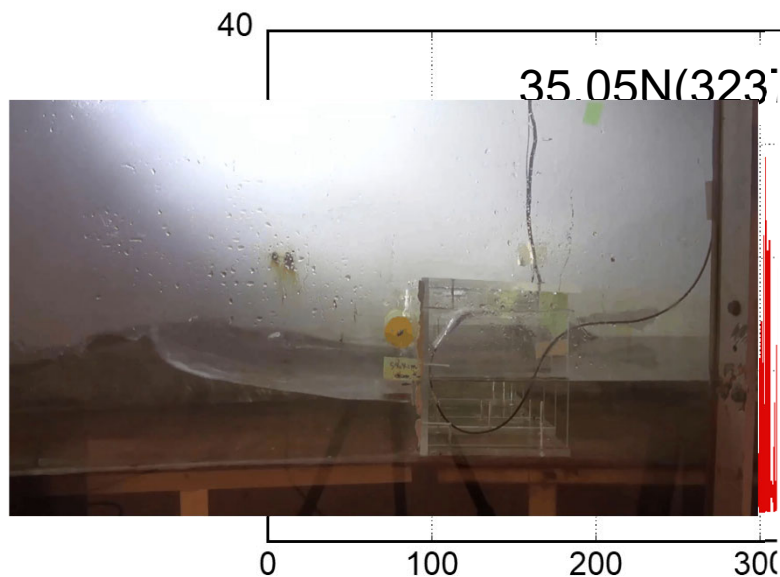
対策工の重さにより低減率が変化

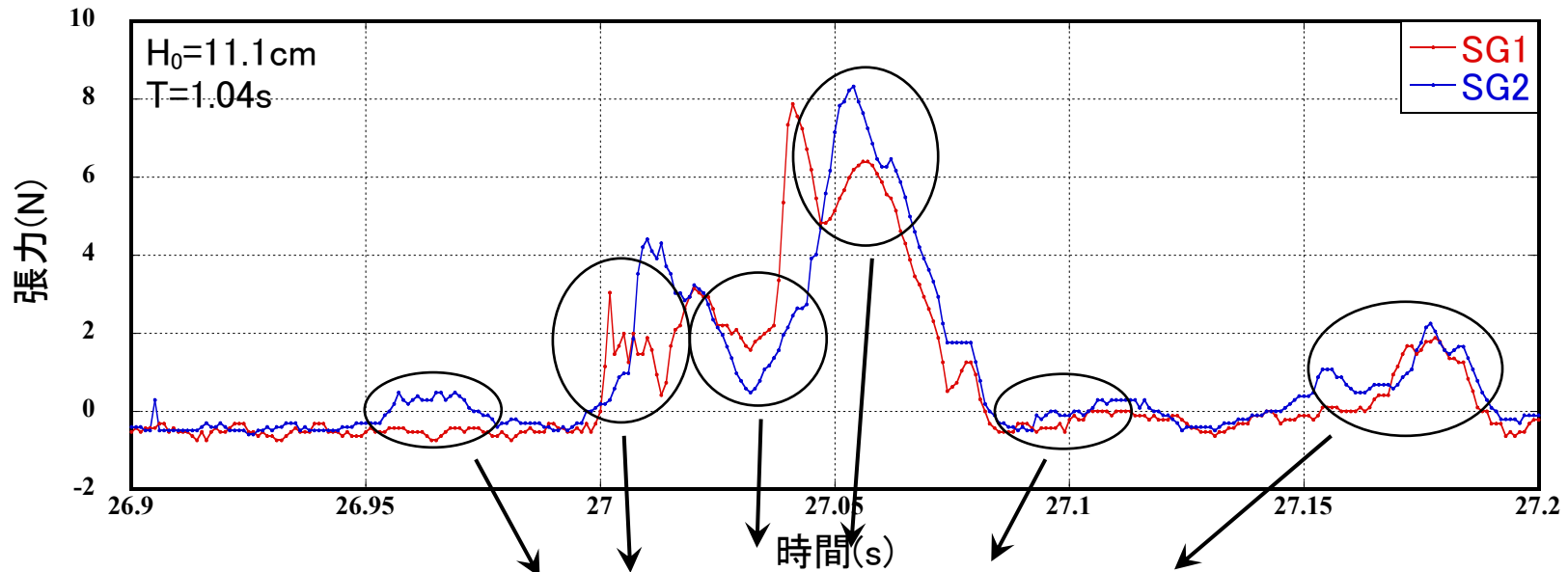
大きい波の場合



小さい波の場合





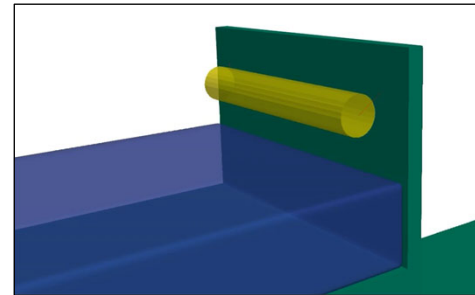
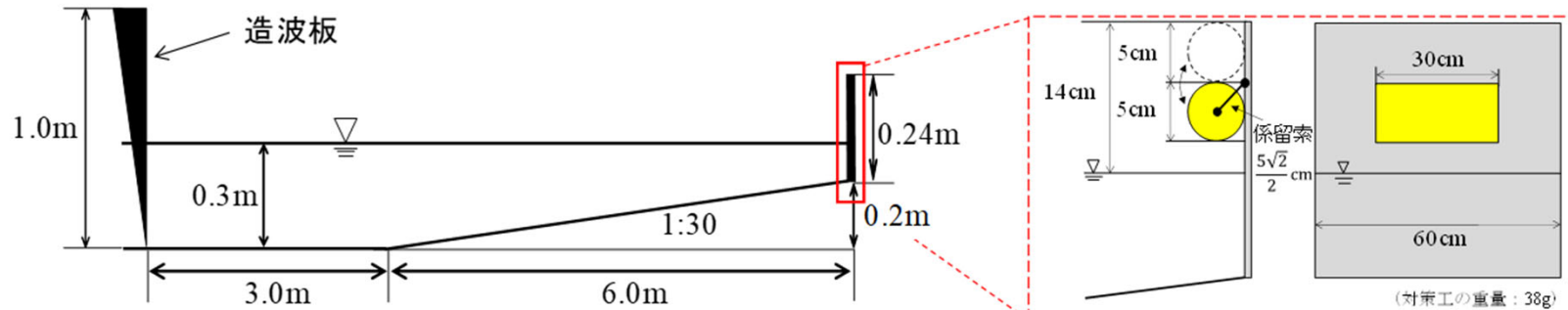


DualSPHysics

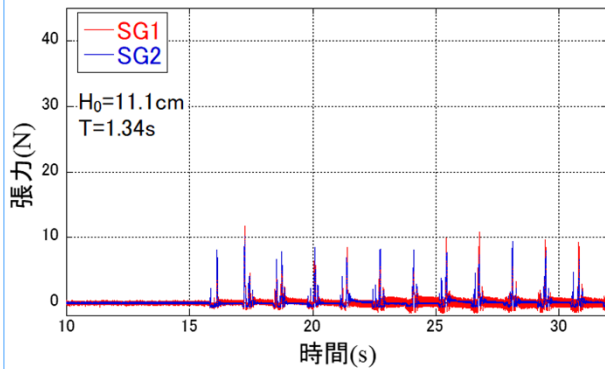
- ・粒子法のSPH法がベース(砕波等の大変形や流体と構造物の相互作用を含む場合でも安定して計算が可能)
- ・GPUを用いた計算により、CPU単体の場合と比較して大幅に計算時間を短縮することが可能



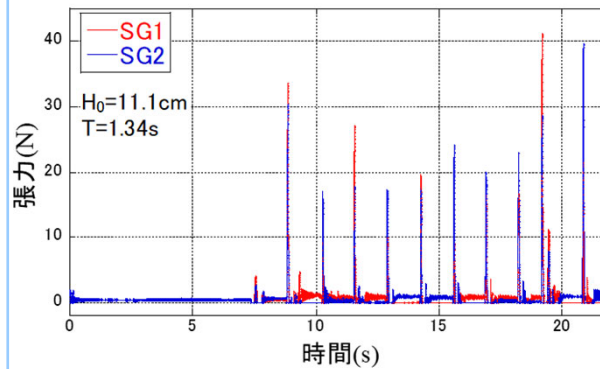
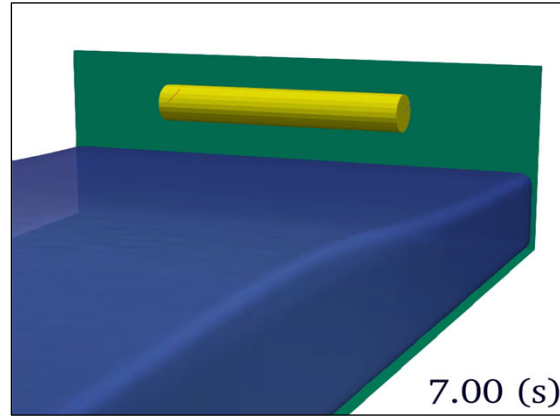
・計算領域(3次元シミュレーション)



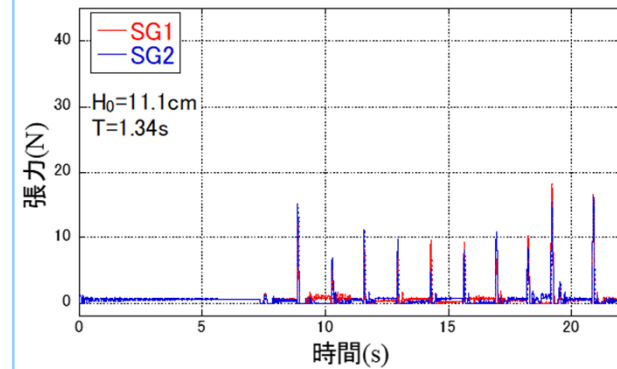
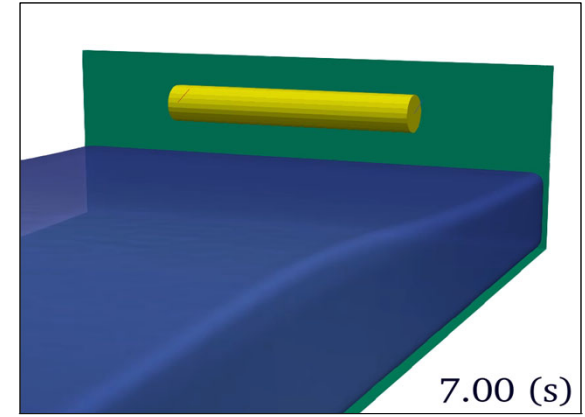
・模型実験



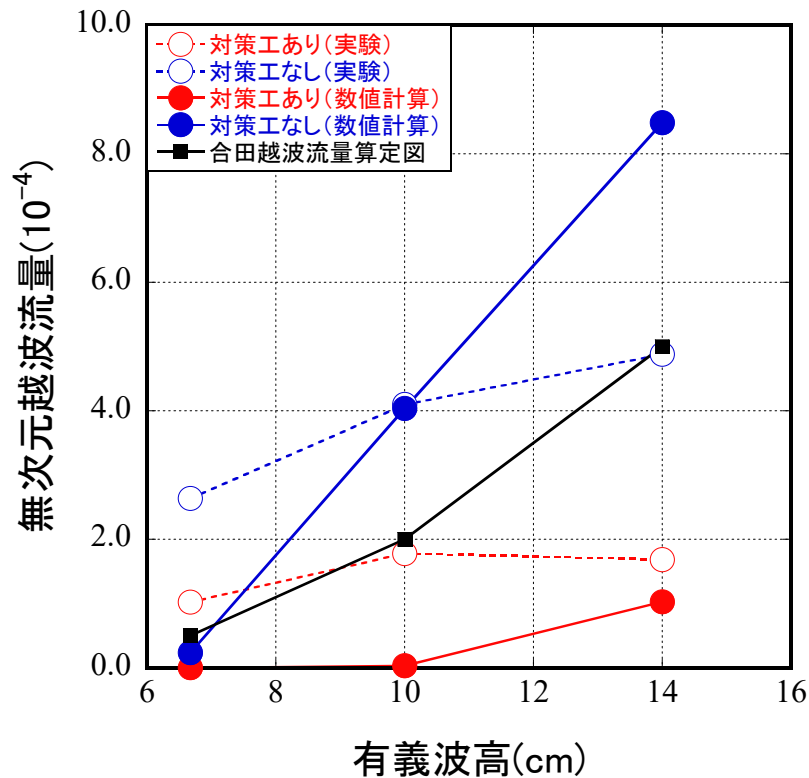
・ヤング率(EA=154)



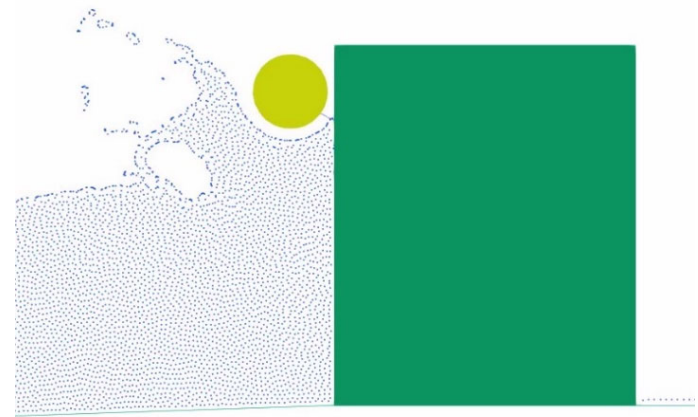
・ばね定数(EA=29.4)



ばね定数を合わせてライン剛性を調整することで再現精度が向上



164.40 (s)



- 境界条件の問題で対策工周辺に粒子が入れない領域があり、その影響で対策工と護岸の間から越波しない
- 波高が大きい条件に着目すれば、ある程度越波流量の評価は可能

係留式越波対策工の実現に向け、越波低減効果
および係留策に作用する張力について基礎資料
を蓄積する。

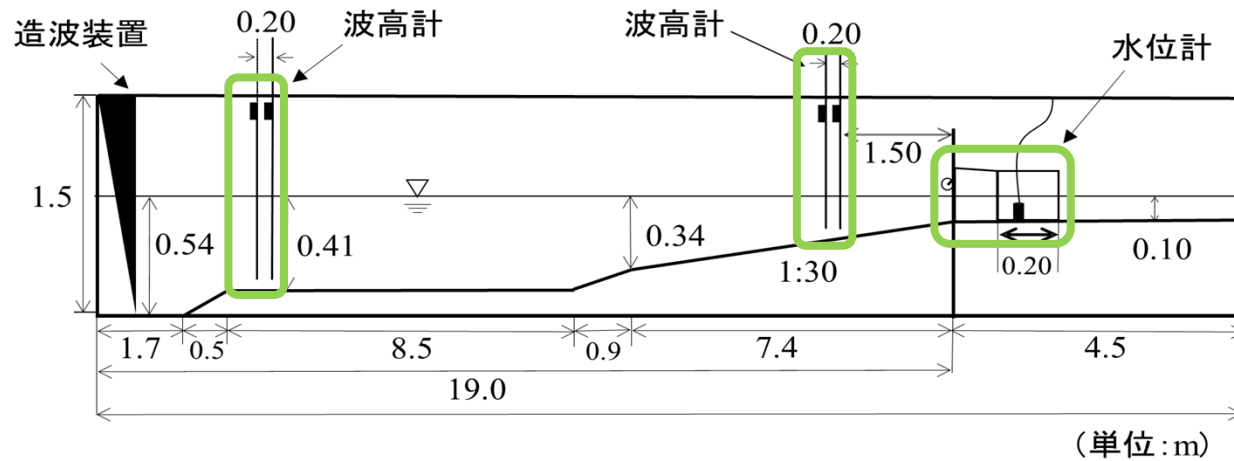
水理模型実験

入射波条件，対策工のたわみ，寸法・設置位置
などの影響を調べる。

数値シミュレーション

係留式越波対策工の基本特性の詳細な評価が可
能な数値シミュレーションモデルを構築する。

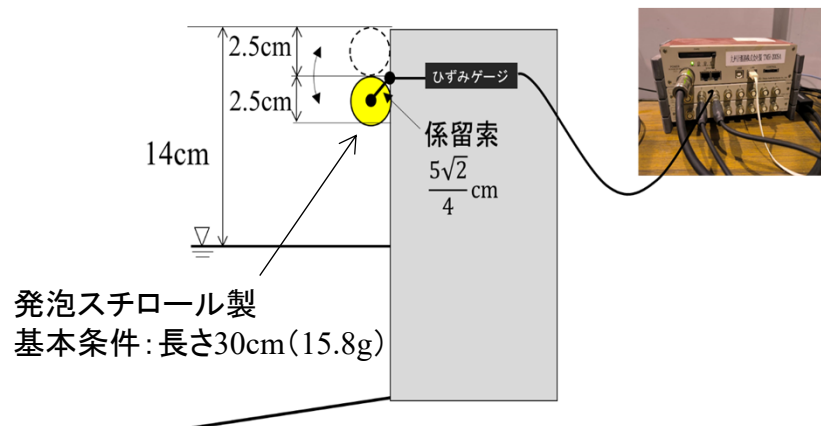
断面二次元造波水路



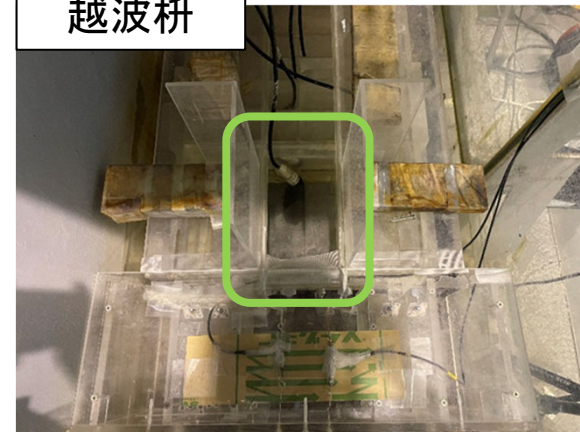
アクリル板(共振の抑制)



模型護岸



越波柵



入射波条件

沖波波高 H_0 : 3.0m, 4.0m, 5.0m
周期 T : 5.0s, 7.0s, 9.0s

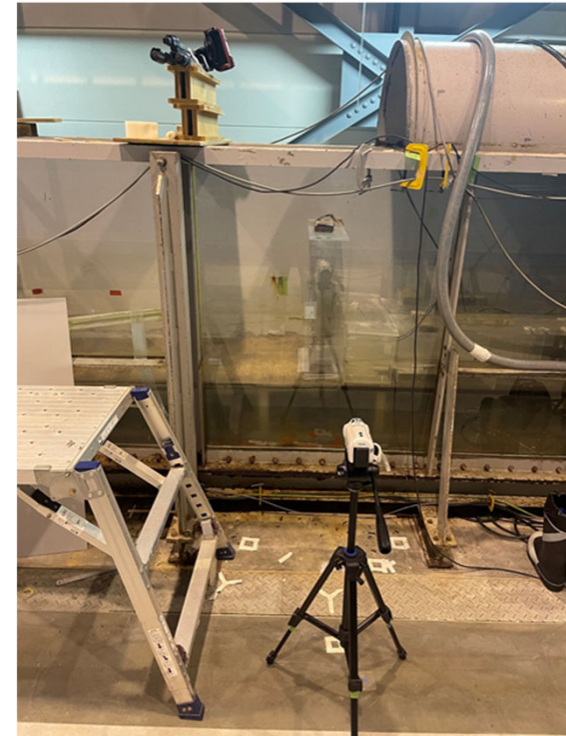
↓ フルードの相似則で変換

	$T(s)$	$H_0(cm)$	$H(cm)$
Case1	0.745	6.67	6.59
Case2	1.04	6.67	6.21
Case3	1.34	6.67	6.11
Case4	0.745	8.89	8.79
Case5	1.04	8.89	8.28
Case6	1.34	8.89	8.16
Case7	0.745	11.1	10.98
Case8	1.04	11.1	10.36
Case9	1.34	11.1	10.22

T : 周期

H_0 : 沖波波高

H : 造波装置前での浅水変形を考慮した波高



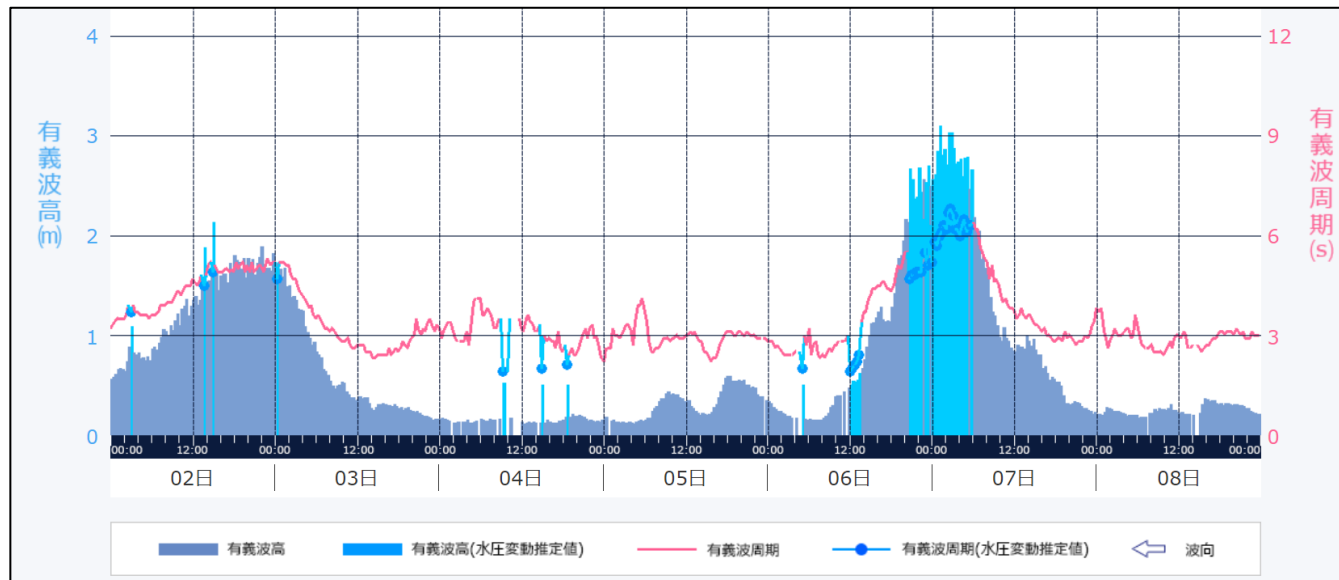
実験の様子をビデオカメラで撮影

各ケース5回ずつ計測を実施

入射波条件の設定

14

台風10号が襲来した2020年9月7日とその前後の苅田港の波浪観測データ
(ナウファス参照)

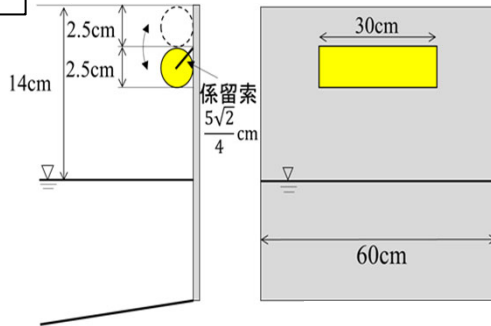


既往研究と瀬戸内海の波浪観測データから、
波高・周期が異なる3種類の条件を決定

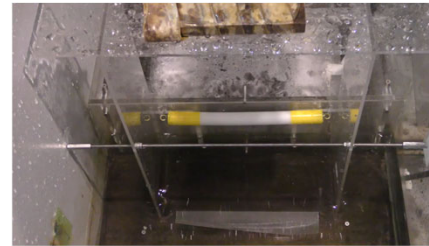
沖波波高: 3.0m, 4.0m, 5.0m
周期: 5.0s, 7.0s, 9.0s

※現地スケール

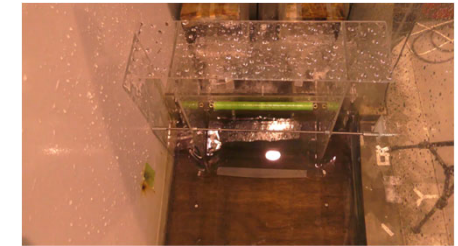
実験概要



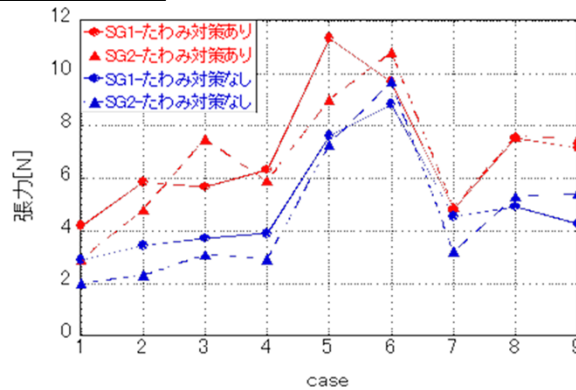
たわみ対策なし
15.8[g]



たわみ対策あり
16.2[g]



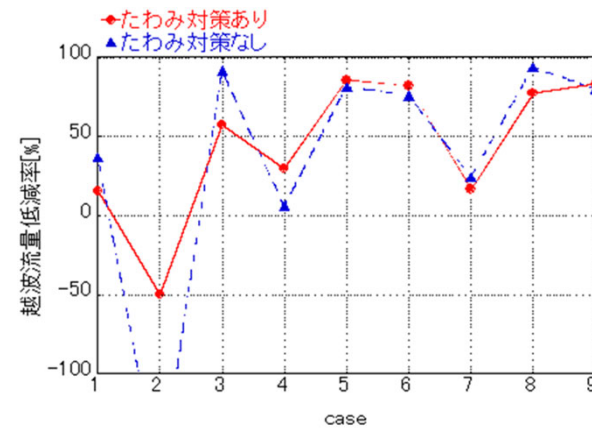
実験結果



最大張力の比較

- 全てのケースにおいて、たわみ対策により張力が増加

→ 係留索に作用する張力を抑制する効果



越波低減効果の比較

- たわみの有無によらず同等の越波低減効果

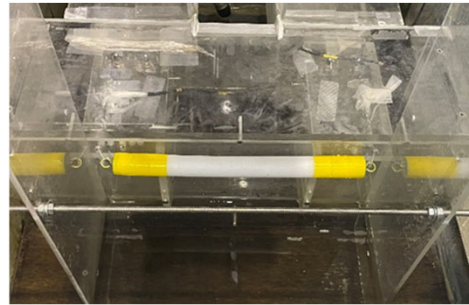
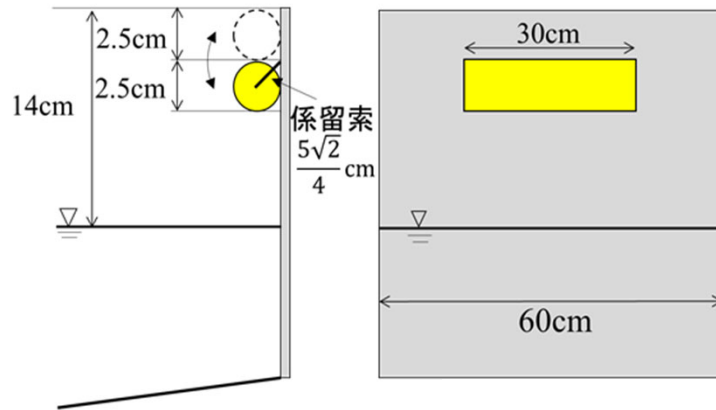
係留索の長さの影響

16

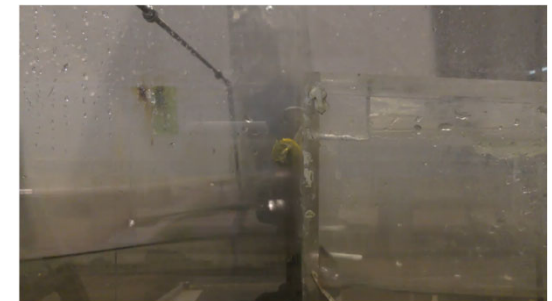
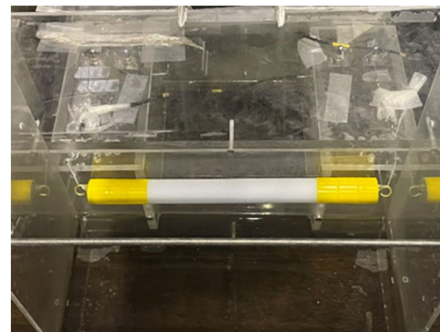
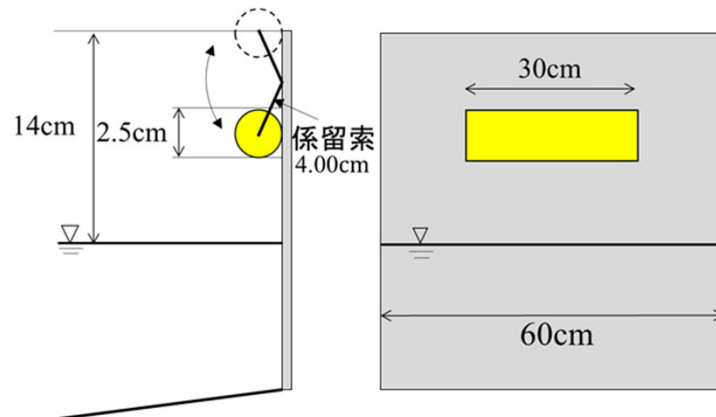
実験概要

(対策工模型: 長さ30cm, 直径2.5cm, 重さ15.8g)

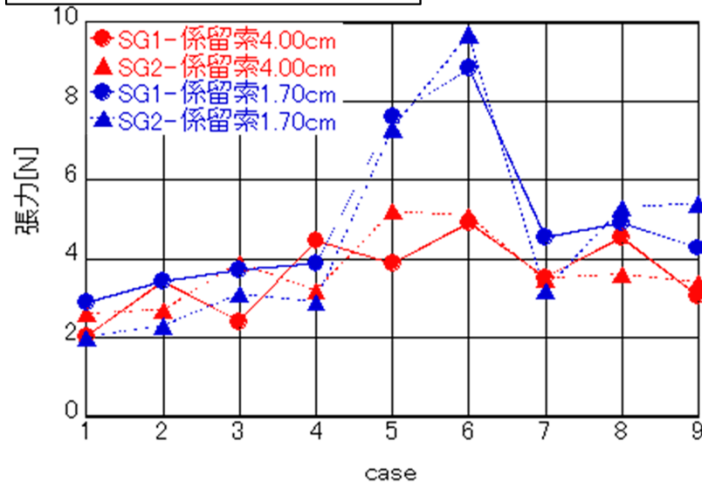
係留索が短い場合: 1.70cm



係留索が長い場合: 4.00cm



最大張力の比較

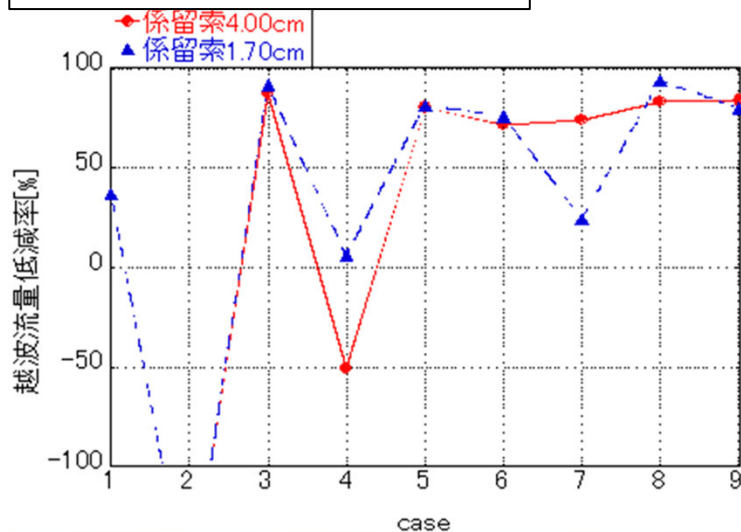


- 係留索が短い場合の, case5, 6のみで大きな張力が作用

来襲する波の条件により, 波力が増加
可動域が小さいため, 波力の作用時間が長い

→ 突発的な大きな張力を防げる効果

越波低減効果の比較



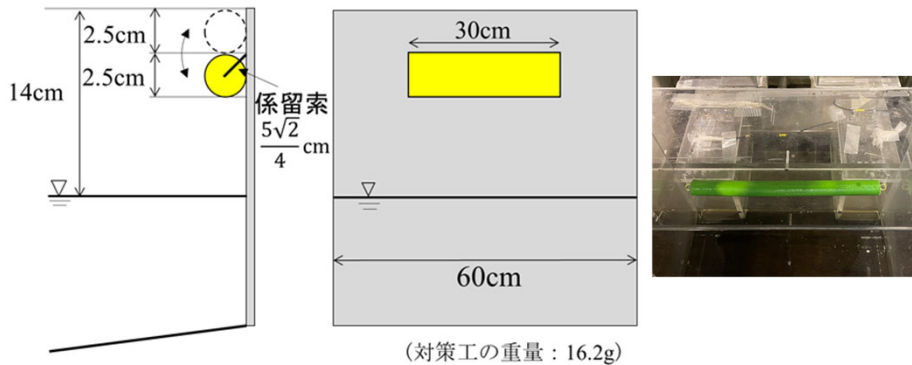
- 係留索の長短によらず同等の越波低減効果
- case1,2,4では対策工ありの方が越波量が多い場合がある

→ 越波量が非常に少なく, 実験結果の変動性の影響が大きい

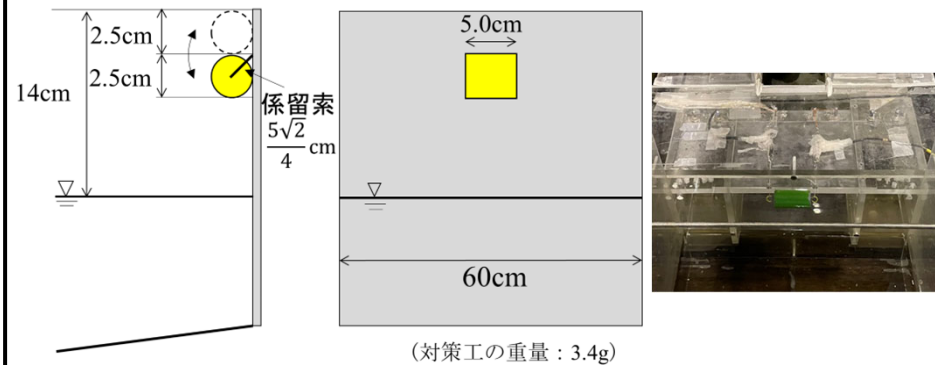
寸法・設置位置の影響

4つの条件での比較

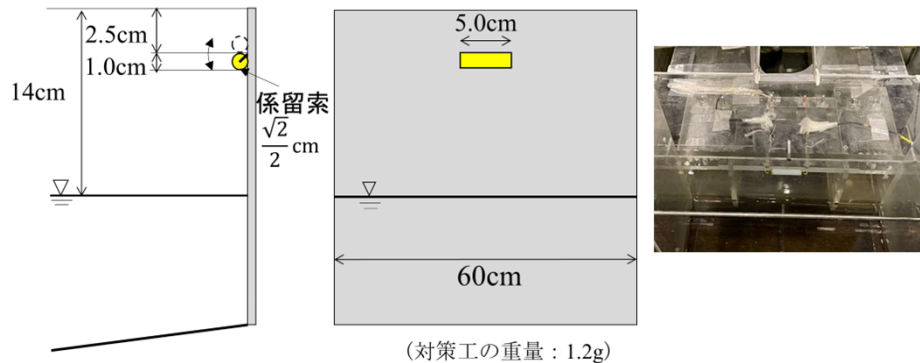
①直径2.5cm, 長さ30cm, 設置高2.5cm



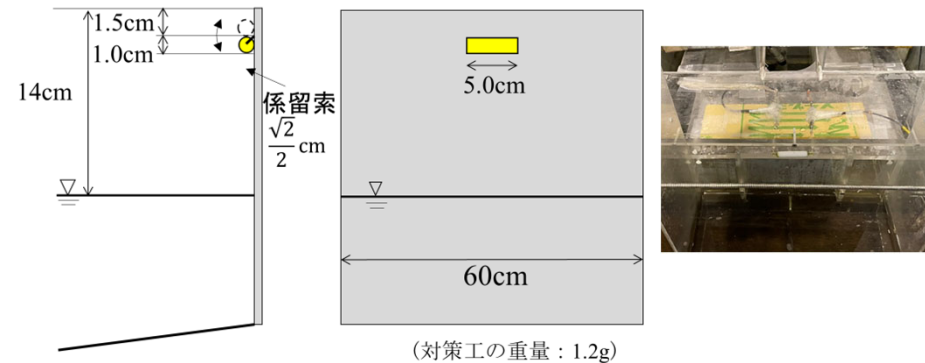
②直径2.5cm, 長さ5.0cm, 設置高2.5cm



③直径1.0cm, 長さ5.0cm, 設置高2.5cm



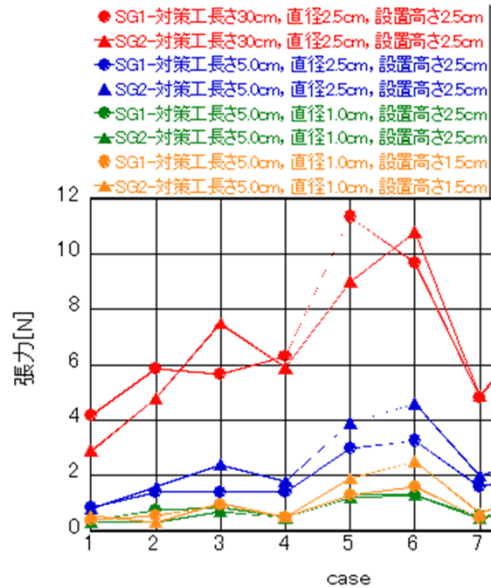
④直径1.0cm, 長さ5.0cm, 設置高1.5cm



寸法・設置位置の影響

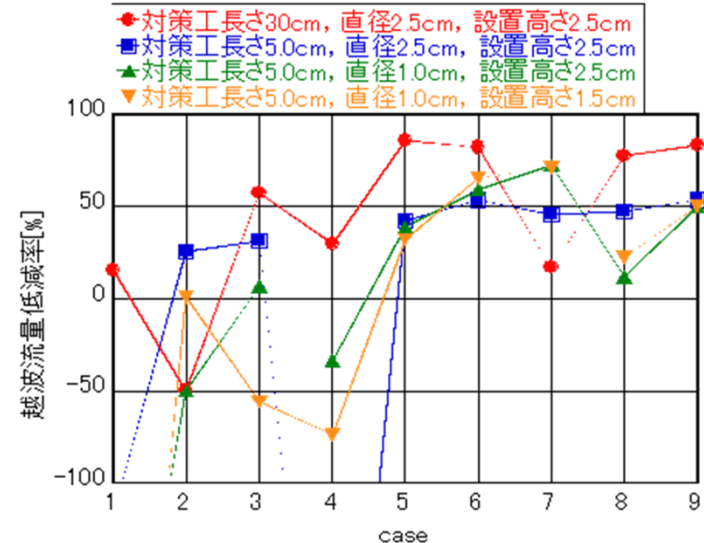
対策工の寸法 大(赤 ← 青 ← 緑, 黄)小

最大張力の比較



- 波が作用する投影面積が小さくなることで、作用する張力も減少する
- 全ての条件でcase5,6の張力が大きい傾向がみられた

越波低減効果の比較



- 全ての条件で越波低減効果が認められた
- 対策工の寸法が大きいほど高い越波低減効果を示した
- 越波量が非常に少ないケースでは実験結果の変動性の影響が大きい

直立護岸の波の打上げの状況から最大張力を推定する

抗力 $D = C_D \frac{\rho}{2} U^2 A$ を求め、**浮力**、**重力**、係留索の**角度**を考慮して推定する

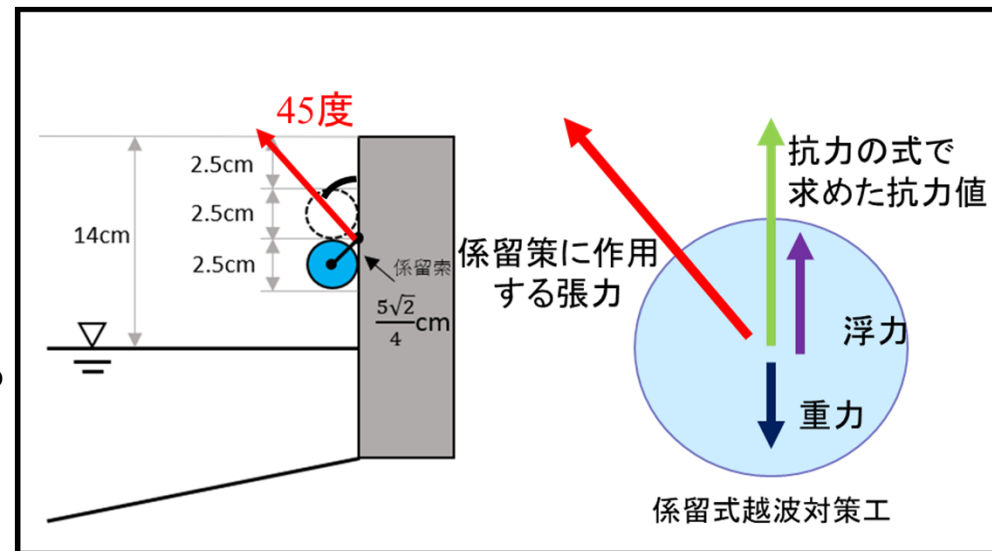
C_D : 抵抗係数

ρ : 流体の密度 (kg/m³)

U : 流体と物体の相対速度 (m/s)

A : 基準面積 (m²)

- 1, 対策工の条件から C_D, A を求める
- 2, 直立護岸での打上げから **水位上昇速度 U** を求める
- 3, 対策工が静止した状態で力が作用していると仮定し、係留索に作用する **抗力 D** を求める



対策工に作用する力の概略図

張力推定式の提案

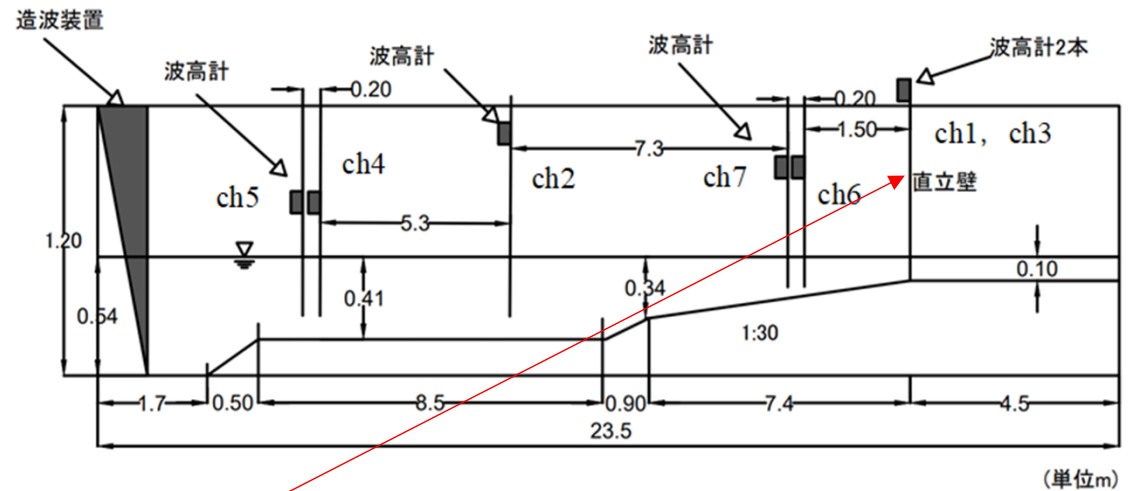
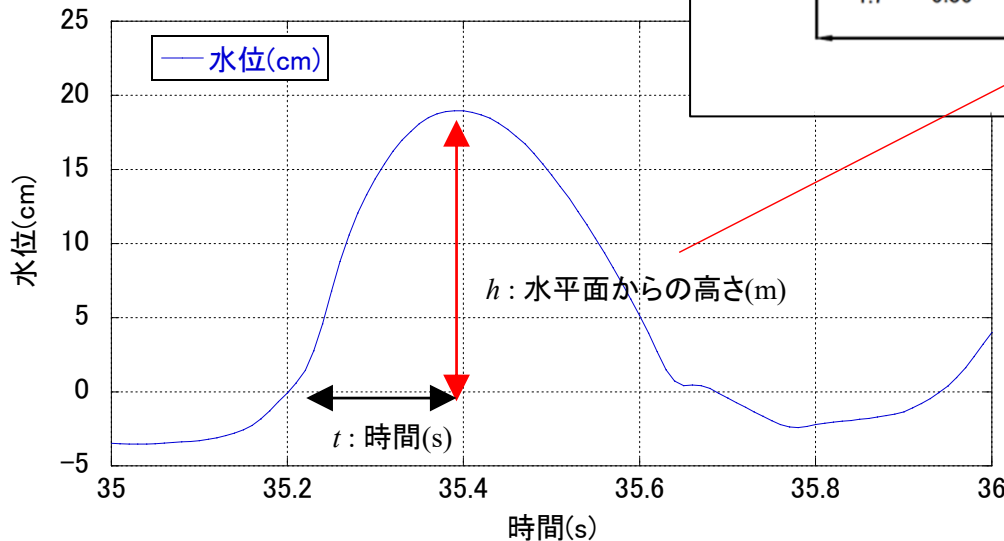
21

浮力, 重力, 係留索の角

$$v = \frac{h}{t} \quad (\text{m/s})$$

h: 水平面
t: 時間(s)

Case1



浮力

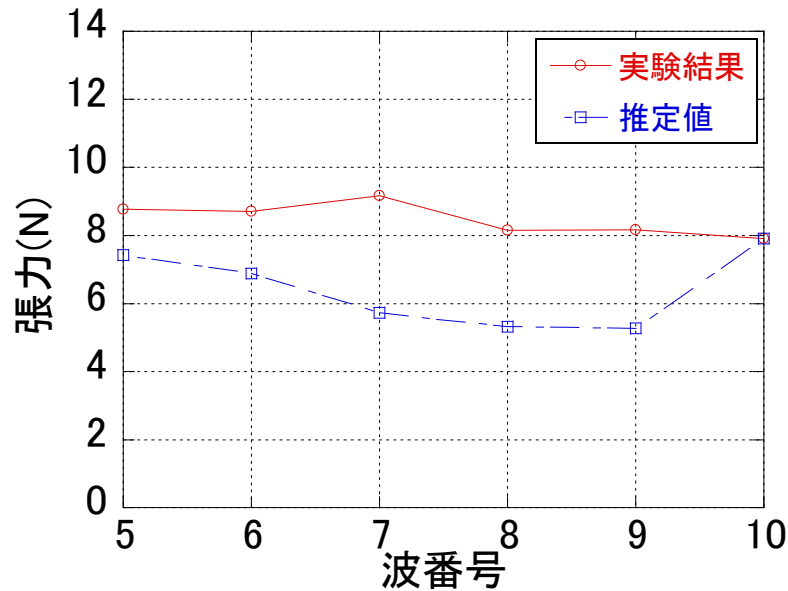
最大張力発生時に対策工の
下半分が水中に沈むと仮定

重力・角度

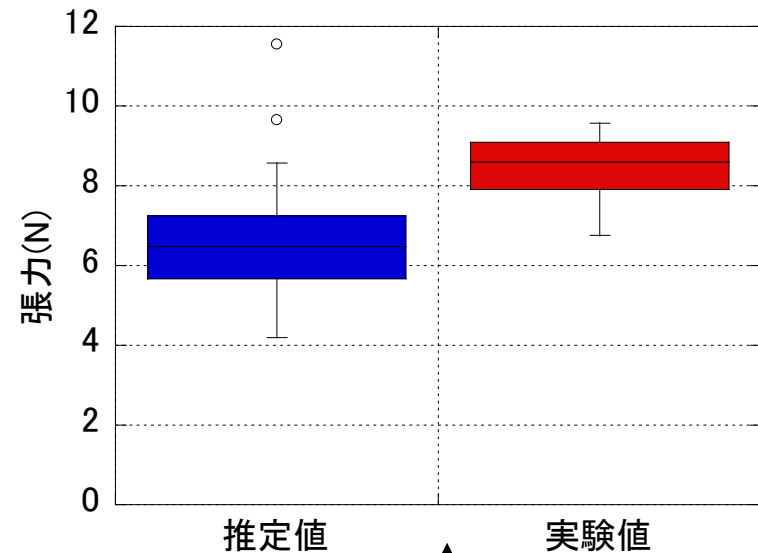
対策工の寸法と実験の状況から
定める

$$\text{推定張力} = \frac{(\text{抗力} + \text{浮力} - \text{重力})}{\cos \frac{\pi}{4}}$$

推定値と実験値の比較 (Case3)



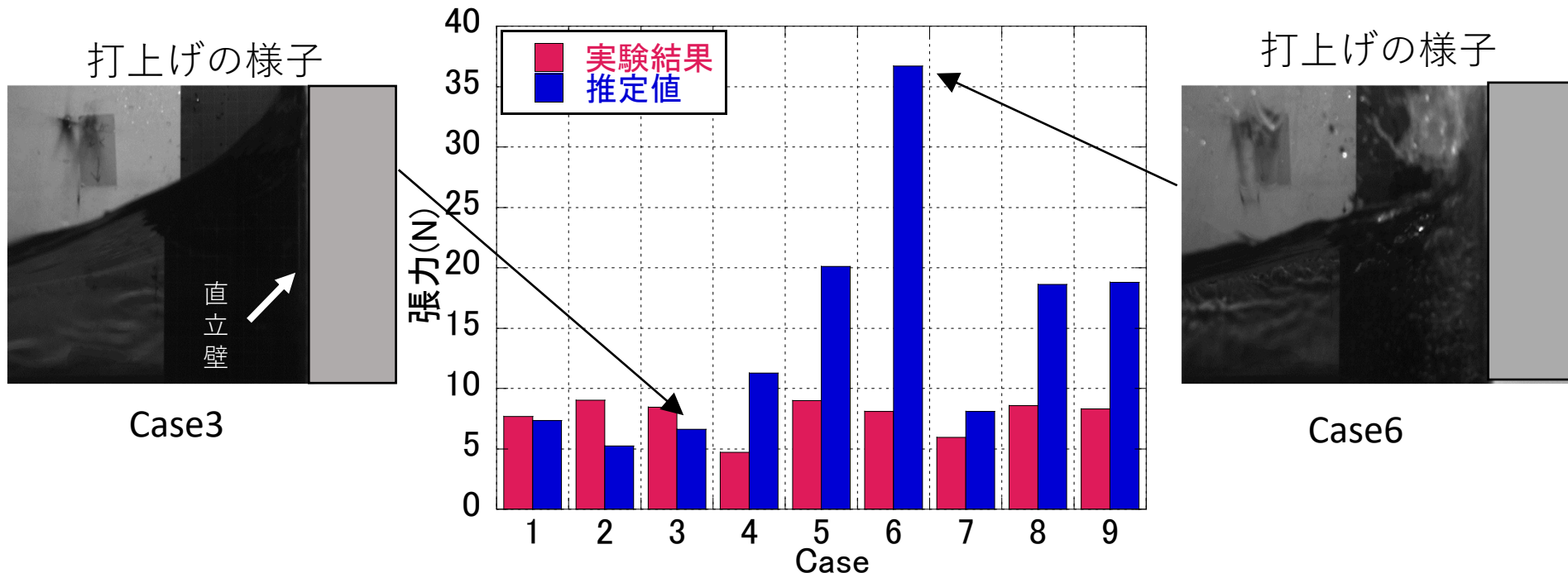
入射波がほぼ定常となった
第5波から10波で比較



Case3で5回行った実験の
第5波から10波で比較

推定値は概ね実験値を表せている

全ケースにおける推定値と実験値の比較



Case6など、直立壁で計測している波高計に飛沫が付着したため流速が過大評価され、張力の推定値も過大となった。

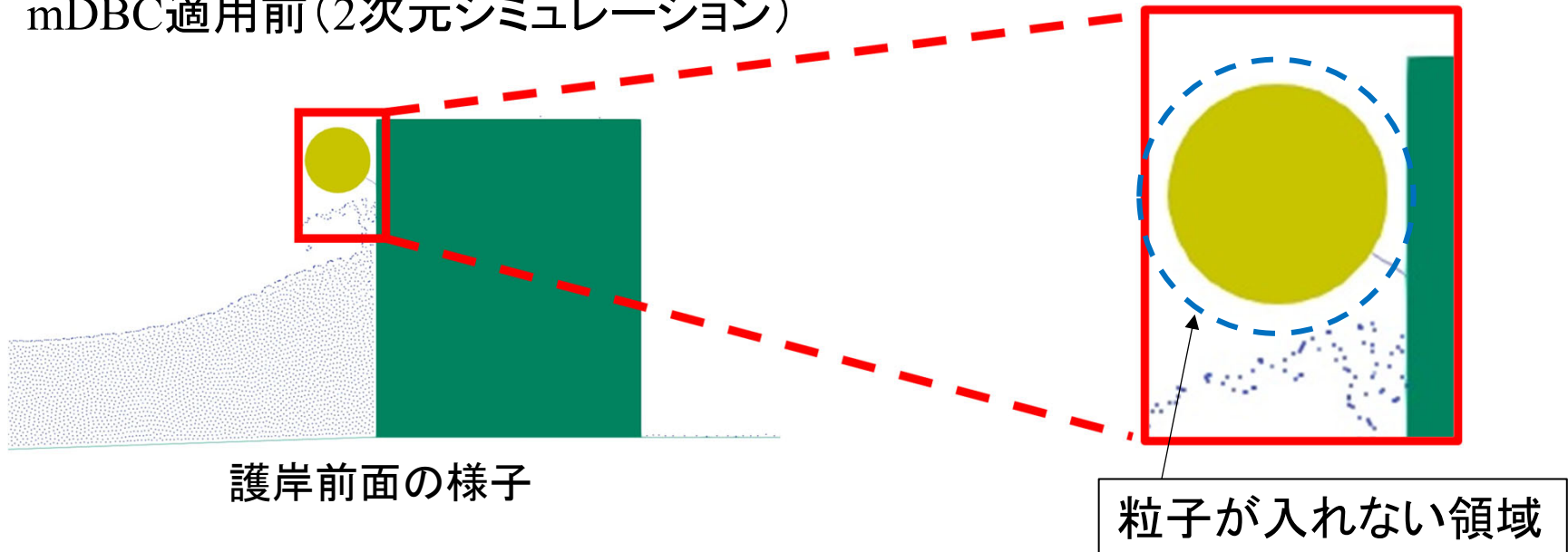
流速を適切に与えることで
推定式により妥当な張力を推定可能

修正動的境界条件(modified Dynamic Boundary Condition)

mDBCとは...

DualSPHysics にデフォルトで設定された境界条件である動的境界条件(DBC)を修正し、境界内により滑らかで現実的な圧力および密度場を形成する境界条件

mDBC適用前(2次元シミュレーション)

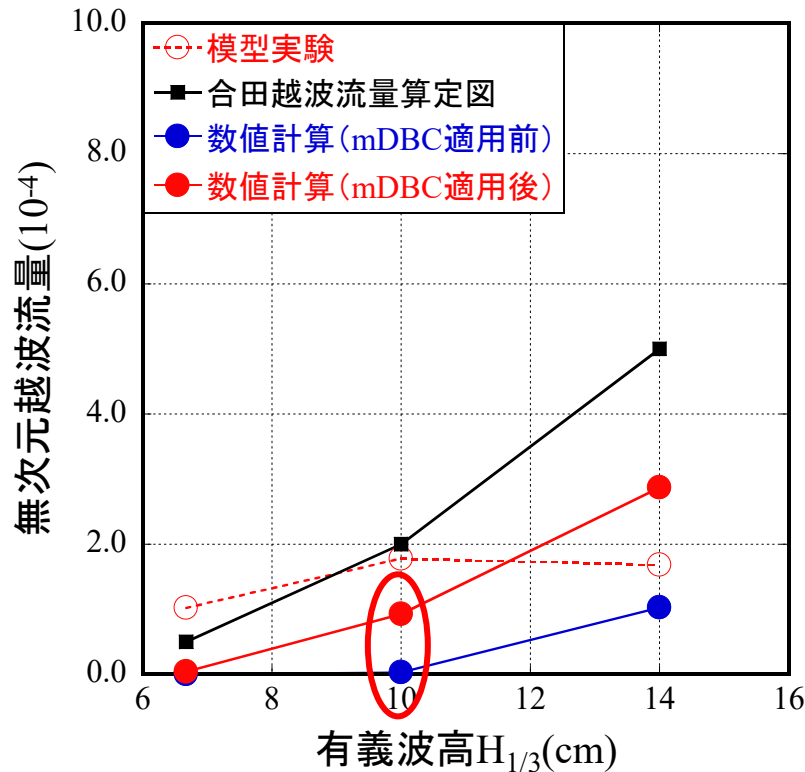


Case1

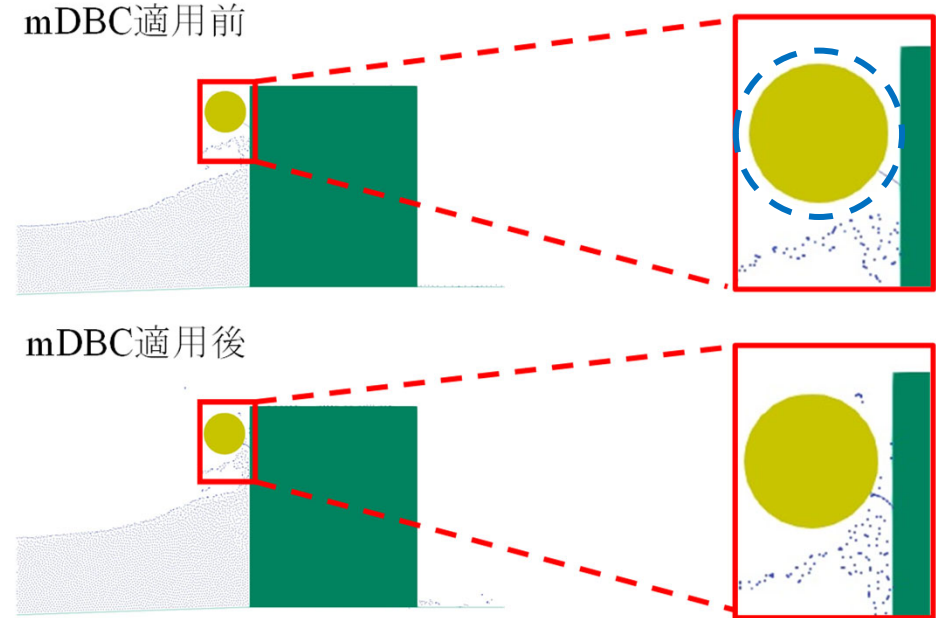
越波流量の計算精度の検証

26

有義波高と無次元越波流量の関係



護岸前面の様子

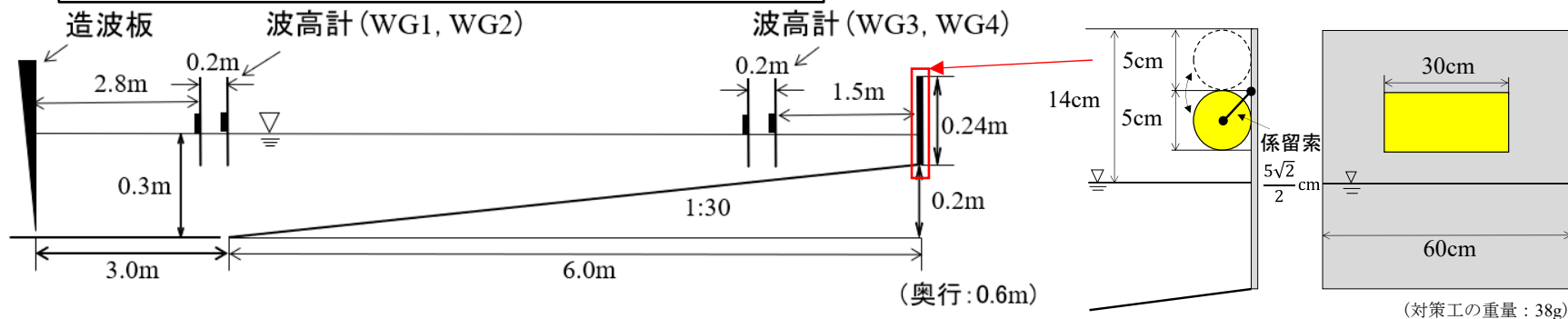


- mDBCをfloatings(対策工)に適用することで
粒子が入れない状況が改善した
- 有義波高10cmのケースで
越波流量が適切に評価されるようになった

張力の計算精度の検証

27

計算領域(3次元シミュレーション)



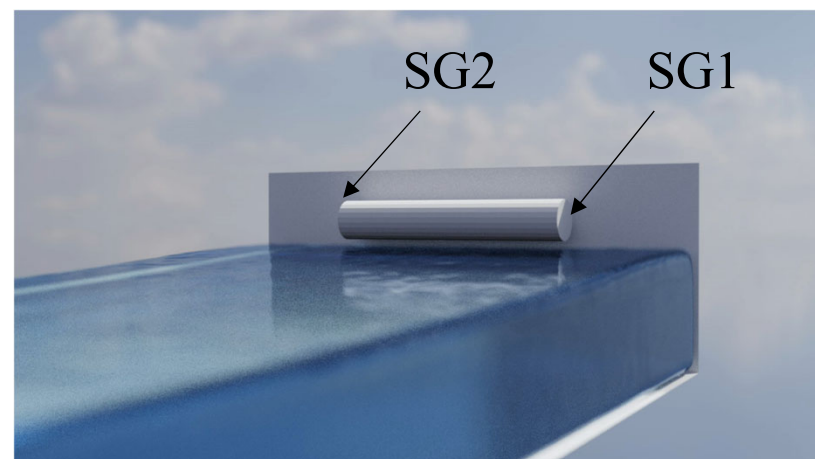
・計算条件

粒子間距離 d_p	5 mm
入射波(規則波)	$H_0=8.89\text{cm}$, $T=1.34\text{s}$
シミュレート時間	22 s

係留索に関するパラメータ(釣り糸を参考)

ライン剛性 EA (N)	29.4
直径(m)	3.30×10^{-4}
1m 当たりの質量(kg/m)	9.75×10^{-5}
減衰比	0.8

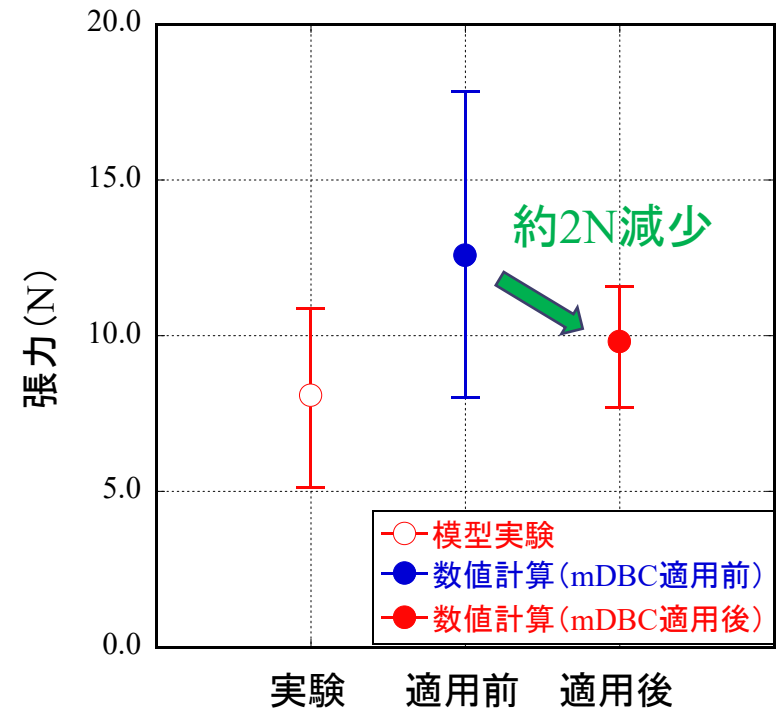
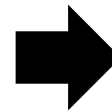
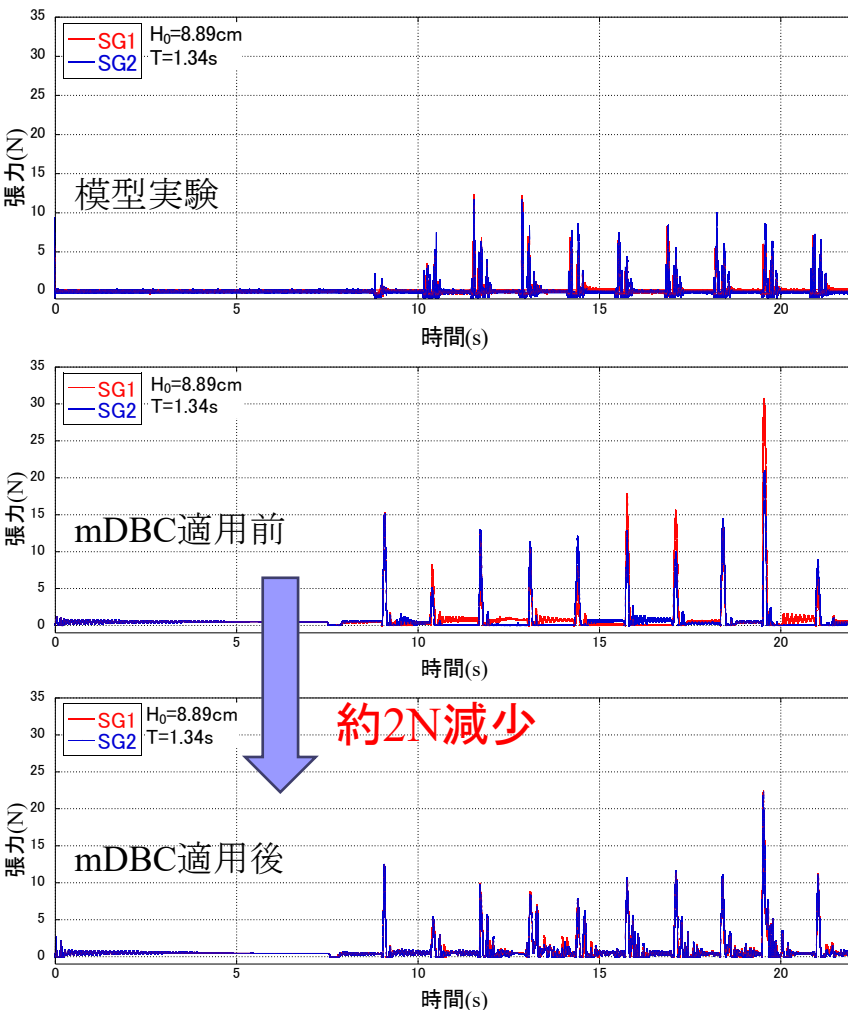
対策工に波が作用する様子



張力の計算精度の検証

28

張力の時系列データ



mDBCの適用により...

空白の領域が生じる問題が改善
越波流量, 張力の再現精度が向上

- 対策工のたわみにより，係留索に作用する張力が低減する.
- 係留索を長くすることで，突発的な大きな張力を防げる.
- 対策工の寸法と設置位置により，越波低減効果および係留索に作用する張力が大幅に変化する.
- 係留索に作用する最大張力を波の打上げ速度から推定する簡易推定式を提案し，ある程度推定できることを示した.
- 数値シミュレーションモデルについては，流体と護岸壁面および対策工との境界処理に修正動的境界条件 (mDBC) を適用することで越波や作用張力の再現精度が向上した.