

危険物屋外貯蔵タンクの津波による 滑動対策工法に関する水理的検討

五洋建設(株) 高橋研也・池野勝哉・
宇野州彦・西畑 剛
東電設計(株) 藤井直樹・保延宏行
(株)エスイー 竹家宏治

目次

1. はじめに
 - (1) 研究の背景
 - (2) 研究の目的
2. 水理模型実験
 - (1) 実験方法
 - (2) 通過波検定
 - (3) 無対策および対策工1の実験結果
 - (4) 対策工2の実験結果
3. CFD解析
 - (1) 計算条件
 - (2) 計算結果
4. 結論

1. (1)研究の背景 1/2

■ 屋外貯蔵タンクの被害

- 2011年東北地方太平洋沖地震の際の津波による石油タンクの被害(畑山健, 2014)

表3 津波により浮き上がり、転倒、滑動、流失、漂流等の移動の被害を受けた石油タンクの数

容量クラス (m ³)	~500	500 ~ 1,000	1,000 ~ 10,000	10,000 ~ 50,000	50,000~	不明	合計
容量クラス別	110	30	16	1	0	0	157

500kL未満 約70%
500~1,000kL 約20%
「小規模タンク」を対象

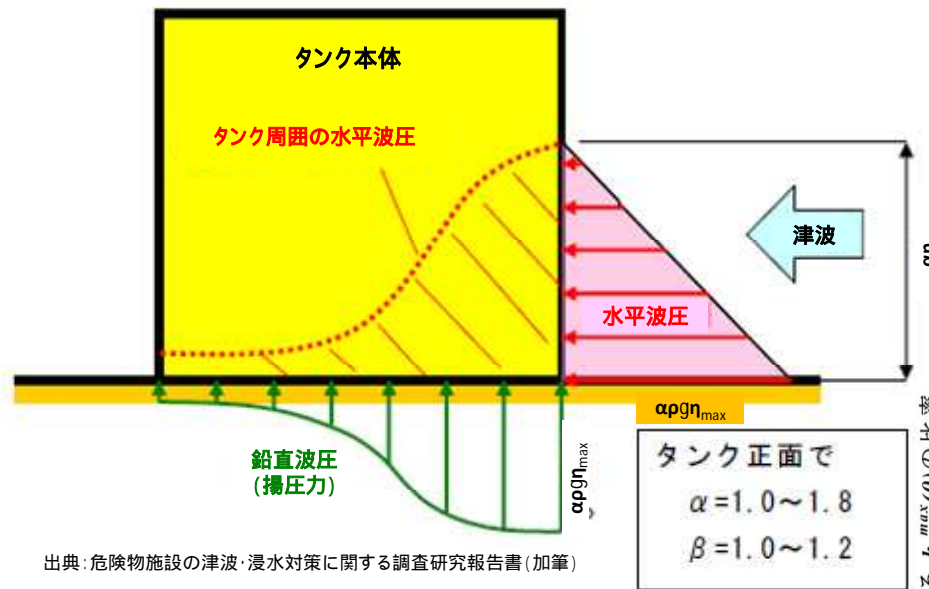
- ✓ 石油タンク津波移動被害予測手法による事後予測結果と実際の移動被害を照合した結果、約76%で実際と予測が一致。
- ✓ 不一致の要因は、タンクに作用する津波波力の過大評価にある。
- 津波以外(たとえば, 1959年伊勢湾台風)においてもタンクの移動被害が発生

■ タンクの滑動防止対策

- 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書(消防庁, 2009)
 - ✓ 防油堤のかさ上げ及びそれに伴う防油堤の構造強化
 - ✓ 防油堤周囲への津波防護壁の設置
 - ✓ タンク本体のアンカー留め又はその増強・増設
(注)アンカーからタンクに作用する力に対するタンクの安全性、タンク底部鋼板に作用する揚圧力に対する隅角部付近の安全性等が確認される必要がある。

1. (1)研究の背景 2/2

タンクに作用する津波波圧



出典: 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査研究報告書(加筆)

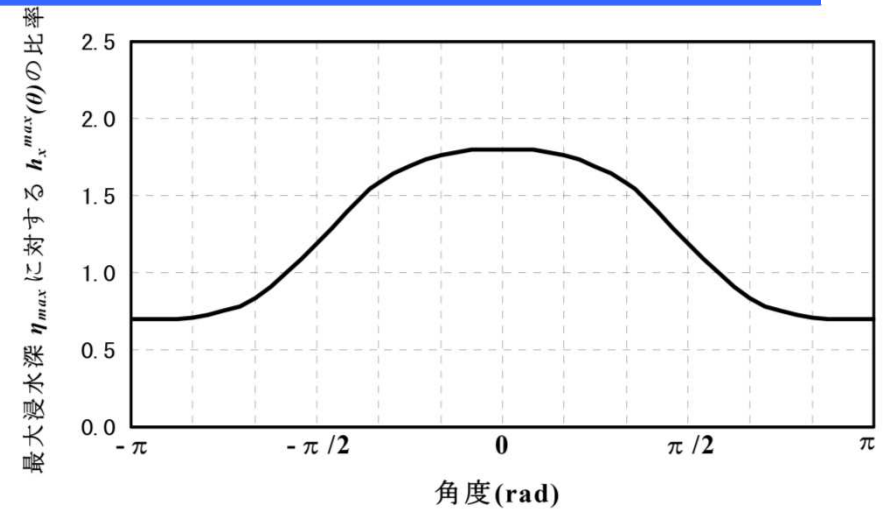


図 3.2-8 タンク円周方向の最大浸水深 η_{max} に対する $h_x^{max}(\theta)$ の比率
 (「タンク水平波力に係る浸水深係数」(α))

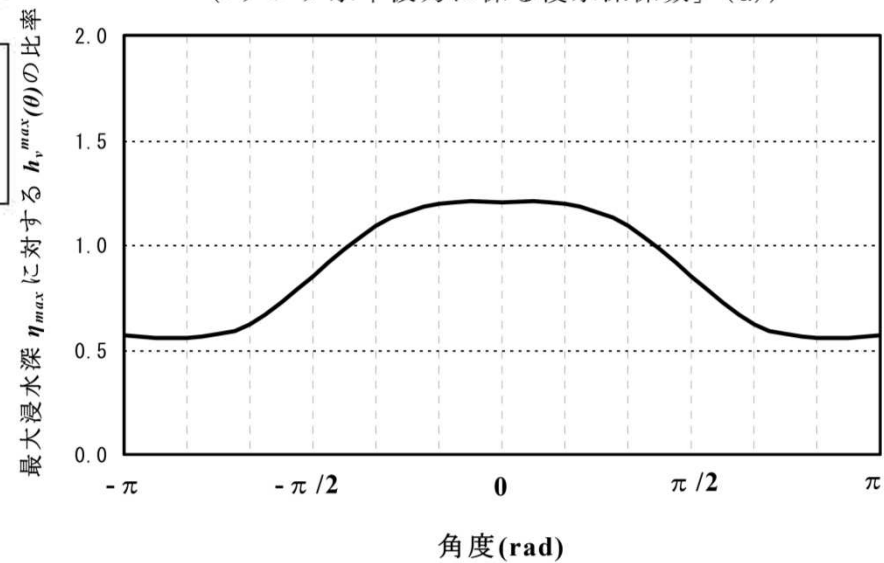


図 3.2-9 タンク円周方向の最大浸水深 η_{max} に対する $h_v^{max}(\theta)$ の比率
 (「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」(β))

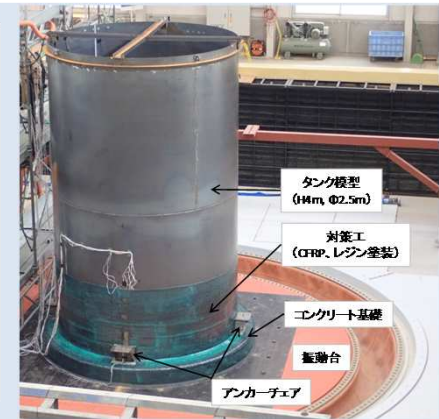
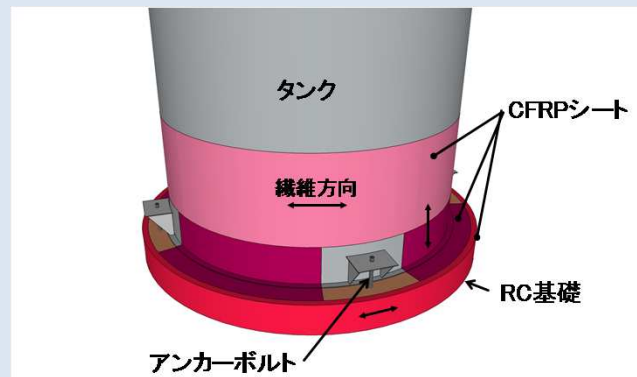
1 . (2)研究の目的

- ◆ タンク本体への津波対策として、アンカー留めによって容量1,000 kℓ級以下のタンクの「滑動」「漂流」を防止する工法について検討することを目的とする。
- ◆ ただし、タンクをアンカーで強く固定すると、隅角部の応力集中等の問題もあることから、この問題点に対する安全性についてFEMと模型実験(振動台)により検討する。このときの外力としては、地震動(慣性力)と津波を想定する。 } 池野ほか (2019)
- ◆ 次に、石油タンク津波移動被害予測手法がタンクに作用する津波波力を過大に評価しているおそれがある問題点について、模型実験(水理)とCFDにより検討する。 } 本研究
- ◆ さらに、タンク底面と基礎上面間の止水効果の有無による違いについても把握し、今後の止水対策に対する基礎資料を得る。 }

1. (3)津波対策工立案

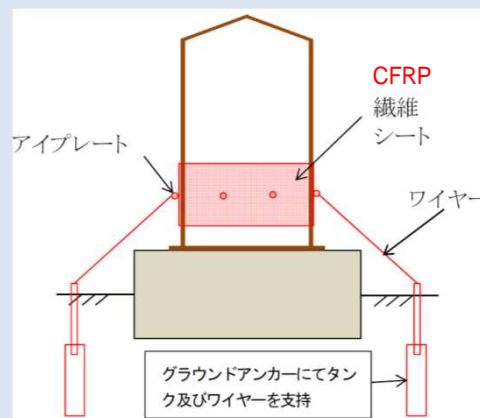
対策工1

タンクとタンク基礎コンクリートをCFRP等、繊維シートと樹脂にて一体化

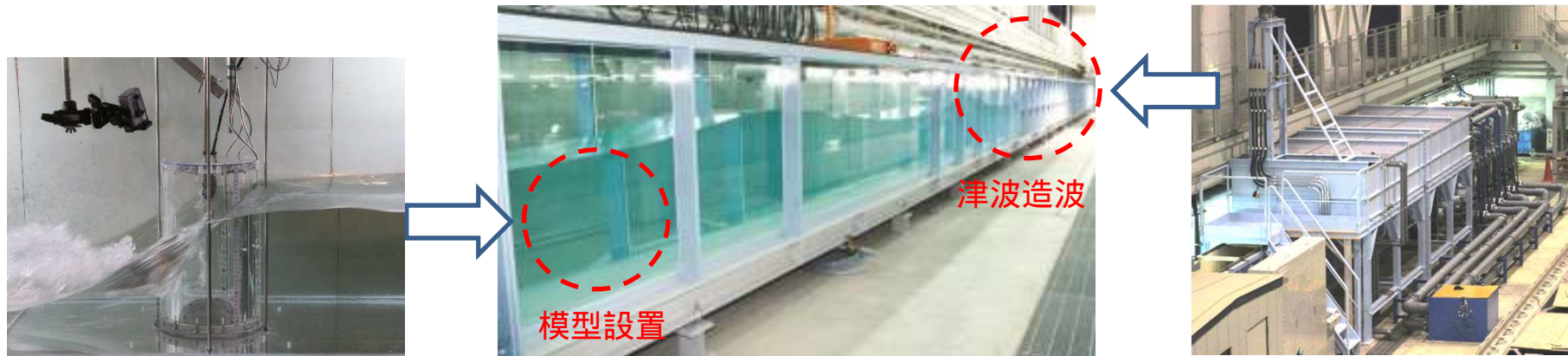


対策工2

タンク側板の中～下部にCFRP等、繊維シートと樹脂にてアイプレートを施工し、ワイヤー等により地盤に設けたアンカー(グラウンドアンカー等)に結ぶ



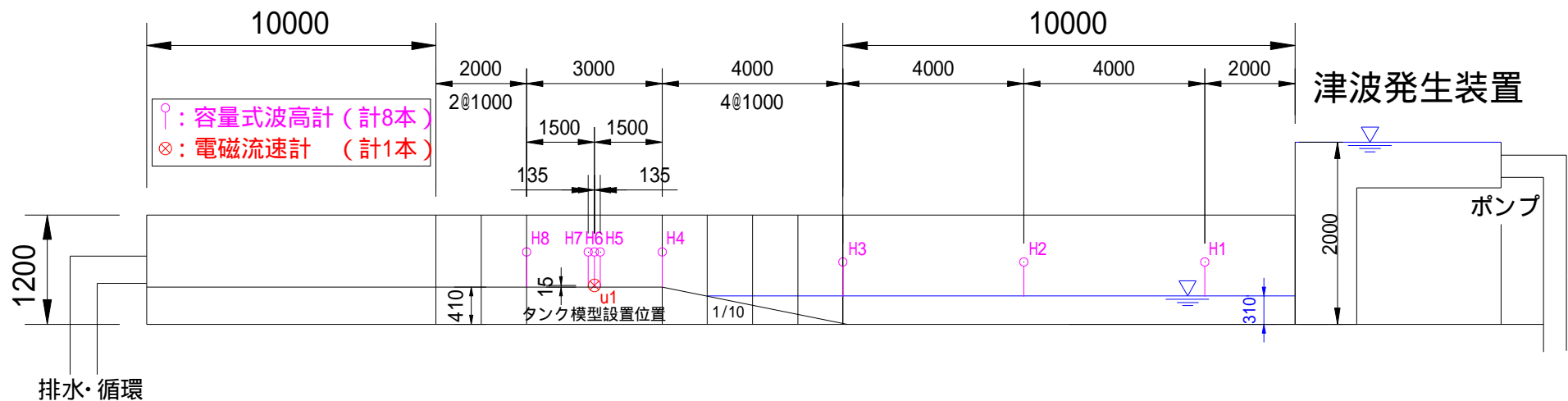
2.(1)実験方法 1/3



タンク波圧実験

50m長水路

津波発生装置

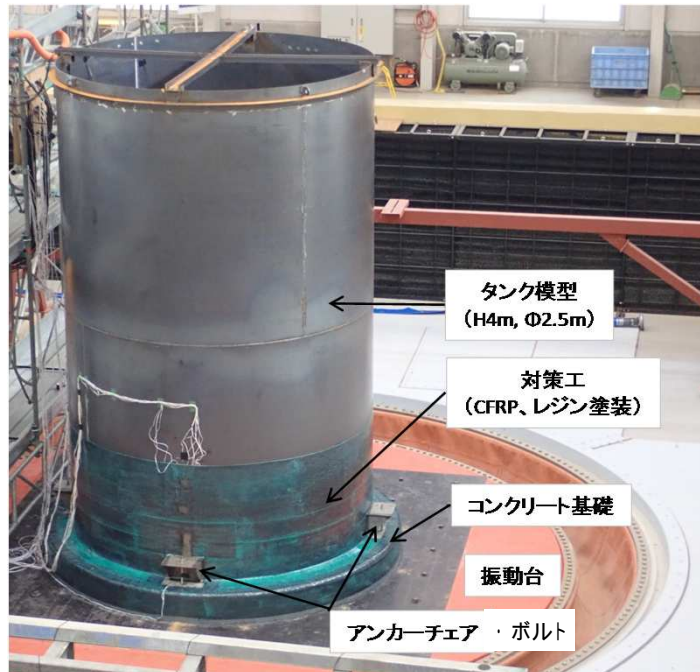


水理模型実験概要 (縦横比=2:1、単位:mm)

長さ50m × 幅0.6m × 高さ1.2m

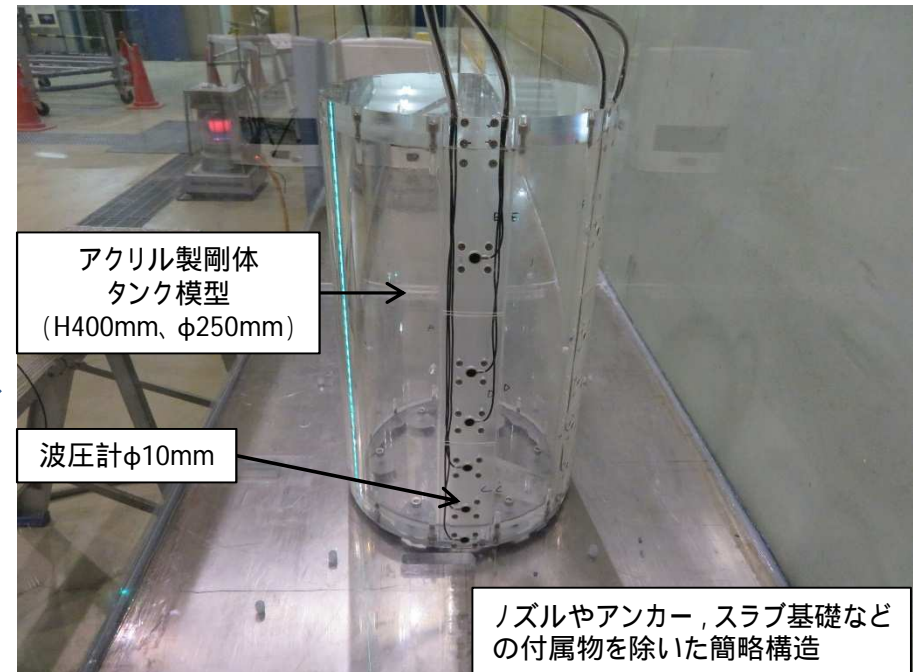
- ・50m長水路にタンク縮尺模型を設置し、津波を作用させて対策工の有効性を検証
- ・タンク本体への影響を評価するための設計外力(津波波圧および津波荷重)を確認

2.(1)実験方法 2/3



20kL級タンク実規模振動台実験 (池野ほか、2019)

1/10
⇒



水理模型実験

タンク模型設置位置
における進行波条件

ケース	最大 浸水深 η_{\max} [cm]	最大流速 V_{\max} ($F_r=1.3$) [m/s]	浮き 上がり 安全率	滑動 安全率	タンク設置時の 津波の作用高さ
1	11.1	1.4	2.75	1.14	タンク高さの半分
2	17.0	1.7	1.80	0.34	タンク高さの3/4
3	22.2	1.9	1.38	0.12	タンク天端

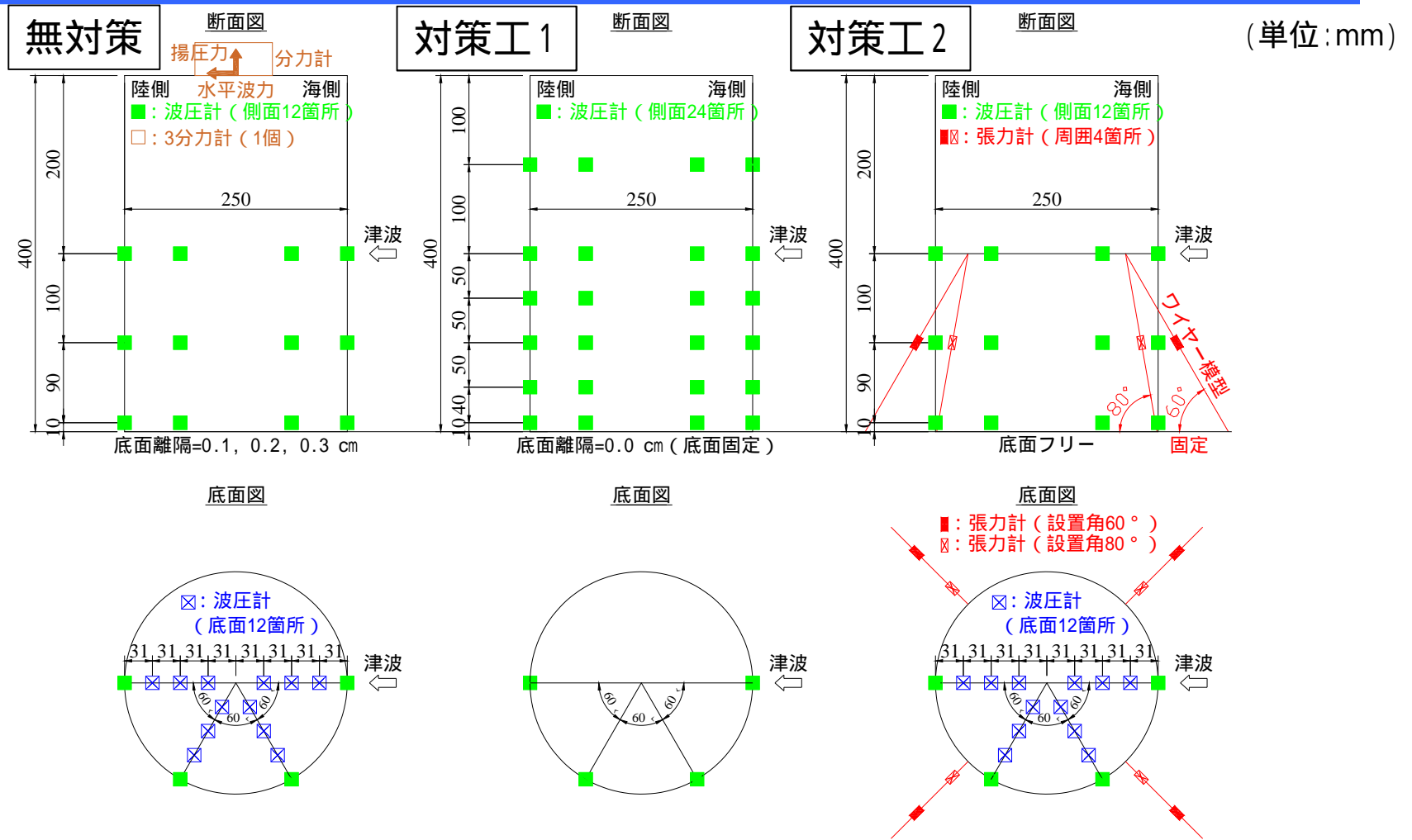
貯液率60%を想定

波力は「屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール」により試算

- ・フルード数1.3以上を目標
- ・浮き上がりは生じないが、滑動する条件での実験

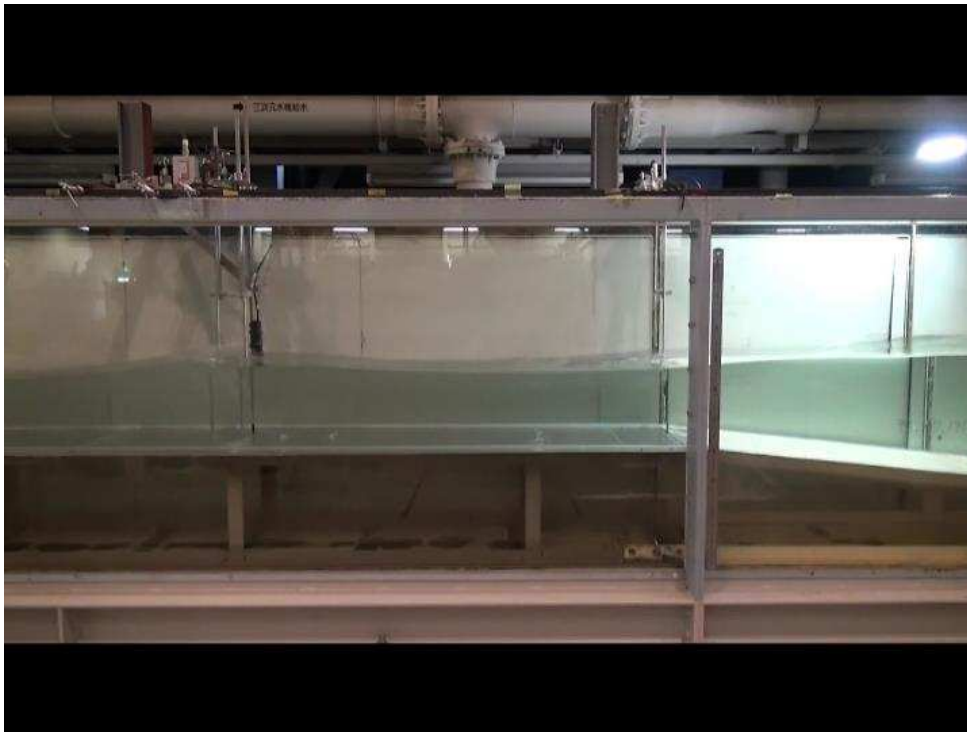
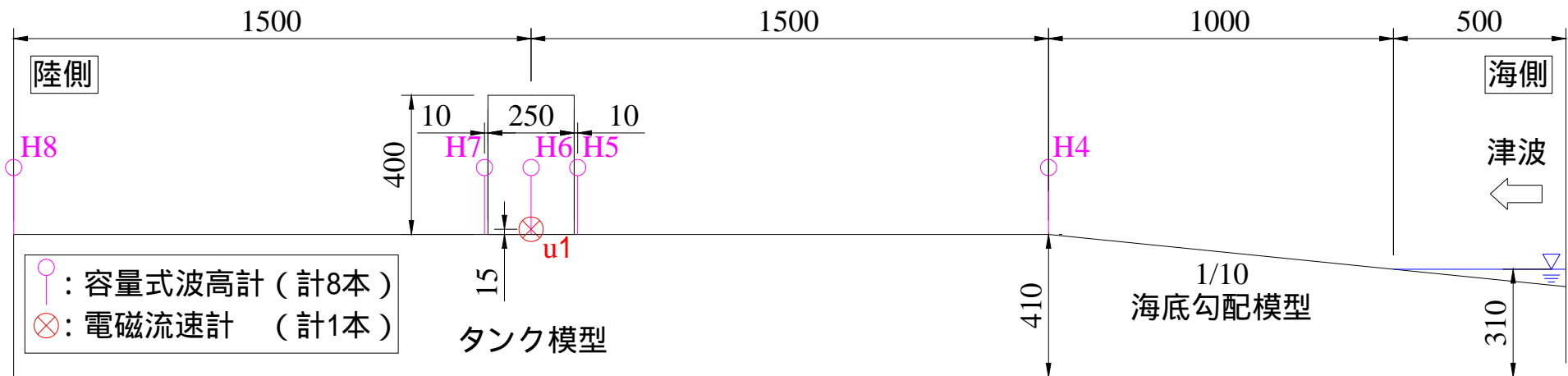
ワイヤ1本当たりに作用させる緊張力は「0」および
「津波水平力の10%」

2.(1)実験方法 3/3

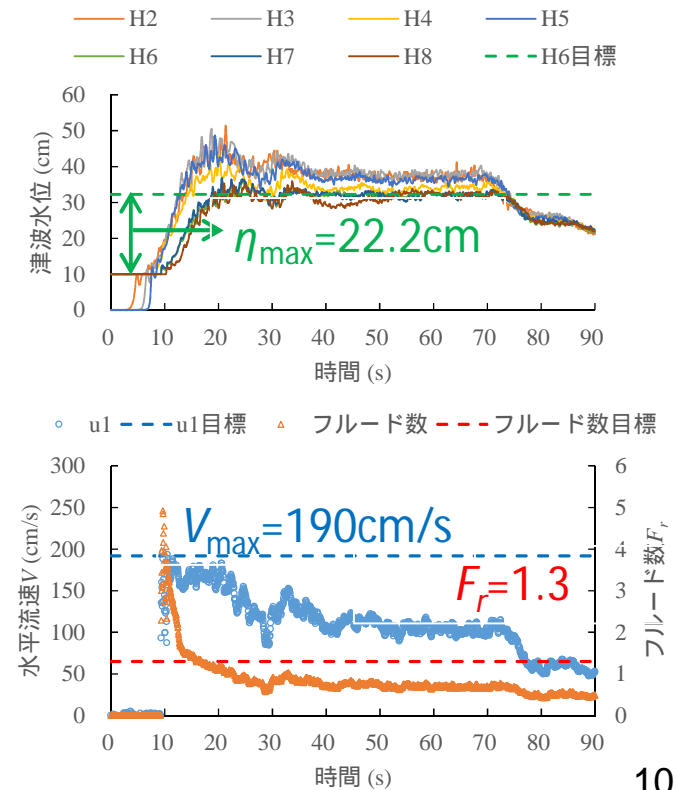


- ・津波規模を変えてタンクに作用 壁面波圧・波力、ワイヤ張力を把握(1,000Hzで計測)
- ・発泡ポリエチレンシートにより静止摩擦係数 $\mu = 0.4$ を再現
- ・タンク底面に離隔を有する場合と離隔が無い場合を設定し、タンク基礎へ止水対策を施した場合(対策工1)の効果も検証

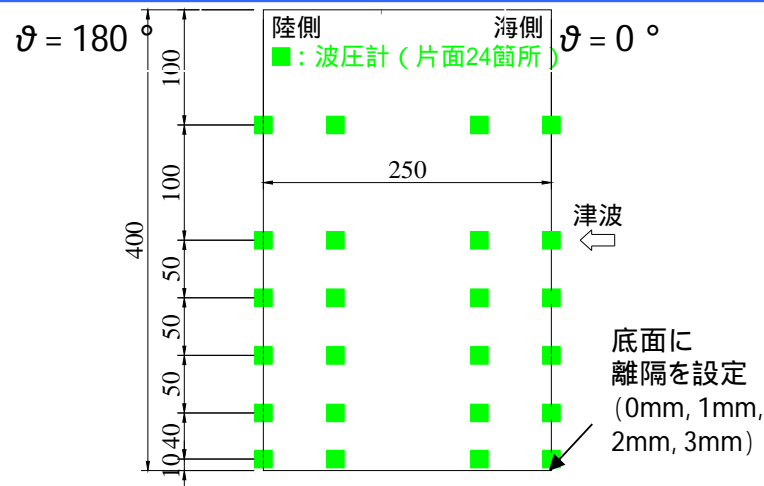
2.(2)通過波検定



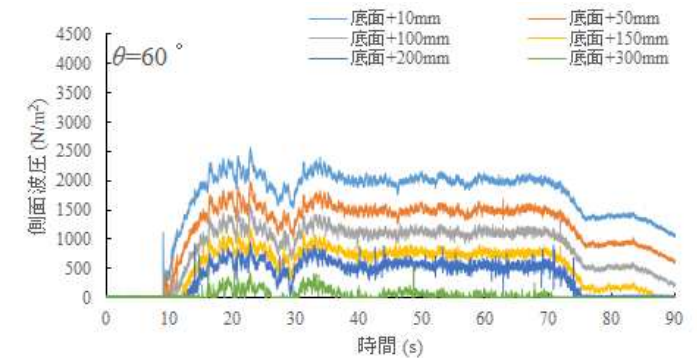
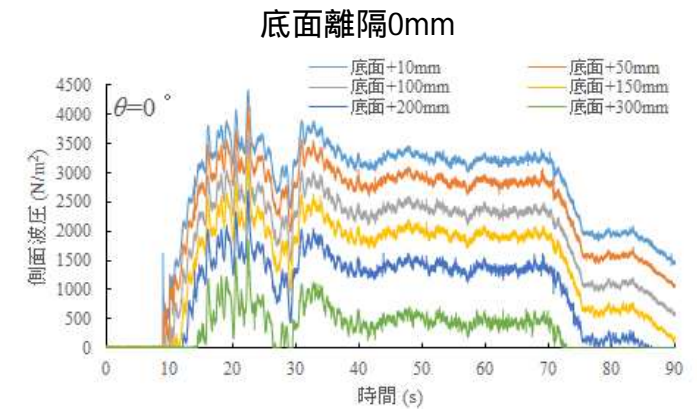
タンク模型を設置しない場合(進行波津波高22.2cm)



2.(3)無対策および対策工1の実験結果 1/2

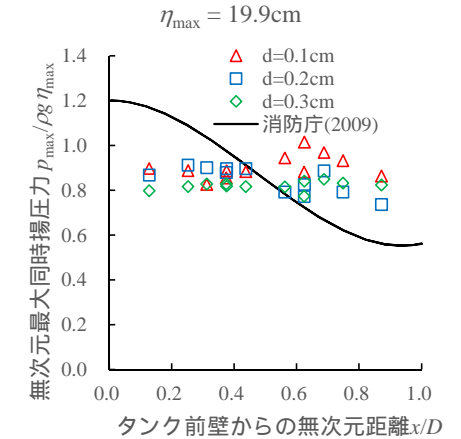
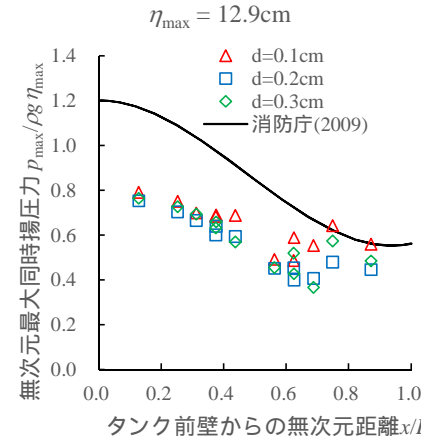
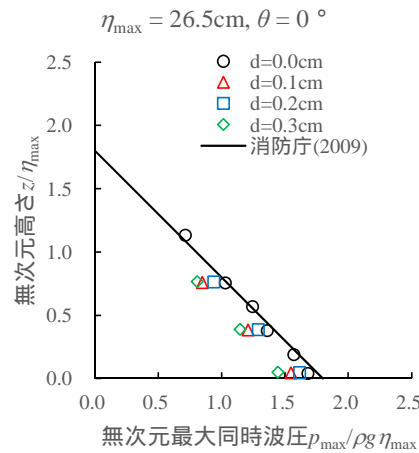
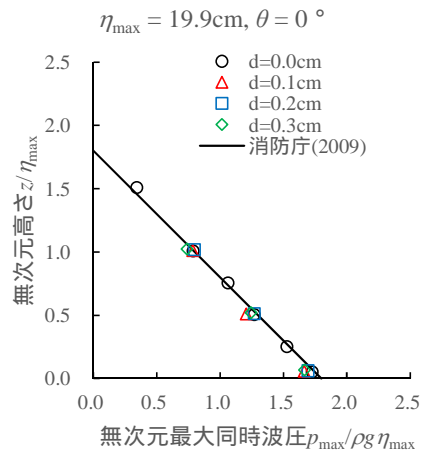


対策工1 (進行波津波高22.2cm)

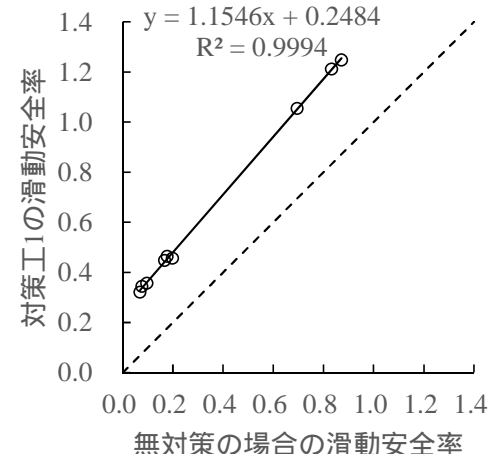
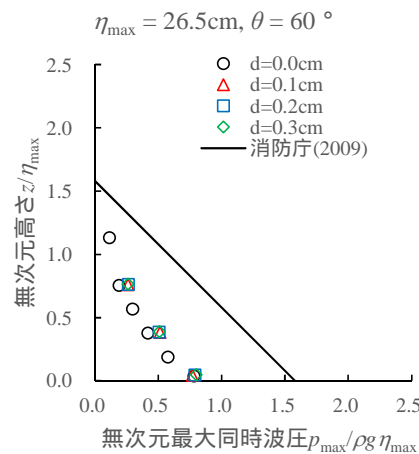
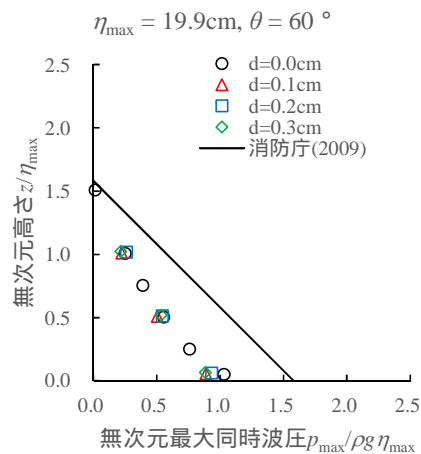


・津波入射波向に対する角度が大きくなるにつれて波圧が小さくなるという既往の知見と整合

2.(3)無対策および対策工1の実験結果 2/2



無次元最大同時波圧分布(底面波圧)



滑動安全率: $F_{sb} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_{IV})}{F_{IH}}$

滑動の可能性あり: $F_{sb} \leq 1.0$

— // — 可能性なし: $F_{sb} \geq 1.0$

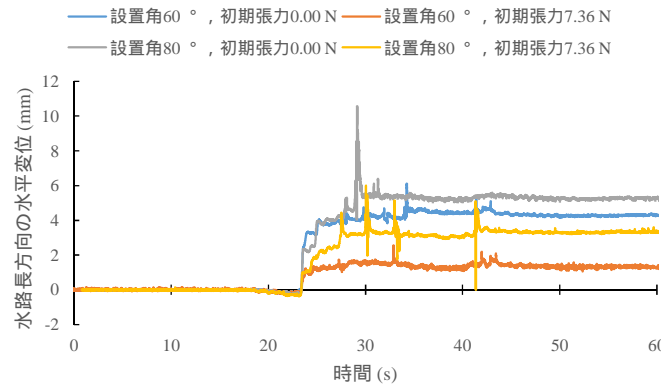
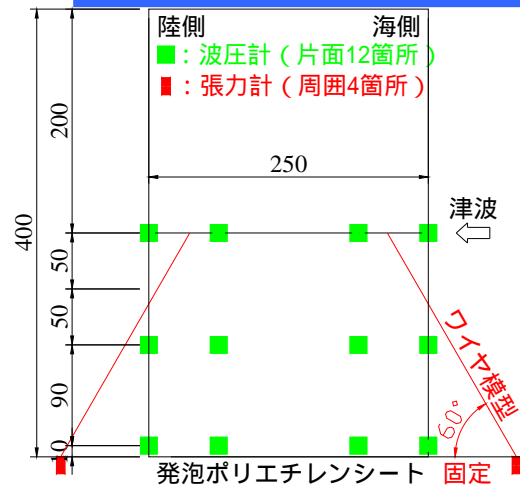
- μ : タンク基礎とタンク本体の摩擦係数
- W_T : タンク本体の重量
- W_L : タンク内容液の重量
- F_{IV} : タンクに作用する津波の鉛直力
- F_{IH} : タンクに作用する津波の水平力

無次元最大同時波圧分布(側面波圧)

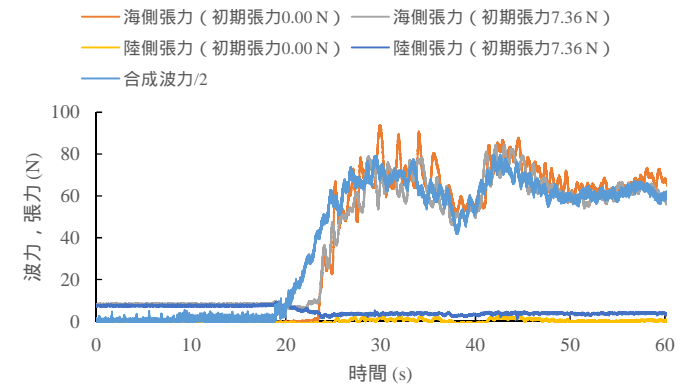
対策工1による滑動安全率の評価結果

- ・側面波圧および底面波圧ともに底面離隔 d が狭いほど大きくなる傾向であったが、その違いは明瞭でない
- ・タンク側面～背面波圧および揚圧力を過大に評価しているおそれ
- ・対策工1の止水効果により滑動安全率が0.24以上向上

2.(4)対策工2の実験結果



タンク模型の水平変位時系列



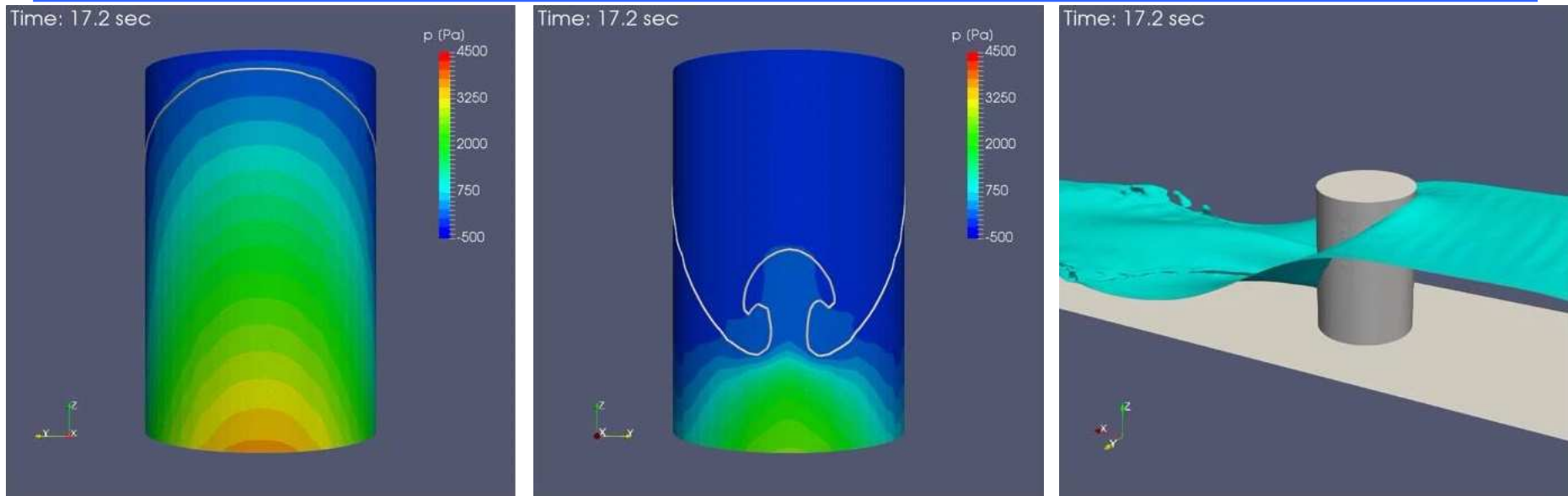
ワイヤー張力と合成波力/2



対策工2 (進行波津波高22.2cm)

- ・ワイヤー設置角が緩いほど、初期張力が大きいほどタンクの水平変位は小さくなり、衝撃的な張力も緩和
- ・海側ワイヤー1本当たりに水平波力 F_x と揚圧力 F_z との合成波力の半分程度の張力がほぼ均等に作用
- ・陸側ワイヤーへは張力がほとんど作用しない
- ・水平波力と揚圧力からワイヤーおよびグラウンドアンカー等の設計が可能に

3 . CFD解析 (無対策、進行波津波高22.2cm) 1/2

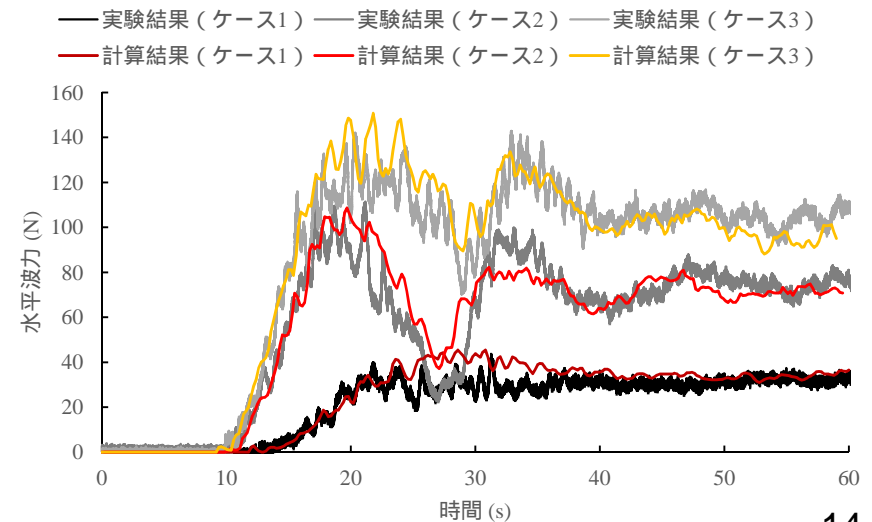


タンク前面

タンク背面

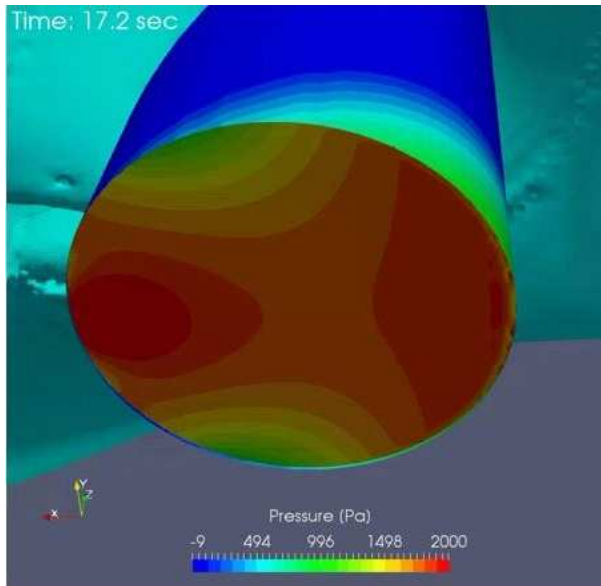
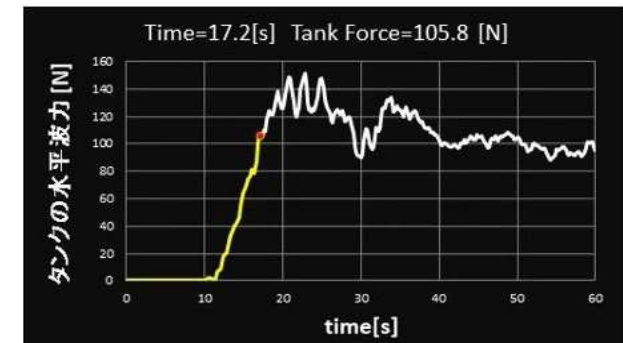
タンク周囲の水面形

- ・円筒タンクであるため、非構格子を扱える3次元数値流体力学ツールOpenFOAMを用い、不混和流体の非圧縮性・等温二相流用ソルバであるinterFoamを使用
- ・造波境界に計測水位および水平流速を入力
- ・陸側端を開境界、格子間隔1～2cm、111万セル
- ・波力および波圧が概ね再現され、対策工の設計に資するための基礎資料として活用

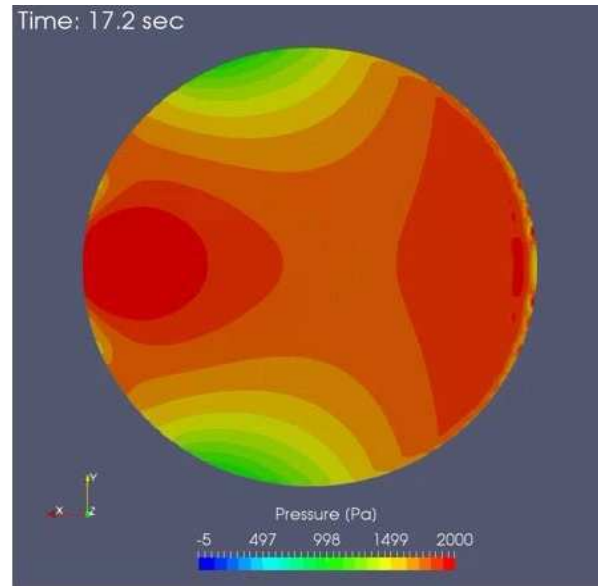


3 . CFD解析 (無対策、進行波津波高22.2cm) 2/2

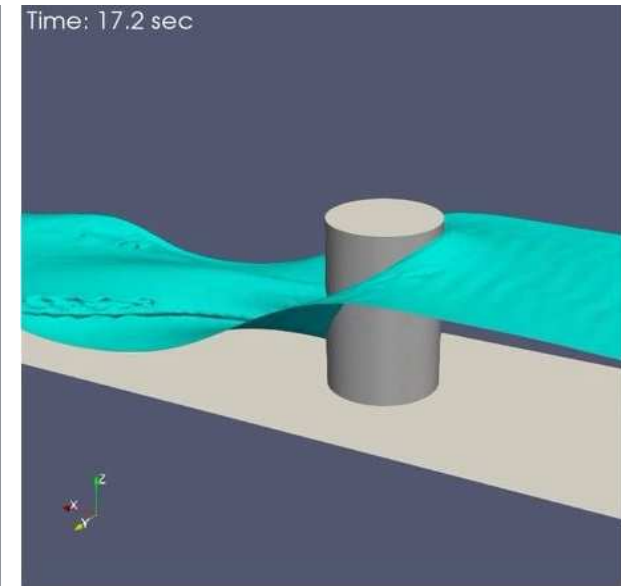
タンク底面波圧 (揚圧力) 分布



タンク底面 view1



タンク底面 view2



タンク周囲の水面形



4 . 結論

- ◆小規模タンク本体への津波対策として、CFRPによる滑動・漂流防止対策工を提案した。
- ◆提案した対策工について津波外力に関する水理模型実験とCFD解析をおこないその有用性を示した。
- ◆本実験条件の範囲内では、対策工1の止水効果により滑動安全率が0.24以上向上することが分かった。
- ◆対策工2の海側ワイヤー1本当たりに水平波力と揚圧力の合成波力の半分の張力が均等に作用し、陸側ワイヤーへはほとんど作用しないことを確認した。

【「消防防災科学技術研究推進制度」により実施されました。】