

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

高橋 研也¹・池野 勝哉¹・宇野 州彦¹・西畑 剛²・
藤井 直樹³・保延 宏行⁴・竹家 宏治⁵

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 (一財)みなと総合研究財団 調査研究部
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-1-10 第二虎ノ門電気ビルディング 3,4F)

³ 正会員 東電設計(株) 土木本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)
E-mail: dfujii@tepsco.co.jp

⁴ 東電設計(株) 火力本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)

⁵ 正会員 (株) エスイー 営業本部営業部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 8-11-1 日東星野ビル 7F)

2011年東北地方太平洋沖地震津波では、沿岸部に立地する石油コンビナートなどにおいて多くの危険物屋外タンク貯蔵所が甚大な被害を受けた。このうち、1,000 kL未満である「小規模タンク」が約90%と報告されており、これらを対象にした津波時の安全対策を講じることは極めて重要である。

そこで、著者らは小規模タンク本体への津波対策として、耐久性(耐食性)、施工性および引張強度に優れた炭素繊維シート(CFRP)による滑動・漂流防止対策工を提案している。タンク基部とRC基礎をCFRPで面的に拘束するもの、およびタンク側板の中部にCFRPを介してアイプレートを設置してワイヤーをグラウンドアンカーなどに展張するものである。

本研究では、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解析をおこなった。

Key Words : oil storage tank, tsunami, countermeasures against sliding, hydraulic model experiment, CFD analysis

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波では、沿岸部に立地する石油コンビナートなどにおいて多くの危険物屋外タンク貯蔵所が甚大な被害を受けた。石油タンク本体が津波により漂流するとともに、配管が損傷するなどして大量の石油が流出したため、気仙沼湾内における大規模な火災の発生が報道で大きく取り上げられるなど、流出油と火災との関連性についても指摘されてきた。畑山¹⁾は、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合計157基の石油タンクのうち、500 kL未満が約70%、500~1,000 kLが約20%と報告しており、危険物関係法令²⁾上の1,000 kL未満である「小規模タンク」を対象にした津波時の安全対策を講じることは極めて重要な課題の一つである。

そこで、著者ら³⁾は小規模タンク本体への津波対策として、耐久性(耐食性)、施工性および引張強度に優れた炭素繊維シート(以下、CFRP)による滑動・漂流防止対策工を提案している。図-1に滑動・漂流防止対策工概念

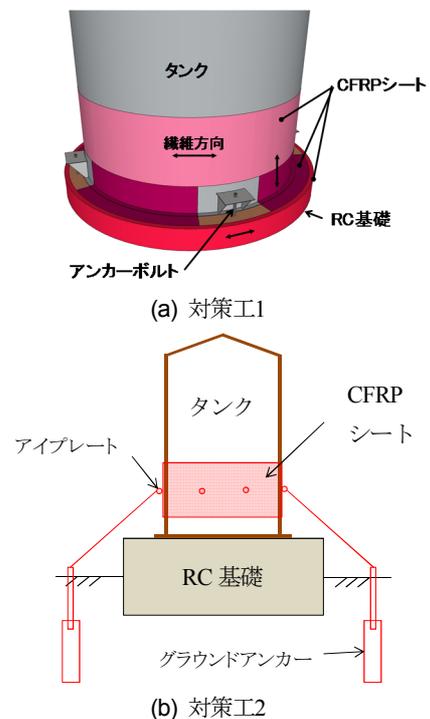


図-1 滑動・漂流防止対策工概念図

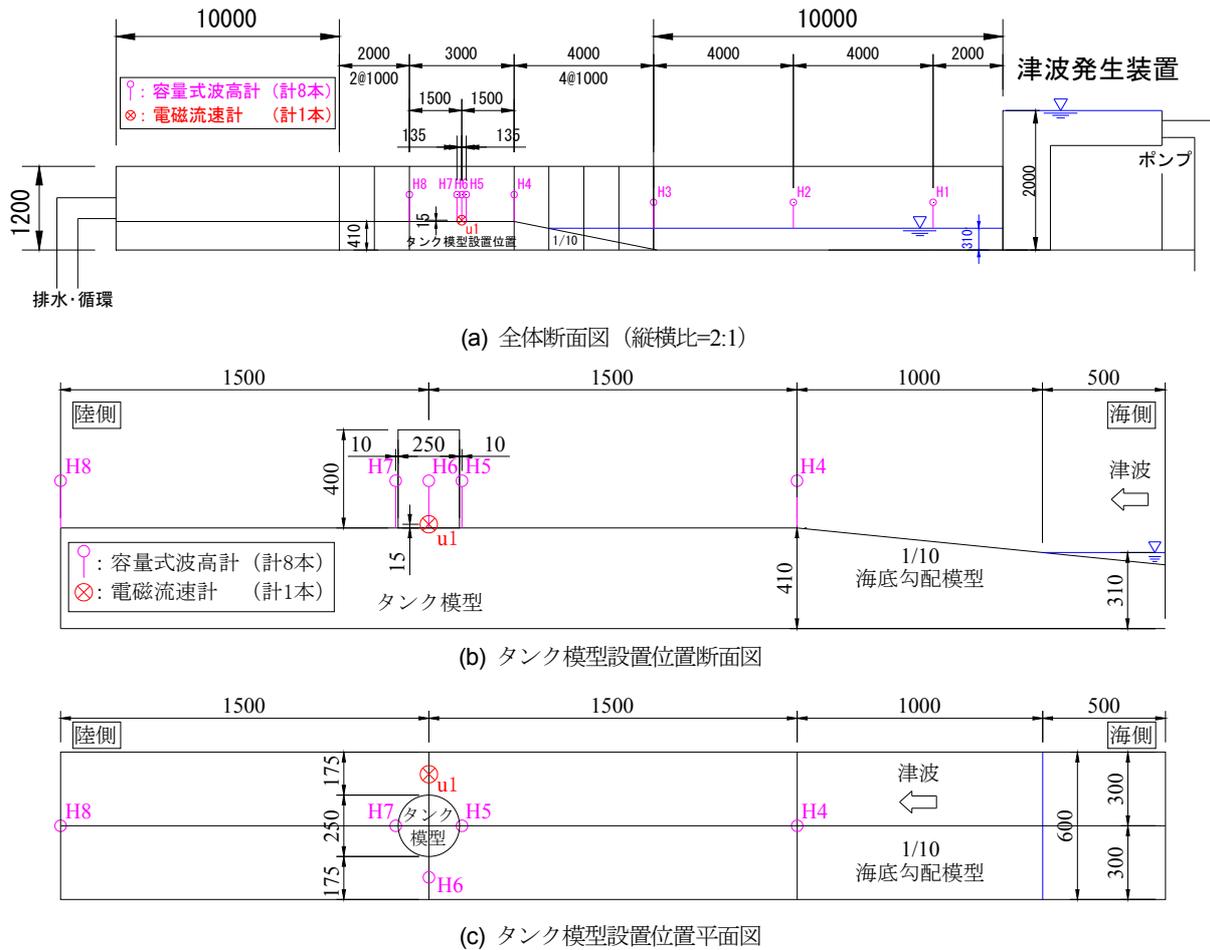


図-2 実験概要図 (単位: mm)

図を示す。対策工1はタンク基部とRC基礎をCFRPで面的に拘束するものであり、タンク下部をCFRPにより止水して津波作用時の揚圧力低減による浮き上がり・滑動防止などの効果を期待している。対策工2はタンク側板の中部にCFRPを介してアイプレートを施工し、ワイヤーをグラウンドアンカーなどに展張することによって津波作用時の浮き上がり・漂流防止などの効果を期待している。著者ら³⁾は、対策工1を施したタンクが地震時に損傷しないか確認するために振動台実験を実施するとともに、津波波圧を作用させた三次元非線形FEM解析を実施して漂流対策効果について考察しているが、そもそも図-1に示した滑動・漂流防止対策工が津波作用時に有効か、また作用させた津波波圧が妥当か検証しておく必要がある。

本研究では、提案した対策工について水理模型実験とCFD解析をおこない、今後の設計に資する津波波圧や波力などの外力に関する基礎資料を得ることを目的とする。

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

実験では対策工およびタンク本体の各部に計測器を

表-1 実験条件

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

配置して作用外力を把握することとした。図-2に実験概要図を示す。実験は長さ50m×幅0.6m×高さ1.2mの長水路および津波造波装置を用いておこなった。長水路内に1/10の斜面勾配を有する水平床を設置し、20kL級タンクの1/10縮尺模型(高さ400mm, 直径250mm)を陸側水路中心線上に配置し、滑動・漂流対策工を付加して様々な規模の津波を作用させることで対策工の効果を確認した。表-1に実験条件を示す。タンク模型設置位置における進行波としての最大浸水深 η_{max} および最大水平流速 V_{max} を、総務省消防庁⁴⁾による浸水深係数が最大となるフルード数 $F_r \geq 1.3$ となるように設定し、これを満足するためにダムブレーク法とポンプ還流の併用による津波造波をおこなった。この実験条件においては、タンク模型設置時の前面津波水位はおおよそタンク高さの半分から天端の範囲となる。なお、表中の浮き上がり安全

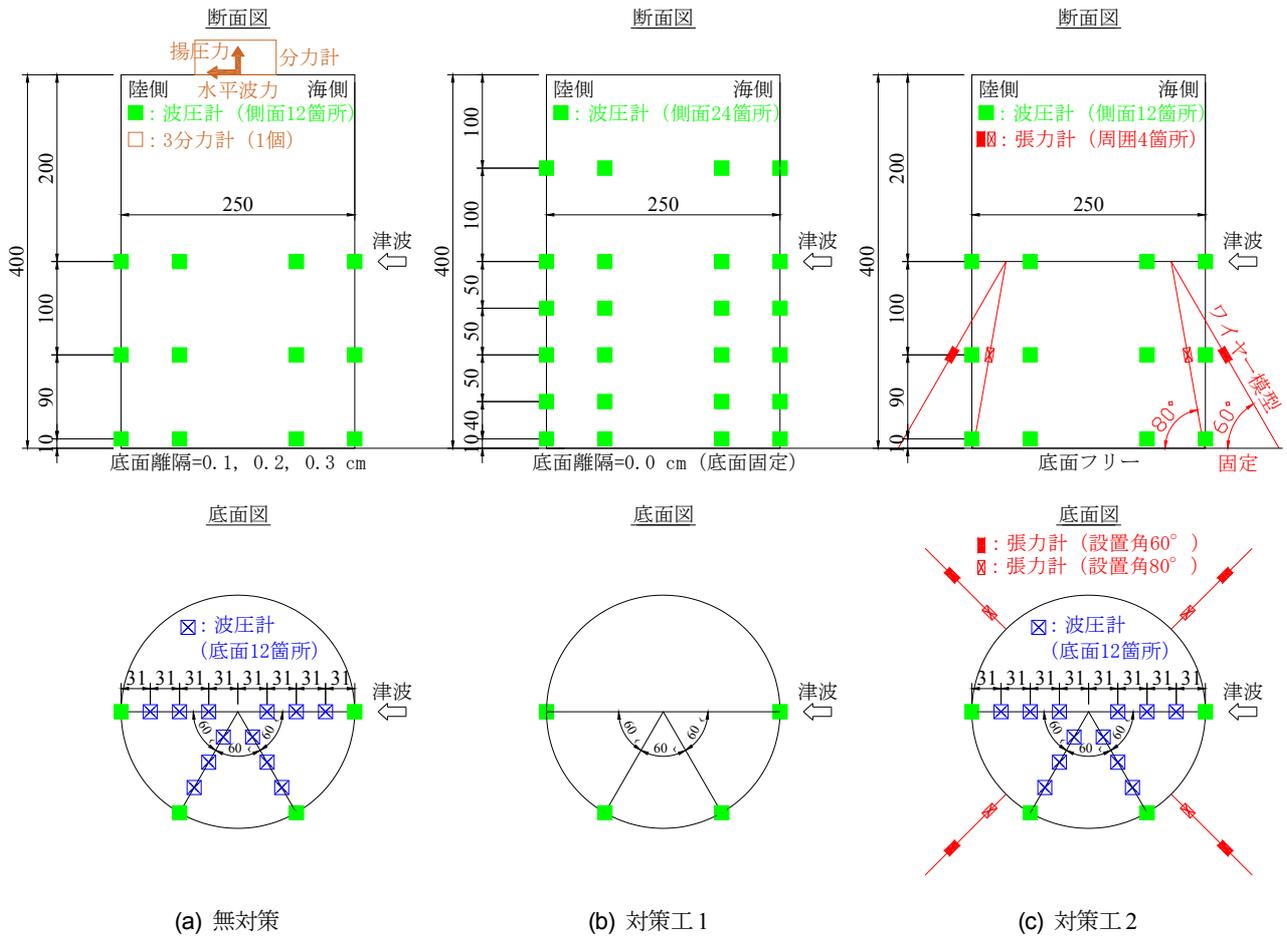


図-3 タンク模型および計測器配置図

率および滑動安全率は、貯液率 60% (水) を想定した重量における消防庁危険物保安室⁹⁾の屋外貯蔵タンク津波被害シミュレーションツールによる計算結果を参考までに示したものであり、ケース 1 は浮き上がりも滑動もしない条件であるが、ケース 2 および 3 は浮き上がらないものの滑動する条件であると考えられる。

図-3 にタンク模型および計測器配置図を示す。タンク模型はアクリル製剛体模型として製作し、周囲の流れ場を単純にするためノズルやアンカー、スラブ基礎などの付属物を除いた簡略構造とするとともに、屋根部を設け、貯液率 60% (水) を想定して重量および重心高を調整した。稲垣ほか⁹⁾に倣いタンク模型底面と床面との間に発泡ポリエチレンシートを敷設して静止摩擦係数 $\mu=0.4$ の条件を再現するとともに、その間の離隔 d を 0.0~0.3 cm と変化させることで無対策時と対策工 1 を模擬した。また、対策工 2 においてはワイヤー設置角が 60° および 80° の 2 種類を用意した。タンク模型側面および底面には波圧計を埋め込み、無対策の場合においては 3 分力計を、対策工 2 の場合においてはワイヤー部に張力計を配置してサンプリング周波数 1,000 Hz にて計測するとともに、図-2 に示した位置に容量式波高計および電磁流速計を配置してサンプリング周波数 20 Hz にて津波を計測した。

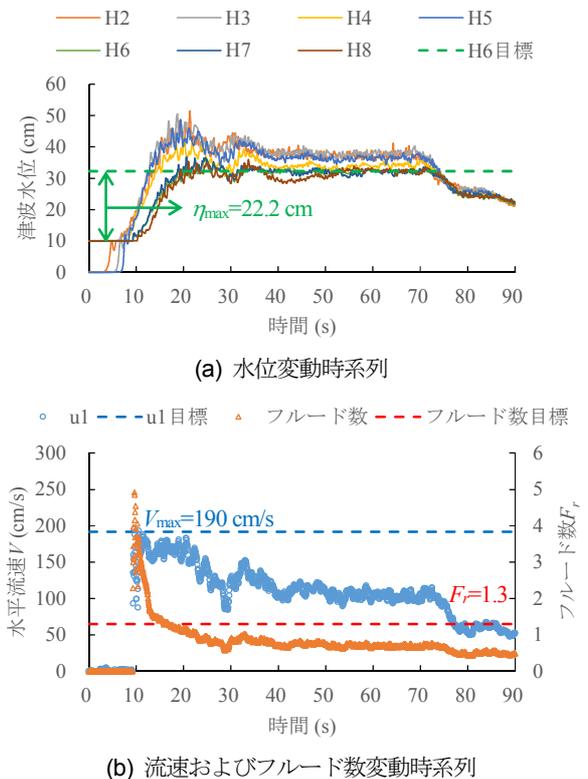


図-4 ケース 3 における通過波検定結果

なお、タンク模型側面および底面における波圧計の取り付け位置は固定しておき、タンク模型を回転させて造波を繰り返すことによって側面作用波圧および底面揚圧力の分布を確認した。対策工法の効果の検証をおこなうために必要となる津波外力の計測を重点的におこなった。

(2) 通過波検定

まず、タンク模型を設置しない状態において表-1に示した対象津波の通過波検定をおこなった。フルード数 F_r をできるだけ大きくするためにダムブレイク法とポンプ還流の併用による津波造波をおこなったが、実験値のばらつきの可能性を考慮して3回以上の造波・計測をおこなった。図-4にケース3における通過波検定結果を示す。いずれのケースにおいても表-1に示した目標値を概ね満足し、その再現性も良好であることを確認したが、後続波の水平流速 V およびフルード数 F_r は小さくなった。

(3) 無対策および対策工1の実験結果

次に、対策工1を想定してタンク模型を水路床に固定および止水処理し、計測データから津波側面波圧を把握した。図-5にケース3における側面波圧の変動時系列を示す。ここに、 θ は津波入射方向となす角度である。1/10の海底勾配を設けたこと、造波水深が310mmと比較的深かったことなどにより段波津波波圧は明瞭でないが、後続波の持続波圧はほぼ定常状態となっており、タンク模型側面の波圧は津波入射方向となす角度が大きくなるにつれて小さくなるという既往の知見⁴⁾と整合した。

タンクには津波外力として水平波力と揚圧力の2種類が作用する。CFRPをタンク下部からRC基礎へ隙間なく貼りつける対策工1については、タンク底面へ津波が浸潤せず揚圧力を発生させない効果が期待できる。そこで、タンク下部にわずかな離隔 ($d=0.1\sim 0.3$ cm) を与えて底板に作用する揚圧力を直接計測するケース(無対策)についても検討した。図-6, 7に通過波検定において計測された波高計 H6 での最大浸水深 η_{max} で無次元化した最大同時波圧分布の離隔 d ごとの比較を消防庁⁴⁾による算定値とともに示す。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く、底面離隔 $d=0.0$ cm (対策工1) の場合においても消防庁⁴⁾の算定値により概ね再現された。一方で、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があることが示唆された。

さらに、無対策の場合に分力計によって直接計測された水平波力および揚圧力から、対策工1による止水効果がタンク滑動防止にどのくらい寄与するか定量的に評価した。図-8に対策工1による滑動安全率の評価結果を示す。対策工1の止水効果により揚圧力を発生させない効果がしっかりと発揮されれば、本実験条件の範囲内にお

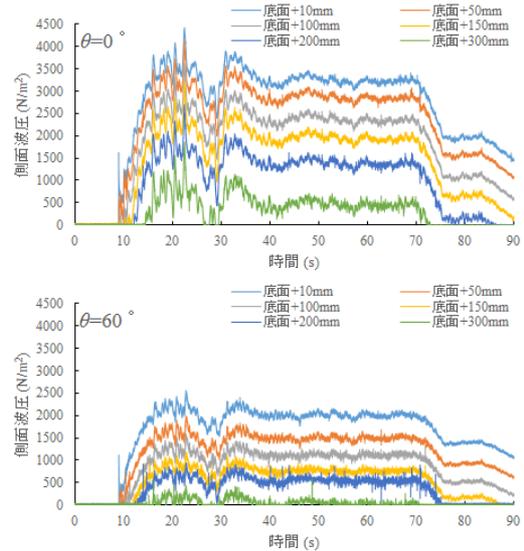
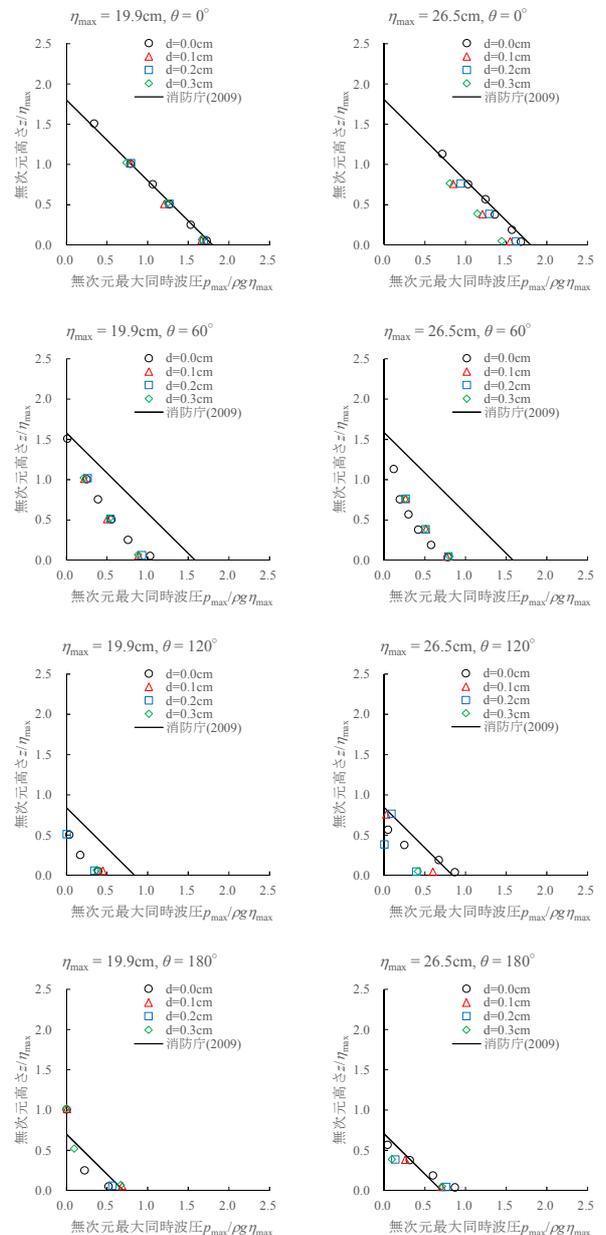


図-5 ケース3における側面波圧の変動時系列 (対策工1)



(a) ケース2 (b) ケース3

図-6 無次元最大同時波圧分布の離隔 d 毎の比較 (側面波圧)

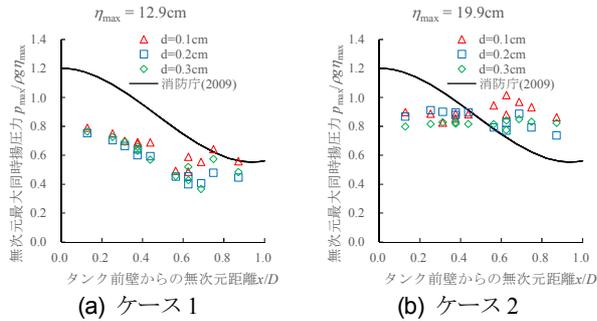


図-7 無次元最大同時波圧分布の離隔 d 毎の比較 (底面波圧)

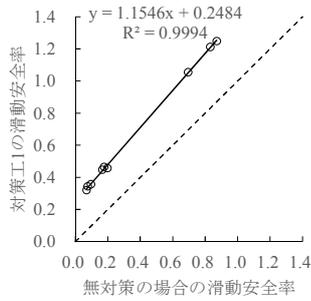


図-8 対策工1による滑動安全率の評価結果

いては滑動安全率が 0.24 以上向上することが分かった。

(4) 対策工2の実験結果

最後に、対策工2を想定してタンク模型を水路床に固定せずに置き、タンク模型と水路床とをワイヤーおよび張力計を介して接続して津波を作用させた。ワイヤー1本当たりに作用させる初期張力は「0」および「表-1 から計算される津波水平力の10%」の2種類とした。また、タンク模型屋根部4点に反射マーカを設置して高精度カメラにより撮影することで、屋根部中心の3次元動態計測を120 Hzにておこなった。

写真-1にケース3(ワイヤー設置角 60°)における実験状況を、図-9にタンク模型の水路長方向の水平変位およびワイヤー張力と合成波力/2との関係を示す。合成波力/2とは、無対策(底面離隔 $d=0.3$ cm)の場合に分力計によって直接計測された水平波力および揚圧力を合成して1/2としたものである。津波波力の作用直後である20~23 sの間はタンク模型自重による水平抵抗力により滑動が生じなかったが、その後滑動が生じるとタンク模型変位およびワイヤー張力が急激に上昇した。また、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されることが分かった。さらに、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程度の張力がほぼ均等に作用すること、陸側ワイヤーへは張力がほとんど作用しないことも確認した。

以上のことから、対策工2の滑動・漂流対策工としての有効性を示すとともに、津波波力からの設計が可能であることを示した。

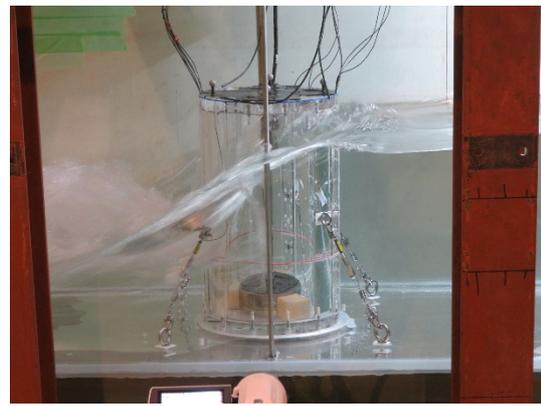
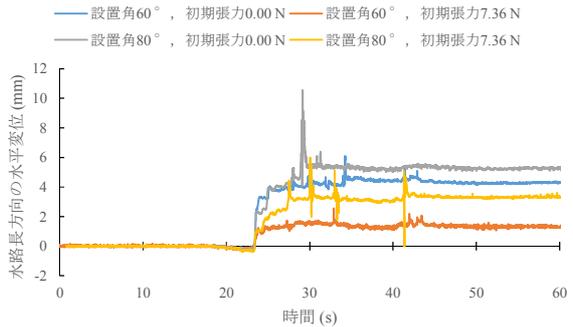
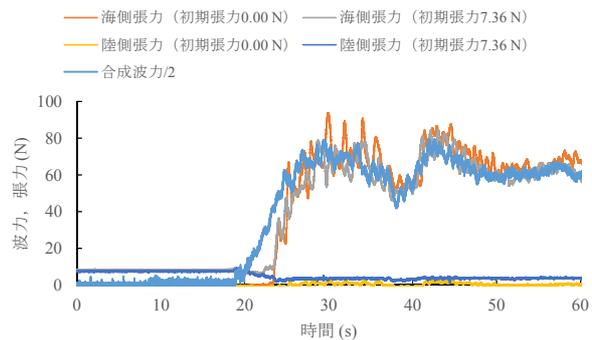


写真-1 ケース3における実験状況 (対策工2, 設置角 60°)



(a) タンク模型の水路長方向の水平変位時系列



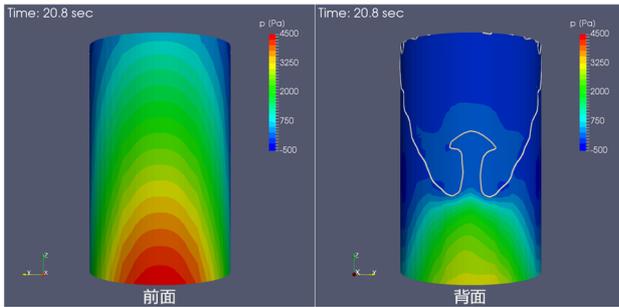
(b) ワイヤー張力(設置角 60°)と合成波力/2の時系列の比較

図-9 ケース3における実験結果 (対策工2)

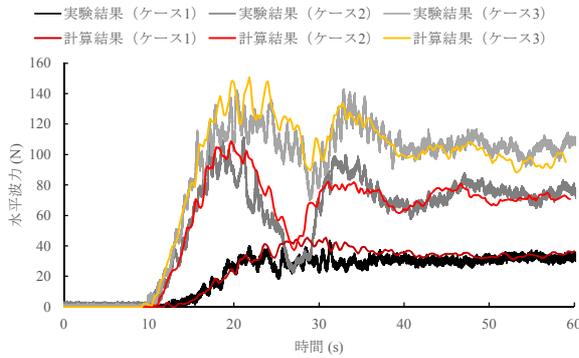
3. CFD 解析

(1) 計算条件

今後の設計への展開を見据え、2.で実施した水理模型実験を再現するCFD解析を実施し、タンク全体に作用する津波波圧分布および津波波力を検証した。計算対象が円筒タンクであるため、数値解析モデルには非構造格子を扱える3次元数値流体力学ツール OpenFOAM v1812⁷⁾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 を使用した。計算領域は波高計 H4 の位置から陸側へ5mの範囲とし、造波境界として計測水位を入力することによって津波を造波するとともに、陸側端を開境界として反射波を抑えた。格子間隔を1~2 cmとし、総セル数を111万セルとして計算をおこなった。



(a) ケース3における計算波圧分布 (白線: 水面位置)



(b) 水平波力変動時系列の実験結果と計算結果との比較

図-10 無対策(底面離隔 $d=0.3$ cm)における再現計算結果

(2) 計算結果

図-10に無対策(底面離隔 $d=0.3$ cm)における波圧分布および水平波力変動時系列の再現計算結果を示す。タンク前面津波水位がおおよそタンク高さの半分から天端の範囲となる非越流の条件ではあったが、波力および波圧ともに良く再現され、CFD解析の有用性が示された。

4. 結論

- ① 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。

- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 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。

謝辞: 本研究は「消防防災科学技術研究推進制度」により実施されたものである。消防研究センターの畑山室長、静岡市消防局の海野主幹、東北大学の今村教授から有益な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 畑山健: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, 第14回日本地震工学シンポジウム, pp.2885-2894, 2014.
- 2) 危険物の規制に関する政令:政令第306号, 1959.
- 3) 池野勝哉, 宇野州彦, 高橋研也, 西畑剛, 藤井直樹, 保延宏行, 竹家宏治:CFRPでタンク基部を面的固定した津波漂流対策に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.75, No.2, 2019(投稿中).
- 4) 総務省消防庁:危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書, pp.70-78, 2009.
- 5) 消防庁危険物保安室:屋外貯蔵タンク津波被害シミュレーションツール, <https://www.fdma.go.jp/publication/simulatetool/simulatetool001.html>, 2012.
- 6) 稲垣聡, 池谷毅, 大森政則, 藤井直樹, 向原健, 畑山健:津波による屋外タンクの滑動・漂流実験および予測手法の提案, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.276-280, 2008.
- 7) OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, 参照 2018-12-20.

(2019.2.7 受付)

(2019.4.24 受理)

HYDRAULIC STUDY ON COUNTERMEASURE AGAINST SLIDING BY TSUNAMI OF OIL STORAGE TANK

Kenya TAKAHASHI, Katsuya IKENO, Kunihiro UNO, Takeshi NISHIHATA, Naoki FUJII, Hiroyuki HONOBE and Koji TAKEYA

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami, many oil storage tanks suffered great damage in the oil complex located in the coastal area. Of these, "small-scale tanks" less than 1,000 kL are reported to be about 90%, and it is extremely important to take safety countermeasures at the time of the tsunami targeting these.

Therefore, the authors have proposed countermeasures to prevent sliding and drifting with carbon fiber sheets (CFRP) that are excellent in durability (corrosion resistance), workability, and tensile strength, as a measure against tsunami to small-scale tank bodies. One is to restrain the tank base and the RC foundation by CFRP, and the other is to install an eye plate in the middle of the tank side plate via the CFRP and extend the wire to the ground anchor etc. In this study, hydraulic model experiments and CFD analysis for tsunami exerting force were performed on the proposed countermeasures.