

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

池野 勝哉¹・宇野 州彦²・高橋 研也²・西畑 剛³
藤井 直樹⁴・保延 宏行⁵・竹家 宏治⁶

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

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

³ 正会員 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 3,4F)

⁴ 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 9F)
E-mail: dfujii@tepsco.co.jp

⁵ 東電設計(株) 火力本部 (〒135-0062 東京都江東区雲 1-7-12 9F)

⁶ 正会員 (株) エスイー 営業本部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 8-11-1 7F)

2011年東北地方太平洋沖地震では、沿岸部に立地する多くの石油タンクが漂流し、流出油による火災が問題視されている。津波被害を受けた石油タンクの多くは、消防法令上の1,000kl未満である「小規模タンク」に該当し、これらを対象にした津波漂流対策が急務である。著者らは、小規模タンクを対象とした津波漂流対策として、通常、風対策として実施されているタンク基部のアンカーボルトに加えて、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によるタンク基部とRC基礎の面的固定を提案している(以下、CFRP対策)。本研究では、CFRP対策を施した小規模タンクが津波来襲前の地震時に損傷しないか確認するため、20kl級実大タンクを用いた振動台実験を実施した。さらに、同タンクに津波波圧を作用させた三次元非線形FEM解析を実施し、CFRPの漂流対策効果について考察した。

Key Words : tsunami, oil storage tank, CFRP sheet, shaking table test, finite element analysis

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、沿岸部に立地する多くの危険物屋外タンク貯蔵所(石油タンク)が地震動および津波により甚大な被害を受けた。このうち、津波被害に関しては、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、石油タンク本体の漂流だけでなく流出油による火災が問題視されている。津波被害を受けた石油タンク(計157基)のうち、500kl未満が約70%、500~1,000klが約20%と報告¹⁾されており、消防法令²⁾上の1,000kl未満である「小規模タンク」を対象にした津波漂流対策が急務である。

著者らは、小規模タンクを対象にした津波漂流対策として、通常、風対策として実施されているタンク基部のアンカーボルトに加えて、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によるタンク基部とRC基礎の面的固定を提案している(以下、CFRP対策)。CFRP対策は、アンカーボルトへの局所的な応力集中によるタンク基部の損傷および内容液の流出を防止すると

もに、タンク側板の座屈防止、津波作用時の浮上りや滑動防止効果を期待している(図-1)。

本研究では、CFRP対策を施した小規模タンクが津波来襲前の地震時に損傷しないか確認するため、20kl級実大タンクを用いた振動台実験を実施した。次に、三次元非線形FEM解析による振動台実験の再現解析を行い、小規模タンクの解析モデルにおける妥当性を確認した。最後に、同解析モデルに津波波圧を作用させた静的解析を実施し、CFRP対策の漂流対策効果を定量的に考察した。

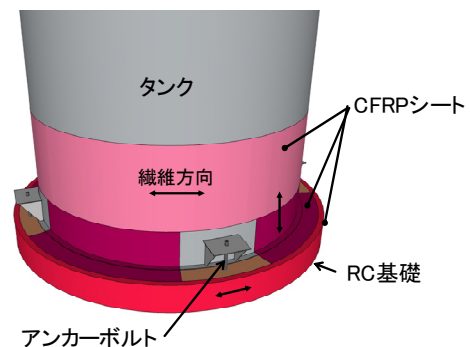


図-1 CFRPによる小規模タンクの津波漂流対策

2. 実大タンクの振動台実験

(1) 実験概要

実験は高さ 4000 mm, 内径 2500 mm の 20 kl 級実大タンクを用いた。振動台上に固定した敷鉄板に直径 3000 mm, 厚み 250 mm の RC 基礎を構築し, 20 kl 級実大タンクを設置して一方向の正弦波加振を行った。タンク内容液には, 振動台の定格重量を考慮し, タンク貯液率 60% (高さ 2400 mm) まで水道水を注水した。ここで, タンクの内容液は, 重油 (密度 $0.8 \sim 0.96 \text{g/cm}^3$) ではなく水道水を用いても, タンクの振動特性に大きな影響を及ぼさないと考えた。20 kl 級の実大タンクを図-2 に示す。タンクは円筒形で, 上部に天板はなく十字補強を施した構造とした。材質は SS400, タンク側板および底板ともに全て板厚は 4.5 mm である。タンク底板の外径は 2600 mm で底板が側面から 50 mm 張り出しており, タンク底板円周に溶接した 4 箇所のアンカーチェアから, M16 のアンカーボルトで RC 基礎と連結が可能な構造である。実験の状況を写真-1 に示す。

a) CFRP 補強材

CFRP 補強材として, 表-1 の特性を有する材料を使用した。タンク側面にプライマー, エポキシ樹脂系の下塗りを塗布したのち, タンク側面 (底板から 1000 mm 高さ)

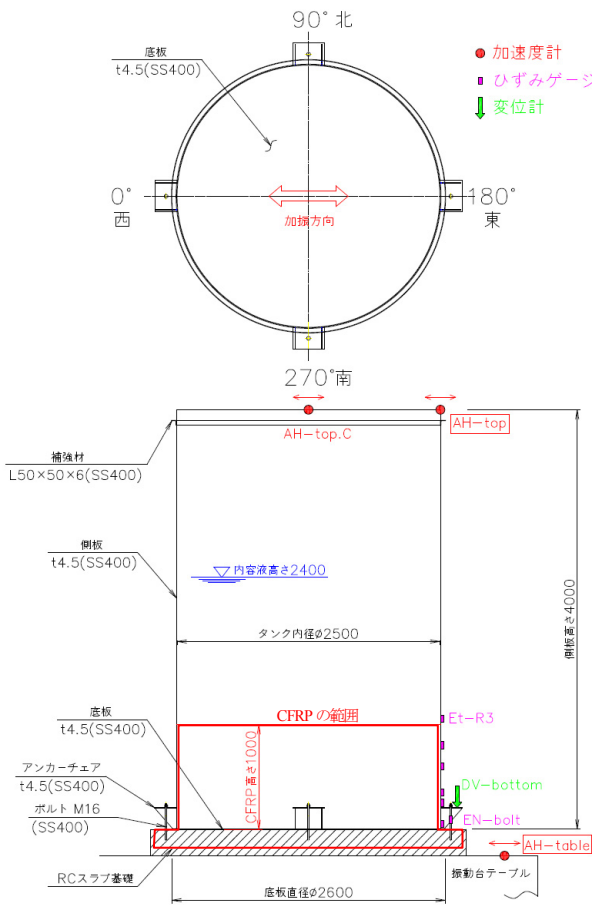


図-2 20 kl 級実大タンク (単位: mm)

と RC 基礎を CFRP で接着固定した。なお, CFRP の貼り付け手順は, 3 章で述べる。

b) 実験ケース

実験に先立ち, 実大タンクに Sweep 波 (30 Gal, 0.7 Hz ~ 70 Hz) を入力することでタンク振動を励起する共振周波数を同定し, 正弦波の入力周波数を設定した。タンク天端 (AH-top) と振動台 (AH-table) における加速度時刻歴の応答スペクトル比率を図-3 に示す。ここで, 告示式²⁾によるタンクの固有周波数 (以下, バルジング) およびタンク液面揺動の固有周波数 (以下, スロッシング) を算定すると, 前者が 57.3 Hz, 後者が 0.6 Hz である。図-3 より確認できるピーク周波数に対して, 告示式²⁾の算定値に近い 48.5 Hz をバルジングの周波数, 14 Hz はタ



写真-1 実験状況 (例: スロッシング)

表-1 CFRP 補強材

目付量	200	(g/m^2)
厚み	0.167	(mm)
引張強度	3400	(N/mm^2)
引張弾性率	230×10^3	(N/mm^2)

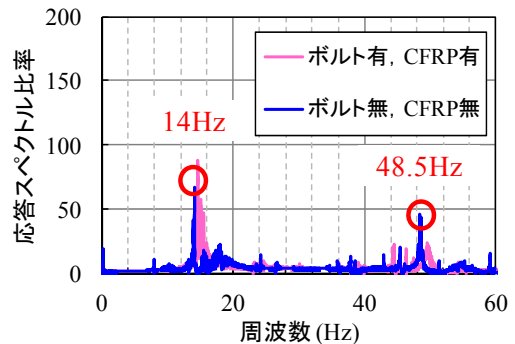
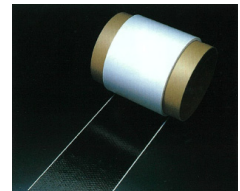


図-3 Sweep 波による応答スペクトル比率 (タンク天端 AH-top/振動台 AH-table)

クのロッキング挙動が見られたことからロッキングの周波数として設定した。また、図からは告示式²⁾によるスロッシング周波数0.6Hzを確認することができないため、振動台の加振制御が可能な0.7Hzをスロッシングの周波数とした。表-2に実験ケースを示す。実験ケースの加速度振幅は、予備加振により比較的大きなものを設定し、タンク基部のアンカーボルトおよびCFRPの有無による比較を行った。計測項目として、図-2に示した箇所での加速度、ひずみおよび変位をサンプリング周波数512Hzで収録した。

(2) 実験結果

実験で得られたボルト有・CFRP有におけるタンク天端(AH-top)の水平加速度時刻歴を図-4に示す。また、全ケースの加速度増幅率(AH-top/AH-table)およびタンク下部の最大鉛直変位を図-5に示す。バルジングおよびロッキング波では、入力された加速度振幅がタンク天端で約5~10倍に増幅し、大きな振動音が生じた。一方、スロッシング波では、加速度の増幅は少ないものの写真-1に示したようにタンク上方から内容液の飛沫が確認された。ロッキング波では、他の入力波と比べてタンク下部の鉛直変位が生じているが、ボルト有・CFRP有はそれぞれ無しのケースに比べて地震時の浮上りが抑制されている。

次に、タンク側板の鉛直方向に貼り付けた軸ひずみ分布(ひずみの正値が引張)を図-6に示す。図より、ロッキング波にはタンク側板に最大235μmの圧縮ひずみが確認できるが、降伏ひずみ(約1700μm)の14%程度である。紙面の都合上、図示を割愛するがアンカーボルトの軸ひずみも同様に軽微であり、CFRP対策によるタンク本体

への悪影響は無いものと考えられる。

次章では、他の入力波に比べてタンク下部の鉛直変位および側板のひずみが確認されたロッキング波を対象に、非線形FEM解析による検討を実施する。

表-2 実験ケース

入力波			対策工	
波名	周波数	加速度	ボルト	CFRP
バルジング	正弦波 48.5Hz	600Gal	○	○
			-	-
ロッキング	正弦波 14Hz	960Gal	○	○
			-	-
スロッシング	正弦波 0.7Hz	200Gal	○	○
			-	-

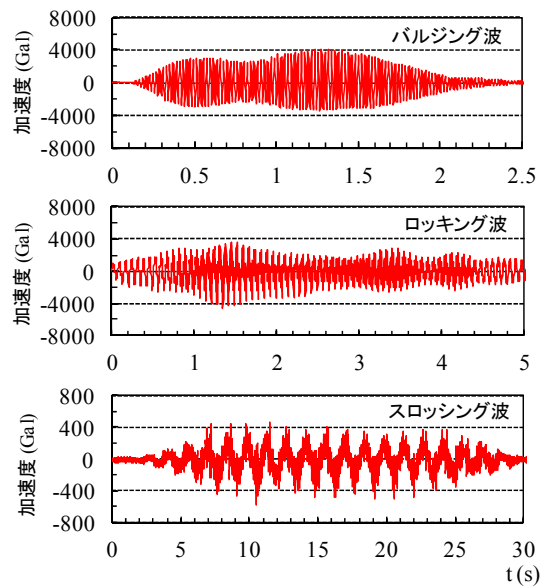


図-4 タンク天端(AH-Top)の水平加速度

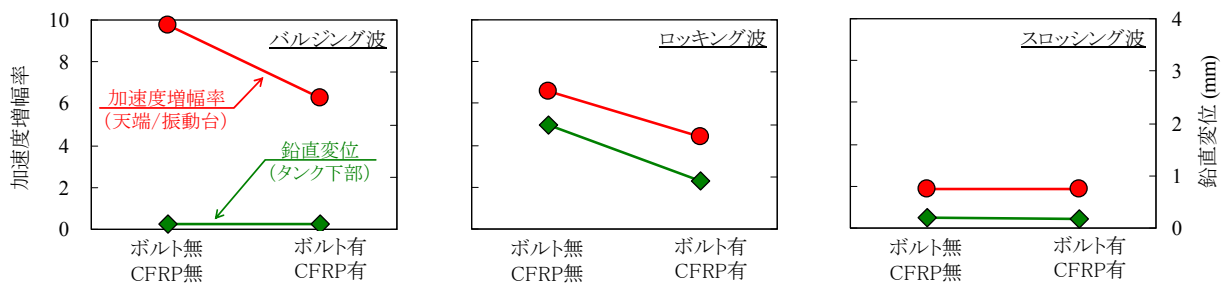


図-5 加速度増幅率とタンク下部の最大鉛直変位

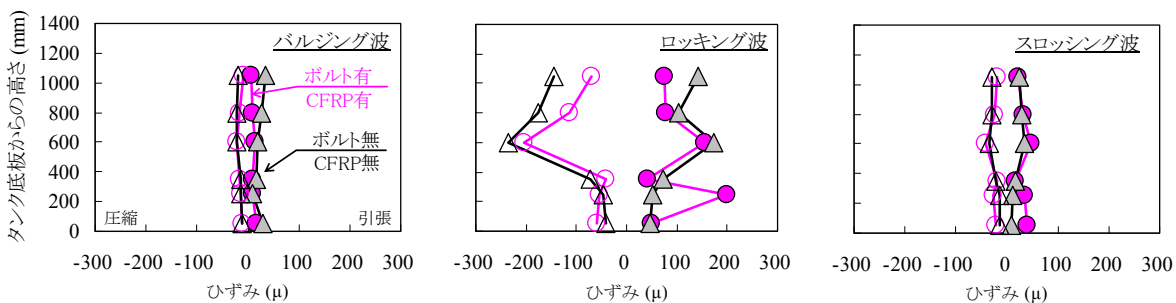


図-6 タンク側板の軸ひずみ分布

3. 非線形 FEM 解析による検討

(1) 解析概要

実験で使用した 20 kl 級実大タンクを三次元の非線形 FEM モデルとし、振動台実験のロッキング波（ボルト有、CFRP 有）を対象にした動的解析（再現解析）を実施した。更に、同モデルに津波波圧を作用させた静的解析を実施し、CFRP 対策の漂流対策効果を考察した。なお、解析には汎用 FEM プログラム DIANA⁴⁾を用いた。

a) 解析モデルおよび材料物性

解析モデルを図-7 に示す。解析モデルは実験の加振方向（東西）を軸とした 1/2 対称モデルとし、モデル対称面では Y 方向の並進を拘束した。タンク鋼板およびアンカーチェアをシェル要素、アンカーボルトを梁要素、CFRP をシェル要素、RC 基礎をソリッド要素、内容液（貯液率 60%）を流体要素としてモデル化した。ここで、CFRP は実験の貼り方と整合させるため、図-8 に示すステップでシェル要素を貼り合わせた。鋼材は降伏条件に Von Mises 基準を用い、2 次勾配を E/100 とするバイリニアモデルとした。CFRP は繊維方向（図中の矢印）に抵抗し、圧縮およびせん断に抵抗しないモデルとした。なお、部材間の境界要素として、CFRP~CFRP は剛、タンク鋼板

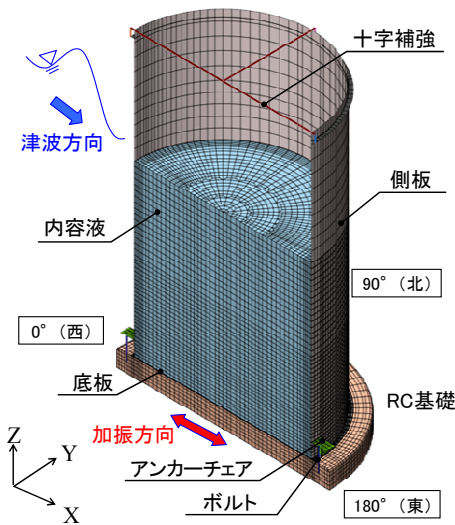


図-7 解析モデル

~CFRP および RC 基礎~CFRP には、法線方向の応力が面外強度に達した場合に剥離し、せん断強度に達した場合に滑るモデルとした。タンク底板~RC 基礎にはクーロン摩擦モデルを適用し、摩擦係数には複合構造標準式方書⁵⁾を参考に 0.3 を設定した。解析物性値の一覧を表-3 および表-4 に示す。

b) 動的解析の外力条件

実験のロッキング波を対象にした動的解析（再現解析）では、正弦波（16.5 Hz, 960 Gal）を RC 基礎底面に入力した。ここで、実験でのロッキング波は周波数 14 Hz であるが、解析モデルの固有値解析を実施すると 16.5 Hz がロッキングに近い周波数と判断された。この違いは、固有値解析ではタンク底板と RC 基礎との接触・剥離を考慮できないためだと考えられる。

c) 静的解析の外力条件

津波作用時の静的解析には、フルード数 $F_r \geq 1.3$ を満足する津波³⁾を対象に、タンク前面の津波水位 h_d^{\max} を 4.0 m および 2.0 m に設定した。検討ケースを表-5 に示す。ここで、タンク周囲に作用する津波波圧は、図-9 に示すような余弦曲線で考慮した。また、本研究では CFRP でタンク基部を RC 基礎に固定していることから、タンク底板には浸水がなく鉛直波圧が作用しないものとした。

表-3 部材毎の解析物性値

部材	降伏基準	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	降伏点 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
タンク鋼板 アンカーチェア	Von Mises バイリニア	2.0×10^5	0.3	340	475	77.0
アンカーボルト	Von Mises バイリニア	2.0×10^5	0.3	235	400	77.0
RC基礎	線形	2.5×10^4	0.2	—	—	24.5
CFRP	非線形	2.5×10^5	0.0	—	4588	18.4

表-4 各部材間の境界要素物性値

境界要素	法線初期 剛性 (kN/m ³)	せん断初期 剛性 (kN/m ³)	面外強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	備考
タンク鋼板 ~CFRP	2.0×10^8	1.0×10^8	38.4	16.0	
RC基礎 ~CFRP	2.0×10^8	1.0×10^8	5.0	2.9	
タンク底板 ~RC基礎	2.0×10^8	1.0×10^8	摩擦係数 0.3	粘着力(N/mm ²) 0.0	クーロン摩擦

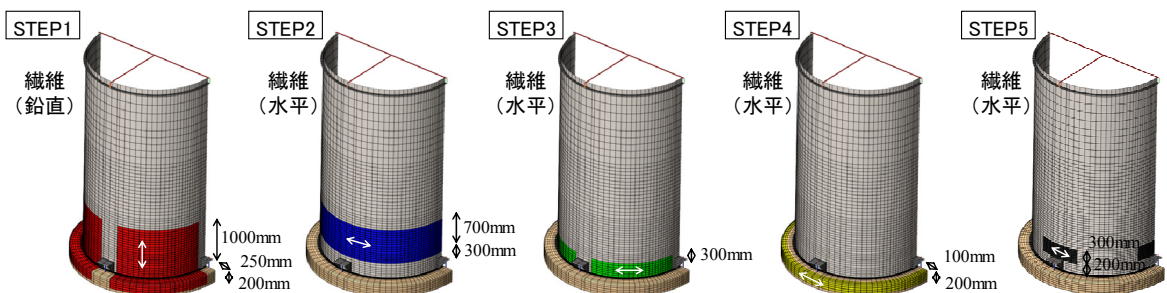


図-8 CFRP の貼り付け手順

表-5 検討ケース

解析ケース	対策工		外力
	ボルト	CFRP	
地震時動的解析	○	○	正弦波 16.5Hz, 960Gal
津波時静的解析	○	○	津波水位 $h_d^{\max}(0)=4.0\text{m}$
			津波水位 $h_d^{\max}(0)=2.0\text{m}$

(2) 地震時の動的解析

再現解析の時刻歴比較として、タンク天端 (AH-top)、ボルト軸ひずみ (BN-Bolt)、タンク側板軸ひずみ (Et-R3) およびタンク下部の鉛直変位 (DV-bottom) を図-10 に示す。なお、解析時間を考慮し入力波の波数を減らしているため、図中では時間軸を調整した主要動で比較している。また、先述した通り、実験 (14 Hz) と解析 (16.5 Hz) で入力した周波数が異なることを付記する。

解析結果は、実験におけるアンカーボルトおよびタンク側板の軸ひずみの振幅を捉えているが、タンク天端の加速度応答やタンク下部の鉛直変位に関して実験をやや過大評価している。これは、解析と実験で入力した正弦波の周波数が若干異なること、実験の境界条件を完全に再現した解析モデルには至っていないことが原因として考えられる。しかし、本解析では実験で見られたようなロッキング挙動が再現されていること、ボルトやタンク側板のひずみ挙動が捉えられていることから、同解析モデルは概ね妥当であると判断した。

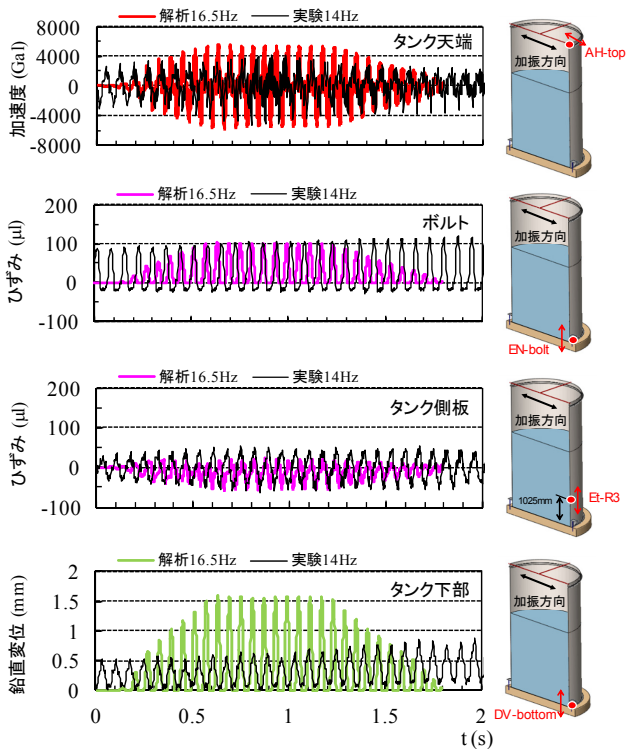


図-10 時刻歴波形の比較 (実験と解析)

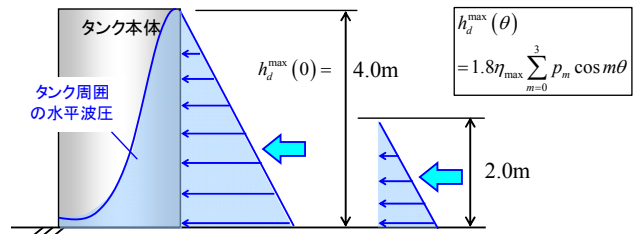


図-9 タンク本体に作用する津波波圧分布³⁾

(3) 津波時の静的解析

前節の解析モデルに津波水位 $h_d^{\max}=4.0\text{m}$ の分布荷重を作用させたタンク基部の Mises 応力および CFRP の軸方向応力を図-11 に示す。図より、津波作用側のタンク基部は若干浮上り、アンカーチェアには降伏値を超える 352N/mm^2 の応力が発生していることが分かる。CFRP の軸方向応力はタンク基部の隅角部に局部的に生じているが、最大 381N/mm^2 であり引張強度の10%に満たない値である。図-12 にタンク底板と RC 基礎間の境界要素におけるせん断応力分布を示す。図より、津波波力を底板面積で除したせん断応力 27.1kN/m^2 を超える領域は一部 (赤丸で図示) であり、津波波力の大半をアンカーボルト・CFRP が負担していると考えられる。図-12 のせん断応力と要素面積の積は、接触しているタンク底面の摩擦力であるため、津波波力からの差分はボルト・CFRP の負担分として考えることができる。そこで、津波水位 $h_d^{\max}=2.0\text{m}$ の結果と合せて、津波波力に対するタンクの漂流抵抗の負担率を図-13 に示す。図-13 より、津波波力に対するアンカーボルト・CFRP の負担率は、 $h_d^{\max}=4.0\text{m}$

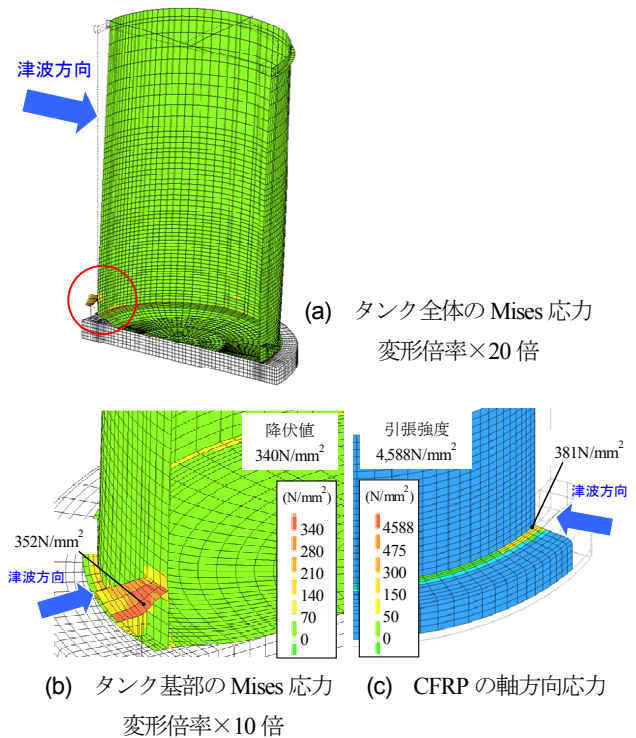


図-11 応力コンター (津波水位 $h_d^{\max}=4.0\text{m}$)

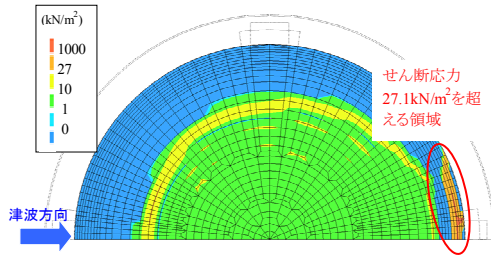


図-12 境界要素の底面せん断応力分布

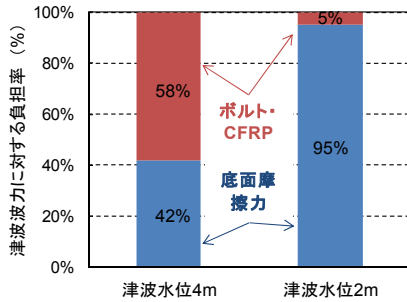


図-13 津波波力に対する負担率

が 58%であるのに対して、津波水位 $h_d^{\max}=2.0$ m では 5% であることが分かる。今回対象とした 20 kl 級実大タンク (貯液率 60%) においては、津波水位 $h_d^{\max}=2.0$ m に対して自重による底面摩擦で抵抗し、津波水位 $h_d^{\max}=4.0$ m が作用した時にアンカーボルト・CFRP による漂流対策効果が発揮されている。本研究では、20 kl 級 (貯液率 60%) に対して対策工の効果を評価したが、実用化に向けては更に規模の大きなタンクを対象にした解析的検討を加え、対策工の適用範囲を示す必要があると考えている。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 振動台実験では、最もタンクに挙動がみられたロッキング波においても、ボルトおよびCFRPによるタンク基部への悪影響はなく、地震後に来襲する津波漂流対策として機能を発揮するものと判断された。
- ② 振動台実験の動的解析 (再現解析) から本解析モデルは、実験で見られたロッキング挙動や、ボルトおよびタンク側板の軸ひずみ挙動を良好に捉えており、概ね妥当なモデルであると判断された。
- ③ 津波水位 $h_d^{\max}=4.0$ m を想定した静的解析では、アンカーチェアに降伏値を超える応力が発生したが、CFRPの軸方向応力は引張強度の10%程度であった。
- ④ 20 kl 級実大タンク (貯液率 60%) において、津波水位 $h_d^{\max}=2.0$ m は自重による底面摩擦で抵抗すること、 $h_d^{\max}=4.0$ m では底面摩擦に加えてアンカーボルトおよびCFRPによる漂流対策効果が発揮されることを解析的に示した。このような解析モデルを用いて、CFRPによる津波漂流対策効果を定量的に評価できるものと期待される。

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。本研究の遂行にあたり、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。

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) 総務省:危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示, 告示第166号 第四条の二十, 2013.
- 3) 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.70-72, 2009.
- 4) DIANA-10.2 User's Manual, DIANA FEA BV.
- 5) 土木学会:複合構造標準示方書 [設計編], 丸善, pp.57-58, 2014.

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

STUDY ON TSUNAMI DRIFTING COUNTERMEASURE OF OIL STORAGE TANK WITH BASE FIXED USING CFRP

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

In 2011 Tohoku Pacific Ocean Earthquake, many oil storage tanks located in the coastal area drifted, and fire caused by spilled oil is a problem. Many of the oil storage tanks damaged by the tsunami are small-scale tanks that are less than 1,000kl, and these countermeasures for tsunami drifting are urgent. Therefore, the authors suggest fixed between the tank base and the RC slab using CFRP sheet that is excellent in durability, workability and tensile strength. In this paper, to confirm the influence on this measure at earthquake, shaking table test using 20kl tank was carried out. In addition, the effect of countermeasures against drifting during tsunami wave action was examined by nonlinear finite element analysis.