

# CFRPにより基部を面的固定した 危険物屋外貯蔵タンクの剥離特性 を考慮した津波適用限界の評価

宇野 州彦<sup>1</sup>・保延 宏行<sup>2</sup>・池野 勝哉<sup>3</sup>・  
高橋 研也<sup>3</sup>・藤井 直樹<sup>4</sup>・竹家 宏治<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 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: kunihiko.uno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 東電設計(株) 火力本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 9F)

<sup>3</sup> 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)

<sup>4</sup> 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

<sup>5</sup> 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甚大な被害を受けた。津波被害を受けた石油タンクの約90%が1,000 kL未満である「小規模タンク」に該当し、これらを対象とした津波漂流対策が急務である。著者らは小規模タンクの津波漂流対策として、CFRPによるタンク基部とRC基礎の面的固定を提案しており、これまでに実験や解析を通じてその効果を確認している。しかし、津波波力が作用した際のタンク本体とCFRPおよびRC基礎とCFRPとの剥離特性が明らかになっておらず、本工法の適用範囲の設定が困難であった。そこで本研究では、要素実験と再現解析からCFRPの剥離特性を明らかにした上で、剥離特性を考慮した小規模タンクのFEM解析を実施し、本工法における津波適用限界と対策効果を定量的に示した。

**Key Words :** oil storage tank, applicable limit of tsunami heights, CFRP sheet, peeling characteristics, element experiment, finite element analysis

## 1. はじめに

2011年に発生した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(以下、石油タンク)が甚大な被害を受けた。石油タンク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が報道で大きく取り上げられた。津波被害を受けた石油タンクのうち、500 kL未満が約70%、500~1,000 kLが約20%と報告<sup>1)</sup>されており、消防法令<sup>2)</sup>上の1,000 kL未満である「準特定屋外タンク貯蔵所」ならびに「特定および準特定屋外タンク貯蔵所以外の屋外タンク貯蔵所」(以下、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、小規模タンクの津波漂流対策として、耐久性(耐食性)、施工性および強度に優れた炭素繊維シート(以下、CFRP)を用いた面的な固定方法を提案している(図-1)<sup>3),4)</sup>。しかし、津波波力が作用した際のタンク本体とCFRPおよびRC基礎とCFRPとの剥離特性が明らか

になっておらず、本工法の適用範囲の設定が困難であった。さらに、本工法は津波作用時にタンク基部の底板隅角部に大きな応力を生じることが分かっており、内容液流出の要因となる隅角部の損傷を防ぐ追加対策が必要であった。そこで本研究では、要素実験と三次元非線形FEMに基づく再現解析から、CFRPの剥離特性を明らかにした上で、CFRPの剥離特性を考慮したスケールの異なる2種類の小規模タンクに対する三次元非線形FEM解析を実施し、本工法における津波適用限界を示す。

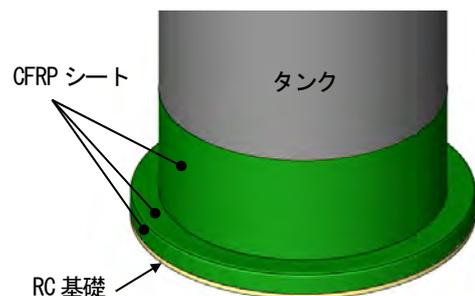


図-1 CFRPによる小規模タンクの津波漂流対策

## 2. CFRP の剥離特性と緩衝材の効果に着目した要素実験

### (1) 実験概要

CFRP の剥離特性に着目するため、実物タンクの一部を切り出した要素実験とする。要素実験の荷重イメージを図-2 に示す。実験は高さ 1500 mm, 平面寸法 1000 mm × 1000 mm の矩形模型を対象とした。模型は高さ 250 mm, 平面寸法 1500 mm × 1500 mm の RC 基礎上に設置し、模型の一端を RC 基礎とピン接合している。荷重時に模型の変形が剥離特性に影響を及ぼさないよう、模型は剛体として取り扱えるように模型内部を鉄筋および鋼材により補強した上、内部にコンクリートを打設している。模型の材質は SS400, タンク側板および底板ともに板厚は全て 4.5 mm である。なおタンク底板は実際のタンク構造を模擬するため、側面から 50 mm 張り出した構造としている。

#### a) CFRP 材

本実験で使用した CFRP 材の特性を表-1 に示す。CFRP の一般的な施工方法に倣い、タンク側面および RC 基礎上面と側面にプライマーとエポキシ樹脂系の下塗り材レジンを塗布した後 CFRP を貼付し、さらにレジンを上塗りして接着した。

#### b) 緩衝材

CFRP を用いた対策工法は、津波波力等が作用した際に、タンク底板の隅角部において大きな応力が発生する可能性が懸念される。隅角部付近が損傷した場合はタンク内容物の流出に繋がるため、損傷を防ぐ対策が必要である。そこで本研究では、写真-1 に示す緩衝材を設置する方法を考案した。実験で使用した緩衝材は発泡スチロールで、発泡率が 90 倍のものである。緩衝材の効果を確認するため、要素実験において緩衝材のないケース (以下, Case1), 緩衝材の厚さ 5 mm を設置するケース (以下, Case2), 厚さ 20 mm を設置するケース (以下, Case3) の計 3 ケースを実施することとした。

### c) 実験ケースおよび計測項目

実験は、1000 kN の荷重ジャッキを用いてタンク頂部に水平荷重を作用させた。荷重速度は、荷重初期から緩衝材上面の CFRP の剥離が始まる区間までを 0.02 mm/s とし、その後タンク頂部の水平変位が 20 mm 増加する毎に 0.02 mm/s ずつ速度を上げ、0.1 mm/s からは速度一定として CFRP が完全に剥離するまで荷重を実施した。

計測項目として、図-3 に示すように荷重位置における荷重荷重と水平変位、およびタンク側面、底板張り出し部、RC 基礎においてひずみを計測した。タンク側面や底板張り出し部においては CFRP の剥離状況を捉えるため、CFRP とタンク本体、CFRP と底板張り出し部の同位置にひずみゲージを貼付した。

### (2) 実験結果

実験では写真-2 に示すように、CFRP の剥離状況とその後の終局状態を観察した。CFRP の剥離特性に関わる結果は、次章において実験と再現解析を比較、考察する。

タンク底板の張り出し部の応力状況を確認するため、張り出し部の鋼板と CFRP それぞれで計測されたひずみを図-4 に示す。緩衝材を設置していない Case1 では、張り出し部の底板側に降伏ひずみ (=1781  $\mu$ ) を超える大きなひずみが発生している一方で、CFRP に発生したひず

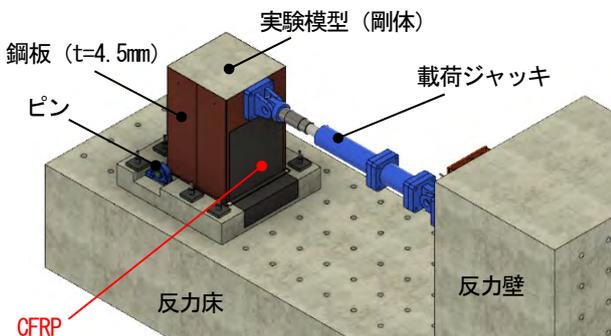


図-2 荷重実験のイメージ

表-1 CFRP 材

目付量	200	(g/m <sup>2</sup> )
厚さ	0.167	(mm)
引張強度	3400	(N/mm <sup>2</sup> )
引張弾性率	230 × 10 <sup>3</sup>	(N/mm <sup>2</sup> )

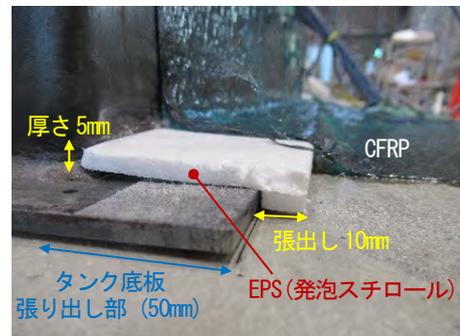


写真-1 緩衝材の設置状況 (厚さ 5 mm)

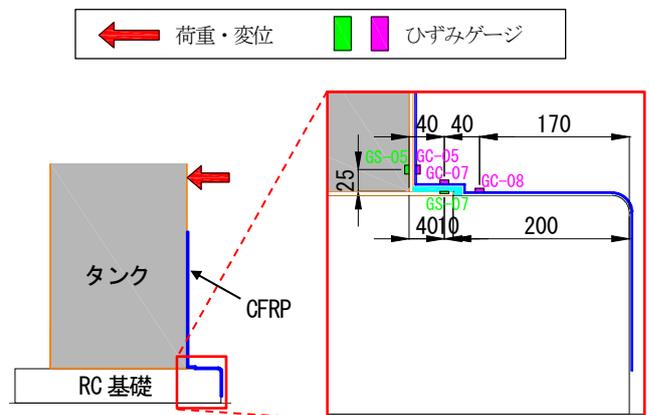


図-3 要素実験の計測位置 (単位: mm)



写真-2 実験模型の終局状態

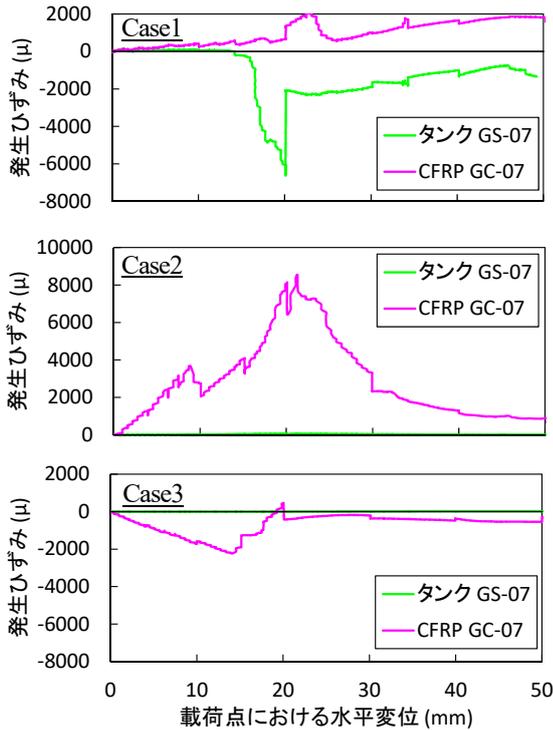


図-4 底板張り出し部に発生したひずみ

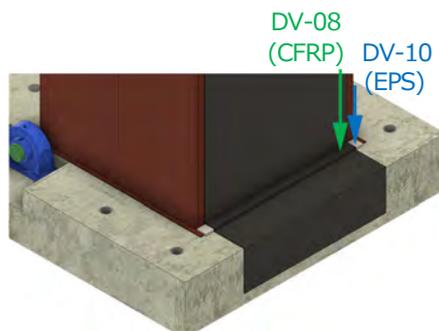


図-5 緩衝材変形量の計測位置

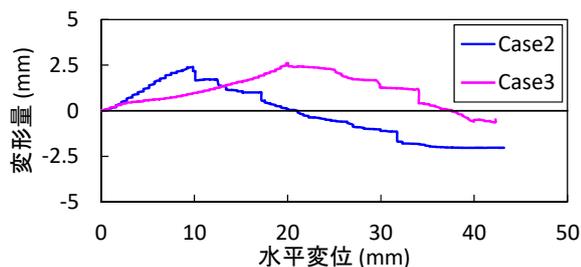


図-6 緩衝材の変形量 (DV-08)と(DV-10)の差分

みは2000 $\mu$ 程度に留まっている。タンク頂部の水平変位が大きくなると張り出し部には浮き上がりが生じるが、浮き上がりの際に張り出し部に貼付しているCFRPが底板部の上向き変位を拘束するため、大きなひずみが発生していると考えられる。一方、緩衝材を設置したCase2やCase3においては、張り出し部の底板側にはひずみが発生しておらず、CFRPにひずみが集中している。このことから、緩衝材の設置により底板張り出し部の損傷を回避し、CFRPが載荷荷重を負担していることが分かった。次に緩衝材の圧縮変形量を定量的に把握するために、図-5に示すようにCFRPを貼付している箇所(DV-08)と緩衝材のみの箇所(DV-10)の変位量をそれぞれ計測し、その差分から圧縮変形量を求めた(図-6)。図の変形量の正値が圧縮量を示している。Case2, Case3のいずれにおいても緩衝材が最大で2.5 mm程度圧縮されていることが分かる。その後圧縮量が減少するのは、CFRPが底板部から剥離していくためである。このことから、タンク変位時に緩衝材が圧縮されることで底板張り出し部には応力が発生せず損傷を防ぐことが可能であること、本研究で対象としたような底板張り出し部長さが50 mm程度であれば、厚さ5 mm程度の緩衝材を設置すればよいことが明らかとなった。

### 3. 要素実験の再現解析

#### (1) 再現解析の概要

CFRPの剥離特性を把握するため、要素実験で使用した矩形模型の再現解析を実施した。解析には汎用FEMプログラムDIANA<sup>3)</sup>を用いた。解析モデルを図-7に示す。解析モデルは奥行き方向に模型幅を考慮した三次元モデルとしている。タンク鋼板およびCFRPをシェル要素、RC基礎およびタンク内部コンクリートをソリッド要素としてモデル化した。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は繊維方向の引張試験をJIS K 7165、圧縮試験をJIS K 7018に基づき実施し、それぞれの弾性係数を設定している。一般にCFRP単体では圧縮方向へはほとんど抵抗しないが、CFRPにエポキシ系樹脂を含浸・硬化した状態の試験片を用いて試験を実施しているため、圧縮時の弾性係数は引張方向の半分ほどとなっている。なお、部材間の境界条件として、タンク鋼板~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。本研究では、要素実験が再現できる法線方向の面外強度を解析的に求める。緩衝材についても境界要素でモデル化し、法線方向およびせん断方向の初期剛性は非常に小さな値とし、圧縮変位量が5 mm以上となると非

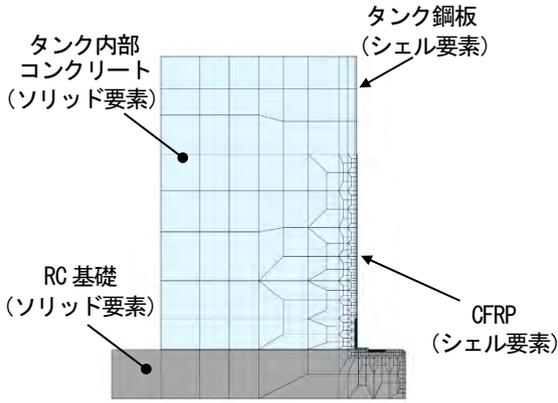


図-7 再現解析モデル

表-3 境界要素の解析物性値

境界要素	法線方向初期剛性 (kN/m <sup>3</sup> )	せん断方向初期剛性 (kN/m <sup>3</sup> )	面外強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )
タンク鋼板 ~CFRP	2.0×10 <sup>8</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	15 <sup>**</sup>	8.66
RC基礎 ~CFRP	2.0×10 <sup>8</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	15 <sup>**</sup>	8.66

境界要素	法線方向初期剛性 (kN/m <sup>3</sup> )	せん断方向初期剛性 (kN/m <sup>3</sup> )	摩擦係数	粘着力 (N/mm <sup>2</sup> )
タンク底板 ~RC基礎	2.0×10 <sup>8</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	0.3	0.0

※面外強度は再現解析にて求めた確定値

常に大きな剛性となるパイリニアモデルとした。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示方書<sup>6)</sup>を参考に0.3を設定した。解析物性値の一覧を表-2、表-3に示す。

(2) 再現解析の結果

本節では、タンク鋼板~CFRPの面外強度を15 N/mm<sup>2</sup>、RC基礎~CFRPの面外強度を15 N/mm<sup>2</sup>と設定した際の結果を示す。荷重ジャッキ位置における荷重と水平変位の関係を図-8に示す。実験結果は、荷重初期の荷重15 kNを計測するまでは剛性が非常に高くその後やや緩やかとなり、水平変位10 mm付近で最大荷重を記録し、その後しばらくは荷重が一定となり、水平変位20 mm以降緩やかに荷重が減少しているが、その状況を解析で概ね捉えることができている。タンク側面およびRC基礎に貼付したCFRPのひずみを図-9に示す。CFRPが剥離するタイミングで大きなひずみが発生するが、解析結果は実験の傾向を概ね再現できている。なお、タンク側面ひずみ(GC-05)の解析結果は、大きなひずみが発生した後ほぼひずみが発生していないが、解析では水平変位が100 mm程度まではCFRPが完全に伸び切っておらず、CFRPの隅角部においてひずみを負担している状況である。一方、実験においては弛みのない状態で剥離が進行したため、発生ひずみに差異があったと考えられる。また、要素実験はRC基礎が必要強度に達した後に間もなく実施したことから、コンクリートの風化や劣化が進行していなければ鋼材と同等の接着強度を有することが分かった。

表-2 使用材料の機械的性質

部材	降伏基準	弾性係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	降伏点 f <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 f <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	単位体積重量 ρ (kN/m <sup>3</sup> )
タンク鋼板	Von Mises	2.0×10 <sup>5</sup>	0.3	362.5	475.2	77.0
RC基礎	パイリニア	2.5×10 <sup>4</sup>	0.2	—	—	24.5
CFRP	線形	2.7×10 <sup>5</sup> (引張時)	0.0	—	4,181	18.4
		1.3×10 <sup>5</sup> (圧縮時)			1,288(圧縮)	

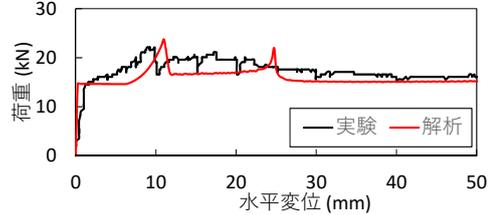


図-8 荷重位置における荷重-変位関係

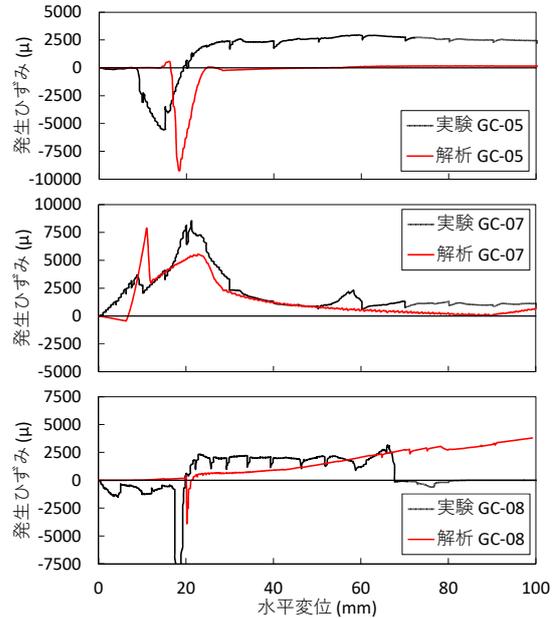


図-9 CFRPに発生したひずみの比較(実験と解析)

4. CFRP対策を講じた小規模タンクの津波適用限界の評価

(1) 解析の概要

三次元非線形FEM解析により、20 kL級と500 kL級の小規模タンクについて津波適用限界を評価する。解析プログラムは前章と同様、DIANAを使用した。解析モデルを図-10に示す。解析モデルは津波波力の作用方向を対称軸とした1/2モデルとし、モデル対称面ではY軸の並進方向を拘束した。各材料の解析要素は、前章と同じである。タンク鋼材やCFRPの物性値については、前章では実験で使用した材料の性能試験結果から物性値を設定したが、ここでは実務設計を意識して公称値とした。鋼材の降伏強度は235 N/mm<sup>2</sup>、引張強度は400 N/mm<sup>2</sup>とし、CFRPは引張時の弾性係数を2.5×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>、圧縮

時の弾性係数については材料試験結果を参考に  $1.2 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>とし、引張強度を 3,400 N/mm<sup>2</sup>、圧縮強度の限界値は定義しないモデルとした。またタンク形状が円形であることから、CFRP の繊維直角方向の剛性も解析結果に影響を与える。本来 CFRP の繊維直角方向は外力にほとんど抵抗しないが、繊維方向の圧縮時と同様に含浸したエポキシ樹脂が抵抗に寄与すると想定し、引張時と圧縮時ともに繊維方向の圧縮時弾性係数である  $1.2 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>を設定した。その他の物性値は前章と同じである。CFRP の面外強度は、再現解析より鋼材～CFRP、RC 基礎～CFRP とともに 15 N/mm<sup>2</sup>と算定されたが、想定される小規模タンクにおいては、RC 基礎の表面が風化している可能性もあるため、本章では RC 基礎～CFRP の面外強度をコンクリートへの接着強度の保証値である 1.5 N/mm<sup>2</sup>に変更した。鋼材～CFRP の面外強度は 15 N/mm<sup>2</sup>としている。緩衝材については前章の結果を踏まえ、厚さ 5 mm とした。タンク内容液の貯液率は、関係機関へのヒアリングを行い、本研究では比較的頻度の高い 50% で設定した。ただし、CFRP の荷重負担割合や津波適用限界は貯液率により変化するため、貯液率をパラメータとした検討は今後必要であると考えている。解析で作用させる津波波力はフルード数  $F_r \geq 1.3$  を満足する津波<sup>7)</sup>を対象とし、津波水位  $h_d^{\max}$  を漸増させる解析を実施した。タンク周囲に作用する津波波圧は、図-11 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。

(2) 津波適用限界の評価

図-12 に 20 kL 級および 500 kL 級タンクの津波水位と水平変位の関係を示す。20 kL 級タンクにおいては、津波水位  $h_d^{\max}=2.5$  m で緩衝材の圧縮変位量が最大となり、 $h_d^{\max}=2.8$  m で RC 基礎上面の CFRP が剥離し始める。その後大幅な変位増加が見られ、 $h_d^{\max}=3.2$  m で CFRP が引張強度に達している。500 kL 級タンクにおいては、津波水位  $h_d^{\max}=5.9$  m で緩衝材の圧縮変位量が最大となり、 $h_d^{\max}=6.4$  m になると CFRP の剥離が進展するとともに変位が増加し始め、 $h_d^{\max}=6.7$  m で CFRP が引張強度に達し

ている。20 kL 級タンクにおいては、RC 基礎上面の CFRP が剥離し始める  $h_d^{\max}=2.8$  m から CFRP の剥離が進展しないまま変位が急激に増加し CFRP の引張強度に至っているため、 $h_d^{\max}=2.8$  m が本工法における津波適用限界と考えられる。500 kL 級タンクは、 $h_d^{\max}=6.4$  m から CFRP の剥離が進展し変位も増加していくため、この津波水位が本工法の津波適用限界であると考えられる。CFRP 対策の効果を定量的に示すため、無対策における津波適用限界の水位を消防庁の算定式<sup>7)</sup>より求めると、滑動安全率が 1.0 となる津波水位は 20 kL 級タンクで  $h_d^{\max}=1.7$  m、500 kL 級タンクで  $h_d^{\max}=4.0$  m となり、いずれのタンクにおいても CFRP 対策により津波適用限界水位が 1.6 倍となった。20 kL 級および 500 kL 級タンクの津波適用限界におけるタンク底板隅角部付近 (図-10 の赤丸) に生じた Mises 応力と CFRP の軸方向応力を図-13 に示す。Mises 応力は、20 kL 級タンクでは最大 108 N/mm<sup>2</sup>、500 kL 級タンクでは最大 109 N/mm<sup>2</sup> と弾性範囲内であり、緩衝材の効果が確認できる。CFRP の軸方向応力は、20 kL 級タンクでは最大 345 N/mm<sup>2</sup>、500 kL 級タンクでは最大 348 N/mm<sup>2</sup> であり、引張強度の 10% 程度であった。津波適用限界におけるタンクの漂流抵抗の負担率を図-14 に示す。津波波力に対するタンクの漂流抵抗は、自重によるタンク底面の接触摩擦力と CFRP による引張力がそれぞれ寄与すると想定しており、タンク底板全体で発生したせん断力を津波作用荷重から引いたものが CFRP の負担荷重と考え、それぞれの負担率を算定している。図より、20 kL 級タンク、500 kL 級タンクのいずれにおいても CFRP が津波波力の 6 割以上を負担していることが分かった。

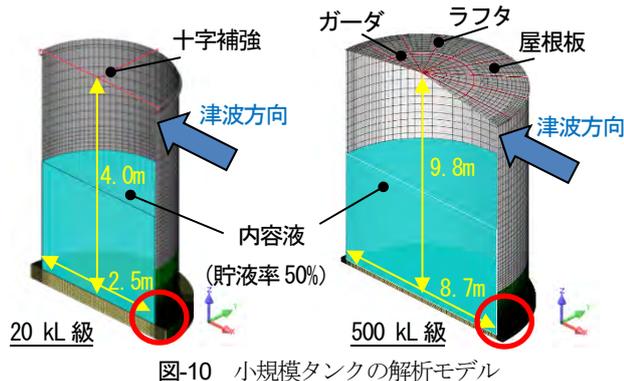


図-10 小規模タンクの解析モデル

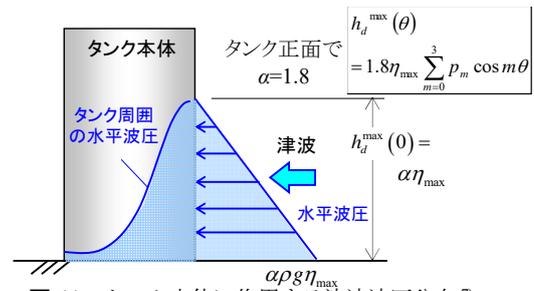


図-11 タンク本体に作用する津波波圧分布<sup>7)</sup>

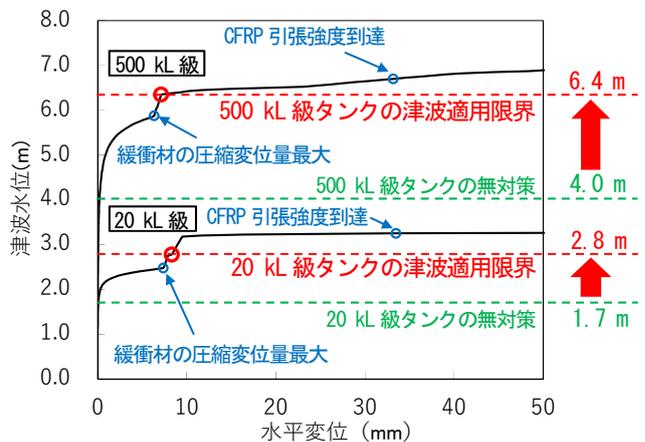


図-12 津波水位—水平変位関係

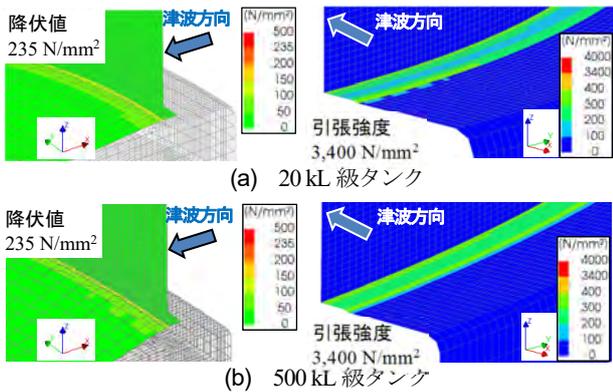


図-13 津波適用限界時のタンク底板隅角部付近の応力(左)とCFRPの軸方向応力(右)

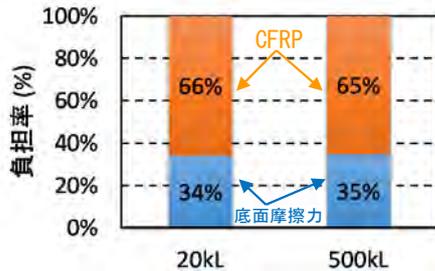


図-14 津波適用限界時の津波波力に対する負担率

## 5. まとめ

- 要素実験から、底板張り出し部に緩衝材を設置することで底板部に発生する応力を緩和し、既存設備が本来保有する構造的な性能に影響を与えないことが示された。
- 要素実験とその再現解析から、タンク本体とCFRPおよびRC基礎とCFRPとの剥離特性が明らかとなった。また、風化や劣化の進んでいないコンクリートであれば、鋼材と同等の接着強度を有することが分かった。
- 津波適用限界水位においては、20 kL 級および 500 kL 級のいずれの小規模タンクにおいても、CFRP が津波波力の 6 割以上を負担しており、CFRP による津波漂流対策を定量的に評価できた。

・20 kL 級および 500 kL 級の小規模タンクにおける津波水位の適用限界は、無対策と比較していずれも 1.6 倍となり、対策効果を定量的に示すことができた。CFRP の剥離が進展すると水平変位が急激に増加するため、CFRP の剥離が始まるまでを本工法の津波適用限界として提案している。なお、適用限界水位においても、タンク本体に降伏値を超える応力は発生せず、CFRP の軸方向応力は引張強度の 10% 程度であった。

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秋葉研究統括官、畑山室長、危険物保安技術協会の宮内課長、静岡市消防局の皆様、東北大学の今村教授から有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 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.
- 総務省:危険物の規制に関する政令, 政令第3号, 第11条第1項第3号の3, 1999.
- 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, pp.I\_767-I\_772, 2019.
- 高橋研也, 池野勝哉, 宇野州彦, 西畑剛, 藤井直樹, 保延宏行, 竹家宏治: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, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I\_25-I\_30, 2019.
- DIANA-10.3 User's Manual, DIANA FEA BV.
- (公社)土木学会:複合構造標準示方書[設計編], 丸善, pp.57-58, 2014.
- 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.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

## EVALUATION ON APPLICABLE LIMIT OF TSUNAMI HEIGHTS FOR OIL STORAGE TANK WITH BASE FIXED USING CFRP BY CONSIDERING PEELING CHARACTERISTICS

Kunihiko UNO, Hiroyuki HONOBE, Katsuya IKENO,  
Kenya TAKAHASHI, Naoki FUJII and Koji TAKEYA

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, many oil storage tanks located in the coastal area were found to be damaged severely. Approximately 90 percent of the damaged oil storage tanks are small-scale tanks which are less than 1,000 kL, and countermeasures for those tanks are urgent. Authors proposed countermeasure for tsunami drifting by fixing the tank base and the RC slab by CFRP sheet. However, the peeling characteristics between tank and CFRP, RC slab and CFRP remain unclear. In this study, element experiment and reproductive analysis are conducted to clarify the peeling characteristics. Thus, applicable limit of tsunami heights and countermeasure effectiveness are evaluated by conducting finite element analysis with consideration of peeling characteristics.