

3. 研究の内容と成果

危険物屋外貯蔵タンクの津波・水害による滑動等対策工法の確立

○藤井直樹¹・保延宏行¹・池野勝哉²・高橋研也²・宇野州彦²・竹家宏治³・早川道洋³
海野正一⁴・今村文彦⁵

Naoki Fujii, Hiroyuki Honobe, Katsuya Ikeno, Kenya Takahashi, Kunihiro Uno, Koji Takeya, Michihiro Hayakawa, Syoichi Unno and Fumihiko Imamura

研究課題の要旨: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(石油タンク施設)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、津波に関しては、危険物屋外貯蔵タンク(石油タンク)に漂流等の移動被害が発生した。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、これらの津波被害を予防・軽減するため、津波時の安全対策を講じることは急務となっているが、石油タンクに対する津波対策は未だ課題として残されている。そこで本研究では、小規模タンク周りで実施することが可能な津波被害の軽減対策工を提案する。提案する滑動・漂流防止対策工としては耐津波性・耐震性・施工性・構造成立性等の観点から有効な2対策案を選定し、実験や解析を通じて本工法における津波適用限界を把握するとともに、その対策効果を定量的に示した。さらに、対策工の設計・施工方法、積算について、基礎資料として取りまとめた。

キーワード: 危険物屋外貯蔵タンク、津波、滑動・漂流防止対策工、炭素繊維シート(CFRP)、模型実験、FEM解析、津波適用限界、設計、施工、積算

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等において多くの危険物屋外タンク貯蔵所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等で大きく取り上げられた。石油タンク本体は津波により漂流するとともに、配管は損傷するなどして大量の石油が流出したため、流出油と火災との関連性について指摘されている。このような津波が浸水した地域に発生する二次災害である津波火災は、1964年(昭和39年)新潟地震においても発生している。新潟地震では、地震動により石油タンクが破壊され、流失した油が発火し、津波浸水域に火災が広がった。沿岸域には大量の危険物が貯蔵されているため、津波時の安全方策を講じることは急務となっているが、石油タンクに対する津波対策は未だ課題として残されている。

そこで本研究では、石油タンク周りで実施することが可能な津波被害「滑動」「漂流」を防止する対策工を提案することを目的とする。本研究では、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-1.1に滑動・漂流防止対策工概念図を示す。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はタンク側板にCFRPを介してアイプレートを設置し、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。

本研究では、タンクの津波による滑動・漂流防止対策工を立案し、最初に地震時における滑動・漂流防止対策工1の耐震性能について検討する。そして、津波による滑動・漂流防止対策工に対する水理的検討を実施する。次に、対策工1および対策工2の津波適用限界について実験と解析により評価する。最後に、対策工の設計・施工方法、積算について取りまとめる

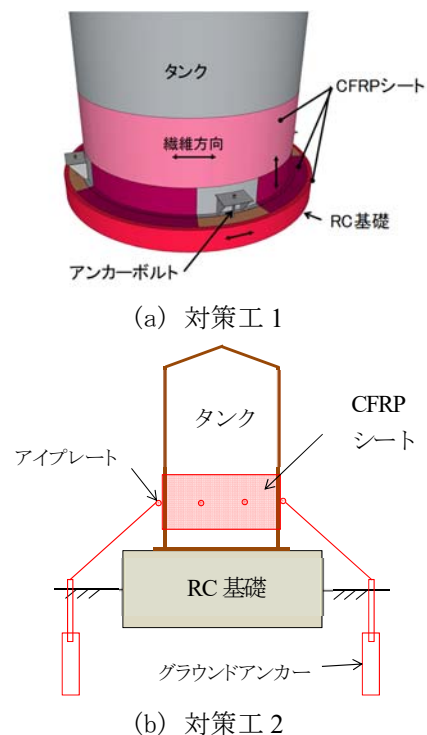


図-1.1 滑動・漂流防止対策工概念図

(所属機関名)

- 1 東電設計株式会社
- 2 五洋建設株式会社
- 3 株式会社エヌイー
- 4 静岡市消防局
- 5 国立大学法人東北大学

2. 小規模タンクの津波による滑動・漂流防止対策工の立案

2.1 日本国内での設置状況

既往資料¹⁾に示される「小規模タンクの実態把握」の調査結果の抜粋を表-2.1、表-2.2に示す。

屋外タンクの貯蔵所数（平成9年3月）は容量別に示されている（表-2.1）。これによると容量100kL未満のタンクは全体の67%程度を占め、500kL未満は全体の82%程度である。また、小規模タンクの基礎状況も示されている（表-2.2）。これによると下記のことがいえる。

- ・100kL以下ではRCスラブ基礎の割合が48%程度

表-2.1 容量別屋外タンクの貯蔵所数¹⁾

合計	100kL未満	100kL以上 500kL未満	500kL以上 1,000kL未満	1,000kL以上 10,000kL未満	10,000kL以上
84,553	56,522	12,763	5,584	6,876	2,808

表-2.2 小規模タンクの容量別基礎構造状況¹⁾

	100 kL	200 kL	300 kL	400 kL	500 kL	600 kL	700 kL	800 kL	900 kL	1,000 kL	合計
盛土	215	112	41	22	48	32	11	7	11	65	564
外傍RCリング	144	72	42	20	52	33	13	10	3	80	469
杭	251	88	41	42	48	46	14	4	17	80	631
砕石直下リング	3	14	0	6	7	1	0	3	5	10	49
直下RCリング	540	93	39	32	56	40	1	4	1	35	841
RCスラブ	1,341	141	45	19	23	25	6	4	20	16	1,640
その他	249	11	5	1	2	0	0	2	2	1	273
合計	2,743	531	213	142	236	177	45	34	59	287	4,467

- ・100kL以下でRCスラブ、RCリング、杭基礎の合計割合は77%。
 - ・500kL以下では、RCスラブ、RCリング、杭基礎の合計割合は62%。
- 上記より500kL以下の小規模タンクの設置基数が多いことがわかった。

2.2 現地状況

静岡市消防局管内にてタンクの敷設状況を調査した。小規模タンクが多く設置されている漁港（清水・用宗・由比）にて調査を実施した。写真-2.1～2.3と表-2.3に調査結果を示す。結果として、

- ・100kL以下が55%程度、500kL以下が88%程度
- ・RCスラブ基礎の割合が88%程度
- ・アンカーを有するタンクは全体の66%

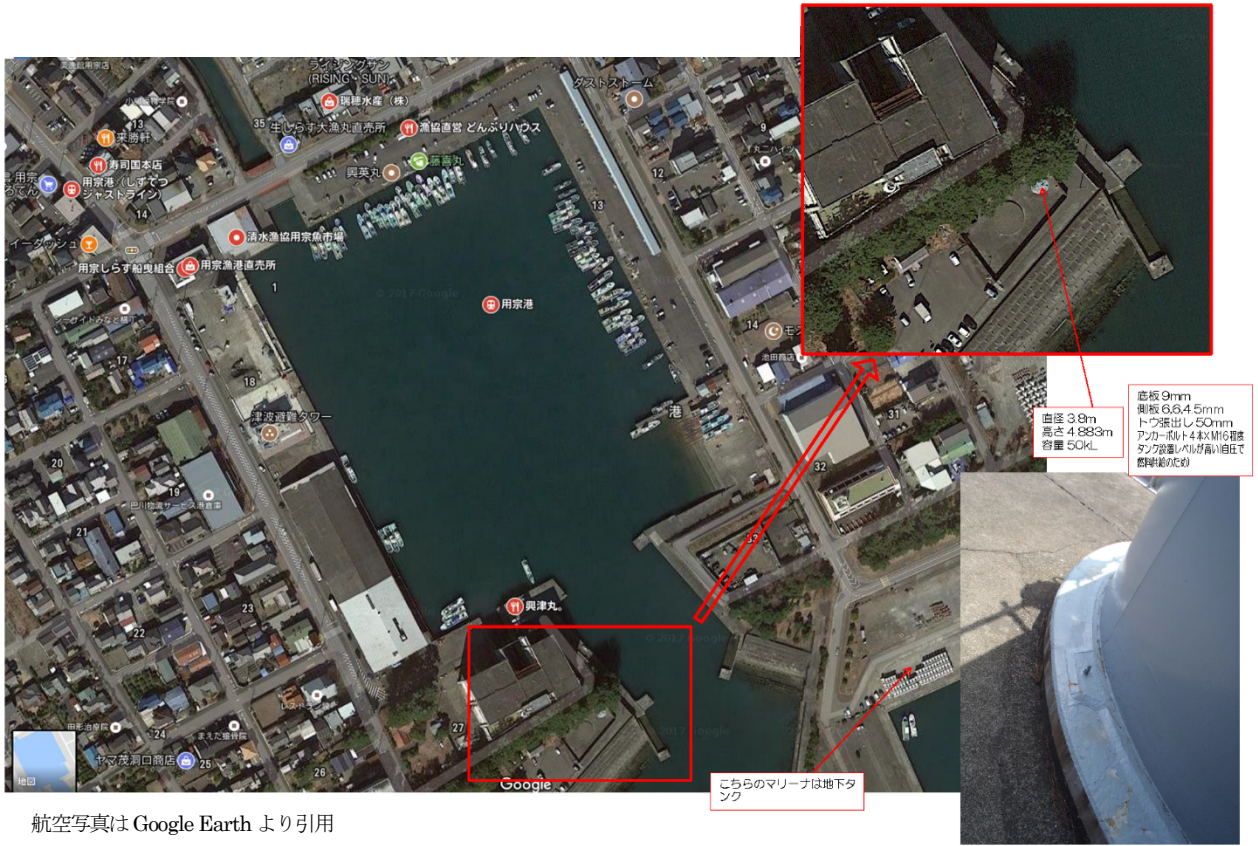
と、既往資料と静岡市の現場設置状況の貯槽容量、基礎状況の傾向は概ね同じであることが確認できた。

表-2.3 静岡市消防局管内漁港のタンク基礎形式

漁港名称	容量 (KL)	基礎形式 (推定)	アンカー有無
清水	1230	RCスラブ	不明
	490	RCスラブ	ボルト有
	450	RCスラブ	ボルト有
	76	RCスラブ	ボルト有
	22	RCスラブ	不明
用宗	50	RCスラブ	ボルト有
由比	200	盛土	なし
	10	RCスラブ	ボルト有
	10	RCスラブ	ボルト有



写真-2.1 清水漁港におけるタンクの敷設状況



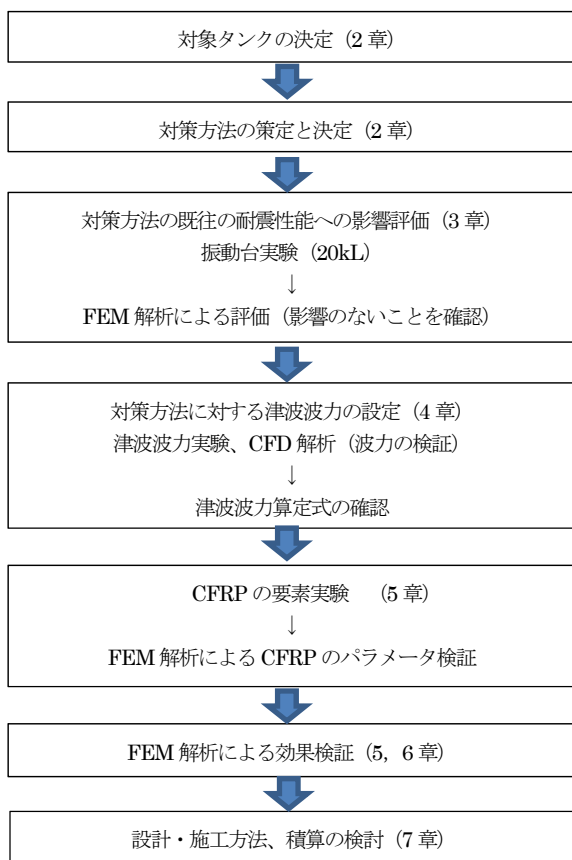
2.3 対象タンクの決定

畑山²⁾はアンケート調査ならびに現地調査に基づき、東北地方太平洋沖地震の津波被害についてまとめている。石油タンク施設は418基の被害を受け、そのうち157基の石油タンクに浮き上がり、転倒、滑動、流出、漂流等の移動被害が生じた。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%と報告しており、危険物関係法令³⁾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方を講じることは極めて重要な課題の一つである。また、500kL未満が全体の82%程度であること、100kL未満は全体の67%程度を占めることより、本研究では500kL以下のタンクを対象とすることとした。津波襲来前の地震に対して影響のない対策工の検証を実施することより、本検討にて使用可能な振動台性能より20kL以下である必要がある。

よって本研究では20kLモデルにて地震慣性力に対する実機検証を行い、FEM解析にて20kL、500kL(後に示す対策工2では100kLも)の対策効果の検証を実施する。

2.4 検討の流れ

本検討は下記の流れで検討を実施した。



2.5 対策方法の策定

図-2.1にて対策方法を検討した。対策方法の選定にあたり、下記の点に着目し、選定を行った。

- ・防消火活動への影響の無いこと
- ・既往の耐震性能を損なわないこと
- ・日常の運用に影響を与えないこと (溶接のため内容を抜くことは好ましくない)
- ・タンク本体の防錆性能に影響を与えないこと
- ・設置可能なスペースの有無 (省スペースな構造)
- ・既設のローディングへの影響のないこと
- ・将来のメンテナンス時 (側板・底板交換) の妨げにならないこと
- ・設置コスト (低コストで効果が得られること)
- ・施工性が良いこと

選定の結果、対策工は②FRP案1 (以下、対策工1) と⑤FRP案2 (以下、対策工2) の2つの案とした。これは1つの案で施工できない敷設状況においてもう一つの案での施工検討が行えるようにするためである。

2.6 既往の技術の流用の可能性

既往の技術の流用として、図-2.1のアンカーボルト案1が挙げられる。この対策は小規模タンクの耐風対策のために実施されるものである。本検討で選定しなかった理由は、アンカーボルト近傍での応力集中が懸念されたためである。FEM解析による解析例を図-2.2に示す。結果として、津波波力によりアンカーボルト周りの隅角部に応力集中(降伏応力を超える)していることがわかる。

アンカーボルト方式の近似方式としてアンカーチェアを用いる滑动対策も存在する。底板に直接アンカーボルトを設置する案に比べて、隅角部への応力集中は小さくなるが、対策工1、2と比較すると隅角部への応力集中は大きいと考える。

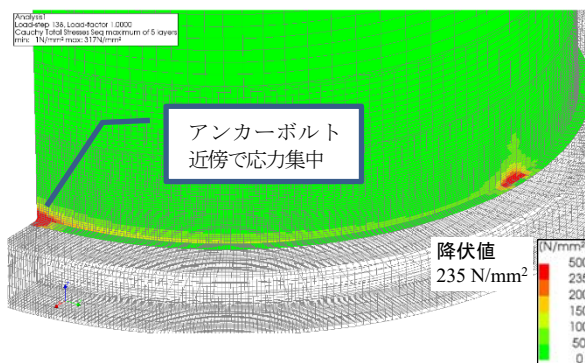
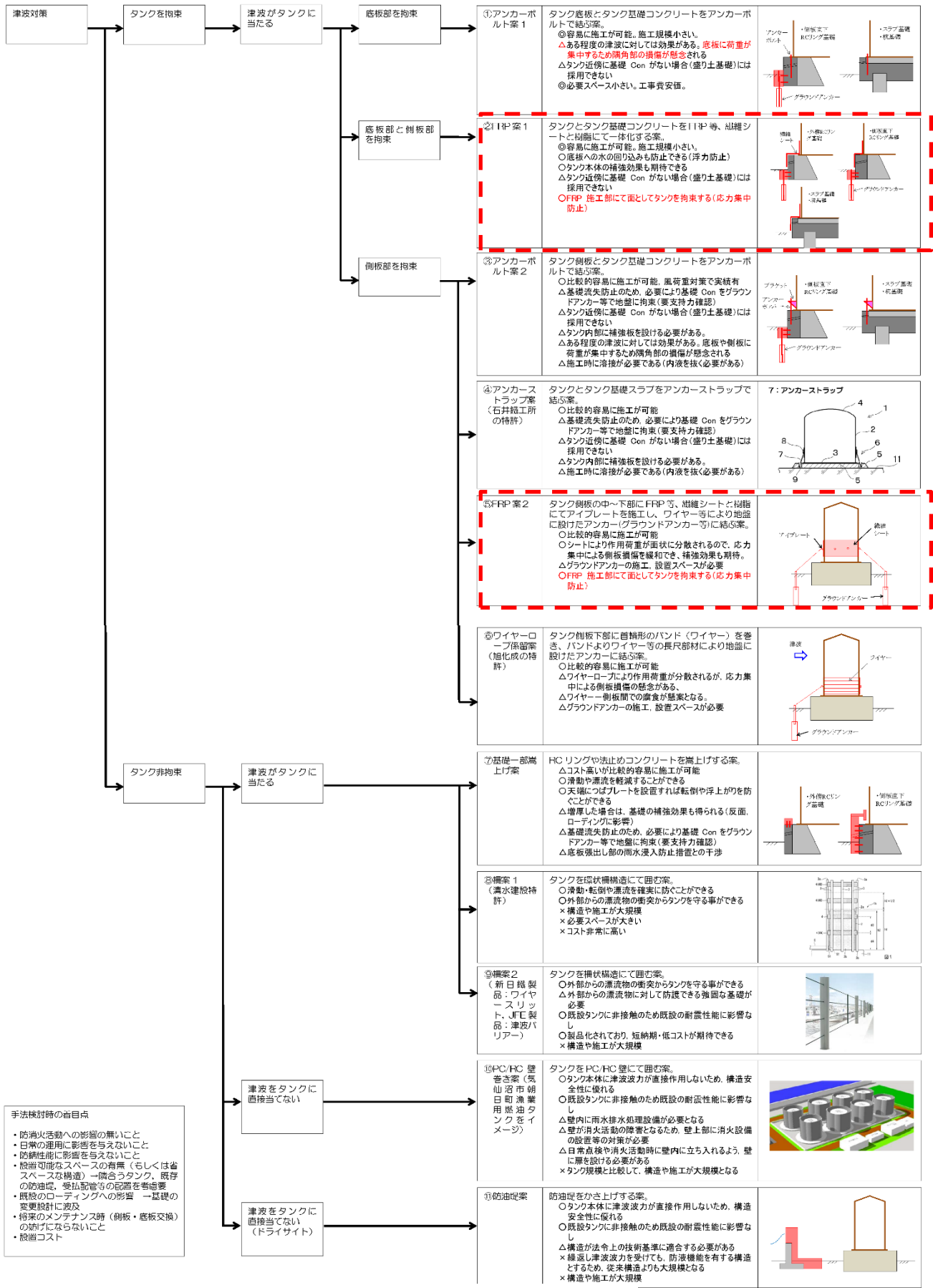


図-2.2 アンカーボルト案1採用時のMises応力例

2.7 FRP (CFRP) の一般性について

本検討で用いるFRPは近年、橋脚の耐震対策として用いられているCFRPと呼ばれるカーボン繊維を専用のエポキシ樹脂で硬化させるものである。現在、複数のメーカーにて販売しており、一般的な材料である。また、CFRPには材料の方向性があり、繊維長手方向で優れた特性を示す。このため、繊維方向に注意して用いる必要がある。

燃料油タンクの津波漂流対策について



- 手法検討時の留意点
- ・防消火活動への影響の無いこと
 - ・日常の運用に影響を与えないこと
 - ・防錆性能に影響を与えないこと
 - ・設置可能なスペースの有無(もしくは省スペースな構造)→隣合うタンク、既存の防油堤、受払配管等の配置を考慮
 - ・既設のローディングへの影響 → 基礎の変更設計に波及
 - ・将来のメンテナンス時(側板・底板交換)の妨げにならないこと
 - ・設置コスト

図-2.1 滑動・漂流対策方法の策定

エポキシ樹脂は「燃焼する」とされているが、近年、難燃性のCFRP用エポキシ樹脂が開発されてきている。

2.8 対策工1について

対策工1はアンカーボルト案1が“点”でタンクを拘束し、応力集中の懸念があるため、それを“面”で拘束することを狙ったものである。また、その拘束をCFRPで行い、溶接作業を必要としないため、タンクが運用中でも施工ができる。また、シート状のCFRPを隙間なく施工することを想定しており、CFRPの性状からタンク底板下に浸水しないため、“浮力を発生させない”ことも本案のメリットである。

CFRPには方向性があるため、効果的な方向に貼付けが必要である。図-2.3にCFRPの貼付け方向例を示す。方向を変えて2層以上の施工が有効と考えられる。

既存のタンクにアンカーボルトが設置されている場合には、アンカーボルトは撤去する。

対策工1は基礎スラブを有するタンクへの施工を前提としている。基礎の高さ方向へのCFRPの施工が非常に効果を発揮する。そのため、基礎の高さが十分(200mm程度)に無い場合には対策工2での施工を推奨する。

なお、対策工1は検証を進めるに従い、既往のタンクの耐震性能に悪影響を与えることがわかった。これに対して5章にて「底板張出部上に緩衝材を設置する」対策を立案し、耐震性能に影響を与えず、津波漂流対策が可能であることを確認している。

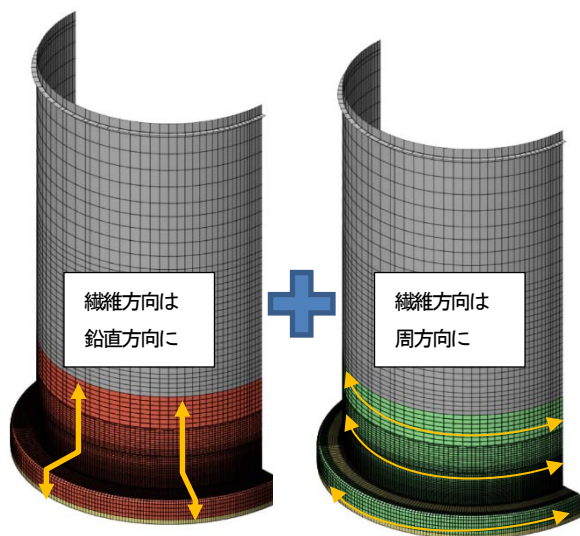


図-2.3 対策工1 CFRP施工方法

2.9 対策工2について

対策工2はワイヤーとグラウンドアンカーにてタンクを拘束する案である(図-2.4)。タンク側板にワイヤー取付を“点”にて接続すると、波力载荷時に側板部に応力集中を生じることとなる。本案ではプレートにワイヤーを接続するアイを取り付け、そのプレートを周方向のCFRPにてタンク側板に設置する(図-2.5)。プレートや

アイを現場にてタンク側板に溶接しないため、運用中のタンクに対しても施工可能である。

対策工2は対策工1に比べ、直接タンクを拘束しないため、タンクの有する耐震性能に影響を与えにくい(重量の増加はあるが)と考える。

CFRPの周方向の終端は200mm以上の重ね貼りが推奨されている。後述の解析では周方向に1周巻き付けた場合として解析、検証を実施している。

対策工2の場合、グラウンドアンカーを打設するスペースが必要となる。また、ワイヤーは日々の運用時に作業性を悪くする可能性もある。

本案でも既存のタンクにアンカーボルトが設置されている場合には、アンカーボルトは撤去する。

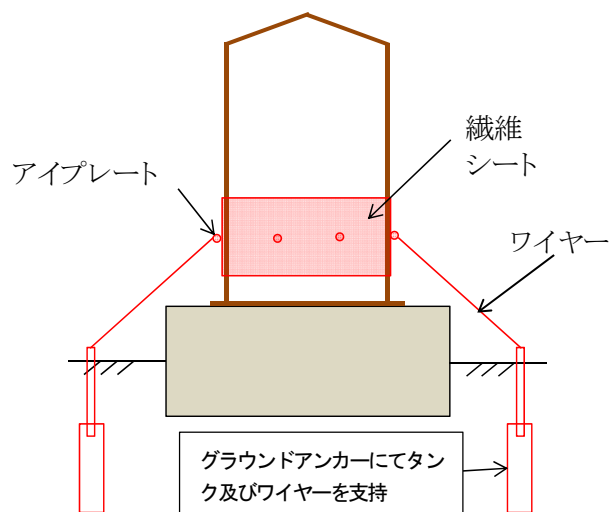


図-2.4 対策工2 施工イメージ

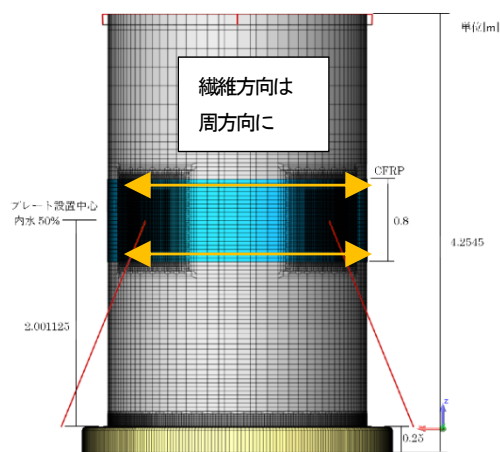


図-2.5 対策工2 CFRP施工方法(20kLの例)

2.10 小括

本章では対策方法を策定し、対策工1, 2を選定した。以降では対策工1について「耐震性に影響を与えないことの確認」を実施(対策工2は耐震性に影響を与える可能性が少ない)し、その後、両案の適用限界を求めていく。

3. 地震時の滑動・漂流防止対策工1に関する検討

3.1 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-3.1 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 基礎と連結が可能で構造である。実験の状況を写真-3.1 に示す。

a) CFRP 補強材

CFRP 補強材として、表-3.1 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) と RC 基礎を CFRP で接着固定した。なお、CFRP の貼り付け手順は後述する。

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-3.2 に示す。ここで、告示式¹⁾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-3.2 より確認できるピーク周波数に対して、告示式¹⁾の算定値に近い 48.5 Hz をバルジングの周波数、14 Hz はタン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¹⁾によるスロッシング周波数 0.6 Hz 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 0.7 Hz をスロッシングの周波数とした。表-3.2 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-3.1 に示した箇所で加速度、ひずみおよび変位をサンプリング周波数 512 Hz で

収録した。

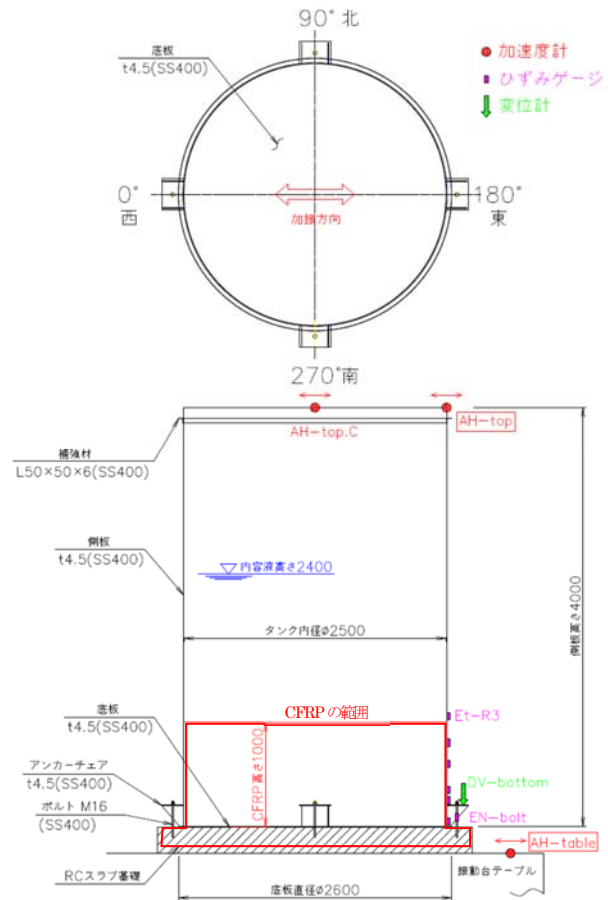


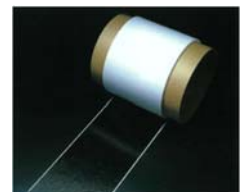
図-3.1 20 kL 級実大タンク (単位 : mm)



写真-3.1 実験状況 (例 : スロッシング)

表-3.1 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)



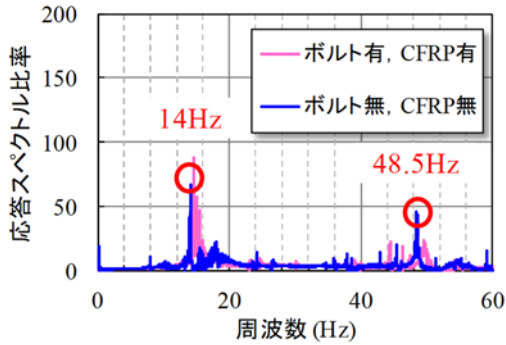


図-3.2 Sweep 波による応答スペクトル比率
(タンク天端 AH-top/振動台 AH-table)

(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-3.3 に示す。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-3.4 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-3.1 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-3.5 に示す。図より、ロッキング波にはタンク側板に最大 235 μ の圧縮ひずみが確認できるが、降伏ひずみ (約 1700 μ) の 14%程度であ

表-3.2 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	600Gal	○	○
	48.5Hz		-	-
ロッキング	正弦波	960Gal	○	○
	14Hz		-	-
スロッシング	正弦波	200Gal	○	○
	0.7Hz		-	-

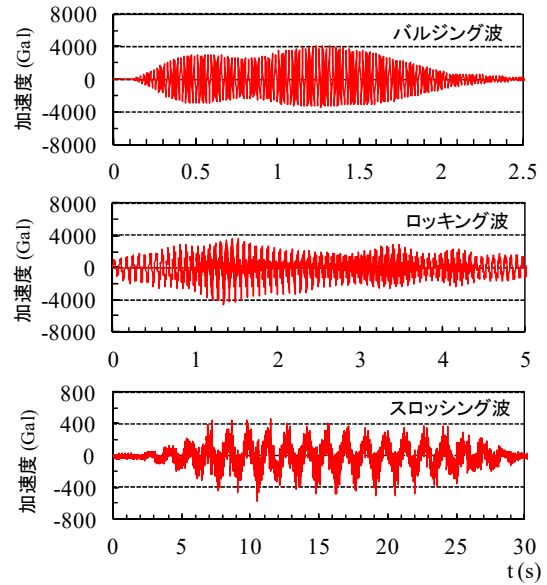


図-3.3 タンク天端 (AH-Top) の水平加速度

る。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。

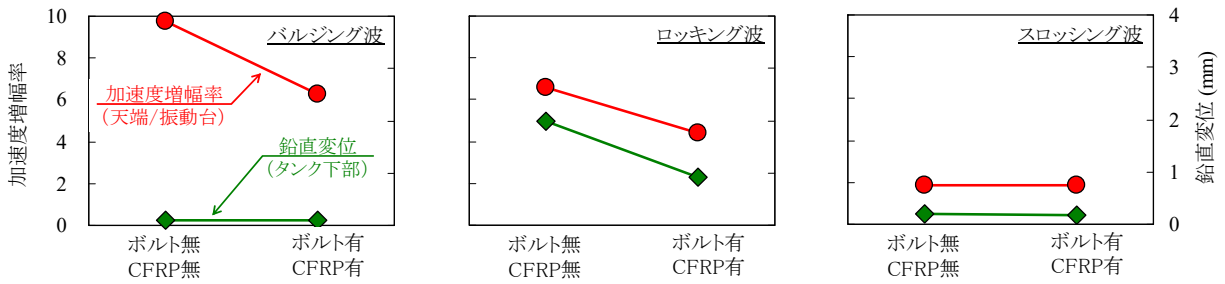


図-3.4 加速度増幅率とタンク下部の最大鉛直

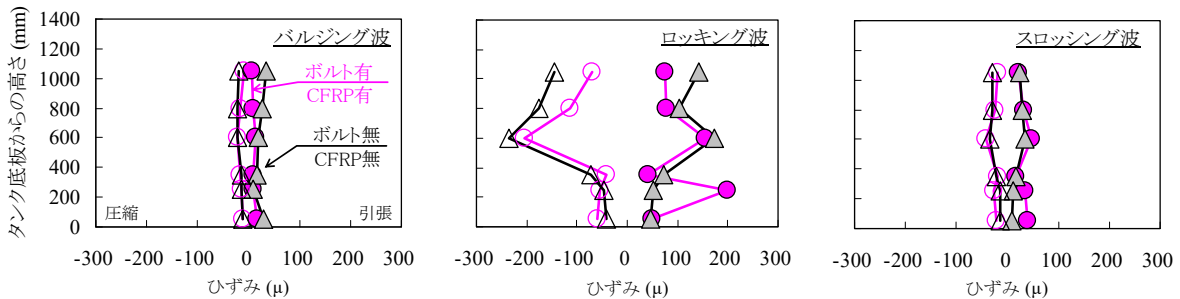


図-3.5 タンク側板の軸ひずみ分布

3.2 非線形 FEM 解析による検討

(1) 解析概要

実験で使用した 20 k1 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 DIANA⁵⁾を用いた。

a) 解析モデルおよび材料物性

解析モデルを図-3.6 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-3.7 に示すステップでシェル要素を貼り合わせた。

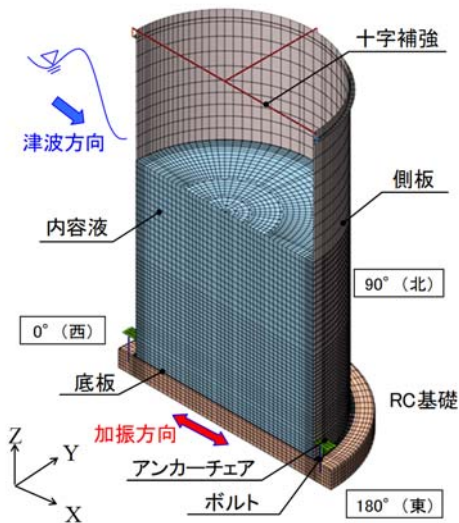


図-3.6 解析モデル

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～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示方書⁶⁾を参考に 0.3 を設定した。解析物性値の一覧を表-3.3 および表-3.4 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。このような違いは、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。

表-3.3 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-3.4 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

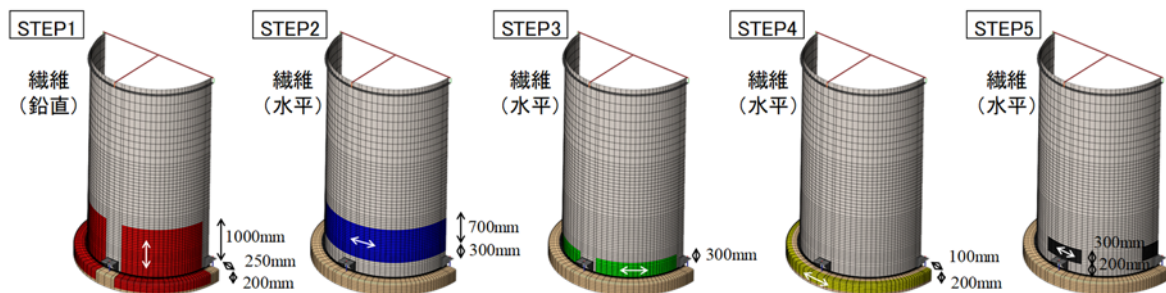


図-3.7 CFRP の貼り付け手順

(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-3.8 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、先述したように実験 (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される。

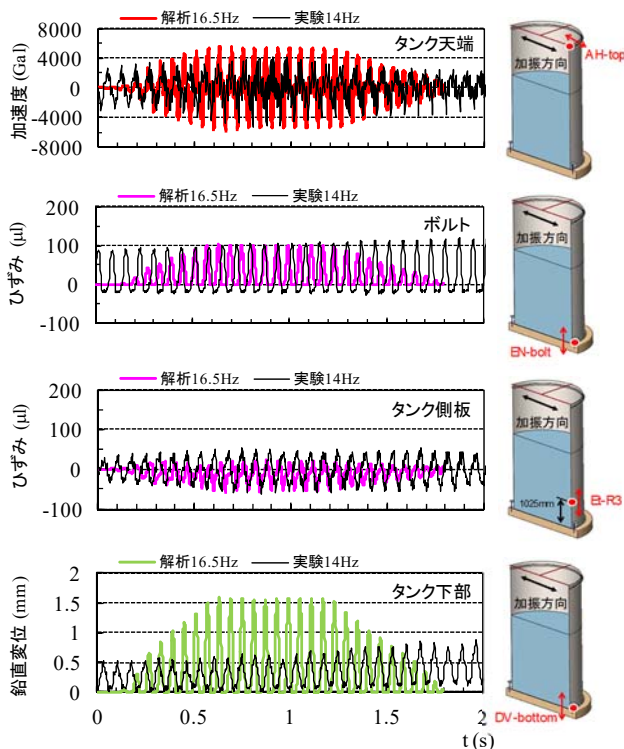


図-3.8 時刻歴波形の比較 (実験と解析)

(3) タンク底板隅角部への影響

タンク底板隅角部への影響を確認するため、タンクの浮き上がり最大時刻における Mises 応力コンターを図-3.9 に示す。図中より、基礎固定されたアンカーチェアが大きく変形し、タンク底板の張り出し部にも鋼材降伏

値 (340N/mm^2) を超える応力が発生していることが分かる。これは、CFRP 固定によって張り出し部の隅角部に応力が集中しているためであり、隅角部の過度な損傷は内容液の流出に繋がる危険性がある。そこで、張り出し部の天端にウレタン相当の物性値を与えた緩衝材を配置し、隅角部に生じる応力緩和を試みた (詳細は5章で述べる)。図-3.10 に結果を示すが、張り出し部の隅角部には応力が発生しておらず、緩衝材の効果が確認できる。

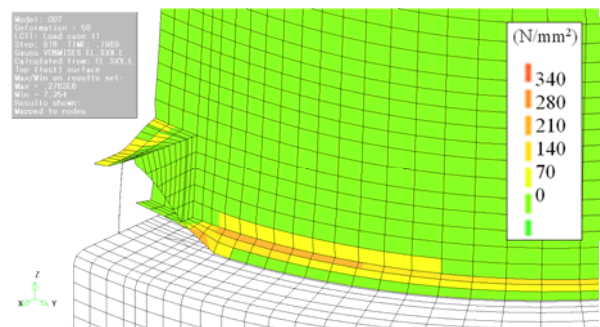


図-3.9 Mises 応力 (変形50倍) 緩衝材なし

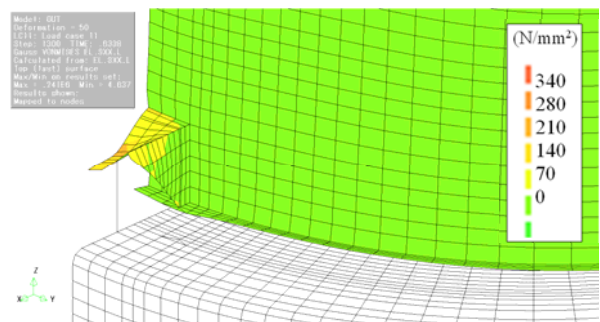


図-3.10 Mises 応力 (変形50倍) 緩衝材あり

3.3 小括

- 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。

4. 津波による滑動・漂流防止対策工に関する水理的検討

4.1 水理模型実験

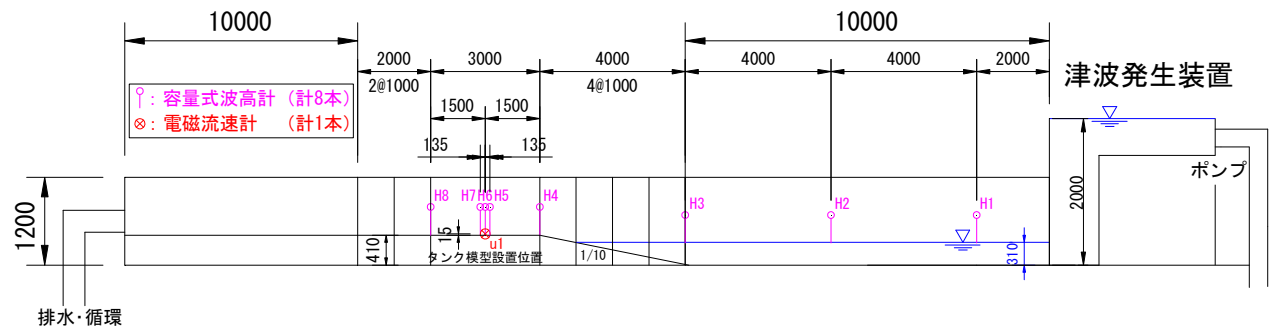
(1) 実験方法

実験では対策工およびタンク本体の各部に計測器を配置して作用外力を把握することとした。図-4.1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）を陸部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-4.1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⁷⁾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

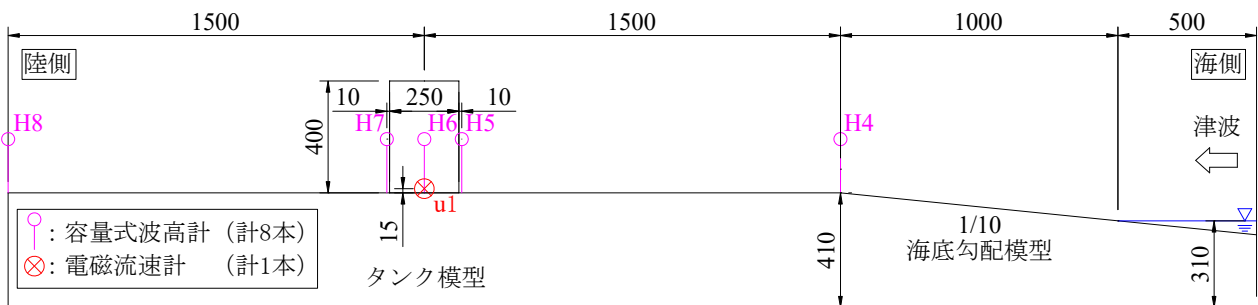
時の前面津波水位はおおよそタンク高さの半分から天端の範囲となる。なお、表中の浮き上がり安全率および滑動安全率は、貯液率60%（水）を想定した重量における消防庁危険物保安室⁸⁾の屋外貯蔵タンク津波被害シミュレーションツールによる計算結果を参考までに示したものであり、ケース1は浮き上がりも滑動もしない条件であるが、ケース2および3は浮き上がらないものの滑動する条件であると考えられる。

表-4.1 実験条件

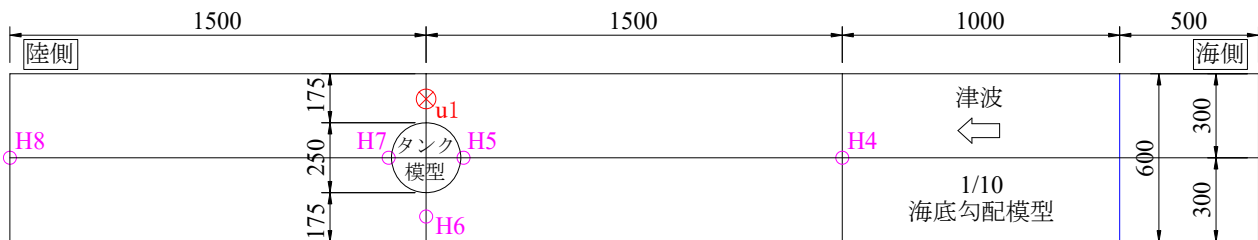
ケース	最大浸水深 η_{max} [cm]	最大流速 V_{max} ($F_r=1.3$) [m/s]	浮き上がり安全率	滑動安全率	タンク設置時の津波の作用高さ
1	11.1	1.4	2.75	1.14	タンク高さの半分
2	17.0	1.7	1.80	0.34	タンク高さの3/4
3	22.2	1.9	1.38	0.12	タンク天端



(a) 全体断面図（縦横比=2:1）



(b) タンク模型設置位置断面図



(c) タンク模型設置位置平面図

図-4.1 実験概要図（単位：mm）

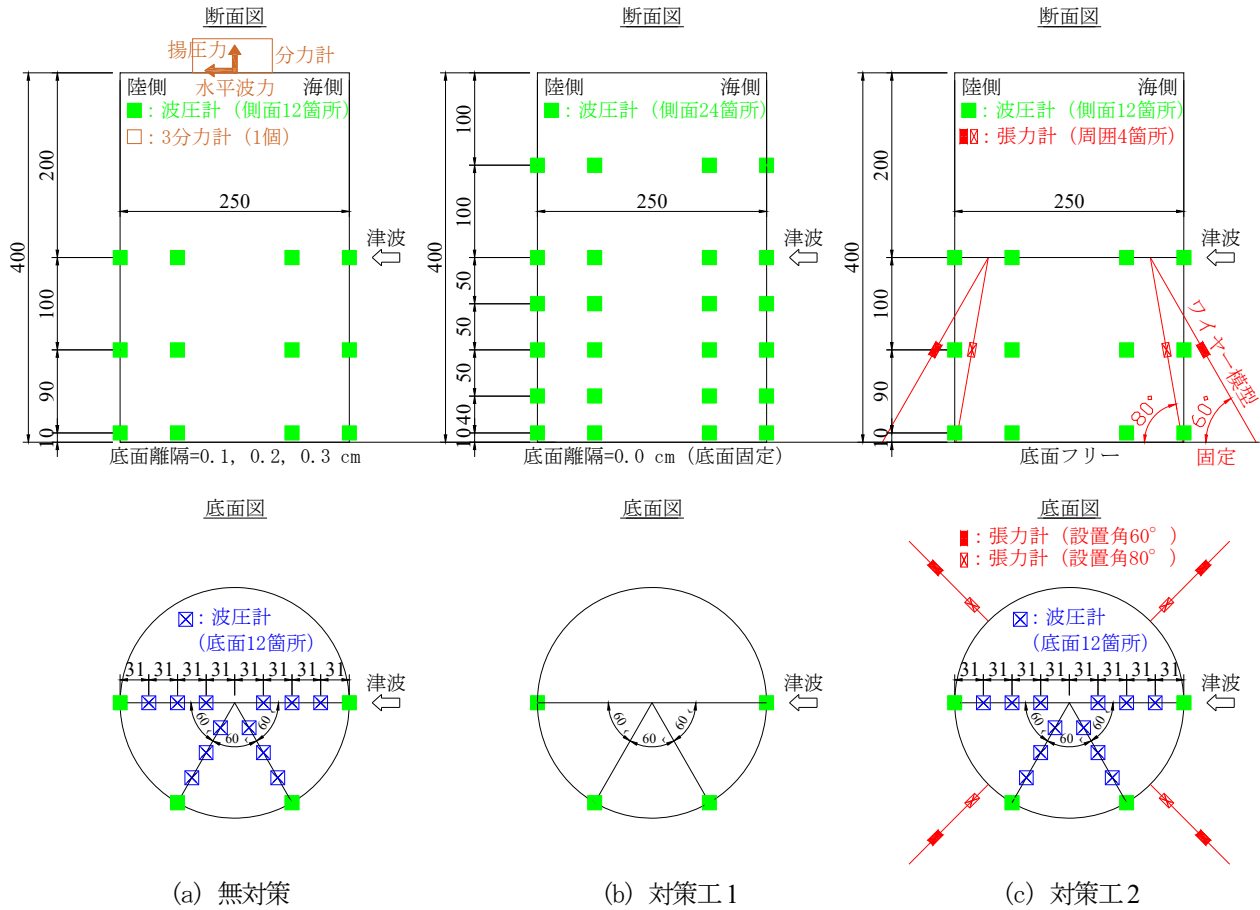


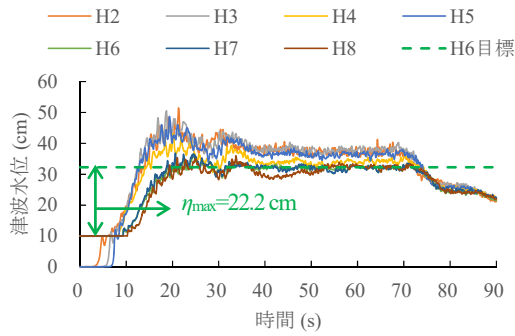
図-4.2 タンク模型および計測器配置図

図-4.2 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 $0.0 \sim 0.3$ 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-4.1 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。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

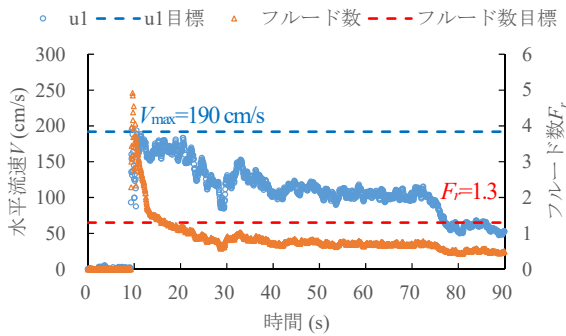
た。対策工法の効果の検証をおこなうために必要となる津波外力の計測を重点的におこなった。

(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-4.1 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-4.3 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-4.1 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。



(a) 水位変動時系列



(b) 流速およびフルード数変動時系列

図-4.3 ケース3における通過波検定結果

(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-4.4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⁷⁾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-4.5、4.6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⁷⁾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⁷⁾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るが、設計外力としてはむしろ安全側の評価となるため、消防庁⁷⁾の算

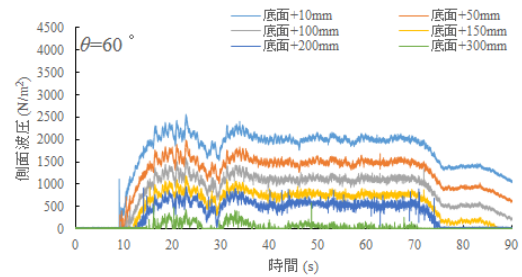
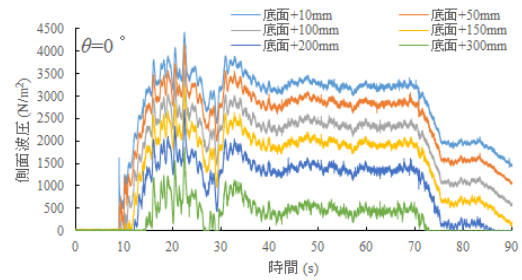
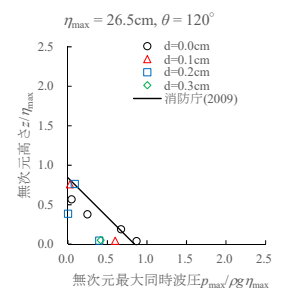
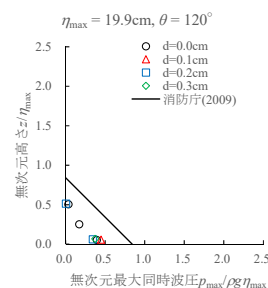
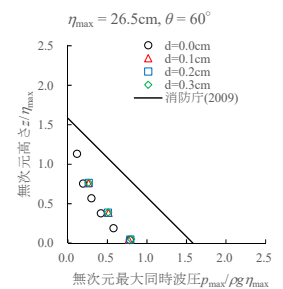
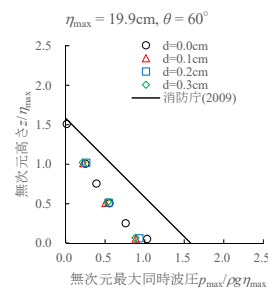
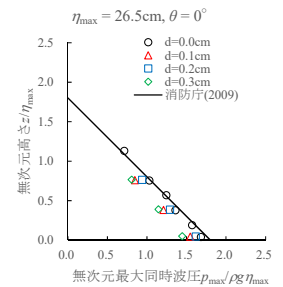
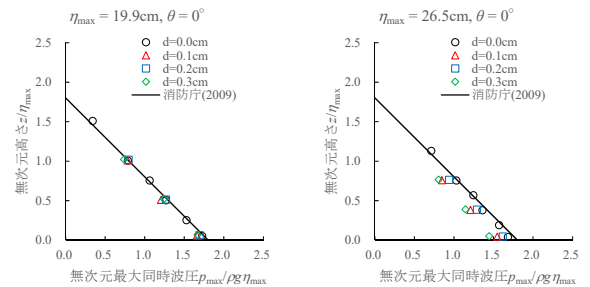


図-4.4 ケース3における側面波圧の変動時系列 (対策工1)



(a) ケース2

(b) ケース3

図-4.5 無次元最大同時波圧分布の離隔 d 毎の比較 (側面波圧)

定値を設計外力として適用することは妥当であるものと考えられる。

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-4.7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いては滑動安全率が0.24以上向上することが分かった。

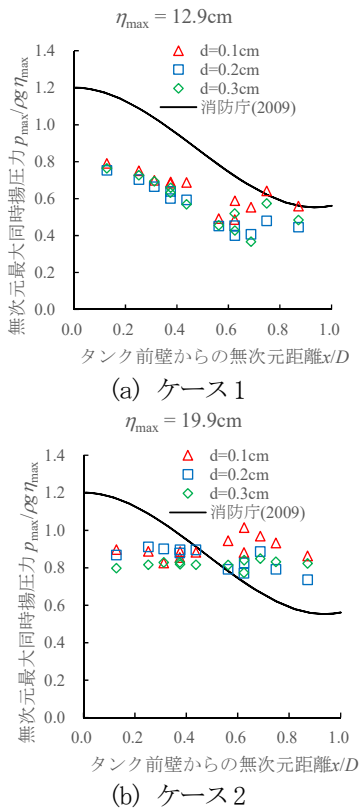


図-4.6 無次元最大同時波圧分布の離隔 d 毎の比較 (底面波圧)

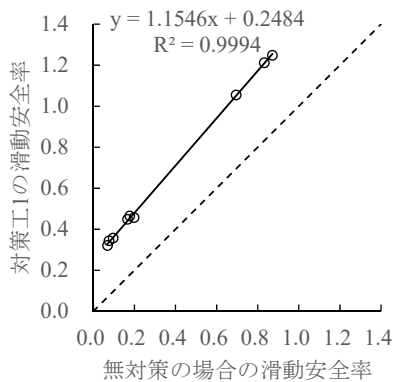


図-4.7 対策工1による滑動安全率の評価結果

(4) 対策工2の実験結果

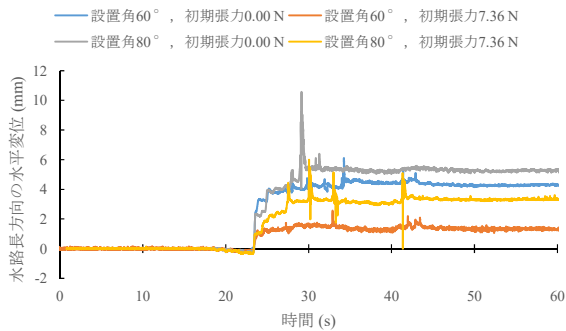
最後に、対策工2を想定してタンク模型を水路床に固定せずに置き、タンク模型と水路床とをワイヤーおよび張力計を介して接続して津波を作用させた。ワイヤー1本あたりに作用させる初期張力は「0」および「表-4.1から計算される津波水平力の10%」の2種類とした。また、タンク模型屋根部4点に反射マーカを設置して高精度カメラにより撮影することで、屋根部中心の3次元動態計測を120 Hzにておこなった。

写真-4.1にケース3(ワイヤー設置角 60°)における実験状況を、図-4.8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本あ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。

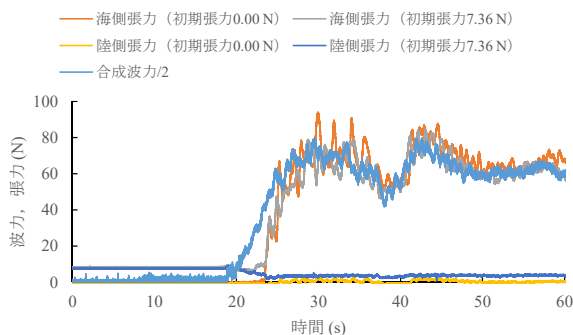
以上のことから、対策工2の滑動・漂流対策工としての有効性を示すとともに、津波波力からの設計が可能であることを示した。



写真-4.1 ケース3における実験状況 (対策工2, 設置角 60°)

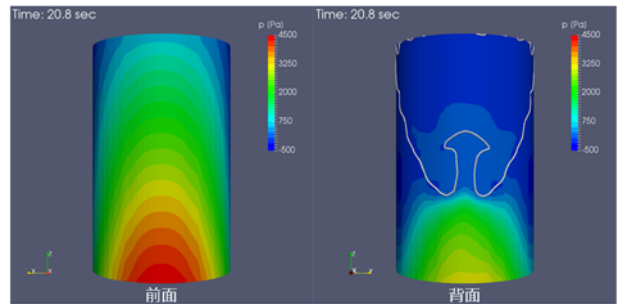


(a) タンク模型の水路長方向の水平変位時系列

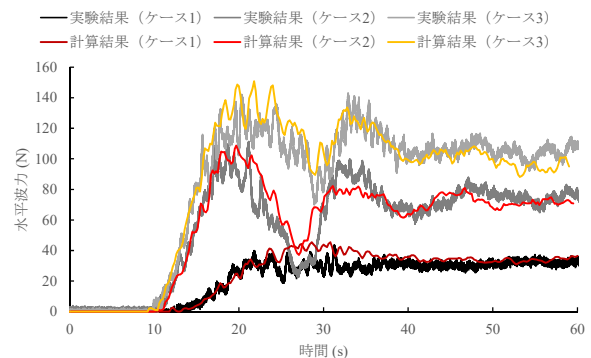


(b) ワイヤー張力（設置角 60° ）と合成波力/2の時系列

図-4.8 ケース3における実験結果（対策工2）



(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-4.9 無対策（底面離隔 $d=0.3$ cm）における再現計算結果

4.2 CFD 解析

(1) 計算条件

今後の設計への展開を見据え、前節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 v1812¹⁰⁾ 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。

(2) 計算結果

図-4.9 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。

4.3 小括

- 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 本あ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。

5. 滑動・漂流防止対策工 1 の津波適用限界の評価

5.1 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。要素実験の载荷イメージを図-5.1 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、模型の一辺を RC 基礎とピン接合している。载荷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。

また、実タンクは円形であることから、剥離状況を確認するため、直径約 1000 mm の円形タンクも用意した。RC 基礎は直径約 1500 mm としている。その他の条件は上述した矩形の模型と同様である。

a) CFRP 材

本実験で使用した CFRP 材の特性は 3 章の表-3.1 に示したものと同様である。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-5.1 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

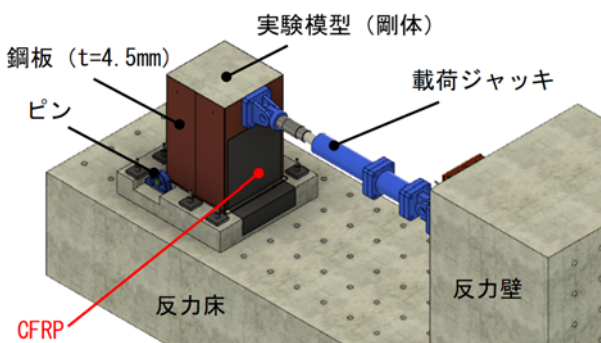


図-5.1 载荷実験のイメージ

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 の载荷ジャッキを用いてタンク頂部に水平荷重を作用させた。载荷速度は、载荷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载荷を実施した。計測項目として、図-5.2 に示すように载荷位置における载荷荷重と水平変位、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-5.2、写真-5.3 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。矩形模型に関しては CFRP が一様に剥離したのに対し、円形模型では鉛直方向に裂けながら剥離している。今回の実験では繊維方向が一方向のみの CFRP 材を用いており、繊維の向きは鉛直方向として貼付している。矩形模型においては発生応力がほとんど鉛直方向のみであることから一様に剥離す

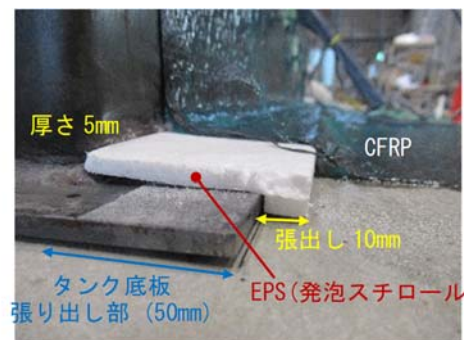


写真-5.1 緩衝材の設置状況（厚さ 5mm）

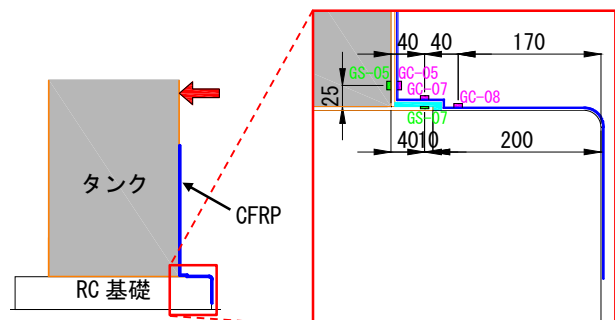


図-5.2 要素実験の計測位置（単位：mm）

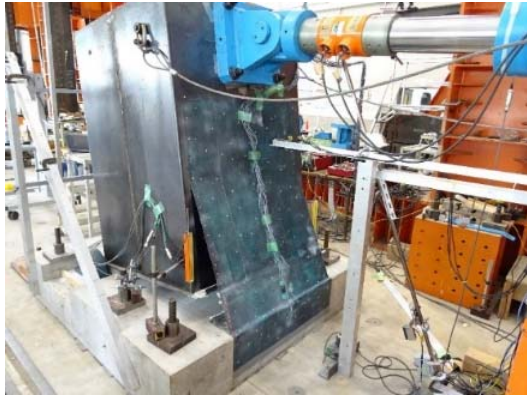


写真-5.2 実験模型の終局状態（矩形）



写真-5.3 実験模型の終局状態（円形）

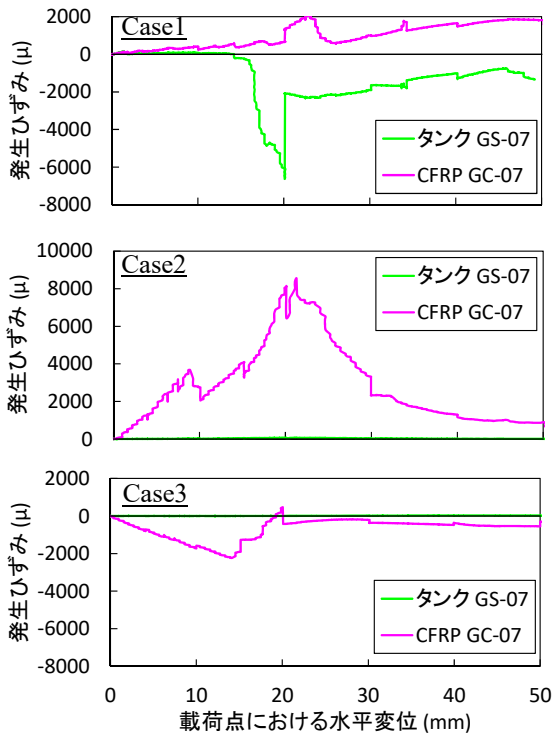


図-5.3 底板張り出し部に発生したひずみ

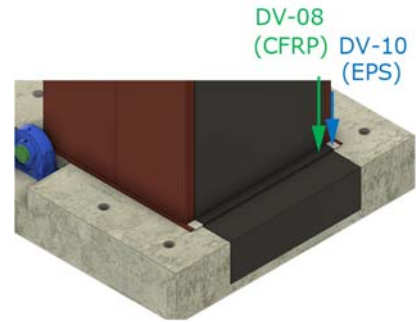


図-5.4 緩衝材変形量の計測位置

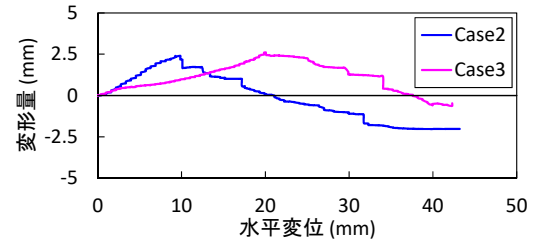


図-5.5 緩衝材の変形量 (DV-08)と(DV-10)の差分

る結果となったが、円形模型では模型周方向にも応力が分散するため、CFRP材が周方向に発生する応力に抵抗できないことから裂ける結果となったと考えられる。したがって、CFRP材のタンクへの実施工においては、鉛直方向だけでなく周方向へも貼付する、もしくは2方向に強度を有するCFRP材を用いることが必要である。

そのほかのCFRPの剥離特性に関わる結果は、次節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-5.3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 μ)を超える大きなひずみが発生している一方で、CFRPに発生したひずみは2000 μ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-5.4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-5.5)。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。

5.2 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および円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[®] を用いた。矩形模型の解析モデルを図-5.6、図-5.7 に示す。また円形模型の解析モデルを図-5.8～図-5.10 に示す。再現解析の目的は、CFRP の剥離特性を明らかにすることであるため、以降は矩形模型の解析を中心に説明することとする。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 以上となると非常に大きな剛性となるバ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[®]を参考に 0.3 を設定した。解析物性値の一覧を表-5.1、表-5.2 に示す。

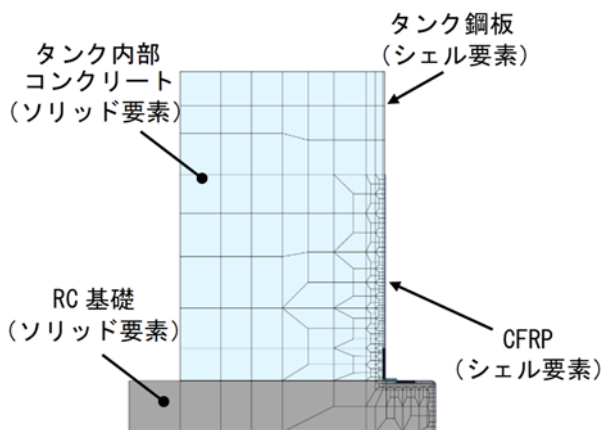


図-5.6 矩形模型の再現解析モデル

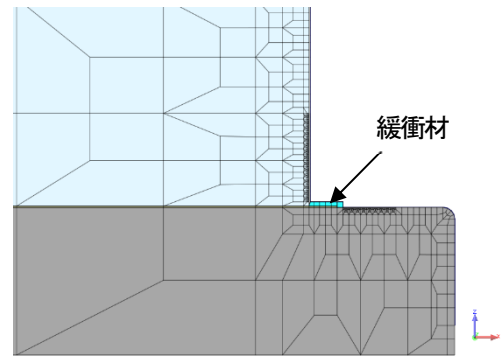


図-5.7 矩形模型の再現解析モデル (隅角部拡大)

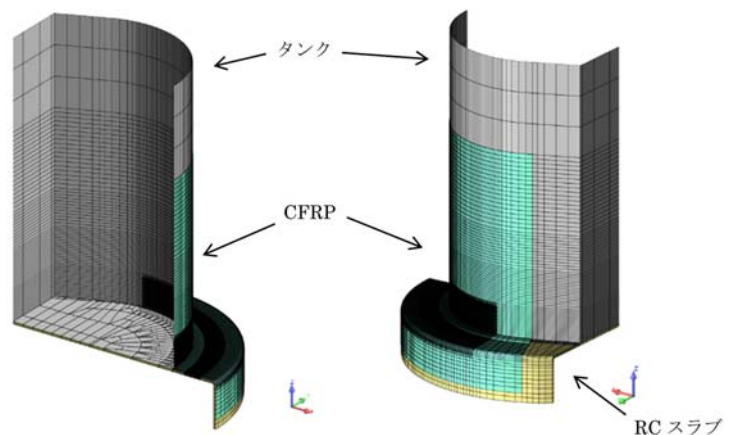


図-5.8 円形模型の再現解析モデル全体図

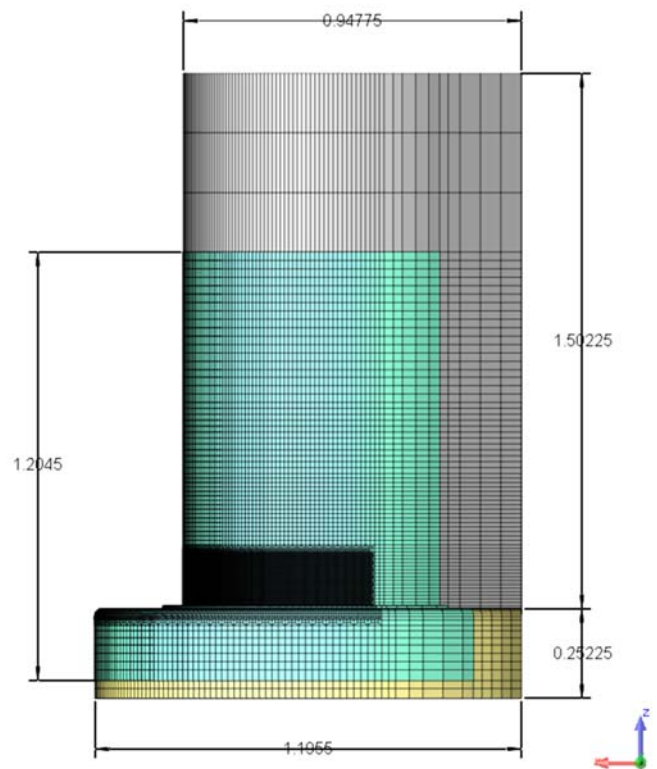


図-5.9 円形模型の再現解析モデル側面図

表-5.1 使用材料の機械的性質

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	Von Mises バイリニア	2.0×10^5	0.3	362.5	475.2	77.0
RC基礎	線形	2.5×10^4	0.2	—	—	24.5
CFRP	線形	2.7×10^5 (引張時)	0.0	—	4,181	18.4
		1.3×10^5 (圧縮時)			1,288 (圧縮)	

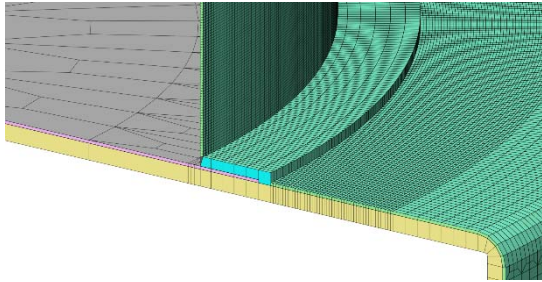


図-5.10 円形模型の再現解析モデル (隅角部拡大)

表-5.2 境界要素の解析物性値

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

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

※面外強度は再現解析にて求めた確定値

(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/mm²、RC 基礎~CFRP の面外強度を 15 N/mm² と設定した際の結果を示す。载荷ジャッキ位置における荷重と水平変位の関係を図-5.11に示す。実験結果は、载荷初期の荷重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-5.12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。

なお、円形模型については、解析結果の掲載は割愛するが、実験結果を再現することが困難であった。前節で述べたように、CFRPの繊維方向が鉛直方向のみであるため、タンク周方向へ発生した応力をCFRPで負担することが難しく、解析において非常に不安定な現象が生じることとなった。実験においてはCFRPが鉛直方向に裂けるという現象が生じているが、FEM解析においてそのような現象を表現することは困難であるため、結果として解析においては安定した荷重-変位関係を得ることができなかった。

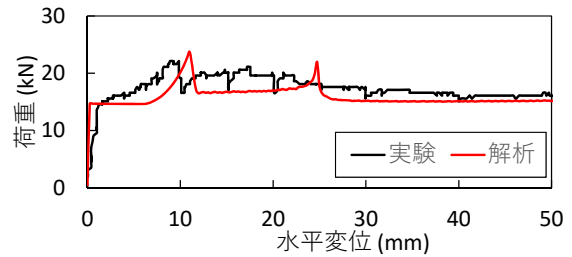


図-5.11 载荷位置における荷重-変位関係

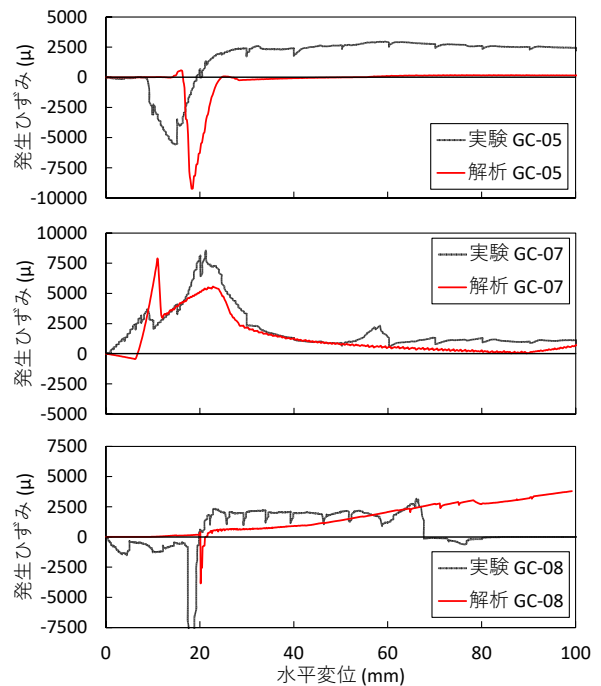


図-5.12 CFRPに発生したひずみの比較 (実験と解析)

5.3 滑動・漂流防止対策工1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。20 kL級の解析モデルを図-5.13～図-5.16に、500 kL級の解析モデルを図-5.17～図-5.20にそれぞれ示す。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/mm²、引張強度は400 N/mm²とし、CFRPは引張時の弾性係数を 2.5×10^5 N/mm²、圧縮時の弾性係数については材料試験結果を参考に 1.2×10^5 N/mm²とし、引張強度を3,400 N/mm²、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 1.2×10^5 N/mm²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ともに15 N/mm²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/mm²に変更した。鋼材～CFRPの面外強度は15 N/mm²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。

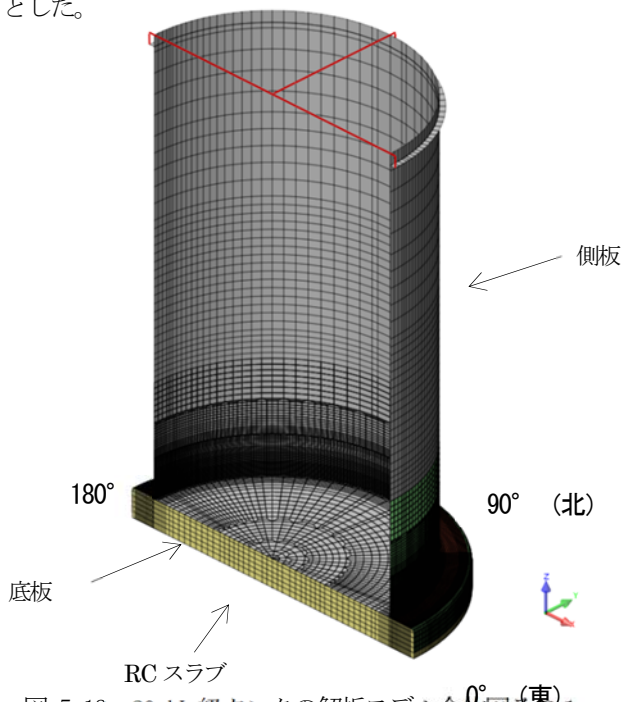


図-5.13 20 kL級タンクの解析モデル全体図その1

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、比較的頻度の高い50%で設定した。解析で作用させる津波波力はフルード数 $F_1 \geq 1.3$ を満足する津波⁷⁾を対象とし、津波水位 h_t^{\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-5.21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。

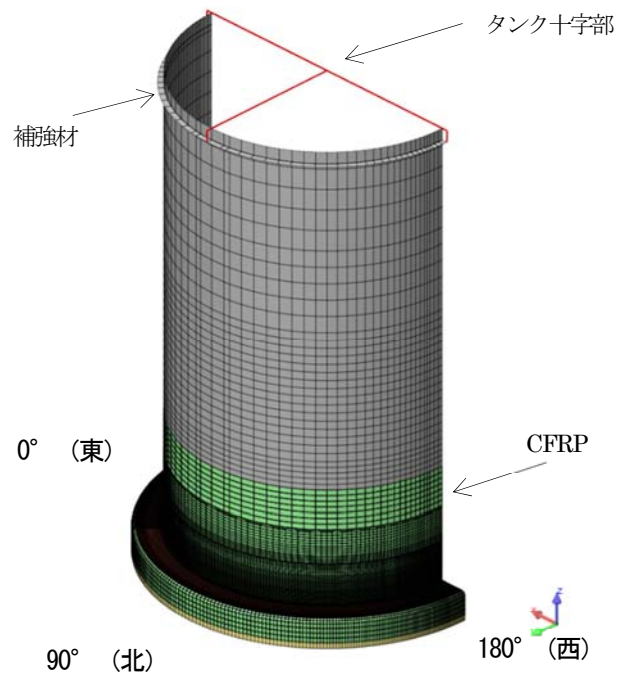


図-5.14 20 kL級タンクの解析モデル全体図その2

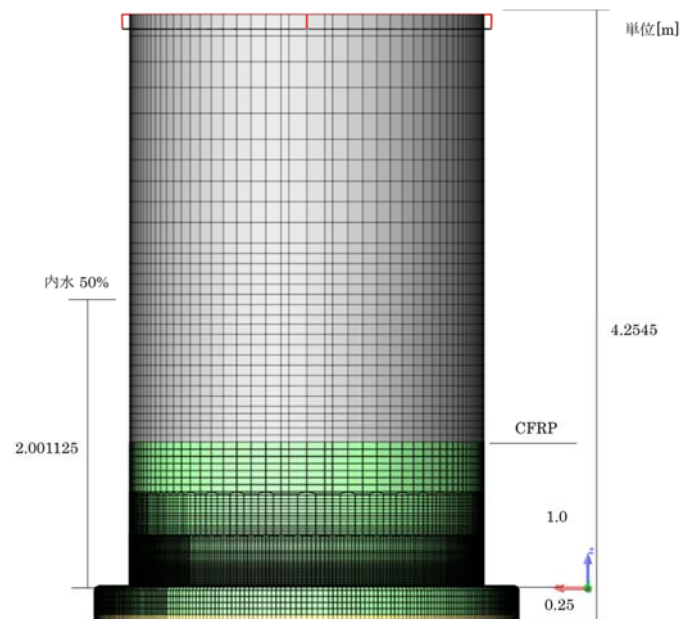


図-5.15 20 kL級タンクの解析モデル正面図

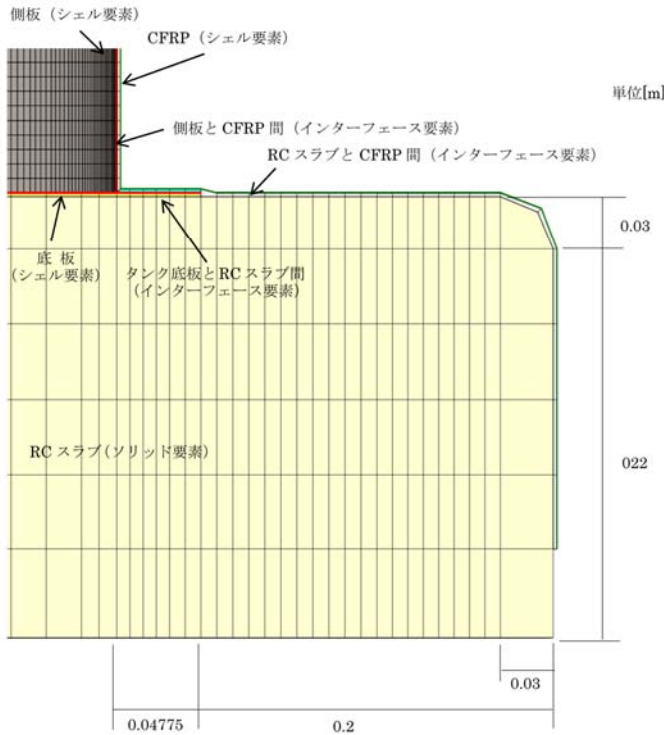


図-5.16 20 kL 級タンクの解析モデル隅角部拡大図

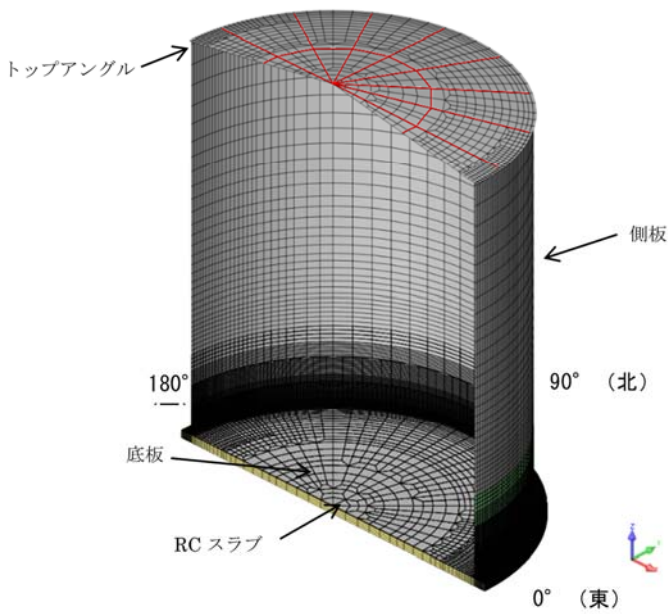


図-5.17 500 kL 級タンクの解析モデル全体図その 1

(2) 解析の結果

図-5.22 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

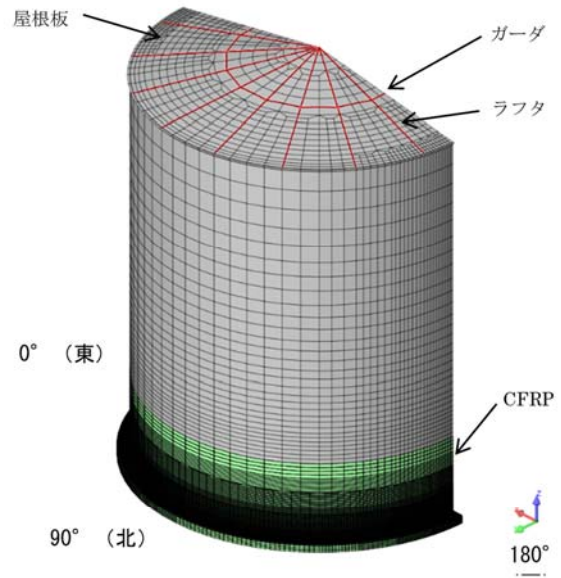


図-5.18 500 kL 級タンクの解析モデル全体図その 2

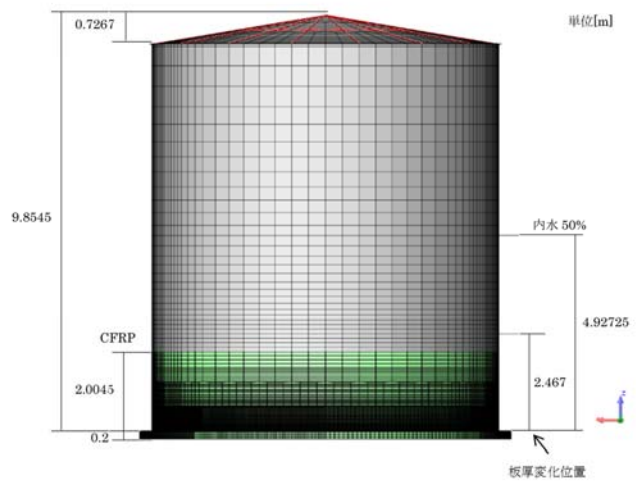


図-5.19 500 kL 級タンクの解析モデル正面図

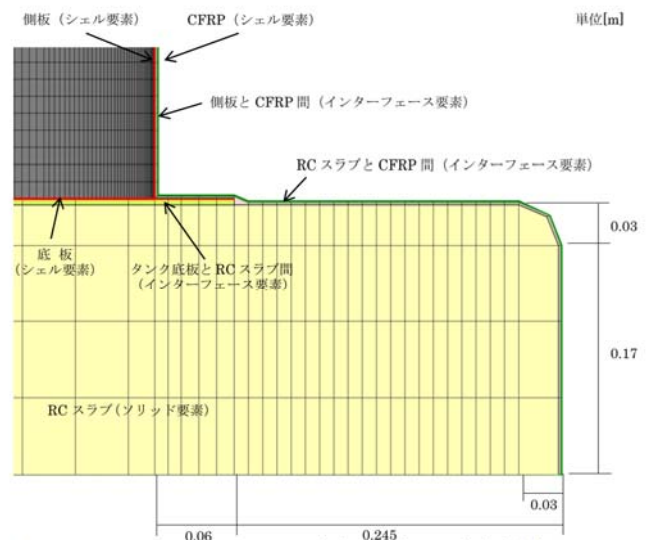


図-5.20 500 kL 級タンクの解析モデル隅角部拡大図

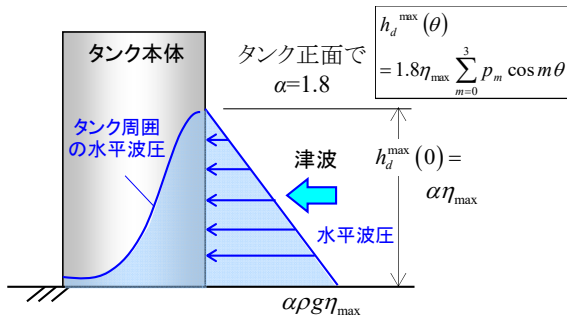


図-5.21 タンク本体に作用する津波波圧分布⁷⁾

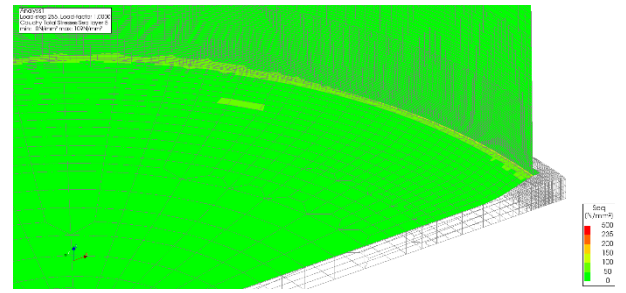


図-5.25 津波適用限界時のタンク底板隅角部付近の応力 (500 kL 級タンク)

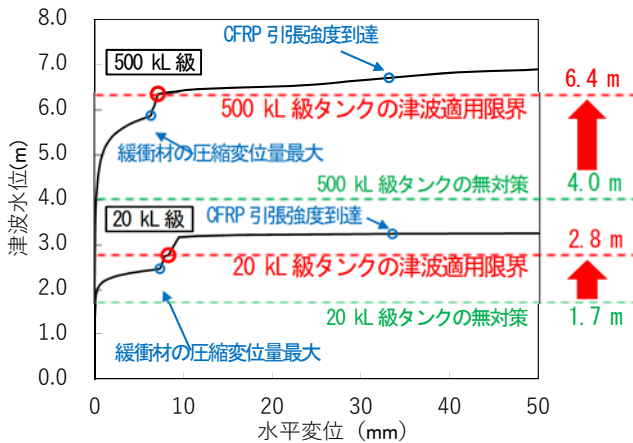


図-5.22 津波水位—水平変位関係

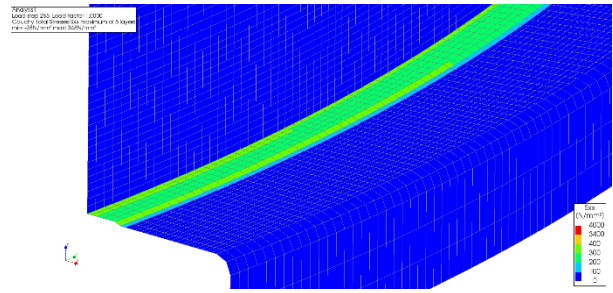


図-5.26 津波適用限界時のCFRPの軸方向応力 (500 kL 級タンク)

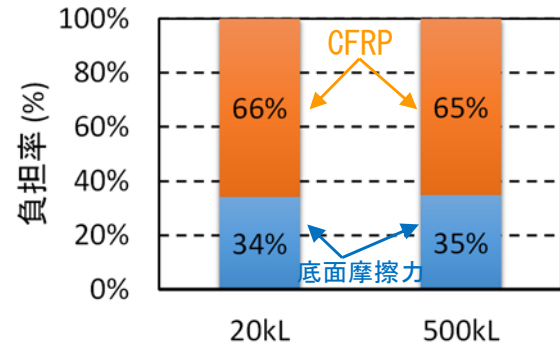


図-5.27 津波適用限界時の津波波力に対する負担率

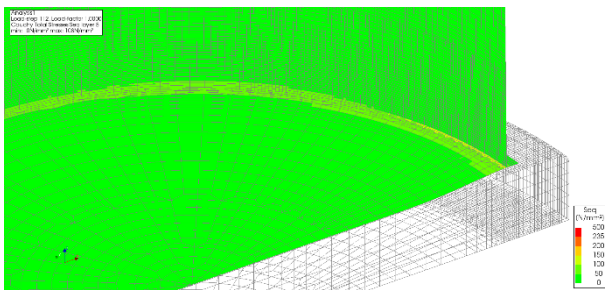


図-5.23 津波適用限界時のタンク底板隅角部付近の応力 (20 kL 級タンク)

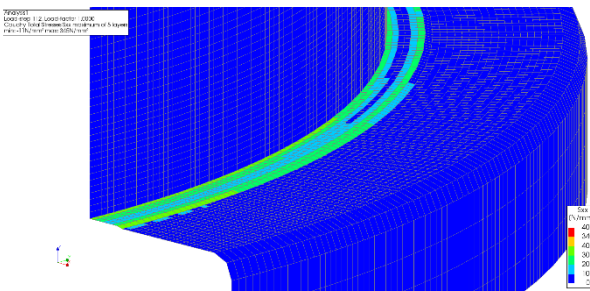


図-5.24 津波適用限界時のCFRPの軸方向応力 (20 kL 級タンク)

$h_d^{\max}=5.9\text{m}$ で緩衝材の圧縮変位量が最大となり、 $h_d^{\max}=6.4\text{m}$ 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、 $h_d^{\max}=6.7\text{m}$ 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 $h_d^{\max}=2.8\text{m}$ 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、 $h_d^{\max}=2.8\text{m}$ 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、 $h_d^{\max}=6.4\text{m}$ 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⁷⁾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 $h_d^{\max}=1.7\text{m}$ 、500 kL 級タンクで $h_d^{\max}=4.0\text{m}$ 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に生じたMises応力とCFRPの軸方向応力

を図-5.23～図-5.26 に示す。Mises 応力は、20 kL 級タンクでは最大 108 N/mm²、500 kL 級タンクでは最大 109 N/mm² 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/mm²、500 kL 級タンクでは最大 348 N/mm² 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-5.27 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。

5.4 小括

- ① 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性能に影響を与えないことが示された。
- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 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 の剥離が進む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。

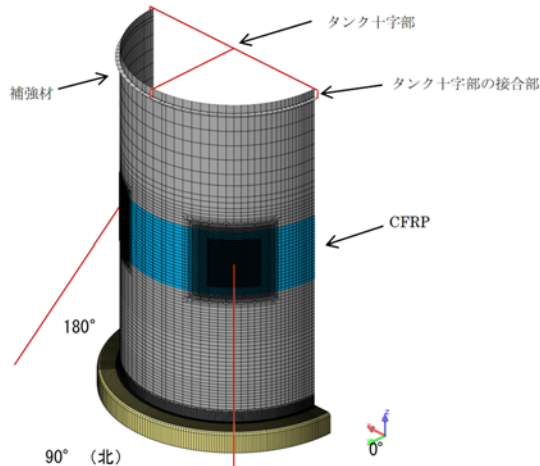


図-6.1 対策工 2 20 kL 級解析モデル メッシュ図

6. 滑動・漂流防止対策工 2 の津波適用限界の評価

6.1 解析の概要

三次元非線形 FEM 解析により、CFRP 対策工 2 を講じた 20 kL 級と 100kL、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-6.1～6.12 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、3 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、ここでは前章と同様に実務設計を意識した公称値とした。鋼材の降伏強度は 235 N/mm²、引張強度は 400 N/mm² とし、CFRP は引張時の弾性係数を 2.5×10^5 N/mm²、圧縮時の弾性係数については材料試験結果を参考に 1.2×10^5 N/mm² とし、引張強度を 3,400 N/mm²、圧縮強度の限界値は定義しないモデルとした。また CFRP の繊維直角方向の剛性も前章同様に、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 1.2×10^5 N/mm² を設定した。その他の物性値も前章と同じである。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、比較的頻度の高い 50 % で設定した。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⁷⁾を対象とし、津波水位 h_w^{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-6.13 に示すような余弦曲線で考慮した。また、本章で述べる対策工 2 では CFRP でタンク基部を RC 基礎に固定しないことから、タンク底板に鉛直波圧が作用するものとした。タンク底板と基礎の間の摩擦係数には複合構造標準示方書⁶⁾を参考に 0.3 を設定して FEM 解析を実施した。消防庁の津波算定式⁷⁾では 0.5 にて算出するが、今回は安全側評価として 0.3 とした。

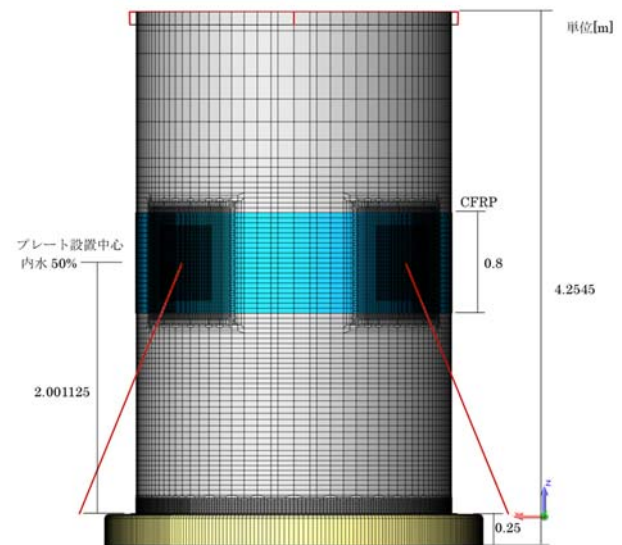


図-6.2 対策工 2 20 kL 級解析モデル 全体正面寸法

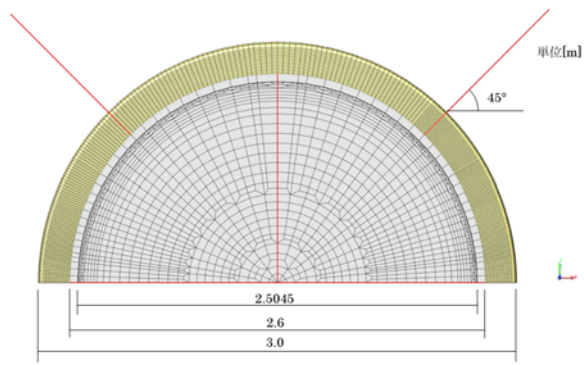


図-6.3 対策工2 20 kL 級解析モデル 全体上面寸法

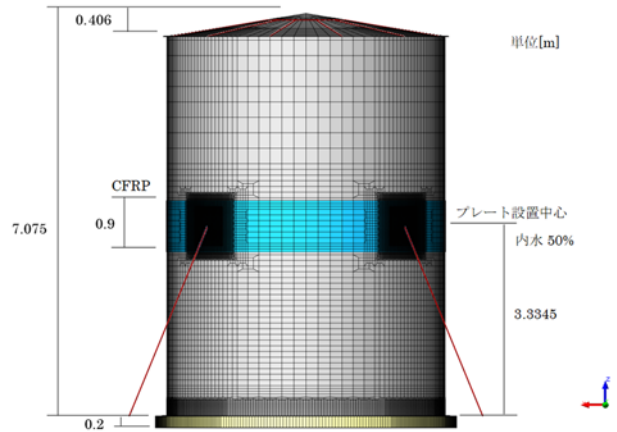


図-6.6 対策工2 100 kL 級解析モデル 全体正面寸法

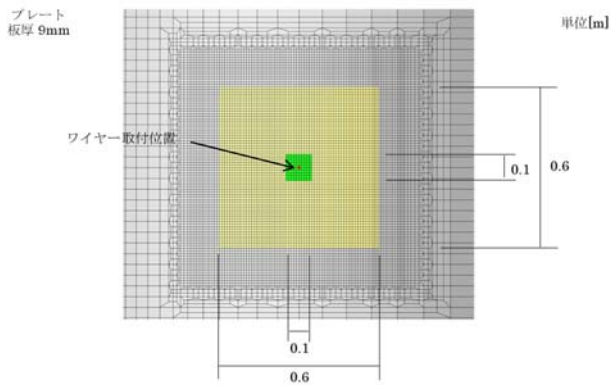


図-6.4 対策工2 20 kL 級解析モデル プレート部寸法

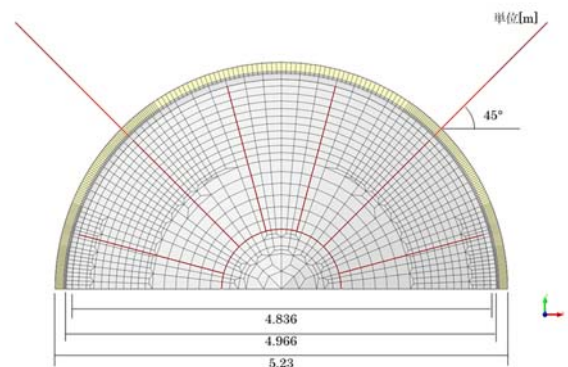


図-6.7 対策工2 100 kL 級解析モデル 全体上面寸法

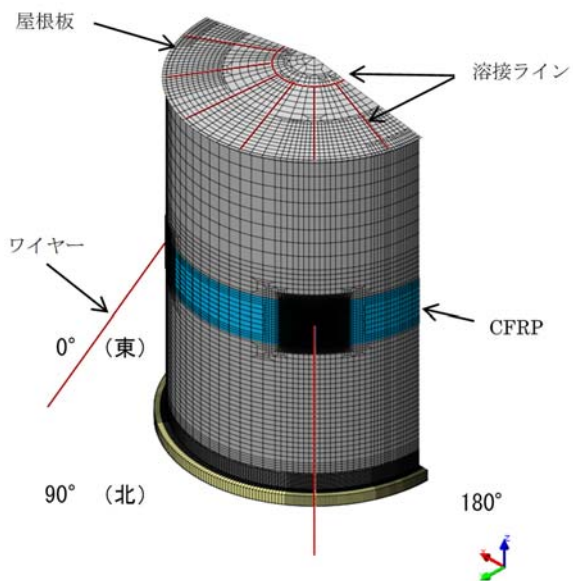


図-6.5 対策工2 100 kL 級解析モデル メッシュ図

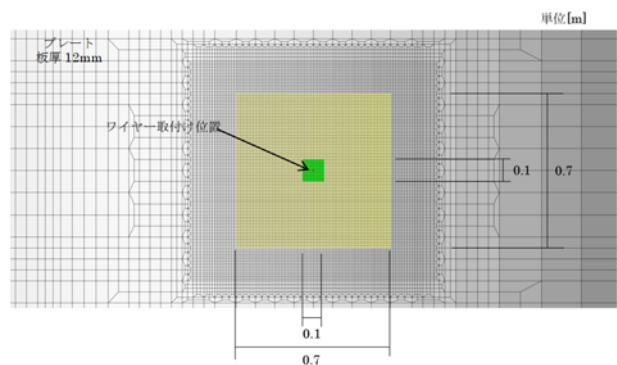


図-6.8 対策工2 100 kL 級解析モデル プレート部寸法

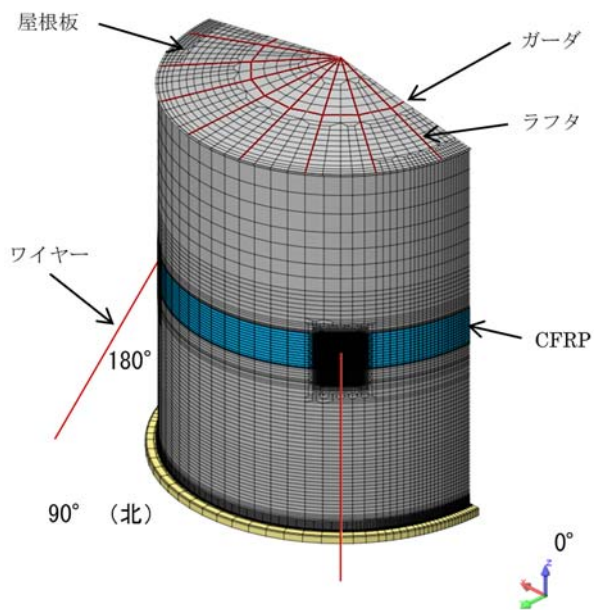


図-6.9 対策工2 500 kL 級解析モデル メッシュ図

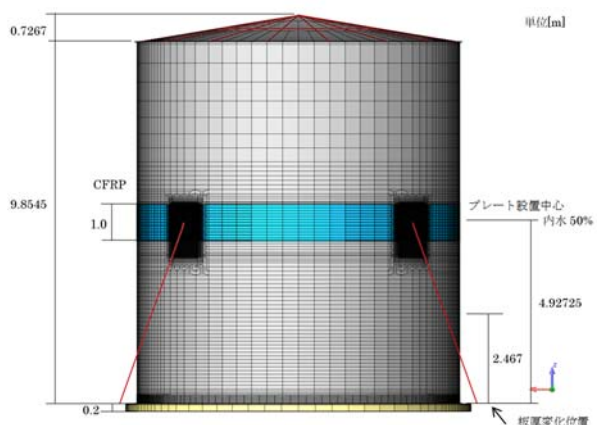


図-6.10 対策工2 500 kL 級解析モデル 全体正面寸法

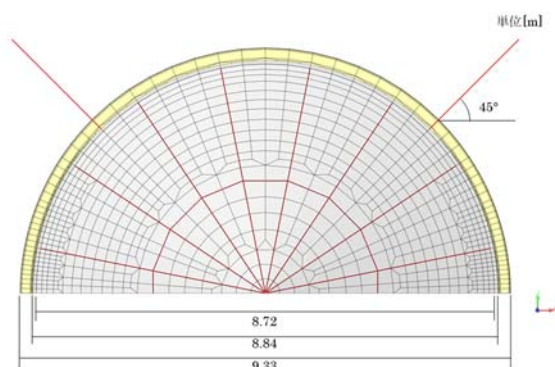


図-6.11 対策工2 500 kL 級解析モデル 全体上面寸法

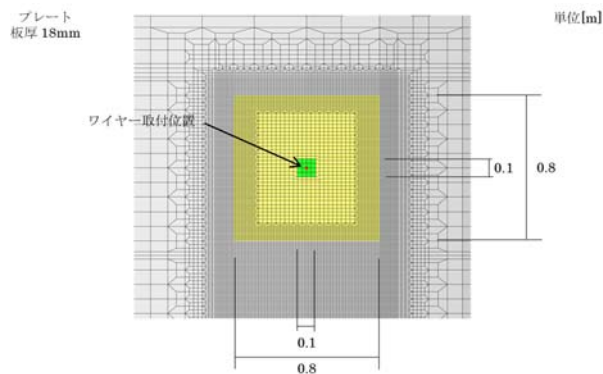


図-6.12 対策工2 500 kL 級解析モデル プレート部寸法

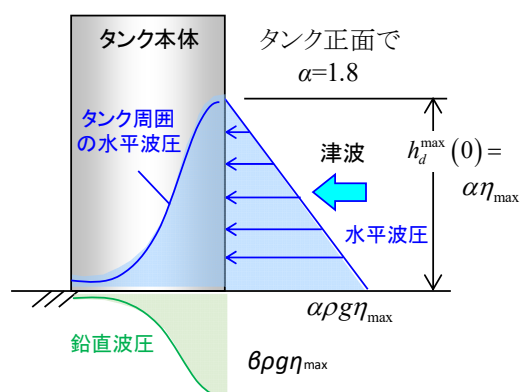


図-6.13 タンク本体に作用する津波波圧分布⁷⁾

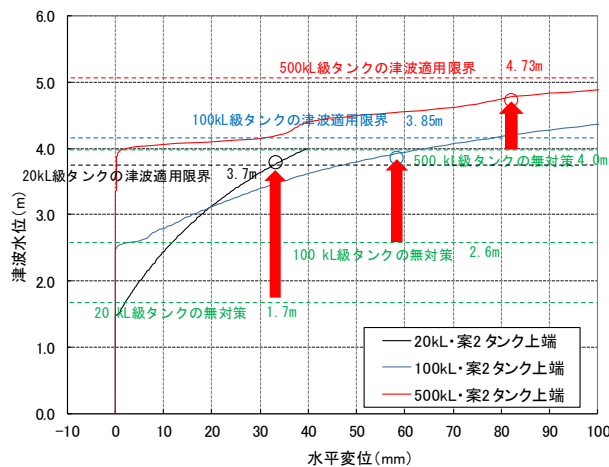


図-6.14 津波水位—水平変位関係

6.2 津波適用限界の評価

図-6.14にCFRP対策工2を講じた20 kL級および100kL、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 $h_d^{\text{max}}=3.7$ m でCFRP 範囲の外でタンク側板の塑性が始まる。その後大幅な変位増加が見られ、タンク頂部を超える $h_d^{\text{max}}=4.0$ m に達する。

対策工2においてはどのケースにおいても CFRP の剥離は見られなかったため、CFRP 施工範囲外にタンクの側板部に塑性が見られた津波水位を津波適用限界水位と定義することとした。

対策工2における 100 kL 級タンクにおいては、津波水位 $h_d^{\text{max}}=3.85\text{m}$ で、500 kL 級タンクにおいては、津波水位 $h_d^{\text{max}}=5.73\text{m}$ で CFRP 範囲の外でタンク側板の塑性が始まり、それぞれの津波適用限界水位と判断した。

各ケースにおいて、CFRP の破断点は 100 kL 級タンクにおいては $h_d^{\text{max}}=4.85\text{m}$ 、500 kL 級タンクにおいては $h_d^{\text{max}}=5.07\text{m}$ であり、20kL 級タンクではタンク高さである $h_d^{\text{max}}=4.0\text{m}$ にて破断は見られなかった。

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⁷⁾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 $h_d^{\text{max}}=1.7\text{m}$ 、100 kL 級タンクで $h_d^{\text{max}}=2.6\text{m}$ 、500 kL 級タンクで $h_d^{\text{max}}=4.0\text{m}$ となり、CFRP 対策により津波適用限界水位が 1.1~2.1 倍となった。

20 kL 級および 100kL、500 kL 級タンクの津波適用限界におけるタンク支持プレート部付近に生じた Mises 応力と支持プレートを固定する CFRP の周方向応力を図-6.15~6.20 に示す。Mises 応力の最大値は、CFRP 範囲内の支持プレート部にて発生し 20 kL 級タンクでは最大 292 N/mm²、100 kL 級タンクでは最大 287N/mm²、500 kL 級タンクでは最大 246 N/mm² であった。CFRP 施工範囲外のタンク側板部が塑性化すると危険物の漏洩の可能性が高まるため、本検討では CFRP 施工範囲外のタンク側板部が塑性化が始まる点を本工法の津波適用限界とすることとし、各図における CFRP 範囲外の塑性に注目した。この点での Mises 応力の最大値は、20 kL 級、100 kL 級、500 kL 級タンクそれぞれ最大 235 N/mm² と塑性が始まる水位であることを示している。CFRP の周方向応力は、20 kL 級タンクでは最大 357 N/mm²、100 kL 級タンクでは最大 570 N/mm²、500 kL 級タンクでは最大 1905 N/mm² であり、引張強度の 11~57 %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-6.21 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いる。図より、20 kL 級タンク、100 kL 級タンク、500 kL 級タンクにおいて対策工2の CFRP とワイヤーが津波波力の 26~56%負担と効果にばらつきがみられる結果となった。タンク容量が大きくなるほど効果が薄くなっていることより、対策工2においては支持プレートの箇所や仕様(大きさ、厚み、材質等)に更なる検討が必要であると推測される。本件は今後の課題である。

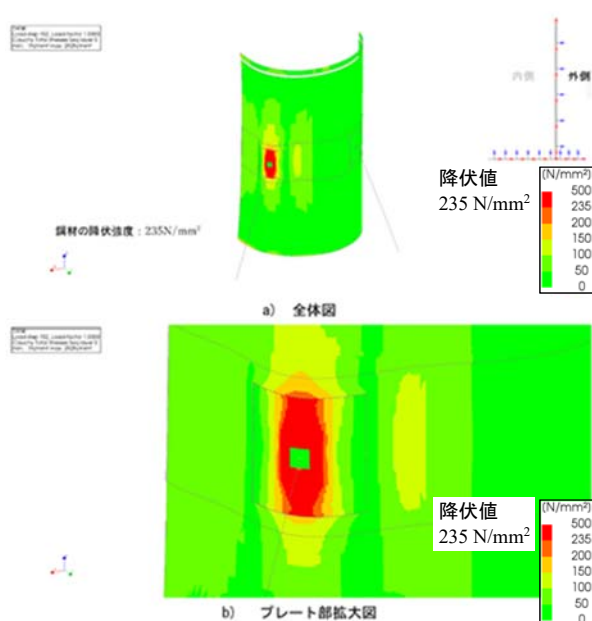


図-6.15 対策工2 20kL 津波適用限界時の Mises 応力

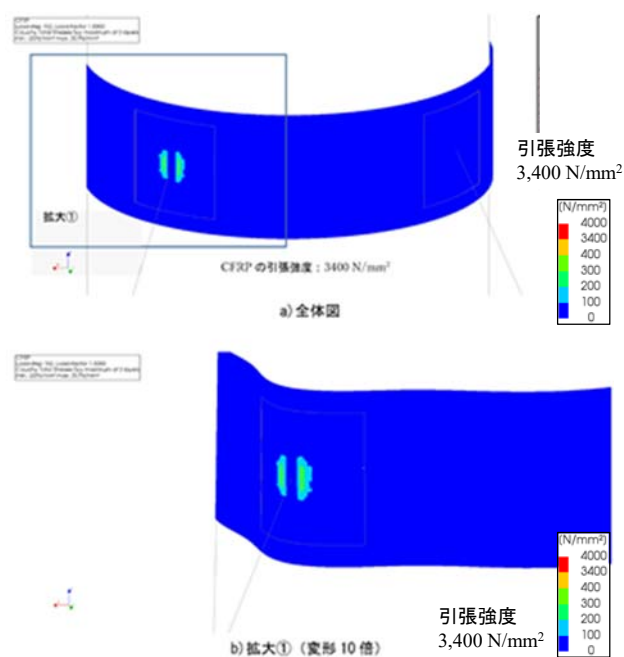


図-6.16 対策工2 20kL 津波適用限界時の CFRP の円周方向応力

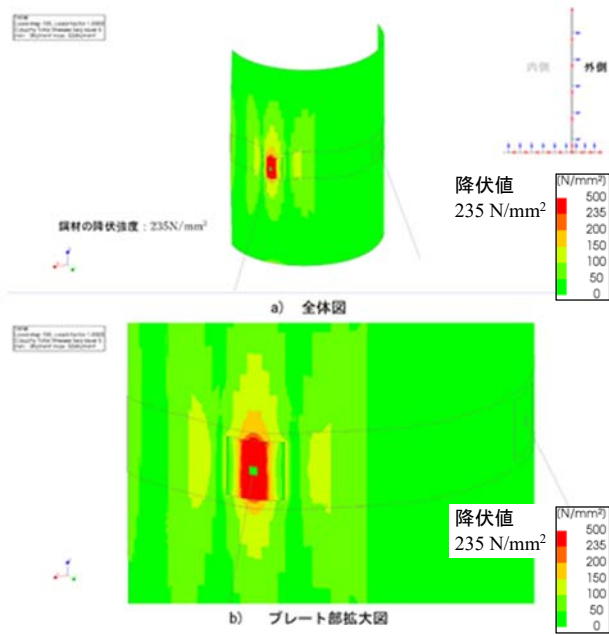


図-6.17 対策工2 100kL 津波適用限界時のタンク支持板付近のMises 応力

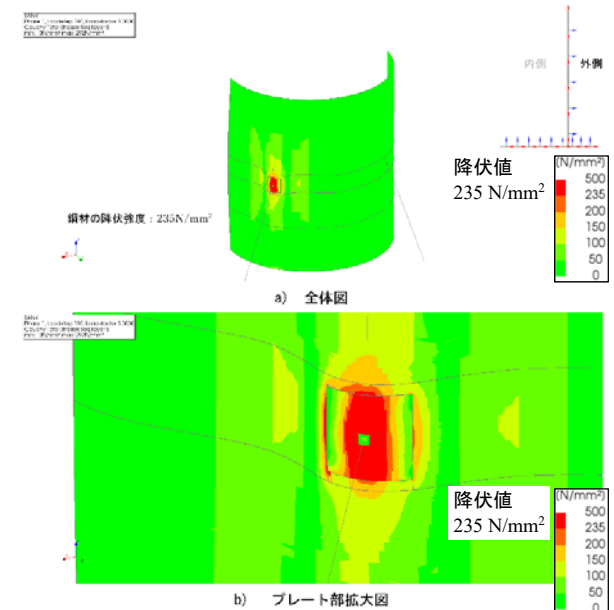


図-6.19 対策工2 500kL 津波適用限界時のタンク支持板付近のMises 応力

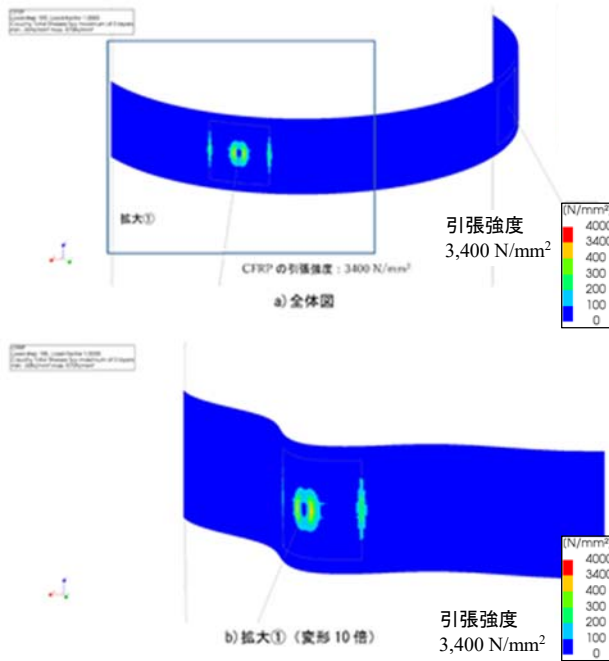


図-6.18 対策工2 100kL 津波適用限界時のCFRPの円周方向応力

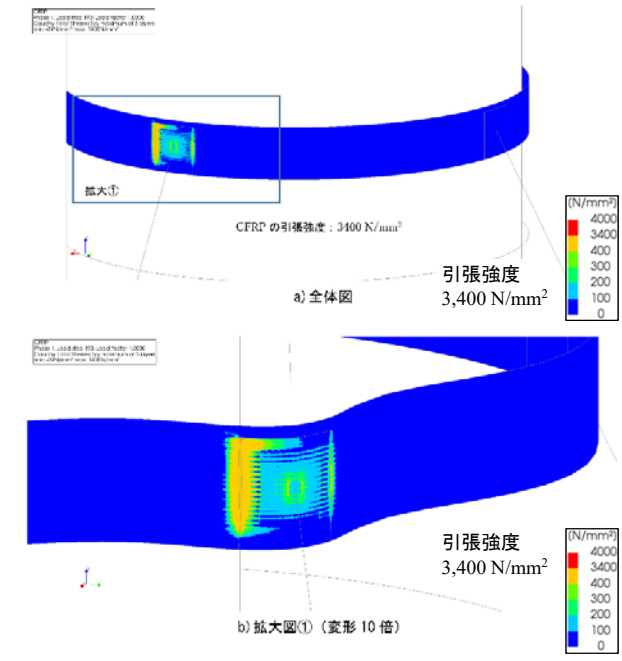


図-6.20 対策工2 500kL 津波適用限界時のCFRPの円周方向応力

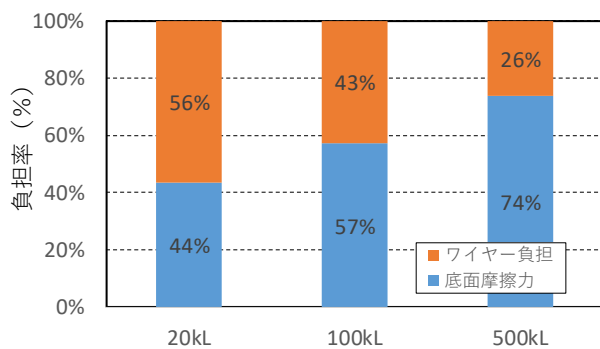


図-6.21 津波適用限界時の津波波力に対する負担率

6.3 小括

CFRP 対策工 2 を講じた小規模タンクの津波適用限界の評価として下記の事項が得られた。

- ① 津波適用限界水位においては、20 kL 級および 100kL、500 kL 級の小規模タンクにおいて、CFRP とワイヤーが津波波力の 26～56% を負担しており、CFRP 対策工 2 による津波漂流対策を定量的に評価できた。
- ② 20 kL 級および 100kL、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 1.1～2.1 倍となり、対策効果を定量的に示すことができた。CFRP 施工範囲外のタンク側板部が塑性化すると危険物の漏洩の可能性が高まるため、CFRP 施工範囲外のタンク側板部が塑性化が始まる点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、支持プレートを支持する CFRP の周方向応力は破断には至らず、引張強度の 11～57 % 程度であった。

7. 滑動・漂流防止対策工の設計・施工方法、積算の検討

7.1 設計方法

【対策工 1】

対策工 1 は、タンクとタンク基礎コンクリートを炭素繊維シートと樹脂により一体化を行う工法で、津波等による外力に対して、シートとタンクおよび基礎コンクリートとの接着力により、タンクの浮き上がりと滑動に抵抗する。

(1) タンク本体の浮き上がり防止に必要な補強力

タンク本体の浮き上がり防止に必要な補強力は、炭素繊維シートとタンク、および炭素繊維と基礎コンクリートの接着力を T_b として、次式により算出する。

$$PF_S = \frac{W_T + W_L + T_B}{F_{tv}} \quad (\text{式-7.1})$$

ここで、 W_T : タンク本体重量、 W_L : 内容液の重量、 F_{tv} : 津波の鉛直波力、 PF_S : 計画安全率 (=1.2)、 T_B : タンクの安定に必要な接着力である。

(2) タンク本体の滑動防止に必要な補強力

タンク本体の滑動防止に必要な補強力は、CFRP とタンク、および CFRP と基礎コンクリートの必要接着力を T_b として、次式により算出する。

$$PF_S = \frac{\mu(W_T + W_L - F_{tv}) + T_B}{F_{th}} \quad (\text{式-7.2})$$

ここで、 μ : 基礎とタンク本体の摩擦係数、 F_{th} : 津波の水平波力である。

なお、本検討での摩擦係数 μ は、土面に対する乾いた石の静止摩擦係数である 0.5 と設定する¹¹⁾。

(3) 必要補強範囲

CFRP の面外強度は、再現実験により鋼材-CFRP、RC 基礎-CFRP とともに 15N/mm^2 と算定されたが、想定される小規模タンクにおいては RC 基礎の表面の風化が懸念されるため、設計においては RC 基礎と CFRP の面外強度は 1.5N/mm (CFRP のコンクリートへの接着強度の保証値) を用いる。

タンクへの CFRP 設置面積を $A_t (= \pi \times D(\text{タンク直径}) \times H(\text{タンクへの CFRP 設置高さ}))$ RC 基礎への CFRP 設置面積を A_c とすると、必要接着力と CFRP 設置面積の関係は以下の通りとなる。

なお、式-7.3 と式-7.4 の大きい値を TB として採用する。

・タンク本体

$$TB = 15 \times A_t (N) \quad (\text{式-7.3})$$

・RC 基礎

$$TB = 1.5 \times A_c (N) \quad (\text{式-7.4})$$

【対策工2】

対策工2はグラウンドアンカーによる補強工法で、グラウンドアンカーで補強したアンカーブロックと、タンク本体をワイヤーで連結し、津波・水害時の滑動および浮き上がりを抑止する補強工法である。

津波等が作用する方向の特定は困難であるため、ワイヤーとグラウンドアンカーはタンク全周に均等な角度で4方向に配置することを基本とする。タンクの浮き上がりに対する補強の検討においては、ワイヤーおよびグラウンドアンカーは4本が有効であるとして設計を行う。一方、本研究における水理模型実験において、水圧作用方向の反対側に設置されたワイヤーおよびグラウンドアンカーには荷重が作用しないことがわかっている。したがって滑動に対する補強の検討においては、4方向に配置したワイヤーおよびグラウンドアンカーのうち1本だけで外力に抵抗すると考える。

(1) 必要補強力の検討

津波および水害発生時にワイヤーに作用する張力を T 、ワイヤーとタンクの傾角を θ 、グラウンドアンカーの張力を T_d とすると、タンクに関する作用力の関係は図-7.1のように示される。また、ワイヤーに作用する張力の成分は、以下のように表すことができる。

$$\text{鉛直方向の成分} : T_v = T \cos\theta \quad (\text{式-7.5})$$

$$\text{水平方向の成分} : T_H = T \sin\theta \quad (\text{式-7.6})$$

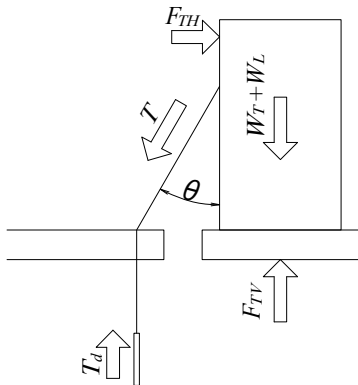


図-7.1 補強概要図

- W_T … タンク本体重量
- W_L … 内溶液の重量
- F_{TV} … 津波の鉛直波力
- F_{TH} … 津波の水平波力
- T … ワイヤーに作用する張力
- T_d … 設計アンカー力

(2) タンク本体の浮き上がり防止に必要な補強力

タンク本体の浮き上がり防止に必要な補強力は、ワイヤーに作用する鉛直方向の張力を T_v として次式により算出する。

$$PF_s \leq \frac{W_T + W_L + T_v}{F_{TV}} \quad (\text{式-7.7})$$

ここで、 W_T :タンク本体重量、 W_L :内溶液の重量、 F_{TV} :津波の鉛直波力、 PF_s :計画安全率 (=1.2) である。

(3) タンク本体の滑動防止に必要な補強力

タンク本体の滑動防止に必要な補強力は、ワイヤーに作用する水平方向の張力を T_H として次式により算出する。

$$PF_s \leq \frac{\mu(W_T + W_L - F_{TV})}{F_{TH} - T_H} \quad (\text{式-7.8})$$

ここで、 μ :基礎とタンク本体の摩擦係数、 F_{TH} :津波の水平波力である。

なお、本検討での摩擦係数 μ は、土面に対する乾いた石の静止摩擦係数である0.5と設定する¹¹⁾。

(4) 必要補強力

式-7.7 および式-7.8 によりそれぞれ算出したワイヤーに作用する張力のうち、最大の値を必要補強力 T とする。

(5) グラウンドアンカーの設計

①グラウンドアンカーの構造

危険物屋外貯蔵タンクは、埋め立て地など比較的軟弱な地盤上に設置されていることが多い。したがって本報告書では、軟弱地盤への適用に適したグラウンドアンカー工法であるRSIアンカーを想定して記述する。RSIアンカーは特殊な注入管(インジェクションパイプ)により繰り返し注入を行うことでアンカー体周辺地盤の拘束力を強化すると同時にアンカー体を拡大し、通常型アンカーと比較して大きな極限引抜き力を得ることができる工法で、軟弱地盤での実績が豊富である。

また、津波等において衝撃的かつ繰り返し荷重が作用することが想定されることから、アンカー材の頭部構造は衝撃荷重および繰り返し荷重の作用に対して定着性能が維持できるナット定着方式を採用する。

②設計アンカー力の算出

設計アンカー力 T_d は、必要補強力 T より次式により算出できる。

$$T_d = T \times \cos\theta \quad (\text{式-7.9})$$

ただし、設計条件や現場条件などによってグラウンドアンカーを鉛直方向以外に計画する必要がある場合は、角度補正による設計アンカー力の割り増しを検討する。

③グラウンドアンカーの配置

・グラウンドアンカーの配置計画

グラウンドアンカーの配置は、タンク1基に対して90°毎に4本配置することを基本とする。ただし、周辺状況や設計条件に制約がある場合、この限りではない。

・グラウンドアンカー打設角度

グラウンドアンカー打設角度は 90° 鉛直方向を基本とする。ただし、周辺状況や設計条件に制約がある場合、この限りではない。

・アンカー体の設置間隔

アンカー体の設置間隔は、グラウンドアンカーの相互作用を考慮して決定する。

一般的にアンカー体設置間隔を 1.5m 以上確保すればグループ効果は考慮しなくてもよい。

④グラウンドアンカーの長さ

・アンカー自由長

アンカー自由長は、原則として、4m 以上とする。

・アンカー体長

アンカー体長は、原則として、3m 以上、10m 以下とする。

⑤アンカー体

アンカー体に用いるグラウトは、緊張時あるいは設計荷重作用時に、十分な強度を有するものとする。

・グラウトの設計基準強度

グラウトの圧縮強度は $\sigma_{ck} = 24N/mm^2$ 以上とする。

・PC 鋼より線とグラウトの許容付着応力度

RSI アンカーにおけるインナーグラウトは、インジェクションパイプによって拘束されている。このため、PC 鋼より線とグラウトの許容付着力は、地盤工学会基準より 25%高い $\tau_{ba} = 1.0N/mm^2$ とする。

・インジェクションパイプとグラウトの許容付着応力度

RSI アンカーはインジェクションパイプを介してアウターグラウトへ荷重が伝達する。インジェクションパイプは亜鉛メッキ塗装鋼管を使用することを標準とし、アウターグラウトとの許容付着力は $\tau_{ta} = 0.5N/mm^2$ とする¹²⁾。

⑥許容アンカー力

設計アンカー力は許容アンカー力を越えてはならない。

許容アンカー力 (T_a) は、許容引張り力 (T_{as})、許容引抜き力 (T_{ag}) のいずれかの小さい値とする。

・許容引張り力 (T_{as})

許容引張り力 (T_{as}) は、アンカー極限引張り力 (T_{us})、テンドン降伏引張り力 (T_{ys}) に対しどちらか小さい値を用いる。

表-7.1 許容引張り力 (T_{as})¹³⁾

	テンドン極限引張り力 (T_{us}) に対して	テンドン降伏引張り力 (T_{ys}) に対して
許容引張り力	0.60 T_{us}	0.75 T_{ys}

・許容引抜き力 (T_{ag})

許容引抜き力 (T_{ag}) は、テンドン極限引抜き力 (T_{ug}) に対して安全率を考慮して決定する。

表-7.2 極限引抜き力に対する (T_{ug}) 安全率 (f_s)¹³⁾

	安全率 f_s
安全率	2.5

⑦周面摩擦抵抗

グラウンドアンカーの設計および施工のために実施する試験のうち、基本調査試験に含まれる引抜試験によって、グラウンドアンカーの極限引抜き力およびその挙動を把握し、グラウンドアンカーの設計に用いるアンカー体の周面摩擦抵抗を決定することを標準とする。

実際には設計に先立って引抜試験を実施することは困難であるため、設計段階では以下に示す周面摩擦抵抗値を用いてもよい。RSI アンカーは繰り返し注入の効果により引き抜き抵抗が増加することから表-7.3 の値を 1.5 ~ 2.0 倍程度割り増した値を設計時の極限周面摩擦抵抗値として採用する¹²⁾。

表-7.3 アンカー体の極限周面摩擦抵抗値¹³⁾

地盤の種類		摩擦抵抗 (MN/m ²)	
岩盤	硬岩	1.5 ~ 2.5	
	軟岩	1.0 ~ 1.5	
	風化岩	0.6 ~ 1.0	
	土丹	0.6 ~ 1.2	
砂礫	N 値	10	0.10 ~ 0.20
		20	0.17 ~ 0.25
		30	0.25 ~ 0.35
		40	0.35 ~ 0.45
		50	0.45 ~ 0.70
砂質土	N 値	10	0.10 ~ 0.14
		20	0.18 ~ 0.22
		30	0.23 ~ 0.27
		40	0.29 ~ 0.35
		50	0.30 ~ 0.40
粘性土		1.0 × c (c は粘着力)	

⑧定着時緊張力

グラウンドアンカーによる補強工法は、津波・水害によるタンクの滑動および浮き上がりを抑止することを目的としているため、定着時緊張力は各条件で算出された設計アンカー力の最大値に対して 100%を導入する。

(6) ケーブル選定例

6 章における解析結果から算出されたワイヤー発生張力から、ワイヤーおよびグラウンドアンカーのケーブルを選定して、対策工 2 が設計可能であることを確認する。

①20kL

解析結果を図-7.2 に示す。タンク降伏時のワイヤーの引張り力である約 103kN に安全を考慮して 110kN/本とする。ワイヤーは F40T (破断荷重 $P_u=387kN$) ~ F600T ($P_u=5819kN$) まで種類がある。破断荷重の 60% を許容荷重 (P_a) とすると、F40T は $P_u=387kN$ より、 $P_a=232.2kN$ となり、F40T は作用する引張り力に対して十分な強度を有する。

グラウンドアンカーは F20U ($P_u=261kN$) ~ F170U (1680kN) まで種類がある。ワイヤーはタンクに対して

30度の角度で設置されていることから、鉛直に打設するグラウンドアンカーには、 $110\text{kN} \times \cos 30^\circ = 96\text{kN}$ の引張力が作用する。F20Uの許容荷重は $P_a=156\text{kN}$ であり、F20Uは作用する引張力に対して十分な強度を有する。

したがって、20kLの場合はワイヤー：F40T、グラウンドアンカーF20Uタイプで対応可能である。

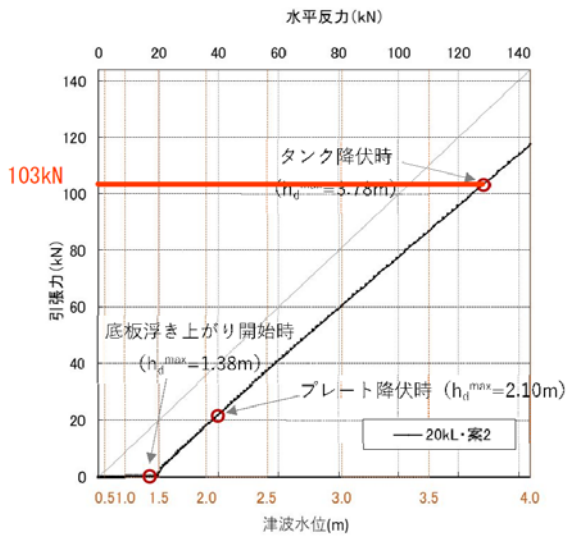


図-7.2 解析結果 (20kL 級)

②500kL

解析結果を図-7.3に示す。CFRP 破断時のワイヤーの引張力を約400kN/本とする。F70Tを選定すると、 $P_u=714\text{kN}$ より、 $P_a=428.4\text{kN}$ となり、F70Tは作用する引張力に対して十分な強度を有する。

ワイヤーはタンクに対して30度の角度で設置されていることから、鉛直に打設するグラウンドアンカーには、 $400\text{kN} \times \cos 30^\circ = 347\text{kN}$ の引張力が作用する。F70Uの許容荷重は $P_a=428.4\text{kN}$ であり、F70Uは作用する引張力に対して十分な強度を有する。

したがって、500kLの場合はワイヤー：F70T、グラウンドアンカーF70Uタイプで対応可能である。

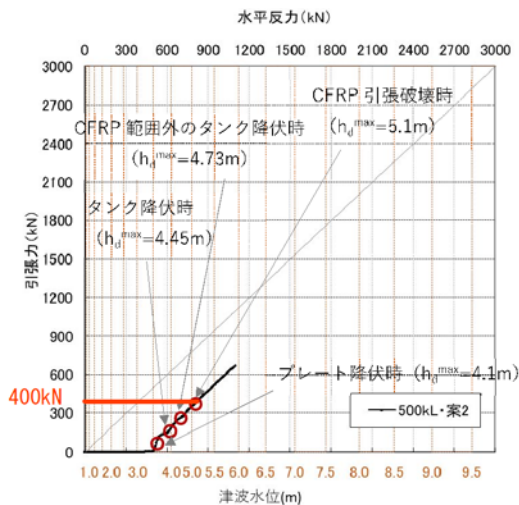


図-7.3 解析結果 (500kL 級)

7.2 施工方法

【対策工1】

(1) 施工手順

施工手順を図-7.4に示す。

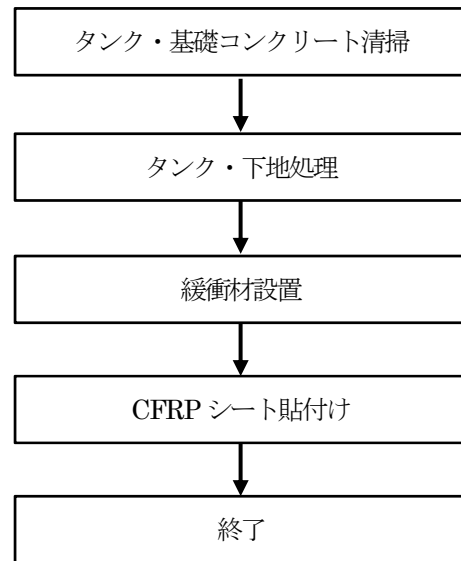


図-7.4 施工手順

①清掃・基礎工の調整

・清掃

タンクおよび基礎コンクリートへの炭素繊維シートの接着に支障となるような異物を除去し、平面度を確保する。

・基礎工の調整

基礎コンクリートの角部でCFRPシートが破断する可能性があるため、R10mm以上の形状に面取りを行う。

・既存グラウンドアンカーの撤去

炭素繊維シートの接着効果を発揮させるため、既存のグラウンドアンカーおよびアンカーチェアを撤去する。その際、高速カッターなど火花を発生させる方法は避ける。

②下地処理

接着剤の性能を發揮させるために、刷毛やローラーでタンクにプライマーを塗布する。塗布の施工状況を写真-7.1に示す。



写真-7.1 プライマー塗布状況

③シート貼り付け

・接着剤下塗り CFRP 設置の前に、タンクおよび基礎コンクリートに接着剤の下塗りを行う。下塗りの施工状況を写真-7.2 に示す。



写真-7.2 レジン塗布状況（下塗り）

・CFRP シート貼り付け

下塗りした接着剤が乾かないうちに、CFRP シートを貼り付ける。CFRP の繊維の方向が、縦と横が重なるように、2 枚のシートを重ねる。シートは 1 枚ごとに接着剤で貼付ける。シート貼り付けの施工状況を写真-7.3 に示す。



写真-7.3 CFRP シート貼付（鉛直方向・水平方向）

・接着剤上塗り

CFRP シートの貼り付けが終わった後、含侵タイプの接着剤をシートの上から上塗りする。上塗りの施工状況を写真-7.4 に示す。



写真-7.4 レジン塗布状況（上塗り）

【対策工 2】

(1) 施工手順

施工手順を図-7.5 に示す。

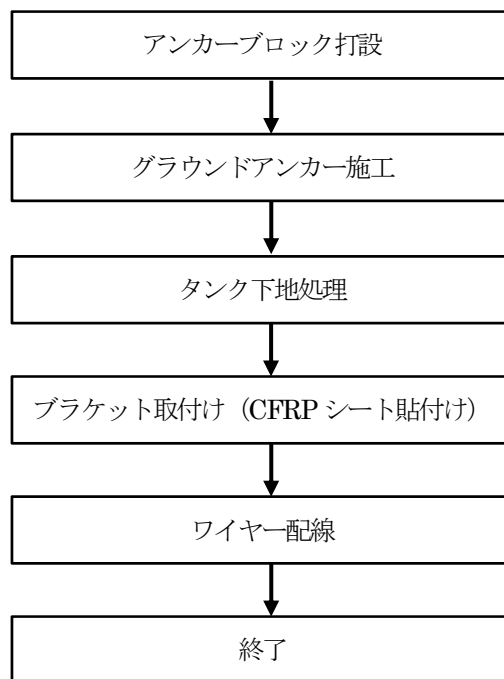


図-7.5 施工手順

①アンカーブロック打設

グラウンドアンカー打設位置にアンカーブロックを造成する。アンカーブロックは、設計アンカー力に対する反力体として十分な強度と、支持地盤の受圧面積を確保できる形状とする。

②グラウンドアンカーの施工

・施工計画

グラウンドアンカー工においては、施工の良否がグラウンドアンカーの耐力、耐久性、安全性を大きく左右するため、施工方法、材料等は事前に十分検討することが必要である。工事着手前に施工管理、品質管理、安全管理に関する詳細な計画を立て、施工方法、施工手順、使用機械、工程、組織編成等について施工計画書を作成す

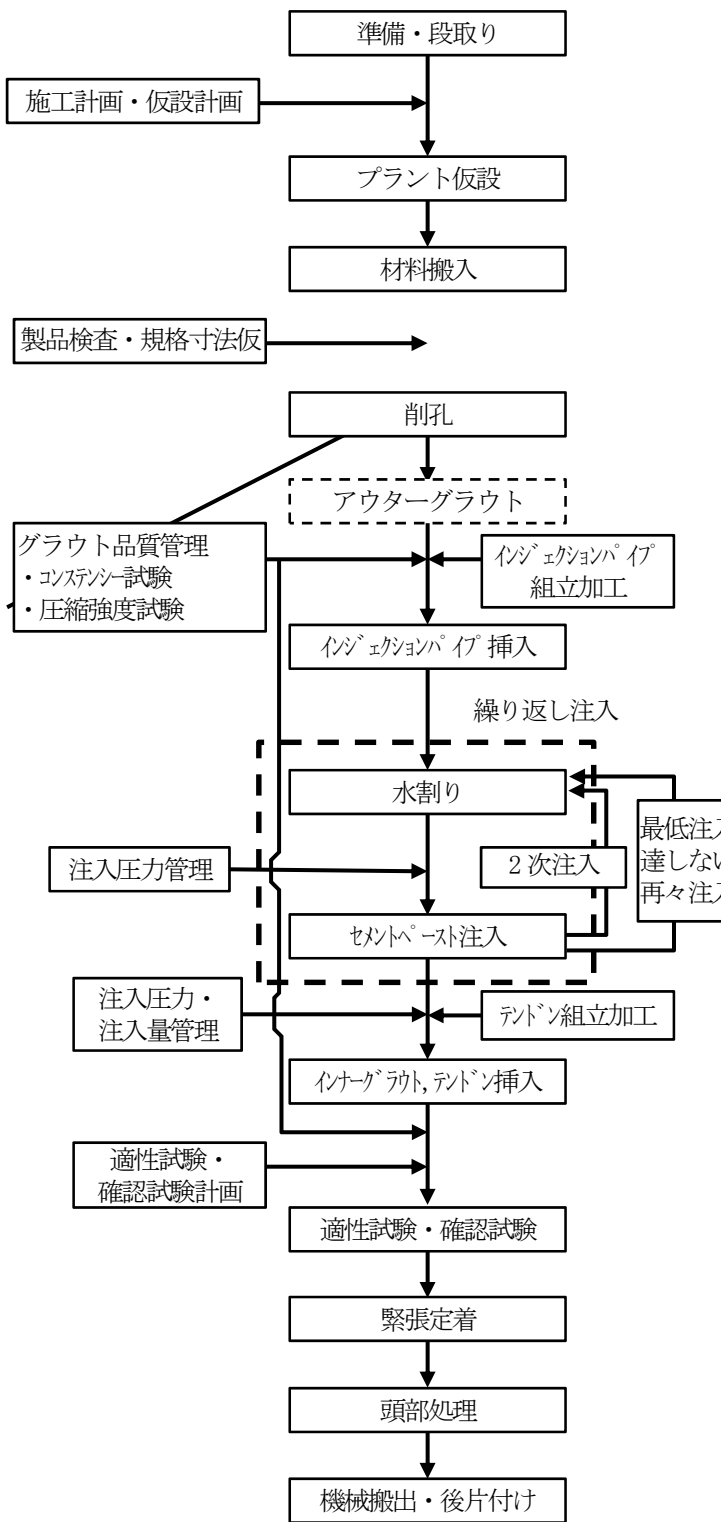


図-7.6 施工フロー図¹²⁾

作業が円滑に行われるようにする。

- ・削孔精度

グラウンドアンカー削孔における施工精度は、グラウンドアンカーがアンカーされる構造物および周辺の構造物に対して、有害な影響を与えないように、許容値以内の制度を確保する。

- ・削孔機械および削孔径

グラウンドアンカーに使用する削孔機は、地質・地盤条件、周辺環境、および経済性を考慮して選定する。削孔径は使用するインジェクションパイプの径に応じたものとする。

- ・テンドン組立

テンドンの組立加工は、設計図書に記された仕様に従い、順序よく加工する。グラウンドアンカーは全長にわたり二重防食構造を採用しているため、特に止水処理は確実にを行う。

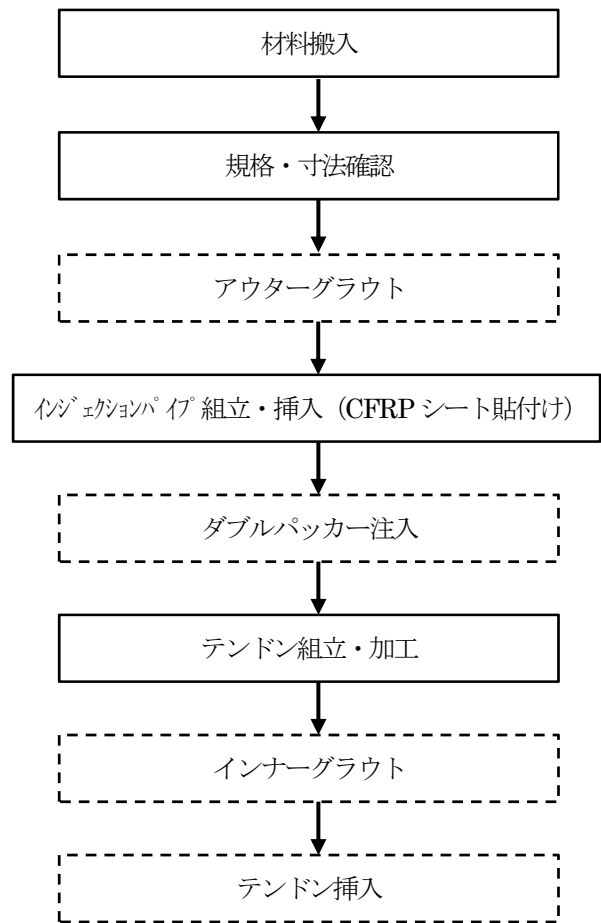


図-7.7 組立加工フロー図¹²⁾

る。

- ・削孔工

削孔は、設計図書に示された位置、削孔径、長さ、アンカー傾角、方向等の仕様や削孔精度を満足し、周囲の地盤を乱すことのないように行う。削孔後は、孔内を清水またはエアで十分に洗浄し、テンドンの挿入、注入

- ・インジェクションパイプの挿入

インジェクションパイプの挿入時には、油脂、泥土等の付着や損傷、変形がないよう十分注意する。インジェクションパイプは所定の深度まで正確に挿入する。

- ・テンドンの挿入

テンドンの挿入時には、油脂、泥土等の付着や損傷が

ないよう十分注意する。

インジェクションパイプおよびテンドンは所定の深度まで正確に挿入する。

・インジェクションパイプおよびテンドンの取り扱い
インジェクションパイプやテンドンを保管する場合は、インジェクションパイプやテンドンの損傷や錆びの防止措置を行う。

・グラウトの配合

グラウトの配合は、W/C=50%を標準とし、現場配合を決定する。混和剤は必要に応じて使用し、試験練りを行い、圧縮強度や比重、フロー値の測定を行う。

・グラウトの練り混ぜ及び注入

グラウトの練り混ぜはミキサーで行い、所定のコンシステンシーを有し、均一なグラウトとなるようにする。

アウターグラウト、インナーグラウトはどぶ漬け方式を基本とし、削孔水と完全に置換されていることを確認する。

・繰り返し注入

繰り返し注入は水割りとセメントペースト注入による繰り返し作業である。水割りはアウターグラウトのセメントペーストが硬化した後に行う。注入の可否は引抜き試験により定めた管理値に従い判断する。セメントペースト注入は所定の速度で規定注入量に達するまで連続的に行う。

・緊張・定着

グラウトが所定強度に達したら適性試験によって所定の荷重や変位特性を確認し、緊張・定着を行いグラウンドアンカーに緊張力を与える。定着時緊張力は各条件で算出された設計アンカー力の最大値に対して 100%とする。

・頭部背面および頭部処理

グラウンドアンカー頭部背面は PC 鋼より線の破断例が多いため、雨水等の浸入がないよう、確実に止水する。グラウンドアンカー頭部は頭部キャップおよび防錆油で止水する。

③タンク下地処理

接着剤の性能を発揮させるために、刷毛やローラーでタンクにプライマーを塗布する。

④ブラケット取り付け

ブラケットは炭素繊維シートの接着によってタンクに貼り付けて固定する。

⑤ワイヤー配線

ワイヤーの両端をアンカーブロックおよびタンクに取り付けたブラケットに固定する。このときワイヤーにたわみの無いよう、ナットを締め付ける。

7.3 積算

【対策工1】

対策工1の積算については、模型実験実施時の供試体作成の施工の状況から、各工程の歩掛を推定した。各工

程の作業員種別は、国土交通省発表の「公共工事設計労務単価」を参考とした。

(1) 清掃工

①構成人員

据付工の構成人員を表-7.4に示す。

表-7.4 清掃工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り据付基数

タンク本体および基礎コンクリートの1日当りの清掃面積 (A) を表-7.5に示す。

表-7.5 日当り清掃面積 (㎡/日)

対象	日当り清掃面積
タンク本体	20
基礎コンクリート	10

(2) 基礎の調整工

①構成人員

基礎の調整工の構成人員を表-7.6に示す。

表-7.6 基礎の調整工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り施工数量

基礎の調整工の1日当りの施工延長 (L) を表-7.7に示す。

表-7.7 日当り施工延長 (m/日)

対象	日当り施工延長
基礎コンクリート (RC)	50

(3) 下地処理工

①構成人員

下地処理工 (プライマー、接着剤下塗り) の構成人員を表-7.8に示す。

表-7.8 下地処理工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り施工数量

下地処理工の1日当りの施工面積 (A) を表-7.9に示す。

表-7.9 日当り施工面積 (㎡/日)

対象	日当り施工面積
タンク本体	10
基礎コンクリート	5

(4) 炭素繊維シート貼り付け工

①構成人員

炭素繊維シート貼り付け工の構成人員を表-7.10に示す。

表-7.10 炭素繊維シート貼り付け工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り施工数量

炭素繊維シート貼り付け工の1日当りの施工面積 (A) を表-7.11に示す。

表-7.11 日当り施工面積 (㎡/日)

対象	日当り施工面積
タンク本体	10
基礎コンクリート	10

【対策工2】

対策工2の積算について、グラウンドアンカーに関しては「RSI グラウンドアンカー工法積算資料」¹⁴⁾を参照する。その他の工程は模型実験実施時の供試体作成の施工の状況から、各工程の歩掛を推定した。各工程の作業員種別は、国土交通省発表の公共「工事設計労務単価」を参考とした。

(1) アンカーブロック打設工

(1) - 1型わく工

①構成人員

型わく工の構成人員を表-7.12に示す。

表-7.12 型わく工の構成人員 (人)

土木一般世話役	型わく工	普通作業員
1	2	1

②日当り施工数量

型枠の組立、解体・撤去における1日当りの施工量(A)を表-7.13に示す。

表-7.13 型わく工の日当り施工量 (㎡/日)

対象	日当り施工量
型わく工	8.5
諸雑費	6 (%)

(1) - 2コンクリート打設工

コンクリート使用量は、次式による。

$$\text{使用量} = \text{設計量} \times (1+K) \quad K: \text{ロス率} (0.21)$$

①構成人員

コンクリート打設工の構成人員を表-7.14に示す。

表-7.14 コンクリート打設工の構成人員 (人)

土木一般世話役	特殊作業員	普通作業員
1	1	2

②日当り施工数量

コンクリート打設工の1日当りの施工量 (V) を表-7.15に示す。

表-7.15 型わく工の日当り施工量 (㎡/日)

対象	日当り施工量
コンクリート打設工	4.0
諸雑費	0.7 (%)

(2) グラウンドアンカー工

グラウンドアンカー工の積算は、「RSI グラウンドアンカー工法積算資料」¹⁴⁾を参考に、現場条件を反映した係数を考慮する。

(3) タンク下地処理工

①構成人員

下地処理工(プライマー、接着剤下塗り)の構成人員を表-7.16に示す。

表-7.16 下地処理工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り施工数量

下地処理工の1日当りの施工面積 (A) を表-7.17に示す。

表-7.17 日当り施工面積 (㎡/日)

対象	日当り施工面積
タンク本体	10

(4) ブラケット取り付け工

①構成人員

ブラケット取り付け工の構成人員を表-7.18に示す。

表-7.18 ブラケット取り付け工の構成人員 (人)

土木一般世話役	特殊作業員	普通作業員
1	7	2

②日当り据付基数

ブラケット取り付け工の1日当りの施工量 (A) を表-7.19に示す。

表-7.19 日当り施工量 (組/日)

対象	日当り施工面積
ブラケット	4

(5) 炭素繊維シート貼り付け工

①構成人員

炭素繊維シート貼り付け工の構成人員を表-7.20に示す。

表-7.20 炭素繊維シート貼り付け工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	2

②日当り施工数量

炭素繊維シート貼り付け工の1日当りの施工量(A)を表-7.21に示す。

表-7.21 日当り施工量 (m²/日)

対象	日当り施工面積
タンク本体	10

(6) ワイヤー設置工

①構成人員

ワイヤー設置工の構成人員を表-7.22に示す。

表-7.22 ワイヤー設置工の構成人員 (人)

土木一般世話役	普通作業員
1	3

②日当り施工数量

ワイヤー設置工の1日当りの施工量を表-7.23に示す。

表-7.23 日当り施工量 (組/日)

対象	日当り施工面積
ワイヤー	8

8. おわりに

小規模タンクに対する津波による「滑動」「漂流」を防止する対策工を提案することを目的とした検討の成果を本報告では取りまとめた。津波による滑動・漂流防止対策工の立案については、耐津波性・耐震性・施工性・構造成立性等の観点から整理して比較・検討を行い、有効な対策工2案を選定した。対策工1については、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、20 k1 級タンクを用いた振動台実験を実施した。さらに、タンクに津波外力を作用させたFEM解析を実施し、漂流対策効果について考察した。対策工2については、津波外力に関する水理模型実験とCFD解析をおこなった。さらに、対策工1および対策工2について、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。最後に、対策工の設計・施工方法、積算について、基礎資料として取りまとめた。

今後は対策工1および対策工2の実用化に向けて、以下のさらなる検討が必要であると考えます。

- ・各種液位に対する対策効果を確認する。
- ・対策工1の敷設費用低減に向けた最小施工範囲を検討する。
- ・対策工2については、ワイヤー取付プレートの仕様(厚み、大きさ、箇所)、FRP施工範囲(幅、高さ)、ワイヤーの設置方法(角度、本数、たるみ有無)、敷設費用低減に向けた最小施工範囲等の最適設置方法が検討課題である。
- ・実機施工の実施により問題点を洗い出す。

今回検討した滑動・漂流防止対策工は津波だけでなく、洪水に対しても有効であると考えられる。そのためには、検討した津波波力式の洪水への適用性について検討し修正することにより、その効果を確認することが必要である。

謝辞: 本研究は総務省消防防災科学技術研究推進制度 JPJ000255 の委託を受け実施されたものである。消防研究センター秋葉研究統括官、畑山室長、危険物保安技術協会宮内課長には研究全般に対して有益な助言を頂いた。また、対策工2に関する設計・施工方法、積算の検討にあたっては、ライト工業株式会社の技術営業本部滝澤部長、施工技術本部佐野部長、別府担当部長から指導を受け有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 屋外タンク貯蔵所の技術基準解説—準特定屋外タンク貯蔵所の技術詳解— 危険物保安技術協会編著, pp. 4-5, 2010.
- 2) 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, pp2885-2894, 2014.
- 3) 危険物の規制に関する政令: 政令第306号、1959
- 4) 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.
- 5) DIANA-10.2 User's Manual, DIANA FEA BV.
- 6) 土木学会: 複合構造標準示方書 [設計編], 丸善, pp.57-58, 2014.
- 7) 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, pp70-78, 2009.
- 8) 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.
- 9) 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, pp276-280, 2008.
- 10) OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, 参照 2018-12-20
- 11) 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, pp88, 2009.
- 12) 一般財団法人土木研究センター: RSI グラウンドアンカー, 建技審証第0531号, 2016.
- 13) 公益社団法人地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準 (JGS4101-2012), 同解説, pp71-78, 2012.
- 14) RSI アンカー協会: グラウンドアンカー工法積算資料, 2019.