

屋外貯蔵タンクの津波・水害による流出等防止に関する
中間まとめ（修正後）

令和3年3月

屋外貯蔵タンクの津波・水害による流出等防止に関する調査検討会

趣旨

平成23年の東日本大震災において、多数の屋外タンク貯蔵所が津波による被害を受けたことから、危険物の規制に関する規則が改正され、津波が発生した際の応急措置等について、予防規程に定めることが義務づけられた。この対策は主に危険物の流出等を最小限にとどめるための措置であり、流出等そのものを防止することは困難とされた。

近年の技術開発により、屋外貯蔵タンクに津波対策工法（PC工法）を施したものが新たに建設されるとともに、消防庁の「消防防災科学技術研究推進制度」（競争的資金）を活用した小規模タンク向けの津波対策工法に関する研究開発が進められるなど、新たな知見が得られつつある。このことから、屋外貯蔵タンクの津波・水害による流出等防止へ寄与する対策工法に関する調査及び検討を行ってきたところである。

今般、これまでの本検討会における調査・検討の進捗状況と、これを踏まえた当面の取組みについて整理した。

課題として抽出された事項については、本検討会において引き続き調査・検討を行っていくこととする。

第1章	調査検討の概要	1
1.1	調査検討の目的	3
1.2	調査検討事項	3
1.3	調査検討体制	3
1.4	調査検討経過	4
第2章	津波・水害対策に関する調査	5
2.1	過去に実施された調査検討と現在の津波対策	6
2.1.1	危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会	6
2.1.2	東日本大震災を踏まえた危険物施設の地震・津波対策のあり方に係る検討会	6
2.1.3	現在の津波対策	7
2.2	近年の津波・水害による屋外貯蔵タンクの被害	7
2.2.1	平成27年9月関東・東北豪雨	7
2.2.2	平成30年以降の豪雨災害における危険物施設の被害	10
2.3	現在の津波対策に関する調査	12
2.3.1	気仙沼 PC工法 津波対策タンク	12
2.3.2	宮城県 志津川漁港 コンクリート被覆型タンク	16
2.3.3	その他	19
2.3.4	既存の津波対策工法の有効性の検討及び問題点の整理	21
第3章	屋外貯蔵タンクの津波対策工法の検討	23
3.1	対策工法の概要	24
3.1.1	対策工法1	24
3.1.2	対策工法2	25
3.2	解析手法の検討	26
3.2.1	事前実験（競争的資金で実施）	26
3.2.2	要素実験の再現解析（競争的資金で実施）	31
3.3	解析条件	36
3.3.1	対策工法1 解析条件	36
3.3.2	対策工法2 解析条件	41
3.4	準備解析	46
3.5	解析ケース	47
3.6	各ケースのFEM解析結果	48
3.7	対策工法の選定	66
3.8	対策工法の耐震性への影響の確認	67
3.9	維持管理	70
3.9.1	補修方法	70
3.9.2	CFRP施工に関する懸案に対する調査結果	70
3.10	現状の一般的な小型屋外貯蔵タンクの設置状況と施工可否の確認	72
3.11	まとめ	73
第4章	今後の検討課題	74
4.1	水害対策	75
4.2	津波対策 今後の課題	75
4.3	漂流物対策の提案	75

第 1 章 調査検討の概要

第1章 調査検討の概要

1. 1 調査検討の目的

平成23年の東日本大震災において、多数の屋外タンク貯蔵所が津波による被害を受けたことから、危険物の規制に関する規則が改正され、津波が発生した際の応急措置等について、予防規程に定めることが義務づけられた。この対策は主に危険物の流出等を最小限にとどめるための措置であり、流出等の原因そのものを防止する措置ではない。

津波による被害の原因となっているのは、タンク本体の浮き上がりに起因する滑動や転倒及び漂流物による配管等の損傷といったものがあり、小規模な屋外貯蔵タンクにおけるこれらのアクシデントを防止するのは震災当時困難とされていた。また、近年では台風や集中豪雨等に伴う浸水により、同様の被害事例が散見されている。

一方で、近年の技術開発により、屋外貯蔵タンクに津波対策工法（PC工法）を施したものが新たに建設されるとともに、消防庁の「消防防災科学技術研究推進制度」（以下「競争的資金」という。）を活用した小規模タンク向けの津波対策工法に関する研究開発が進められるなど、新たな知見が得られつつある。このことから、屋外貯蔵タンクの津波・水害による流出等防止へ寄与する対策工法に関する調査及び検討を行うことを目的とする。

1. 2 調査検討事項

- (1) 現在の津波対策工法の調査結果（第2章）
- (2) 津波対策工法の検討（第3章）

1. 3 調査検討体制

屋外貯蔵タンクの津波・水害による流出等防止に関する調査検討会委員名簿

（五十音順 敬称略）※()は前任者

座長	辻 裕一	東京電機大学 工学部 機械工学科 教授
委員	有田 英文	石油化学工業協会
	(細瀬 泰伸)	石油化学工業協会)
	岩本 善和	常総地方広域市町村圏事務組合消防本部 予防課長
	小川 晶	川崎市消防局 予防部 危険物課長
	岸 正憲	一般社団法人 日本化学工業協会
	久保内 昌敏	東京工業大学物質理工学院 教授
	佐々木 敦	気仙沼・本吉地域広域行政事務組合消防本部 予防課長
	サッパシー・アワット	東北大学災害科学国際研究所 災害リスク研究部門津波工学研究分野 准教授
	田島 芳満	東京大学大学院工学系研究科 教授
	田山 昇	一般社団法人 日本産業機械工業会 タンク部会
	西 晴樹	消防庁消防研究センター 火災災害調査部長
	畑山 健	消防庁消防研究センター 施設等災害研究室長
	松島 立	石油連盟 環境安全委員会 設備管理専門委員会
	宮内 孝	危険物保安技術協会 タンク審査部 審査第一課長
事務局	渡辺 剛英	消防庁危険物保安室長
	鈴木 知基	消防庁危険物保安室課長補佐
	迫田 知明	消防庁危険物保安室パイプライン係長
	岸 京介	消防庁危険物保安室総務事務官

1. 4 調査検討経過

検討の経過は以下のとおりである。

○令和2年度

- 第1回検討会 令和2年8月5日
- 第2回検討会 令和2年12月4日
- 第3回検討会 令和3年2月25日

○令和3年度

計3回程度の開催を予定

※ 本報告書で使用する略語は以下のとおり

- 消防法（昭和23年法律第186号）・・・法
- 危険物の規制に関する政令（昭和34年政令第306号）・・・政令
- 危険物の規制に関する規則（昭和34年総理府令第55号）・・・規則
- 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（昭和49年自治省告示第99号）・・・告示
- 屋外タンク貯蔵所のタンク本体・・・タンク
- 屋外タンク貯蔵所の基礎・地盤・・・基礎・地盤
- 危険物の規制に関する政令及び消防法施行令の一部を改正する政令（昭和52年政令第10号）の施行後に設置許可の申請がなされた特定屋外タンク貯蔵所・・・新法タンク
- 危険物の規制に関する政令及び消防法施行令の一部を改正する政令（昭和52年政令第10号）の施行の際、現に法第11条第1項前段の規定による設置に係る許可を受け、又は当該許可の申請がされていた特定屋外タンク貯蔵所で、その構造及び設備が政令第11条第1項第3号の2又は第4号に定める技術上の基準に適合していなかったもののうち、その構造及び設備が昭和52年政令第10号附則第3項各号に定める技術基準に適合しているもの・・・旧法タンク

第2章 津波・水害対策に関する調査

第2章 津波・水害対策に関する調査

2.1 過去に実施された調査検討と現在の津波対策

2.1.1 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会

(平成18年度～平成20年度)

屋外タンク貯蔵所の津波被害（タンクの滑動等）を簡便に予測する手法と、この予測手法を用いるに当たって必要となる、タンクや防油堤に作用する津波波力を算定する方法（津波対策シミュレーション）が提案された。

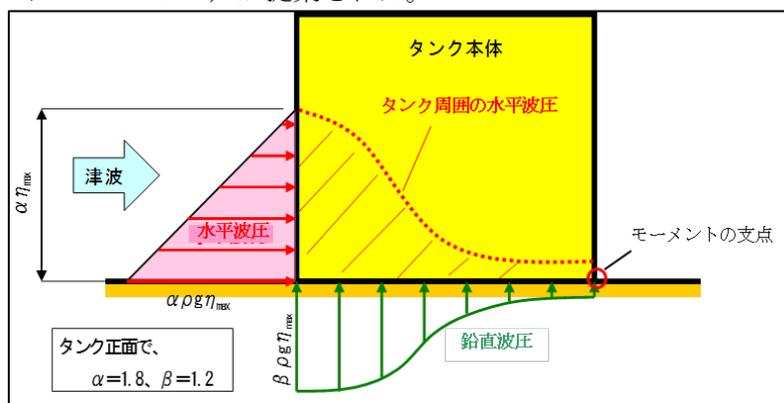


図2-1 タンク本体に作用する津波波圧分布

2.1.2 東日本大震災を踏まえた危険物施設の地震・津波対策のあり方に係る検討会

(平成23年度)

東日本大震災における危険物施設への地震・津波による被害の取りまとめ及び、対策に関する提言がなされた。屋外タンク貯蔵所については、津波による被害の分析の結果、2.1.1に示した津波対策シミュレーションの妥当性が確認されるとともに、津波浸水深が3m以上になる容量1000kL以上の特定屋外貯蔵タンクに危険物の流出を防止する措置（緊急遮断弁の設置又はタンク元弁を閉止できる体制の構築）が提案された。



図2-2 宮城県気仙沼市における屋外タンク貯蔵所の被害

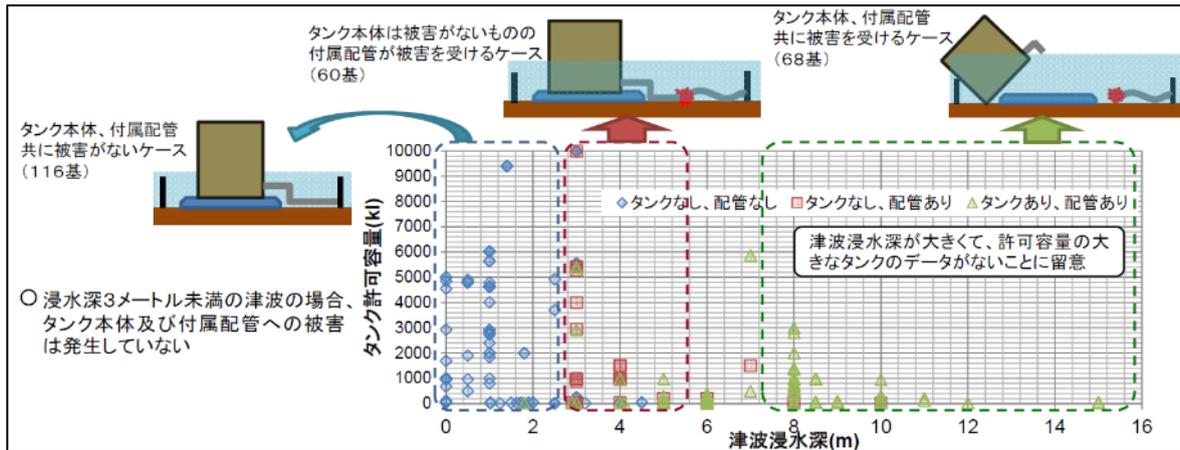


図 2-3 危険物施設における被害状況の概要

2.1.3 現在の津波対策

上述の検討会における提言を受け、屋外タンク貯蔵所について、タンクの容量や想定津波浸水深に応じた対策をとることが法令・通知等で義務付けられている（表 2-1）。

表 2-1 現在の屋外タンク貯蔵所の津波対策（設置義務の有無）

容量	緊急遮断弁 *1の設置	配管からの危 険物流出防止 措置*2	津波対応を予 防規程*3に明 記	津波被害シミュレーション*4 の実施
1万 kL 以上	あり		あり	あり (想定津波浸水深3m以 上のタンクのみ)
千 kL~1万 kL	いずれかを実施 (想定津波浸水深3m以上の タンクのみ)		あり	あり (想定津波浸水深3m以 上のタンクのみ)
500kL~千 kL	なし	なし*5	あり	あり
500kL 未満	なし	なし*5	あり	あり

*1：遠隔操作可能であり、予備動力源が確保されたもの

*2：緊急遮断弁の設置又は、津波が到達する時間及び従業員等の避難を考慮した上で、休日・夜間を問わずに従業員がタンク元弁を手動で閉止できる体制を構築し、予防規程に定める必要がある

*3：保安に関する事項（組織・運転・点検・検査・非常時対応等）について事業所が定め、市町村長等の認可を受けなければならないもの。

*4：平成24年に総務省消防庁から提供されているソフト（無料）。タンクの諸元や想定津波浸水深を入力することで、転倒・滑動の有無を自動計算できる。

*5：千kL未満のタンクは上述のような配管からの流出防止措置は要しないが、津波被害シミュレーションの結果を踏まえ、可能な限り危険物の流出を防止するための具体的な対策について検証を行い、予防規程に定める必要がある

2. 2 近年の津波・水害による屋外貯蔵タンクの被害

2.2.1 平成27年9月関東・東北豪雨

(1) 気象状況

平成 27 年 9 月 9 日から 11 日にかけて、台風 18 号及び台風から変わった低気圧に向けて南から流れ込む湿った風の影響により、多数の線状降水帯が次々と発生し、関東地方と東北地方で記録的な大雨となり、屋外タンク貯蔵所にも被害が発生した。



図 2-4 常総市内の浸水域



図 2-5 鬼怒川堤防決壊現場
(防災システム研究所 山村武彦氏資料)

(2) 屋外タンク貯蔵所の被害

表 2-2 に示すとおり、屋外タンク貯蔵所にも水害による被害が発生しており、旧水海道地区の油槽所の 3 基は屋外タンク本体の浮上、傾斜、横ずれ等の被害が発生している (図 2-6~8)。

当該油槽所のタンクには地盤面から約 2.5m の高さまで浸水した痕跡があり (図 2-9)、被災時の貯蔵量が少なくアンカーによる固定がされていなかった 2 基 (No.4No.8) は浸水による浮力により浮揚し、水が抜ける過程で横ずれ、傾斜が発生したと推定される (図 2-10~13)。

また、アンカーで固定されていたタンク (No.3) については、浮揚等は発生しなかったものの、周辺の地盤に損壊が見られた (図 2-14、15)。

事故後の措置としては、施設の点検を実施し、他に被害が生じていないことを確認するとともに、被災した 3 基の残油抜き取り、清掃、撤去及び同タンク損傷配管の分離、撤去等を実施した。

表 2-2 常総市内の危険物施設の被害状況

施設の種別	地区	旧水海道地区		旧石下地区		合計
		被害施設数	被害内訳	被害施設数	被害内訳	
屋内貯蔵所				1	防火戸変形1	1
屋外タンク貯蔵所		3	浮上1 横ずれ1 傾斜1	6	ポンプ水損6	9
地下タンク貯蔵所		1	液面計水損1	1	ポンプ水損1	2
移動タンク貯蔵所		3	水損3	6	水損6	9
給油取扱所		8	地盤・防火堀損壊1 計量機水損6 POS水損1	3	計量機水損3	11
一般取扱所		3	計量機水損1 ポンプ水損2	2	計量機水損2	5
合計		18		19		37



図 2-6 被災油槽所の位置



図 2-7 油槽所の周辺

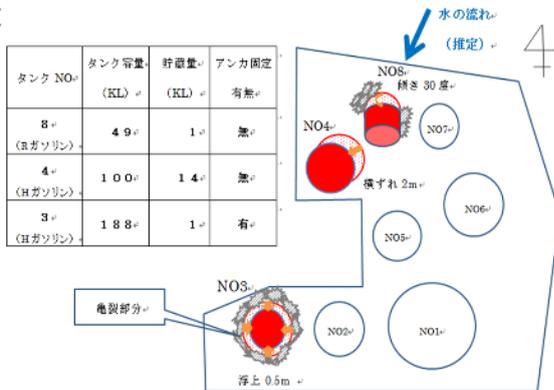


図 2-8 油槽所の被災タンク



図 2-9 最高水位跡



図 2-10 No.4 タンクの横ずれ状況①



図 2-11 No.4 タンクの横ずれ状況②



図 2-12 No.8 タンクの傾斜状況①



図 2-13 No.8 タンクの傾斜状況②



図 2-14 No. 3タンクの地盤面損壊状況①



図 2-15 No. 3タンクの地盤面損壊状況②

2.2.2 平成 30 年以降の豪雨災害における危険物施設の被害

近年の豪雨災害では、屋外タンク貯蔵所に被害は発生していないものの、令和 2 年 7 月豪雨の際には、指定数量未満の小規模なタンクについては、浮揚・流出等の被害が発生している。

(1) 事例 1

場所：長崎県

タンク容量：19000

内容物：A 重油

流出量：約 5000

概要：川の氾濫によりビニールハウス用の燃料タンクが横転し、流出



図 2-16 横転したタンク



図 2-17 流出した重油

(2) 事例 2

場所：長崎県

タンク容量：19000ℓ × 4

内容物：A重油

流出量：約3000ℓ

概要：川の氾濫によりタンク配管の一部が破損し、流出



図 2-18 ビニールハウス



図 2-19 破損した配管

(3) 事例 3

場所：鹿児島県

タンク容量：20000ℓ未満

内容物：重油

流出量：約8000ℓ

概要：大雨により土砂崩れが発生し、養鰻場の裏の重油タンクに土砂が流れ込み、タンク底部から流出（底部溶接部に亀裂が生じたものと推定）



図 2-20 タンクと流れ込んだ土砂

2. 3 現在の津波対策に関する調査

各自治体や事業者において自主的に実施されている、屋外貯蔵タンクの津波対策について調査を実施した。

2.3.1 気仙沼 PC工法 津波対策タンク

気仙沼市に震災復興事業にてリプレースされたPC工法による津波対応型準特定屋外貯蔵タンクについて調査を実施した。

平成23年当時、気仙沼市朝日町にある油槽所には20基の屋外貯蔵タンクが設置されていた。このうち19基の縦型円筒タンクが2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波により移動、漂流の被害を受けた。100kL横置き円筒タンク1基は移動、漂流しなかったが、タンク本体への漂流物の衝突により凹み、損傷が見られたため、同地区のタンクをまとめてリプレースとなった（図2-21参照）。

新設されたタンクは990kL×5基の屋外タンク貯蔵所である（図2-22参照）。タンク高さ約11m、タンク内径は約11mである（図2-25参照）。津波以外に船舶の衝突を考慮する必要があったため、既往のPCタンクをヒントに設計されている。東北地方太平洋沖地震にて仙台港に設置されていたPCタンクが津波後でも機能が確保されていたことも採用を後押しした。

設計条件として津波浸水深は津波シミュレーションに基づき約7.6m（GLから5.3m）を想定、19ton級の船舶（実重量約400ton）の衝突を考慮している。想定船舶衝突による弾性変形を考慮し、タンク本体とPC壁の間に10mmの緩衝材が設置されている。タンク本体とPC壁間の結露等の排水のため、排水管及びバルブが設けられている（図2-23参照）。

タンク本体の津波対策だけでなく、タンクノズル部に対しても対策が講じられている。ノズル部の第一弁は電動の緊急遮断弁とし、予備動力源として無停電電源装置も備えている。また、漂流物からノズルや緊急遮断弁を守るため、防護壁が設けられている（図2-24参照）基礎構造は地盤改良（中層混合処理）を実施した上で、直接基礎としている。

施設総工費は約23億円。施工期間は約1年（タンクの建設は6カ月）であった。



図 2-21 2011年東北地方太平洋沖地震前の同油槽所



図 2-22 気仙沼市 PC工法 津波対応型 屋外貯蔵タンク



図 2-23 タンク本体とPC壁間の排水管とバルブ



図 2-24 タンクノズル部の防護壁と緊急遮断弁

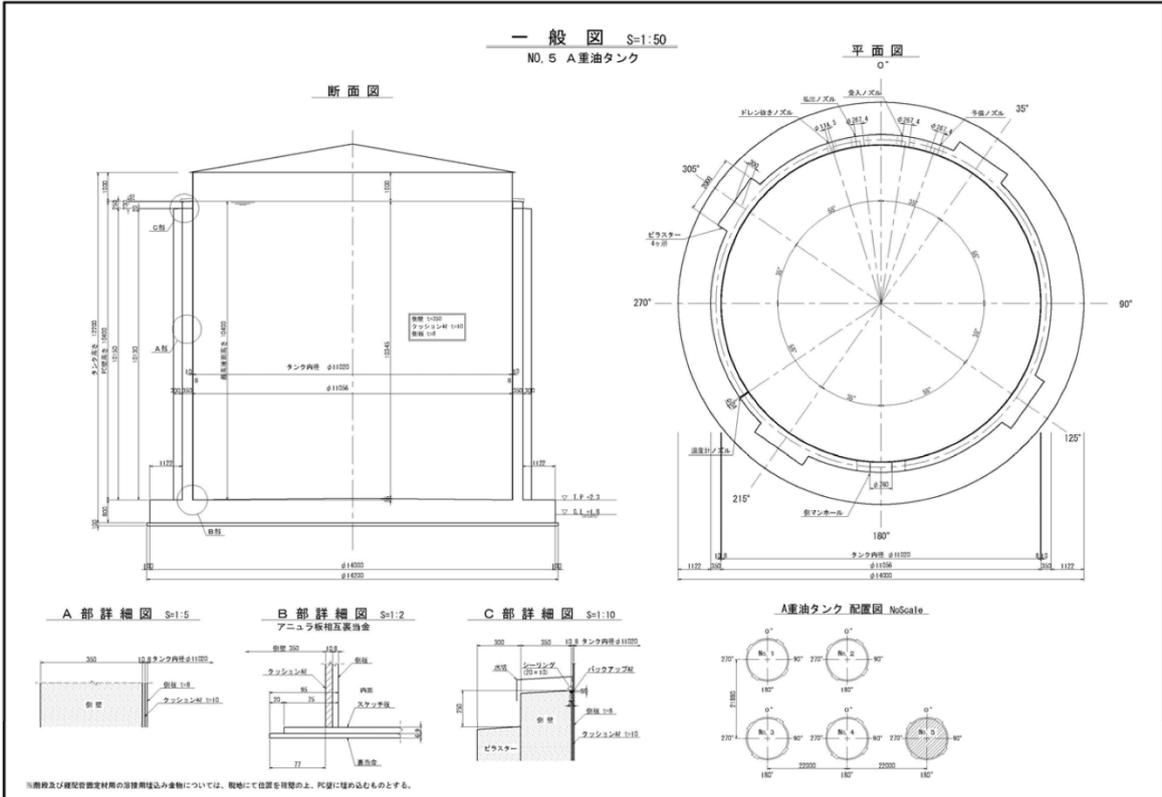


図 2-25 タンク仕様

2.3.2 宮城県 志津川漁港 コンクリート被覆型タンク

宮城県本吉郡南三陸町の志津川漁港に震災復興事業にてリプレースされたコンクリート被覆型タンクについて調査を実施した。

志津川漁港には船舶給油用の3基の鋼製タンク（50kL重油タンク1基，30kL軽油タンク2基）が設置されていた。2011年東北地方太平洋沖地震により3基の既設タンクは津波により移動，漂流の被害を受けた。

新設されたタンクは30kL×3基（A重油2基，軽油1基）のコンクリート被覆型タンクである（図2-26参照）。

被災後の早期復旧のためコンクリート被覆型タンクを選定した。タンクの幅が2.5mであるため、工場より、トレーラによる陸送が可能であり、据付は1日で終了できる。実際に工期は3カ月（工場での製作期間，基礎の改造期間）であった。

基礎は既存タンクの杭基礎16本を流用し，その杭上にコンクリートスラブを uploads 基礎としている。

タンクの構造を図2-27に示す。4.5mmの角型鋼製タンクの周囲を15cmの鉄筋コンクリートで覆う構造となっている。本タンクの寸法はL7.04m×W2.445m×H2.5mであり，躯体重量は32.1tonである。

早期の復旧のため，津波の波圧に対しては考慮していないが，浮力により浮上，流出しないための検討と対策を実施した（タンク全高水深での浮力を考慮）。全没しても浮上しないという結果になっているが，追加の対策としてワイヤーにより固定している（図2-28参照）。

タンク付属配管はタンク上部での取り合いとなるため，津波時に配管を損傷しても最小限の漏油となる構造である（図2-29参照）。

当該コンクリート被覆型タンクは製品として1kLから35kLまでラインナップされており，日本国内では2020年8月時点で256基の実績がある。また，世界では40000基の実績がある。津波対策型として鋼材フレームにて支持した事例も2件ある（図2-30参照）。

価格はタンク1基当たり約1200万円程度（基礎費用，付帯設備，設計費用，設置工事費，輸送費用含まず）



図2-26 志津川漁港 コンクリート被覆型タンク

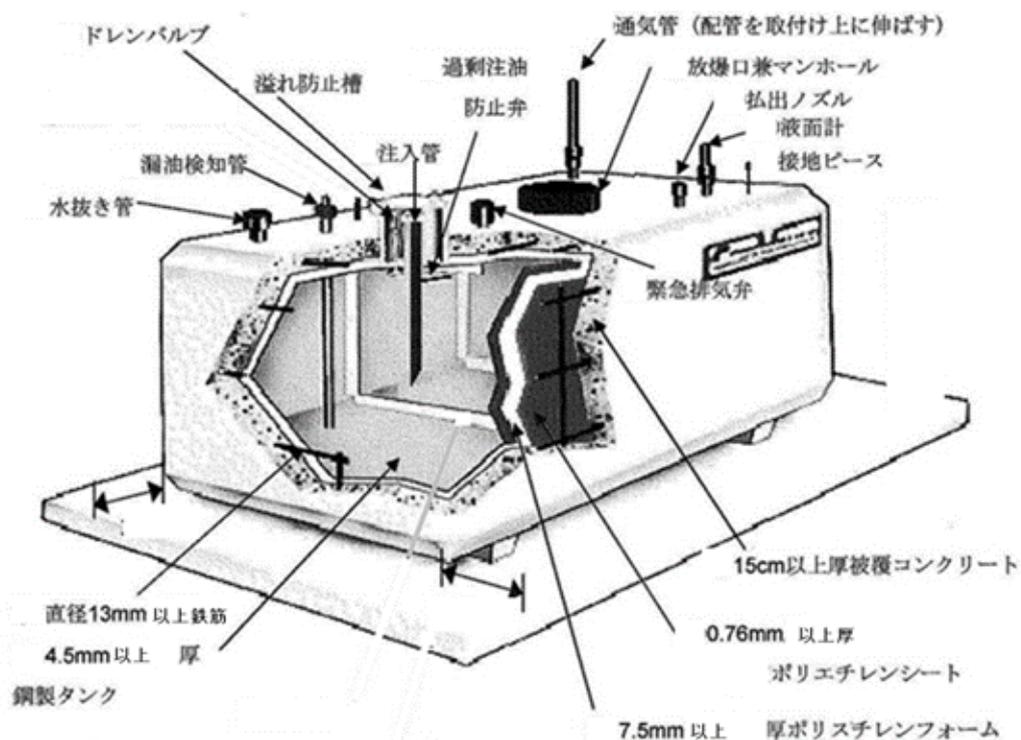


図 2-27 コンクリート被覆型タンクの構造



図 2-28 コンクリート被覆型タンクの浮上・流出対策
(赤丸部で据付、緑部でワイヤー固定)



図 2-29 コンクリート被覆型タンク屋根のノズル部(配管取合部)

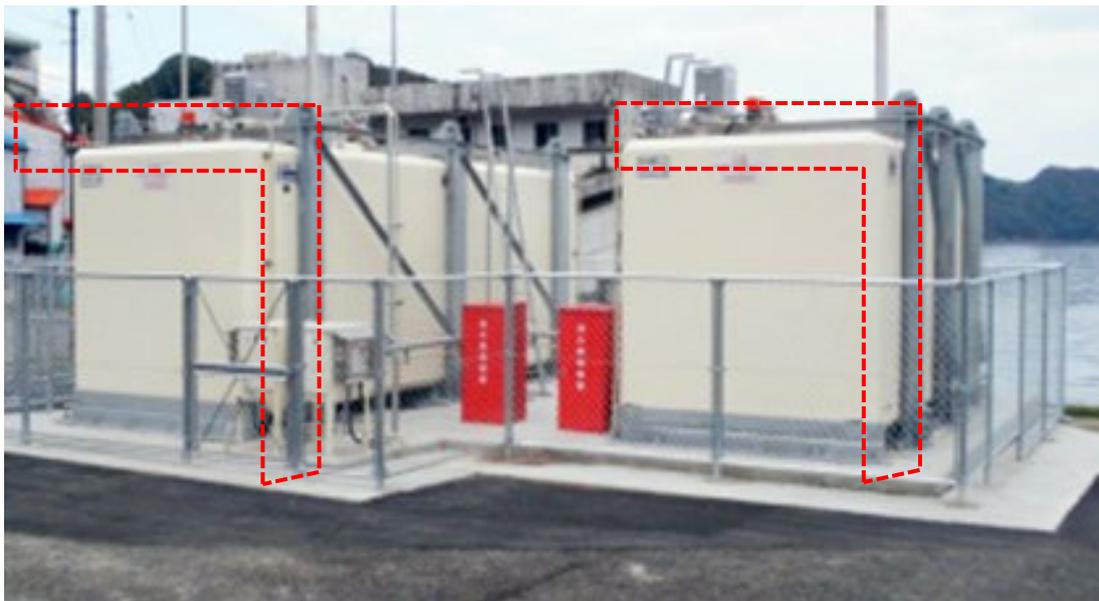


図 2-30 津波対策型コンクリート被覆型タンクの例
(メーカーホームページ<http://convault.jp/>より)

2.3.3 その他

静岡市清水港の調査の際に、ターンバックルを用いた津波対策が施工されたタンクが設置されており（図2-31参照）、所有者である静岡県漁業協同組合連合会にヒアリングを実施した。平成25年にタンク建替えの際に「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 総務省消防庁 平成21年3月」に掲載のフロー図（図2-32）に従い、設計施工の発注がなされ、静岡県内のエンジニアリング会社により建設された。フロー図のⅢ項に従い、対策を講じている（波力に対する詳細強度検討迄は未実施である）。

同時期に静岡県内の他の3つの漁港に同様設計思想のタンクが設置された。



図2-31 ターンバックルを用いた津波対策施工タンク

屋外タンク貯蔵所の周囲における津波被害予防・軽減対策の検討フローの例

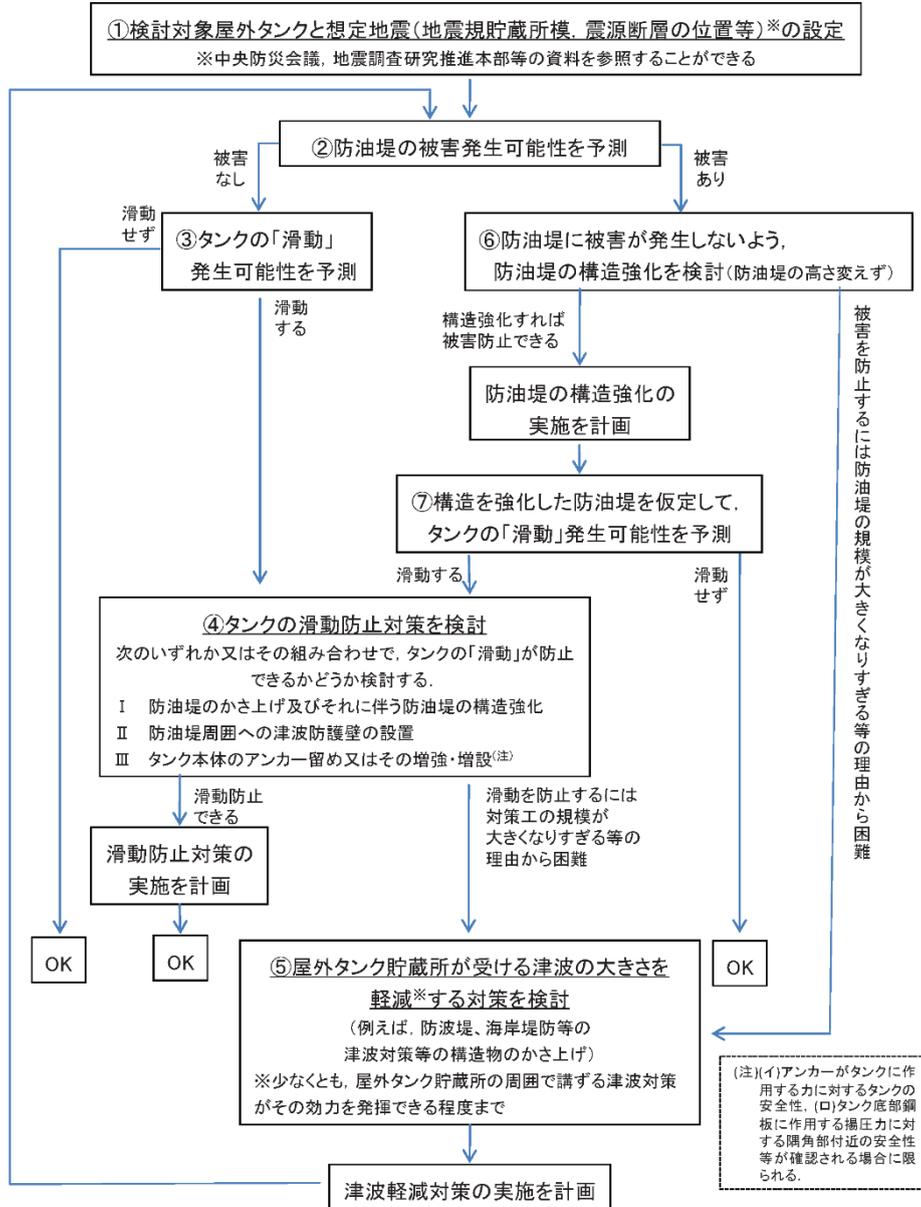


図 6-1 屋外タンク貯蔵所の周囲における津波被害予防・軽減対策の検討フローの一例

図 2-32 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書 検討フロー図

2.3.4 既存の津波対策工法の有効性の検討及び問題点の整理

既存の津波対策工法の調査結果より表2-3に有効性の検討及び問題点を整理した。対策工法の策定にあたり、下記の事項に配慮することとした。

- 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（溶接のため内容液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）
- 既設の基礎への荷重を大きく増加させないこと
- 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

表 2-3 既存の津波対策工法の有効性と問題点の比較

工法	ターンバックルを用いた津波対策	本検討で狙いたい部分	コンクリート被覆型タンク	PC工法
写真				
コスト	数十万円/基 程度	数百万円/基 程度	約 1000 万円前後 (容量による。基礎費用、付帯設備、設計費用、設置工事費、輸送費用含まず)	タンク 1 基当たり約 1 億円。タンク基礎は 1 基当たり 6000 万円 (容量による)
効果	<ul style="list-style-type: none"> ● ある程度の浮上・漂流対策が期待できるものの、どの程度の規模の津波に耐えるかは未知数。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 地上より 3m~6m 程度の津波に対する浮上・漂流対策が期待できる ● 面的にタンクを拘束することで、応力集中を抑えることができる 	<ul style="list-style-type: none"> ● 構造として重く、漂流しにくい。 ● 配管の取り合いをタンク上部としており、被災時でも内容物の流出がしにくい。 ● コンクリートで被覆されているため、漂流物にも一定の効果が期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 外槽の設計としてレベル 2 津波に耐えうる設計。 ● 漂流物も考慮した設計。 ● 最も効果を期待できる。
耐震性	不明	既存の耐震性への影響を最小限耐震性を確認 (0.3G ベース)	耐震性あり	耐震性あり
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ● 安価である ● 対策設備が小規模であり、日常運用に障害を与えない 	<ul style="list-style-type: none"> ● タンク内液を抜かずに既存タンクへの施工可能 ● 安価なコストで一定の効果を期待できる ● 対策設備が小規模であり、日常運用に障害を与えない 	<ul style="list-style-type: none"> ● 製品として購入できるため据え付け工期を短くできる 	<ul style="list-style-type: none"> ● どの構造よりも津波に対する安全性が高い。また、被災後でも継続使用できる可能性が高い。
デメリット	既存タンクへの施工は内容液を抜いて、洗浄後の施工が必要となる	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工に CFRP 施工の専門知識を要する 	<ul style="list-style-type: none"> ● 既存タンクに対してはリプレースが前提。 ● 横置き方形のため、縦型円筒タンクに比べて設置面積が大きい。 ● タンク容量と形状が製品型式に限定される。また、最大 35kL とラインナップが限定。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 既存タンクに対してはリプレースが前提。 ● PC 外槽のため荷重が大きく、基礎が大きく設置面積が大きくなる。 ● 上部構造と基礎費用により必要コストが高額であり、建設工期も長い。

効果・コスト 高

第3章 屋外貯蔵タンクの津波対策工法の検討

第3章 屋外貯蔵タンクの津波対策工法の検討

2011年の東北地方太平洋沖地震では、津波により危険物屋外貯蔵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たが、危険物屋外貯蔵タンクに対する安価で効果的な津波対策は未だ課題として残されていた。

2017年度より消防防災科学技術推進制度により、小規模タンクで実施することが可能な津波被害の軽減対策工法2案が提案され、それらの対策により一定の効果が期待できることが示された。

本検討では、タンク本体への津波対策として、引張強度に優れた炭素繊維シート（以下、CFRP）と接着強度に優れたCFRP用エポキシ樹脂を用いた、対策工法1、対策工法2の2つの滑動・漂流防止対策工法について検討を行う。

3.1 対策工法の概要

3.1.1 対策工法1

対策工法1は既往のアンカーボルトでの固定が“点”でタンクを拘束しているため、応力集中の懸念がある。それを“面”で拘束することによって、応力集中の軽減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”ことも本工法のメリットである。

CFRPを構成する炭素繊維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3-1に対策工法1の施工イメージと炭素繊維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。本工法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以上）に無い場合には後述する対策工法2での施工を推奨する。

なお、対策工法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「底板張出部上に緩衝材を設置する」ことで、耐震性能に影響を与えず、津波漂流対策が可能である（図3-2参照）。

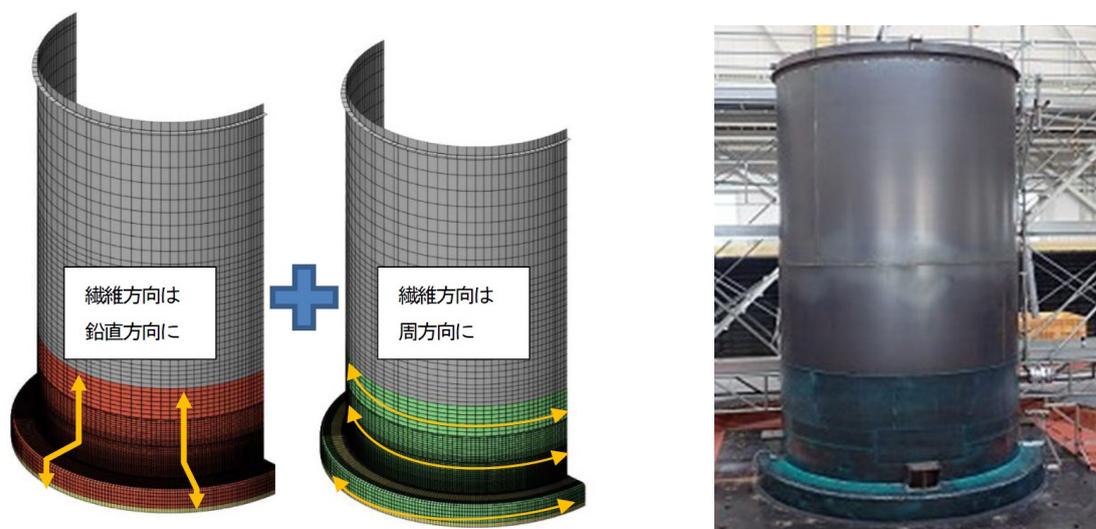


図3-1 対策工法1 イメージ

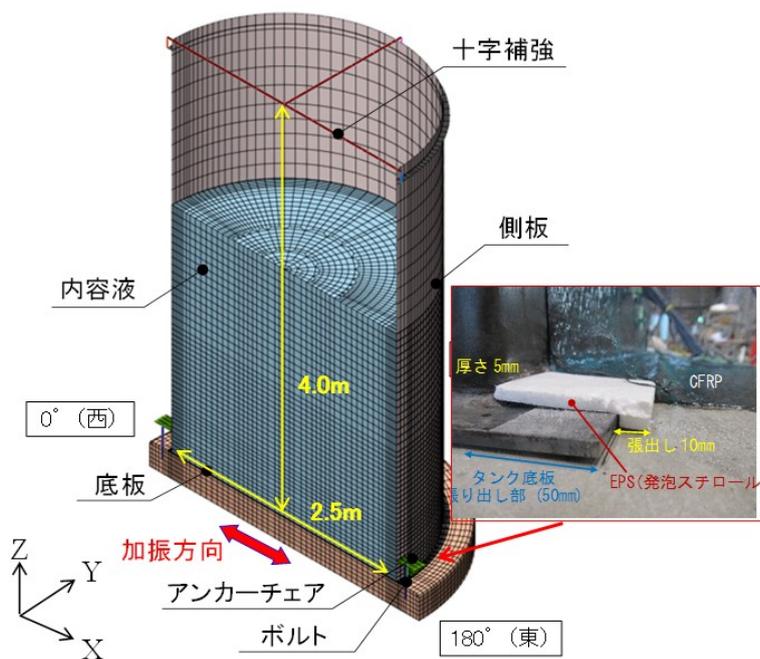


図 3-2 対策工法 1 底板張出部上 緩衝材設置イメージ

3.1.2 対策工法 2

対策工法 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 3-3)。タンク側板にワイヤー取り付けを“点”にて接続すると、波力載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。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。

対策工法 2 は対策工法 1 に比べ、タンクの拘束が弱いため、タンクの有する耐震性能に影響を与えにくい (重量の増加とワイヤーの張力はあるが) と考える。

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。なお、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。

対策工法 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。

本工法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。

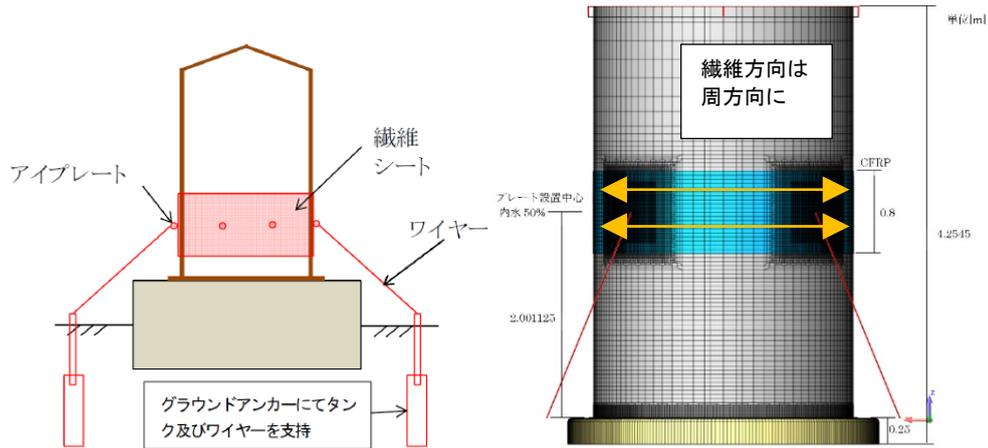


図 3-3 対策工法 2 イメージ

3. 2 解析手法の検討

対策工法の有効性を検討するため、下記の流れにより解析パラメータと手法を確認した。

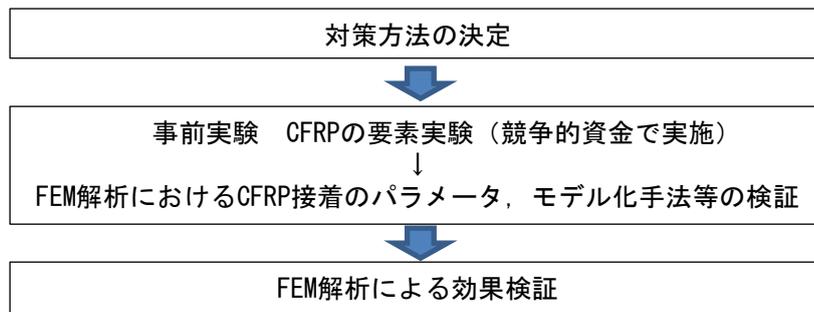


図 3-4 検討の流れ

3.2.1 事前実験（競争的資金で実施）

(1) 実験概要

CFRP の接着・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を実施した。要素実験の荷重载荷イメージを図 3-5 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、模型の一边を RC 基礎とピン接合している。荷重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た。

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。

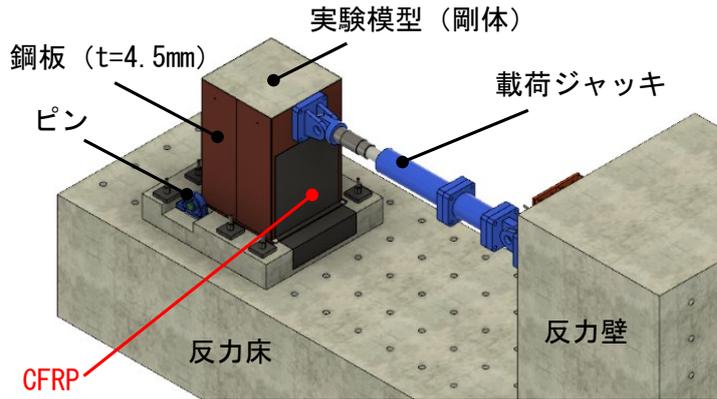


図 3-5 载荷実験のイメージ

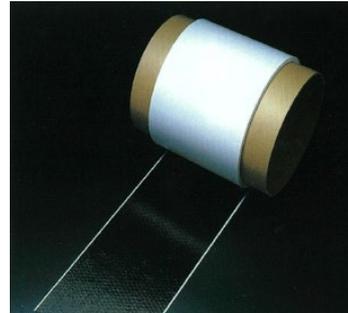
a) CFRP 材

実験で使用した CFRP 材の特性を表 3-1 に示す。CFRP とは炭素繊維を織り込んだシート状の製品をエポキシ樹脂（レジン）を含浸させ硬化させたものである。炭素繊維の引張強度が優れており、近年、橋脚部の耐震対策等に用いられており、入手しやすい材料となっている。

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下塗り材（エポキシ樹脂）を塗布した後、炭素繊維シートを貼付し、さらにエポキシ樹脂を上塗りして接着硬化させた。

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)



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液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、図 3-6 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 ケースを実施した。

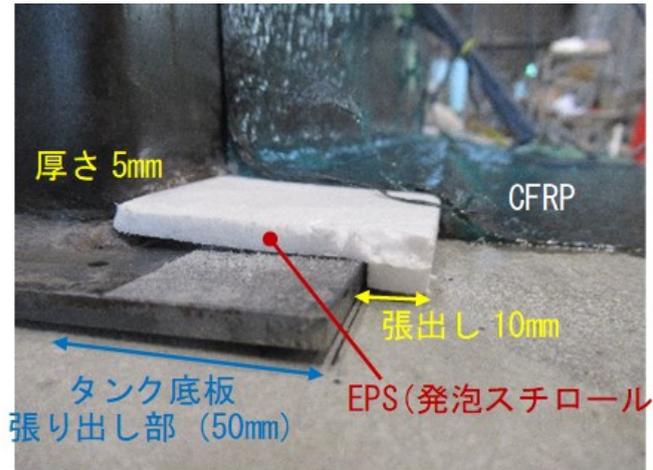


図 3-6 緩衝材の設置状況 (厚さ 5mm)

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 3-7 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。

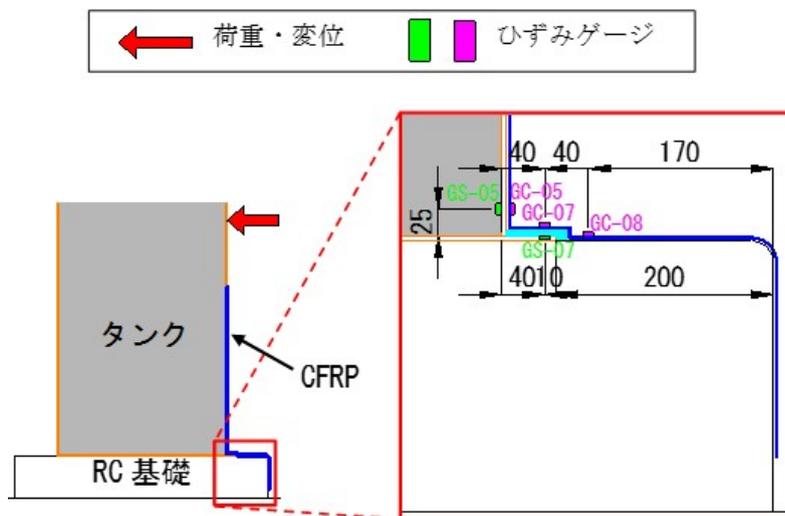


図 3-7 要素実験の計測位置 (単位 : mm)

(2) 実験結果

実験では図 3-8, 図 3-9 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ことがわかった。

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3-10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3-11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3-12)。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。

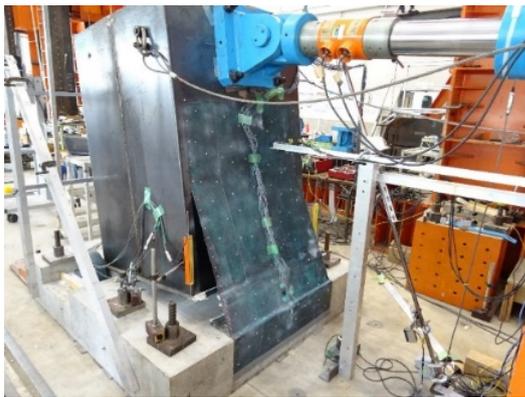


図3-8 実験模型の終局状態(矩形)



図3-9 実験模型の終局状態(円形)

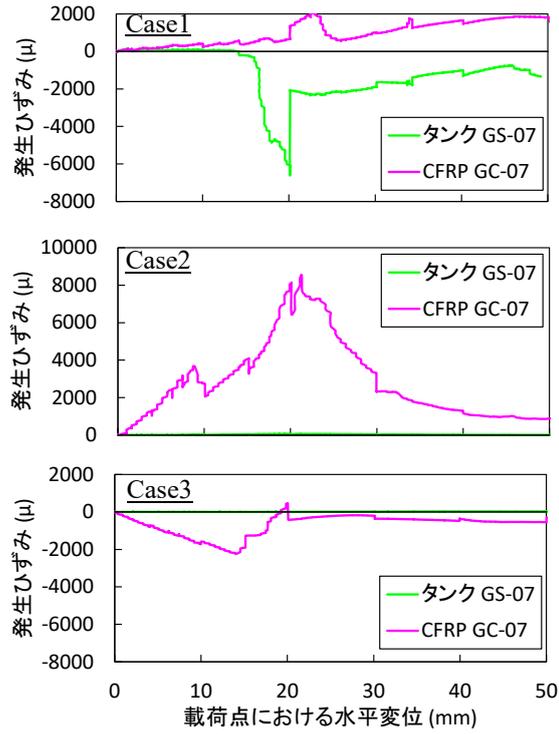


図 3-10 底板張り出し部に発生したひずみ

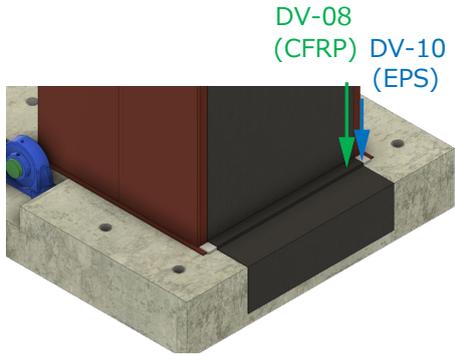


図 3-11 緩衝材変形量の計測位置

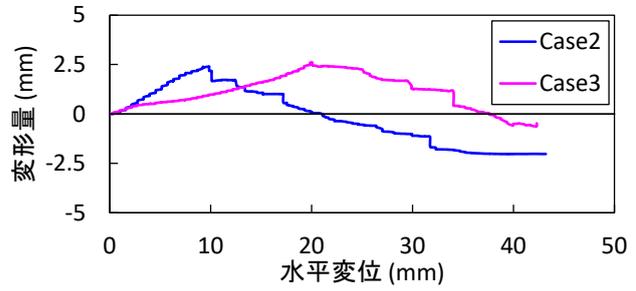


図 3-12 緩衝材の変形量 (DV-08)と(DV-10)の差分

3.2.2 要素実験の再現解析（競争的資金で実施）

(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 DIANA5 を用いた。矩形模型の解析モデルを図 3-13.1、図 3-13.2 に示す。また円形模型の解析モデルを図 3-14.1～図 3-14.3 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。

ここでは、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 3-2、表 3-3 に示す。

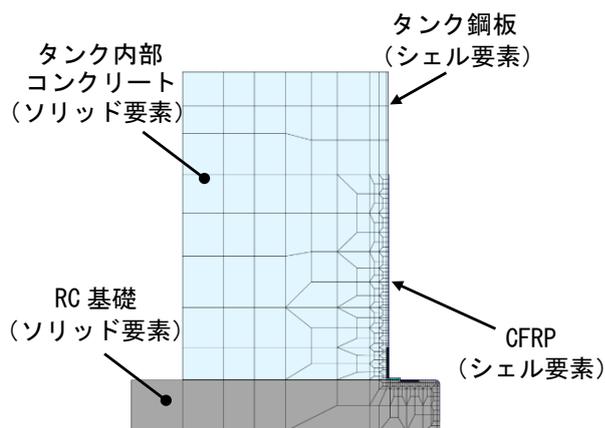


図 3-13.1 矩形模型の再現解析モデル

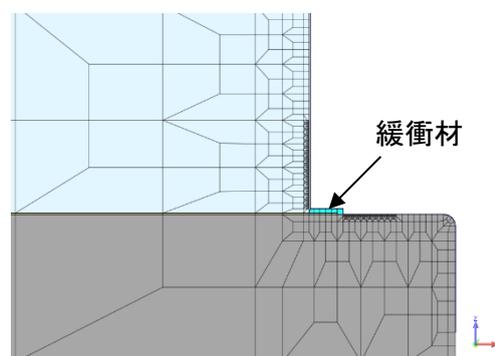


図 3-13.2 矩形モデル（隅角部拡大）

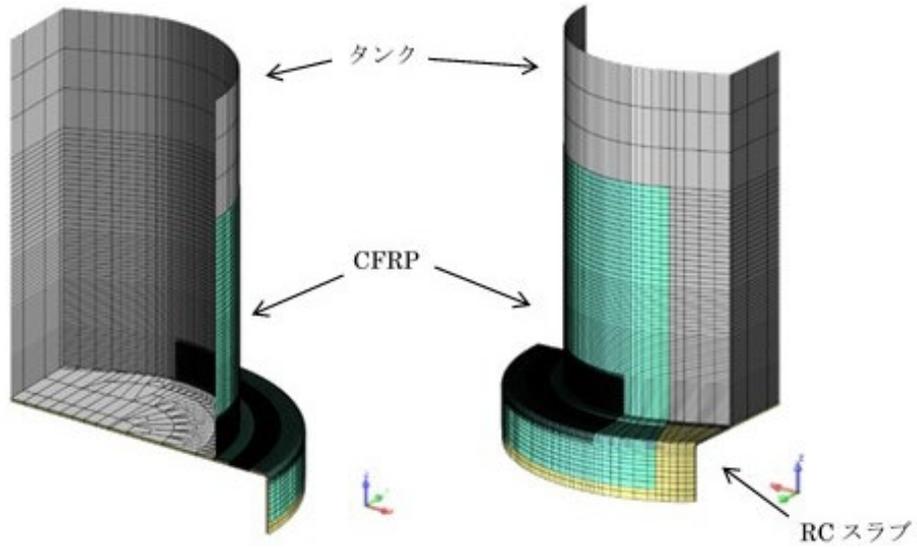


図 3-14.1 円形模型の再現解析モデル全体図

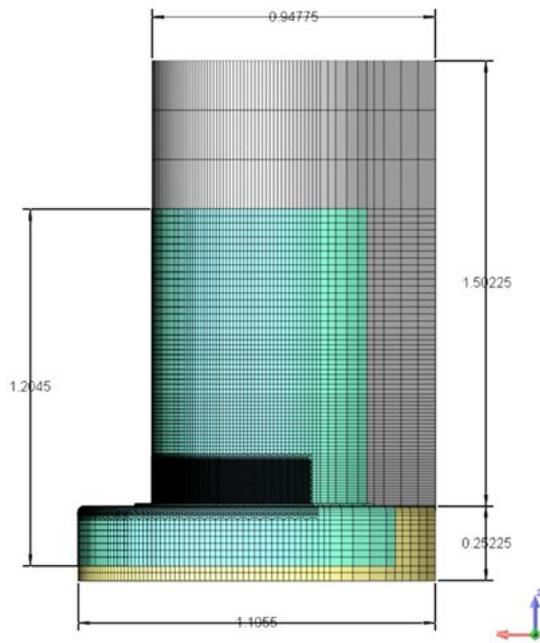


図 3-14.2 円形模型側面図

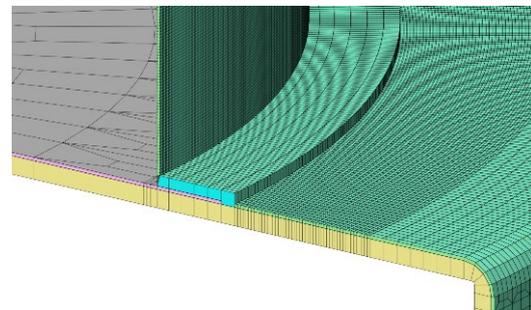


図 3-14.3 円形模型 (隅角部拡大)

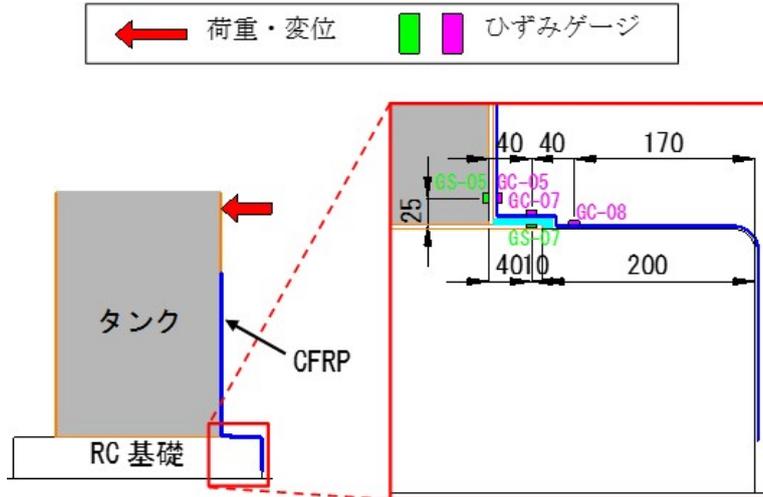


図 3 - 15 要素実験の計測位置 (単位 : mm)

表 3 - 2 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)	

表 3 - 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 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

(2) 矩形モデル再現解析の結果

本節では、タンク鋼板～CFRP の面外強度を 15 N/mm^2 、RC 基礎～CFRP の面外強度を 15 N/mm^2 と設定した際の結果を示す（パラメータスタディにより最も近似な結果が得られたケース）。

荷重ジャッキ位置における荷重と水平変位の関係を図 3-16 に示す。実験結果に対して、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 3-17 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 15 N/mm^2 を有することが分かった。ただし、次章の実機スケールでの解析時には現地状況を考慮し、製品保証値である 1.5 N/mm^2 を採用する。

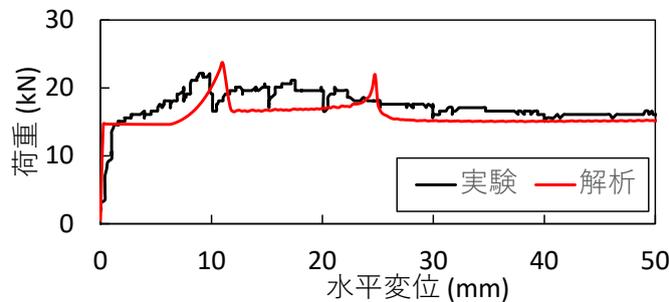


図 3-16 荷重位置における荷重-変位関係

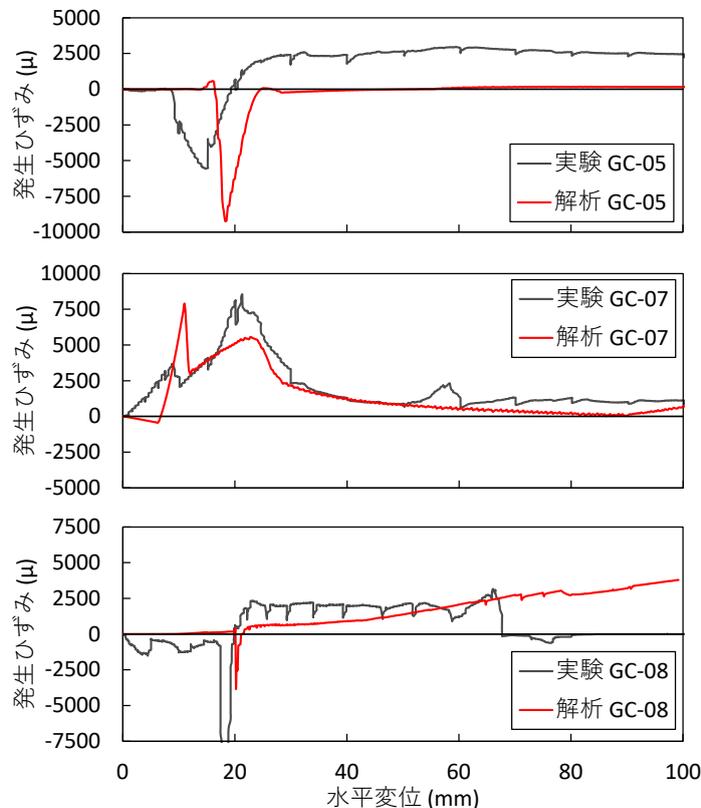


図 3-17 CFRP に発生したひずみの比較（実験と解析）

(3) 円形モデル再現解析の結果

円形モデルでの荷重ジャッキ位置における荷重と水平変位の関係を図3-18に示す。円形モデルの解析結果は、変位80mmあたり迄、実験結果よりもやや低めの荷重値を示す結果となった。しかし、この結果より円形モデルの解析は安全側評価となっているといえる。

後述の実機タンクを模擬したFEM解析において津波波圧、タンクの浮き上がり量、水平変位が着目点となるため、本項では基礎スラブ上CFRPの浮き上がり量と荷重ジャッキの水平変位について実験と解析結果を比較した。結果を図3-19に示す。結果としてタンクの隅角部近傍に相当するDV-02のCFRP浮き上がり量が実験結果と合うことが確認できた。

また、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た。よって浸水を防ぐため炭素繊維シートを周方向にも施工、もしくは2方向に繊維を有する炭素繊維シートにて施工する必要があることが分かった。

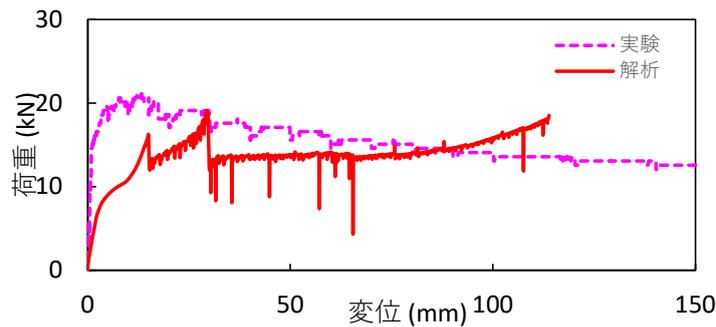


図3-18 荷重位置における荷重-変位関係

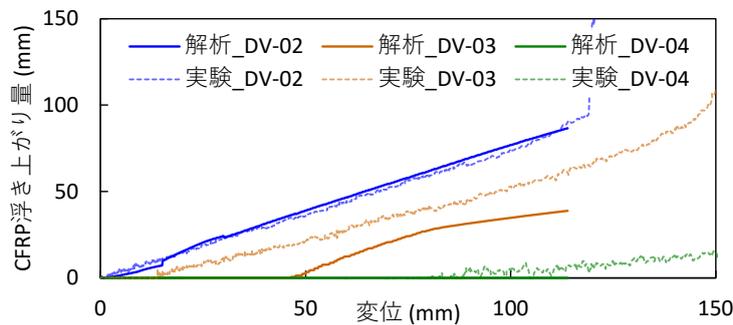


図3-19 基礎スラブ上CFRPの浮き上がり量

3. 3 解析条件

3.3.1 対策工法 1 解析条件

下記の条件により解析を実施した。

- 三次元非線形 FEM 解析
- 20 kL 級と 100kL 級, 500 kL 級について実施
- 内容液貯液率は比較的頻度の高い 50% 液位を中心に、20%, 80% を実施

表 3 - 4 解析物性値

項目	設定値	備考
タンク鋼材材質	SS400 を想定	
鋼材降伏応力	235 N/mm ²	
鋼材引張強さ	400 N/mm ²	
CFRP 引張強さ	3,400 N/mm ²	
CFRP-鋼材間接着強度 (面外)	15 N/mm ²	メーカー試験値は 27.4 N/mm ² であるが安全側評価として製品保証値を採用
CFRP-コンクリート間接着強度 (面外)	1.5 N/mm ²	メーカー試験値は 4 N/mm ² であるが安全側評価として製品保証値を採用
内液比重	0.8	

- 20 kL 級の解析モデルを図 3 - 20. 1 ~ 図 3 - 20. 2, 表 3 - 5 に示した。
- 100kL 級の解析モデルを図 3 - 21. 1 ~ 図 3 - 21. 2, 表 3 - 6 に示した。
- 500 kL 級の解析モデルを図 3 - 22. 1 ~ 図 3 - 22. 2, 表 3 - 7 に示した。

表 3-5 20kL 級タンク 板厚

	材質	板厚	備考
屋根	-	-	剛梁にてモデル化
側板	SS400	4.5mm	
底板			

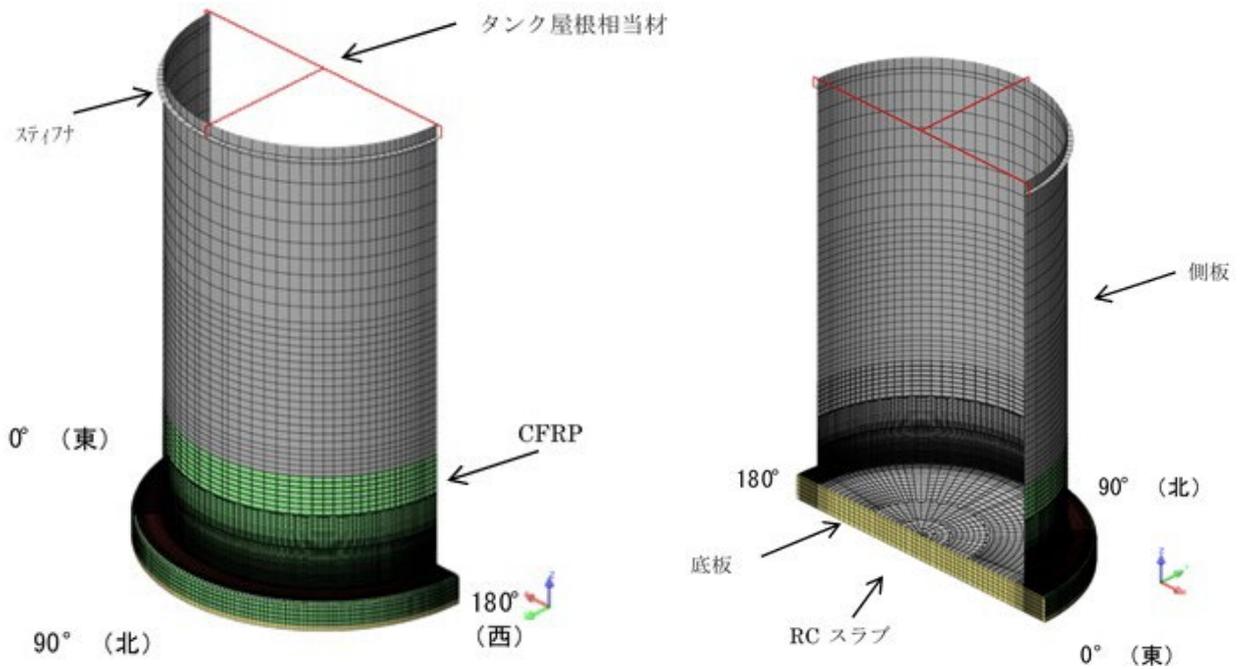


図 3-20. 1 20 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル全体図

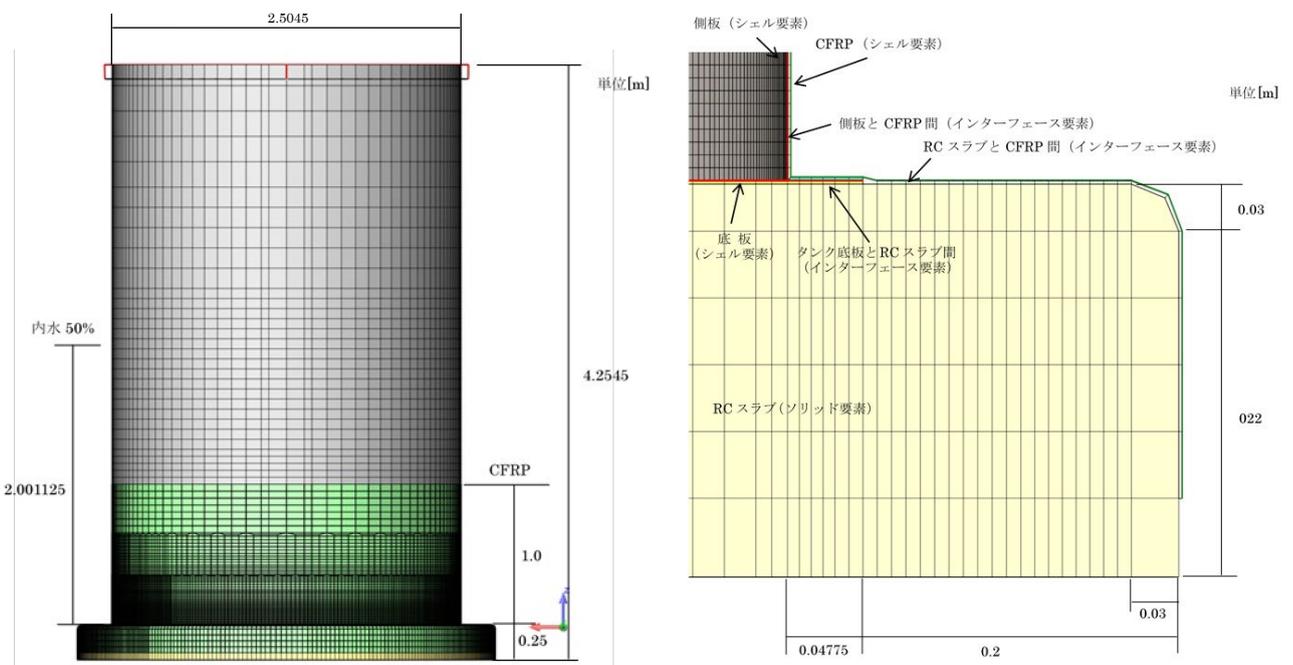


図 3-20. 2 20 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル正面図と底板と基礎拡大図

表 3-6 100kL 級タンク 板厚

	材質	板厚	備考
屋根板	SS400	4.5mm	
側板		6mm	
底板		8mm	

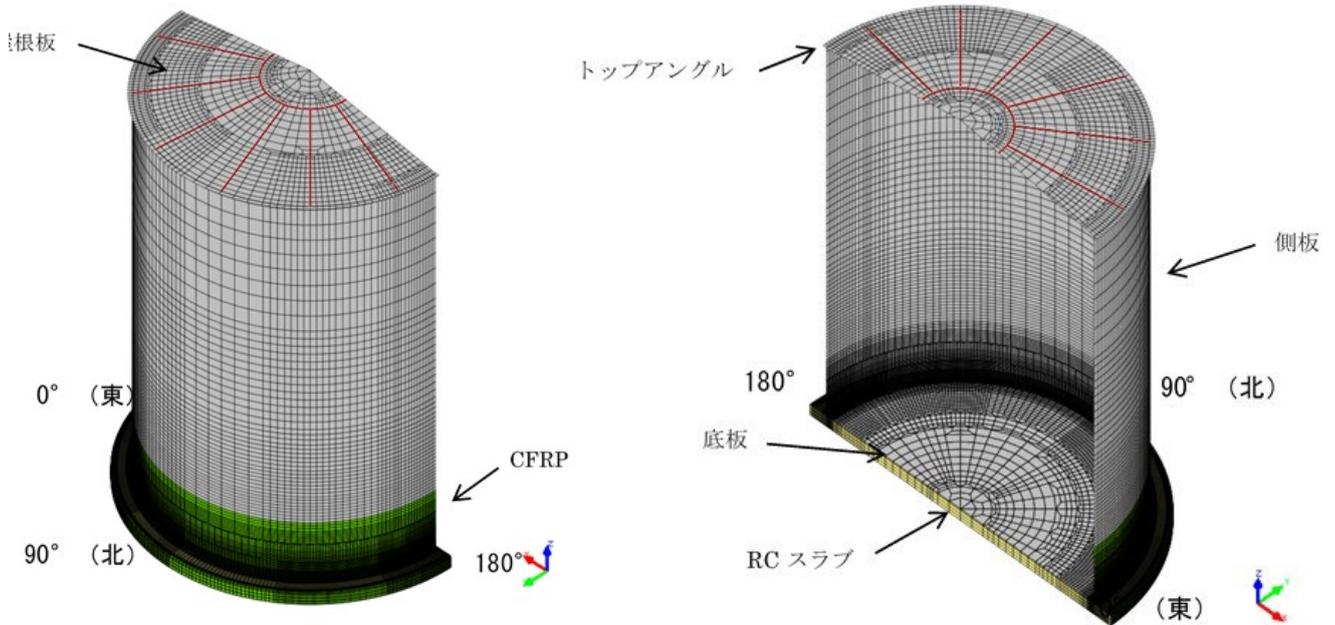


図 3-21.1 100 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル全体図

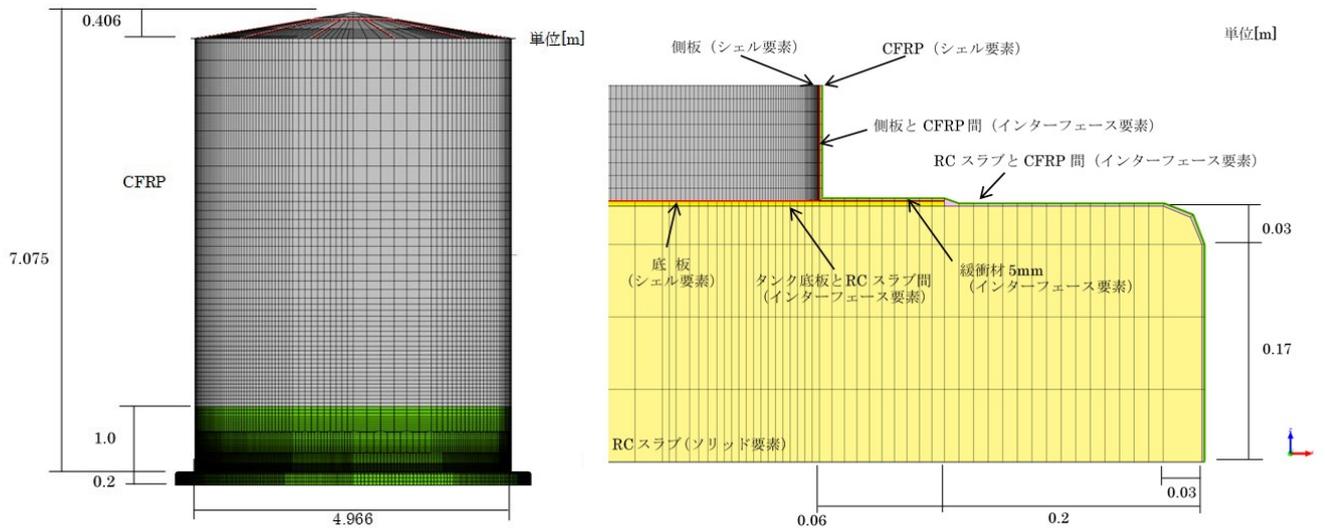


図 3-21.2 100 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル正面図と底板と基礎拡大図

表 3-7 500kL 級タンク 板厚

	材質	板厚	備考
屋根板	SS400	4.5mm	
側板		9mm	
側板下部		10mm	最下段(底板より 2460.5mm)
底板		9mm	

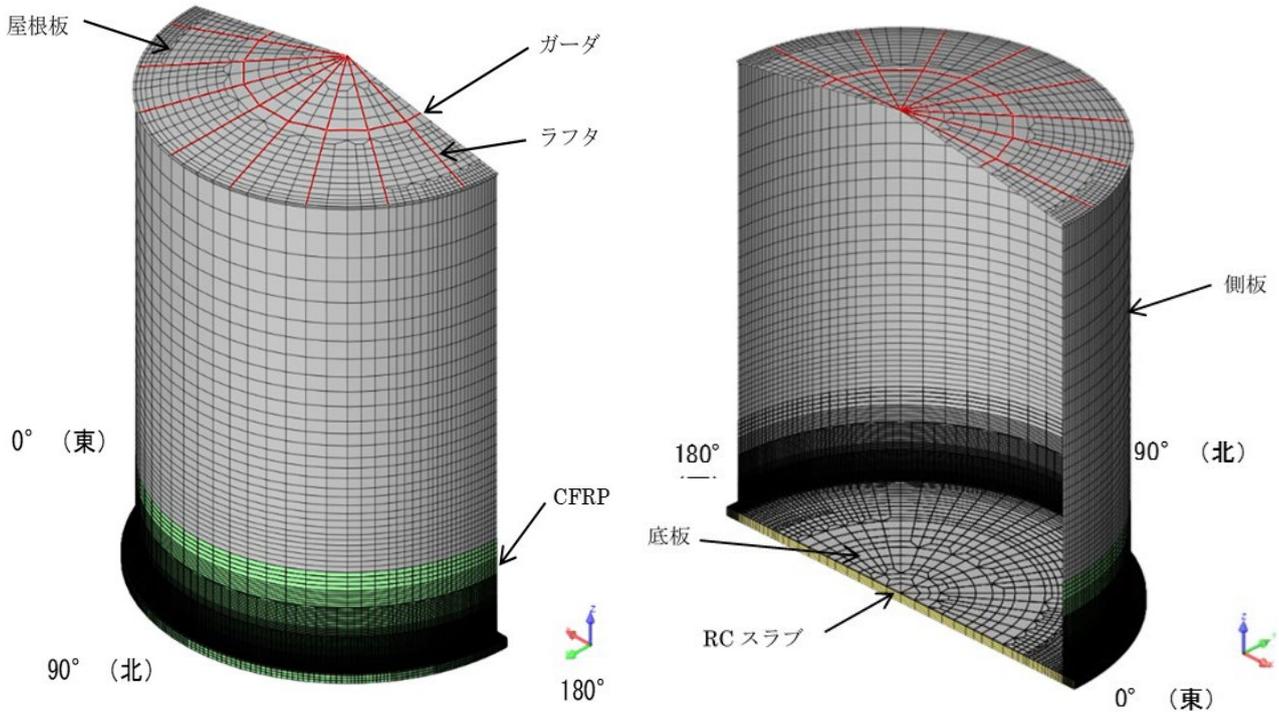


図 3-22.1 500 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル全体図

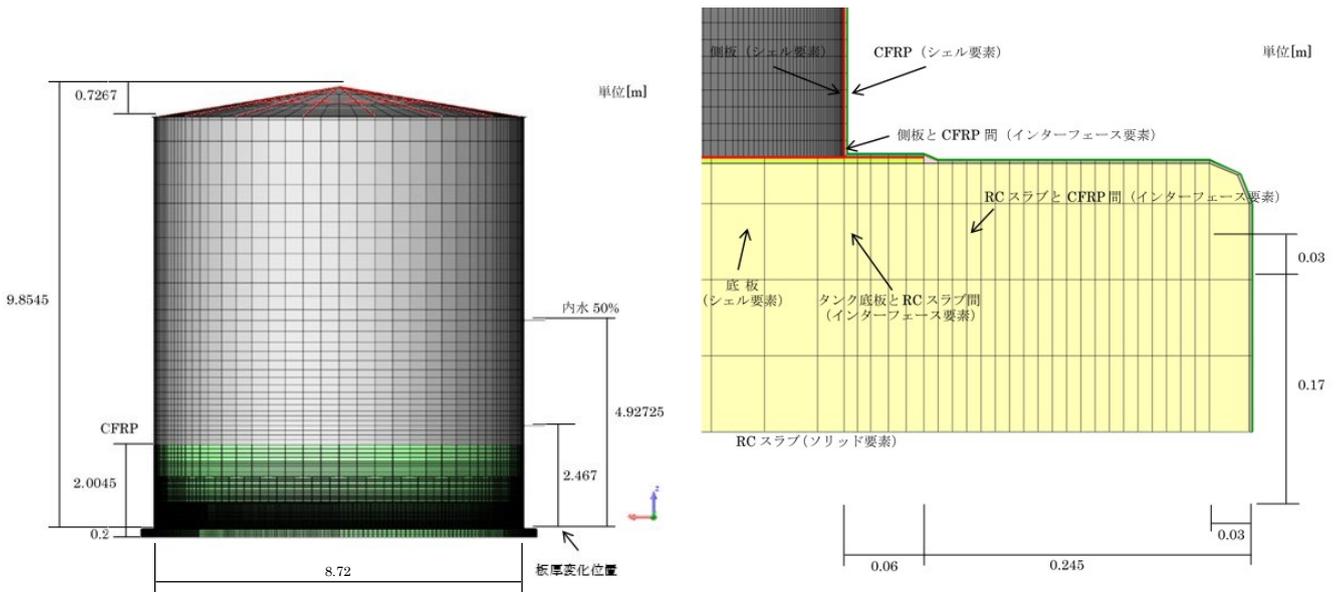


図 3-22.2 500 kL 級タンク 対策工法 1 の解析モデル正面図と底板と基礎拡大図

- 解析で作用させる津波波力はフルード数 $Fr \geq 1.3$ を満足する津波を対象とし、津波水位 h_d^{\max} を漸増させる解析を実施。津波水位は下式により算出した。

$$h_x^{\max}(\theta) = \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta \quad \text{ここで、} \alpha = 1.8 \quad (\text{式 3.2-12})$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035$$

- 下式により計算した津波荷重の水圧を各要素に一様分布として載荷する。 $hd_{\max} > Z_i$ となる要素に対して津波荷重を載荷した。タンク周囲に作用する津波波圧は、図 3-23 に示すような余弦曲線で考慮した。

$$P_i = (hd_{\max} - Z_i) \times 9.80665$$

ここで、 P_i : 要素 i に載荷する水圧 (kN/m²)

Z_i : 要素 i の中心位置における RC スラブからの高さ (m)

- 対策工法 1 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 (浸水を想定した比較ケースも 1 ケース実施)。

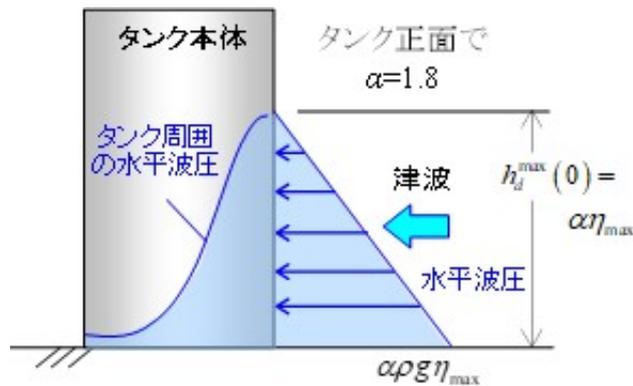


図 3-23 タンク本体に作用する津波波圧分布

3.3.2 対策工法2 解析条件

下記の条件により解析を実施した。

- 三次元非線形 FEM 解析
- 20 kL 級と 100 kL 級, 500 kL 級について実施
- 内容液貯液率は比較的頻度の高い 50% 液位を中心に、20%, 80% を実施

表 3-8 解析物性値

項目	設定値	備考
タンク鋼材材質	SS400 を想定	
鋼材降伏応力	235 N/mm ²	
鋼材引張強さ	400 N/mm ²	
CFRP 引張強さ	3,400 N/mm ²	
CFRP-鋼材間接着強度 (面外)	15 N/mm ²	メーカー保証値を採用
CFRP-コンクリート間接着強度 (面外)	1.5 N/mm ²	メーカー試験値は 4 N/mm ² であるが安全側評価として製品保証値を採用
タンク底板-コンクリート間摩擦係数	0.3	複合構造標準示方書を参考に設定 消防庁の津波算定式では 0.5 にて算出するが、安全側評価として採用
内液比重	0.8	

- 20 kL 級の解析モデルを図 3-24. 1 ~ 図 3-24. 2 示した。
- 100 kL 級の解析モデルを図 3-25. 1 ~ 図 3-25. 2 に示した。
- 500 kL 級の解析モデルを図 3-26. 1 ~ 図 3-26. 2 に示した。
- 各タンクの板厚諸元は対策工法 1 と同じである。

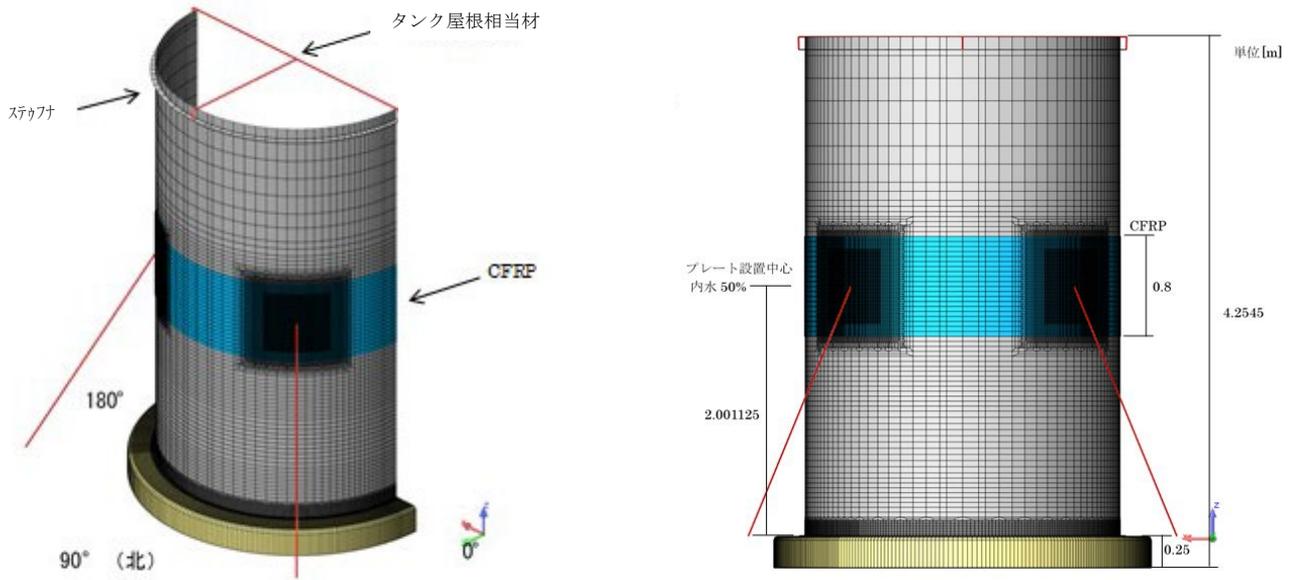


図 3-24. 1 20 kL 級タンク 対策工法 2 の解析モデル全体図

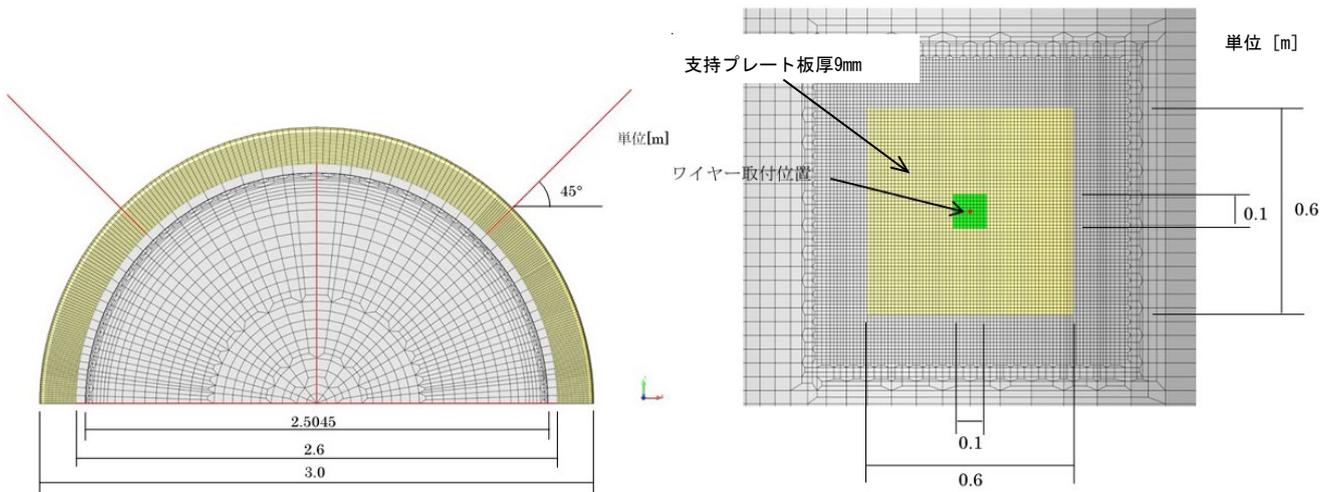


図 3-24. 2 20 kL 級タンク 対策工法 2 の解析モデル上面図とワイヤー支持部拡大図

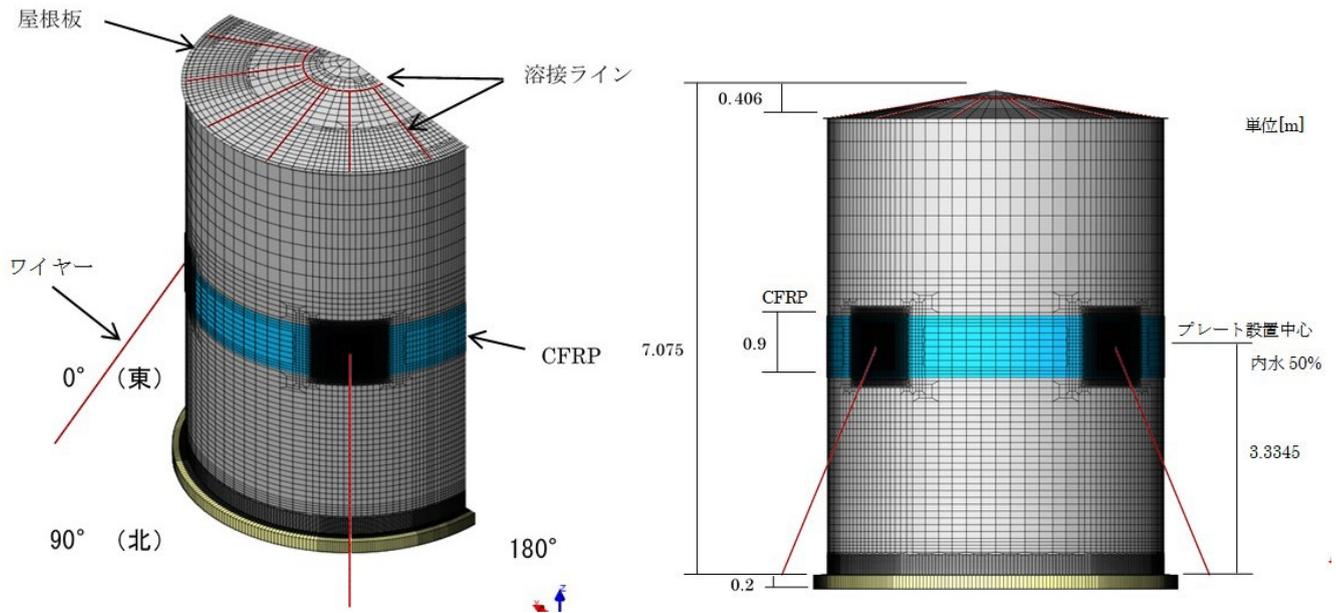


図3-25.1 100 kL級タンク 対策工法2の解析モデル全体図

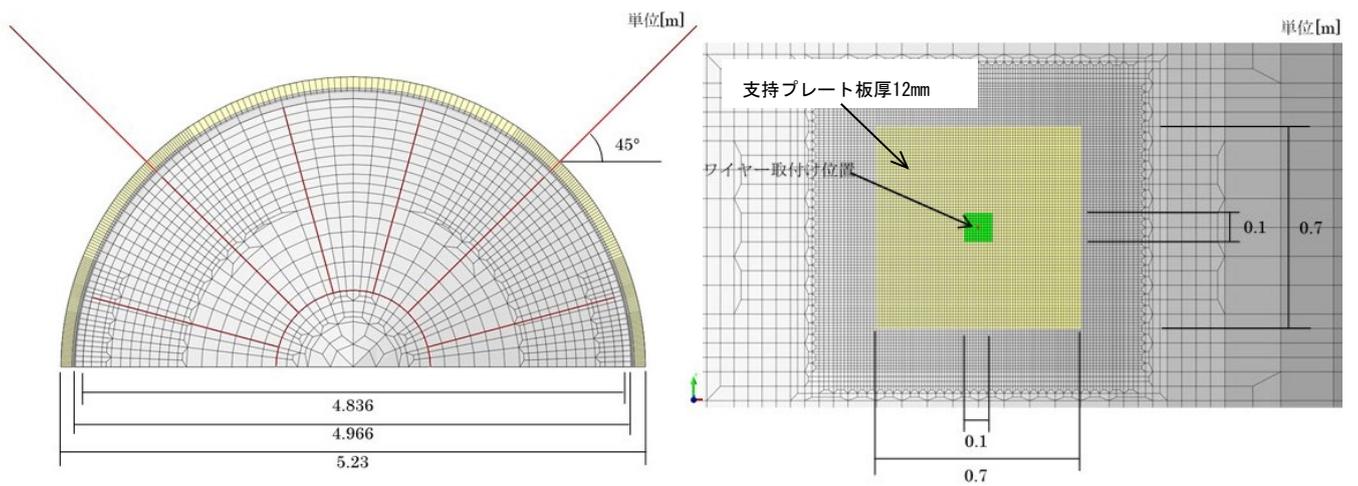


図3-25.2 100 kL級タンク 対策工法2の解析モデル上面図とワイヤー支持部拡大図

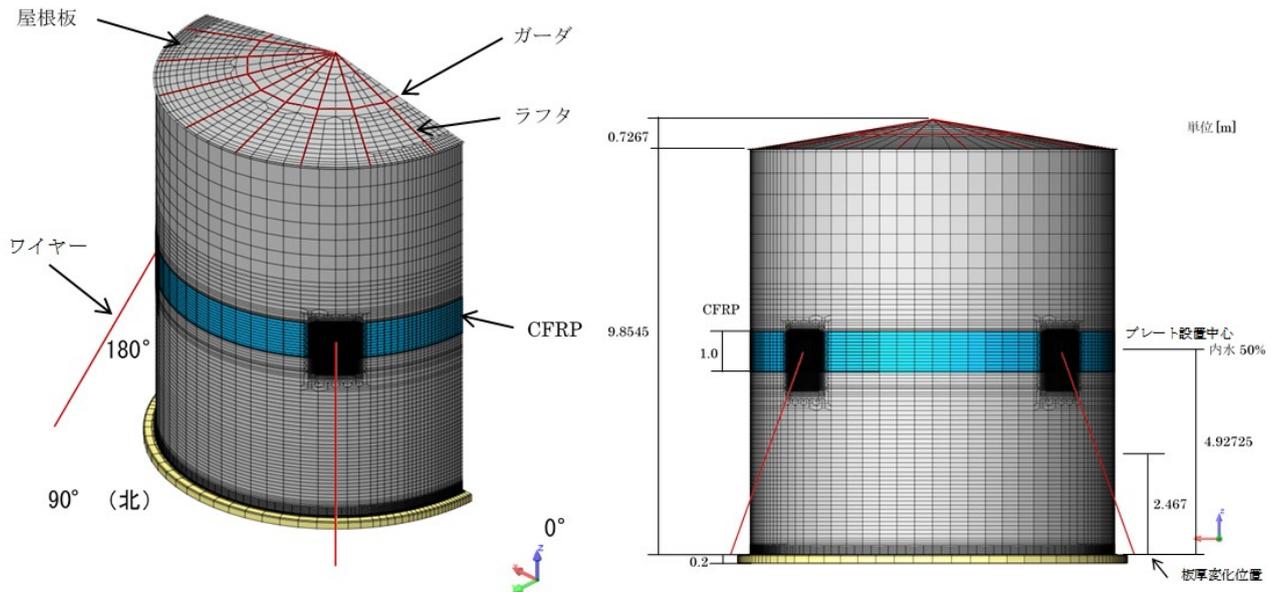


図 3-26. 1 500 kL 級タンク 対策工法 2 の解析モデル全体図

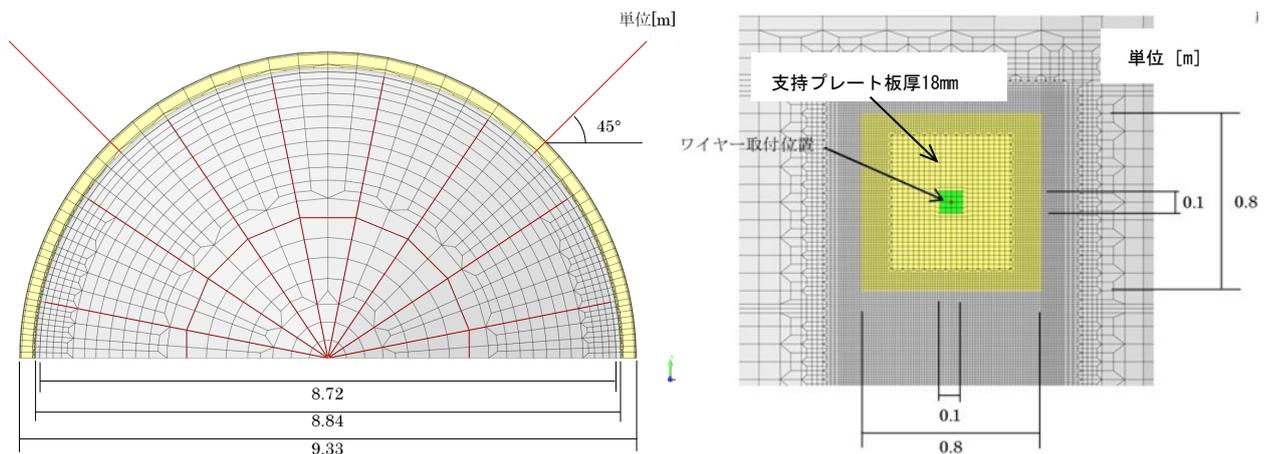


図 3-26. 2 500 kL 級タンク 対策工法 2 の解析モデル上面図とワイヤー支持部拡大図

- 解析で作用させる津波波力はフルード数 $Fr \geq 1.3$ を満足する津波を対象とし、津波水位 h_d^{\max} を漸増させる解析を実施。津波水位は下式により算出した。

$$h_x^{\max}(\theta) = \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta \quad \text{ここで、} \alpha = 1.8 \quad (\text{式 3.2-12})$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035$$

- 対策工法 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。

$$h_V^{\max}(\theta) = \beta \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 q_m \cos m\theta \quad \text{ここで、} \beta = 1.2 \quad (\text{式 3.2-15})$$

$$q_0 = 0.720$$

$$q_1 = 0.308$$

$$q_2 = 0.014$$

$$q_3 = -0.042$$

- 下式により計算した津波荷重の水圧を各要素に一様分布として載荷する。
 $hd_{\max} > Z_i$ となる要素に対して津波荷重を載荷した。タンク周囲に作用する津波波圧は、図3-27に示すような余弦曲線で考慮した。

$$P_i = (hd_{\max} - Z_i) \times 9.80665$$

ここで、 P_i : 要素*i*に載荷する水圧 (kN/m²)

Z_i : 要素*i*の中心位置におけるRCスラブからの高さ (m)

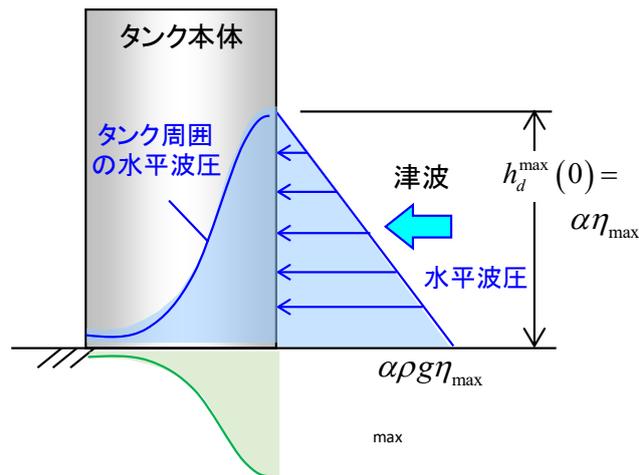


図3-27 タンク本体に作用する津波波圧分布

3. 4 準備解析

対策工法の効果を確認する前に、無対策構造の解析を実施した。解析ケースは 20kL 級、50% 液位とした。

結果を図 3-28 に示す。無対策構造では津波水位 1.45m でタンクが大きく水平移動する(津波限界水位)ことがわかった。

これに対して消防庁が提供している屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツール (<https://www.fdma.go.jp/publication/simulatetool/simulatetool001.html>) にて同条件にて計算を実施すると、タンク前面津波水位は 1.4m (津波浸水深×1.8 倍、摩擦係数を 0.3 として算出) となり、同様な結果となった。

よって、以降の検討においては無対策構造の津波限界水位は同ツールにて算出(表 3-10 に掲載)し、比較検討を実施する。

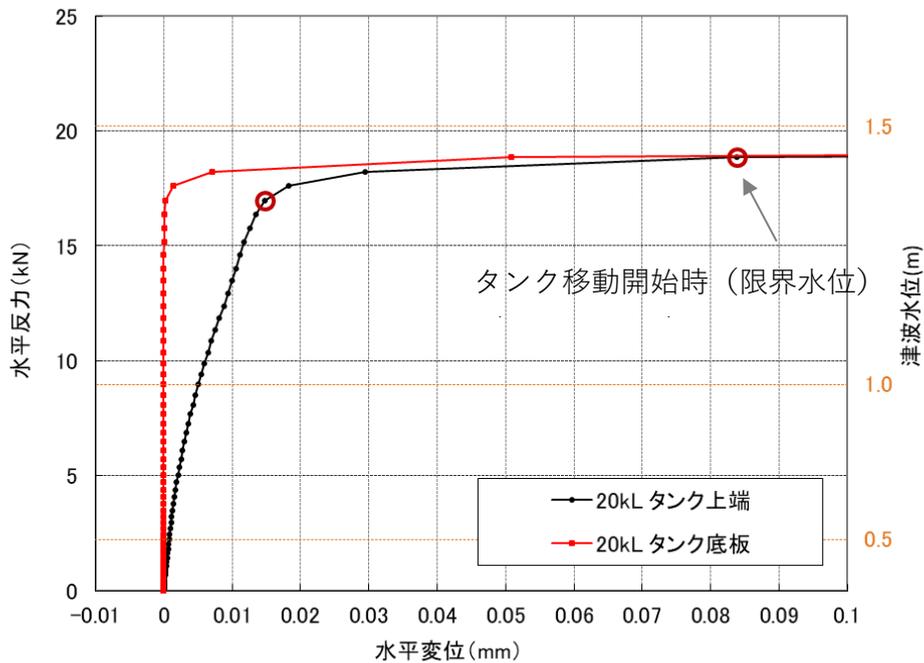


図 3-28 無対策構造 20kL 級タンク 50% 液位の場合の津波水位とタンク水平変位の関係

3. 5 解析ケース

表3-9に示す20ケースの解析を実施した。

表3-9 解析ケース一覧

対策工法	タンク仕様	内容液位 %	浮力	アンカーボルトの有無	ワイヤ本数	ワイヤ位置	ケース番号	目的
対策工法1	20kL	20	無	無	—	—	①	
		50	無	無	—	—	②	
				有	—	—	③	アンカーボルトを残置して施工した場合の検証（ケース②と対比）
		有	無	—	—	④	CFRP内に浸水した場合、基礎側より浸水した場合の効果確認（ケース②と対比）	
	80	無	無	—	—	⑤		
	100kL	50	無	無	—	—	⑥	
	500kL	20	無	無	—	—	⑦	
		50	無	無	—	—	⑧	
		80	無	無	—	—	⑨	
対策工法2	20kL	20	有	無	4本	中	⑩	
		50	有	無	4本	中	⑪	
		80	有	無	4本	中	⑫	
	100kL	50	有	無	4本	中	⑬	
		500kL	20	有	無	4本	中	⑭
	50		有	無	4本	中	⑮	
			有	無	4本	低	⑯	ワイヤ支持箇所変更の効果を検証（ケース⑮と対比）
			有	無	8本	中	⑰	ワイヤ本数増の効果を検証（ケース⑮と対比）
	有	無	4本 (波力載荷方向0度)	中	⑱	津波載荷方向変更の効果を検証（ケース⑮と対比）		
	80	有	無	4本	中	⑲		
対策工法1 + 対策工法2	500kL	50	無	無	4本	中	⑳	2つの対策工法を施工した場合の効果検証（ケース②、⑮と対比）

*：ケース番号に網掛けをしたケースは2017-2019年度の競争的資金にて実施したケースである。

3. 6 各ケースのFEM解析結果

表3-10にFEM解析結果をまとめた。各ケースの応力状態(限界水位でのMISES応力)とその比較を次ページ以降に示す。

表3-10 解析結果一覧

対策工法	タンク仕様	内容液位 %	ケース番号	無対策限界水位 (消防式による)	対策後 限界水位
対策工法 1	20kL	20	①	0.9m	2.9m
		50	②	1.4m	3.1m
			③	2.25m(アンカー有, CFRP 無)	2.8m
			④	1.4m	2.7m
			⑤	1.8m	3.3m
	100kL	50	⑥	2.1m	4.8m
	500kL	20	⑦	2.0m	5.8m
		50	⑧	3.4m	6.3m
		80	⑨	4.4m	6.7m
対策工法 2	20kL	20	⑩	—	—
		50	⑪	1.4m	4.0m
		80	⑫	—	—
	100kL	50	⑬	2.1m	4.5m
	500kL	20	⑭	2.0m	3.9m
		50	⑮	3.4m	5.1m
			⑯		5.0m
			⑰		5.4m
			⑱		4.6m
80		⑲	4.4m	6.0m	
対策工法 1 + 対策工法 2	500kL	50	⑳	3.4m	8.4m

各ケースの FEM 解析結果より下記のことがいえる。

- 表 3-11 にて 20kL 級タンクに対策工法 1 を施工した場合の内容液位による対策効果の確認を実施した（ケース①, ②, ⑤を比較）。20kL 級タンクに対策工法 1 の場合、いずれの内容液位でも CFRP が大きく剥がれ、水平移動を開始する点が限界水位となった。無対策の場合、内容液位の変化が限界の津波水位に大きく影響するが、対策工法 1 を施工することにより、内容液位の変化が限界津波水位に与える影響が小さくなり、内容液位の増減に関わらず、津波漂流対策効果を発揮することがわかった。液位が低くても効果を失わないといえる。

ここで、前章の図 3-29 と表 3-11 の 50%液位の結果は同一の解析条件より得られたものであるため、対策工法 1 の有効性が確認できる。

20kL	20%液位	50%液位	80%液位
無対策 限界津波水位	0.9m	1.4m	1.8m
対策工法 1 限界津波水位	2.9m	3.1m	3.3m

- 表 3-12 にて 500kL 級タンクに対策工法 1 を施工した場合の内容液位による対策効果の確認を実施した（ケース⑦~⑨を比較）。500kL 級タンクに対策工法 1 の場合、いずれの内容液位でも CFRP が大きく剥がれ、水平移動を開始する点が限界水位となった。無対策の場合、内容液位の変化が限界の津波水位に大きく影響するが、対策工法 1 を施工することにより、内容液位の変化が限界津波水位に与える影響が小さくなり、内容液位の増減に関わらず、津波漂流対策効果を発揮することがわかった。液位が低くても効果を失わないといえる。

500kL	20%液位	50%液位	80%液位
無対策 限界津波水位	2.0m	3.4m	4.4m
対策工法 1 限界津波水位	5.8m	6.3m	6.7m

- 表 3-13 にて 20kL 級タンクに対策工法 2 を施工した場合の結果を示した（ケース⑩）。50%液位にて無対策の場合、限界津波水位は 1.4m であるが、対策工法 2 を施工することにより、タンク高さである 4.0m まで限界津波水位を改善することができる。ワイヤー支持プレートの裏側にてタンク側板は塑性化するが、CFRP 施工範囲外には達していない。よってタンク高さである 4.0m を限界水位とした。20kL のような小型のタンクに対して対策工法 2 は効果的であることがわかった。他の解析ケースより内容液位の増減に対して、対策効果が大きく変わらないことがわかったため、20kL 級タンクの 20%液位、80%液位時の解析は省略した。

ここで、前章の図 3-29 と表 3-13 の 50%液位の結果は同一の解析条件より得られたものであるため、対策工法 2 の有効性が確認できる。

20kL	20%液位	50%液位	80%液位
無対策 限界津波水位	—	1.4m	—
対策工法 2 限界津波水位	—	4.0m	—

- 表3-14にて500kL級タンクに対策工法2を施工した場合の内容液位による対策効果の確認を実施した。500kL級タンクに対策工法2の場合、いずれの内容液位でもCFRPの引張強度到達点が限界水位となった。無対策の場合、内容液位の変化が限界の津波水位に大きく影響するが、対策工法2を施工することにより、内容液位の変化が限界津波水位に与える影響が小さくなり、内容液位の増減に関わらず、津波漂流対策効果を発揮することがわかった。液位が低くても効果を失わないといえる。但し、20kL級タンクに対策工法2を施工した時ほどの改善効果はないことがわかった。理由としてタンク本体（側板部）の剛性の有無によるものと考えられる。

500kL	20%液位	50%液位	80%液位
無対策 限界津波水位	2.0m	3.4m	4.4m
対策工法1 限界津波水位	5.8m	6.3m	6.7m

- 表3-11～表3-14を総括すると、対策工法1、2ともに内容液位の増減に関わらず、津波漂流対策効果を発揮することがわかった。液位が低くても効果を失わないことがわかった。
- 500kL級タンクに対策工法2を施工する場合、寸法によるタンク側板部の剛性の弱さにより、対策工法の効果を発揮できていないことがわかった。その対策として支持箇所及び支持ワイヤー本数を増加させ、支持部の荷重を分散することを考えた。ここでは支持ワイヤーを8本とした場合の検討を行った。ケース⑮と⑰を比較した結果を表3-15に示す。結果として、支持ワイヤー4本時の津波限界水位5.1mに対して支持ワイヤー8本時の津波限界水位は5.4mと支持部の荷重は分散され、限界津波水位は向上したものの、対策効果に大きな改善は見られないことがわかった。
- 500kL級タンクに対策工法2を施工する場合、寸法によるタンク側板部の剛性の弱さにより、対策工法の効果を発揮できていないことがわかった。ここではその対策として支持箇所をタンク形状の剛性を利用できる箇所となる、底板側の低い位置にてすることを考えた。ケース⑮と⑱を比較した結果を表3-16に示す。結果として、本案ではワイヤー支持力による側板応力が隅角部に伝播し、隅角部の応力集中を促進させる結果となり、支持ワイヤーをタンク1/2高さ位置に設置した場合の津波限界水位5.1mに対して支持ワイヤー設置位置を低く（タンク1/4高さ位置）設置した場合の津波限界水位は5.08mと対策効果に効果がないことがわかった。
- 対策工法1はCFRPの防水性により、タンクに浮力を発生させない点が対策効果の1つである。万一、施工したCFRPが防水性能を失った際（損傷）には、浮力を生じることとなる。ここでは20kL級タンクに対策工法1を施工した場合に、タンク底面に浸水があり、浮力を生じた場合の対策効果を確認した。ケース②と④を比較した結果を表3-17に示す。20kL級タンク50%液位での対策工法1の津波限界水位3.1mに対して、浮力を生じた場合には津波限界水位は2.7mとなり、性能は若干低減するものの、一定の効果は残り、対策工法1は有効であることが確認できた。
- 小型の危険物タンクはタンク解放時の風対策としてアンカーボルトが設置されている場合が多い。対策工法1を施工する際に、既設のアンカーボルトをそのままとした場合について解析した。ケース②と③を比較した結果を表3-18に示す。20kL級タンク50%液位での対策工法1の津波限界水位3.1mに対して、アンカーボルトを付けたままとした場合には津波限界水位は2.8mにてタンク隅角部が降伏（CFRP内ではあるが）した。地

震時における応力集中も考慮すると、施工時に撤去することが望ましい。

- 小型の屋外タンクとはいえ、20kLと500kLでは構造に大きな差があることがわかった。そのため、100kLに対して対策工法1（ケース⑥）、対策工法2（ケース⑬）の効果の確認を実施した。対策工法1の結果を表3-19に、対策工法2の結果を表3-20に示した。結果としていずれも20kL級と500kL級の間の中の結果となるが、今回の100kL級モデルのサンプルとしたタンクの寸法例では500kL級と同様に寸法によるタンク側板部の剛性の弱さが特徴として現れることがわかった。
- 表3-19、表3-20及び表3-11～表3-14より、タンク容量と限界津波高さの関係を整理した。結果を図3-29に示す。個々のタンクの寸法（高さ、直径、板厚）にもよるが、今回の検討ではタンクが大型化するほど対策工法1の効果が高く、対策工法2ではタンクの高さに対して限界津波高さが向上せず、100kLを超えるタンクの場合には対策工法1の方が効果的といえる。

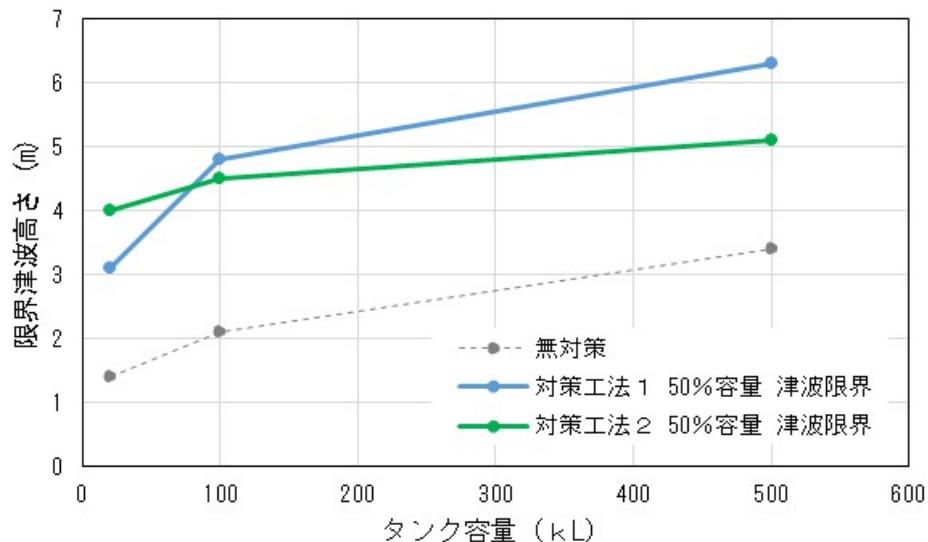


図3-29 タンク容量と限界津波高さの関係

- これまでの結果より、対策工法1と対策工法2の津波波力を受けた際の変形モードが異なることがわかった。対策工法1ではタンクの底板近傍を基礎に固定するためタンク上部が変形し、その荷重をCFRPが支持しきれなくなり、接着部の剥離もしくはCFRPの破断により限界津波水位が決定し、対策工法2ではタンクの間部をワイヤーにて支持するため、タンクの下部が移動し、その荷重をCFRPが支持しきれなくなり、CFRPの破断もしくはタンク隅角部の降伏となり、限界津波水位が決定されている。ここでは2つの対策工法を併用することにより、弱点となるモードを補うことができなからと考へ、500kL級タンクに対して対策工法1+対策工法2のケース⑳を実施した。結果を表3-21に示す。結果として両対策工法の弱点を補完することができ、対策工法1では津波限界水位6.3m、対策工法2では津波限界水位5.1mであったものが、対策工法1+対策工法2では津波水位8.4mにてタンク隅角部（CFRP内）が降伏し限界津波水位となった（津波水位8.5mにて対策工法1部分のCFRPが破断となる）が、効果が大きく改善できることがわかった。対策工法1、2との結果比較を図3-30に示す。

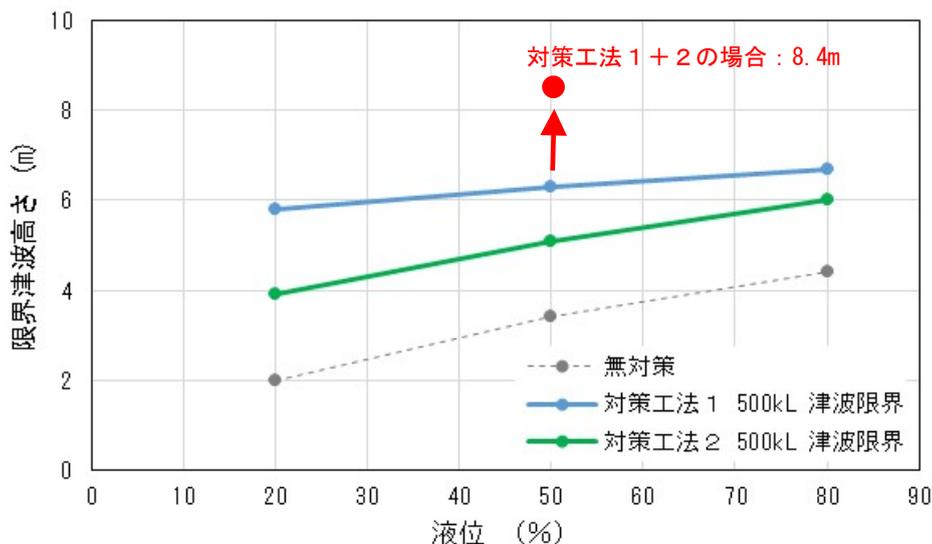


図3-30 対策工法による津波限界水位の比較

- 500kL 級タンクに対策工法2を施工する場合、津波波力が支持ワイヤーに対してどの角度で载荷されるかは不明である。これまでの解析ケースでは津波波力に対して45° 方向に支持ワイヤーがあるものとして解析を実施してきた。ここではワイヤー支持方向に津波波力が入力（相対角度0°）したとして効果を確認した（ケース⑱）。ケース⑮と⑱を比較した結果を表3-22に示す。結果として、45° 方向に支持した場合には2本のワイヤーにて支持されているが、0° 方向とした場合には3本の支持ワイヤーで分散支持すると予想したのに対して1本の支持ワイヤーのみで支持することとなり、津波限界水位は4.6mと10%程度効果が減少することがわかった。
- 対策工法2を施工する場合、これまでの解析ケースではワイヤーを接続する支持プレートをタンク本体とは接着せず、CFRPにて固定するものとして解析を実施してきた。ここでは支持プレートをタンク側板にエポキシ樹脂にて接着したとして効果を確認した。支持プレートとタンク側板の接着の有無の効果を比較した結果を表3-23に示す。結果として、タンク側板全体でタンクを支持するイメージとなり、津波限界水位は接着なしの5.1mから5.6mと10%程度効果が改善することがわかった。しかし、効果が向上した分、反力が大きくなるため、支持プレートとワイヤー支持アイの接合部の応力が過大となるため、本構造を成立させるためには支持プレートの設計が課題である。

表3-11 対策工法1 20kL級タンク 液位による対策効果の比較

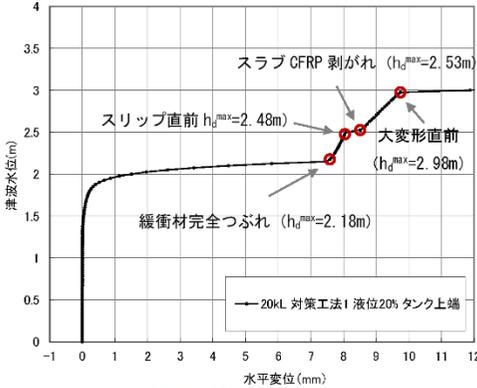
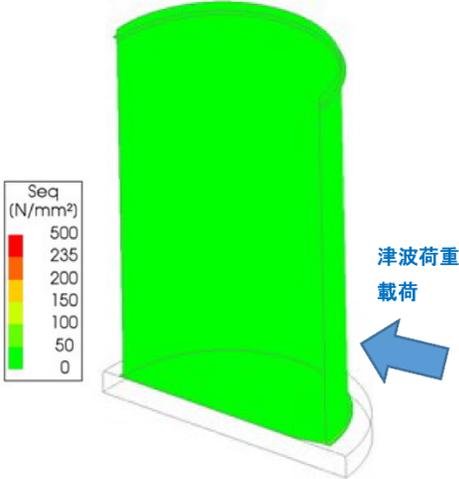
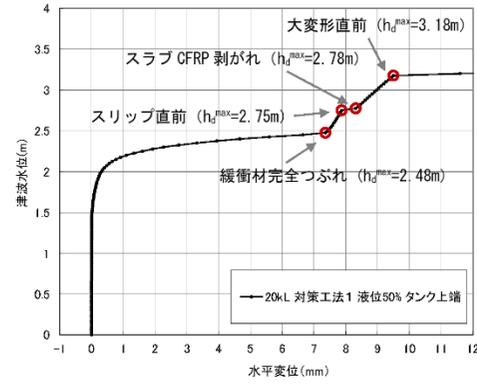
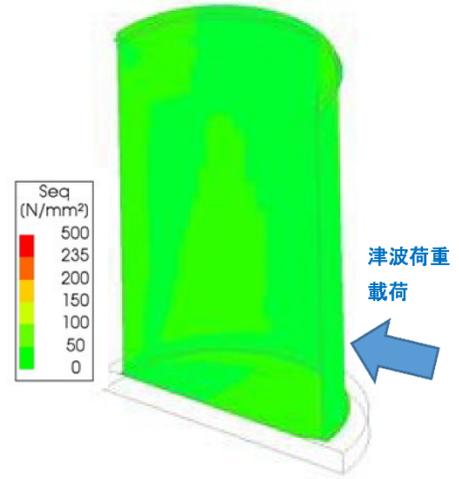
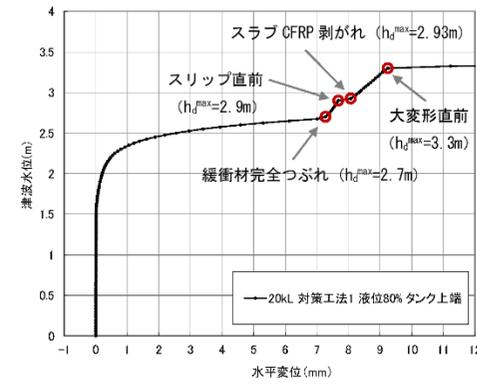
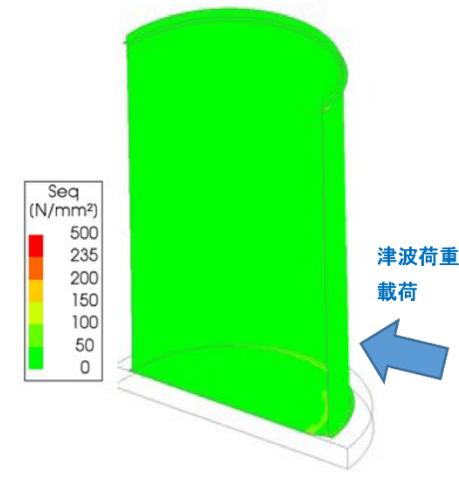
内容液量	20%	50%	80%
<p>対策工法1 20kl (タンク高さ4.0m)</p> <p>液位の増減に関わらず、漂流効果を発揮することがわかる。液位が低くても効果を失わない。</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策0.9m(消防式) → 対策後2.9m</p>   <p>図1.1 大変形直前のタンク本体のMISES応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策1.4m(消防式) → 対策後3.1m</p>   <p>図1.2 大変形直前のタンク本体のMISES応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策1.8m(消防式) → 対策後3.3m</p>   <p>図1.3 大変形直前のタンク本体のMISES応力</p>

表 3-12 対策工法 1 500kL 級タンク 液位による対策効果の比較

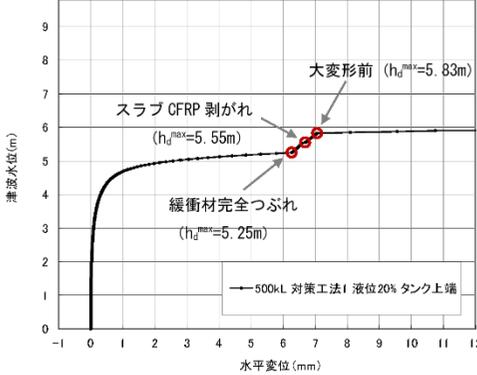
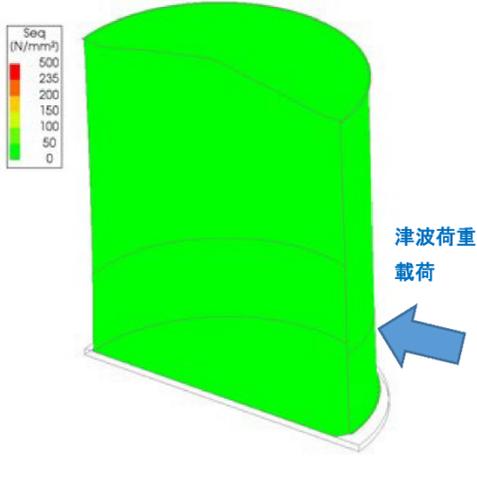
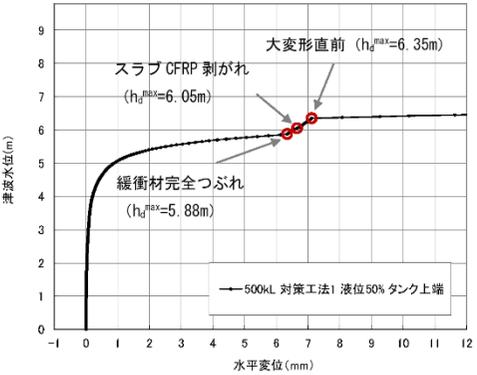
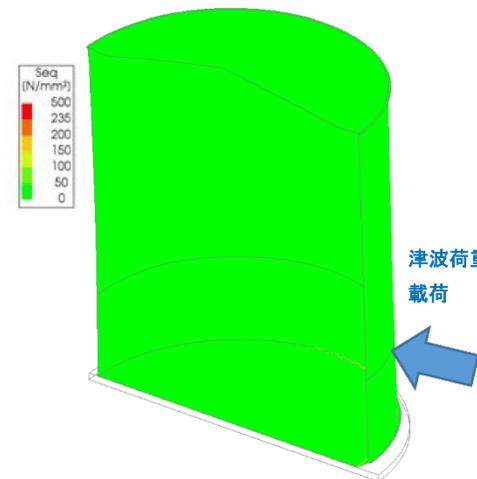
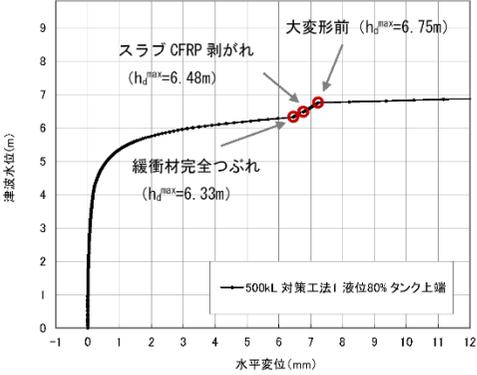
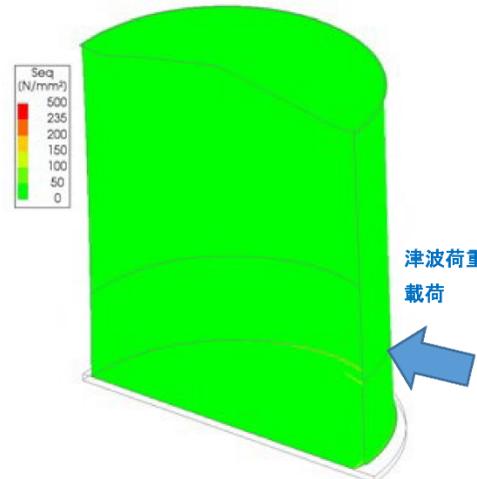
内容液量	20%	50%	80%
<p>対策工法 1</p> <p>500kL</p> <p>(タンク高さ 9.8m)</p> <div data-bbox="250 906 465 1098" style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>液位の増減に関わらず、漂流効果を発揮することがわかる。液位が低くても効果を失わない。</p> </div>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 2.0m (消防式) → 対策後 5.8m</p>   <p>図 2.1 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) → 対策後 6.3m</p>   <p>図 2.2 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 4.4m (消防式) → 対策後 6.7m</p>   <p>図 2.2 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>

表 3-13 対策工法 2 20kL 級タンク 液位による対策効果の比較

内容液量	20%	50%	80%
<p data-bbox="286 719 425 751">対策工法 2</p> <p data-bbox="327 791 385 823">20kL</p> <p data-bbox="255 847 448 874">(タンク高さ 4.0m)</p> <div data-bbox="248 906 465 1034" style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red;"> 20kL のタンクに対して対策工法 2 は効果的であるといえ </div> <div data-bbox="342 1042 902 1369"> </div>	<div data-bbox="616 507 882 699" style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red;"> 対策工法 1、2 とともに内容液位の増減に大きく影響されないことが解ったため実施せず </div>	<p data-bbox="999 339 1276 371">タンク前面の津波水位</p> <p data-bbox="999 411 1456 443">無対策 1.4m (消防式) → 対策後 4.0m</p> <div data-bbox="999 480 1487 834"> </div> <div data-bbox="999 858 1456 1369"> </div> <p data-bbox="1037 1390 1451 1417">図. 3 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<div data-bbox="1630 507 1897 699" style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red;"> 対策工法 1、2 とともに内容液位の増減に大きく影響されないことが解ったため実施せず </div>

表 3-14 対策工法 2 500kL 級タンク 液位による対策効果の比較

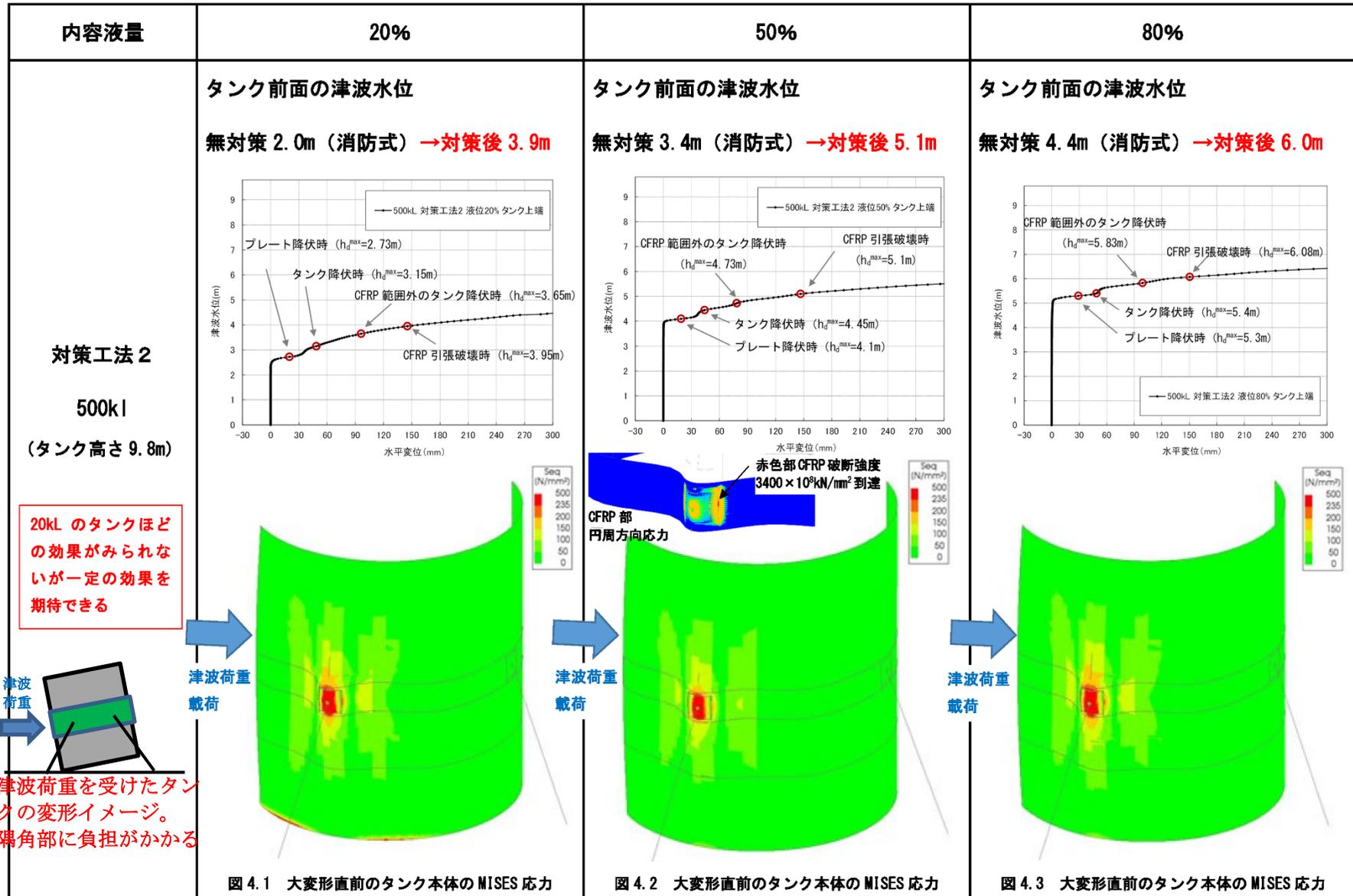


表 3-15 対策工法 2 500kL 級タンク 50%液位 支持ワイヤー本数による対策効果の比較

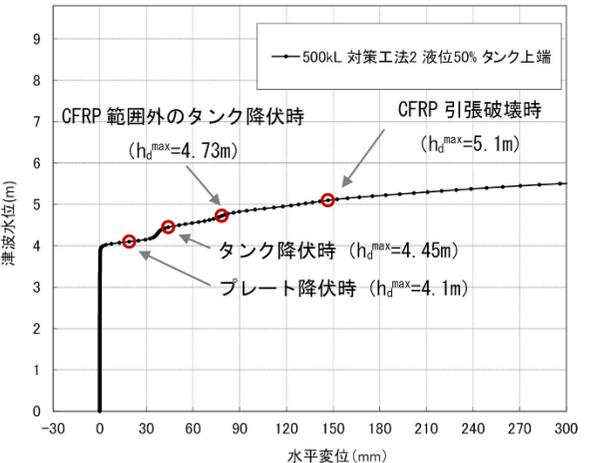
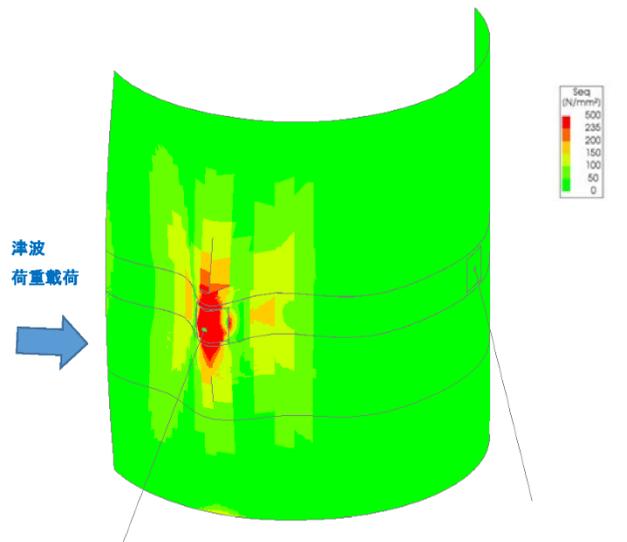
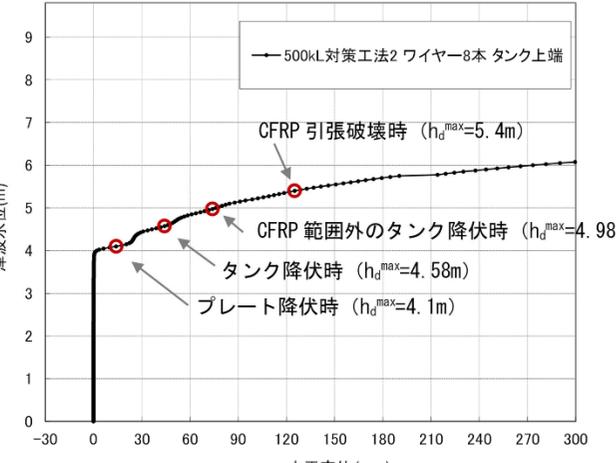
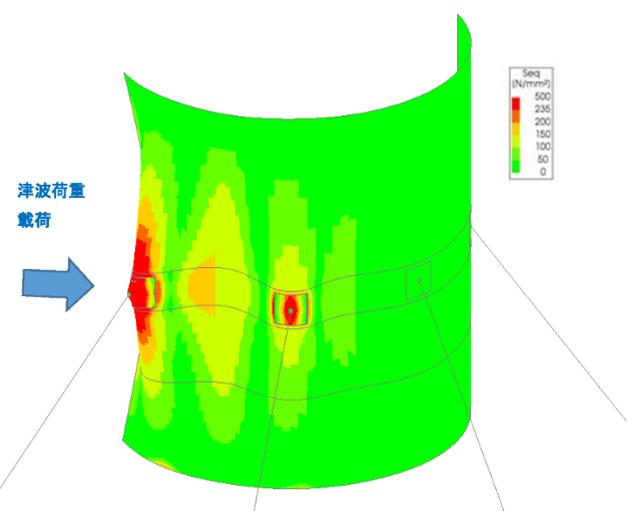
ケース	50%容量	
<p>対策工法 2 500kL 支持ワイヤー4本</p> <p>50%液位 (タンク高さ 9.8m)</p>	<p>タンク前面の津波水位 無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.1m</p> 	
<p>対策工法 2 500kL 支持ワイヤー8本</p> <p>50%液位 (タンク高さ 9.8m)</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px; color: red;"> <p>対策工法 2 の取付ワイヤーを多くしても大きな改善がない (費用対効果が薄い)。</p> </div>	<p>タンク前面の津波水位 無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.4m</p> 	

表 3-16 対策工法2 500kL級タンク 50%液位 支持ワイヤー位置による対策効果の比較

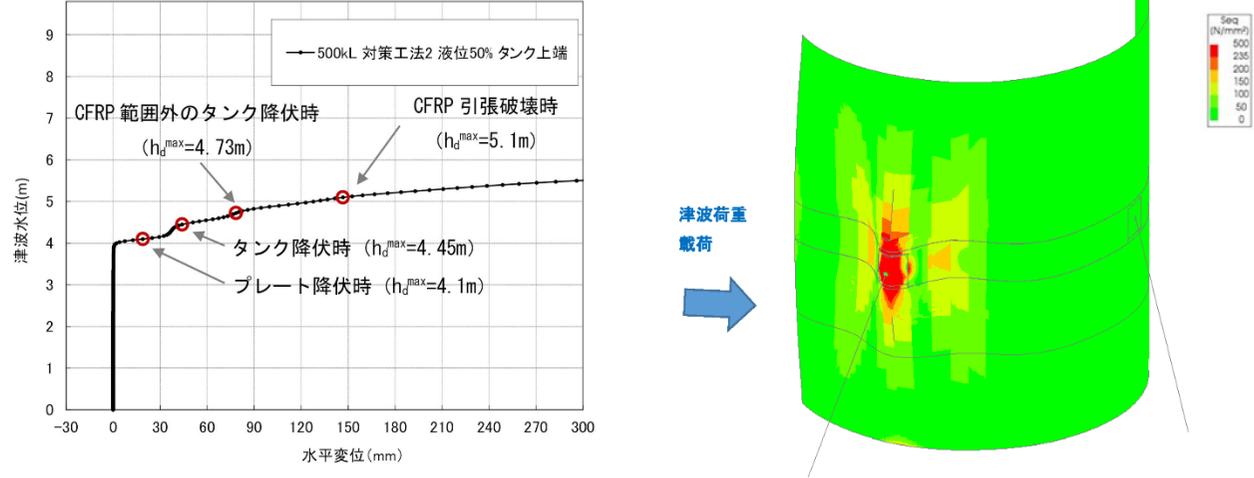
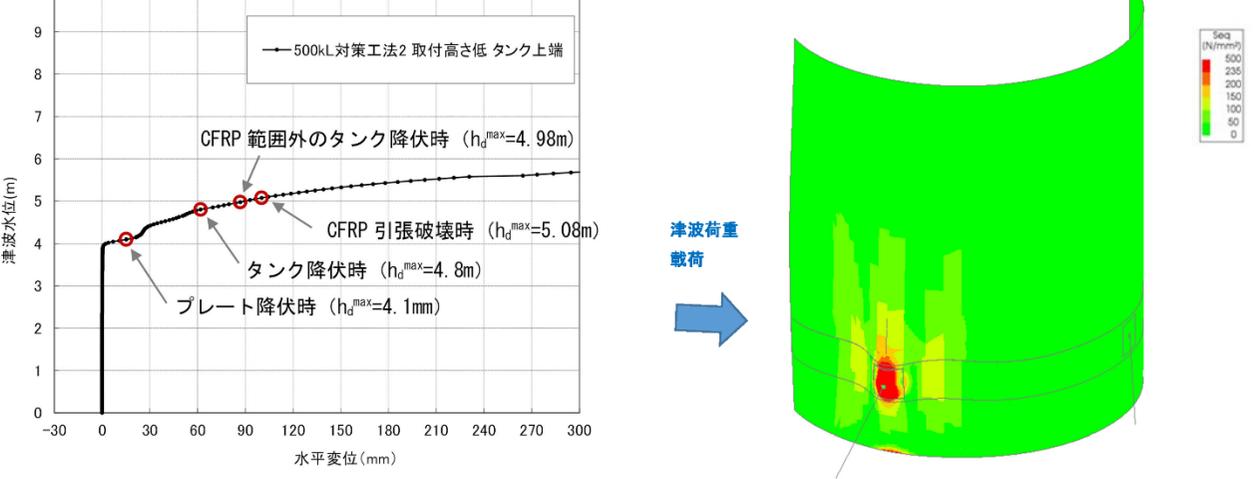
ケース	50%容量
<p>対策工法2 500kL 支持ワイヤー4本</p> <p>50%液位 (タンク高さ9.8m)</p>	<p>タンク前面の津波水位 無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.1m</p> 
<p>対策工法2 500kL 支持ワイヤー4本</p> <p>ワイヤー位置を低くした場合</p> <p>50%液位 (タンク高さ9.8m)</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>対策工法2の取付位置を低くしても効果がない。隅角部にも応力集中が見られるようになった。</p> </div>	<p>タンク前面の津波水位 無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.08m</p> 

表 3-17 対策工法1 20kL 級タンク 50%液位 底面浮力の有無による対策効果の比較

ケース	50%容量
<p>20kL 対策工法1 50%液位</p> <p>CFRPにより防水</p> <p>(タンク高さ4.0m)</p>	<p>タンク前面の津波水位 無対策1.4m(消防式) →対策後3.1m</p>
<p>20kL 対策工法1 50%液位</p> <p>浸水し、浮力あり</p> <p>(タンク高さ4.0m)</p>	<p>タンク前面の津波水位 無対策1.4m(消防式) →対策後2.7m</p>

表 3-18 対策工法1 20kL級タンク 50%液位 既設アンカーボルトの有無による対策効果の比較

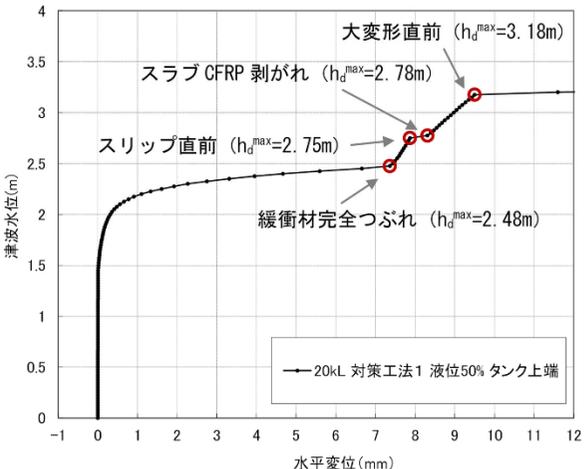
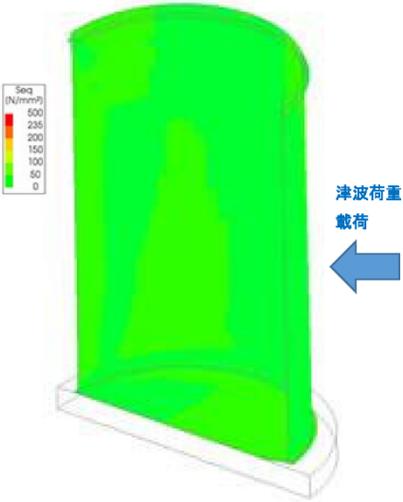
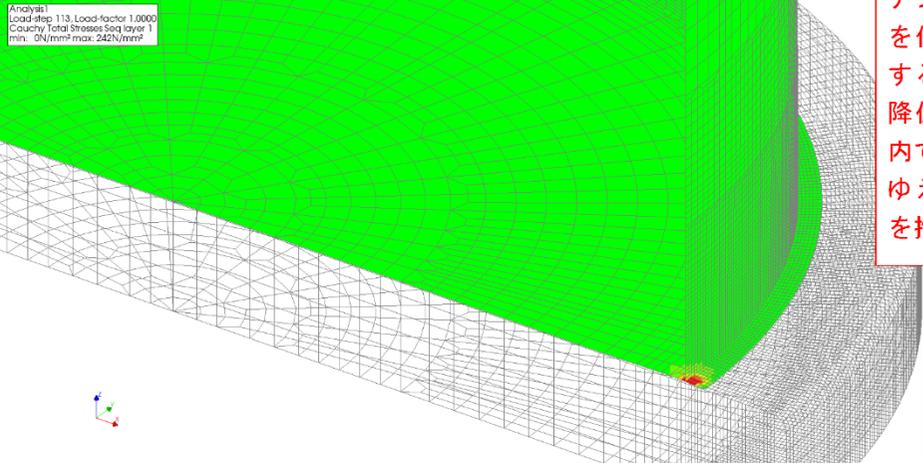
ケース	50%容量
<p>20kL 対策工法1 50%液位</p> <p>津波波力載荷</p> <p>50%液位</p> <p>(タンク高さ 4.0m)</p>	<p>タンク前面の津波水位 無対策 1.4m (消防式) →対策後 3.1m</p>  
<p>20kL 対策工法1 50%液位</p> <p>津波波力載荷</p> <p>アンカーボルトを付けたまま CFRP 施工</p> <p>(緩衝材あり)</p> <p>50%液位</p> <p>(タンク高さ 4.0m)</p>	<p>無対策 1.7m → 2.8m にて隅角部が降伏を超える</p>  <div data-bbox="1653 901 1870 1197" style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <p>アンカーボルトを付けたままとすると隅角部で降伏する (CFRP内ではあるが)。ゆえに外すことを推奨します。</p> </div>

表 3-19 対策工法 1 のタンク容量による対策効果の比較 50%液位

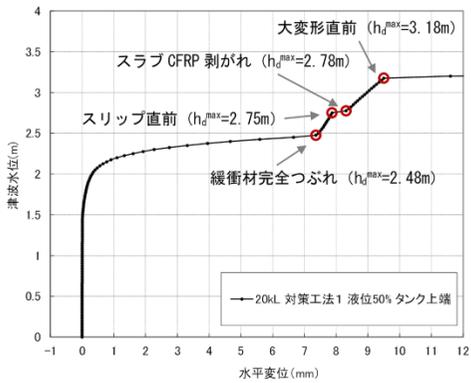
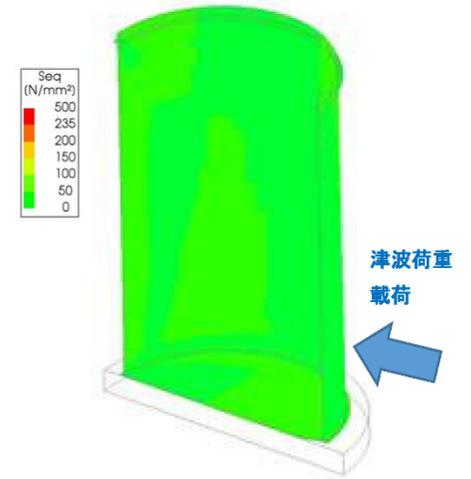
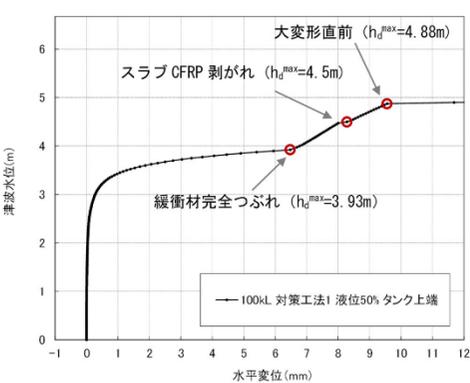
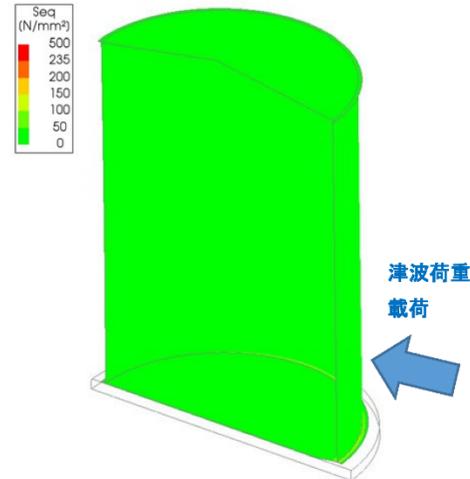
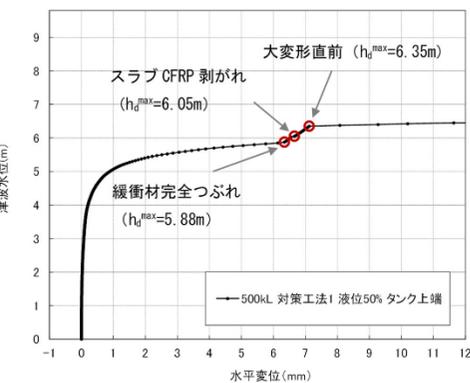
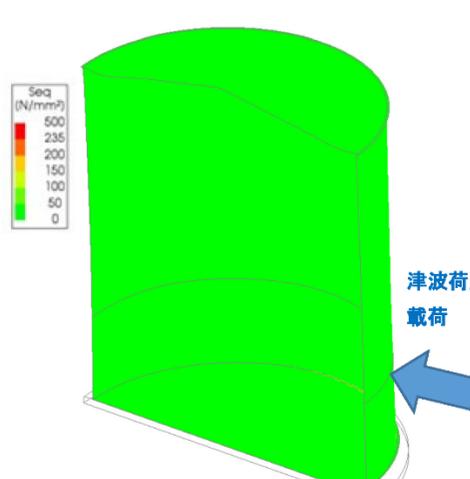
タンク容量	対策工法 1 20kL 50%液位	対策工法 1 100kL 50%液位	対策工法 1 500kL 50%液位
<p>対策工法 1</p> <p>50%液位</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 1.4m (消防式) →対策後 3.1m</p>   <p>図 2.1 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 2.1m (消防式) →対策後 4.8m</p>   <p>図 2.2 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) →対策後 6.3m</p>   <p>図 2.3 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>

表 3-20 対策工法 2 のタンク容量による対策効果の比較 50%液位

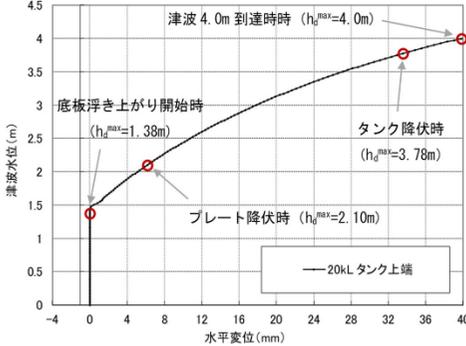
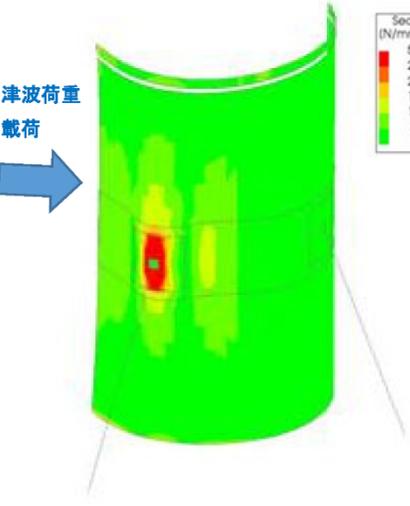
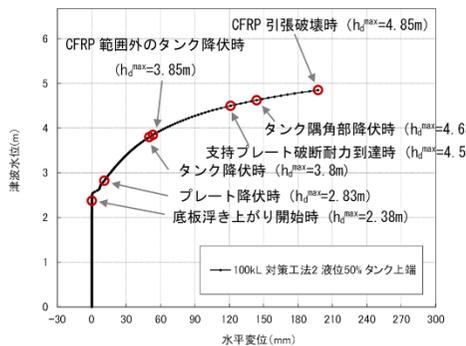
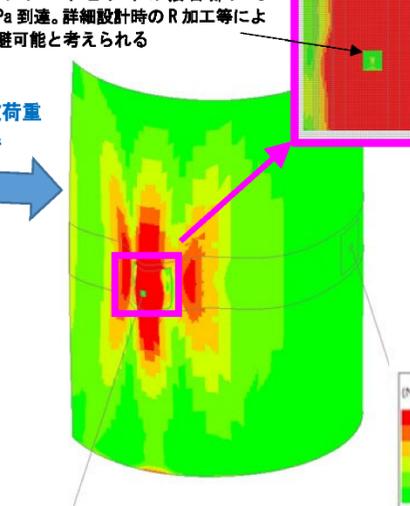
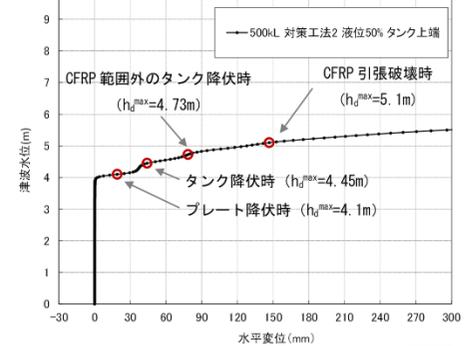
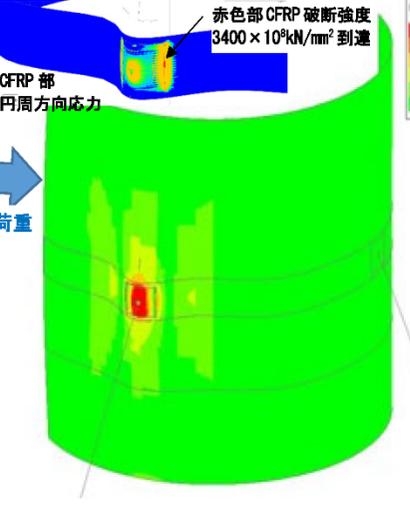
タンク容量	対策工法 2 20kL 50%液位	対策工法 2 100kL 50%液位	対策工法 2 500kL 50%液位
<p>対策工法 2</p> <p>50%液位</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 1.4m (消防式) →対策後 4.0m</p>  <p>図 3.1 津波 4.0m 到達時のタンク本体の MISES 応力 (タンク全高 4.0m)</p> 	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 2.1m (消防式) →対策後 4.5m</p>  <p>支持プレートとアイの接合部にて 570MPa 到達。詳細設計時の R 加工等により回避可能と考えられる</p>  <p>図 3.2 タンク隅角部降伏時のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.1m</p>   <p>図 3.3 CFRP 引張破壊時のタンク本体の MISES 応力</p>

表3-21 対策工法1, 対策工法2, 対策工法1+2の対策効果の比較 500kL級タンク 50%液位

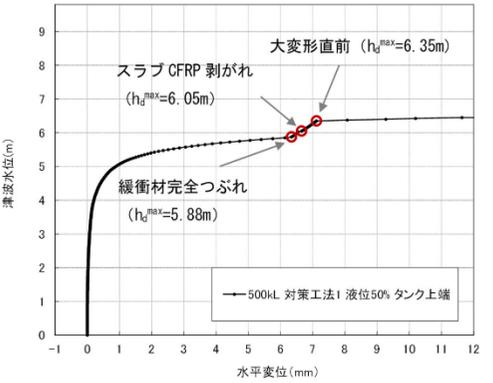
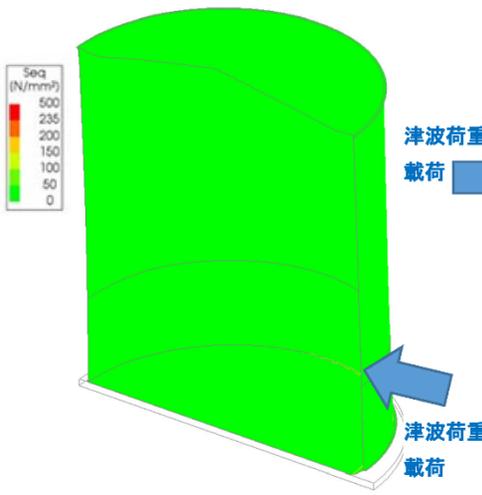
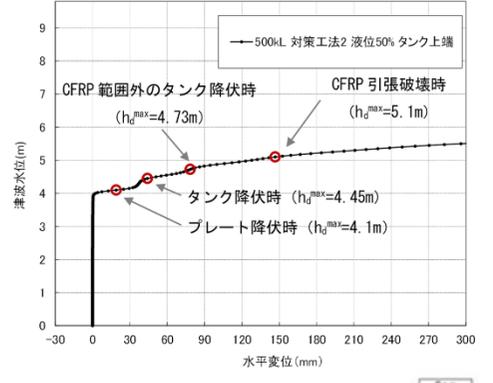
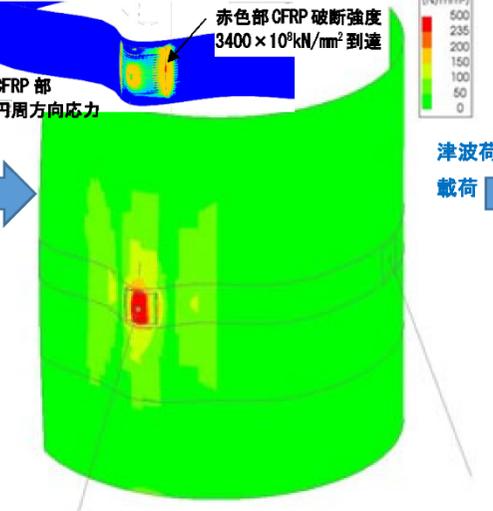
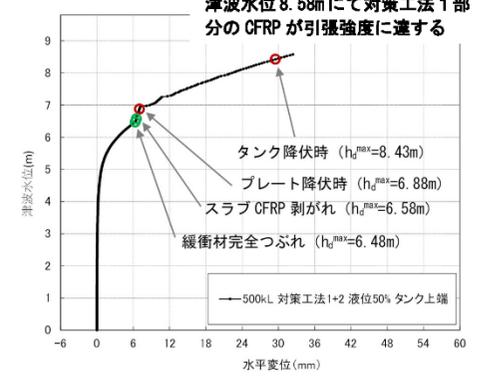
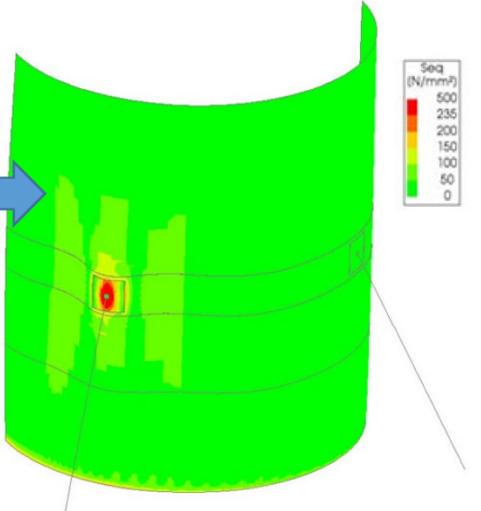
対策工法比較	対策工法1 500kL 50%液位	対策工法2 500kL 50%液位	対策工法1+2 500kL 50%液位
<p>500kL (タンク高さ9.8m)</p> <p>対策工法1+2では対策工法1, 2の長所が発揮され、対策の効果が大きくなる。</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) → 対策後 6.3m</p>   <p>図1.1 大変形直前のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) → 対策後 5.1m</p>   <p>図1.2 CFRP 引張破壊時のタンク本体の MISES 応力</p>	<p>タンク前面の津波水位</p> <p>無対策 3.4m (消防式) → 対策後 8.4m</p>   <p>図1.3 タンク降伏時のタンク本体の MISES 応力</p>

表3-22 対策工法2 500kL級タンクの津波波力载荷方向とワイヤー支持方向の差による対策効果の比較 50%液位

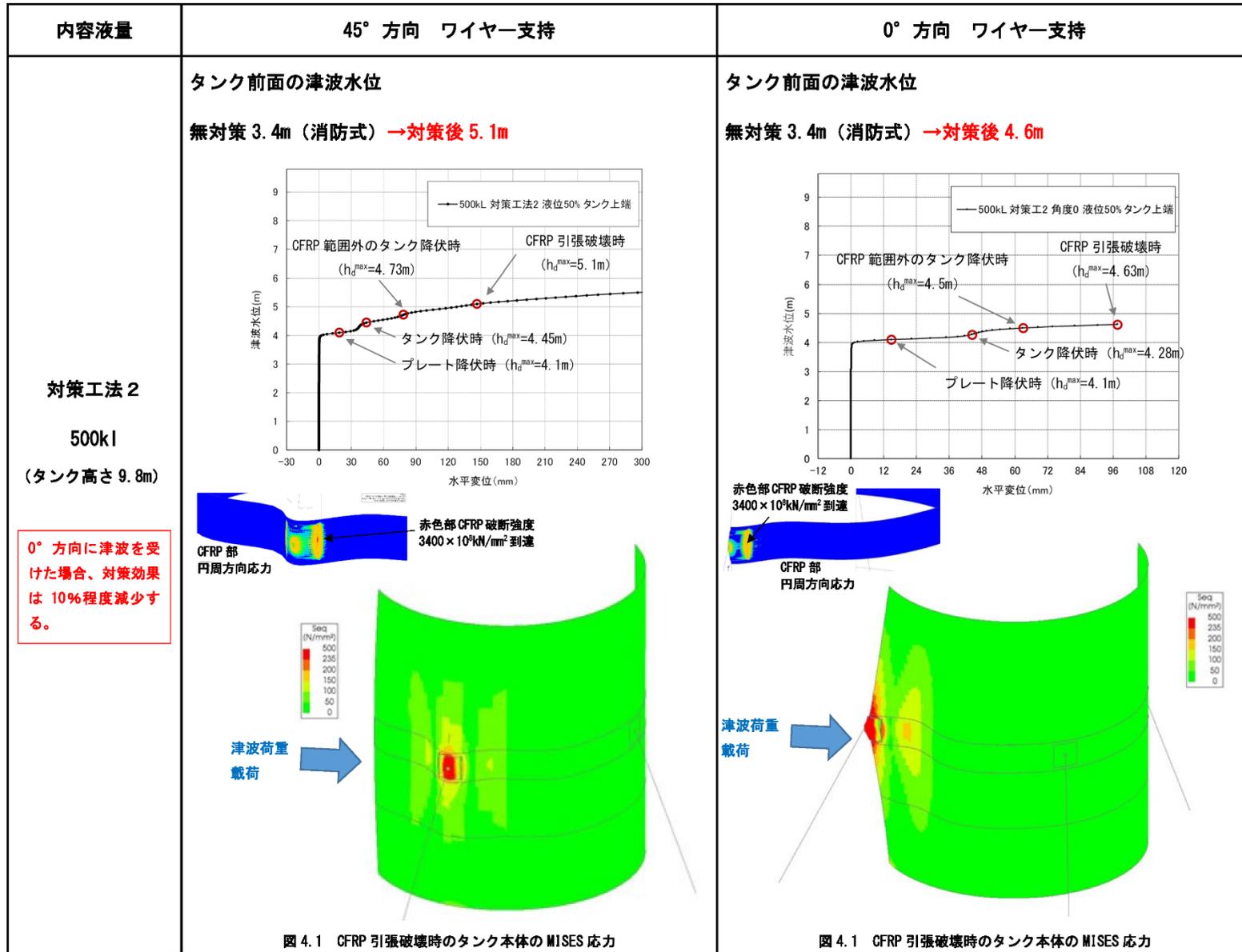
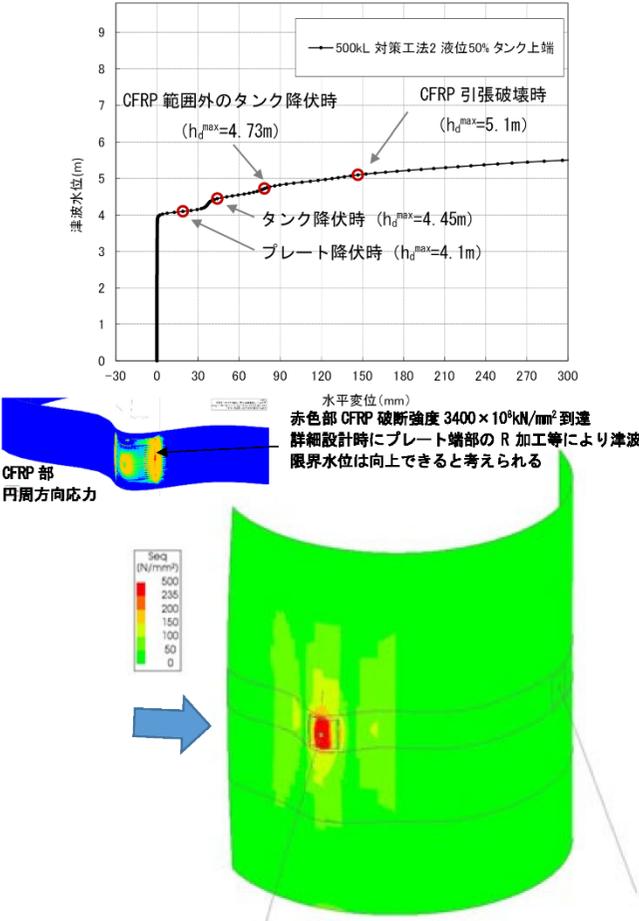
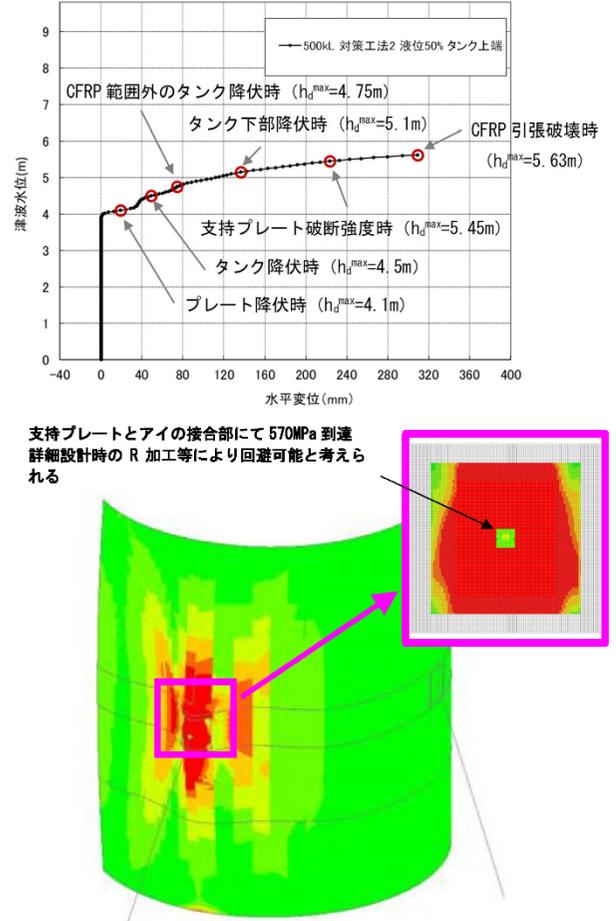


表3-23 対策工法2 500kL級タンク ワイヤー支持プレートの取付方法の差による対策効果の比較 50%液位

内容液量	ワイヤー支持プレート裏面とタンク側板の接着なし	ワイヤー支持プレート裏面とタンク側板の接着あり
<p data-bbox="376 496 495 528">対策工法2</p> <p data-bbox="400 560 470 592">500kl</p> <p data-bbox="349 608 521 639">(タンク高さ9.8m)</p> <div data-bbox="342 730 533 1241" style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>ワイヤー支持プレートの裏面をタンクとエポキシ樹脂にて接着した場合、接着していない場合に比べて、タンク側板全体の強度が利用できるようになり、津波限界水位が改善できる。しかし、支持反力も上昇するため、アイの接合部等に負荷がかかる。支持プレートの設計に課題が残る。</p> </div>	<p data-bbox="555 325 801 357">タンク前面の津波水位</p> <p data-bbox="555 389 965 421">無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.1m</p>  <p data-bbox="667 1390 1104 1417">図5.1 CFRP引張破壊時のタンク本体のMISES応力</p>	<p data-bbox="1236 325 1482 357">タンク前面の津波水位</p> <p data-bbox="1236 389 1646 421">無対策 3.4m (消防式) →対策後 5.4m</p>  <p data-bbox="1281 1390 1854 1417">図5.2 支持プレート破断強度(570MPa)時のタンク本体のMISES応力</p>

3. 7 対策工法の選定

これまで効果を確認してきた対策工法 1， 対策工法 2 の選定フローを図 3-31に示す。

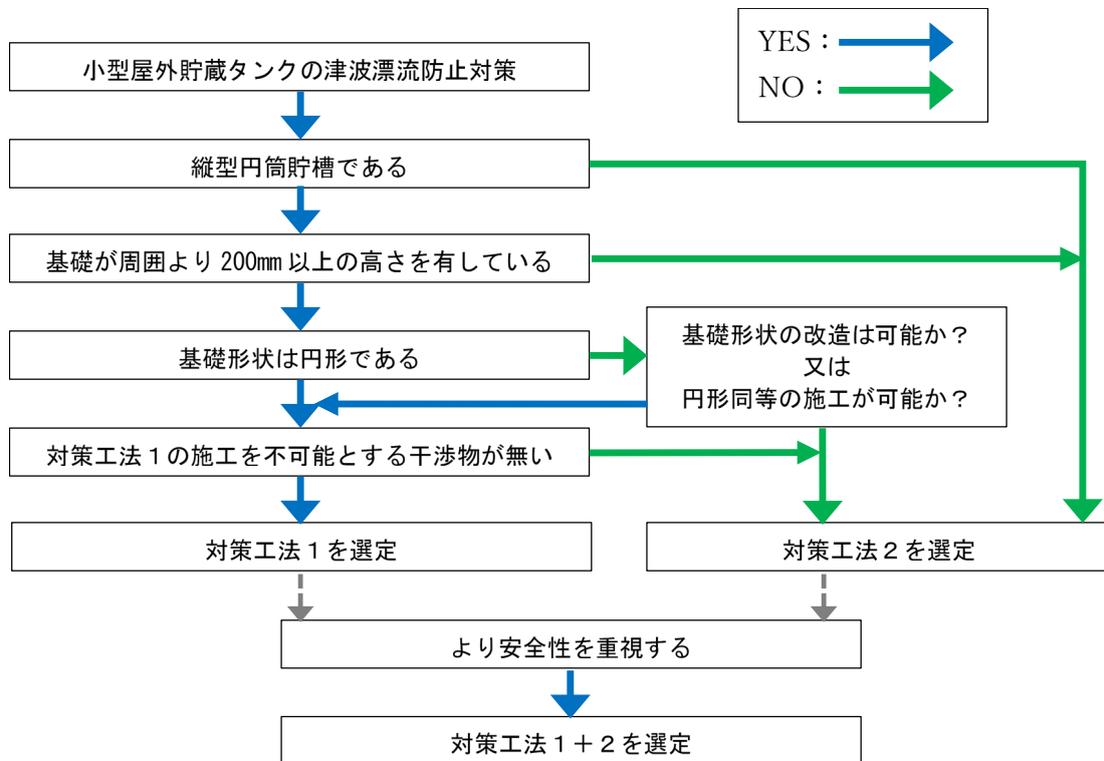


図 3-31 対策工法の選定フロー

3. 8 対策工法の耐震性への影響の確認

2つの対策工法を施工した際に、耐震性能を損なっていないか20kL級タンク、500kL級タンクモデルにより確認した（表3-24, 25参照）。結果としてこのクラスのタンクの設計震度として採用される水平地震力0.3G対して概ね耐震性を有していることを確認した。

表 3-24 対策工法 1 20kL, 500kL 級タンク 耐震性能に対する影響の確認

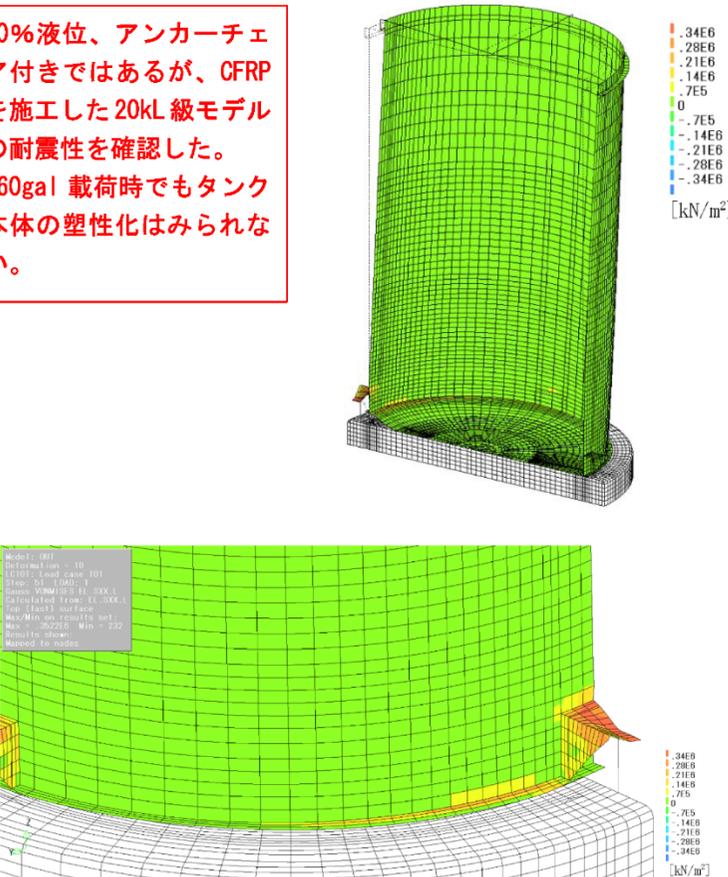
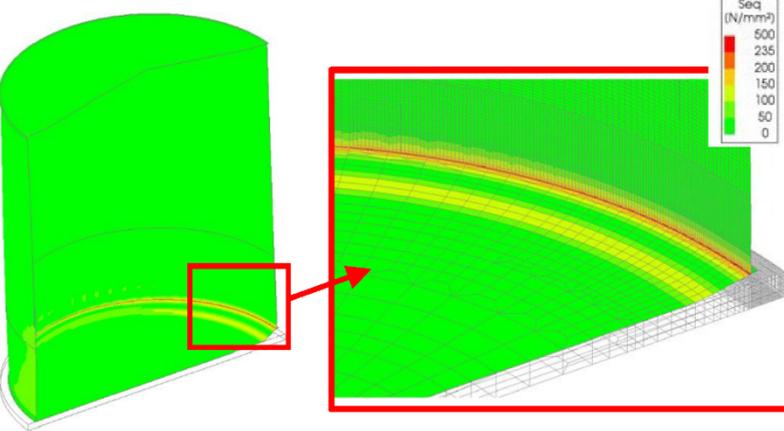
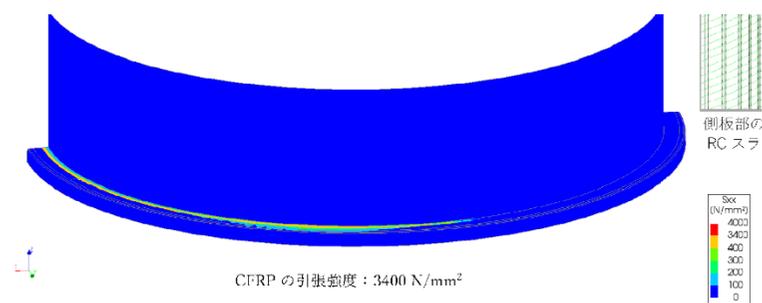
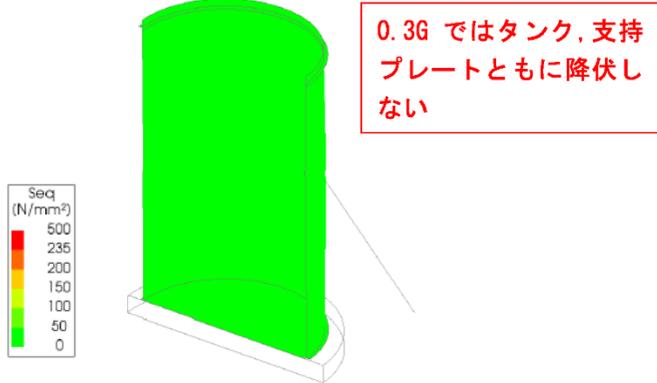
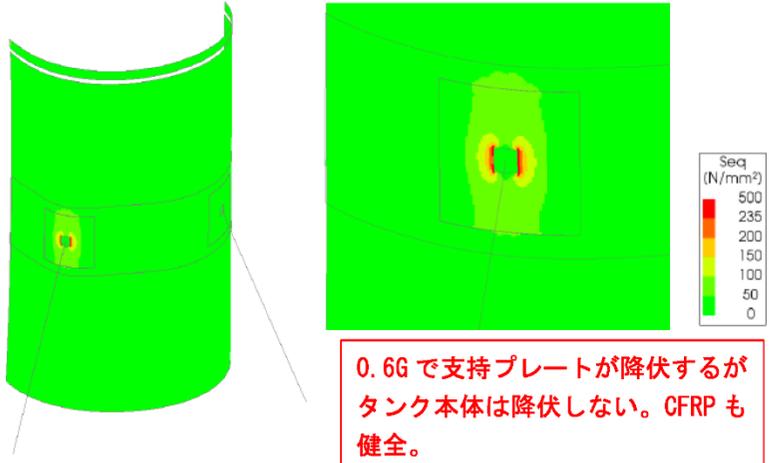
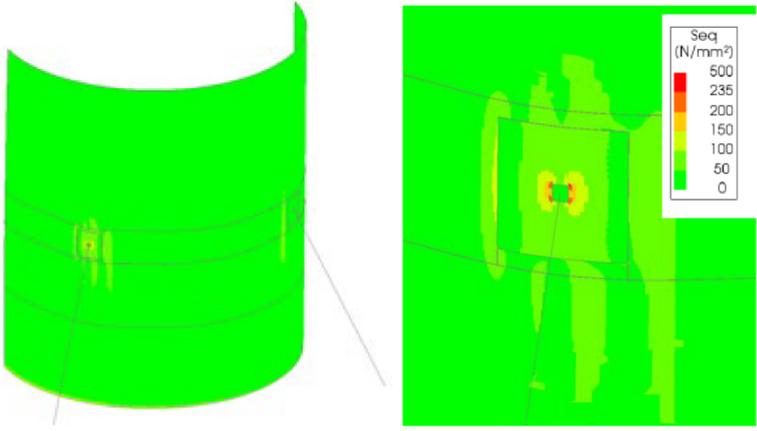
	対策工法 1 20kL 60%液位 0.96G 荷時	対策工法 1 500kL 100%液位 0.3G 荷時
<p>【確認ケース】</p> <p>対策工法 1</p> <p>地震慣性力</p> <p>荷時</p>	<p>60%液位、アンカーチェア付きではあるが、CFRPを施工した20kL級モデルの耐震性を確認した。960gal 荷時でもタンク本体の塑性化はみられない。</p>  <p>図 6.1 地震慣性力 0.96G 荷時のタンク本体の MISES 応力</p>	 <p>図 6.2.1 地震慣性力 0.3G 荷時のタンク本体の MISES 応力</p> <p>0.3G にて隅角部 (CFRP 内) が降伏する。CFRP は引張強度に達していない (0.325G にて CFRP が引張強度に達する)</p>  <p>図 6.2.2 地震慣性力 0.3G 荷時の CFRP 側板鉛直、スラブ半径方向応力</p>

表 3-25 対策工法 2 20kL, 500kL 級タンク 耐震性能に対する影響の確認

	対策工法 2 20kL 100%液位 0.3G 载荷時	対策工法 2 500kL 100%液位 0.3G 载荷時
<p>【確認ケース】</p> <p>対策工法 2</p> <p>地震慣性力</p> <p>载荷時</p>	 <p>0.3G ではタンク, 支持プレートともに降伏しない</p> <p>Seq (N/mm²)</p> <p>500 235 200 150 100 50 0</p> <p>図 7.1.1 地震慣性力 0.3G 载荷時のタンク本体の MISES 応力</p>  <p>0.6G で支持プレートが降伏するがタンク本体は降伏しない。CFRP も健全。</p> <p>Seq (N/mm²)</p> <p>500 235 200 150 100 50 0</p> <p>図 7.1.2 地震慣性力 0.6G 载荷時のプレート部の MISES 応力</p>	 <p>0.3G ではタンク本体は降伏しない。 0.3G からワイヤー支持プレートが降伏し始める</p> <p>Seq (N/mm²)</p> <p>500 235 200 150 100 50 0</p> <p>図 7.2.1 地震慣性力 0.3G 载荷時のタンク本体の MISES 応力</p>  <p>Seq (N/mm²)</p> <p>500 235 200 150 100 50 0</p> <p>図 7.2.1 地震慣性力 0.3G 载荷時のプレート部の MISES 応力</p>

3. 9 維持管理

ここでは施工後の補修方法とCFRP施工に関する懸案に対する調査結果を述べる。

3.9.1 補修方法

(1)CFRP施工後にタンク側板内面が減肉した場合の補修方法

鋼製タンクは経年により側板や底板が腐食する。CFRPを施工した箇所やその近傍にて腐食減肉した場合には下記の4つのステップで補修を行う（CFRPメーカー2社へヒアリング実施）。

- ①タンク内面よりサンダーにて傷んだ鋼材とCFRPをカットする。
- ②鋼材を突合せ溶接にて溶接する
- ③熱焼けしたCFRPをサンダーにて削り取る（母材に注意し実施）。
- ④元の施工CFRPと同層数（1層、2層）の炭素繊維シート（熱焼け部＋各方向200mm）を繊維方向に注意し重ね貼りする。重ね貼りの際には元の施工CFRPと同メーカーのエポキシを用いること

(2)CFRPの耐候性と樹脂減肉時の補修方法

CFRPは耐候性を有する（耐震補強部材として採用して20年程度の実績。30-50年と考えられる）が、経年によりCFRP表面の樹脂が痩せていく。それを防止するため、CFRP施工表面には通常のタンク表面と同様にペンキ等にて表面塗装を行い、CFRP層を保護する。

表面塗装が傷んだ場合には、表面の清掃・目粗し後、再塗装を実施する。

CFRPの表層のエポキシが傷み、繊維が見え始めた時にはエポキシ樹脂（元の施工CFRPと同メーカー）を塗り重ね、最後に表面塗装を実施する。（CFRPメーカー2社へヒアリング実施）。

3.9.2 CFRP 施工に関する懸案に対する調査結果

CFRP施工に関する懸案に対してメーカーヒアリングを実施した。結果を下記に示す。

(1)タンク側板とCFRP間で腐食しないか

タンク側板とCFRP間に水が入り込むと、タンクの鋼材を腐食させる恐れがある。それを防止するため、CFRP施工時のタンク側板部の入念な洗浄とケレンを実施し、CFRPとをエポキシ樹脂にてタンク鋼材に密着させる。また、定期的な塗装によりCFRP端部の劣化防止をはかる。

(2)タンク鋼材とCFRP間で電蝕しないか

鋼材とCFRPの炭素繊維は直接接触すると電蝕の恐れがある。CFRP施工時には下地に不陸調整・プライマーとしてエポキシパテを1層塗る。また、プライマーの上にエポキシを下塗りし、そこに炭素繊維シートを貼りつけることから、炭素繊維と鋼材の確実な絶縁を果たし、電蝕は生じない。本件については炭素繊維補修・補強工法技術研究会にて実験を実施し、電蝕しないことを確認している。

(3)炭素繊維の施工により危険物設備に落雷しないか

橋梁等に採用する際に同様の質疑あり。炭素繊維の露出部に落ちるわけではなく、高いところに落ちるので懸案はない。煙突補強にも用いており、今のところ被害は報告されていない。



図3-31 橋梁部，煙突施工の例
(メーカーホームページ<http://www.mp-infratec.co.jp>より)

(4) CFRPは燃えないか

CFRPを構成する炭素繊維とエポキシ樹脂は建築基準法でいう指定材料ではなく、不燃材・難燃材ではない。

消防法上、危険物設備に用いる材料は建築基準法に示される不燃材料を用いることとされている。建築基準法の関連法規である、『建築物の耐震改修の促進に関する法律』の関連指針の『あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針』では、『既存部分が耐火性能に関する技術的基準を満たす構造となっていれば、補強による増設部分は耐火関係規定に適合しているとみなしてよい』と記載があるため、今回の対策工法は消防法に抵触しないと解釈できる。トンネル内の補強にCFRPが採用(図3-32)されていることも同様事例と考えられる。将来、難燃性の高強度な繊維と樹脂による施工法の立案が課題である。

なお、近年、CFRP用のエポキシ樹脂において難燃性のものが開発され、難燃化CFRPが開発されている。



図3-32 トンネル内施工の例
(メーカーホームページ<https://www.tbm.toray/business/carbon/>より)

3. 10 現状の一般的な小型屋外貯蔵タンクの設置状況と施工可否の確認

現在設置されている小型屋外貯蔵タンクの設置状況について千葉県を例に調査した。

15基の内、2基が横置円筒貯槽であった（表3-26参照）。残りの13基は縦型円筒貯槽（図3-33参照）であり、その内、12基では対策工法1，対策工法2ともに施工ができると思われる。1基は基礎が八角形であり、対策工法1の施工に際しては基礎の成形（肉盛りもしくは削る）もしくは八角形の形に合わせCFRPの施工をする必要がある。

いずれのタンクも対策工法1，対策工法2のいずれかの施工は可能であることが確認できた。

表3-26 小型屋外貯蔵タンクの設置状況の例

	タンク形式	容量	内容物	アンカーボルト 有無	対策工法1 施工可否	対策工法2 施工可否
漁港1	縦型円筒	350kL	灯油	無	可(丸スラブ)	可
	縦型円筒	350kL	重油	無	可(丸スラブ)	可
漁港2	縦型円筒	60kL, 2基	重油	4本(アンカーチェア)	△ (八角形スラブ)	可
漁港3	縦型円筒	97kL	軽油	無	可(丸スラブ)	可
	横置円筒	30kL	灯油	8本	不可	可
漁港4	縦型円筒	100kL, 2基	軽油	4本(アンカーチェア)	可(丸スラブ)	可
漁港5	横置円筒	100kL, 2基	軽油	6本	不可	可
漁港6	縦型円筒	10kL	ガソリン	4本(アンカーチェア)	可(丸スラブ)	可
	縦型円筒	20kL	軽油	4本(アンカーチェア)	可(丸スラブ)	可
	縦型円筒	5kL	灯油	4本(アンカーチェア)	可(丸スラブ)	可
漁港7	縦型円筒	9.5kL	ガソリン	4本	可(丸スラブ)	可
	縦型円筒	20kL	重油	4本	可(丸スラブ)	可



図3-33 小型屋外貯蔵タンクの例

3. 11 まとめ

今回の検討会により、対策工法1、2ともに内容液位の増減に関わらず、津波漂流対策効果を発揮することがわかった。また、多くの懸案に対して確認を実施することができ、対策工法1、2の有効性を確認することができた。

第4章 今後の検討課題

第4章 今後の検討課題

4.1 水害対策

(1) 浮揚・移動の防止対策の提案

今回検討の対策工法1，対策工法2は水害対策にも適用可能と考える。

(3)項の検討により津波のように流体力が大きくないことが確認された場合、浮揚・移動防止対策として、より安価で一般性の高いGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）の対策工法1への適用の有効性を確認し、また、問題点を整理する必要がある。

(2) 既設のアンカーボルトの有効性の検討及び問題点の整理

水害時に大きな流体力を生じない場合には、浮力に対して既往のアンカーボルト工法の有効性を確認し、また、問題点を整理する。

(3) 浮揚・移動の防止対策効果の有効性検証に必要な検討事項の整理

各種のハザードマップ等を整理し、水害時の浮揚・移動の防止対策効果の有効性検証に必要な検討事項について整理する。また、水害時の流れの状況について実事例を基に調査，確認する。

4.2 津波対策 今後の課題

(1) 対策工法1，2の工事の最小化とコスト低減対策

今回の検討において、対策工法1，対策工法2のケーススタディを実施し、その有効性を確認することができた。しかし、対策工法の最小化やコスト低減の検討余地が残っている。特に対策工法1におけるタンク高さ方向の施工範囲の低減は材料コストに大きく影響するため、検討が必要と考える。

(2) タンク周辺・付属品の津波対策について

今回の検討により、対策工法1，対策工法2により、タンク本体に対する津波対策工法を示すことができた。今後、タンクノズル部とタンク元弁（第一弁）に対する津波対策が課題となる。

(3) 他の対策工法について

対策工法1，対策工法2の他に、より安価な、または、より効果的な対策工法の導出が必要と考える。対策工法1，2に対して他の素材の適用可能性や、他の工法について検討を行う。

(4) 施工面での課題の抽出と解決

対策工法1，対策工法2について施工面での課題を抽出し、解決を検討する。

4.3 漂流物対策の提案

今回検討の対策工法1，対策工法2は屋外貯蔵タンク本体の津波に対する流出対策であり、今後、漂流物によるタンク本体やタンクノズル部等付属品の損傷を防ぐことも重要である。そのための情報収集と整理（耐衝撃性塗料：例えばポリウレア樹脂塗料等）を実施する。