

# 気仙沼における津波対応型燃料タンクの建設について

日本工営株式会社 防衛基盤整備事業部  
福岡支店 技術2部 副理事 山田 善政

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により、気仙沼港に設置されていた鋼製地上式屋外タンク貯蔵所が津波により被災した。

気仙沼市では、市の主要産業である水産業再建のため、漁船運用に不可欠となる燃料受払棧橋、燃料貯蔵タンク等燃料施設復旧事業が計画された。（写真-1 参照）

燃料貯蔵タンクの型式についてはこれまでの経験等を踏まえて、地震に強いとされるプレストレストコンクリート（以下「PC」という。）が、津波対応としてタンク本体側板の周囲に採用された。

なお、タンク設置許可申請は、当該燃料施設を運用する民間事業者（㈱気仙沼商会）により気仙沼市・本吉消防本部へ申請されたが、津波対策壁（底板共）及び対策壁設置に伴う荷重増等直接的な関連がある基礎・地盤工事は、気仙沼市で実施された。



写真-1 燃料施設全体配置図

## 2. タンクの構造形式

PCは、コンクリートに発生する軸引張応力に対応するためのPC鋼材を配置したもので、鉄筋コンクリートと比較して部材厚低減による経済性、ひび割れ応力制御による耐久性及び繰り返し荷重等を受ける部材について高い靱性を有する等の特質がある。

また、PCタンクについては、昭和53年6月12日に発生した宮城県沖地震による被害を踏まえ、厚生労働省が（公社）日本水道協会に対して依頼・策定された「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」の制定以降全国で建設されたタンク型式で、今回の被災において仙台港の船舶用給水タンクにおいて、タンク本体に大きな損傷がなかったことから、耐震性及び津波対応性が評価されたものである。

一方、コンクリート部材は、セメント量と水セメント比を定めれば水密性を確保できるが、危険物（油）の浸透を防止することは困難である。従って、消防法ではタンク本体構造は鋼製によるものと規定している。

以上より当該タンクの構造型式については、鋼製屋外貯蔵タンク（消防法令で規定されている準特定屋外貯蔵タンク）の周囲に津波対応のためのPCを施した構造（以下「津波対策壁」という。）とした。

タンク型式については、図-1を参照。

なお、津波対策壁の設置位置については、気仙沼・本吉消防本部との協議により、タンク本体側板に接して設置することとした。

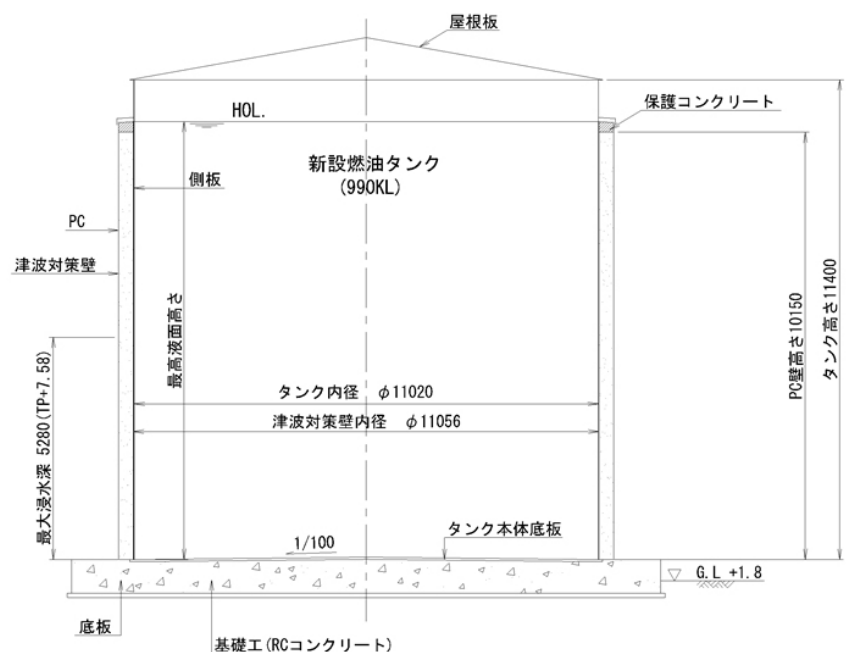


図-1 タンク型式概要図

### 3. タンク設置許可申請図書の内容等

#### (1) タンク設置許可申請区分等

タンク設置許可申請は、次項タンク諸元に示す実容量990kℓ-準特定屋外タンク貯蔵所として、気仙沼市・本吉消防本部へ申請された。

タンク本体及び基礎・地盤については、消防法で規定されている常時、地震時における検討項目を本設置許可申請において検討している。

また、津波対策壁（底板共）の重量及び地震時慣性力の影響が付加されることから、津波対策壁を設置した状態での検討結果を添付することとした。

なお、本タンクに採用された津波対策壁に関する技術基準は消防法に規定されていないことから、津波衝撃及び漂流物(船舶)衝突荷重等による安全性検討は別途行う必要がある。このため、津波対策壁、底板に係る応力度検討等は危険物保安技術協会に委託した技術援助により安全性を確認している。

#### (2) 申請されたタンク諸元、設置条件等

##### ① タンク諸元

申請されたタンク諸元は、表-1 に示すとおり。

##### ② タンク配置

###### ・平面配置について

敷地境界及び保有空地等に係る離隔距離等タンク配置については、屋外タンク貯蔵所に係る政令第11条に基づくものとし、防油堤及び構内道路の配置については、規則第22条に基づくものとしている。

###### ・タンク設置高

タンク設置高(基礎上面高さ)については、ボーリング調査における孔内水位観測結果に基づく地下水位(HWL.=TP.+0.15m)と、規則第20条の3の2第2項第5号より規定された地下水位からの離隔距離2.0m以上に余裕15cm(告示第4条の22の5-許容沈下量相当)を見込むものとした。

タンク設置高=TP.+0.15m+2.0m+0.15m=TP.+2.30m

##### ③ タンク基礎・地盤について

###### ・地盤

当該タンクの地盤は、深度3m程度から沖積シルト質砂層が厚く堆積しており、告示第4条の22の6及び告示第74条で規定される液状化に対する抵抗率FL値が1未満と算出される深度が多い。

また、地表面近くの埋土層は、告示第4条の22の4で規定された支持力に対する安全率3.0を満足することができないことが確認された。

以上より、タンク地盤については、地盤改良工事が必要とされることが認められた。

このため、液状化対策及び支持力対策として、地表面から3.4m(許容支持力を満足する深さ)までの範囲について平成11年消防危第27号通知別添1第2深層混合処理工法を用いた準特定屋外タンク貯蔵所の地盤の技術指針に準じた「中層混合処理工法」を採用し、地盤改良工事を実施することとした。

###### ・改良体の安全性

改良体の安全性確認については、津波対策壁を設置した状態で改良体上面に伝達される地震時及び津波時の水平力、モーメント及び地盤反力等に対する安全性の確認を実施するものとした。

表-1 タンク諸元、設置条件等一覧表

項目	諸元・設置条件等
タンク形式	固定屋根式鋼製地上式屋外タンク貯蔵所
危険物の種類	第四類、第三石油類、重油
設計引火点	約 80°C
指定数量	2,000ℓ
実容量	990kℓ-指定数量の倍数 495 倍
タンク内径	D = 11.02 m
タンク高さ	H = 11.40 m
液面高さ	h = 10.40 m
地震の影響	設計水平震度 k h 1=0.4436 地域別 $\nu 1=1.0$ 、地盤別 $\nu 2=2.0$ 、 応答倍率 $\nu 3=1.4787$
基礎地盤	ハ地盤 液状化、支持力対策 深層混合処理-地表面から 3.40m
基礎工	津波対策壁底板を兼ねた コンクリートスラブ基礎

・基礎

基礎は、津波対策壁の底板を兼ねることとなることから、形状及びタンク荷重支持方式が類似している告示第4条の22の7に規定された局所的な沈下を防止できる鉄筋コンクリートスラブを有する基礎構造(以下「スラブ基礎」という。)に準ずるものとした。

④ タンク本体について

タンク本体は、規則第20条の4の2に規定された準特定屋外貯蔵タンクの構造に係る基準を満足するものとし、一般的な地上式縦置き円筒型タンクと同様に、常時・地震時の検討を実施するものとした。なお、津波荷重等はタンク本体ではなく、すべて津波対策壁で受け持つ構造としている。

また、津波対策壁設置により、製缶材腐食補修等の対応が困難となることが考えられることから、防蝕対策として側板については腐食代1.5mmを見込むものとし、底板についてはエポキシ樹脂による内面塗装工を実施することとした。

4. 津波対策壁の検討

(1) 検討内容

津波対策壁の検討は、次のケースについて実施している。

ア 地震時、津波衝撃作用時の安定性

イ 津波衝撃作用時の浮き上がりに対する検討

ウ 常時、地震時、津波衝撃、漂流物(漁船)衝突荷重作用時PC壁の応力検討

ただし、地震時、津波衝撃、漂流物(漁船)衝突荷重作用時は、個別に発生するものとした。

なお、地震時については、既存タンクにおいて類似検討事例があることから、本稿では紹介を省略することとした。

(2) 津波高及び津波流速

タンクに対する想定津波高(タンク前面)及び津波流速については、気仙沼市が実施した津波シミュレーション解析(新設防潮堤考慮)結果より、下記の値を採用することとした。

$$\text{想定津波高} = TP. + 7.58\text{m}$$

$$\text{津波流速} = 5.64\text{m/sec} \rightarrow 6.0\text{ m/sec}$$

(3) 津波衝撃の影響

津波衝撃による水平力及び転倒モーメントについては、平成21年3月総務省消防庁「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書」(以下「報告書」という。)の一部を参考として設計に用いた。

① タンク本体に作用する津波波圧分布及び津波水位について

タンク本体に作用する津波波圧分布は、報告書では、水理模型実験等により図-2に示すとおりとしている。

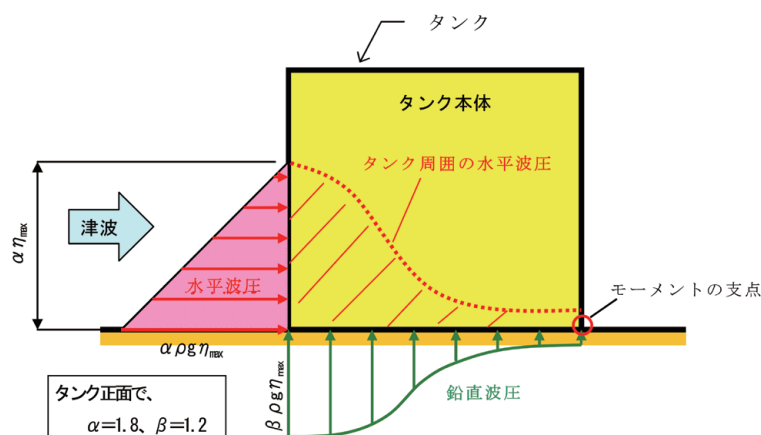


図-2 タンク本体に作用する津波波圧分布

報告書では、タンク前面における津波水位について、防油堤を越流した後の津波の流速効果を考慮することが適当であるとされ、フルード数に応じて津波波力等を算出することとされている。当該タンクについては、新設された防潮堤通過後の津波が適用されるが、想定水位・流速（津波シミュレーション解析値）から求められるフルード数が0.9未滿となることから、報告書に基づき $\alpha=1.0$ を採用している。

なお、設計津波水位については、気仙沼市より提示された、津波シミュレーション解析におけるタンク位置での水位 TP.+7.58m（津波対策壁浸水深 5.28m）を採用することとした。

タンクに作用する水平波力が最大となる時点でのタンク周囲の津波水位（津波到来方向となす角度 $\theta$ 方向の側板での $h_x^{max}(\theta)$ ）は、水理模型実験より次のフーリエ級数で近似できるとしている。

$$h_x^{max}(\theta) = n_d^{max} \sum_{m=0}^3 P_m \cos m\theta = 1.0 n_{max} \sum_{m=0}^3 P_m \cos m\theta$$

$P_0=0.680$ 、 $P_1=0.340$ 、 $P_2=0.015$ 、 $P_3=-0.035$

$n_{max}$  と  $h_x^{max}(\theta)$  の比率は、図-3 に示すとおりとなる。

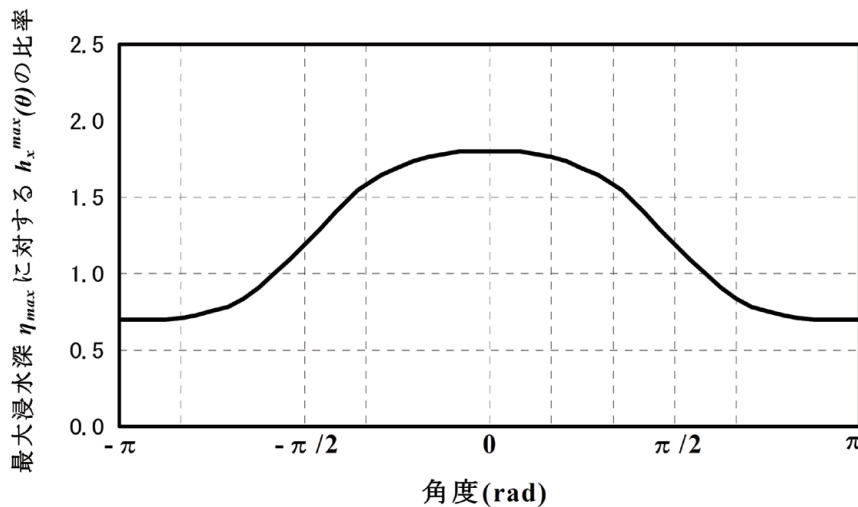


図-3 タンク円周方向の最大浸水深 $\eta_{max}$ に対する $h_x^{max}(\theta)$ の比率

② タンク（本件では「津波対策壁」と考える。）に作用する津波の水平波力及び水平波力（転倒）モーメント

・タンクに作用する津波の水平波力

水理模型実験からは、模型タンクに作用する水平波力が最大となる時点においてタンクの全面で計測された水圧の高さ方向分布は、その時点でのタンク前面における水位からの静水圧分布で近似可能であることがわかった。これに基づいて、津波を受けるタンクに作用する水平波力の最大値 $F_{tH}$ は、次式で評価できるものとされた。

$$F_{tH} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{max}(\theta)]^2 R \cos \theta d\theta \quad \text{ここで、} R: \text{タンクの半径}$$

当該タンクでは、津波浸水深 5.28m、津波対策壁の半径 5.528m よりタンクに作用する水平波力は、1,216.3kNと算定された。

・タンクに作用する水平波力（転倒）モーメント

津波を受けるタンクに作用する水平波力モーメントは、モーメントの支点であるタンク背後基部から水平波力の作用線までの高さ方向の距離 $h_x(\theta)/3$ を掛けたもので評価することができる。この考え方に基づき、水平波力 $F_{tH}$ がタンクに作用する場合の水平モーメント $M_{tH}$ を算定する式として次式が提案された。

$$M_{tH} = \frac{1}{6} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{max}(\theta)]^3 R \cos \theta d\theta$$

前項水平波力算定結果により当該タンクに作用する水平波力（転倒）モーメントは、津波浸水深基部（図-5 $\theta=$

180° 津波対策壁の津波浸水深 5.28m) で 2,327.3kNm、厚さ 0.8m 基礎下面で 3,299.8kNm と算定された。

(4) 漂流物（漁船）衝突荷重

漂流物（漁船）衝突荷重 P(kN) については、道路橋示方書・同解説I共通編（(社)日本道路協会）に示された衝突荷重算定式と、気仙沼湾内漁船の平均的なトン数 19 トン及び津波シミュレーションから求められた津波流速（表面）V=6.0 m/sec より下式で算定した。

$$P=0.1 \cdot W \cdot V$$

ここで、W：19トンクラス漁船の満載時重量で、32 トン × 9.8 ≒ 320kN とした。

なお、荷重の作用位置は、津波高の位置とした。

(5) 浮力に対する検討

浮力（浮き上がり）に対する検討は、タンク空液時タンク周りの水深が想定津波高 (TP+7.58m) となった場合について、タンク本体工（製缶重量）のみで抵抗した場合と、タンク本体工と津波対策壁（底板共）が一体となり抵抗した場合の2ケースについて実施した。

タンク本体工のみでは、浮き上がりが生じることが確認されたが、津波対策壁（底板共）を考慮した場合は、津波浸水深 5.28m に対し、津波対策壁高が 10.40m と十分に余裕があることから、タンク本体が浮き上がるような浸水はないと考えられる。

さらに、津波対策壁天端には雨水浸入防止策（水切、シーリング）が講じられていることから、浮力に対しては製缶工と津波対策壁（底板共）が一体として抵抗する検討を行い浮き上がらない事を確認している。

(6) 検討荷重の組合せとタンク構造寸法について

前項までの設計荷重を用いて、表-2に示す荷重の組み合わせにおける、応力度検討、安定計算（滑動、転倒）、支持力（地盤改良工）及び浮力に対する検討結果に基づき、図-4に示すタンク構造寸法を採用することとした。

表-2 タンク基礎及び安定検討に用いた荷重の組合せ

項 目	常 時		地震時		津波時		漁船衝突時		
	空液時	満液時	空液時	満液時	空液時	満液時	空液時	満液時	
自 重	製缶重量	○	○	○	○	○	○	○	○
	内容液重量	—	○	—	○	—	○	—	○
	PC壁重量	○	○	○	○	○	○	○	○
	基礎重量	○	○	○	○	○	○	○	○
	上載荷重	○	○	○	○	○	○	○	○
地震の影響	慣性力	—	—	○	○	—	—	—	—
津波の影響	津波衝撃圧	—	—	—	—	○	○	—	—
	浮力	—	—	—	—	○	○	—	—
	衝突荷重	—	—	—	—	—	—	○	○

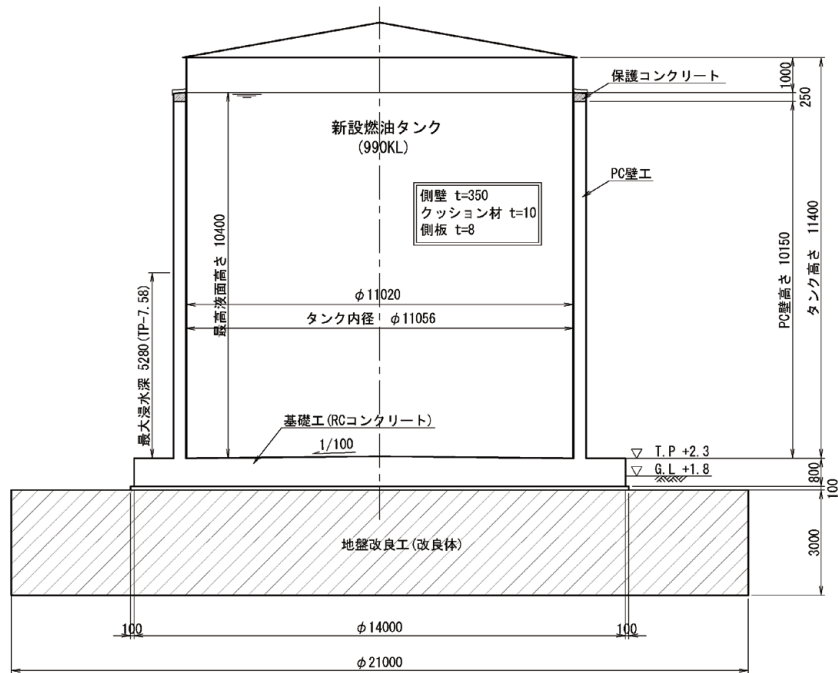


図-4 津波対策壁を設置したタンク構造寸法

(7) 断面力の計算

断面力の計算は、表-3 に示す荷重の組合せについて、3次元薄肉シェル要素を用いた有限要素法により求めた。(使用ソフト: Femap with NX Nastran)

なお、本モデルは対称性が見られることより、図-5 津波による衝撃波荷重分布参考図に示すように、実構造の半解析モデル (1/2 モデル) としてモデル化した。

表-3 断面力の計算に用いた荷重の組合せ

項目	自重	液圧	プレストレス		躯体慣性力	動液圧	津波	船衝突
			直後	設計時				
プレストレス導入直後	○	—	○	—	—	—	—	—
常時空液時	○	—	—	○	—	—	—	—
常時満液時	○	○	—	○	—	—	—	—
地震時空液時	○	—	—	○	○	—	—	—
地震時満液時	○	○	—	○	○	○	—	—
津波作用空液時	○	—	—	○	—	—	○	—
津波作用満液時	○	○	—	○	—	—	○	—
船衝突空液時	○	—	—	○	—	—	○	○
船衝突満液時	○	○	—	○	—	—	○	○

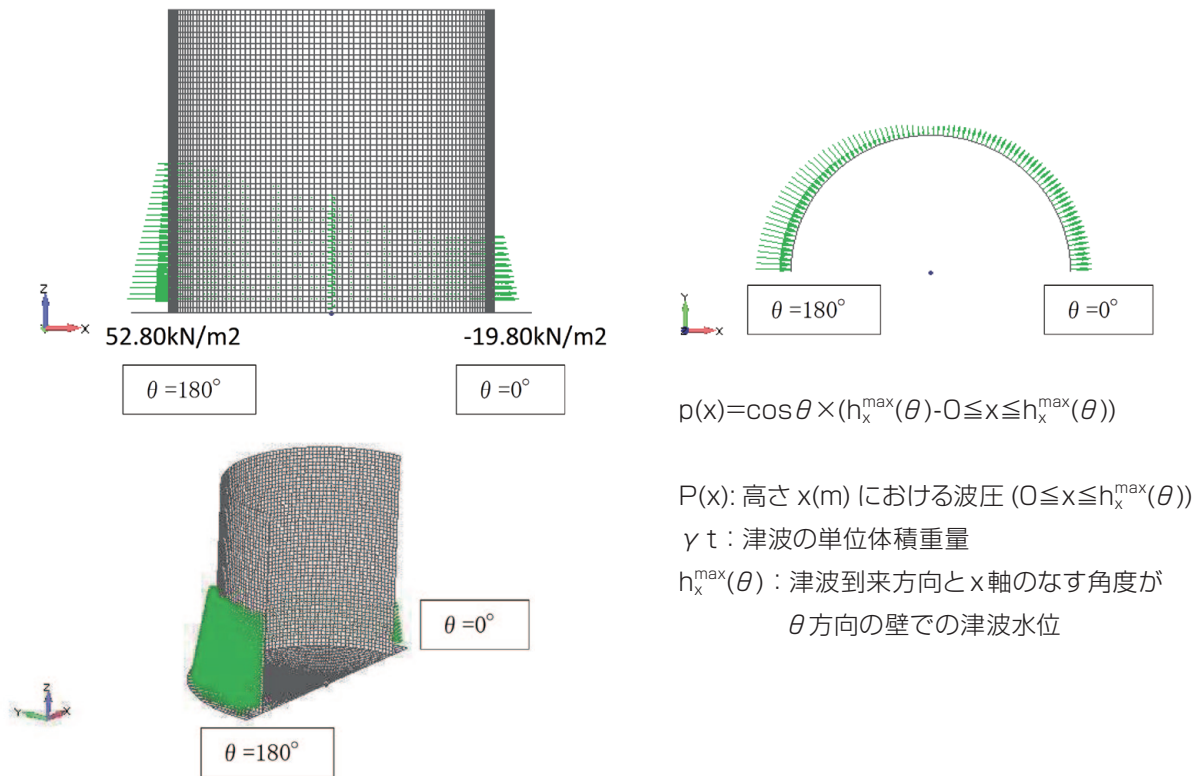


図-5 津波による衝撃波荷重分布参考図

(8) 応力検討結果

応力検討は、表-4に示す設計条件により実施した。

表-4 種別、設計基準強度、許容応力度等一覧表

検討対象	許容応力度等		備考
プレストレストコンクリート	設計基準強度	36.0N/mm <sup>2</sup>	
	許容曲げ圧縮応力度	13.8N/mm <sup>2</sup>	
	許容軸圧縮応力度	10.0N/mm <sup>2</sup>	
	許容曲げ引張応力度	0.0N/mm <sup>2</sup>	満液時
鉄筋コンクリート	設計基準強度	30.0N/mm <sup>2</sup>	
	許容曲げ圧縮応力度	11.0N/mm <sup>2</sup>	
	許容軸圧縮応力度	8.5N/mm <sup>2</sup>	
横締PC鋼より線	種別	1S21.8	
	許容引張力	344kN/本	設計荷重時
横締PC鋼棒	種別	1B32B1	
	許容引張力	521kN/本	設計荷重時
鉄筋	種別	SD345	
	許容引張力	196N/mm <sup>2</sup>	

検討結果より求められた PC 鋼材の配置及び配筋は、下記及び別添図 1 「一般図」、別添図 2 「側壁 PC 鋼材配置図」及び別添図 3 「底板配筋図」に示すとおりである。

- ・ PC 壁 円周方向 PC 鋼より線 - 150 mm ~ 400 mm ピッチ × 30 段  
鉛直方向 PC 鋼 - 平均 519 mm ピッチ × 69 本
- ・ 底板 鉄筋上側、下側共 - D19 200 mm ピッチ

注) 応力計算手法は、水道用プレストレストコンクリートタンクと同様であるので、本稿では紹介を省略することとした。

## 5. 危険物保安技術協会の技術援助

屋外タンク貯蔵所に津波対策壁等の津波対策工を併設した構造は、消防法令等に技術基準が示されていない。

そこで、気仙沼市・本吉消防本部の指導に基づき、津波対策壁設置による屋外タンク貯蔵所の安全性確保状況について、危険物保安技術協会の技術援助を受けることとした。

### (1) 技術援助検討項目

委託した技術援助の検討項目は次のとおりである。

- ① 津波荷重等に対する津波対策壁（PC 壁）及び基礎構造体の安全性
  - ② 津波荷重に対する地盤の安全性
- (2) 想定される津波・漂流物（船舶）の条件
- ① 津波高さ（標高）：気仙沼市検討結果による
  - ② 漂流物（船舶）の荷重：東北運輸局聴取結果による
- (3) 検討内容
- ① 地盤関係
    - ア 地盤改良における改良体の応力度検討（津波時）
    - イ 地盤改良における改良体底面の支持力（津波時）
    - ウ 地盤改良における改良体の安定性（津波時）
  - ② 津波対策壁
 

検討内容は表-5に示すとおり。

表-5 津波対策壁の検討箇所等

津波対策壁 検討箇所	検討応力	プレストレスト導入直後	常時	地震時	津波時	船衝突時
側板軸方向	圧縮応力	○	○※	○※	○※	
	引張応力	○	○※	○※	○※	
側板円周方向	圧縮応力	○	○※	○※	○※	
	引張応力	○	○※	○※	○※	
側板軸方向	曲げ耐力					○※
側板円周方向	引張耐力					○※

※：空液時、満液時の両方について検討

- ③ 底板（スラブ基礎）
  - ア スラブ応力度 津波時（空液時、満液時）
  - イ スラブ応力度 船衝突時（空液時、満液時）
- ④ 津波対策壁及び底板（スラブ基礎）
  - ア 転倒に対する偏心量 地震時（空液時、満液時）
  - イ 転倒に対する偏心量 津波時（空液時、満液時）
  - ウ 滑動に対する安全率 地震時（空液時、満液時）
  - エ 滑動に対する安全率 津波時（空液時、満液時）
- ⑤ 浮力に対する検討（津波時）



## 6. 施工要領

施工要領は、以下のとおりである。

なお、赤字は気仙沼市所掌工事、黒字は設置許可申請者 - (株)気仙沼商会所掌工事を示している。

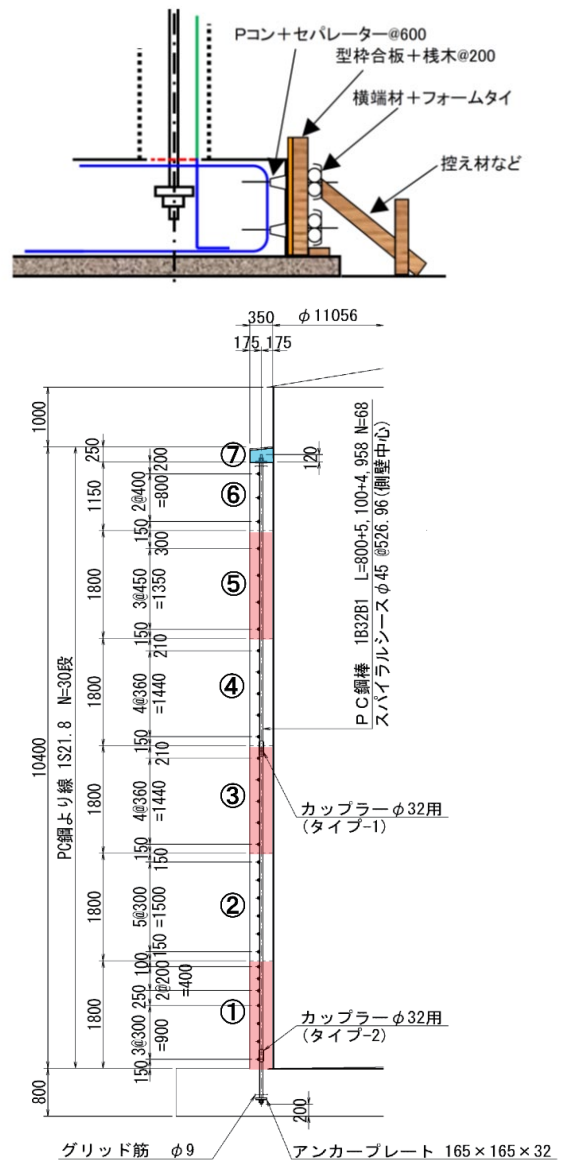
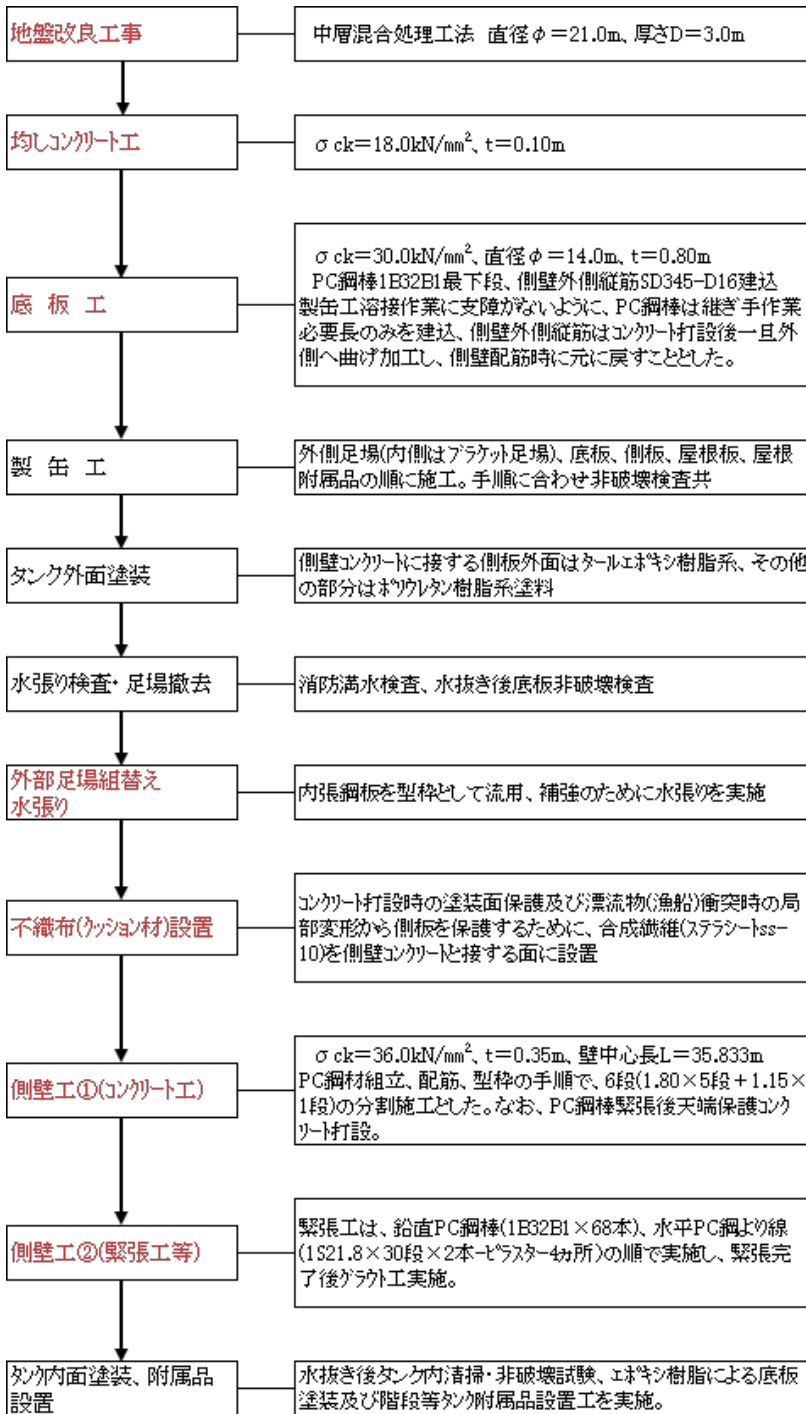


図-6 PC 鋼材配置図



写真-2 PC 鋼材配置

## 7. 工事完成後の状況

完成後の準特定屋外タンク貯蔵所 5 基の設置状況を写真-3及び写真-4（撮影方向は図-7参照）に示す。

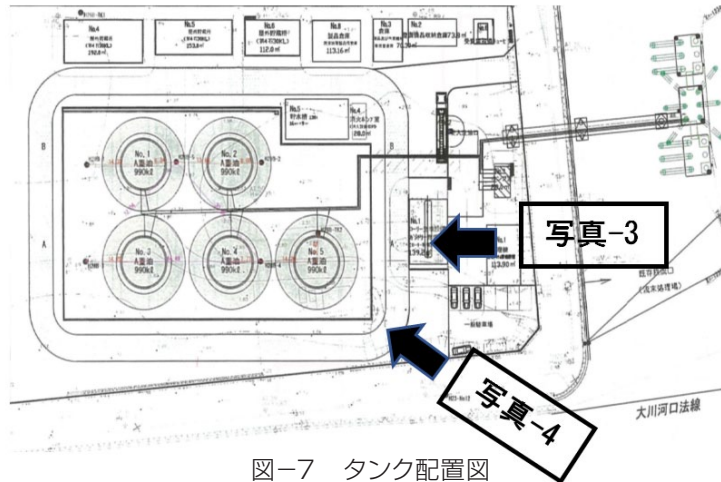


図-7 タンク配置図



写真-3

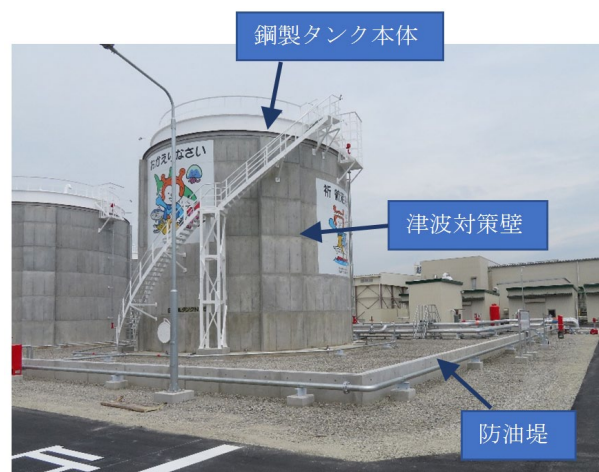


写真-4

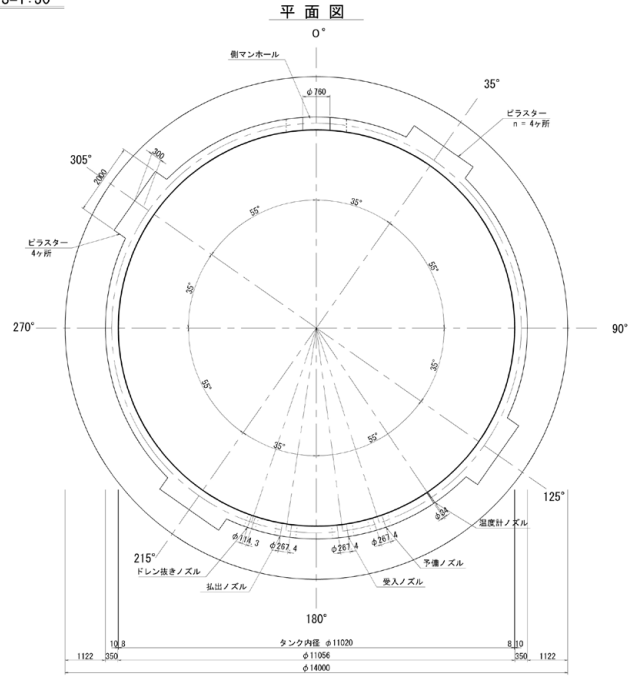
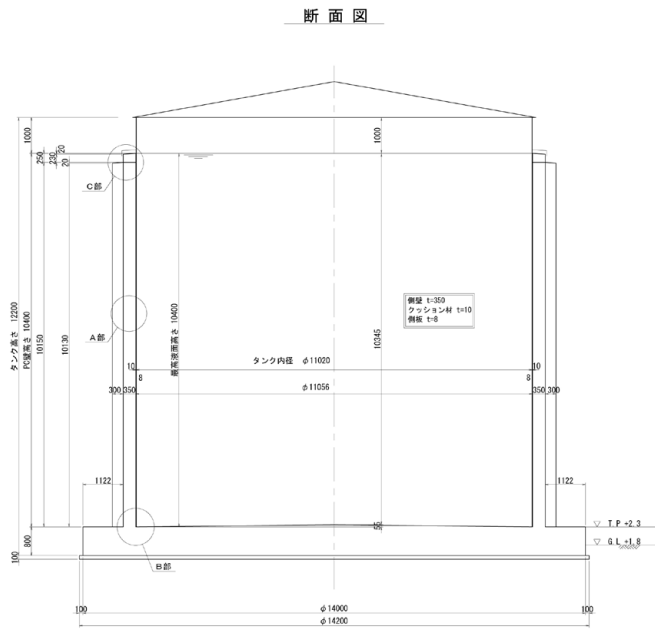
## 8. おわりに

本稿では気仙沼市で建設された津波等に対応できる準特定屋外タンク貯蔵所の設計内容の概要について述べた。本タンクは 2019 年 6 月 14 日に完成しており、現在は漁業用船舶の燃料タンクとして供用を開始している。

国内でもこのような型式で建設された屋外タンク貯蔵所は初めてと考えられるが、今後、発生が危惧されている大規模地震によって発生する可能性がある津波等を想定した設計に、参考としていただければ幸いである。

別添図 1

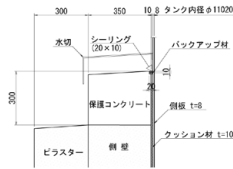
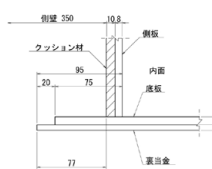
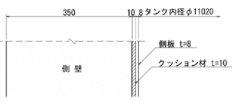
一般図 S=1:50



A 部詳細図 S=1:5

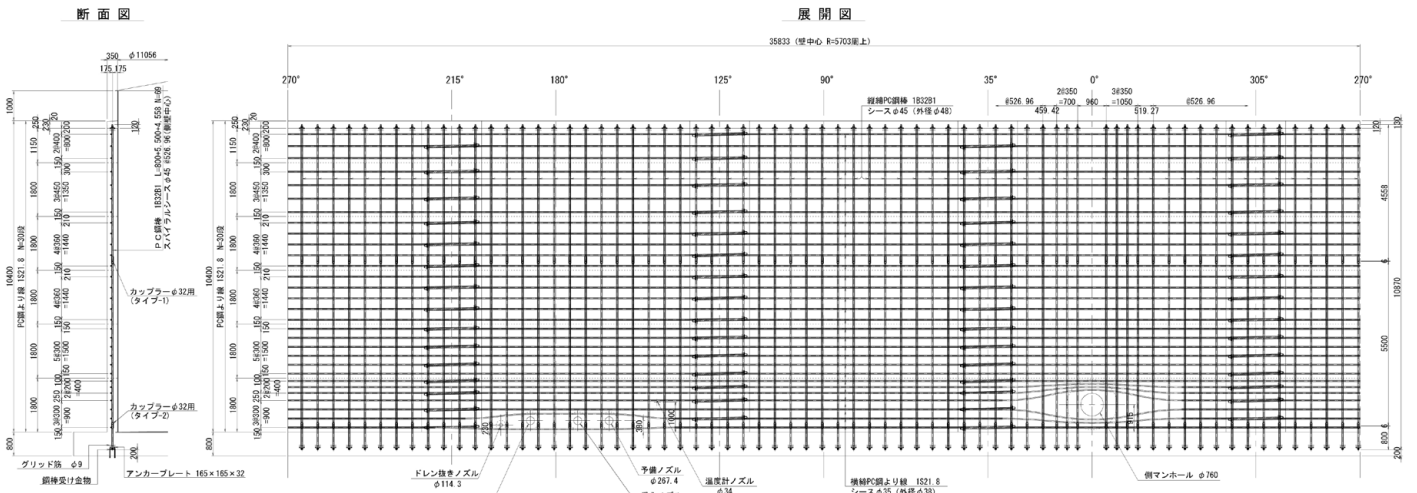
B 部詳細図 S=1:2  
アニュラ板相互裏当金

C 部詳細図 S=1:10



別添図 2

PC鋼材配置図 S=1:60



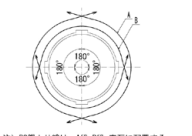
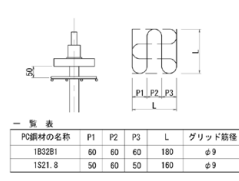
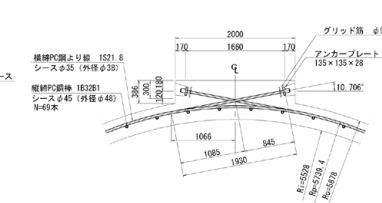
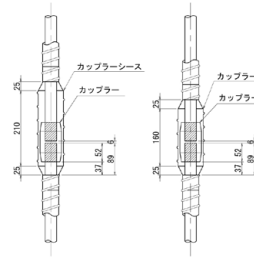
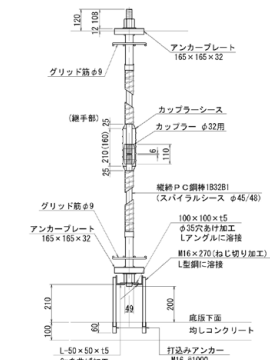
縦向き部詳細図 S=1:10

タイプ1 タイプ2

PC鋼より線定着部詳細図 S=1:30 (N=4ヶ所)

グリッド筋詳細図 No Scale

PCストランドの平面配置 No Scale



※ PC鋼材がマンホール・配管等に干渉する場合は、現場にてPC鋼材をずらすものとする。

※ PC鋼より線は、A92 B92 交互に配置する。

PC鋼材の名称	P1	P2	P3	L	グリッド筋径
1R2281	60	60	60	180	φ9
1S21.8	50	60	50	160	φ9

別添図 3

底板配筋図(1) S=1:30

