

報告 三陸南地震によって被災したプレストレストコンクリート製高架水槽の耐震設計と被災復旧について

堅田 茂昌^{*1}・小野 恵三^{*2}・天沼 照貴^{*3}・吉田 純一^{*4}

要旨：2003 年 5 月 26 日に発生した三陸南地震によって、震源から 16km の位置にあったプレストレストコンクリート製高架水槽（以下、高架タンク）の鉄筋コンクリート製脚壁（以下 RC 脚壁）にひび割れが発生した。被災調査が実施され、調査結果、分析および解析を踏まえた検討が行われ、補修処理および耐震性向上を目的とした補強検討が実施された。ここに、本構造物の被災調査、分析および補修、補強に関する報告をするものである。

キーワード：地震被害、ひび割れ補修、耐震補強、高架タンク

1. はじめに

2003 年 5 月 26 日に発生したマグニチュード 7.0 を記録した三陸南地震によって気仙沼市大島中山地区の高架タンクが被災した。この地震により、本高架タンクの RC 脚壁下端付近に水平方向と斜め方向のひび割れが発生した。しかし、PC 構造の水槽本体には損傷が確認されず、貯水および配水機能は保持され、高架タンクとしての供用性はたもたれた。RC 脚壁のひび割れおよび高架タンク全体の調査を行い、強度および耐久性の検討を実施し、RC 脚壁の補修および補強計画を提案した。補強においては、今後発生する可能性のある大きな地震動に対して、安全性を確保できる提案とした。これら補修、補強提案に基づき、本構造物の震災復旧が実施された。

2. 構造物の概要

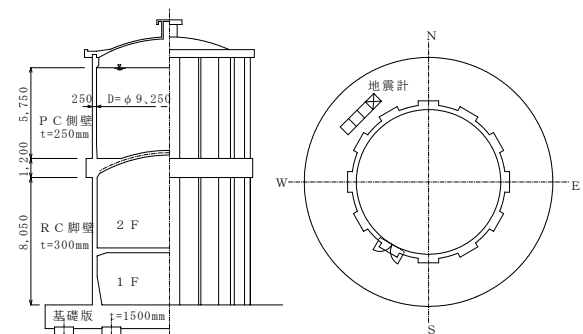
2.1 構造概要

本高架タンクは、1998 年に施工された内径 9.26m、全水深 5.75m、容量 380m³ の円筒形高架タンクである（図－1 参照）。外観は、24 箇所の凹凸をつけ、多くの柱で支えられた構造物に見える。構造は、PC 造のタンクを高さ 9.25m の RC 造の脚壁で支持し、厚さ 1.5m の基礎版と場所打

ち杭（Φ1.2m、長さ L=6～8m）16 本で支持されている。尚、上部水槽の底版および屋根は、RC 製のドーム構造である。

2.2 耐震設計

上水道施設の耐震設計は、1995 年に発生した兵庫県南部地震後に改訂された「水道施設耐震工法指針・同解説」²⁾に基づいている。この耐震設計におけるレベル 2 地震動は、1995 年兵庫県南部地震のように、供用期間中に発生する確率は低いが、大きな強度を持つ地震動として位置付け、地表面の加速度 400～800 (gal)、構造物重心位置の応答加速度 700～1400 (gal) の大きさである。耐震設計は、表-1 に示す震度法による照査を行っている。



図－1 高架タンクの構造諸元と平面位置図

*1 (株)安部工業所 技術開発部 技術課長 (正会員)

*2 (株)安部工業所 東北支店 工務部長

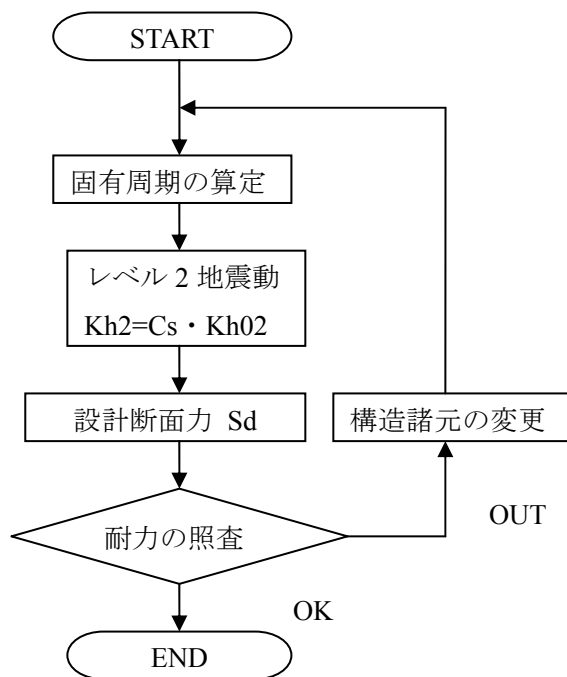
*3 (株)安部工業所 東北支店 設計課

*4 気仙沼市 ガス水道部

表－１ 設計水平震度と照査

	レベル 1	レベル 2
設計 水平 震度	$Kh1 = C_z \cdot Kh01$ Cz：地域係数	$Kh2 = C_s \cdot Kh02$ Cs:構造物 特性係数
耐震 設計法	震度法 (固有周期を考慮)	震度法 (固有周期と構造物特 性係数を考慮)
照査	許容応力度	終局耐力

レベル 2 設計水平震度の大きさを決定する構造物特性係数 C_s は、構造物の応答による減衰とじん性による塑性変形能力において定める係数で、RC 構造の地上水槽の場合 $C_s=0.45$ が用いられている。



図－２ レベル 2 地震動の耐震設計フロー

一般に高架タンクの耐震照査は、「水道施設耐震工法指針・同解説」²⁾に示される塔状構造物の耐震計算例を参考に、図－２に示す震度法による設計でレベル 2 地震動に対する耐震照査を行い、設計断面力 S_d と断面耐力 R_d の確認³⁾を行っている。

本高架タンクの場合、地盤種別はⅡ種地盤と判定され、レベル 2 地震動は $Kh02=0.45 \times 0.80 = 0.36$ として、上述の耐力照査が実施されていた。

3. 被災状況

3.1 震源との位置関係

三陸南地震により被災した高架タンクは、宮城県気仙沼市大島中山地区にあり、震源より直線で約 16km の距離にある。

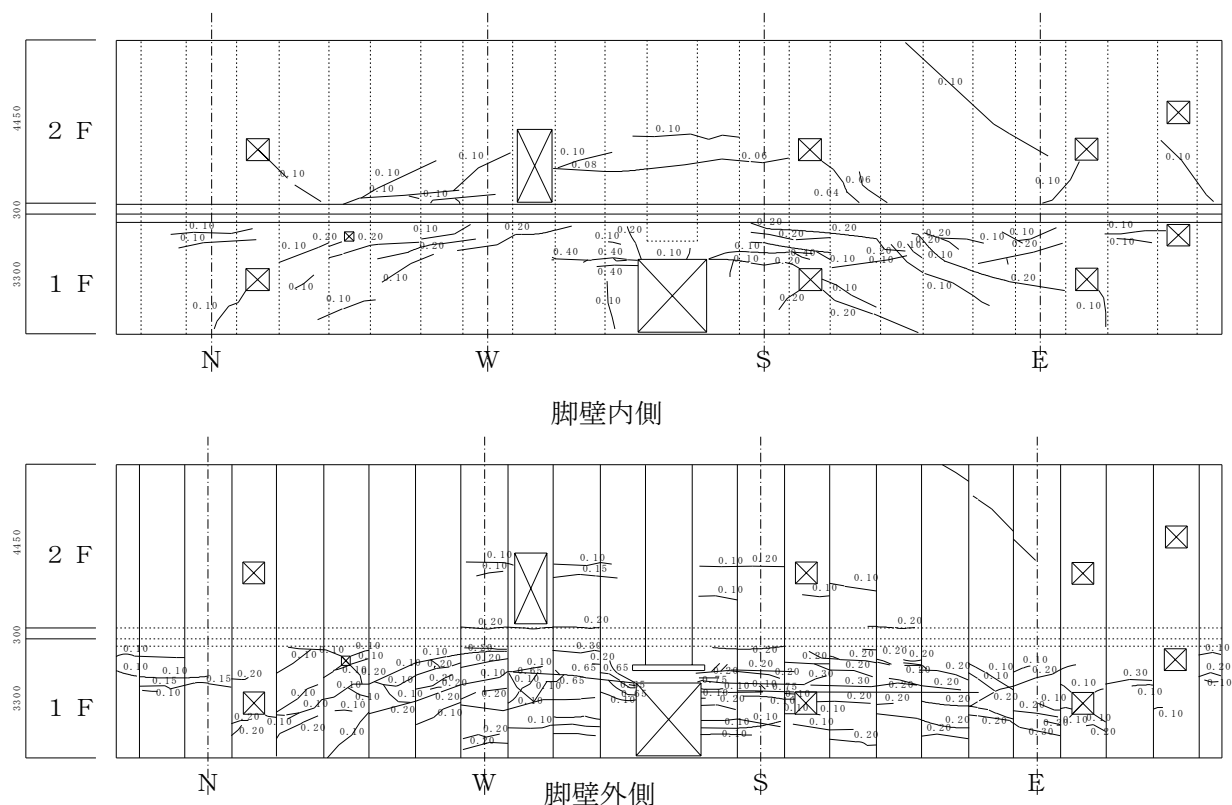
3.2 外観調査

本高架タンクは、地震直後も貯水、配水が正常に機能していた。地震後の定期点検において被災が確認され、詳細調査が実施された。本調査で確認された被災状況を以下に列記する。

- ・ 高架タンク脚壁下部にひび割れが多く発生し、脚壁内部のひび割れは外部の半数程度が確認された。
- ・ 高架タンクの傾き、沈下は発生していない。
- ・ 高架タンク内の配管からの漏水は無い。
- ・ 高架タンク周辺の地盤には、地盤沈下と地割れが確認された。
- ・ 螺旋階段は、最上部と中間 2 ヶ所の計 3 ヶ所で高架タンクに連結され、最上部とその下の金具が破損していた。
- ・ 高架タンク基礎版上面に設置された震度計に、999gal の加速度が記録されていた。(注：この震度計は 999gal を上限として、それ以上の値は観測できない)
- ・ 近隣の被害は、瓦屋根やブロック塀の倒壊、歩道の陥没が確認された。

3.3 ひび割れ状況

三陸南地震によって、図－１の RC 脚壁下端に図－３に示すひび割れが確認された。脚壁の南北方向には 0.15～0.3mm の水平ひび割れが、直交する東西方向には 0.1～0.3mm の斜めひび割れが確認された。特に、水平方向のひび割れが多く、開口部周辺には最大 0.75mm のひび割れが確認され、曲げによる損傷が支配的であったと考えられる。



図－３ ひび割れマップ

4. 調査結果の検討および分析

高架タンク脚部の被災状況を確認する目的で、ひび割れ幅から推定する鋼材応力度と、動的解析による応答値を比較することで、本構造の被災度を検討した。

4.1 ひび割れ幅から推定する鋼材応力

高架タンク脚部に発生したひび割れ幅より、脚壁に配置されている鉄筋の応力状態を推定した。まず、鉄筋が降伏するときのひび割れ幅を2通りの方法で計算し、結果を表－2に示す。

表－2 鉄筋降伏時のひび割れ幅

		ひび割れ幅
1) 付着領域を考慮した鉄筋のひずみ ⁴⁾	Ls=100mm	0.45mm
	Ls=200mm	0.59mm
2) ACI 温度ひび割れ幅算定式 ⁵⁾		0.41mm

Ls:付着損失領域長さ

表－2のひび割れ幅より、0.41mm以上のひび割れ箇所の鉄筋は降伏している可能性が高いと考えた。その結果、せん断によるひび割れと考えられる斜め方向の最大ひび割れ幅は0.3mmで

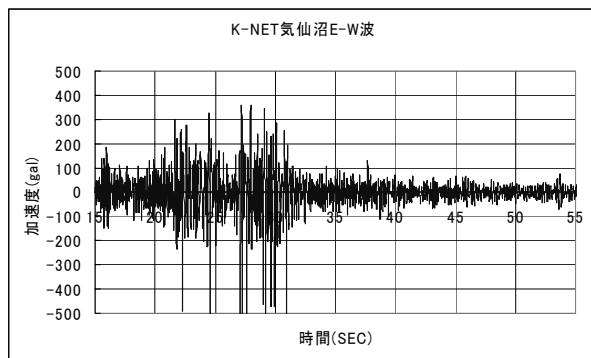
あることより、水平方向の鋼材は健全と判定された。しかし、開口部周辺の水平方向には、最大0.75mmのひび割れがあることより、鉛直方向最外縁の鋼材には降伏力に近い応力が生じたと推測される。

4.2 解析による損傷度の確認

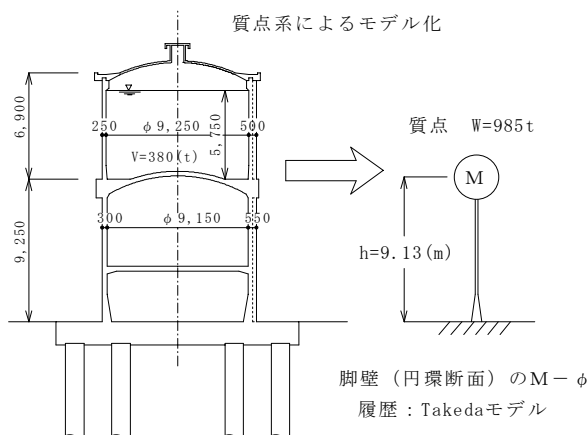
本地震による高架タンクの挙動を確認する動的解析を行った。解析に用いた地震波は、建設地点の地盤が不明確のため、地表面の波を採用した。また、近隣の地震波と過去の代表的な地震波の加速度応答スペクトルを比較して、本高架タンクの固有周期に近い、周期0.1~0.3(sec)において顕著な応答を示すK-net 気仙沼を用いた。

解析のモデル化は、従来の経験と試算により、本形式の高架タンクに関しては、高次モードの影響が少なく1次モードが卓越することより、図－5に示すRC脚壁を棒部材に置換えた1質点系の簡易モデルを採用した。質点のモデル化は、被災時満水に近いこと。そして、短周期の卓越した特性であり衝撃圧が支配的と考えて、貯水の全てを固定水と見なす。また、基礎版上面を基部としてその上部の重心位置に質点を設けた。

脚壁は、曲げせん断系の梁とした。曲げ剛性は開口部の影響を無視した円環断面、せん断剛性は軸対称FEM解析による変形量を基に決定した。モデルの非線形特性は、4.1より曲げによる損傷が支配的と考え、脚壁を円環梁としたM- ϕ を求め、Takedaモデルの履歴特性を設定した。減衰は、剛性比例型5%とした。入力地震波は、高架タンク基礎版上面で計測された加速度999galに振幅調整した。



図－4 K-NET 気仙沼の観測地震波（E-W）



図－5 動的解析モデル

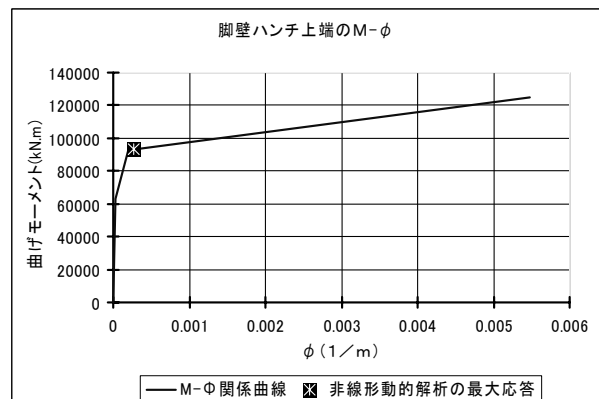
動的特性を把握する目的で、図－5のモデルによる線形解析と非線形解析による最大応答加速度を比較し、その結果を表－3に示す。

表－3 最大応答加速度の比較

	最大応答加速度(gal)	
	線形	非線形
N-S	2036	1641
E-W	2646	1623

本高架タンクの満水時の固有周期は、 $T=0.08(\text{sec})$ と短い、加速度の応答倍率が2.6倍(E-W波)であった。また、脚壁の非線形特性を考慮することで、応答値の低下を確認した。

図－6に、脚壁下部のM- ϕ 関係上に、解析で得られた最大応答をプロットした。この解析から脚壁基部の損傷は、初降伏モーメントを若干上回る結果となった。



図－6 脚壁下部ハンチ上端の最大応答

4.3 まとめ

高架タンク脚部に発生したひび割れ幅より、脚壁に配置されている鉄筋の応力状態を推定した。その結果、0.41mm以上のひび割れ箇所の鉄筋は降伏している可能性がある。脚壁開口部周辺には、0.3mm～0.75mmの水平ひび割れが確認され、鉛直方向の鋼材に降伏力に近い応力が生じたと推測された。また、貯水全てを固定水として評価した動的解析において、初降伏程度の応答が確認できた。

5. 被災度判定および被災復旧の計画

5.1 被災度区分判定

本高架タンクの被災度区分を「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針（鉄筋コンクリート造編）」⁶⁾によって判定した。これは、損傷状況の調査に基づき、補修・補強要否および解体の必要性を判定する一手法である。その判定項目は、構造物の全体傾斜、全体沈下および躯体の損傷状況の3項目である。測量調査から構造物の全体傾斜および沈下は認められず、

RC 脚壁下部のひび割れに限定された。RC 脚壁を、図－１の平面図に示す凹凸を基準に 24 本の柱部材より構成される構造物と見なして、式(1)により脚壁の損傷割合を算定し、表－４により被災度区分を判定した。

$$D=10B_1+26B_2+60B_3+100B_4+1000B_5/7 \quad (1)$$

ここに、D：損傷割合

Bi：表－５に示す損傷度が i の柱本数を調査柱本数で除した値

表－４ 構造躯体の損傷割合と被災度区分判定

調査項目	判定			
	軽微	小破	中破	大破
D	5 以下	5～10	10～50	50 超

表－５ 柱梁の損傷度分類の基準⁶⁾

損傷度	損傷内容
I	ひび割れ幅 0.2mm 以下
II	ひび割れ幅 0.2～1mm 程度
III	ひび割れ幅 1～2mm 程度
IV	大きなひび割れ（2mm 超）が多数 コンクリートの剥落，鉄筋の露出
V	鉄筋の座屈，内部コンクリート圧壊 柱の高さ方向の変形，鉄筋破断

表－６ 補強等の要否

震度階	軽微	小破	中破	大破	倒壊
IV以下	○	△	×	×	×
V	○	○	△	×	×
VI以上	○	○	○	△	×

○印：補修により復旧するもの

△印：補修または補強により復旧するもの

×印：補強により復旧または取り壊すもの

ひび割れマップ（図－３）より損傷割合 D を算定した。その過程と結果を以下に示す。

調査柱本数 24 本

損傷度 I 13 本 $B_1= 0.542$

損傷度 II 11 本 $B_2= 0.458$

$$D= 5.42 + 11.92 = 17.3$$

損傷割合 D より，“中破”と判定。三陸南部地震の強さは気象庁震度階VI以上であることより、表－６によって「補修により復旧するもの」と判定した。

5.2 被災復旧の計画

本高架タンクの RC 脚壁は「補修により復旧するもの」と判定し、ひび割れの補修工法⁸⁾として浸透性防水材の塗布工法と注入工法の併用を選定した。本高架タンクは、大島の山頂にあり潮風の影響を受け、被災した脚壁のひび割れに飛来塩分の侵入が考えられることより、浸透性防水材の選定には、脚壁内部の鋼材の防錆対策を施せること等の理由から無機系材料⁹⁾を選定した。また、浸透性防水剤の塗布工法として適用可能な無機系材料として粉末系と液体系の 2 種類あるが、注入工法にも適用可能な液体系を選定した。

5.3 今後の地震に対する耐震性能の改善

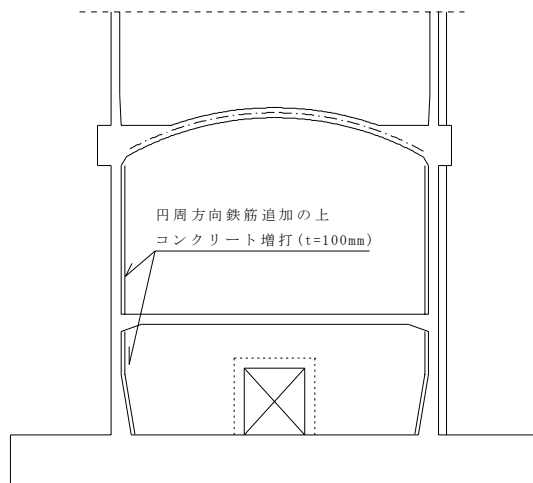
本高架タンクは、設計荷重を上回る地震力を受けても、ライフラインとしての機能を保持し水道施設に要求される性能を確保していた。また、地震力により脚壁下端にひび割れが発生したことが解析により確認できた。解析による検討と調査結果を踏まえた被災度区分判定より、ひび割れ補修により復旧できると判断した。しかし、今後も今回以上の大きさの地震が発生する可能性がある。

高架タンクの部材ごとに終局時の破壊モードを確認した結果、脚壁部分はせん断破壊先行であることが判明した。この RC 脚壁の耐力を、水平震度に換算して比較した結果を表－７に示す。

表－７ 脚壁ハンチ上端での耐力比較

耐力		水平震度
終局曲げ耐力		1.84
せん断	棒部材 $V_{yd}^{10)}$	1.21
降伏耐力	せん断補強鋼材のみ ¹¹⁾	0.86

表－７の水平震度の比率から脚壁のせん断耐力を $1.84/0.86=2.14$ 倍以上確保する事で、曲げ破壊モードに改善出来る。なお、せん断降伏耐力は、せん断補強鉄筋負担分のみとした。また、円筒形断面におけるせん断力は、棒部材などの長方形断面と異なり不明な点が多いことより、コンクリートに働く最大せん断応力度をすべて鉄筋に置き換えることで、せん断耐力を算出した。¹¹⁾この結果を踏まえ、シート巻き立て等の工法と比較した結果、図－７に示す経済的な脚壁の円周方向鉄筋を追加した断面増し厚を計画し提案した。



図－７ 脚壁の補強

6. まとめ

三陸南地震によって被災した高架タンクの健全度の確認を目的に技術検討を行い、被災度区分判定から補修・補強の提案を行った。最大ひび割れ幅から推定する鋼材応力は降伏程度と判定され、動的解析による結果も、初降伏程度の軽微な損傷であった。また、被災度区分判定より、ひび割れ補修により復旧できると判断した。

本高架タンクは、大島の山頂にあり潮風の影響を受け、被災した脚壁のひび割れに飛来塩分の侵入が考えられる事より、本提案の補修が早期に実施された。

しかし、今後も今回以上の大きさの地震が発生する可能性があり、高架タンクの破壊モードを確認した結果、脚壁の曲げ終局時において、

せん断降伏耐力が不足していることが判明した。この結果を踏まえ、円周方向鉄筋を追加した断面増し厚を計画し提案した。その後、本高架タンクのライフラインとしての重要性を鑑み、写真－１に示す提案による補強工事が実施された。



写真－１ 脚壁内の補強状況

謝辞

本検討を行うにあたり、東北大学の鈴木基行教授に貴重なご助言を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設設計指針，2000.
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
- 3) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説，1996
- 4) 土木学会：最新のマスコンクリート技術
- 5) ACI：ACI207 CHAPTER6
- 6) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針（鉄筋コンクリート造編），1991
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術の事例，1998
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2003
- 9) 笠井和弘ほか：無機系改質材によるコンクリートのひびわれ補修に関する基礎的性能評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，日本材料学会，2002
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針，1976