

PCタンク側壁の耐震性能照査に関する研究

(株)安部工業所 技術開発部 正会員 ○野田義成
 (株)安部工業所 技術開発部 正会員 横山博司
 (株)安部工業所 技術開発部 正会員 堅田茂昌
 (株)安部工業所 技術開発部 正会員 村井 篤

1. はじめに

水道用プレストレストコンクリート製タンク（以下、PCタンクと称す）は、兵庫県南部地震後に改訂された「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説¹⁾」（以下、PCタンク指針と称す）に基づいて耐震設計が行われている。

このPCタンク指針では、地震動レベル2における要求性能として、「PCタンクの機能保持が可能」と規定し、その耐震性能照査では、地震時に側壁円周方向に発生するひずみ（以下、円周方向応答ひずみと称す）が地震動除荷後に水密性が確保される程度に復元されるための許容ひずみ以下であることを確認する。一般に、この許容ひずみは、鉄筋の降伏ひずみ以下としている。

この照査は、側壁の円周方向軸引張力-ひずみの非線形関係を仮定し、設計時の静的弾性解析から得られる応答値にエネルギー一定則を適用することで弾塑性応答値を推定している。

この円周方向応答ひずみの推定式は、非線形特性を考慮したプッシュオーバー解析により得られた荷重-変位関係に基づいて仮定²⁾されたものであり、動的な非線形特性は考慮されていない。

西尾ら³⁾は、時刻歴弾塑性解析により、推定式の妥当性確認を実施している。この結果、PCタンク指針による推定式から算出した円周方向応答ひずみ値は、時刻歴弾塑性解析結果の値に比べ、過大に評価することを確認した。現状の推定式では、地震時挙動を再現できないと考えられるが、実設計において、時刻歴弾塑性解析をすることは、実用的ではない。

そこで、地震時挙動に対するPCタンク耐震設計評価式を検討する目的で、地震時PCタンク円周方向軸力-ひずみ関係を時刻歴弾塑性解析により確認した。ここに本解析結果について報告する。

2. 円周方向応答ひずみ

地震時に側壁に作用する動水圧および躯体慣性力により、側壁の円周方向に軸引張力が作用する。前述の通り、PCタンク指針では、この照査方法を円周方向応答ひずみの検討として規定している。

円周方向応答ひずみの検討において規定された円周方向軸力-ひずみ関係（図-1）は、コンクリートの引張強度から定まる軸引張力 (Q_{cr}) とPC鋼材降伏強度から定まる軸引張力 (Q_{py}) の間を直線補間し、鉄筋降伏ひずみ時 (ϵ_{sy}) の直線上の点を鉄筋降伏時の軸引張力 (Q_{sy}) としている。さらに、部材の仮想降伏点 (Q_y, ϵ_y) をひび割れ点と鉄筋降伏点の間と定義し、原点-仮想降伏点-PC鋼材降伏点の経路を通るバイリニア型に模式化している。照査は、この円周方向軸力-ひずみ曲線に、弾性解析により得られた応答値にエネルギー一定則を適用することで部材の弾塑性応答ひずみを簡易的に算定するものである。この算定された側壁の応答ひずみが鉄筋の降伏ひずみ (ϵ_{sy}) 以下であることを確認することにより、PCタンクの液密性が確保可能となり、PCタンクの機能保持が可能であるとしている。

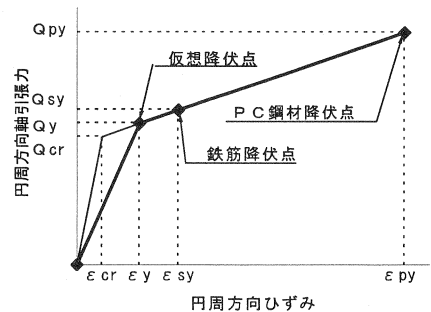


図-1 円周方向軸力-ひずみ関係

3. 解析検討

3.1 解析概要

解析は、プッシュオーバー解析、時刻暦弾性解析および時刻暦弾塑性解析を実施する。これにより、時刻暦弾塑性解析によって得られた結果が、プッシュオーバー解析や時刻暦弾性解析と比較してどのような傾向にあるのかを把握する。これにより、照査方法の確立が可能であると考へ、以下に解析を実施した。

3.2 解析対象PCタンクと解析モデル

解析対象PCタンクは図-2 に示される水道施設耐震工法指針⁴⁾ 設計計算例に示されたPCタンクとし、側壁下端が固定支持された内容容10,000m³、(内径D) / (水深H) = 3.5 の円筒形PCタンクである。

PCタンク側壁およびドームリングはプレストレストコンクリート構造である。解析対象PCタンク側壁の配筋状況を図-3 および図-4 に示した。

解析モデルは、PCタンクの形状および作用荷重の対称性を考慮して1/2モデルとし、側壁部および屋根部はそれぞれ8節点および6節点アイソパラメトリックシェル要素を使用した。

また、内容液についてのモデル化は、西尾らにより妥当性の確認がされた付加質量モデル³⁾ を採用した。

付加質量モデルとは、速度ポテンシャル法により算定される動水圧による影響と等価な効果をもたらす質量を、側壁の各節点に与えたモデルである。

3.3 解析条件

数値解析には有限要素法を用い、解析コードは汎用有限要素法解析システム「DIANA」により実施した。

解析に用いた構成則は、コンクリートの降伏条件にはDrucker-Prager の破壊基準、また、ひび割れは、分布ひび割れモデルによりモデル化し、ひび割れ後は、引張軟化特性を考慮して、引張強度を超えてからは、引張強度に対応するひずみ (ϵ_{cr}) の3倍まで直線的に減少させた。図-5 に鉄筋の応力-ひずみ関係およびPC鋼材の応力-ひずみ関係を示した。想定した材料特性を表-1 にまとめて示した。

拘束条件は、側壁下端部において完全固定とし、1/2 切断面において、対称条件とした。

荷重条件は、プッシュオーバー解析においては、常時荷重に相当するプレストレス荷重、静水圧および自重を与え、次に地震の影響に相当する駆体慣性力と動水圧を漸増载荷した。動水圧は速度ポテンシャル法に基づいて算出し、これを側壁に作用させた。また、時刻歴応答解析においても同様に、常時荷重に相当する荷重を与え、次に地震波を与えた。

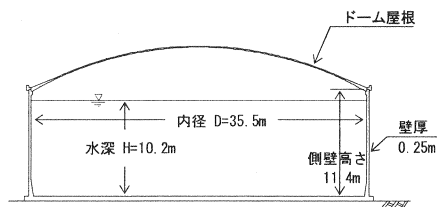


図-2 解析対象PCタンク

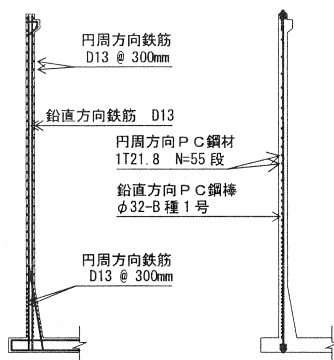


図-3 タンク側壁の配筋図 (円周方向)

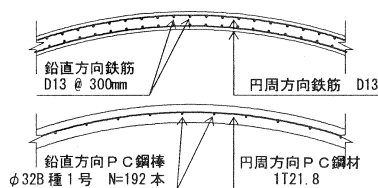


図-4 タンク側壁の配筋図 (鉛直方向)

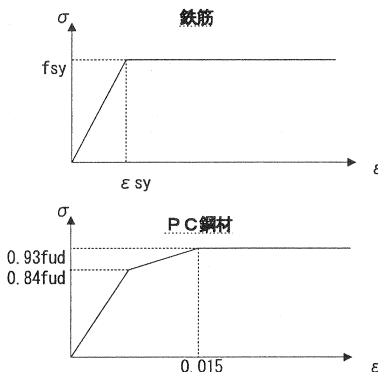


図-5 鉄筋・PC鋼材の応力-ひずみ関係

表-1 材料特性

コンクリート	ヤング係数	N/mm ²	2.98×10 ⁴
	ポアソン比		0.2
	圧縮強度	N/mm ²	35
	引張強度	N/mm ²	2.48
	密度	kg/m ³	2450
鉄筋	ヤング係数	N/mm ²	2.10×10 ⁵
	降伏強度	N/mm ²	3.00×10 ²
P C鋼材・鋼棒	ヤング係数	N/mm ²	2.00×10 ⁵
	引張強度 (鋼材)	N/mm ²	1.85×10 ³
	引張強度 (鋼棒)	N/mm ²	1.10×10 ³

入力地震波は、釧路沖地震（平成3年1月）の際の釧路気象台で観測された加速度波形（KSR波形）および兵庫県南部地震（平成7年1月）の際の神戸海洋気象台で観測された加速度波形（JMA波形）の2つの地震波を用いた。図-6にそれぞれの波形から得られる加速度応答スペクトルを示した。釧路沖で観測された地震波は、これまでに我が国で観測されてきた強震記録の中でも、特に短周期構造物の応答を増幅させる加速度波形であり、本研究で解析対象とするP Cタンクの固有周期帯0.1秒～0.3秒程度において、卓越した応答となる。

解析において、入力地震波に倍率を乗じて、倍率毎の応答値を確認した。入力地震波の倍率について表-2に示した。

時刻歴応答解析は、直接積分により、数値解析法はNewmark β法（β=1/4）を用いた。応答計算の時間刻みは1/500秒を基本とした。また減衰力は、初期剛性比例型減衰により与え、1次固有振動数に対して、モード減衰定数h=10%を適用した。

3. 4 結果

プッシュオーバー解析、時刻歴弾性解析および時刻歴弾塑性解析の結果得られたP Cタンク側壁の円周方向軸力-ひずみ関係を入力地震波毎に図-8および図-9に示し、図中の値をそれぞれ表-3および表-4に示した。また、時刻歴弾性解析結果にP Cタンク指針による推定式を適用した場合の結果を併せて示した。

結果は、部分的な塑性化が確認された側壁中間点（図-7）の値とし、また、時刻歴解析における結果は、側壁の円周方向応答ひずみが最大となる時刻における、円周方向軸力とそのひずみ値とした。なお、時刻歴弾塑性解析における結果は、円周方向軸力による側壁中間点の部分的な塑性化が見られたが、P Cタンク全体としての挙動は、概ね弾性挙動となっていることを確認した。

プッシュオーバー解析の結果、コンクリートのひび割れ以降から鉄筋降伏までの間の剛性は、鉄筋とP C鋼材の剛性となっており、また、鉄筋降伏以降の剛性は、P C鋼材のみの剛性となることを確認した。

プッシュオーバー解析と時刻歴弾塑性解析の結果を比較すると、同様のライン上に位置していることから、時刻歴弾塑性解析の妥当性が確認できる。

表-3より、円周方向軸力結果について着目すると、時刻歴弾性解析結果と時刻歴弾塑性解析結果を比較すると、軸引張力の応答の低下が確認できた。その低下率は55～74%程度の範囲にある。P Cタンク指針による推定式を適用した場合と時刻歴弾塑性解析結果を比較すると、P Cタンク指針による応答軸力が全て上回っているが、過大となっていることが分かる。

表-4より、円周方向ひずみ結果について着目すると、P Cタンク指針による推定式を適用した場合と時刻歴弾塑性解析結果を比較すると、P Cタンク指針による推定値は、概ね時刻歴弾塑性結果を上回り、大きめの評価となっている傾向にあるが、JMA波形1.5倍時の結果は、若干小さめの評価となる。これは、設

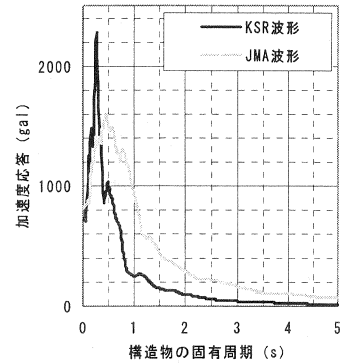


図-6 加速度応答スペクトル

表-2 入力地震波倍率

入力地震波	倍率
KSR波形 711.4 (gal)	1.0
	1.5
	1.8
JMA波形 812.0 (gal)	1.0
	1.5

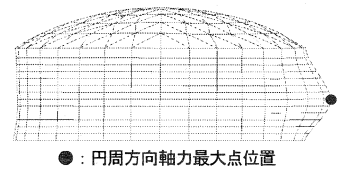


図-7 側壁中間点（円周方向軸力最大）

計荷重を大きく上回る地震動において、PCタンク指針による推定式の適用性に問題があることを示している。

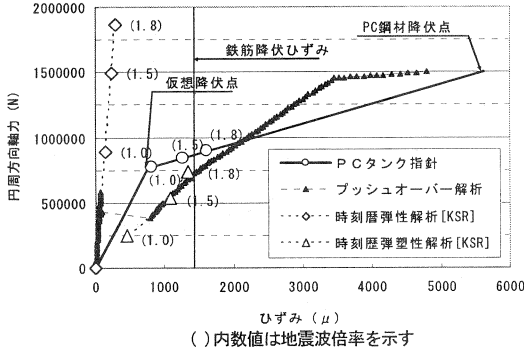


図-8 円周方向軸力-ひずみ関係 (KSR 波形)

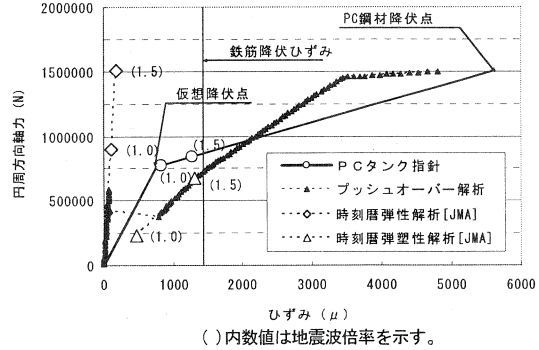


図-9 円周方向軸力-ひずみ関係 (JMA 波形)

表-3 円周方向軸力結果

入力地震波	倍率	応答軸力 (N)			低下率 (%)	
		(a)時刻歴弾性解析	(b)PCタンク指針	(c)時刻歴弾塑性解析	$(a)-(b)/(a)$	$(a)-(c)/(a)$
KSR 波形	1.0	888515.7	775438.7	246374.7	12.7	72.3
	1.5	1497070.7	842578.2	532091.7	43.7	64.5
	1.8	1862203.7	895388.8	732287.7	51.9	60.7
JMA 波形	1.0	896880.7	776159.0	234887.7	13.5	73.8
	1.5	1509617.7	844251.7	674119.7	44.1	55.3

表-4 円周方向ひずみ結果

入力地震波	倍率	応答ひずみ (μ)			ひずみ比
		(a)時刻歴弾性解析	(b)PCタンク指針	(c)時刻歴弾塑性解析	(c)/(b)
KSR 波形	1.0	143.5	821.1	459.9	0.6
	1.5	236.1	1264.0	1076.1	0.9
	1.8	291.7	1612.4	1331.5	0.8
JMA 波形	1.0	108.4	825.8	459.2	0.6
	1.5	183.5	1275.1	1314.1	1.0

4. まとめ

得られた知見を以下にまとめる。

- 時刻歴弾性解析および時刻歴弾塑性解析結果より、円周方向軸引張力は側壁のひび割れ後に、応答低下が確認できた。
- 時刻歴弾塑性解析による円周方向軸引張力の応答低下は、低下率にして、約55%以上となることが確認できた。
- PCタンク指針の円周方向応答ひずみ推定式は、JMA1.5倍の地震波を入力した場合においては、小さめの評価となることが分かった。

以上のことが明らかとなった。本結果に基づき、PCタンクの耐震挙動を評価できる。解析結果である応答低下率に着目することで、円周方向応答ひずみの照査方法を新たに提案できると考える。このためには、今後さらに、PCタンク形状をパラメータとした解析を実施していく必要がある。

参考文献

- 水道用プレストレストコンクリート設計施工指針・解説, 1998
- 吉岡民夫ほか:「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」の改訂について, プレストレストコンクリート技術協会, 第27回技術講習会資料, pp.63-78, 1999.2
- 西尾浩志ほか:プレストレストコンクリート製タンク側壁のレベル2地震動に対する耐震性能照査, 土木学会論文集 No.725/V-58, pp.85-100, 2003.2
- 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説, 1997