

# 論文 レベル2地震動を考慮したプレストレストコンクリート製タンクの耐震安全性評価

小林 寛明\*1 · 西尾 浩志\*2 · 秋山 充良\*3 · 鈴木 基行\*4

**要旨:** レベル2地震動を受ける水道用プレストレストコンクリート製タンク(PCタンク)の時刻歴地震応答解析を行い、その耐震安全性を評価した。また、PCタンクの主たる地震荷重である動水圧による影響と等価な慣性力を与える付加質量を用いてモデル化した動的解析結果、およびエネルギー一定則に基づき簡易的に算定した円周方向応答ひずみと流体要素を用いて内容液との連成を考慮した弾塑性地震応答解析結果を比較することで、PCタンクの耐震性能照査法に関する一考察を行った。

**キーワード:** プレストレストコンクリート製タンク, 耐震設計, 地震応答解析, 動水圧

## 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)は、兵庫県南部地震後に改定された「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」<sup>1)</sup>(以下、PCタンク設計施工指針)に基づき耐震設計されている。このPCタンク設計施工指針では、地震動レベル2に対して、「人命に重大な被害を与えない」、および地震後の「機能保持が可能」を保有すべき耐震性能として規定している。そして、前者に対しては、円周方向の軸引張力と鉛直方向の曲げモーメントが、部材の設計断面耐力よりも小さいこと、また後者に対しては、液密性への配慮から、円周方向応答ひずみが許容残留ひび割れ幅を満足するに十分小さいことを確認する(通常は鉄筋が降伏していないことを確認)することで、その耐震性能が照査される。しかし、このように耐震設計されたPCタンクの地震応答性状に関しては、未解明な部分が多く、設計地震力、もしくはそれ以上の過大地震力が作用した場合の地震時挙動を把握しておく必要がある。なおPCタンクでは、側壁に作用する動水圧が主たる地震荷重となるため、その地震応答性

状を検討する中では、内容液と側壁の連成を反映できる解析モデルを用いなければならない。

そこで本研究ではまず、流体要素を用いることで、内容液と側壁の連成を考慮した弾塑性地震応答解析を行い、設計地震力以上の強震動を受けるPCタンクの耐震安全性を検討した。また、PCタンクの簡便な耐震性能照査法の検討として、動水圧の効果を付加質量に置換した動的解析から得られる応答値、およびエネルギー一定則に基づき算定される円周方向応答ひずみと流体要素を用いた動的解析結果を比較することで、各手法の妥当性を検証した。

## 2. PCタンクの非線形動的解析

### 2.1 解析対象PCタンク

本解析では、側壁下端が固定支持された円筒形PCタンクを対象として、その耐震安全性および耐震性能照査法に関する検討を行う。解析対象は、水道用PCタンクとして比較的規模の大きい容量10000m<sup>3</sup>を有するものであり、その概略図を図-1に示した。また、表-1には、その構造諸元を示した。表-1に示されるように、解析対象PCタンクは、(内径D) / (水深H)が3.5と大きく、また、側壁厚さがタンク内

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 (株)安部工業所 東北支店長 工修(正会員)

\*3 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 工修(正会員)

\*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)



表-2 材料特性

コンクリート	ヤング率	$2.98 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.2
	密度	$2450 \text{ kg/m}^3$
鉄筋	ヤング率	$2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
PC鋼材	ヤング率	$2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3

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、Rayleigh減衰により与えた。

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（以下、KSR波形）を用いた。KSR波形およびPCタンク設計施工指針に規定される地震動レベル2の加速度応答スペクトルの比較を図-4に示した。釧路沖地震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PCタンク(D/H=3.5)の固有周期帯0.1秒～0.2秒程度において、図-4に示される通り、KSR波形は設計地震動を大きく上回る。これまで国内外において、施工が不十分であった場合を除いて、健全なPCタンクが地震により崩壊した例は報告されてなく<sup>3)</sup>、その耐震安全性は極めて高いと思われるが、一方で、どの程度の地震力に対してまで、前述したPCタンク設計施工指針で規定される耐震性能を満足できるかは明らかにされていない。そこで、図-4に示されるような設計地震動以上の過大入力を与えた時のPCタンクの地震応答性状について検討する。

#### 2.4 解析結果

流体要素を用いて内容液との連成を考慮した解析対象PCタンクに対して、周波数 $\omega$ 毎に調和振動を与え、側壁上端および側壁中間部の半径方向の応答変位を求めた結果を図-5に示した。また、ピークの応答を与える周波数9.1Hzに対応する固有振動モードを図-6に示した。図-5および図-6より、D/H=3.5を有するPCタンク

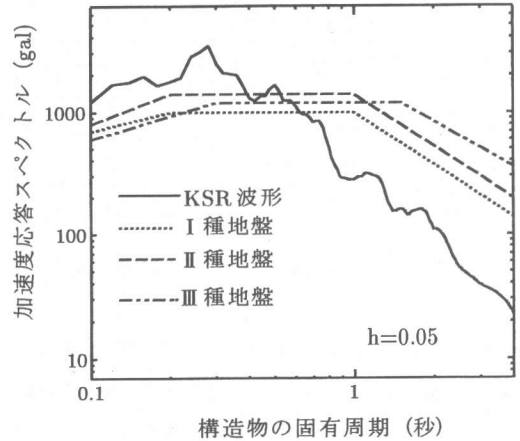


図-4 加速度応答スペクトル

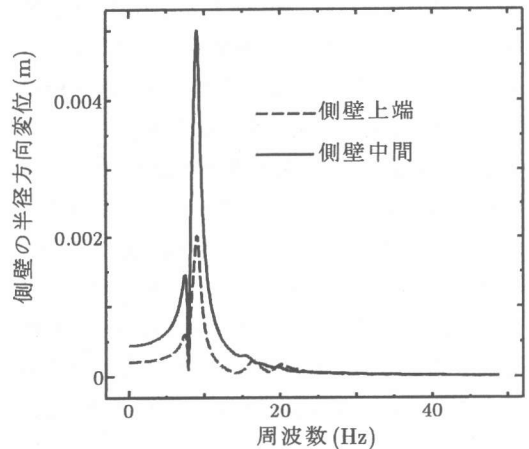


図-5 調和振動に対するPCタンクの応答

クでは、側壁中間部の応答が側壁上端部の応答に比べ卓越しており、側壁中間部の円周方向軸引張力がPCタンクの耐震安全性に大きな影響を与える断面力であることが分かる。

次に、KSR波形を入力し、解析対象PCタンクの時刻歴応答解析を行った。地震波は、KSR波形の最大加速度が生じる時間を含む20秒～30秒の加速度記録を用いた。側壁中間部に着目した円周方向ひずみと鉛直方向曲げモーメントの時刻歴応答をそれぞれ図-7および図-8に示した。結果として、KSR波形を受けるPCタンクでは、地震波入力後0.08秒でひび割れを発生

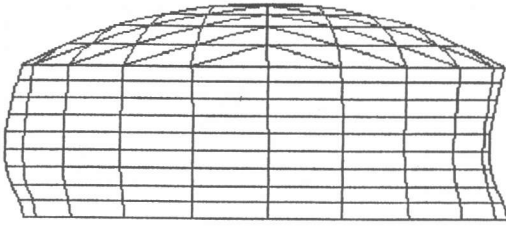


図-6 主要な振動モード(変形倍率500倍)

するが、図-7に示す通り、円周方向応答ひずみは、液密性を確保できる許容残留ひび割れ幅に抑えるための限界ひずみ(鉄筋の降伏ひずみ)に対して、十分な余裕を確保できており、鉛直方向の鉄筋に関しても、降伏していないことが確認された。さらに、図-8に示される通り、鉛直方向曲げモーメントも断面耐力に対して十分な余裕を有しており、設計地震力を上回るKSR波形の入力に対しても、解析対象PCタンクは、PCタンク設計施工指針で規定する耐震性能を確保できることが示された。このような設計地震力以上の地震動に対しても、耐震性能が確保されているのは、後述するように、動的解析結果に比べ、過大な応答を与えるエネルギー一定則により円周方向応答ひずみを推定することや構造細目による規定が関係しているためである。

### 3. 付加質量モデルとエネルギー一定則に基づくPCタンクの弾塑性地震応答の推定

#### 3.1 付加質量モデル

タンク側壁に作用する動水圧は、式(1)に示される速度ポテンシャル法で算定できる<sup>1)</sup>。

$$P(\xi, \theta) = \rho K_h R \left( 1 - 2 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{K_s^2 - 1} \times \frac{\cosh\left(K_s \frac{H - \xi}{R}\right)}{\cosh\left(K_s \frac{H}{R}\right)} \right) \cos \theta \quad (1)$$

ここに、 $P(\xi, \theta)$  : 水面からの距離  $\xi$ , 地震動入力方向に対する角度  $\theta$  における動水圧  
 $\rho$  : 水の単位体積重量

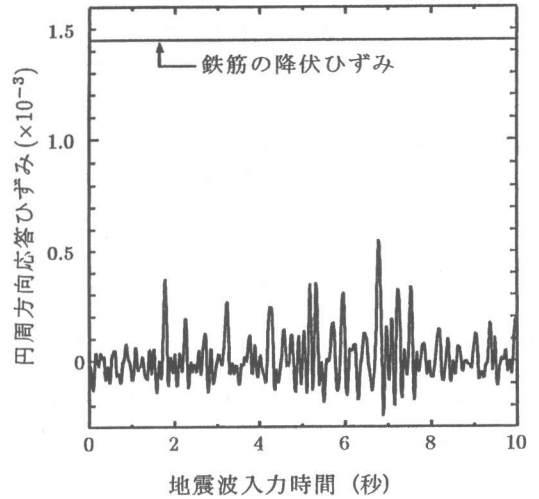


図-7 円周方向ひずみの時刻歴応答

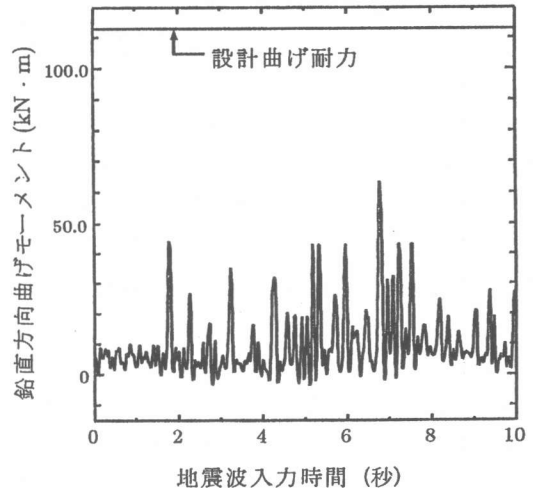


図-8 鉛直方向曲げモーメントの時刻歴応答

$K_h$  : 設計水平震度  
 $K_s$  :  $\frac{d}{dK_s} (J_1(K_s)) = 0$  を満足する正根  
 ( $J_1$ : ベッセル関数)  
 $R, H$  : タンクの半径及び水深

そこで、式(1)から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(付加質量)を式(2)に従い側壁に与えることで、流体要素を用いたPCタンクモデルの単純化を図った。

$$m(\xi, \theta) = \frac{P(\xi, \theta) \times A}{K_h \times g} \quad (2)$$

ここに、  $m(\xi, \theta)$  : 動水圧  $P(\xi, \theta)$  に対応する付加質量  
 $A$  : 各要素の面積  
 $g$  : 重力加速度

この付加質量を用いた解析(以下、付加質量モデル)により、有限要素解析モデルにおける全要素数を大幅に低減できる。

### 3.2 付加質量モデルを用いた時刻歴応答解析

付加質量モデルと、流体要素を用いて内容液との連成を考慮したモデル(以下、連成系モデル)による動的解析結果を比較した。KSR波形の原波形を入力した場合には、前述した通り、PCタンクは鉄筋の降伏が生じず、このようなほぼ弾性挙動を示す場合には、両モデルの応答値が、ほぼ一致することが確認された。なおこれは、 $D/H$ が2.5以上確保されたPCタンクの線形動的解析による検討から、式(1)に基づく動水圧慣用計算法により、側壁に作用する動水圧の作用を十分に再現できるとの報告<sup>4)</sup>からも明らかである。そこで、KSR波形の振幅を3倍にして入力し、弾塑性挙動をするPCタンクの応答値を基に両モデルの比較を行った。

両モデルから得られる側壁中間部の円周方向ひずみおよび鉛直方向曲げモーメントの時刻歴応答をそれぞれ図-9および図-10に示した。振幅を3倍にした本解析では、両モデルで円周方向と鉛直方向に配筋された鉄筋の降伏が確認されており、図-9および図-10は、鉄筋の降伏を示す時刻帯を拡大したものである。結果として、付加質量モデルがやや過大に応答値を算定しているが、その差は小さく応答性状についても十分に連成系モデルの結果を再現できている。より大きな非線形挙動をする場合の両モデルの差については、今後十分に検討する必要があるが、ここで用いたような強震動を受けるPCタンクでも、付加質量モデルによりその地震応答性状は十分に把握できる。

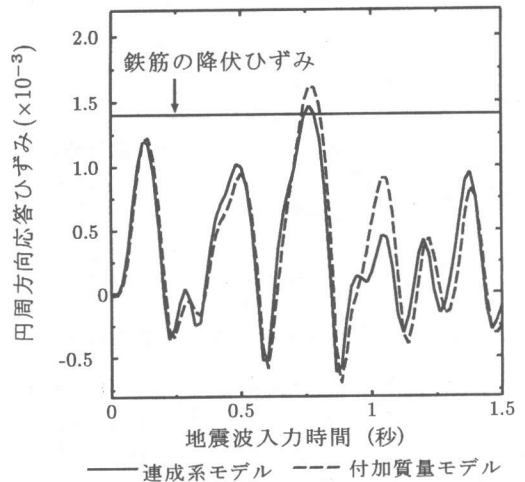


図-9 円周方向応答ひずみの比較

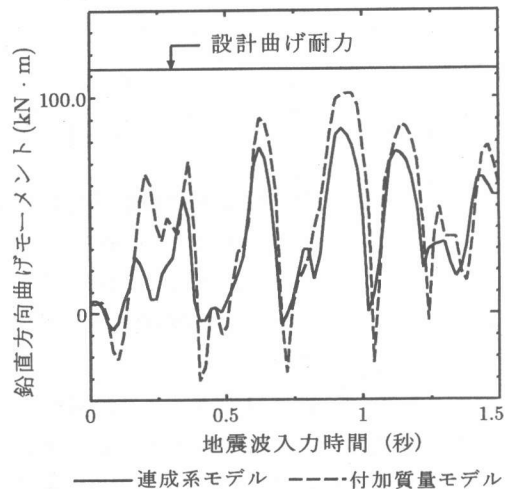


図-10 鉛直方向曲げモーメントの比較

### 3.3 エネルギー一定則に基づく円周方向応答ひずみの推定

PCタンク設計施工指針では、地震後の機能保持(液密性)を確保するため、エネルギー一定則に基づき算定した円周方向応答ひずみ $\epsilon_r$ が許容ひずみ $\epsilon_{ra}$ (鉄筋の降伏ひずみ $\epsilon_{sy}$ )に到達しないことを照査している。そこで、PCタンク設計施工指針に従い簡易的に算定されるエネルギー一定則を用いた円周方向応答ひずみ $\epsilon_r$ と連成系モデルを用いた動的解析結果を比較することで、その手法の妥当性を検証する。

円周方向応答ひずみ $\epsilon_r$ は、エネルギー一定則

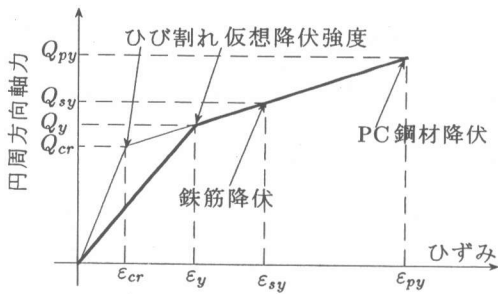


図-11 円周方向の軸力-ひずみ曲線

表-3 エネルギー一定則を用いた応答ひずみ

$Q_{cr}$	$Q_e$	$\epsilon_r$	$\epsilon_{ra}(=\epsilon_{sy})$
656kN	2170kN	2040 $\mu$	1430 $\mu$

に基づく式(3)および式(4)より算定できる。

$$\epsilon_r = \epsilon_y \cdot (1 + \eta_r) \quad (3)$$

$$\eta_r = -\frac{1}{r_h} + \frac{1}{r_h} \sqrt{1 - \frac{r_h}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{Q_e}{Q_y} \right)^2 \right\}} \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_y$  : 図-11 に示す仮想降伏ひずみ

$\eta_r$  : 応答平均塑性変形倍率

$r_h$  : 部材の降伏剛性に対する降伏後の2次剛性の比

$Q_e$  : 弾性応答軸引張力

$Q_y$  : 図-11 に示す仮想降伏荷重

円周方向の弾性応答軸引張力 $Q_e$ を算定する際の基準水平震度は、KSR波形の加速度応答スペクトルに対し、解析対象PCタンクの1次固有周期に対応する値を震度に換算したものをを用いた。そして、速度ポテンシャル法による動水圧と対応する躯体慣性力を側壁に載荷した静的線形解析により、円周方向の弾性応答軸引張力 $Q_e$ を求めた。これらより算定される円周方向応答ひずみ $\epsilon_r$ を表-3に示した。

### 3.4 エネルギー一定則の適用性

エネルギー一定則に基づき推定される円周方向応答ひずみ $\epsilon_r = 2040\mu$ に対して、KSR波形を入力した連成系モデルの時刻歴動的解析から算定される応答ひずみ $\epsilon_{rd}$ は、554 $\mu$ である。

連成系モデルを用いた動的解析では、KSR波形の入力に対し、円周方向応答ひずみは許容ひ

ずみ(鉄筋の降伏ひずみ)以下であったが、エネルギー一定則を用いた場合には、許容値を満足できないと判定されることになった。今後、より多くの地震動やD/Hを変更した時の解析を行う必要があるが、本解析に限れば、エネルギー一定則より推定される円周方向応答ひずみはかなり安全側の評価になっており、その耐震性能照査法として、付加質量モデルなどを用いた動的解析によれば、より合理的な設計が可能になる場合があると思われる。

### 4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 通常設計される範囲の諸元を有するD/H=3.5のPCタンクに対して、内容液との連成を考慮した動的解析を行った結果、PCタンク設計施工指針で規定される以上の地震動に対しても、十分な耐震性能を有していることが確認された。
- (2) 動水圧の効果を付加質量で置換した動的解析を行った。その結果、付加質量を用いた場合でも、流体要素により内容液との連成を考慮する動的解析結果を再現可能であることを示した。
- (3) エネルギー一定則に基づき推定される円周方向応答ひずみは、動的解析結果に対し、かなり安全側に算定される場合があることを確認した。

### 参考文献

- 1) 日本水道協会：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，1998.5
- 2) 西尾浩志：PCタンクに関する技術的動向と展望，プレストレストコンクリート，Vol.41，No.1，pp.15-20，1999.1
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の耐震性能照査-検討課題と将来像-，コンクリート技術シリーズ34，2000.5
- 4) 小野雄司ほか：プレストレストコンクリート製タンクの耐震安全性に関する基礎的研究，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，第1部門，CD-ROM，2000.9