

# 付加質量モデルを用いた PC タンクの地震応答解析

東北大学大学院 学生員 ○江角真也 西松建設(株) 正会員 小野雄司  
 (株)安部工業所 正会員 西尾浩志 (株)安部工業所 大村一馬  
 東北大学大学院 正会員 秋山充良 東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

## 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)では、躯体慣性力よりも側壁に作用する動水圧が主たる地震荷重となることが知られている。従って、その地震応答性状を検討するためには、内容液との連成を反映できる解析手法を用いなければならない。そこで本研究では、既往の動水圧算定手法である速度ポテンシャル法<sup>1)</sup>を基に、動水圧の効果を付加質量に置換した動的解析(以下、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動的解析(以下、連成系モデル)の結果を比較することで付加質量モデルの妥当性を検証した。なお、解析は線形動的解析および非線形動的解析により行った。

## 2. 解析方法

### (1) 解析モデル

解析対象とした PC タンクは容量約 10,000m<sup>3</sup>、(内径 D)/(水深 H) が 3.5 および 1.0 の円筒形タンクである。図-1 に解析対象 PC タンクの概略図を示し、表-1 にその構造諸元を示す。数値解析には有限要素法を用いており、モデル化は対称条件より全体の 1/2 を対象とし、側壁下端部は固定条件とした。側壁部および屋根部はシェル要素でモデル化した。鉄筋および PC 鋼材は、格子状に密に配筋されていることから、要素の中で平均化された鉄筋比としてモデル化した。内容液に関しては、連成系モデルでは、流体要素を用いてモデル化した。また、付加質量モデルでは、速度ポテンシャル法に基づく式(1)から算定される動水圧による影響を慣性力に置換するため、式(2)による付加質量を側壁の各節点に与えた。

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

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

ここに、 $P(\xi)$ : 水面からの鉛直距離  $\xi$  における動水圧、 $\rho$ : 水の単位体積重量、 $K_h$ : 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、 $m(\xi)$ : 水面からの鉛直距離  $\xi$  における付加質量、 $A$ : 各要素の面積、 $g$ : 重力加速度。

### (2) 材料特性

線形動的解析では、表-2 に示すヤング係数およびポアソン比を各材料に与えた。

非線形動的解析で用いた圧縮側のコンクリートの応力-ひずみ関係は完全弾塑性型とした。引張側は、引張応力が引張強度に達するまでの範囲では比例関係とし、ひび割れ後は tension stiffening を考慮して、引張強度に対応するひずみ値の 3 倍まで直線的に減少させた。コンクリートの圧縮強度および引張強度はそれぞれ 35.0N/mm<sup>2</sup>、2.48N/mm<sup>2</sup> とし

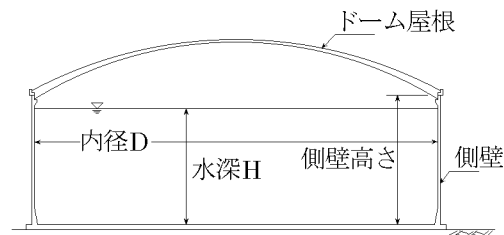


図-1 解析対象 PC タンク

表-1 PC タンクの構造諸元

内径 D	水深 H	D/H	壁厚
35.5m	10.2m	3.5	0.25m
23.4m	23.4m	1.0	0.35m

表-2 材料特性

コンクリート	ヤング係数	2.98×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.2
	密度	2450 kg/m <sup>3</sup>
鉄筋	ヤング係数	2.10×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.3
PC 鋼材	ヤング係数	2.00×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.3

**Key Words:** プレストレストコンクリート製タンク, 付加質量, 地震応答解析, 動水圧

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06 TEL: 022(217)7449 FAX: 022(217)7448

た。降伏条件には Drucker-Prager の条件を適用し、コンクリートのひび割れは分布ひび割れモデルで考慮した。除荷剛性は圧縮側が初期剛性、引張側は原点指向で与えられる。また、鉄筋は完全弾塑性型、PC 鋼材は降伏後の硬化を考慮した応力-ひずみ関係を用いた。その他、ヤング係数などは表-2 の各値を用いた。

### (3) 解析条件と入力地震波

動的解析は、直接積分による時刻歴応答解析であり、数値積分法には Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ ) を用いた。入力地震波には、釧路沖地震 (平成 3 年 1 月) における観測波 (KSR 波形) を用い、その最大加速度を含む 20 秒～30 秒の加速度記録を入力した。

## 3. 解析結果

表-1 の諸元を有する PC タンクの地震応答では、側壁中間部の円周方向軸引張力が卓越し、そ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っている。そこで、連成系モデルと付加質量モデルから得られる側壁中間部の円周方向応答ひずみを比較した。

D/H=3.5 および 1.0 の PC タンクの線形動的解析結果を、それぞれ図-2 および図-3 に示した。図-2 より、D/H=3.5 の PC タンクでは両モデルの応答は非常に良く整合していることが確認される。しかし、図-3 より、D/H=1.0 の PC タンクでは応答の絶対値および応答性状ともに大きく異なっており、式 (1) に基づく動水圧算定手法では、連成系モデルに生じている動水圧の作用を評価することは難しいと考えられる。

次に、線形領域において両モデルの応答がほぼ一致した D/H=3.5 の PC タンクに対して非線形動的解析を行った。KSR 波形の原波形を入力した場合には、PC タンクは鉄筋の降伏を生じずほぼ弾性挙動を示すため、図-2 の結果と同様、両モデルの応答は良く整合していた。そこでここでは、KSR 波形の振幅を 2 倍にして入力したときの鉄筋の降伏が生じる時間帯に着目した解析結果を図-4 に示す。図-4 より、鉄筋の降伏が生じる程度の非線形挙動を示す場合でも付加質量モデルは連成系モデルの応答値および応答性状を十分に再現できている。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、KSR 波形は解析対象 PC タンクの固有周期帯において、設計地震動<sup>1)</sup> を大きく上回る加速度応答スペクトルを与える強震記録である。そのため実用上は、D/H=3.5 を有する PC タンクならば、付加質量モデルにより、十分にその耐震安全性を議論できるとと思われる。

## 4. まとめ

線形動的解析より、D/H=1.0 の PC タンクでは、付加質量モデルと連成系モデルの応答性状が大きく異なり、既往の動水圧算定手法では、側壁に作用する動水圧の影響を十分に評価できないことを示唆する結果となった。また、非線形動的解析より、D/H=3.5 の PC タンクならば、鉄筋の降伏程度の非線形化を示す場合でも、付加質量モデルにより、連成系モデルの解析結果を再現可能であることを示した。

## 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

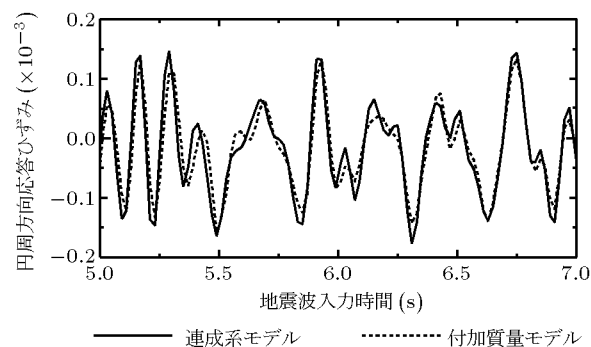


図-2 円周方向応答ひずみの比較 (D/H=3.5)

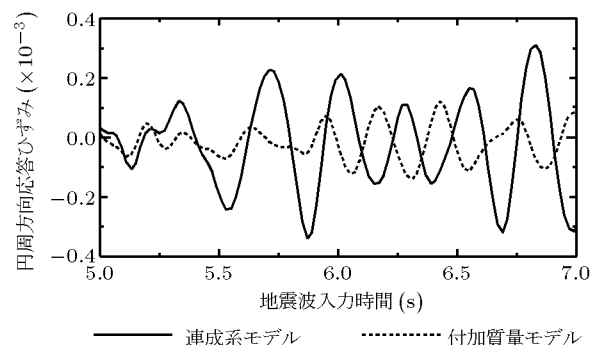


図-3 円周方向応答ひずみの比較 (D/H=1.0)

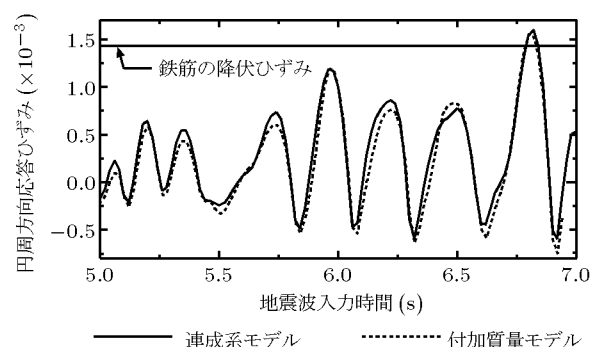


図-4 円周方向応答ひずみの比較 (非線形動的解析)