

I - 10

内容液との連成を考慮したPCタンクの地震応答解析

東北大学 学生員 ○ 江角真也 (株) 安部工業所 大村一馬
東北大学大学院 学生員 小野雄司 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、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ためには、内容液との連成を考慮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¹⁾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）を行い、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）との比較を行った。解析は、PCタンクの変形非線形性を等価剛性で考慮した線形動的解析および材料非線形性の影響を直接考慮した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PCタンクの構造諸元を表-1に示す。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。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。

表-1 PCタンクの構造諸元

内径	側壁高さ	D/H	容量	壁厚
35.5m	10.2m	3.5	10000m ³	0.25m

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

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

ここに、 $P(\xi)$:水面からの鉛直距離 ξ における動水圧、 ρ :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 ξ 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

PCタンクの変形非線形性を等価剛性で考慮する線形動的解析では、側壁および屋根にヤング係数 $E = 3.2 \times 10^4$ (N/mm²)を与える場合(Model1)と、その1/5の値を与える場合(Model2)の2つのケースを想定した。各検討ケースにおけるPCタンクの固有周期を表-2に示した。なお、Model1のヤング係数は、各材料に初期剛性を与えたPCタンクの固有周期と概ね等しくなるように設定している。

表-2 ヤング率および固有周期

	Model1	Model2
ヤング係数 (N/mm ²)	3.2×10^4	6.4×10^3
1次固有周期 (s)	0.130	0.275

非線形動的解析では、鉄筋およびPC鋼材ともに要素の中で平均化された鉄筋比としてモデル化した。その降伏条件としてはVon-Misesの条件を用い、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。コンクリートについては、図-1に示す応力-ひずみ関係を用い、降伏条件にはDrucker-Pragerの条件を適用した。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。なお、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。

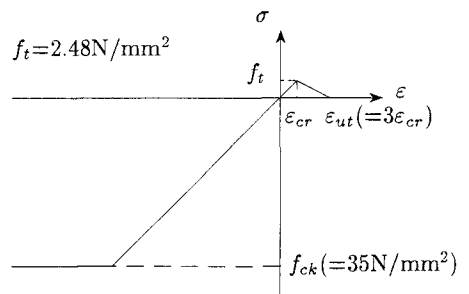


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

(3) 解析条件と入力地震波

線形動的解析では、地震波の各周波数成分に対する周波数応答を求め、フーリエ逆変換することにより時刻歴応答を求めている。非線形動的解析は、直接積分により時刻歴応答を求め、その数値積分法には Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) を用いた。地震波は、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

$D/H=3.5$ 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、側壁中間部の円周方向応答ひずみに着目して、連成系モデルと付加質量モデルを比較した。

Model1 および Model2 に対する線形動的解析結果を、図-2および図-3に示す。両図では、応答の卓越する時間帯を拡大して連成系モデルおよび付加質量モデルの比較を示している。図-2より、各材料が初期剛性を有する PC タンクの固有周期と等しくなるようにヤング係数を定めた Model1 では、両モデルの応答値は非常に良く整合している。しかし、図-3より、タンクが長周期化するにつれて付加質量モデルは応答値を過小に算定していることがわかる。これは連成系モデルでは、タンク側壁の弾性変形に起因する変形圧の影響が考慮されるのに対し、式 (1) および式 (2) に基づく付加質量モデルでは、衝撃圧の影響しか評価していないためである。

次に KSR 波形の振幅を 3 倍にして入力した非線形動的解析を行った。鉄筋の降伏を示す時間帯を拡大した解析結果を図-4に示す。なお、振幅を 1 倍として入力した非線形動的解析では、鉄筋の降伏が生じていないことを確認しており、この場合には図-2と同様、両モデルの応答値は良く整合していた。そして図-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。図-3の結果からも、より大きな非線形挙動をする場合には、両モデルの整合性が失われると予想されるが、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思われる。

4. まとめ

$D/H=3.5$ の PC タンクに対する線形動的解析より、タンク側壁の剛性が低下して長周期化する場合、付加質量モデルは連成系モデルに比べ応答値を過小評価することになり、変形圧の影響が大きくなることを確認した。また、非線形動的解析より、鉄筋の降伏程度の非線形化であれば、付加質量モデルを用いても、連成系モデルによる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

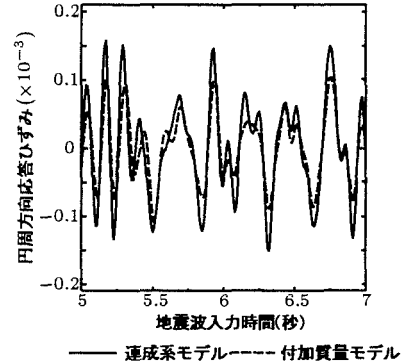


図-2 円周方向応答ひずみの比較 (Model1)

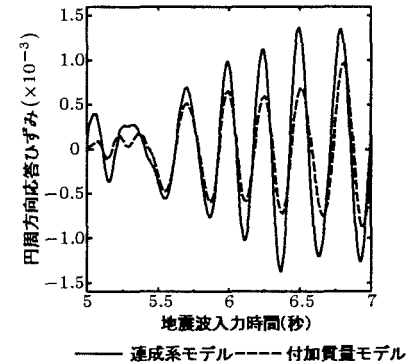


図-3 円周方向応答ひずみの比較 (Model2)

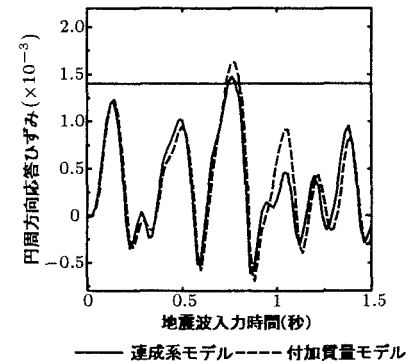


図-4 円周方向応答ひずみの比較
(非線形動的解析)