

(72) PCタンクの地震時弾塑性応答解析

髙比・エス 開発技術部 正会員 ○石田邦洋
 同上 技術研究所 正会員 久保明英

1. まえがき

半球状屋根を有する大容量プレストレストコンクリート造円筒貯水タンク(以下PCタンクと称する。)を立体骨組構造にモデル化し、円周方向に軸引張りで塑性する梁要素、鉛直方向に曲げて塑性する梁要素を用いて弾塑性時刻歴解析を行い、満水時に直下型大強度地震が襲来したとしてPCタンクの挙動を計算した。

PC円筒状造物では、導入するプレストレスの程度によって、鉛直方向と円周方向の塑性順序が替わり、全体の挙動も変わると考えられるが、その塑性挙動についてはまだ十分な研究がなされていないようだ。本稿では、地震時に厳しいと予想される、現行大規模PC貯水タンクを対象とした解析結果を報告する。

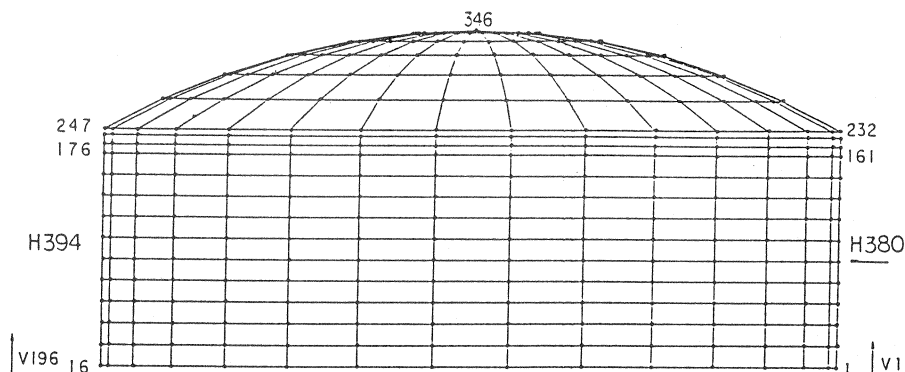


図-1 PCタンクの解析モデル

2. PCタンクの構造寸法と解析モデル

(1) PCタンクの構造寸法

PCタンクの解析モデルを図-1に示す。半径17.75m、有効水深10.2mの半球状屋根を有するPC造円筒貯水タンクを解析対象とする。コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=360\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数 $2.98 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 、ひび割れ発生応力度 $-0.5\sigma_{ck}^{2/3}=-25.3\text{kgf/cm}^2$ 、単位体積重量 2.5tf/m^3 、また側壁厚さ0.25mである。内容水の単位体積重量は 1.0tf/m^3 とし、内容水の地震時の抵抗については、Housnerの方法で換算して壁体質量に加えている。側壁では、鉛直方向と円周方向共にD13を0.25m間隔で内面・外面に配筋する。鉛直方向にはPC鋼棒SBPR930/1080 $\phi 26$ を0.5m間隔で配置し、有効引張り応力度 $\sigma_{pe}=65\text{kgf/mm}^2(0.59\sigma_{pu})$ とする。鉛直方向では満水状態で、水圧による曲げ引張り応力度とプレストレスが打ち消し合うと仮定する。円周方向にはPC鋼より線1T21.8を0.15m間隔で配置し、有効引張り応力度 $\sigma_{pe}=109\text{kgf/mm}^2(0.59\sigma_{pu})$ とする。円周方向では満水状態で、 10kgf/cm^2 の圧縮プレストレスが残っていると仮定する。

(2) 地震時の内容水圧

地震時に壁面に作用する内容水の地震時水圧をHousnerの理論に基づく式(1)で計算し、壁体質量に加えている。当モデルの側壁最下部の地震時水圧は8.6tf/m²となる。式で、P_{so}(y)は地震時水圧(tf/m²)、Rはタンクの半径(m)、hはタンクの水深(m)、ρは水の単位体積重量(tf/m³)、k_Hは水平震度である。

$$P_{so}(y) = \sqrt{3} \rho k_H h \left\{ \frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right\} \tanh \left(\sqrt{3} \frac{R}{h} \right) \dots\dots\dots (1)$$

(3) 立体骨組モデル

PCタンクの半球状屋根と円筒側壁の表面を、節点を結ぶ線で区切り、区切られた領域の壁体を鉛直方向梁と円周方向梁でモデル化し、PCタンク全体を立体骨組構造として解析する。梁は軸方向のねじり剛性、面外方向曲げ剛性及び面内方向曲げ剛性を持つ。半球状屋根の部分の梁については、面外・面内方向曲げ剛性として十分大きい値を設定した。円筒側壁の鉛直方向梁については寸法通りの曲げ剛性を設定した。円筒側壁の円周方向梁については、面外方向曲げ剛性は寸法通り、面内方向の曲げ剛性は標準部で寸法から計算される値の3.1倍に調整した。

調整は、シェル要素を用いたシェルモデル及び立体骨組モデルでスペクトル応答解析を実行し、円周方向応答軸応力が一致するように行った。調整後のモデルの1次の固有周波数は5.34Hz、円周方向応答軸応力185tf/mで、シェルモデルとほぼ一致していた。次に、部材断面積相当のせん断変形を考慮することとして、同じ立体骨組モデルで応答スペクトル解析を行ったところ、1次の固有周波数は4.62Hz、円周方向応答軸応力148tf/mと低減した。シェルモデル、立体骨組モデルで計算した円周方向応答軸応力を図-2に示す。応答スペクトル曲線は道路橋示方書のType-2のI種地盤用、減衰定数5%を用いた。

せん断変形を考慮することとして、立体骨組モデルを用いて弾性時刻歴解析及び弾塑性時刻歴解析を行って比較する。弾塑性時刻歴解析では、側壁円周方向に圧縮荷重下で弾性、ひび割れ発生以上の軸引張りで塑性する梁要素(非対称バイリニア)、側壁鉛直方向の下方から3番目以上の梁を曲げて塑性する梁要素(武田モデル)を用いた。計算にはCRC総研のDyna2Eを使用した。

(4) 入力地震動及び解析手法

時刻歴解析は道路橋示方書のType-2のI種地盤用標準地震波(JMA KOBE N-S)を用い、ニューマークのβ法による直接積分法、構造減衰は減衰定数で5%として剛性比例型で設定し、計算時間刻み0.002秒で行った。

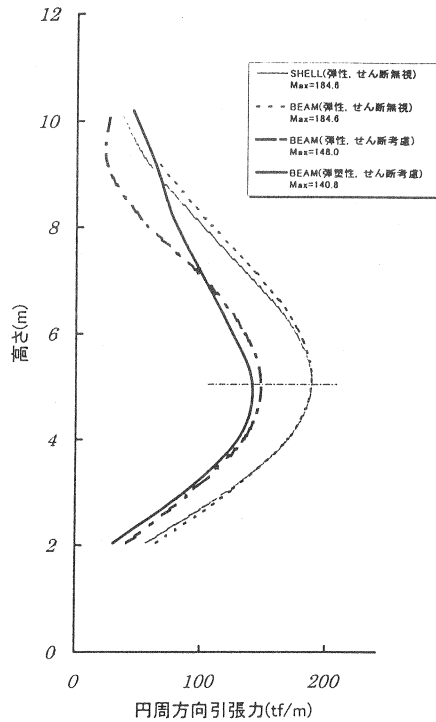


図-2 円周方向の応答軸力(スペクトル応答解析)

算した円周方向応答軸応力を図-2に示す。応答スペクトル曲線は道路橋示方書のType-2のI種地盤用、減衰定数5%を用いた。

(5) 円周方向軸力塑性梁

側壁円周方向に作用する地震時部材力は、曲げは無視出来る程小さく、軸力が大きい。側壁円周方向梁を、図-3に示す様な領域で引張りに抵抗する、圧縮軸力下で弾性、ひび割れ発生荷重以上の軸引張りでバイリニアに塑性化する梁としてモデル化する。図-4に円周方向梁の塑性特性を示す。なお、円周方向には満水時に10kgf/cm²の圧縮プレストレスが残っている。

[仮定]

- ①ひび割れ発生間隔を200mmとする。
- ②長さ 10mmの部分は鋼材で抵抗する。
長さ190mmの部分はコンクリートと鋼材で抵抗する。
- ③引張り抵抗域は45°で広がる。

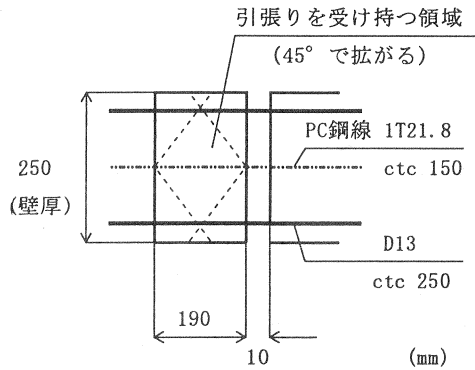


図-3 円周方向引張り抵抗断面模式図

(6) 鉛直方向曲げ塑性梁

地震時、側壁鉛直方向には曲げと軸力が交番作用する。側壁鉛直方向には、満水時に生じる曲げ応力度を圧縮側に治められる程度、また地震時に作用する軸引張り以上のプレストレスが導入されている。鉛直方向梁を、曲げで塑性化する梁‘武田モデル’としてモデル化した。プレストレスの効果を検討し、鉛直方向梁は一定軸力作用下にあり、地震前に曲げ応力が生じていないと仮定している。図-5に鉛直方向梁の塑性特性を示す。

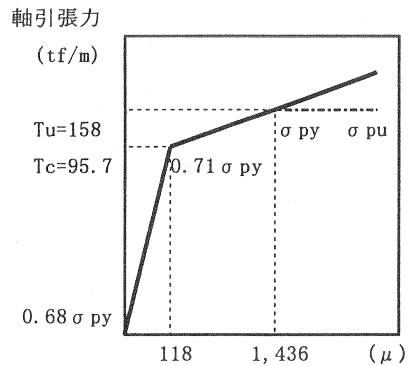


図-4 円周方向梁の塑性特性

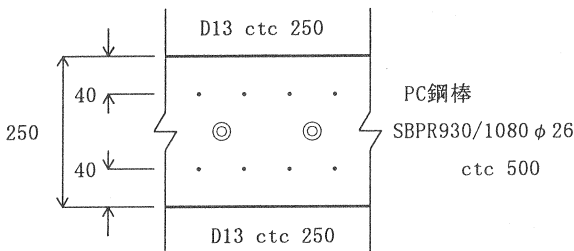


図-5 側壁鉛直方向の鋼材配置

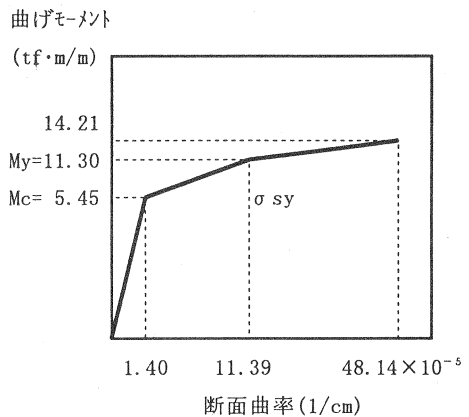


図-6 鉛直方向梁の塑性特性

3. 弾性・弾塑性時刻歴解析

弾性及び弾塑性時刻歴解析で計算した円周方向応答軸引張り応力を図-7, 最大応答値を表-1に示す.

表-1 弾性・弾塑性時刻歴解析の応答値比較

	節点 番号	弾性	塑性
		Linear	N. Linear
最大応答変位	81	32.0	32.6
(mm)	346	8.4	8.4
最大応答加速度	81	32.2	32.4
(m/sec ²)	346	11.1	11.1

	要素 番号	弾性	塑性
		Linear	N. Linear
鉛 軸力 (tf/m)	3	-78.5	-52.6
直 モーメント (tf・m/m)	3	20.7	3.2
円 軸力 (tf/m)	394	-148.0	-140.8
周 歪み (μ)	394	183	1,078

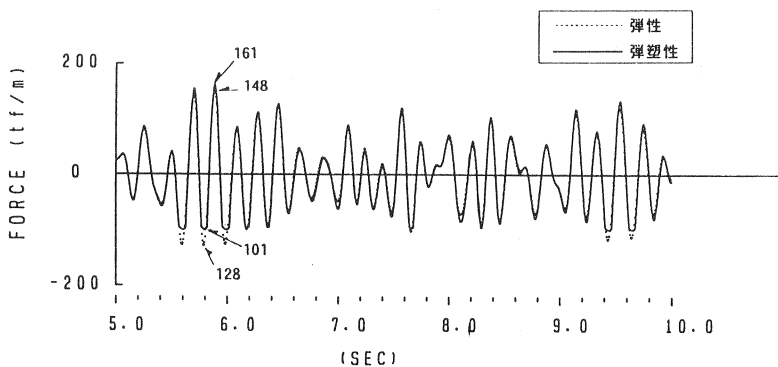


図-7 弾性及び弾塑性時刻歴解析の円周方向応答軸力(要素-380)の比較

4. 結論

(1) 円周方向部材で、引張り軸力でひび割れが発生した時を降伏、PC鋼材応力度が降伏応力度に達した時を終局と定義すると、降伏歪みは $\epsilon_y = 118 \mu$ 、終局歪みは $\epsilon_u = 1,436 \mu$ である。弾塑性時刻歴解析で計算した円周方向の要素-394の最大応答軸引張り応力は $T_p = -140.8 \text{ tf/m}$ 、応答歪みは $\epsilon_{rp} = 1,078 \mu$ であった。これより塑性率を計算すると $\mu_p = \epsilon_{rp} / \epsilon_y = 9.1$ となる。

(2) 弾性時刻歴解析で計算した円周方向の要素-394の最大応答軸引張り応力は $T_e = -148.0 \text{ tf/m}$ 、応答歪みは $\epsilon_{re} = 183 \mu$ となる。これより塑性応答低減率を計算すると $T_p / T_e = 140.8 / 148.0 = 0.95$ となる。エネルギー一定則が成り立つとして塑性率を予想すると $\mu_e = 199 \mu$ となる。

5. まとめ

PCタンクは高い耐震強度をもつ構造物であるが、特に大内径PCタンクでは地震時に大きい円周方向軸引張り力が作用するため、ひび割れ発生による機能損傷を被らぬよう注意が必要である。円周方向のひび割れ発生間隔・伸び性状を仮定した本稿の試算によると、神戸海洋気象台記録を作用させた場合、PC鋼材は $0.92 \sigma_{py}$ 程となり、PC鋼材は降伏以前でひび割れは閉じるが、残留ひび割れを生じる臨界状態となった。

参考文献

1) 久保・由浅：PCタンクの地震時弾塑性応答解析，第7回プレストレストコンクリートの発展に関する論文集，1997.10