

(127) PCタンクの地震時弾塑性応答解析

榑ピー・エス 土木技術部 正会員 ○久保明英
 同上 開発技術部 正会員 由浅直洋

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、鉛直方向に弾塑性梁要素を用いて弾塑性時刻歴解析を実行し、直下型大強度地震襲来時のタンクの挙動を計算した。PC円筒状構造物では、導入するプレストレス量で鉛直方向また円周方向の耐力が変化するため、塑性挙動が異なるものとなる。本稿の計算では、鉛直方向が円周方向より先に塑性すると仮定している。また常時の荷重すなわち満水時の静水圧を無視しており、現行PCタンクと対応させるにはプレストレスを割引いて考える必要がある。

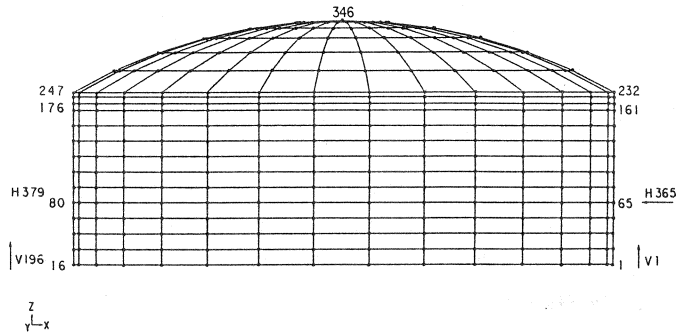


図-1 PCタンクの解析モデル

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 $\sigma_{ck}=300 \text{ kg f/cm}^2$ 、ヤング係数は $3.1 \times 10^5 \text{ kg f/cm}^2$ 、単位体積重量は 2.5 t f/m^3 、また側壁は厚さ 0.25mである。内容水の単位体積重量は 1.0 t f/m^3 とし、内容水の地震時の抵抗については、(2)の方法で換算して壁体質量に加えている。側壁の鉄筋は、外面側と内面側のダブル配筋とし、鉛直方向と円周方向は共にD13を0.25m間隔の配置とする。鉛直方向にはPC鋼棒 $\phi 23$ を1.7本/mで配置する。この場合、鉛直方向のプレストレスとして導入される圧縮緊張力は円周単位長当たり 35.5 t f/m となる。円周方向にはPC鋼より線1T21.8を多い部分で15本/m配置する。この場合、円周方向のプレストレスとして導入される圧縮力は鉛直単位長当たり 463.0 t f/m となる。なお、この円周方向の緊張力は、後に示す道路橋示方書Type-2のI種地盤用標準地震波を用いた弾塑性時刻歴解析の結果得られた最大応答引張力に対し、ひびわれを生じないために必要な量である。ひびわれ発生引張応力は $-0.5 \sigma_{ck}^{2/3} = -22.4 \text{ kg f/cm}^2$ としている。

(2) 地震時の内容水圧

地震時に壁面に作用する内容水の水圧をHousnerの理論に基づく式(1)で計算し、これを重量に換算して壁体重量に加えている。当モデルの場合地震時水圧を換算した重量は側壁最下部で 8.6 t f/m^2 程となる。

$$P_{w0}(y) = \sqrt{3} \rho k_h h \left\{ \frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right\} \tanh \left(\sqrt{3} \frac{R}{h} \right) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $P_{so}(y)$: 地震時水圧 ($t f / m^2$)
 R : タンクの半径(m)
 h : タンクの水深(m)
 ρ : 水の単位体積重量 ($t f / m^3$)
 k_H : 水平震度

(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した。梁は軸方向のねじり剛性、面外方向曲げ剛性およ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約3.5倍に調整した。調整は、シェル要素を用いたPCタンクモデルおよび当該立体骨組モデルで応答スペクトル法による応答計算を実行し、水平2方向の1次の固有周波数が一致し、振動モード形がほぼ一致するように、また節点65の最大応答変位が一致するように行った。なお、調整計算に用いた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%のもので、また内容水を付加質量として考慮した。地震作用方向の1次の固有周波数は8.80Hzで、振動モード形は図-2の弾塑性応答解析の変位形状と似たものとなる。節点65の最大応答変位は5.2mm、また地震作用方向と直角方向の1次振動モードの固有周波数は8.24Hzであった。

円筒側壁の鉛直方向梁には面外方向の曲げで塑性化する弾塑性梁要素を用い、この履歴特性として‘武田モデル’を用いた。

(4) 入力地震動および解析手法

時刻歴応答計算には道路橋示方書(平成8年)のType-2のI種地盤用標準地震波を用いた。ニューマークのβ法を用いた直接積分による時刻歴応答解析法でPCタンクの応答を計算した。計算時間刻みは1msec、PCタンクの構造減衰は減衰定数で5%とし、減衰マトリックスを要素剛性マトリックス比例で計算した。

表-1 鉛直梁の履歴特性値

	軸力 (tf/m)	曲モーメント (tf・m/m)	曲率 (1/m)
ひびわれ	-17.75	3.07	0.760×10^{-3}
鋼材降伏	-44.92	3.23	8.192×10^{-3}
曲げ破壊	-63.21	3.36	49.344×10^{-3}

3. シミュレーション解析

(1) 弾塑性静的震度法解析

PCタンク立体骨組モデルに一樣加速度を水平一方向に静的に作用させ、加速度を0.01Gの上げ幅で増加させて行き、変位と部材力の変化を計算した。弾塑性静的震度法解析の結果を用い、弾塑性時刻歴解析に用いるM-φ曲線を決定した。

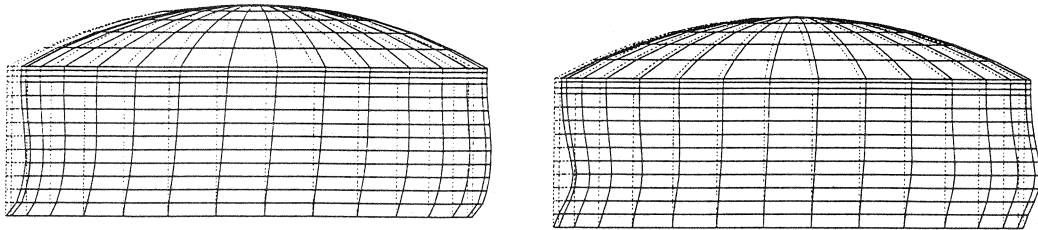
弾塑性静的震度法解析の結果によると、側壁円周方向の梁については、曲げモーメントは微小な値のまま増加しないが、軸力は震度と共に増加する。軸力は地震力入射側壁体で圧縮、反対側で引張りとなる。円周方向には、軸引張力を打ち消す程の圧縮力をPC鋼材を緊張して導入することとし、シミュレーションでは円周方向の梁は弾性梁として扱っている。

側壁鉛直方向の梁については、曲げモーメントおよび軸力は作用震度と共に増加する。軸力は地震力入射側壁体で引張り、反対側で圧縮となる。鉛直方向にはP C鋼材で円周単位長当たり35.5 t f/mの圧縮力が与えられている。ひびわれ発生部材力は、各作用水平震度で計算された引張り(N)と曲げモーメント(M)によるコンクリート応力度がちょうどひびわれ発生応力となる組を選んでいる。鋼材降伏部材力は、ひびわれ発生以後の剛性低下を仮定して弾塑性静的震度法解析を繰り返し行い、計算されたM、Nの組で、平面保持の仮定を用い、コンクリートの引張り抵抗を無視して計算した鉄筋応力度が、ちょうど3,000 k g f / c m²となる組を選んでいる。ひびわれ発生以後鋼材降伏までの剛性は初期剛性に対し比率でk1=0.0054となった。鋼材降伏以後の剛性については初期剛性に対し比率でk2=0.0009とした。鉛直梁の履歴特性値を表-1に示す。

(2)時刻歴応答解析

P Cタンク立体骨組モデルを用い、弾性時刻歴解析と側壁鉛直方向の梁に弾塑性梁要素を適用した弾塑性時刻歴解析を行った。

一様加速度を水平一方向に作用させた場合の静的変形と弾塑性時刻歴解析で計算した動的変形を図-2に示す。弾性および弾塑性時刻歴解析で計算した応答部材力を図-3に、最大応答値を表-2に示す。弾塑性時刻歴解析で計算した最大応答部材力のタンク高さ方向の分布を図-4に示す。



(a)静的震度法解析の応答変形

(b)弾塑性時刻歴解析の応答変形

図-2 静的変形と動的変形の比較

表-2 弾性・弾塑性時刻歴解析の応答値比較

(a)最大応答変位と最大応答加速度

	節点 番号	弾性 Linear	弾塑性 N. Linear
最大応答変位 (mm)	65	17.9	13.9
	346	8.2	5.7
最大応答加速度 (m/sec ²)	65	54.9	43.5
	346	25.5	16.6

(b)最大応答部材力

		要素 番号	弾性 Linear	弾塑性 N. Linear
鉛直	軸力(tf/m)	1	-78.5	-52.6
	モーメント(tf)	1	20.73	3.16
円周	軸力(tf/m)	365	-661.9	-519.9
	モーメント(tf)	365	-	-

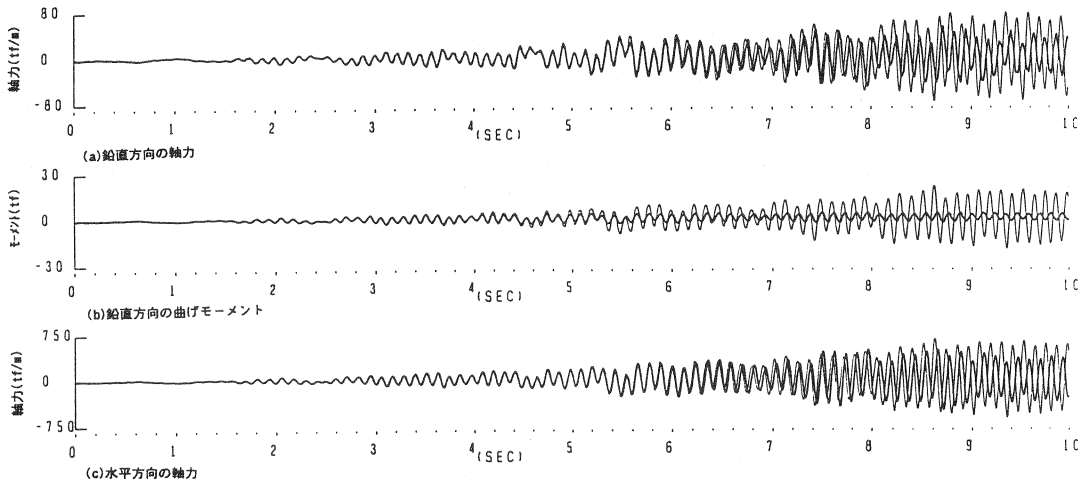


図-3 弾性および弾塑性時刻歴解析の応答部材力の比較

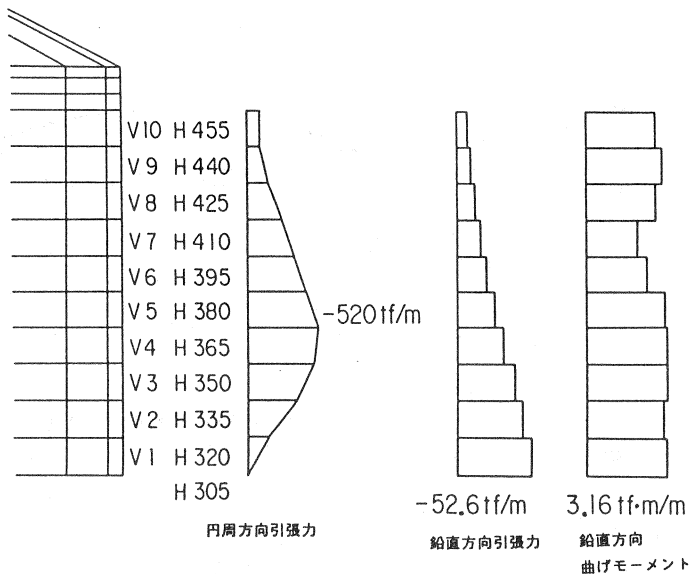


図-4 最大応答部材力の分布

(3) PCタンク側壁の塑性過程

弾塑性静的震度法解析及び弾塑性時刻歴解析の結果得られたPCタンク側壁の塑性過程模式図を図-5に示す。鉛直方向梁を実線、円周方向梁を2点鎖線で表している。同一水平震度を作用させた状態を点線で結んでいる。静的震度法解析の結果では、鉛直方向梁が0.7Gでひびわれ発生、1.75Gで鋼材降伏、2.44Gで曲げ・引張破壊に至っているが、鉛直方向梁が終局に至った状態で円周方向梁に作用している引張力は -334 t f / m であり、円周方向梁はひびわれ発生に至っていない。

弾塑性時刻歴解析で得られた最大応答引張力は、円周方向梁で -520 t f/m 、鉛直方向梁で -52.6 t f/m であった。これらを1点鎖線で結んでいる。円周方向梁にこの引張力が作用した状態を構造終局と考えると、終局状態で鉛直方向梁は鋼材降伏を超え、曲げ・引張破壊にはまだ至らない状態にある。

弾塑性時刻歴解析の結果得られた円周方向梁の最大応答引張力 -520 t f/m が作用した状態で、コンクリートが丁度ひびわれ発生応力($= -22.4 \text{ kg f/cm}^2$)となるように設計すると、必要となるPC鋼材導入緊張力は鉛直単位長当たり 463.0 t f/m となる。

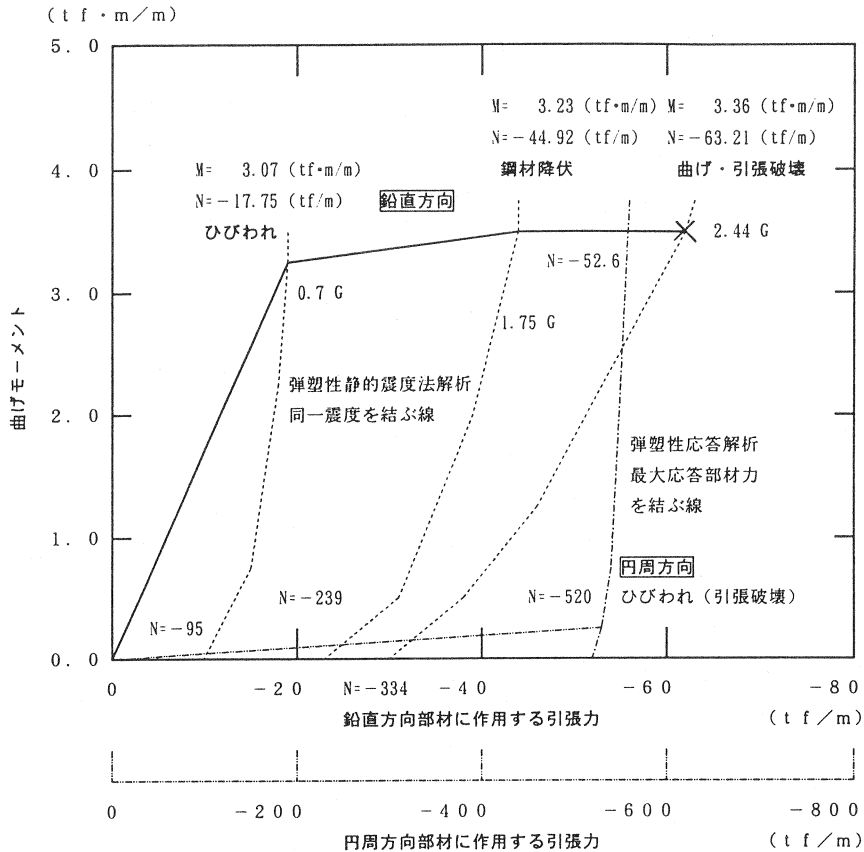


図-5 PCタンク側壁の塑性過程

4. 結論

- (1) 一様加速度を水平方向に静的に作用させた場合、側壁円周方向については、曲げモーメントは微小のままだが、軸力は作用震度と共に増加する。側壁鉛直方向については、曲げモーメントおよび軸力が作用震度と共に増加する。

- (2)図-2に示すように、一様加速度を静的に作用させた場合は全体がドリフトした変形となるが、地震動を作用させた場合は腹が膨れた変形となり、両者で変形状が異なっている。また、図-5に示すように、弾塑性静的震度法解析では鉛直方向が円周方向より先に終局に至っているが、弾塑性時刻歴解析では円周方向が先に限界に至っている。
- (3)道路橋示方書(平成8年)のType-2のI種地盤用標準地震波を用い、大容量貯水タンクに属する規模のPCタンクで弾塑性時刻歴解析を行った。計算結果によると、側壁鉛直方向はひびわれ発生、鋼材降伏を超えるが曲げ・引張り破壊には至らない応答であり、円周方向は最大応答引張力 -520 t f/m となった。円周方向のコンクリート応力をひびわれ発生以下に抑えるには、圧縮力を単位鉛直長当たり 463.0 t f/m 以上与える必要があり、PC鋼より線1T21.8が15本/m以上必要となる。
- (4)弾塑性時刻歴解析で計算した側壁鉛直方向の要素-1の最大応答引張力は -52.6 t f/m であるが、これと一致する応答引張力となる弾塑性静的震度法解析の水平加速度は 2.04 G で、その時の節点346の変位は 6.2 mm である。これを構造終局と定義すると終局変位 $\delta u = 6.2 \text{ mm}$ となる。弾塑性静的震度法解析で計算した要素-1のひびわれ荷重は 0.7 G で、この時の節点346の変位は 2.1 mm である。鉛直梁のひびわれ発生を構造降伏と定義すると $\delta y = 2.1 \text{ mm}$ であり、これより塑性率を計算すると $\mu = \delta u / \delta y = 2.95$ となる。
- (5)塑性化することで応答は低減する。塑性率 $\mu = 2.95$ の場合の円周方向軸力の塑性応答倍率を表-2から計算すると $520/662 = 0.79$ となる。

5. まとめ

PCタンクでは、導入するプレストレス量で鉛直方向また円周方向の耐力が変化し、異なる塑性挙動をとる。本稿の計算では鉛直方向が円周方向より先に塑性すると仮定したが、プレストレス量によっては、鉛直方向より先に円周方向が塑性することとなる。円周方向の塑性では、軸引張力に依り内面まで貫通した、鉛直方向に伸びるひびわれが生じるが、その発生間隔および発生後の変形の集中程度、また瞬時に張力が増加する鋼材の衝撃破断の問題などについては十分解明されていない。一方、円周方向の破壊がそれ程危険とも思えない。すなわち、図-4の地震時の円周方向引張力の分布を観ると、大きい引張力が作用する部分は限定されており、また常時の静水圧分布も三角形分布であり、円周方向の破壊が起こってもその領域は限定されると考えられる。この場合、機能は失われるが構造倒壊に至る危険は小さいと考えられる。

PCタンクの耐震設計方針として、円周方向の塑性(ひびわれ発生)をタンクの機能喪失と考へ、これに対し安全となるよう円周方向のプレストレスを設定することを提案する。ただし、円周方向の必要PC鋼材量が経済性を損なう程多くなる場合には、円周方向を塑性させる方策を採ることで可と考えている。

参考文献

- 1)久保・前田・由浅：PCタンクの地震時弾塑性応答解析，第24回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，1997年7月
- 2)容器構造指針・同解説，日本建築学会，1996年10月改訂
- 3)PCタンクの設計，中国四国農政局土地改良技術事務所監修，平成3年3月