

(71) PCタンクの非線形解析に関する一考察

オリエンタル建設(株) 技術研究所 正会員 ○江口 信三  
同 上 正会員 吉岡 民夫

1. はじめに

プレストレストコンクリートタンク(PCタンク)のような軸対称構造物では、3次元シェル要素や軸対称シェル要素を用いた有限要素法が汎用的である。しかし、これらの有限要素法は、未だ誰でもがいつでも使えるとは言い難く、また、自由度が多くなり、繰り返して計算を前提とする非線形解析では、演算時間が膨大となってしまう。

筆者らは軸対称な円筒形PCタンクを、ある幅で鉛直に切り出した片持ばりに線形領域において等価に半径方向変位をコントロールでき、かつ、ひび割れ発生後のコンクリート引張部材の非線形特性を有する任意の大きさの仮想半径方向部材を水平に接続し、2次元モデルで解析する方法を示した。この解析では、仮想半径方向部材の寸法に応じて、仮想半径方向部材の材料特性を換算する必要がある<sup>1)</sup>。

そこで、仮想半径方向部材の大きさを変えた場合の影響をみるため、仮想半径方向部材の大きさをパラメータとして解析を行った。さらに、本モデルを検証するために、仮想半径方向部材を非線形パネに置き換えて行った解析と比較した。

2. 解析条件

2. 1 パラメータ

図-1に仮想半径方向部材の概念図を示す。今回の解析において、仮想半径方向部材の長さ $l$ 、厚さ $t'$ および側壁部材の幅 $b$ をパラメータとした。パラメータの一覧を表-1に示す。

表-1 パラメータ一覧

	単位:mm			
	$l$	$l$ の分割数	$t'$	$b$
Case1	250	4@62.5	250	1000
Case2	500	4@125	250	1000
Case3	1000	6@167	250	1000
Case4	250	4@62.5	1000	1000
Case5	250	4@62.5	250	2000

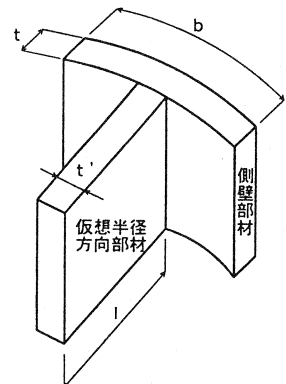


図-1 概念図

2. 2 解析条件および形状

解析に用いたPCタンクの形状は、タンク半径 $a=13.125\text{m}$ 、側壁部材高さ $H=10.0\text{m}$ 、側壁部材厚 $t=0.25\text{m}$ および有効水深 $H_0=9.5\text{m}$ とする。計算に用いた材料諸数値を表-2に示す。鉛直方向PC鋼材は、壁部材の外側から125mmの位置に直線配置とし、その円周方向の配置間隔は443mmである。円周方向PC鋼材は、静水圧が作用した状態で1.0MPaの円周方向軸応力が残るように配置している(図-2参照)。鉄筋は鉛直・円周方向共にD13@300mmで配置している。解析は2次元弾塑性有限要素法プログラムSBETAを用いて行った。要素分割図を図-3に示す。

今回の解析は以下の条件で行った。

- ・引張によるコンクリートの破壊は破壊力学に基づく。
- ・破壊基準はKupferの2軸破壊基準を用いる。
- ・ひび割れ後に圧縮強度の低減を行う。

- ・ ひび割れは分布ひび割れモデル(smearred crack model)とする。
- ・ 鉄筋は分散鉄筋(smearred reinforcement)とする。
- ・ 収束計算は Newton-Raphson 法を用いる

表-2 材料諸数値

	単位	数値
コンクリート		
圧縮強度	MPa	35
引張強度	MPa	2.48
弾性係数	MPa	$2.95 \times 10^4$
ポアソン比		0.2
単位面積当りの破壊エネルギー	MN/m	$0.1 \times 10^{-3}$
鉄筋 SD295A D13		
降伏強度	MPa	300
弾性係数	MPa	$2.1 \times 10^5$
鉛直方向PC鋼材 SBPR930/1080 $\phi$ 26mm		
引張強度	MPa	1100
弾性係数	MPa	$2.0 \times 10^5$
有効応力度	MPa	595.1
円周方向PC鋼材 SWPR19 1S21.8mm		
引張強度	MPa	1850
弾性係数	MPa	$2.0 \times 10^5$
有効応力度	MPa	945.9

鉛直方向プレストレスは、有効プレストレスに相当するひずみを発生させるように、コンクリートとPC鋼材線膨張係数を変えて温度荷重を与えた。その時のPC鋼材の応力-ひずみ関係は、表-2に示す諸数値を満足するように定めた。円周方向プレストレスを温度荷重で与えると、側壁上部の鋼材間隔が広いところで、プレストレスが一様に分布せずに応力集中の影響が生じる。そこで、円周方向プレストレスと静水圧の差、すなわち円周方向余裕応力度に相当する応力を、節点荷重に換算して載荷した。これにより、仮想半径方向部材に円周方向PC鋼材として配置するPC鋼材の応力-ひずみ関係は、有効応力度を原点とし、部材寸法に応じた換算を行った。また、円周方向の鉄筋についても同様の換算を行った。表-3に各ケースにおけるコンクリートおよびPC鋼材の換算した材料諸数値を示す。なお、同表における記号は、図-4に対応している。

表-3 仮想半径方向部材 換算材料諸数値

	コンクリート			PC鋼材				
	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\sigma_{0.84}$ (MPa)	$\sigma_{0.93}$ (MPa)	$\epsilon_{0.84}$	$\epsilon_{0.93}$	$E_p$ (MPa)
Case1	2.67	0.189	42.8	46.3	59.0	0.1596	0.5392	290
Case2	2.67	0.189	85.6	46.3	59.0	0.0798	0.2696	581
Case3	2.67	0.189	171	46.3	59.0	0.0399	0.1348	1161
Case4	0.667	0.0472	10.7	11.6	14.8	0.1596	0.5392	72.6
Case5	5.33	0.378	85.6	92.6	118	0.1596	0.5392	581

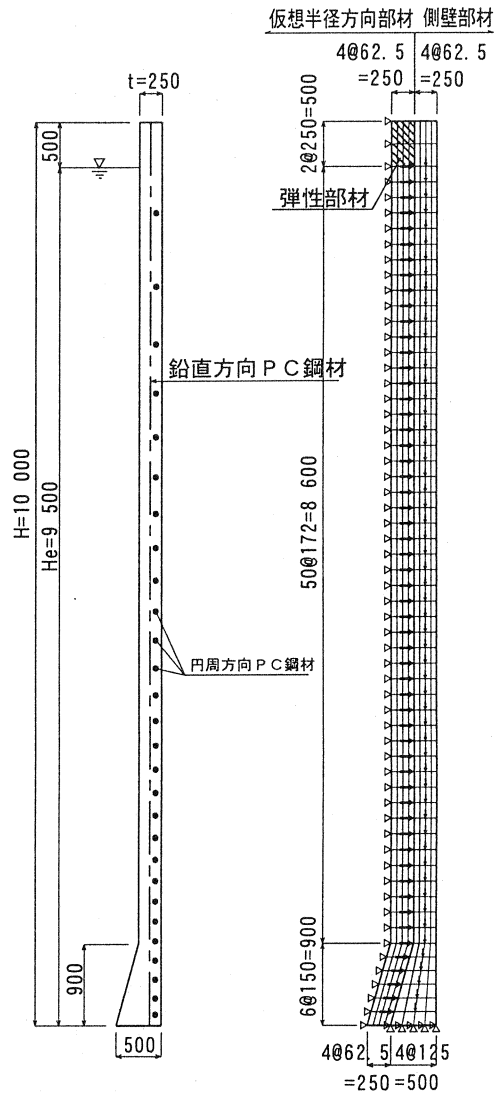


図-2 形状図

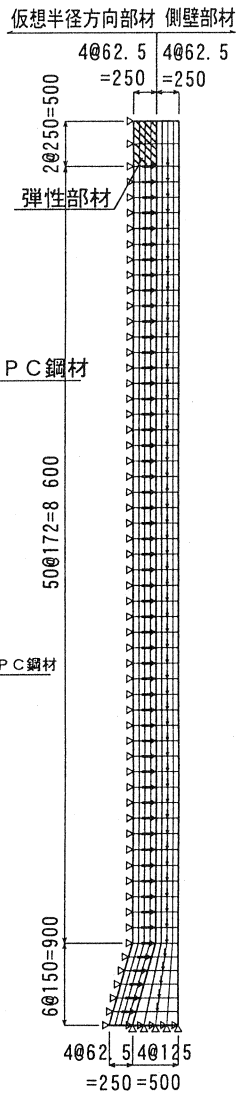


図-3 要素分割図

寸法：mm

2. 3 荷重

荷重は、ステップ1で鉛直方向プレストレス、ステップ2で円周方向プレストレスと静水圧の差に相当する分布荷重を載荷し、ステップ3で水平震度  $K_h=0.2$  に相当する動液圧および等価鉛直方向力を載荷している。動液圧は仮想半径方向部材と側壁部材の境界の節点に、等価鉛直方向力は側壁部材の中心の節点に載荷している。以降、水平震度を 0.01 づつ増加する荷重増分で解析を行った。荷重の詳細については、文献 1) を参照されたい。

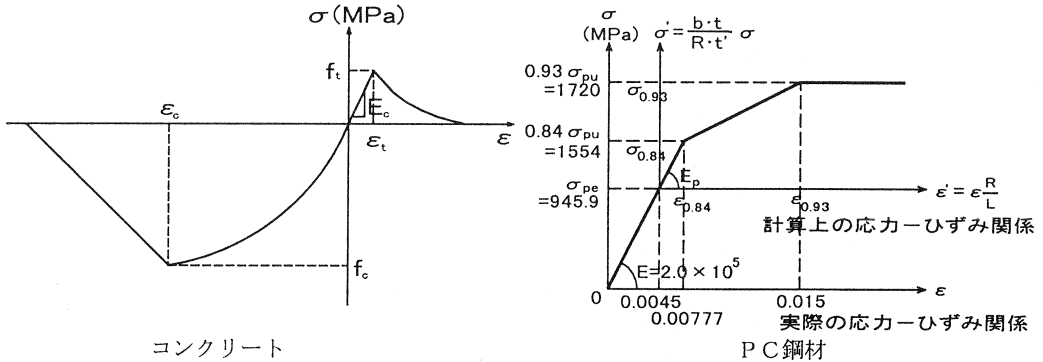


図-4 仮想半径方向部材 荷重-ひずみ関係

2. 4 解析結果

実際のPCタンクでは、側壁上端に屋根およびリング部材があり、側壁上部では剛性が増されていたり、拘束があったりする。今回の解析においては、図-3のハッチをつけた要素は弾性部材とし、ひび割れが生じないようにすることにより、側壁上端部の剛性増加や拘束の影響を考慮に入れた。

図-5に Case1~3 の、下縁から  $y=5.716m$  における水平震度と水平変位の関係を示す。同図において、ひび割れ発生荷重が異なるものの、その差は小さく、計算上の誤差と考えられる。その後の挙動も、ほぼ一致しており、仮想半径方向部材の長さ  $l$  を変えても、影響は小さいと思われる。図-6に Case1,4 および5の、下縁から  $y=5.716m$  における水平震度と水平変位の関係を示す。同図において、ひび割れ発生荷重が一致している。しかし、その直後は収束計算上の誤差で一致していないものの、その差は小さいと思われる。以上の結果より、今回の解析範囲においては、各ケースの水平震度と水平変位の関係はほぼ一致していると考えられ、仮想半径方向部材に寸法依存性はないと考えて良いと思われる。

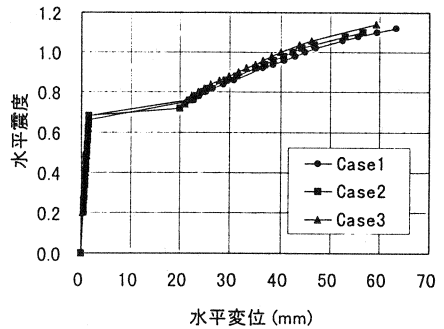


図-5 Case1~3 水平震度-水平変位の関係

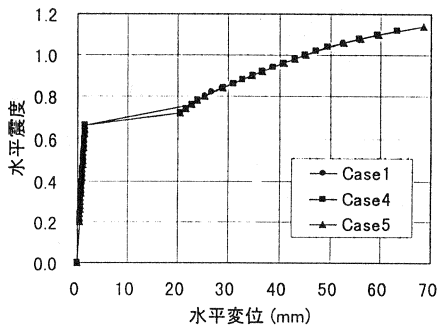


図-6 Case1,4,5 水平震度-水平変位の関係

### 3. 非線形バネ剛性の計算

前節において、仮想半径方向部材を用いた解析モデルにおいて、要素寸法依存性がなく、モデルの妥当性  
が実証された。さらに、その結果を検証するために、従来から良く実施されている円周方向剛性を外部バネ  
で置換するモデル<sup>2)</sup>で解析を実施し、仮想半径方向部材を用いたモデルの結果と比較した。

式(1)~(8)に側壁部材に接続する、非線形バネの荷重-変位関係を求める計算式を示す。非線形バネは、コ  
ンクリートのひび割れ発生時、鉄筋降伏降伏時およびP C鋼材降伏時( $0.84 \sigma_{pu}$ 、 $0.93 \sigma_{pu}$ )の4つの領域に分  
けて計算している。

#### 1) コンクリートひび割れ発生時

換算部材厚

$$t_{trans} = t + A'_s \left( \frac{E_s}{E_c} - 1 \right) + A'_p \left( \frac{E_p}{E_c} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

- ここに、 $t_{trans}$  : 換算部材厚 (mm)
- $t$  : 側壁部材厚 (mm)
- $A'_s$  : 単位高さあたりの鉄筋断面積 ( $\text{mm}^2/\text{mm}$ )  $A'_s = A_s / h$
- $A_s$  : 分担する要素内の鉄筋断面積 ( $\text{mm}^2$ )
- $h$  : 1節点が分担する要素高さ (mm)
- $A'_p$  : 単位高さあたりの円周方向P C鋼材断面積 ( $\text{mm}^2/\text{mm}$ )  $A'_p = A_p / h$
- $A_p$  : 分担する要素内の円周方向P C鋼材断面積
- $E_c$  : コンクリートの弾性係数 (MPa)
- $E_s$  : 鉄筋の弾性係数 (MPa)
- $E_p$  : 円周方向P C鋼材の弾性係数 (MPa)

バネ剛性

$$K_{v1} = k_{v1} \cdot b \cdot h \dots \dots \dots (2)$$

- ここに、 $K_{v1}$  : コンクリートひび割れ発生前のバネ剛性 (N/mm)
- $k_{v1}$  : 単位面積あたりのバネ剛性 ( $\text{N}/\text{mm}^3$ )
- $k_{v1} = \frac{E_c \cdot t_{trans}}{a^2}$
- $a$  : タンク半径 (mm)
- $b$  : 側壁部材幅 (mm)

ひび割れ発生時の変形量

$$\delta_1 = \frac{N_1 \cdot a}{E_c \cdot t_{trans}} \dots \dots \dots (3)$$

- ここに、 $\delta_1$  : ひび割れ発生時の変形量 (mm)
- $N_1$  : ひび割れ発生時の単位高さあたりの軸力 (N/mm)  $N_1 = \sigma_t \cdot t_{trans}$
- $\sigma_t$  : コンクリートの引張強度 (MPa)

ひび割れ発生時の荷重

$$P_1 = K_{v1} \cdot \delta_1 \dots \dots \dots (4)$$

- ここに、 $P_1$  : ひび割れ発生時の荷重 (kN)

2) 鉄筋降伏時

$$A_{s,trans} = A_s + A_p \frac{E_p}{E_s}$$

$$A'_{s,trans} = A_{s,trans} / h$$

$$N_2 = \sigma_y \cdot A'_{s,trans}$$

ここに、 $\sigma_y$  : 鉄筋の降伏強度 (MPa)

$$\delta_2 = \frac{N_2 \cdot a}{E_s \cdot A'_{s,trans}} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\delta_2$  : 鉄筋降伏時の変形量 (mm)

$$P_2 = \frac{N_2}{a} \cdot b \cdot h \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $P_2$  : 鉄筋降伏時の荷重 (kN)

3) PC鋼材降伏( $0.84\sigma_{pu}$ )時( $0.93\sigma_{pu}$ も同じ)

$$N_3 = A'_p \cdot (0.84\sigma_{pu} - \sigma_{pe}) + A'_s \cdot \sigma_y$$

ここに、 $\sigma_{pu}$  : 円周方向PC鋼材の引張強度 (MPa)

$\sigma_{pe}$  : 円周方向PC鋼材の有効引張応力度 (MPa)

$$\delta_3 = (\varepsilon_{0.84\sigma_{pu}} - \varepsilon_{\sigma_{pe}}) a \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\delta_3$  : PC鋼材降伏時の変形量 (mm)

$\varepsilon_{0.84\sigma_{pu}}$  :  $0.84\sigma_{pu}$  時のひずみ

$\varepsilon_{\sigma_{pe}}$  : 円周方向PC鋼材の有効応力度時のひずみ

$$P_3 = \frac{N_3}{a} \cdot b \cdot h \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $P_3$  : PC鋼材降伏時の荷重 (kN)

解析においては、側壁部材の高さを円周方向PC鋼材の本数が同等となるように側壁高さを10区間に分割した。PC鋼材の配置間隔は、その区間の平均値を用いて計算した。図-7に代表的な側壁部材の上段、中段および下段における非線形バネの荷重-変位関係を示す。同図において、上段および中段では、コンクリートひび割れ後の剛性が負勾配となっているが、これは、鉄筋およびPC鋼材量が少ないためである。

4. 解析比較

解析に用いたPCタンクの側壁部材高さは、 $H=9.5m$

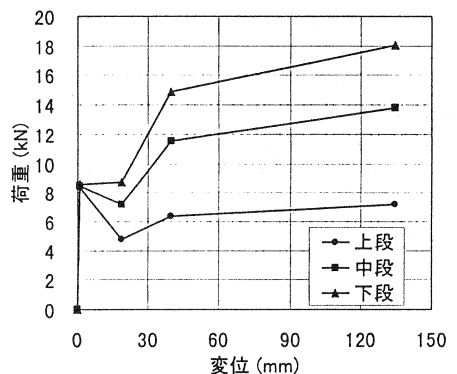


図-7 バネの荷重-変位関係

とし、その他の形状および条件は、Case1と同じとした。仮想半径方向部材モデルと非線形バネモデルを比較するために、弾性範囲内である、水平震度  $Kh=0.2$  に相当する動液圧が作用した時の変形量を比較する。

図-8に、水平震度  $Kh=0.2$  に相当する動液圧が作用したときの、水平方向の変形量を示す。図-8より、中段あたりにおいて若干の差があるものの、良く一致していることがわかる。

図-9に、両モデルの下縁から 5.716m の位置における水平震度と水平変位の関係を示す。仮想半径方向部材モデルのひび割れ発生水平震度は  $Kh=0.72$ 、非線形バネモデルでは  $Kh=0.75$  と若干異なる結果となった。ひび割れ発生後、仮想バネモデルでは急激に変形が増加したが、非線形バネモデルでは、緩やかに増加し、 $Kh=0.85$  あたりで急激に増加する結果となった。その後は、両モデルは比較的一致していると思われる。

### 5. まとめ

円筒形PCタンクを、2次元汎用非線形有限要素法を用いて解析を行い、今回の解析範囲において、下記の結果が得られた。

- 1) 仮想半径方向部材には寸法依存性がなく、仮想半径方向部材の大きさを変更しても、水平震度と水平変位の関係は一致した。
- 2) 仮想半径方向部材モデルと非線形バネモデルにおいて、水平震度  $Kh=0.2$  に相当する動液圧が作用した場合の変形は、中段あたりで若干差があったものの、ほぼ一致した。
- 3) ひび割れ発生水平震度は、仮想半径方向部材モデルにおいて  $Kh=0.72$ 、非線形バネモデルにおいて、 $Kh=0.75$  となり、若干異なる結果となった。
- 4) ひび割れ発生直後に、仮想半径方向部材と非線形バネモデルにおいて、若干の差がみられるものの両者は概ね良い一致を示した。

### 参考文献

- 1)江口、大谷、吉岡、高西：PCタンクの静的非線形解析、第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、P.671~676
- 2)M.J.Priestley;Analysis and Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks,PCI Journal,pp.64-85,July-August,1985

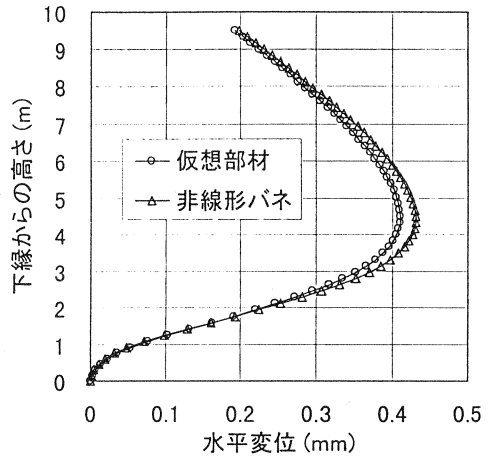


図-8  $Kh=0.2$  時の水平変位

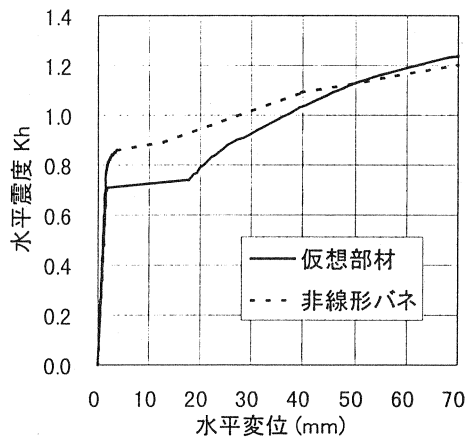


図-9 水平震度-水平変位の関係