

水道用 PC タンクの耐震設計について

近 藤 功 百*

1. はじめに

PC タンクは、その経済性や維持管理の容易性等が評価され、全国の水道事業体で非常に多く採用されるようになった。水道用 PC タンクは、水源から給水装置に至る水道システムの中であって、浄水池または配水池として用いられ、給水量の時間的変動の調整、漏水、停電時等の貯水機能を持つ配水施設の中心施設である。また最近では、東海大地震の危険が予測されることから、これらの多くは、地震災害時の応急給水用の拠点施設として計画されているものもあり、災害時の市民の生命を守る重大な使命を持つことから十分な安全性が必要である。しかし我が国における水道用 PC タンクの歴史は二十数年と比較的浅く、大地震に対する経験も少なく、先の宮城県沖地震（昭和 53 年 6 月）に際しては、水道用 PC タンクの崩壊事故も発生しており、慎重な検討により十分な耐震対策が望まれる。

ここ十数年間における地震関係の研究、耐震設計法および施設・構造物の耐震工法についての進歩発展は著しいものがあるが、水道用 PC タンクの耐震設計法について確立されたものがなく、各事業体または施工会社ごとに独自の仕様により、またそれぞれの手法による設計に基づいて建設されているのが現状である。

ここでは、日本水道協会において、久保慶三郎氏を委員長に斯界の権威者を委員に委嘱し、最新の理論・技術を取り入れ「水道施設耐震工法指針・解説」が発刊された。この「指針・解説」を基に、水道用 PC タンクの最も一般的な地上円筒形タンクについて、耐震設計の概要について述べる。

2. 耐震設計の基本方針

一般に構造物の耐震設計に当たっては、その施設の構造特性、建設地点周辺の地盤条件を考慮し、それらに適合した耐震設計法により設計を行い、地震時の安全性を確認することが必要である。

水道用 PC タンクの構造特性は、地上に設けられることから慣性力の影響が大きく、水そう内の水は H.W.L. と L.W.L. の間で変動する。地震時にはこれらの水は動水圧や水面動揺として影響する。

* 名古屋市水道局業務部緑業務所所長

また構造体に比して、水の重量が大きいので基礎地盤の十分な調査に基づいて、適切な基礎構造を選定することが重要である。

耐震設計の手順は、一般的には図-1 に示すとおりである。

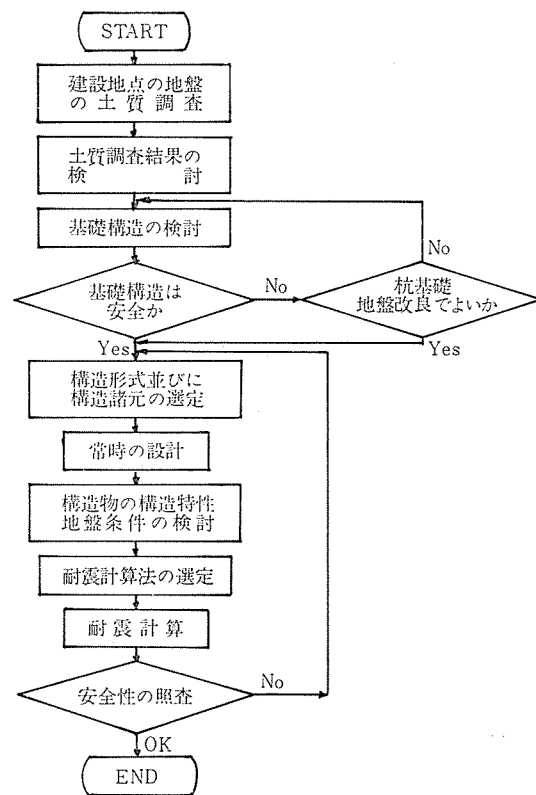


図-1 耐震設計の手順

3. 水道用 PC タンクの固有周期

耐震計算法の選定の目安は、その固有周期によるものとされているが、水道用 PC タンクの固有周期は次式によって求めてよい。

(1) 空虚時 PC タンクの固有周期

$$T = \frac{\pi \cdot h^2}{d} \sqrt{\frac{2q}{3gE} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{d}{h} \right)^2 \right\}} \quad (\text{sec}) \dots (1)$$

(2) 満水時 PC タンクの固有周期

$$T = \frac{\pi \cdot h^2}{d} \sqrt{\frac{2q'}{3gE} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{d}{h} \right)^2 \right\}} \quad (\text{sec}) \dots (2)$$

ここに、

表一2 地盤の種別による補正係数 (A_2)

区分	地 盤 種 別 ¹⁾	係数
1種	(1) 第三紀以前の地盤 (以下岩盤と称する)	0.9
	(2) 岩盤までの洪積層 ²⁾ の厚さが 10m 未満	
2種	(1) 岩盤までの洪積層の厚さが 10m 以上	1.0
	(2) 岩盤までの沖積層 ³⁾ の厚さが 10m 未満	
3種	沖積層の厚さが 25m 未満かつ軟弱層の厚さが 5m 未満	1.1
4種	上記以外の地盤	1.2

注) 1) 地盤種別は一応の目安を示したものであるから、建設地点の状況に応じて係数を判断する。ここでいう地層の厚さは地表面からの厚さとする。
 2) 沖積層の締まった砂層、玉石層をふくむ。
 3) がけくずれなどによる新しい堆積層をふくむ。

$$q' = q + \frac{r \cdot d}{2t} \cdot \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3} \cdot d}{h}\right)}{\frac{\sqrt{3} \cdot d}{h}} \quad (\text{kg/cm}^3)$$

(3) 貯留水の固有周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{d \cdot \coth\left(0.586 \pi \cdot \frac{h}{d}\right)}{0.586 \pi \cdot g}} \quad (\text{sec}) \quad \dots (3)$$

ここに、

- T : 固有周期 (sec)
- h : 水そうの高さ (cm)
- d : 水そうの半径 (cm)
- q : 壁体の単位容積重量 (kg/cm^3)
- r : 水の単位容積重量 (kg/cm^3)
- t : 水そうの側壁厚 (cm)
- E : 側壁コンクリートのヤング係数 (kg/cm^2)
- g : 重力の加速度 (cm/sec^2)

4. 水道用 PC タンクの耐震計算法

地震時の構造物の振動は、構造物の特性によって異なり、地上部の構造物は同じであっても基礎構造や地盤条件が異なれば地震時には異なった挙動を示す。しかし水道用 PC タンクの固有周期は、一般に空虚時で 0.1 sec 以下、満水時でも 0.2 sec 以下のものが大部分であることから、原則的には、震度法の範ちゅうにある。このことから水道用 PC タンクの耐震計算は、震度法によるものとし、設計震度は次式で求める。

(1) 設計水平震度 k_h

$$k_h = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot k_0 \quad \dots (4)$$

ここに、

- k_0 : 標準設計水平震度 0.2 とする。
- A_1 : 地域係数 地域区分 (表一1) による。

表一1 地域係数 (A_1)

地域区分	地域係数 A_1
A	1.0
B	0.85
C	0.7

注) 地域区分は、建設省告示第 1,621 号 (昭和 53 年 10 月 20 日) による。

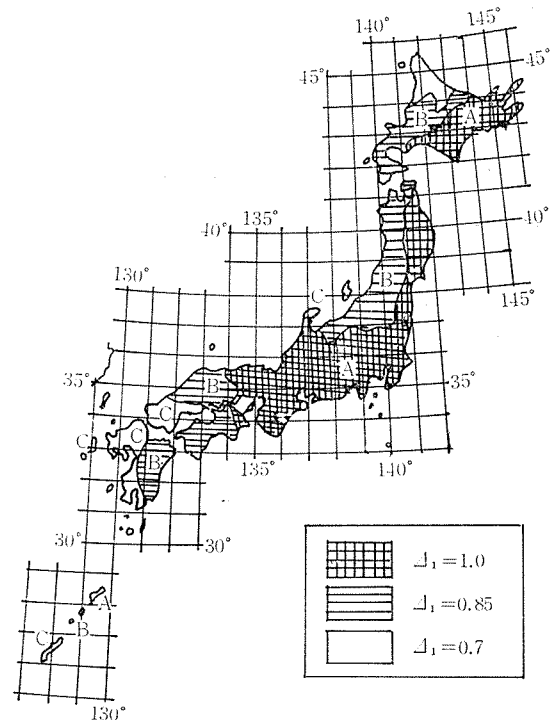
A_2 : 地盤の特性による補正係数 (表一2) による。

A_3 : 構造物の種別による補正係数は 1 とする。

(2) 地中構造物に用いる水平設計震度 k_h'

$$k_h' = \frac{3}{4} A_1 \cdot k_0 \quad \dots (5)$$

A_1 , k_0 は (1) によるものとし、地中構造物の耐震計算に当たっては、計算基盤面の震度 k_h' 、地表面における震度は k_h とする。



図一2 地域区分図

(3) 設計鉛直震度 k_v

$$k_v = \frac{1}{2} k_h \quad \dots (6)$$

(注) 動的解析法について

一般の水道用 PC タンクでは、特に動解析の必要性は少ないが、特に大規模なもの、軟弱地盤上に建設するもので地盤による地震動の増幅作用をより正確に考慮すべき場合などは、前述の震度法により設計されたものについて、適切な解析モデルを設定して動解析により、さらに詳細な地震時挙動を把握することが望ましい。動解析による検討は次のいずれかによる。

- 1) 応答スペクトル法
- 2) 時刻歴応答解析法

動的解析法に用いる地震動の特性は、建設地点の地盤条件やその地域の地震活動の特性を考慮して定める。

5. 地震の影響

水道用 PC タンクの耐震設計に当たっては、地震時の

報 告

影響として次の事項を考慮する。

- 1) 構造物および負荷荷重に起因する慣性力
- 2) 地震時の動水圧
- 3) 地震時土圧
- 4) 地震時水面動揺

ただし、4) の地震時の水面動揺については、水面動揺の固有周期と地震動の長周期成分との相対的な関係にあり、構造物の慣性力とは別途に、水そう上部の余裕高または越流に対する検討を行うものとする。

水道用 PC タンクの地震荷重および分布は、次による。

5.1 構造物および負荷荷重に起因する慣性力

(1) PC タンク側壁の慣性力

半径方向力 $P_r(\theta, z_1)$

$$P_r(\theta, z_1) = q \cdot t \cdot k_h \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

円周方向力 $P_\theta(\theta, z_1)$

$$P_\theta(\theta, z_1) = q \cdot t \cdot k_h \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

q : 側壁コンクリートの単位体積重量 (kg/cm³)

t : 側壁の厚さ (cm)

k_h : 設計水平震度

θ : 加速度の作用方向からの角度

平面および鉛直方向の分布を示せば図-3 のとおりである。

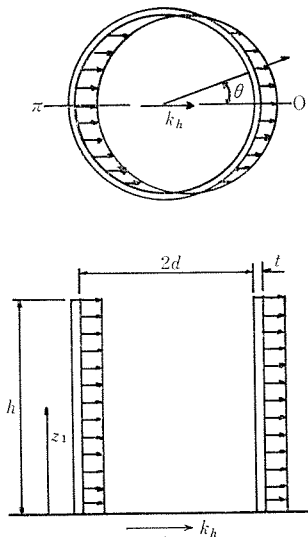


図-3 側壁の慣性力の分布

(2) 負荷荷重による地震力 ($N_{x\theta}$)

水道用 PC タンクの負荷荷重には一般に次のものを考慮し、側壁頂部に作用するものとする。

- 1) ドームによる荷重
- 2) ドームにかかる分布荷重
- 3) 積雪荷重
- 4) 回廊等の荷重

$$N_{x\theta} = \omega / 2 \pi d \cdot k_h \sin \theta \quad (\text{kg/cm}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

ω : 負荷荷重の全重量 (kg)

d : タンクの半径 (cm)

k_h : 設計水平震度

5.2 地震時動水圧

地震時動水圧は、次式によって求める。

(1) 水そう内部の動水圧 $P(\theta, z_1)$

$$P(\theta, z_1) = k_h \cdot r \cdot d_1 \cos \theta \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot I^{(i)} \left(\frac{d_1}{h_1} \right) \cdot \cos \lambda_i \frac{z_1}{h_1} \\ = k_h \cdot r \cdot d_1 \cos \theta I \left(\frac{z_1}{h_1} \right) \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

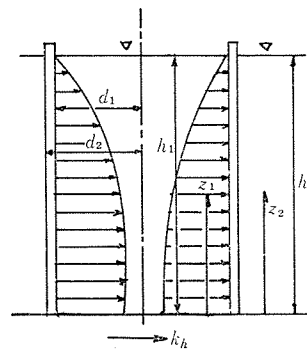
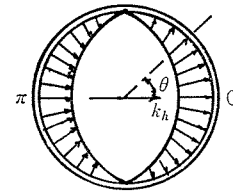


図-4 動水圧図

ここに、

k_h : 水平設計震度

r : 水の単位容積重量 (kg/cm³)

h_1 : 水そうの水深 (cm)

d_1 : " の半径 (cm)

θ : 加速度の作用方向からの角度

i : 0, 1, 2, 3,

$$I^{(i)} \left(\frac{d_1}{h_1} \right) = \frac{2}{\frac{d_1}{h_1}} \cdot \frac{I_1 \left(\lambda_i \frac{d_1}{h_1} \right)}{\lambda_i I_0 \left(\lambda_i \frac{d_1}{h_1} \right) - \frac{h_1}{d_1} I_1 \left(\lambda_i \frac{d_1}{h_1} \right)}$$

$$\lambda_i : \frac{2i+1}{2} \pi = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2} \pi, \frac{5}{2} \pi, \dots\dots\dots$$

I_0, I_1 : 第1種変形ベッセル関数

$I \left(\frac{z_1}{h_1} \right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} I^{(i)} \left(\frac{d_1}{h_1} \right) \cos \lambda_i \frac{z_1}{h_1}$ の値を図-

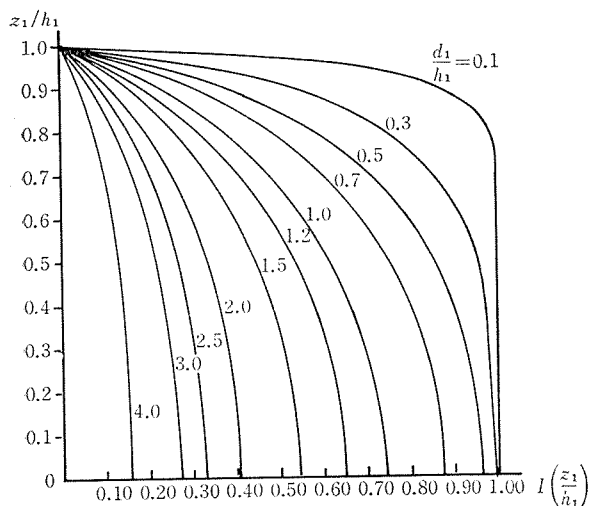


図-5 $I\left(\frac{z_1}{h_1}\right)$ の計算図

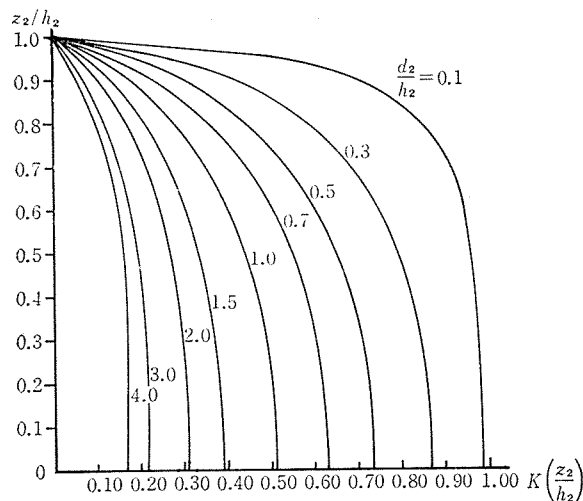


図-6 $K\left(\frac{z_2}{h_2}\right)$ の計算図

5 に示す。

(2) 水そう外部の動水圧

二重水そうの場合にあっては、内側水そうの外部に作用する外部動水圧は次式による。

$$P'(\theta, z_2) = k_h \cdot r \cdot d_2 \cos \theta \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot K^{(i)}\left(\frac{d_2}{h_2}\right) \cdot \cos \lambda_i \frac{z_1}{h_1} \\ = k_h \cdot r \cdot d_2 \cos \theta K\left(\frac{z_1}{h_1}\right) \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、

d_2 : 水そうの外径 (cm)

$$K^i\left(\frac{d_2}{h_2}\right) = \frac{2}{\frac{d_2}{h_2}} \cdot \frac{K_1\left(\lambda_i \frac{d_2}{h_2}\right)}{\lambda_i K_0\left(\lambda_i \frac{d_2}{h_2}\right) - \frac{h_2}{d_2} K_1\left(\lambda_i \frac{d_2}{h_2}\right)}$$

K_0, K_1 : 第2種変形ベッセル関数

$K\left(\frac{z_2}{h_2}\right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} K^i\left(\frac{d_2}{h_2}\right) \cos \lambda_i \frac{z_2}{h_2}$ の値を図-

6 に示す。詳細については、文献 1) の 36 頁 (表 9 (a)) および 44 頁 (表 10(a)) による。

5.3 地震時土圧

地震時土圧は、次による。

- 1) 地震時水平土圧は、物部・岡部土圧公式による。
- 2) 地震時水平土圧は、土の粘着力の有無を考慮して算定するものとする。

算定式については、文献 1) の 1.5.2 による。

水道用の地上式 PC タンクにあっては、地震時における安定計算および満水時の応力等の検討に当たって土圧による効果は期待しない。

5.4 水面動揺

(1) 水面動揺の固有周期

$$T_w = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (\text{sec}) \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g \lambda_n}{d} \cdot \tanh\left(\lambda_n \frac{h}{d}\right)}$$

λ_n は表-3 による (一般に $n=1$ とする)。

表-3 λ_n の値

n	1	2	3	4	5
λ_n	1.841	5.332	8.536	11.71	14.86

d : 水そうの半径 (cm)

h : 水深 (cm)

g : 重力加速度 (cm/sec²)

(2) 液面揺動高さ

$$h_{(n)} = \frac{4\pi^2 D_G d}{g T_w^2} \{0.837 A_{a(n)} + 1\} \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots\dots(13)^*$$

ここに、

$h_{(n)}$: 等価入力波数 n の場合の水面高さ (cm)

D_G : 地震動の振幅 (cm)

d : 水そうの半径 (cm)

T_w : 水の振動の固有周期 (sec)

g : 重力の加速度 (cm/sec²)

$A_{a(n)}$: 等価入力波数 n の値に応じ、表-4 の値を原則とする。

表-4 $A_{a(n)}$ の値 (減衰定数 0.1% の場合)

n	1	2	3	4	5
$A_{a(n)}$	33	6.5	9.3	13	18

* 新耐震設計法 (案) による。

この式は、水そう内の水の基本固有周期に一致した周期を持つ正弦波状の地震動が作用した場合に生ずる水面揺動の高さの最大値を求めるものである。等価入力波数 n は、3~4 波を考慮する。

6. 地震時側壁の断面力の算定

水道用 PC タンクの側壁断面力の算定は、薄肉円筒シェル構造として行われるが、地震時における地震力は、非対称荷重として作用することから解析が複雑になる。

このことから原則として有限要素法を用いた、震度法による静解析とする。有限要素法による解析は、解析モデルにより種々の方法があるが、タンク側壁の解析法としては、薄肉円筒シェル要素による解析が、要素の形状が正確に表現できる等精度の高い解が得られることから、薄肉円筒シェル要素を用いた有限要素法によることを原則とする。

薄肉円筒シェル要素による有限要素法の概要を示せば次のようである。

6.1 有限要素法の概要

円筒 PC タンクを図-7 に示すように、軸対称シェルとして、対称軸に垂直で相互に近接する2つの平面で切断し、その切断線を1つの節線と考え、節線で互いに連結した円筒要素の集合体と考える。

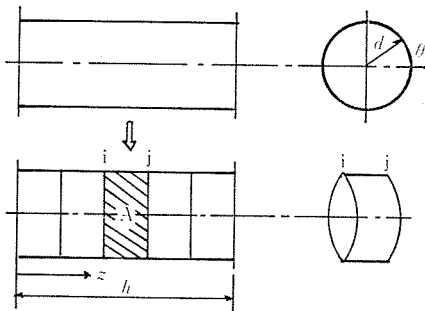


図-7 円筒タンクの円筒要素モデル

今軸対称シェルに非対称荷重が作用する場合には、殻(から)の中央断面上の点の移動を表わすためには、変位3成分 u (軸方向変位), v (円周方向変位), w (半径方向変位) および回転角 β が必要であり、これに対応する外力は、 V, T, H および曲げモーメント R である。今代表要素Aについて、節線変位および要素変位を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{節線 } i \{ \vec{u} \}_i &= [u_i, v_i, w_i, \beta_i]^T \\ \text{節線 } j \{ \vec{u} \}_j &= [u_j, v_j, w_j, \beta_j]^T \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

$$\begin{aligned} \text{要素A } \{ \vec{u} \}_A &= [\{ \vec{u} \}_i, \{ \vec{u} \}_j]^T \\ &= [u_A, v_A, w_A, \beta_A]^T \dots\dots(15) \end{aligned}$$

ここに、

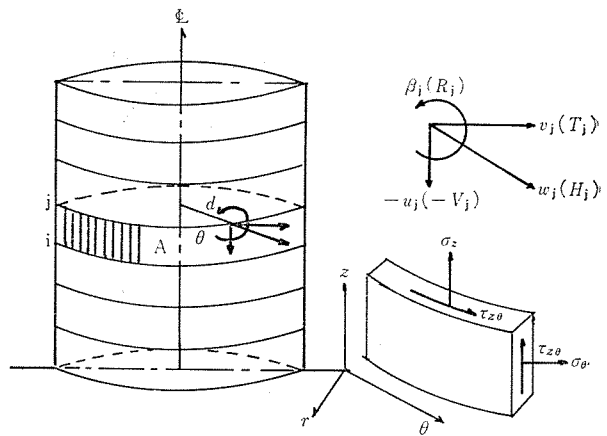


図-8 要素の変位、外力成分および応力成分

- u_A : 軸方向変位
- v_A : 円周方向変位
- w_A : 半径方向変位
- β_A : 回転角

これに対応する節線外力および要素外力を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{節線 } i \{ \vec{f} \}_i &= [V_i, T_i, H_i, R_i]^T \\ \text{節線 } j \{ \vec{f} \}_j &= [V_j, T_j, H_j, R_j]^T \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

$$\begin{aligned} \text{要素A } \{ \vec{f} \}_A &= [\{ \vec{f} \}_i, \{ \vec{f} \}_j]^T \\ &= [V_A, T_A, H_A, R_A]^T \dots\dots(17) \end{aligned}$$

ここに、

- V_A : z 軸方向力
- T_A : 円周方向力
- H_A : 半径方向力
- R_A : 曲げモーメント

次に式(14)~(17)で定義された変位と外力が、円周方向にフーリエ級数に展開できたとして、これを要素Aについて示せば、次式で示される。

$$\begin{aligned} \{ \vec{u}(z, \theta) \}_A &= \begin{pmatrix} u_A(z, \theta) \\ v_A(z, \theta) \\ w_A(z, \theta) \\ \beta_A(z, \theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{n=0}^m u_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m v_{nA}(z) \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m w_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m \beta_{nA}(z) \cos n\theta \end{pmatrix} \\ &= \sum_{n=0}^m \begin{pmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin n\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos n\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos n\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{nA}(z) \\ v_{nA}(z) \\ w_{nA}(z) \\ \beta_{nA}(z) \end{pmatrix} \\ &= \sum J_n \{ \vec{u}_n(z) \}_A \dots\dots(18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{\vec{f}(z, \theta)\}_A &= \begin{pmatrix} V_A(z, \theta) \\ T_A(z, \theta) \\ H_A(z, \theta) \\ R_A(z, \theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{n=0}^m V_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m T_{nA}(z) \sin n\theta \\ \sum_{n=0}^m H_{nA}(z) \cos n\theta \\ \sum_{n=0}^m R_{nA}(z) \cos n\theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin n\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos n\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos n\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{nA}(z) \\ T_{nA}(z) \\ H_{nA}(z) \\ R_{nA}(z) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= \sum J_n \{\vec{f}_n(z)\}_A \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 $\{u_n(z)\}_A$, $\{\vec{f}_n(z)\}_A$ は要素 A の z 方向の変位および外力の分布を示す。

なお本解析法の詳細については文献 4), 5) を参照すること。また、本解析法の解析プログラムは、NASTRAN, WILSON をはじめ多くの構造解析プログラム中に備えられており、実際の計算を行う場合はこれらを利用すればよい。

この解析法によって求められる応力成分は、軸方向応力 (σ_z), 円周方向応力 (σ_θ) およびせん断力 ($\tau_{z\theta}$) である。

6.2 入力データ

実際の計算に当たっては、プログラムのマニュアルに従ってデータを入力するが、一般には次のものが必要である。

- 1) 要素分割, 形状データ
- 2) 物性値データ
- 3) 荷重条件
- 4) 拘束条件

円筒 PC タンクの入力データの概要を示せば、次のようである。

(1) 要素分割

水そうを薄肉円筒シェル要素に分割する。分割方法は荷重条件の厳しい下端部では細かくし、上方に向かうに従って大きくしてもよい。水そうの寸法にもよるが、水そうの下端部から 5m ぐらいまで要素幅を 50 cm, それ以上については 100 cm 程度を標準としてよい。

(2) 物性値

物性値は、次による。

- 1) コンクリートのヤング係数は表-5 による。
- 2) " の単位体積重量は表-6 による。
- 3) " のポアソン比は、1/6 とする。

表-5 コンクリートのヤング係数

	(kg/cm ²)						
σ_{ck}	210	240	270	300	400	500	600
E_c	2.6×10^5	2.7×10^5	2.85×10^5	3.0×10^5	3.5×10^5	4.0×10^5	4.5×10^5

表-6 単位体積重量

種 別	単位体積重量 (t/m ³)
無筋コンクリート	2.3
鉄筋コンクリート	2.4
プレストレストコンクリート	2.45
モルタル	2.1

(3) 荷重条件

地上水そうの薄肉円筒シェル構造物では、①地震時動水圧, ②地震時側壁の慣性力, ③ドーム, 負荷荷重による慣性力について考慮する。

i) 地震時動水圧 $P_r(\theta, z_1)$

地震時動水圧は、前述の式 (10) による。円周方向には $\cos \theta$ 分布, 深さ方向には $I\left(\frac{d_1}{h_1}\right)$ の関数の分布形状を示す半径方向に作用する荷重である。

ii) 側壁の慣性力 P_2

地震時の側壁による慣性力は、式 (8), 式 (9) により

$$P_2 = (P_{2r} + P_{2\theta}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots \dots \dots (20)$$

iii) 負荷荷重による慣性力 $N_{x\theta}$

負荷荷重は、ドームの自重, 雪荷重, 群集荷重, 手摺等付属施設の重量による荷重であり、頂部の要素に入力する。式 (9) による円周方向には $\sin \theta$ 分布, 軸方向には $\cos \theta$ 分布の荷重として入力する。

iv) 等価節線荷重

前述の i) 動水圧, および ii) 側壁慣性力は、各要素に対する等価節線荷重として入力する。

等価節線荷重の算定は、円周方向に対してはフーリエ積分し、軸方向に対しては直線近似により、以下に示すように等価な集中荷重 (p_1, p_2) に変換して求める。

深さ方向……直線近似

$$\left. \begin{aligned} p_i &= 1/6 \{2f_{(zi)} + f_{(zj)}\} l \text{ (kg/cm)} \\ p_j &= 1/6 \{f_{(zi)} + 2f_{(zj)}\} l \text{ (kg/cm)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (21)$$

p_i, p_j を円周方向にフーリエ積分して、等価節線荷重

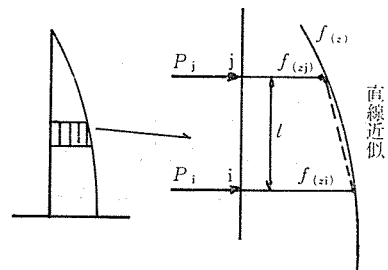


図-9 等価節線荷重の算定

P_i, P_j を求めると

$$\begin{aligned} P_i &= p_i \cdot \pi d_1 = 1/6 \{2 f_{(zi)} + f_{(zj)}\} \pi d_1 l \text{ (kg)} \\ P_j &= p_j \cdot \pi d_1 = 1/6 \{f_{(zi)} + 2 f_{(zj)}\} \pi d_1 l \text{ (kg)} \end{aligned} \dots\dots\dots(22)$$

ここに、

- d_1 : 円筒要素の半径 (cm)
- l : 要素の幅 (cm)
- $f_{(zi)}, f_{(zj)}$: i 点, j 点における外力の分布荷重強度 (kg/cm²)

(4) 拘束条件

拘束条件は、側壁と底版の支承条件に応じて次による。

$z=0$ において、

$$\left. \begin{array}{l} \text{固定支承} \quad u=v=w=\beta=0 \\ \text{ヒンジ支承} \quad u=v=w=0 \\ \text{自由支承} \quad u=v=0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

水道用 PC タンクでは、一般にドーム等の屋根を設けるが、この場合にあっては、その取付け部の条件に応じて、頂部要素の剛性を増加するか、または前述の拘束条件を加えればよい。

6.3 安全性の照査

安全性の照査に当たっては、常時の応力と前述の地震応力を加え、それぞれ地震時の許容応力度以内にあることを確かめる。PC タンクの許容応力度は、それぞれの荷重の組合せに応じて、文献 3) によるが、地震時の割増係数は 1.5 とする。

なお本解析法においては、軸方向応力 (σ_z)、円周方向応力 (σ_θ) およびせん断応力 ($\tau_{\theta z}$) であるが、支持部が固定法による場合には、本解析法では評価できない、半径方向応力 (σ_r)、断面内中立軸に沿うせん断応力 (τ_{rz}) が支持部に生ずるので、十分な配筋を行う等の配慮が必要である。

その他に、ヒンジ支持の場合には地震時のベースシヤーに対する検討が必要であり、自由支持の場合にあっては地震時のベースシヤーおよび側壁の転倒に対する検討が必要である。

6.4 水そう基礎、支持部の評価方法

前述の「薄肉円筒シェル要素を用いた有限要素法」による解析では、水そう支持部の解析精度が落ち、また解析できない応力が生ずる。

また、基礎地盤等を含めた解析はできないのでこれらの解析が必要な場合には、「3 角要素等による、非対称荷重を受ける回転体としての有限要素法」による解析 (文献 6) 参照) を行うことが望ましい。

7. 安定計算

安定計算は、地震時の動水圧、負荷荷重および躯体の

慣性力、底版にかかる動水圧を考慮して行う。

この場合の地震力の算定には、Housner の計算式 (文献 1), 1.13.2 を参照) が簡明であり、これによってよい。

安定計算に当たっては、水そうを剛体として扱い、支持力、転倒、滑動および変位量の照査を行う。直接地盤上に設ける場合の概要を示せば次のようである。

7.1 支持力

地盤強度から決まる許容支持力は、荷重の偏心傾斜を考慮した地盤の極限支持力を用い次による。

$$Q_a = \frac{1}{n} Q_u \text{ (kg)} \dots\dots\dots(24)$$

ここに、

- Q_a : 地盤の許容支持力 (kg)
- n : 安全率、原則として 2 とする。

7.2 転倒

基礎底面における荷重の作用位置は、地震時において基礎外縁端より 1/6 内側にあればよい。

7.3 滑動

滑動抵抗は、基礎底面と地盤との間の粘着力および摩擦角によって次による。

$$H_u > n H_g \dots\dots\dots(25)$$

ここに、

- $H_u = C_B' A' + P \tan \phi_B$
- H_g : 地震時水平力 (kg)
- H_u : 滑動抵抗力 (kg)
- P : 底面に作用する鉛直力 (kg)
- A' : 底面の有効面積 (cm²)
- C_B' : 底面と地盤との粘着力 (kg/cm²)
- ϕ_B : 底面と地盤との摩擦角 (度)

コンクリートと土……土の内部摩擦角の 2/3
 “ と岩盤…… $\tan \phi_B = 0.6$

n : 安全率、原則として 1.2 とする。

8. おわりに

水道用 PC タンクの耐震設計の概要について述べたが、PC タンクについては、施工会社により構造、施工方法に相違があり、立地条件もそれぞれ異なることから、実際の設計に当たっては各々の特性に応じた検討が必要である。また最近の耐震に関する研究、技術の進歩はめざましく、特に種々の地震動入力を用いた動解析により地震時の挙動の把握が可能になる等耐震対策の向上に大きく寄与している。しかし PC タンクについては、入力地震動、水と構造物および基礎地盤との連成等まだ不明な面も多く、より適切な解析法の確立が望まれる。

この文は、「水道施設耐震工法指針・解説」に基づい

ており、末尾ながら久保委員長はじめ委員の方々に感謝いたしますとともに、紙面の都合で省略した部分、また筆者の不勉強のため適切でない部分もあらうと思われますので、皆様の御教授をお願い申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1979年 版
- 2) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案），土木研究技術資料第 1185 号，昭和 52 年 3 月
- 3) 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標準仕様書，昭和 55 年 3 月
- 4) 川股：シェル構造解析，日本鋼構造協会，培風館
- 5) 岩楯，松尾，栗原：薄肉円筒シェル要素を用いた有限要素法とその応用，電力中研技研報告 No. 71012
- 6) 桜井，栗原，岩楯，矢島：PC 調圧水槽の耐震性の検討，電力中研技二研究報告 No. 72509

◀刊行物案内▶

第 21 回研究発表会講演概要

- 体 裁：B 5 判 52 頁
 定 価：1500 円 送 料：250 円（巻末の 200 円は誤記につきお詫びして訂正いたします）
 内 容：(1) PC 鋼棒の遅れ破壊特性について，(2) 鋳物定着具のコンクリート耐荷性能について，(3) アンボンド工法用定着具の低サイクル疲労試験法について，(4) アンボンド工法用 CCL 定着具の性能試験，(5) 海洋コンクリート構造物の基礎的研究（その 2 接合部の動的挙動），(6) コンクリートの自己ひずみによる PC 架構応力の略算法，(7) PC 中空床版曲線橋の解析と実験，(8) プレストレスト鉄筋コンクリートはりの長期曲げひび割れ幅について，(9) 補強筋をもつ PC 鋼材定着部の破壊機構および強度について，(10) PRC 梁断面の履歴性質に関する解析的研究，(11) II，III 種 PC 桁の実用化に関する研究，(12) III 種 PC はりの力学的性質に関する基礎研究，(13) 横補強コンクリートによるアンボンド梁の靱性改善，(14) 超高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，(15) PC 板埋設型枠工法に関する研究，(16) 「特別講演」プレストレストコンクリートと建築（特別講演に限り概要はありません），(17) 出雲大社新神楽殿の設計・施工，(18) 一宮地方総合卸売市場の構造設計と施工概要，(19) 大阪国際空港誘導路の PC プレキャスト版舗装工事報告，(20) 下路 PC 桁の押出し工法による架設および試験（仙山線・上杉山架道橋），(21) 鳥飼連絡線真砂 PC 工事，PC 単純箱桁ブロック工法の施工について，(22) PC 鉄道橋の支承部の補修について，(23) 鹿島線潤沼川橋りょうの施工について，(24) 押出し工法による九戸坂橋の設計と施工について，(25) 一本杉公園 PC 斜張橋の設計施工について

◀刊行物案内▶

プレストレスト コンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題

- 体 裁：A 4 判 116 ページ
 定 価：1500 円 送 料：450 円
 内 容：(1) PC 橋の施工開始前の諸問題，(2) PC 橋の工事ならびに施工管理について，(3) 新しい PC 設計方法について，(4) 最近の話題の橋梁
 お申込みは代金を添えて，(社)プレストレストコンクリート技術協会へ