

# PCタンクの設計と施工

〔その1. PCタンク（水槽）の設計について〕

中 條 友 義\*  
富 岡 省 二\*

講 座

## 1 まえがき

プレストレストコンクリートタンク（以下 PC タンクという）は、一般に屋根、側壁および底版からなっており、側壁は円筒形状である。屋根はタンクの中の貯水が雨水等によって汚染されないように設けられるもので、円筒状側壁上面全体を覆う構造が一般的で、屋根の構造はドーム形式を用いることが多い。構造的には尾根底版は通常の鉄筋コンクリートで、円筒状の側壁は水密性を保つために、円周方向、鉛直方向ともプレストレストコンクリート構造となる。ただし必ずしも側壁鉛直方向はプレストレストコンクリート構造でなくともよい。本講座では以上述べた円形ドーム形式の PC タンクに限定して設計の概要を紹介することにする。

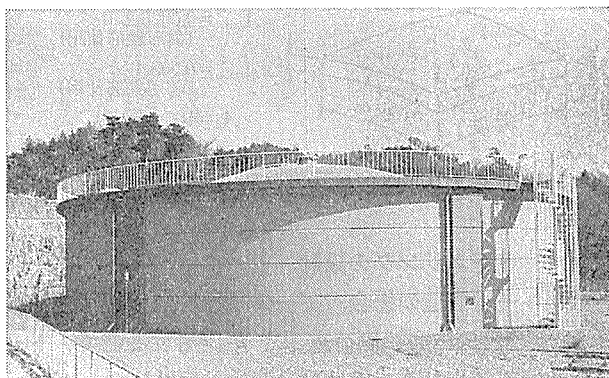


写真-1

## 2 設計の手順

設計については、図-1 に示すようなフローチャート

\* 日本鋼弦コンクリート（株）

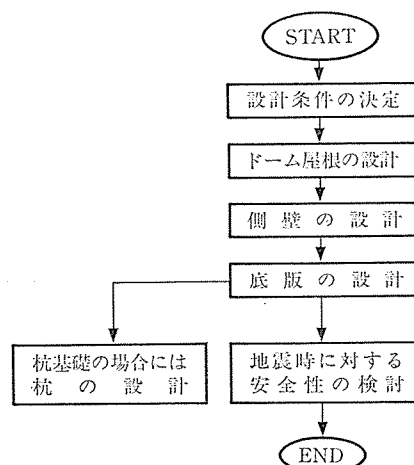


図-1 PCタンク設計のフローチャート

に従って進めればよい。

## 3 設計条件の決定

設計条件については、タンクの計画有効容量から表-1のように決定される。表の中のタンク形状寸法については、図-2のタンク立面図を参照のこと。

## 4 ドーム屋根の設計

### (1) ドームの設計

ドームの最小厚さは 8 cm とする。ドームライズスパン比は 1/6~1/10（ライズ、スパンについては図-3、図-4 参照）を標準とする。ライズが大きければ応力度は小さくなるが、コンクリート打ちにあたってドームの縁端部付近では特別な方法を採用する必要があるほど、その傾斜が急になる。一方ライズが低いと施工は容易であるが、作用する応力度は大となる。スパンとライズとの

表-1 設計条件の決定事項

構造形式	円形ドーム屋根付きプレストレストコンクリート構造		
形状寸法	有効容量	$V=$ (t)	
	内径	$D=$ (m)	
	有効水深	$H=$ (m)	
	全水深	$H'=$ (m)	
	ドーム半径	$R=$ (m)	
	側壁高	$h_1=$ (m)	
	側壁厚	$t_1=$ (m)	
	底版厚(側壁部)	$t_2=$ (m)	
底版厚(中央部)	$t_3=$ (m)		
側壁下端の支持条件	自由, ヒンジ, 固定のいずれかを選択		
設計荷重	単位重量	プレストレストコンクリート	2.45 t/m <sup>3</sup>
		鉄筋コンクリート	2.4 t/m <sup>3</sup>
		無筋コンクリート	2.3 t/m <sup>3</sup>
		モルタル	2.1 t/m <sup>3</sup>
		水	1.0 t/m <sup>3</sup>
		土	1.8 t/m <sup>3</sup>
設計震度	$KH=4_1 4_2 4_3 k_0$ $4_1$ : 地域係数 $4_2$ : 地盤係数 $4_3$ : 構造物係数 $k_0$ : 標準設計水平震度=0.2		
ドーム積載荷重	$w$ (t/m <sup>2</sup> )		
材料強度および許容応力度	プレストレストコンクリート, 鉄筋コンクリート, PC鋼材, 鉄筋については, 水道用プレストレストコンクリート標準仕様書(昭和55年3月, 日本水道協会)参照のこと。		

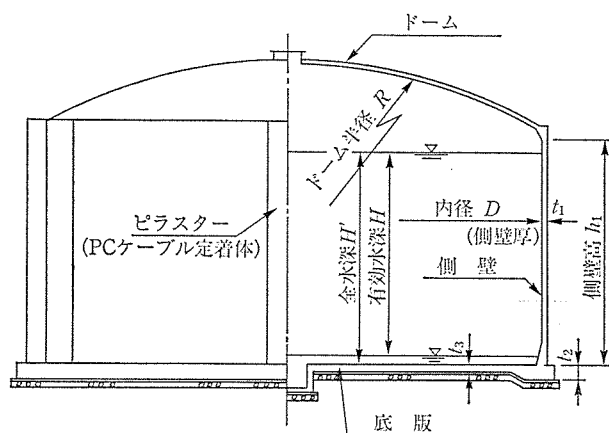


図-2 立面図

比を 1/6~1/10 程度とすれば堅練りコンクリートを施工すると上面型枠は特に必要とならない。ドームに作用する荷重は一般に自重, 積載荷重, プレストレス力, 地域によって雪荷重等である。ドーム構造の設計は弾性球面シェル理論により解析し, 構造は鉄筋コンクリート構造とする。弾性球面シェル理論によりドームに働く経線および緯線方向の膜応力を求め, その膜応力が許容軸圧縮応力度以内であるか否かを確認する。なおドームに配筋する最小鉄筋量は, 経線緯線の両方向とも普通鉄筋使用の場合, 断面積の 0.3% 以上, また異形鉄筋使用の場合, 断面積の 0.25% 以上配筋することにする(図-5 参照)。

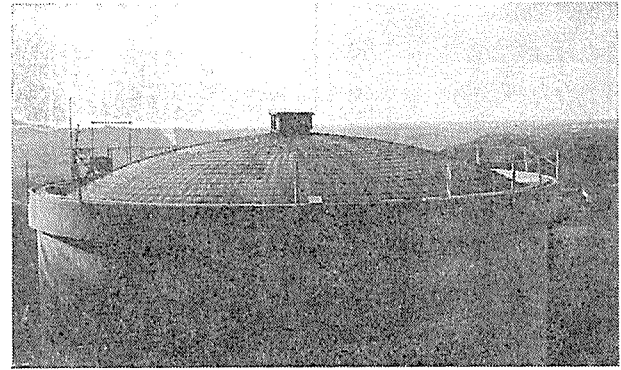


写真-2 屋根工

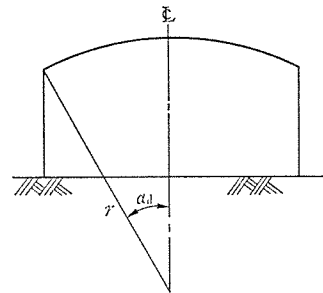


図-3

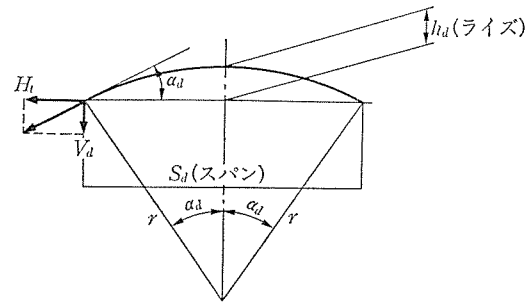


図-4

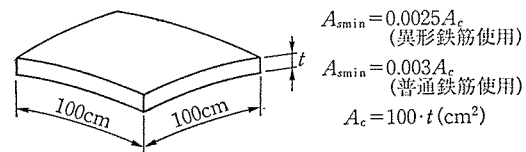


図-5

(2) ドームリングの設計

球形ドーム構造の場合, ドーム縁端部に水平スラスト  $H_d$  および円周方向鉛直荷重  $V_d$  が作用するので, ドームの縁端部にリングを設け設計荷重作用時にリングのコンクリートに引張応力が生じないように水平スラストに相当するプレストレスを導入し, ドームリング(図-6)の安全性を確認する(図-4 参照)。ドームリングにはプレストレスを導入する前の収縮および温度差の影響に対して, 円周方向の最小鉄筋量としてドームリングの断面積の 0.25% 以上の鉄筋を配置する必要がある。

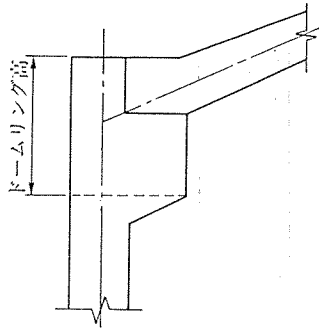


図-6

地域によって雪荷重等大きな短期積載荷重を考慮する場合、全水平スラストをプレストレスで打ち消すと、積雪のない時に逆に大きな圧縮応力がドームリングに残留することになる。また全水平スラストを打ち消さない場合には軸方向引張応力が発生し、ドーム荷重による水平スラストとプレストレス力の水平方向成分との間に大きな不均衡が生じるので設計上注意する必要がある。

## 5 側壁の設計

### (1) 構造形式

側壁下端の支持形式としては、図-7 のように自由支持、ヒンジ支持、固定支持の3種類が考えられる。

図-7 a) の自由支持の場合は、底版に対して側壁の回



写真-3 側壁工

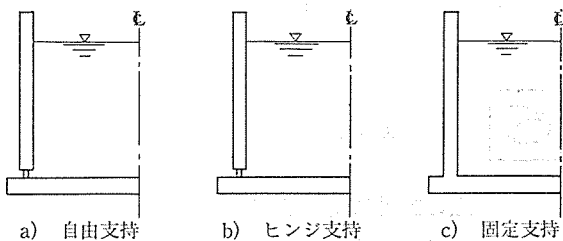


図-7

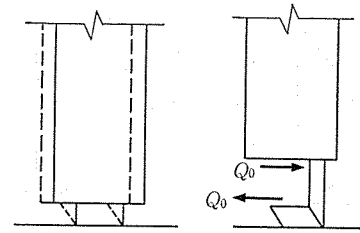


図-8 自由支持

転および水平変位を許す側壁下端と底版の結合方法である。理想的な自由支持であれば、鉛直方向曲げモーメントは発生しない。すなわち図-8 のようにゴム支承上に側壁が載っており回転は自由であるが、水平移動はゴムのせん断変形によって拘束され水平せん断力  $Q_0$  を生ずる。設計上は通常円管容器側壁下端回転によるせん断力は小さいので、無視してもさしつかえない。むしろ支承材の変形拘束で曲げモー

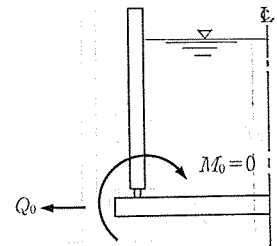


図-9 ヒンジ支持

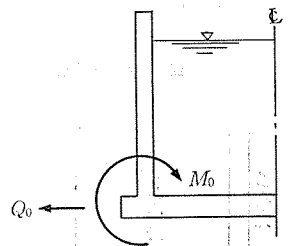


図-10 固定支持

メントが発生するので、設計上十分注意する必要がある。図-7 b) のヒンジ支持の場合は、側壁の回転を許す側壁下端と底版との結合方法である。下端拘束曲げモーメント  $M_0=0$  でせん断力  $Q_0$  のみが作用する。回転は可能であるが、水平移動量は0である(図-9 参照)。

図-7 c) の固定支持の場合は、底版に対して側壁の回転および水平方向の変位を許さない側壁下端と底版との結合方法である。すなわち側壁下端には拘束曲げモーメント  $M_0$  とせん断力  $Q_0$  が作用する(図-10 参照)。

### (2) 側壁の設計に用いる荷重

自重、積載荷重、静水圧、プレストレス力、クリープ・乾燥収縮、温度の影響、地震の影響、風荷重の影響、雪荷重、土圧、等の荷重を考慮すればよい。

### (3) 側壁の設計

側壁の設計は、一般的に弾性円筒シェル理論により計算すればよい。応力の算出は、静水圧、温度差、土圧、地震時の動水圧およびタンク躯体の慣性力とする。静水圧によって側壁の円周方向にはフープテンション、鉛直方向曲げモーメントが発生する(図-11 参照)。フープテンションを打ち消すために円周方向プレストレスが必要となる。通常静水圧に相当する力と余裕圧縮力 5~10

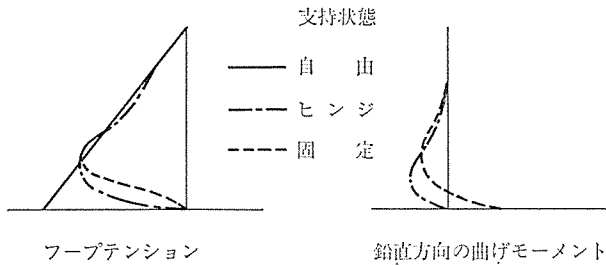


図-11 フープテンションと鉛直方向曲げモーメント

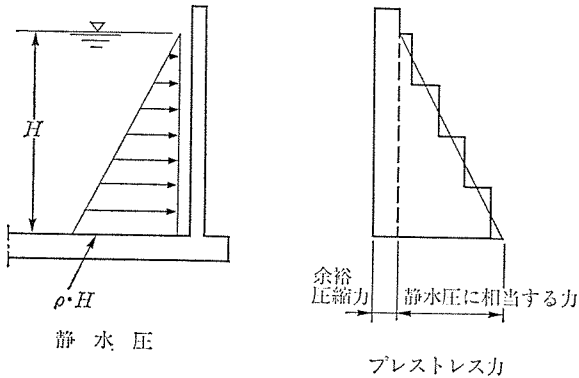


図-12 一般的なプレストレスの与え方

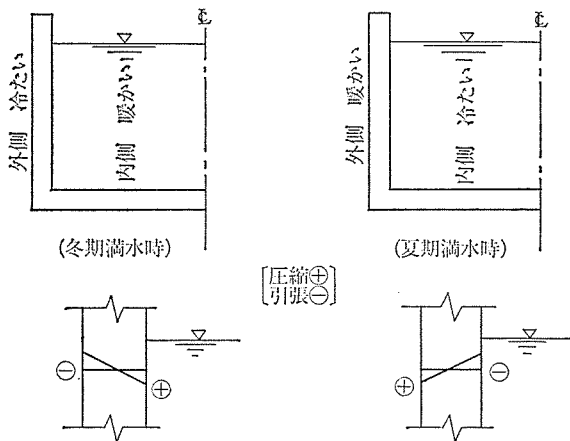


図-13

kg/cm<sup>2</sup> の和をプレストレス力として与える (図-12 参照)。このように余裕圧縮力を設計上 5~10 kg/cm<sup>2</sup> を考慮するのは、温度差による応力等が側壁断面に発生してもなお引張応力が発生しないようにする必要からである。なお側壁下端の設計については、その支持形式によって側壁の応力状態にかなりの差が生ずるので、設計に際して特に注意する必要がある。次に、余裕圧縮力考慮の原因である側壁内外面の温度差について述べることにする。円筒シェル内側と外側表面に温度差がある場合の応力は (図-13 参照)、S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger の板とシェルの理論により計算すればよい。

$$M = \frac{E\alpha Ath^2}{12(1-\nu)}$$

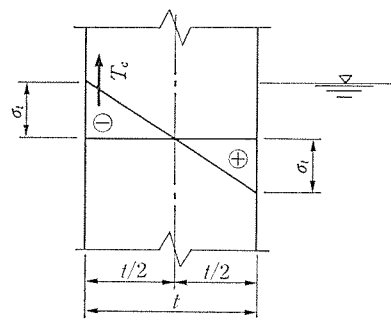


図-14

水槽の内外の温度を  $t_1, t_2$  とすると緑部の応力  $\sigma_t$  は下記のようなになる。

$$\sigma_t = \pm \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\nu)}$$

ここに、 $E$  : コンクリートのヤング係数

$\alpha$  : コンクリートの線膨張係数 ;  $1.0 \times 10^{-5}$

$\nu$  : コンクリートのポアソン比 ;  $1/6$

$\Delta t$  : 温度差  $t_1 - t_2$

夏期  $-5^\circ\text{C}$

冬期  $5^\circ\text{C}$

以上より温度差による応力は、夏期満水時  $t_1 - t_2 = -5^\circ\text{C}$  で、

$$\sigma_t = \pm \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\nu)} = \mp \frac{2.5 E\alpha}{(1-\nu)}$$

冬期満水時  $t_1 - t_2 = 5^\circ\text{C}$  で、

$$\sigma_t = \pm \frac{E\alpha(t_1 - t_2)}{2(1-\nu)} = \pm \frac{2.5 E\alpha}{(1-\nu)}$$

として求められる。

以上の計算により求められた引張応力に対して、引張鉄筋の算定を行って引張に抵抗させる。

全引張力  $T_c$  は、 $T_c = |\sigma_t| (t/2) (1/2)b$  として求められる (図-14 参照)。このようにして計算された全引張力に対して、鉄筋の抵抗引張力  $T_R$  を求め、 $T_R > T_c$  であることを確認する。 $T_R$  は、

$$T_R = A_s \sigma_{sa}$$

として求められる。

ここに、 $A_s$  : 配置する鉄筋の断面積

$\sigma_{sa}$  : 鉄筋の許容引張応力度

側壁設計の場合、水に接している部材ということから鉄筋の許容引張応力度は  $\sigma_{sa} = 1000 \text{ kg/cm}^2$  を考慮すればよい。

## 6 底版の設計

### (1) 底版の設計に用いる荷重

底版の設計に用いる荷重としては、一般に自重、積載荷重、静水圧、プレストレス力、地震の影響、雪荷重、

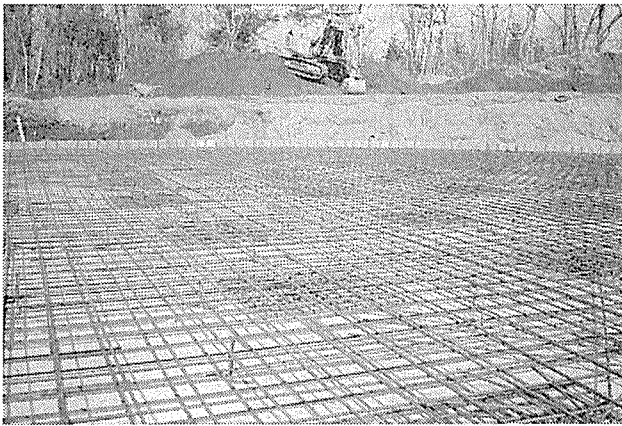


写真-4 底版工

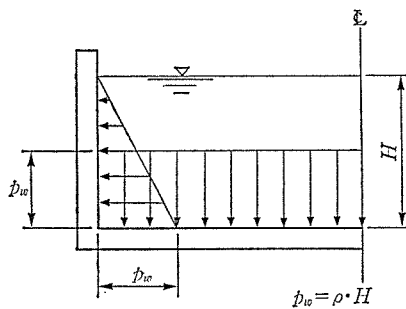


図-15 静水圧

土圧、揚圧力等を考慮すればよい。ここでいう底版に作用する静水圧の分布は 図-15 のようになる。

(2) 底版の設計

底版の形式としては、直接基礎、杭基礎の2形式が考えられる。直接基礎の場合、底版は地盤係数  $K$  の弾性上の円板と考えると解析するのが妥当であると考えられる

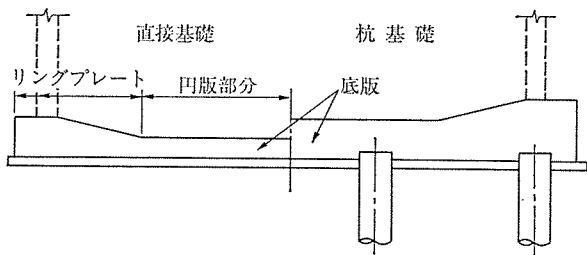


図-16 底版を1層とした施工例

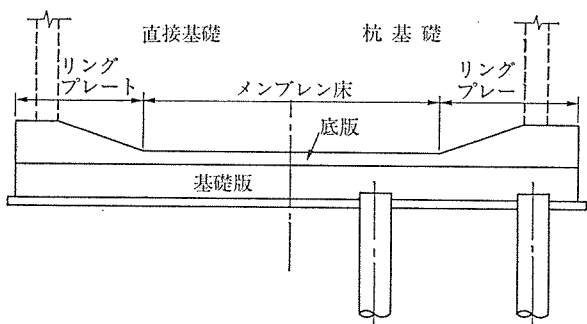


図-17 底版を2層とした施工例

が、しかし一方向梁として解析しても両者の計算結果には大差なく、一方向梁で解析した結果の方が応力的にやや安全側となるので一般的には弾性支承上の梁として解析すれば十分であり、また杭基礎の場合、床版はフラットスラブとして解析すればよい。なお底版には図-16、図-17のように1層構造と2層構造とがある。一般的には一層構造で設計施工するのが普通であるが、一様な地盤耐力が得られないような場合に基礎地盤に鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリート製の基礎版を設け、その上にタンク本体を築造することもある。そのような場合の基礎構造を二層基礎と呼んでいる。底版の設計にあたり、側壁と底版の接合部分における底版の厚さは側壁下端部の厚さ以上かつ 30 cm 以上とし、コンクリートの設計基準強度は  $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$  以上を使用するのが望ましい。

7 地震時に対する安全性の検討

(1) 耐震設計で考慮すべき地震の影響

一般的に耐震設計で考慮に入れる必要のある地震の影響として考えられるのは、構造物の自重、積載荷重に起

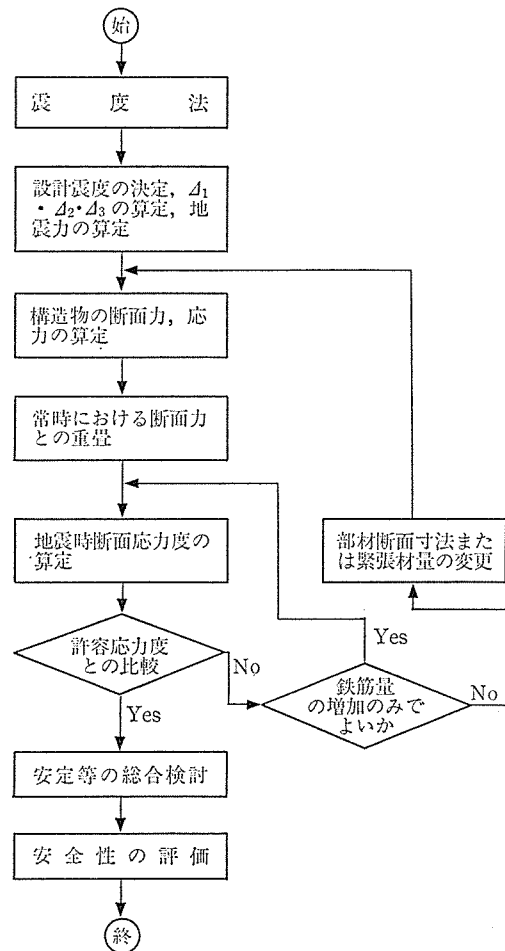


図-18 耐震計算のフローチャート

◇講 座◇

因する慣性力、地震時動水圧等である。さらに大規模かつ重要な構造物の設計にあたっては、必要に応じて地震時の水面動揺の影響も検討する必要がある。通常的设计では、上記3項目の地震の影響を考慮して設計を進めれば十分である。

(2) 耐震設計法

一般に剛性が高く、その固有周期が 0.5 sec 以下となるような構造物の耐震計算は、「水道施設耐震工法指針・解説」によると震度法によってよいことになっているので、震度法で計算すれば十分安全である。固有周期が 0.5 sec 以上となるような長周期のたわみやすい構造物の耐震計算は、指針によると修正震度法で解析すればよいことになっている。さらに細部にわたって地震時の挙動を調査する必要がある場合には、有限要素法等によって動的解析すればよい。本講座では固有周期 0.5 sec 以下となる構造物の耐震設計に用いられている震度法について概要を述べることにする。震度法による耐震計算のフローチャートを示すと図-18 のようになる。

(a) 地震時側壁の断面力の算定

地震時側壁の断面力の算定は、図-19 に示す荷重分布形状に基づいて水槽本体を薄肉円筒シェル構造として計算すればよい。

(b) PC タンクの安定計算

PC タンクの地震時安定計算は、側壁および底版にかかる動水圧を考慮し、一般的には Housner 理論によって地震時動水圧を計算し安定計算を行えばよい。なお設計にあたっては、「水道施設耐震工法指針・解説」p. 104 に示されている Housner 理論を耐震設計用にまとめた U.S.AEC の TID レポートの解説があるので、このレポートを参照するとよい。



おわりに

以上 PC タンクの設計の概要を簡単に紹介したが、設

	①地震時動水圧 ( $p_1$ )	②地震時水そう慣性力 ( $p_2$ )
円周方向分布	<p>半径方向 <math>p_{1r}(\theta, z_1) : \cos \theta</math> 分布, 円周方向 <math>p_{1c}(\theta, z_1) = 0</math></p>	<p>半径方向 <math>p_{2r}(\theta, z_1) : \cos \theta</math> 分布, <math>p_{2c}(\theta, z_1) : \sin \theta</math> 分布</p>
深さ方向分布	<p><math>p_r(\theta, z_1) = k_H \cdot \gamma_w \cdot \cos \theta \cdot I\left(\frac{z_1}{h_1}\right) (\text{t/m}^2)</math> <math>I\left(\frac{z_1}{h_1}\right) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{\lambda_i} J^{(i)}\left(\frac{a}{h}\right) \cdot \cos\left(\frac{z_1}{h_1} \lambda_i\right)</math></p>	<p><math>p_{2ri}(\theta, z_1) = \gamma_c \cdot t \cdot k_H \cdot \cos \theta</math> 一様分布 <math>p_{2ci}(\theta, z_1) = \gamma_c \cdot t \cdot k_H \cdot \sin \theta</math></p>
等価節線荷重	<p>(i) 半径方向荷重 <math>P_{ri} = \int p_{ri}(\theta, z_1) r d\theta dz</math> <math>\approx \frac{1}{6} (2p_{ri} + p_{rj}) \cdot \pi r l</math> (ton) <math>P_{rj} \approx \frac{1}{6} (p_{ri} + 2p_{rj}) \cdot \pi r l</math> (ton)</p>	<p>(i) 半径方向荷重 <math>P_{2ri} = p_{2ri} \cdot \pi r l = \gamma_c t k_H \cdot \pi r l</math> (ton) (<math>P_{2rj} = P_{2ri}</math>) (ii) 円周方向荷重 <math>P_{2ci} = p_{2ci} \cdot \pi r l = \gamma_c t k_H \cdot \pi r l</math> (ton) (<math>P_{2cj} = P_{2ci}</math>)</p>

図-19 地震時荷重分布

計の詳細については最後に紹介する参考文献を読んでいただきたい。本講座が、これから PC タンクの設計を試みようとする若い技術者にとって少しでも設計の手助けになれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設設計指針・解説，1977
- 2) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書
- 4) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 6) ACI 344 : Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures, ACI Journal, September 1970
- 7) BSI : CP 2007 : Part 2 : 1970, Design of Construction of Reinforced and Prestressed Concrete Structures for the Storage of Water and Other Aqueous Liquids
- 8) S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger (長谷川 節訳) : 板とシェルの理論 (上) (下), プレイン図書

- 9) L.R. Creasy : Prestressed Concrete Cylindrical Tanks, Contractors Record Limited.
- 10) 鈴木, 吉岡 : 上水用 PC タンクの現状と問題点, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No. 5, Oct. 1978
- 11) 山本 : PC タンクの耐震設計の一手法, プレストレストコンクリート, Vol. 20, No. 5, Oct. 1978
- 12) 猪股俊司 : プレストレストコンクリート製容器, F.K.K. 技術資料, No. 7
- 13) 坪井善勝 : 曲面構造・シェル理論とその応用, 丸善
- 14) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 昭和 55 年 5 月
- 15) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計基準・同解説
- 16) 建設産業調査会 : 土木建築技術者のための基礎設計施工ハンドブック
- 17) 土木学会 : 構造力学公式集
- 18) 横山幸満 : くい構造物の計算法と計算例, 山海堂
- 19) LNG 地下タンク研究委員会, 電気事業連合会 : LNG 地下式貯槽 (土木設備) 設計指針, 昭和 53 年 10 月
- 20) 猪股, 宮地, 三浦, 小寺, 百島, 本岡 : 土木新技術選書, PC 工法の応用, 鹿島出版会
- 21) M.J.N. Priestley : Ambient Thermal Stresses in Circular Prestressed Concrete Tanks, ACI Journal, 10, 1976
- 22) 井土俊昭, 奥野映二 : PC タンクの下端境界条件
- 23) 田中, 樋口, 石本 : 弾性固定による PC タンクの応力測定, 土木学会第 32 回年次学術講演会概要集
- 24) 日本道路公団 : 設計要領第 2 集 橋梁上下部工・擁壁・カルバート, 昭和 45 年 1 月
- 25) コンクリートポールパイル協会 : コンクリートパイルハンドブック, 山海堂
- 26) M. Hetényi : Beams on Elastic Foundation, the University of Michigan Press.
- 27) 日本水道協会 : 水道施設耐震工法指針・解説, 1979 年版
- 28) Barry P. Hughes : Limit-state theory for water-containing structures, Concrete, Vol. 4, No. 11, Nov. 1970
- 29) 山本 : プレストレストコンクリート・コンテナの設計について, コンクリート工学, Vol. 15, No. 5, May 1977

## ◀刊行物案内▶

## 第 27 回 研究発表会講演概要

体 裁 : B 5 判 98 頁

頒布価格 : 2 500 円 (送料 : 300 円)

内 容 : (1) FC 板の長支間, 重荷重倉庫への適用, (2) PC 合成床版の構造性能に関する実験的研究, (3) 19 年間工場建屋に使用された PC 鋼棒について, (4) プレキャストプレストレストコンクリート梁・柱接合部の終局域特性に関する実験的研究, (5) マイクロコンピューターを利用した緊張管理について, (6) PRC 構造の Cost Study, (7) 持続荷重を受ける PRC はりの曲げひびわれ幅とたわみ, (8) PRC 曲げ部材断面の終局限界モードとじん性設計について, (9) 高強度鉄筋を緊張使用した PRC はりの力学特性, (10) ケミカルプレストレスを導入した PRC 部材の曲げ特性, (11) PC 斜張橋斜材定着部実験, (12) 人工軽量骨材を用いた PC 桁の定着部の補強実験, (13) 緊張材用 FRP ロッドについて, (14) 経年 PC マクラギの耐力調査, (15) 海岸部高架橋における塩害対策について——北陸自動車道親不知海岸高架橋——, (16) PC 合成床版工法——PC 板を埋設型枠として用いた合成床版工法——について, (17) プレキャスト化した床版及び壁高欄の施工, (18) 新門司大橋の施工, (19) 万之瀬橋 (アーチローゼ) の設計と施工, (20) シンガポール高速鉄道における大型 PC 桁の架設について, (21) 有田橋の設計と施工, (22) FCC 工法における設計・施工管理システム, (23) 二色の浜連絡橋 (PC 2 径間ゲルバー桁橋) の設計・施工, (24) PC 等径間連続ラーメン橋桁橋の設計と施工について——北陸自動車道親不知海岸高架橋——, (25) 人工軽量骨材を用いた PC 連続桁の設計, (26) 軽量コンクリートを使用した PC 下路桁の施工について (JR 西日本片町線内代 Bv), (27) 新丹波大橋の施工について