

特集

PC円形構造物

上水用PCタンクの現状と問題点

鈴木 素彦*
吉岡 民夫**

1. はじめに

人間が生存していくうえで、不可欠な物資の一つに水がある。大古から、人間は、水が容易に得られる場所を捜し求めて、居住地としてきた。例えば、水を得ることが非常に困難な砂ぼく地帯では、地下水が湧き出す、いわゆるオアシスのまわりに集落が形成されてきた。また、それ以外の地域では、河川や湖沼の近くに村落が発達してきたのである。しかし、土木技術が発達して、遠くの水源から水を引いて来ることができるようになると、必ずしも、河川や湖沼の近くにこだわらずに、むしろ、水害の危険が少ない地域に集落の中心が移っていくようになる。

現在では、上水道が大部分の地域で完備され、生活可能地域は著しく拡大されている。しかし、その裏では、円滑に上水を供給するために、それなりの供給設備の改善改良が行われているのである。その一つに、配水池の整備がある。配水池は、浄水場と給水区域の中間に位置し、給水区域の最も高い個所にも所定の水圧を確保するとともに、区域内の単位時間当りの使用水量が、浄水場からの給水能力を一時的に上回っても、それに対処できるように設置されているものである。

最近では、生活レベルの向上に伴って、水洗便所、電気洗濯機、家庭風呂等が普及した結果、各家庭での水の使用量が急増し、しかもある時間帯に水の使用が集中するため、さらには住宅が高層化していることもあって、ちょっとした住宅団地にも、配水池が必要となってきている。平坦な地形の上に建設された団地では、十分な水圧がどの家庭でも得ら

れるよう、高架配水池またはそれに準ずる地上配水池が設けられる。また、傾斜地を利用した団地では、最高地に地上または地下配水池を設けることが多い。

配水池には、耐久性および水密性が要求されることは勿論のこと、所定の水頭が確保しやすいこと、用地が少なくすむことなども併せて要求される。そのため、現在は、鋼製およびコンクリート製のタンクが一般的である。鋼製は、容量が小さく高架の場合に、鉄筋コンクリート製は、容量が大きく地下の場合に、プレストレストコンクリート（以下PCと略す）製は、容量が大きく地

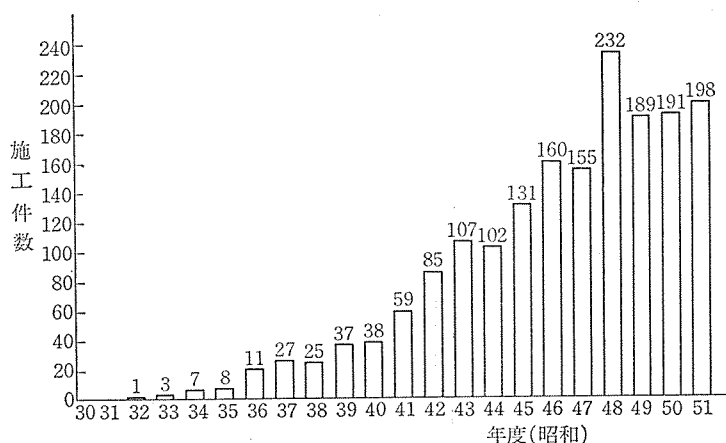


図-1 PCタンクの施工実績 (PC建設業協会の年報による)

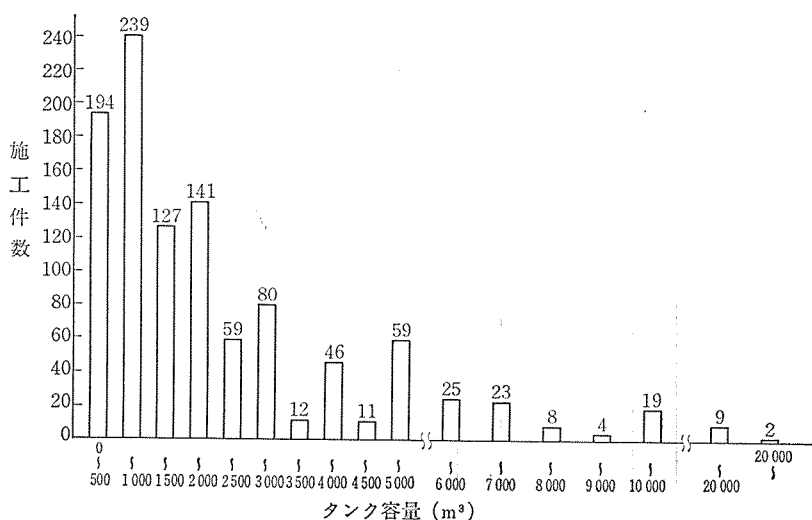


図-2 容量別工事件数

* オリエンタルコンクリート(株)技術部次長

** オリエンタルコンクリート(株)技術部

上および高架の場合に、それぞれ、主として用いられている。ここではPCタンクについて触れてみる。

本題に入る前に、これまでのPCタンクの施工実績を振り返ってみる。本格的なPCタンクの建設は、昭和15~16年頃からアメリカで始まったが、我が国においては図-1に示すPC建設業協会の統計によると、ようやく昭和32年に我が国初のPCタンクが建設されている。しかし、その後の我が国における発展はめざましく、年々増加の一途を辿り、最近では、協会外での施工をも含めると、おそらく、年間の施工件数は250池を超えているものと思われる。その内の一部について、容量と施工件数の関係を図示してみると、図-2のようになり、1000m³前後のタンクが最も多いことがわかる。

以下PCタンクについて、設計施工の面から見た現状と問題点を探ってみる。

2. 設 計

2.1 構 造

PCタンクは、水道施設設計指針によれば「漏水がなく、かつ、外部からの汚染のおそれのない構造」でなくてはならない。これらの目的を達成する最も一般的な構造は、図-3に示すようなものである。

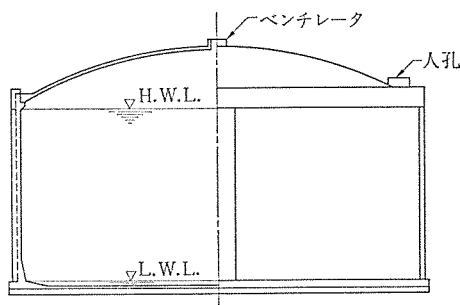


図-3 基本構造

配水池などの構造は、その容量および水頭によって決まるので、それに見合う内径および水深が要求される。また、維持管理上から隔壁を設けて水槽を分割することを要求される場合もある。これらの要求を満足する構造は図-4に示すようなものである。

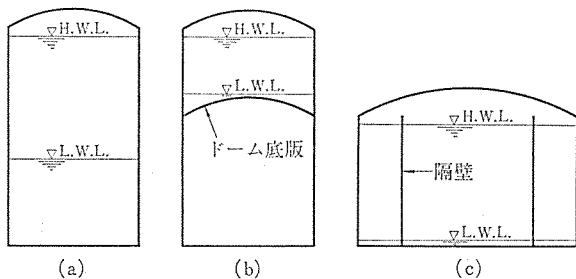
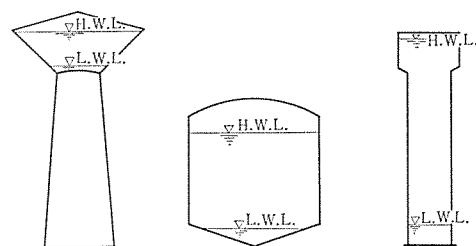


図-4 応用例

図-4はすべて図-3の応用であり、基本的にはPCタンクは図-3の構造で代表することができる。

配水池は、必要な水頭を得るためにできるだけ高く、また、均等な水圧を確保するために給水区域の中心に設置することが有利であるが、そのような場所が得られない場合には、配水塔や高架タンクにする必要がある。どちらにしる人目につく構造物となるので、意匠上の配慮を必要とする場合が多い。その例としては、基本的な構造に塗装やカーテンウォール等を用いて装飾したものと、構造そのものをデザイン化したものが見られる。

これらの他にも、その機能や目的にあわせて種々様々な構造が考えられ、そのいずれの場合にもPCの特性を有効に利用することができる(図-5参照)。



(a) 高架水槽 (b) 傾斜底版の水槽 (c) スタンドパイプ

図-5 その他の例

2.2 設計概念

ほとんどのPCタンクは図-3の基本構造におきかえることができるので、ここではこの構造に限定して話を進める。

この基本構造は、ドーム屋根を形成する球形シェル、側壁を形成する円筒シェルおよび底版を形成する円板により構成されるが、これらを一体として、必要な境界条件を用いて数学的に解析することは極めて困難である。そこで、これを許される範囲内で分割して解析し、設計することが有用である。

構造は次の3つに分割することができる。

ドーム屋根

側壁

底版

分割された3つの構成部材は、すべて中心軸を有する回転体として得られ、他方、水圧等の荷重も一般的には軸対称となる。図-4(c)は、同心円の隔壁を設けて荷重が軸対称になるようにした例であるが、もしこれを中心を通る壁で2分し、一方だけに水を満たすと、壁体には軸対称荷重では生じない応力(面内せん断力およびねじりモーメント)が発生して、それへの対処が必要になってくる。よって、基本的には構造・荷重とも軸対称となるように計画、設計することが、回転シェルの特性を

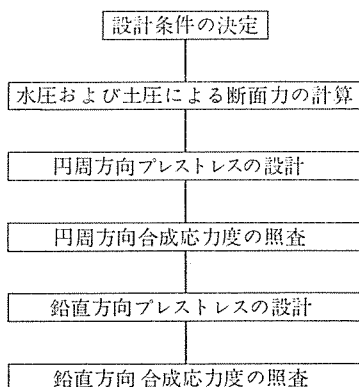
生かすために重要である。

PCタンクに関する示方書がない現在、許容応力度のとり方は明確でないが、一般的にはプレストレス導入直後を除いて、引張応力度の発生を認めない設計が行われている。

2.3 側壁の設計

2.3.1 設計手順

設計手順を簡単に示すと以下のごとくである。



2.3.2 荷 重

一般的な荷重は以下のとおりである。

水圧, 土圧

円周および鉛直方向プレストレス

壁体自重, ドーム屋根重量

2.3.3 応 力

直立円筒シェルでは次のような応力が考えられる (図-6 参照)。

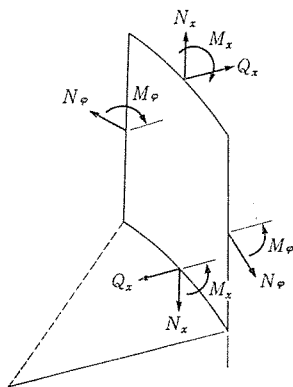


図-6 円筒シェルの応力

N_x : 鉛直方向軸力

N_ϕ : 円周方向軸力

M_x : 鉛直方向モーメント

M_ϕ : 円周方向モーメント

$N_{x\phi}, N_{\phi x}$: 面内せん断力

$M_{x\phi}, M_{\phi x}$: ねじりモーメント

Q_x, Q_ϕ : 面外せん断力

このうち軸対称問題では $N_{x\phi} = N_{\phi x} = M_{x\phi} = M_{\phi x} = Q_\phi = 0$ で、残る5つの応力が生ずる。ただし面外せん断力 Q_x は、スラブの設計と同様、一般にシェル構造では考慮する必要はない。

2.3.4 基礎方程式

円筒シェルのつり合い方程式、フックの法則および変形とひずみの関係を用いて整理すると、各荷重について次式が得られる。なお詳しくは、文献 2) 等を参照されたい。

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{Z}{D} \quad (1)$$

ここに w = 半径方向変位

x = 壁上端からの距離

$$\beta = \text{タンク定数} = \sqrt[4]{\frac{Eh}{4a^2 D}}$$

E, h, a = 各々弾性係数, 壁厚および半径

$$D = \text{曲げ剛性} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

ν = ポアソン比

各荷重での Z および N_x は次式であらわされる。

(1) 三角形荷重 (水圧等) $Z = rx \quad N_x = 0$

(2) 長方形 " (ガス圧等) $Z = p \quad N_x = 0$

(3) 鉛直荷重 (ドーム重量等) $Z = \nu P/a \quad N_x = P$

(4) 壁体自重 $Z = \nu Wx/a \quad N_x = Wx$

ここに r = 水の単位体積重量

p = ガス圧

P = 単位長さ当りの鉛直荷重

W = 壁体自重 = 単位体積重量 × 壁厚

(3) は $\nu P/a$ を p と、(4) は $\nu W/a$ を r とおけば各各 (2), (1) と同様であり (1) および (2) の解を求めれば、上記の荷重について解析することができる (ただし N_x に注意)。

(1) 式は弾性床上の梁や杭の計算で馴染みの深いものであるが、厳密に解くならば、その一般解は4つの積分定数を持っている。このことは、構造力学的にみれば、上下端の拘束がないとした時の応力 (膜応力) に、上下端でその境界条件を満足させるための4つの不静定力をかけ、膜応力と不静定力による応力の合成を求めることになる。ところでシェル構造では、不静定力による影響は壁上下端付近にしか及ばないものである。また、上端フリーとした場合の上端不静定力は一般に小さいので、壁の高さが十分に高ければ (厳密に言うとタンク定数 β と壁の高さ l の積が十分に大きければ)、それを無視しても応力全般に及ぼす影響は小さい。この上端不静定力を無視するということが、いわゆる無限長の梁と考えるということであり、そうすることによって積分定数も2

つに減り、せいぜい上端付近にわずかの誤差が生ずるだけで、設計計算としては十分な精度が得られる。

2.3.5 断面力

前項 (1), (2) では N_ϕ , M_x , M_ϕ が生ずるが、 $M_\phi = \nu M_x$ であり、 ν の値から考えて十分小さいので、一般的には設計で考慮していない。(3), (4) では N_x , N_ϕ , M_x , M_ϕ が生ずるが、 N_x に比べて他の応力は小さく、また、それらは水圧などによって生ずる応力と比べて十分小さいので、一般には N_x 以外は無視している。以上のことは、(1), (2) では円筒シェル、(3), (4) では単位幅で切り出した片持梁として考えればよいということになる。片持梁と考えるということは、静定系としての一次応力だけ求め、不静定系としての二次応力を無視するということである（一般的な断面力分布状態は 図-10 参照）。

2.3.6 円周方向プレストレス

円周方向プレストレスは、水圧によって生ずる軸引張応力 N_ϕ を打ち消す目的で導入する。そのためには、図-7 に示すように、水圧とは逆符号の三角形荷重をプレストレス導入によって作り出せばよい。しかし、一般に

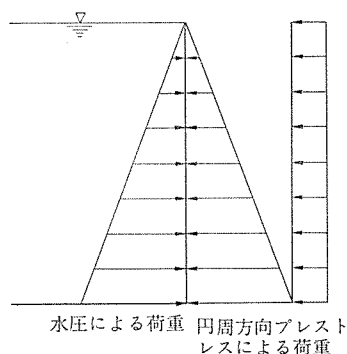


図-7 円周方向プレストレスによる荷重

は水槽に水が満たされた状態（満水時）にわずかの圧縮応力度（残留圧縮応力度）が残るように設計するので、さらに、図-7 のような長方形荷重を加えてやる。そうすれば、満水時に三角形部分は打ち消され、長方形部分だけが残り、全般に軸圧縮応力度が残留する結果となる。残留圧縮応力度は 10 kg/cm^2 程度が妥当であると言われている。

ケーブル1本当りの緊張力が小さいほど、目的とする荷重状態に近づけることができるが、鋼材配置や経済性を考え、最大ピッチが 1 m 以下程度になるように PC 鋼材を選択するのが望ましい。

2.3.7 鉛直方向プレストレス

設計-満水時には、水圧および円周方向プレストレスによるモーメント M_x が打ち消し合い、合成モーメントはわずかである。しかし、設計-無水時には、円周方

向プレストレスによる鉛直方向モーメントが生じているので、このモーメントに対して鉛直方向プレストレスを設計しなくてはならない。これは、単位幅で切り出した片持梁と考え、鉛直方向 PC 鋼材を圆心に配置してプレストレス量を決めればよい。PC 鋼材のピッチはその有効範囲を考慮して決める（図-8 参照）。鉛直方向モー

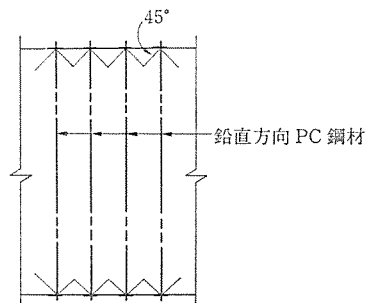


図-8 鉛直方向 PC 鋼材のピッチ

メントは壁上部では小さいので、鋼材の一部を壁途中で定着することが考えられるが、壁が薄いために、アンカープレートが水みちになり易く、また、緊張に必要なコンクリートの強度が得られるまで施工を中断しなくてはならないなどの理由で、すべての鉛直鋼材を上端で定着する例が多い。

円筒シェルでは両端をフリーにすれば膜応力状態となり、モーメントは生じない。よって円周方向軸力 N_ϕ が一次応力であり、鉛直方向モーメント M_x は、いわば二次応力である。その意味で、円周方向プレストレスの設計で導入した残留圧縮応力度は、鉛直方向プレストレスでは考えないのが一般的である。同じ意味で、鉛直方向には鉄筋を配してプレストレスを導入しない設計例もあるが、その場合には、鉄筋の許容応力度を低くとり、ひび割れを制御すべきである。しかし、円周方向には 10 kg/cm^2 もの残留圧縮応力度をとり、鉛直方向では引張応力度の発生を認めるという概念は、少々ちぐはぐな感じがする。

2.3.8 応力状態の合成

ここで取り扱う土圧は、地中タンクのようなものではなく、せいぜいタンクの半分程度が地下にある場合や、盛土により一部に土が被された程度のものをいう（文献 3）参照）。このような土圧は、壁体に部分的にかかるので、その断面力を求めるのは意外に煩雑である。詳しくは文献 4）などを参照されたい。

土圧は外側からかかり、円周方向プレストレスと同じ効果を発揮するが、一般にはその効果は無視し、設計-無水時に不利に働く場合のみ取り扱う。

サフィックスを次のように取り決めると、その応力度 σ の合成は以下のとおりである。

第1 サフィックス

- N_x = 鉛直方向軸力
- N_ϕ = 円周方向軸力
- M_x = 鉛直方向モーメント

第2 サフィックス

- W = 水圧
- P_ϕ = 円周方向プレストレス
- P_x = 鉛直方向プレストレス
- S = 土圧

1) 設計-満水時

- 円周方向 $-\sigma_{N_\phi \cdot W} + \sigma_{N_\phi \cdot P_\phi}$
- 鉛直方向 $\pm \sigma_{M_x \cdot W} \mp \sigma_{M_x \cdot P_\phi} + \sigma_{N_x \cdot P_x}$

2) 設計-無水時

- 円周方向 $\sigma_{N_\phi \cdot P_\phi} + \sigma_{N_\phi \cdot S}$
- 鉛直方向 $\pm \sigma_{M_x \cdot P_\phi} \pm \sigma_{M_x \cdot S} + \sigma_{N_x \cdot P_x}$

3) プレストレス導入直後

- 円周方向 $\sigma_{N_\phi \cdot P_\phi}$
- 鉛直方向 $\pm \sigma_{M_x \cdot P_\phi} + \sigma_{N_x \cdot P_x}$

2.3.9 壁下端の構造

壁下端の構造としては、フリー、ヒンジ、固定が考えられ、場合によっては、円周方向プレストレス導入時はフリー、その後はヒンジまたは固定となるような構造とする例も見られる。しかし、一般にはヒンジと固定が多用されている。いずれの方法も施工可能であるが、一長一短があるといえる。

フリー：鉛直方向モーメントは生じないが、下端の止水と地震時のせん断力に対して特別な配慮が必要。

ヒンジ：応力状態は固定に比べ単純で対処し易く、不測の応力発生危険性も少ないが、ヒンジの構造(図-9)がやや複雑である。

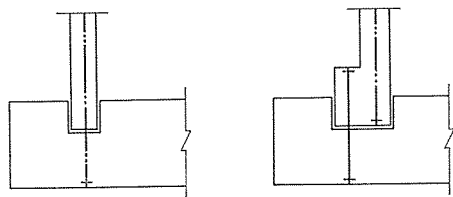


図-9 ヒンジ構造

固定：水槽という性質上止水性は最も良いが、下端付近に局所的なモーメントが生じ、その対処に問題がある。さらに、底版と壁体の相互作用について明確でない部分がある。

これらの応力状態を 図-10 に示す。

図-10 は理想的な拘束条件下での応力状態であり、実際の拘束とはわずかの差があると考えられる。この問題は、水圧と円周方向プレストレスとにより同様に起こり得ることであり、円周方向プレストレスが水圧に対抗

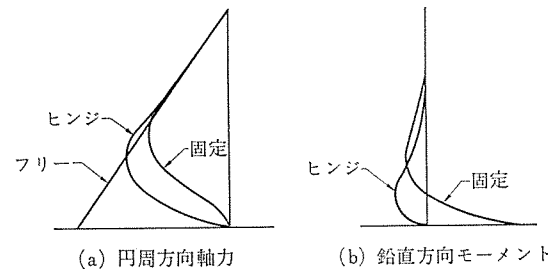


図-10 PCタンクの断面力

する形で決定されているので、円周方向では一般に問題とならない。鉛直方向は、円周方向プレストレスによる壁中間付近の最大モーメントに対してプレストレスを設計するので、そのモーメントの値が、下端の拘束条件の仮定と実際との差の影響を受けるようでは問題であるが、実測結果等によると、鉛直方向プレストレスの着目点が下端よりかなり上であるため、下端拘束条件のわずかな差異の影響はあまり及ばず、一般的な構造では理想的拘束条件として断面力を求めてもさしつかえない。

下端固定の場合、その最大モーメントは壁下端に生じその同符号のモーメントが生ずる範囲はせいぜい下端から 1m 程度である(図-10 参照)。この下端モーメントに対して軸力によりプレストレスを与えると、ヒンジ構造に比べてかなり大きなプレストレスを必要とする。文献 5) によると、鉛直方向プレストレスは壁中間付近に生ずる下端とは異符号の最大モーメントに対して設計し、下端付近は鉄筋で対処せよとなっているが、これも先ほどの鉛直方向プレストレスで触れた問題と同様、少々ちぐはぐな感じがする。そこで下端内側にハンチを設け、それによって生ずる偏心モーメントを利用して設計する方法が現在国内では一般的である。すなわち、壁を単位幅で切り出した片持梁と考えるわけで、2.3.5 で述べたことと同じ考え方である。しかるに、これはあくまで便宜的な方法であり、適用できるのはハンチ高が十分小さい時だけで、壁の全高にわたって偏心する場合などはこの限りではない。

どの下端構造がよいかは一概に断定できないが、拘束が少ないほど、応力上は優れているが、止水性に問題が生じてくると言うことができる。今後予想される数万 m³ 級のタンクでは、底版と側壁が分離されているものの方が安全であろう。

2.3.10 最小壁厚寸法

PCタンクの壁厚は、主として次の2つの要素により決まる。

1) 施工面から

壁の中に円周および鉛直方向PC鋼材、鉄筋が定められたかぶりで配置でき、かつ、コンクリートを締め固め

報 告

るためのパイプレータを十分挿入できる余裕があること。

2) 設計面から

1) を満足したうえでさらにプレストレス導入直後の圧縮応力度が、許容応力度内であること。

一般には、ほとんど 1) の要素で決まり、シングルストランドの場合でも壁厚 18 cm 程度は必要である。

2.3.11 定着工法

PCタンクでは、ほとんどすべての定着工法を利用できるが、鉛直方向では、自立性の良さ等からPC鋼棒を用いる例が圧倒的に多い。

円周方向のケーブルは、普通定着用のリブを壁外側に設けて定着するが、リブの本数は、タンク径、緊張力、ケーブルとシースの摩擦等を考慮して決める。一般には4本以上の偶数本を用いることが多い。リブ本数とタンク径の概略の目安は表-1のとおりである。近年、原子

表-1 リブ本数とタンク径の関係

| 内 径 | リブ 本 数 |
|---------|--------|
| 20m 以下 | 4 |
| 20m~80m | 6 |
| 80m 以上 | 8 |

力容器等ではリブ本数を減らせる傾向にあるが、詳しくは文献 6), 7) などを参照されたい。

偶数本用いる理由は、上下2段のケーブルの応力均等

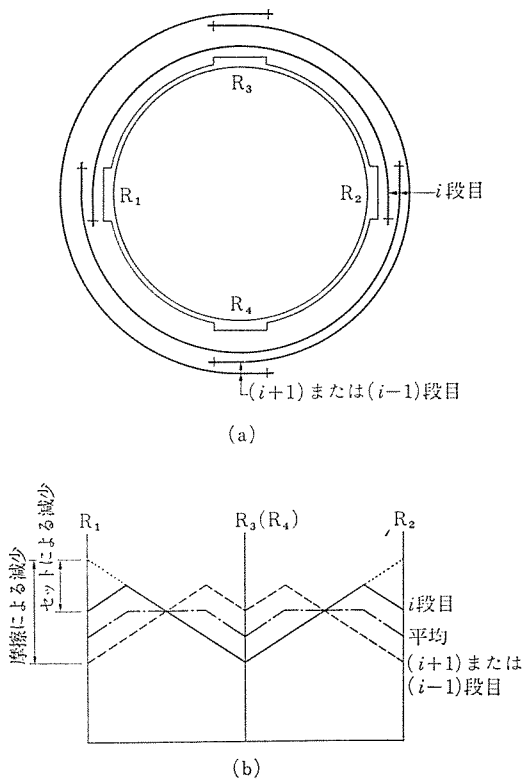


図-11 円周方向PC鋼材の配置

化を計るためである。図-11(a)において、ある段のケーブルを R_1 および R_2 で定着したとすると、そのすぐ上およびすぐ下のケーブルは R_3 および R_4 で定着し、上下2段のケーブルで、ケーブル中央とケーブル端が同じ位置にくるように配置する。よってケーブルの有効応力度は、図-11(b)に示すように、ケーブル中央の応力とケーブル端のセット終了時の応力を平均して求めてよい。

リブの厚さと幅は、ケーブルが定着でき、かつ、ケーブルをリブに引き出してくる部分で十分なかぶり力が得られるように決めればよい。また、美観上などの理由でリブを壁内側に設ける場合があるが、この場合、ケーブルをリブに引き出してくる所で曲げ上げ角が大きくなるので摩擦とかぶりの関係を見ながら、リブを少し大きめにするとよい。また、水に接する側に定着するので、十分な防蝕対策が必要である。

2.3.12 温度応力

一般の水槽では温度応力の検討は不要であるが、極寒地の水槽や内容物が高温の場合(下水消化槽など)では検討が必要である。

一般に温度変化によって生ずる引張応力度を、プレストレスによって打ち消そうとするのは不経済で、コンクリート両表面間の温度差が、許される範囲内に収まるように、断熱処理を施すべきである。特に内容物が高温の場合には、PC鋼材のリラクセーションに留意し、低リラクセーション鋼の使用や、リラクセーション値の割り増しを考えなくてはならない。

温度応力の求め方は文献 8) などを参照されたい。

弾性理論により求めた温度応力はかなり大きなものとなるが、実際にはクリープの影響によりもっと小さくなるものであり、弾性理論値の1/2程度とする文献もある(文献9)参照)。また、内容物の温度と外気温の差を、そのまま壁両表面間の温度差とするのは過大で、外側表面での空気の対流を考慮して設計温度勾配を決めるべきである。

2.4 ドーム屋根の設計

2.4.1 場所打ちドーム屋根

ドーム(球形シェル)は図-12(a)に示すような拘束条件にすれば膜応力状態となり、ドームの開角 α があ

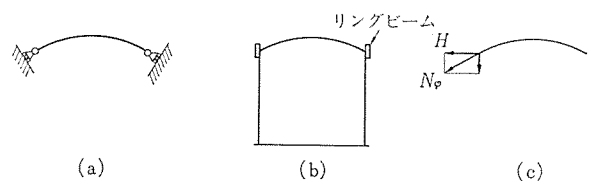


図-12 ドームの支持条件

る角度（約 52°）以下では、緯線方向、経線方向ともに軸圧縮力しか生じない。一般には開角を 30° とする例が多い。

しかし実際にはそのような理想的な支持条件ではなく、リングビームを介して壁体と結合されており、完全な膜応力状態ではない。ところで膜応力以外の応力（2方向のモーメントと面外せん断力）は、ドーム裾に生ずる経線方向軸力 N_ϕ の水平分力 H を（図-10(c) 参照）うまく打ち消してやればほとんど発生せず、膜応力に近い状態におくことができる。そこでこの水平分力を打ち消すようにドーム裾に連結したリングビームにプレストレスを導入する。

ドームの曲げ解析を行うと自重およびリングビームのプレストレスによって 図-13 (a), (b) のごとき応力状態となり、その合成 (c) はほとんど膜応力と等しい状態になり、2方向の軸圧縮応力しか発生しない。ただしこ

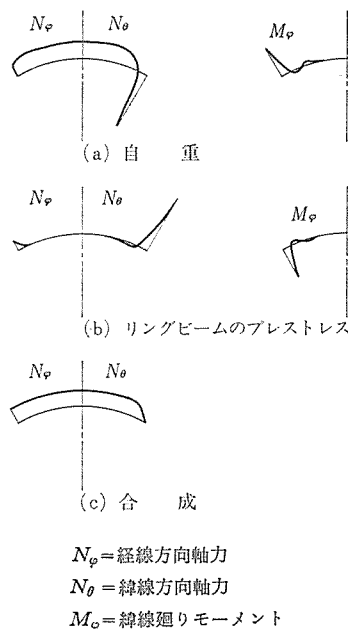


図-13 ドームの応力（曲げ解析）

の応力状態を生み出すためには、ドーム打設後にリングビームにプレストレスを導入しなくてはならない。また、PC鋼材の配置は、ドーム裾での経線方向接線とリングビーム中心線の交点に対称とすることが望ましい。

ドームの厚さは計算上 1~2 cm でよい場合があるが、鉄筋の配置等の施工上の都合で 10 cm 以上にすべきである。一般には平均厚 10 cm とする例が多い。

ところで 図-4 (b) に示したような底版としてドームを用いる場合、満水時のつり合いでプレストレスを決めるので、無水時にはプレストレスが圧倒的に過剰な状態となる。2方向の軸力は圧縮となるが、ドーム裾にはモーメントが生ずるので、曲げ解析するなどして、十分に

対処しなくてはならない。

2.4.2 プレキャストドーム屋根

場所打ちドーム屋根のかわりに、プレキャスト化が考えられるが、国内の施工例では以外に数が少ない。これはタンクの設置位置が山の上などで、重機の搬入ができないとか、プレキャストにしてもやはり一部支保工が必要のため、経済的メリットが明確でないことなどによると思われるが、それと同時に、プレキャスト化した場合、ドームとしての構造特性を十分生かせるかどうか問題となる。すなわち、プレキャスト材架設時にはドーム梁として考えなくてはならず、すべてのプレキャスト材でな材を結合し、支保工を撤去した時点で始めてドームとなることである。このことは、ドーム屋根の荷重のほとんどが自重であり、活荷重が無いことを考えると、非常に薄く曲げ耐力の小さなプレキャスト材架設時に特別な配慮、例えばリブを付けるなどが必要となり、それを避けるためにプレキャスト材を細分化すると、それに伴い支保工が増加してしまう。よってドームのプレキャスト化は途中で構造系が変化するというデメリットがあるが、工程の短縮、出来ばえ等にメリットもあり、十分検討されるべきと思われる。

2.4.3 その他の屋根形式

一般的な水槽ではドーム屋根が有利であるが、径が小さい場合、二重水槽の外側覆蓋、高さを制限される場合などには陸屋根が考えられる。径が大きい場合の陸屋根は途中で柱を設ければよいが、この場合底版に与える影響も配慮しておく必要がある。他にも意匠を考慮して様々な屋根形式が考えられるし、西欧ではPC石油タンクの屋根に鋼製浮屋根が設置されている例もある。

2.5 底版の設計

底版はその基礎形式、すなわち杭基礎か直接基礎かによってその対策が異なってくるが、ここでは直接基礎に限定して話を進める。

底版は、内容物と地盤とを絶縁し、かつタンク自重や内容物重量の反力を地盤に伝える役目を果たす。よって地盤の特性に応じて対処しなくてはならないが、ここでは一般的な留意点のみを示す。

底版の代表的な形を 図-14 に示す。

まず壁と底版が一体の場合、すなわち壁下端固定構造

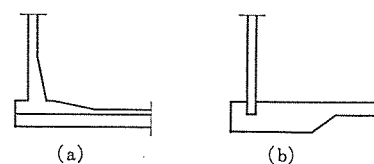


図-14 底版

の場合、壁下端モーメントが底版に伝播する可能性がある。それに対する補強が必要である。いわゆる鋼製タンクのアニュラー部である。この部分の設計については文献 5) に、モーメントの伝播距離および壁下端剛性の低下について与えられている。それによれば一部式を変形して以下のとおりである。

$$l^2 = \frac{\frac{2M_0}{H}}{1 + \frac{(t/h)^3}{(Dt)^{1/2}}}$$

ここに l = 伝播距離

M_0 = 水圧による下端モーメント

H, D = 水深, 内径

t, h = 壁厚, 底版厚

$$M_p = \frac{H}{2} l^2$$

ここに M_p = 実際に生ずるモーメント

この l を使って底版端部厚を拡幅し、 M_p を使って鉄筋量を決めればよい。

ドーム自重および壁体自重が底版端部にかかる、底版にモーメントが生ずる。このモーメントは載荷点から少し内側で最大となり、中心に向かって減少してゆくので、底版端部の厚さを増したりする (図-14 (b))。

底版厚が一定である場合、そのモーメントを求める方法は種々考えられるが、ここでは周辺自由、周辺荷重の弾性床上的円板の解について触れる。ポアソン比 1/6, 周辺全荷重 (単位長当りの荷重でなく全重量) $P=100t$ の場合の半径方向モーメント M_r および円周方向モーメント M_θ の最大値は 図-15 のごとくである。ここで

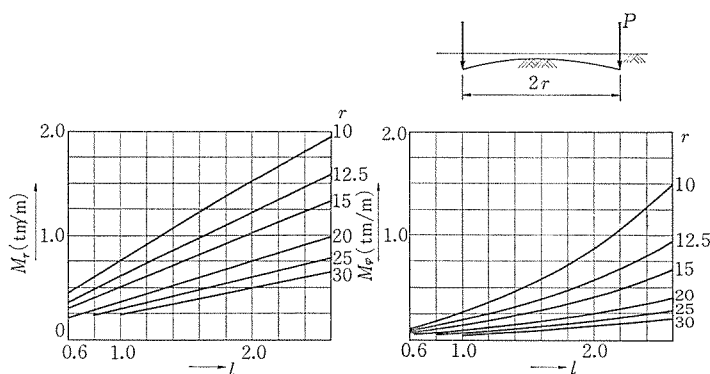


図-15 弾性床上的円板の最大モーメント ($\nu=1/6, P=100t$)

横軸 l は次式で示される (詳しくは文献 10) を参照されたい)。

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{K_V}} \quad \left(D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right)$$

ここに h = 底版厚

K_V = 鉛直地盤反力係数

なお最大モーメントが生ずる点は、概略、載荷点より l m 内側付近と見て大差ない。また、鉛直地盤反力係数は文献 11) などに示されている式を用いればよい。

2.6 地震時の検討

一般に P C タンク本体の固有周期は極めて短く、地震に共振する心配はまず無いので、剛体と見てさしつかえない。問題は中の水がどのように挙動するかである。すべての水が質量効果がある、すなわち地震によって水平力をタンクに伝えるとするならば、水平震度法を用いて水平力を求めればよいのであるが、実際には自由水面近くの水は質量効果が小さく、この部分の水 (動水と呼ばれる) に質量効果を与える設計は不経済である。

現在、水槽の地震時水平力を求める最も一般的な方法は HOUSNER 理論であり、その内容は文献 12) に詳しく示されており、その計算も容易で、設計には非常に便利である。また、HOUSNER は背の高い水槽や高架タンクの計算法も示している。

地震時の増加水圧の 1 例を 図-16 (a) に示す。このように、地震によって側壁と底版に圧力増加がおり、それは、側壁では水平力および転倒モーメントに、底版では転倒モーメントに関係する。HOUSNER は内容物

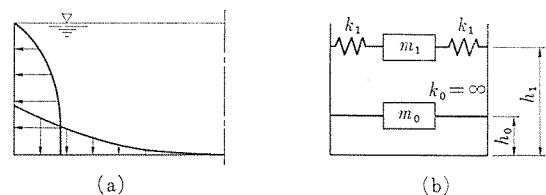


図-16 地震時水圧および Housner のモデル

を 図-16 (b) に示す 2 質点系モデルに置きかえ、各質点の質量と重心距離 (腕長) を求めて、水平力と転倒モーメントを計算している。下の質点 (固定水) は、タンク本体に剛結されているとし、100% 質量効果を評価し、上の質点 (動水) はバネでタンク本体に結合されているとし、その振動特性を考慮して、質量効果を減少させている。また、底版圧の影響を考慮する場合には、腕長を加算して求めている。

最近、地震に対する不安から、水平震度を大きくする傾向があるが、水平震度とは地盤表面の加速度を示すもので、実際の応答がその設置地盤の特性と構造物の固有周期に依拠するものであるから、修正震度法 (文献 13) など参照) などを用いて検討すべきであり、いたずらに水平震度のみを大きくするのは疑問である。

近年スロッシング（自由水面の動揺）が問題となっているが、概して良質地盤上に設置される水槽で、果してこの現象が生ずるかどうかは定かでないし、未だ完成された手法も見当たらないので、現在のところはこの検討は不要であろう。詳しくは文献 14) などを参照されたい。

3. 施 工

PCタンク施工の手順は概略 図-17 のとおりである。

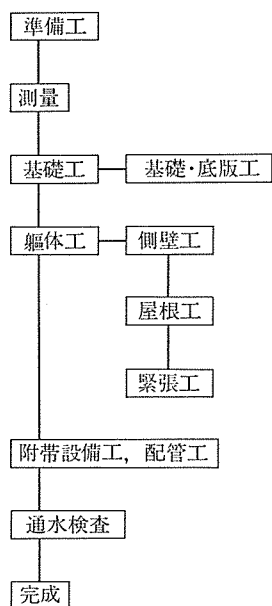


図-17 施工の手順

3.1 基礎工

土を掘削し、割栗地業、杭工事などを行い、底版の下を通る入排水管などを設置し、底版コンクリートを打設する。容器の最大の敵はひび割れであるから、コンクリートはできるだけ一回で打設し、十分な湿潤養生を行う。特に壁下端固定構造では、底版と側壁の乾燥収縮の進行に差を生じさせないよう、壁体がある程度打ち終るまで十分養生しなくてはならない。

3.2 躯体工

PCタンクでは荷重によるひび割れを避けることができ、一般にはライナーや防水工を必要とせず、コンクリートの水密性で漏水を防ぐ。よって、コンクリートの施工は十分留意し、特に薄い壁体に多くの鋼材が配置されているので、バイブレータによる締め固めは、慎重かつ確実に行わなくてはならない。

側壁は1回の打設高さを1~3m程度にし、何回かに分けて施工するので、打ち継ぎ目が生ずる。打ち継ぎ目は、止水板などを用いることなく、レイタンスの除去や

チップング等で処理するのが一般的である。壁下端固定の場合の底版と側壁1段目の打ち継ぎは、乾燥収縮や両者間の温度差が原因と考えられるひび割れが入り易いので、養生方法やプレストレスの早期導入などを考えるべきである。

ドーム屋根は、その開角が30°程度であれば、型枠は底面だけで十分である。コンクリート打設はできるだけ支保工に偏載荷させないことが重要である。

緊張は、ジャッキをリブの数だけそろえ、一周分同時に行うことが望ましい。

4. おわりに

これまで、主として、設計的な観点から、PCタンクの構造について詳説してきた。本文では触れなかったが、グラウトをしない、いわゆるアンボンドケーブルを用いたPCタンクの実績も、かなりできてきた。今後ますます増加するものと思われる。しかし、このような新しい技術的な問題をも含めて、PCタンクに関する示方書がないために、設計の基準がまちまちであることは否めない。現場技術者が安心して設計できるよう、1日も早くPCタンク示方書ができるよう願ってやまない。

参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：水道施設々計指針・解説，1977
- 2) S. Timoshenko, S.W. Krieger: Theory of Plates and Shells, McGRAW-HILL BOOK COMPANY
- 3) 岡田清：プレストレスコンクリートによる円形構造物の施工，土木施工 '64 増刊号
- 4) 猪股俊司：プレストレスコンクリートの設計および施工，技報堂
- 5) L.R. Creasy: Prestressed Concrete Cylindrical Tanks, Contractors Record Limited.
- 6) 宮崎義成：円形PCタンクのリブ数の決定に関する経済的考察，プレストレスコンクリート Vol. 13, No. 1, 1971
- 7) 牧野靖：原子力発電所構造物の設計と施工②コンクリート格納容器，土木学会誌 Vol. 63, 4, 1978
- 8) M.J.N. Priestley: Ambient Thermal Stresses in Circular Prestressed Concrete Tanks, A.C.I. Journal, 10, 1976
- 9) 猪股俊司：プレストレスコンクリート製容器. F.K.K. 技術資料 No. 7
- 10) 土木学会：構造力学公式集
- 11) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針—直接基礎編
- 12) TID 7024: Nuclear Reactors and Earthquakes, Aug. 1963
- 13) 太田，佐伯，塩井，田崎，川島：新耐震設計法（案）第Ⅱ編，土木技術資料 20-4, 1978
- 14) 清水信行：円周タンクの耐震設計（1）~（3），配管技術 '74, 7~9