

PCタンクに関する技術的動向と展望

西尾 浩志*

1. はじめに

プレストレストコンクリート製タンク（PCタンク）は、1957年に日本で初めて建設されて以来¹⁾、上水道、農業用水、下水道および液化低温ガス貯蔵施設などの幅広い用途に用いられている。これは、PCタンクの構造が非常に合理的であり、優れた性能すなわち高い液密性、耐久性および耐震性などが認められているためと考えられる。

PCタンクは数の上では上水道用が圧倒的に多く、1957年以來3 500基を超える実績があるとされている。1990年度以後建設された貯水槽の年度ごとの施工件数および総容量を図-1に示す（プレストレスト・コンクリート建設業協会年報²⁾に基づき集計した）。図-2には池田³⁾によりまとめられた1985年以前の同様の実績を示す。これらにより、PCタンクは1960年代半ばから急激に増加し、1970年代半ばから年間施工件数200前後、総容量50万m³～60万m³程度でほぼ安定して建設されていることが分かる。容量別に件数を見る

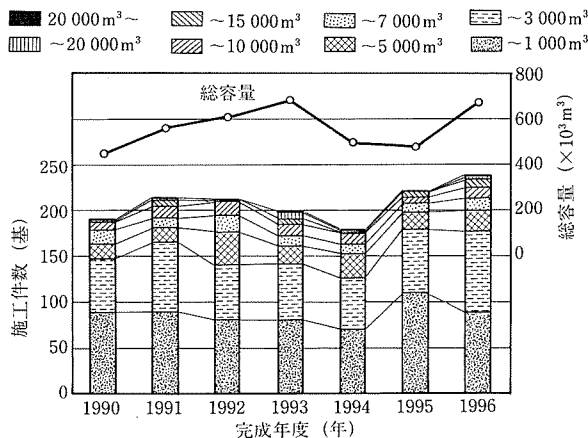


図-1 PCタンク施工実績(1990年以後)

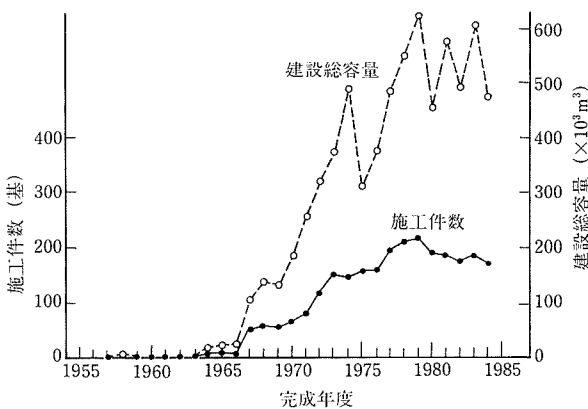


図-2 PCタンク施工実績(1985年以前)³⁾

と、1 000m³以下のPCタンクが全体の約40%、3 000m³以下は全体の約70%以上を占める。一方、1万5 000m³を超える大容量の実績も見られ(表-1、底版もコンクリートで作られた円筒形のPCタンクに限る)、最近では実容量5万m³を超える上水道用PCタンクも建設されている。

表-1 15 000m³以上の上水道用円筒形PCタンクの実績

容 量	基 数
15 000m ³ ～	15
20 000m ³ ～	8
25 000m ³ ～	5
30 000m ³ ～	8
合 計	36

本文では、PCタンクに関する最近の技術的動向および展望について、耐震設計法を中心に施工方法等について述べる。なお、本文では主に水槽として用いられる平底円筒形PCタンクについて述べることにする。その他については他の論文等を参考にされたい^{3), 4)}。

2. 設計における技術的動向と展望

2.1 兵庫県南部地震によるPCタンクの被災状況

1995年に発生した兵庫県南部地震により、阪神・淡路地区を中心に膨大な数の構造物が壊滅的な被害を受けた。PCタンクについても、地震直後からその震災について調査が行われ、いくつかの報告がなされている。プレストレストコンクリート技術協会で行った調査⁵⁾による、PC容器構造物の被災状況を表-2に示す。これによれば、調査対象225件のうち、機能に影響する構造的損傷が発生したものが2件、装飾用タイルの剥離など軽微な損傷が発生したものが8件であった。前者の2件については、それぞれのタンクに固有の問題がもともとあり⁵⁾、地震によりこの問題が顕在化し損傷につながったもので、PCタンクの構造そのものが直接の原因で損傷を受けたのではないことが分かっている。

兵庫県南部地震によるPCタンクの被害が、他の構造物と比べると軽微であった理由としては、以下のようなことが

表-2 兵庫県南部地震によるPC容器構造物の被災状況⁵⁾
(単位:件)

府県名	調査対象容器構造物数	機能に影響する構造的損傷発生容器構造物数	軽微な損傷発生容器構造物数	損傷なし
兵庫県	105	2	2	101
京都府	40	0	3	37
奈良県	35	0	1	34
大阪府	31	0	2	29
和歌山県	14	0	0	14
合 計	225	2	8	215

* Hiroshi NISHIO : (株)安部工業所 取締役 技術副本部長兼技術部長

考えられる。

- ① PCタンクの固有周期が一般には0.1秒以下と非常に小さく、地盤の卓越周期と一致しなかった。
- ② PCタンクは軸対称の壁構造であり、耐震的な構造である。
- ③ PCタンクは薄肉シェル構造であり、自重が軽く、躯体慣性力の影響が少ない。

2.2 耐震設計の動向

(1) 耐震設計法の遷移

表-3にPCタンクに関する指針類および耐震設計法の遷移を土木学会のコンクリート標準示方書等の遷移と比較して示す。1978年に発生した宮城県沖地震を契機に、PCタンク的设计施工指針としては初めて、「水道用プレストレストコ

ンクリートタンク標準仕様書」⁶⁾(PCタンク仕様書)が1980年日本水道協会から発行された。これ以後PCタンクは、この仕様書に基づき、震度法により設計水平震度最大0.2~0.3程度で設計されるようになった。これ以前についても、PCタンクについての公の規準はなかったものの、ほぼ同様の設計法が採られていたようである。兵庫県南部地震を経験し被害が軽微であったPCタンクは、このような耐震設計法で設計されたものであった。

(2) 新「PCタンク指針」における耐震設計法

1Gを超える応答加速度を考慮する必要性を提起した兵庫県南部地震を経験して、耐震設計法が各方面で見直された。日本水道協会においても、1997年に水道施設全般に対する「水道施設耐震工法指針・解説」⁷⁾(水道耐震指針)を改訂

表-3 PCタンクに関する指針類および耐震設計法の遷移

年	日本水道協会		土木学会			
	耐震関係指針	施設基準等	耐震設計法	RC	PC	耐震設計法
1931				「鉄筋コンクリート標準示方書」制定 (1931)		
1953	「水道施設の耐震工法」					
1955	発刊(1953)	「水道施設基準」制定			「プレストレストコンクリート設計施工指針」	
1956		(1955)		「鉄筋コンクリート標準示方書」改訂 (1956)	震度法	
1958		「水道施設基準解説」改訂	震度法		(1955)	設計水平震度 $K_h=0.2$
1961		(1958)	地域別標準震度×		「プレストレストコンクリート設計施工指針」改訂	(標準)
1966	「水道施設の耐震工法」	「水道施設基準解説」改訂	地盤の種別および			設計鉛直震度 $K_v=K_h/2$
1967	改訂(1966)	(1966)	施設の種別による比率 $K_h=0.1\sim 0.3$	「鉄筋コンクリート標準示方書」改訂 (1967)		(鉛直震度を考える場合)
1974			K_v :とくに記述なし	「コンクリート標準示方書」改称・改訂 (1974)		
1977		「水道施設設計指針・解説」改称・改訂 (1977)				
1978					「プレストレストコンクリート標準示方書」改訂 (1978)	
1979	「水道施設耐震工法指針・解説」改称・改訂 (1979)		原則として			
1980		「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」制定 (1980)	震度法(固有周期0.5秒以下)			震度法
1986		(1980)	修正震度法	「コンクリート標準示方書」改訂(1986)		修正震度法
1990		「水道施設設計指針・解説」改訂 (1990)	このうち震度法では			設計水平震度 K_h は
1991			設計水平震度 K_h は	「コンクリート標準示方書」改訂(1991)		$K_h = \nu_1 \nu_2 \nu_3 \nu_4 \nu_5 K_0$
			$K_h = \Delta_1 \Delta_2 \Delta_3 K_0$			標準水平震度 $K_0=0.2$
			標準設計水平震度			地域別補正係数 $\nu_1=0.7\sim 1.0$
			$K_0=0.2$ 下回らない			地盤別補正係数 $\nu_2=0.9\sim 1.2$
			地域による補正係数			構造物の固有周期による
			$\Delta_1=0.7\sim 1.0$			補正係数 $\nu_3=0.5\sim 2.0$
			地盤の種別による補正係数			設計想定地震時における
			$\Delta_2=0.9\sim 1.2$			構造物の限界状態による
			構造物の種別による補正係数			補正係数 $\nu_4=0.4\sim 1.0$
			$\Delta_3=0.5\sim 1.0$			計算上考慮しない部材の
			設計鉛直震度 K_v			耐震効果に関する補正係数
			$K_v = K_h/2$			$\nu_5=0.7\sim 1.0$
			(設計鉛直震度を考慮する場合)			設計鉛直震度 K_v
						$K_v = K_h/2$ (考慮する場合)
						(地震方向としては一般に水平方向のみを考慮すればよいが、必要に応じて鉛直方向も考慮する)
1996				「コンクリート標準示方書」改訂(耐震設計編制定)		2つの地震動レベルおよび3つの耐震性能を設定し、安全性を照査する
1997	「水道施設耐震工法指針・解説」改訂 (1997)		2つの地震動レベルを設定し、各々のレベルに対して安全性を照査する			(1996)
1998		「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」改訂 (1998)	レベル2地震に対して、原則として震度法を用い、構造物の塑性変形を考慮			
			固有周期0.1秒以下の場合			
			レベル1: $K_{h1}=0.12\sim 0.24$			
			レベル2: $K_{h2}=0.30\sim 0.36$			

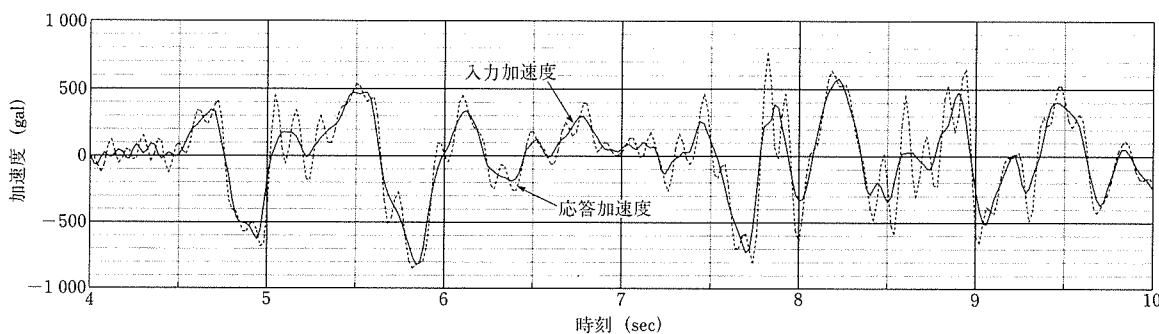


図-3 線形動的解析 入力および応答加速度⁹⁾

し、この中で耐震設計に用いる地震動としてレベル1およびレベル2を考慮することを定めた。さらに、それぞれの地震に対し加速度応答スペクトルを与え、震度法による設計に用いる設計震度としてはレベル2地震で最大1.4という値を示した。

これを受け、PCタンクの耐震設計に関してもPCタンク仕様書が改訂され、1998年5月「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」⁸⁾ (PCタンク指針) と名称も改め日本水道協会から発行された。以下、この指針におけるPCタンクの耐震設計法を、とくに地震動レベル2に対する考え方を中心に概説する。なお、以下の①および②については、プレストレスト・コンクリート建設業協会PCタンク検討小委員会における活動の成果である。

① レベル2クラスの地震外力に対する線形動的解析

1万m³のモデルタンクに対して、内容水を軸対称液体要素、ドーム屋根および側壁を軸対称シェル要素とし、内容水と側壁の連成を考慮したモデル化を行い、神戸NS (1995年、最大加速度818gal)の地震波を入力し、線形時刻歴応答解析が行われた⁹⁾。側壁の変形が最大となる位置 (側壁下端から壁高のほぼ中央の位置) における入力加速度と応答加速度との関係を図-3に、側壁の変形が最大となる時刻におけるタンクの変形図を図-4に示す。

この結果より以下のことが分かった。

- タンク全体はほぼ剛体として挙動し、その挙動の中で側壁の中間部が膨れたり、へこんだりしながら揺れる。
- タンクの各位置での応答加速度時刻歴は入力加速度とほとんど変わらない。
- 一般の形状であればPCタンクに対して特別な動的特性を考慮する必要はない。

② レベル2クラスの地震外力に対する非線形静的解析

①と同形状の1万m³のモデルタンクに対して積層シェル弾塑性解析が行われた。解析モデルを図-5中に示す。シェル厚方向に8層に分割し、コンクリート、PC鋼材および鉄筋の材料非線形が考慮された。荷重については、常時荷重を初期に作用させ、動水圧等の地震時水平荷重を分布荷重で表現し、これを逐次増加させながら2G相当の地震に対する荷重まで増加させた。このときの側壁上端位置における荷重-変位関係を図-5に示す。

この結果より以下のことが分かった。

- レベル2クラスの地震外力が作用したとき、PCタンク

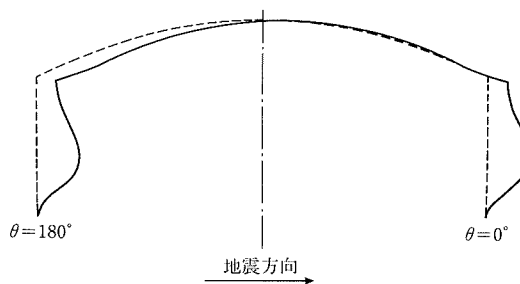


図-4 線形動的解析 変形図(変形最大時)⁹⁾

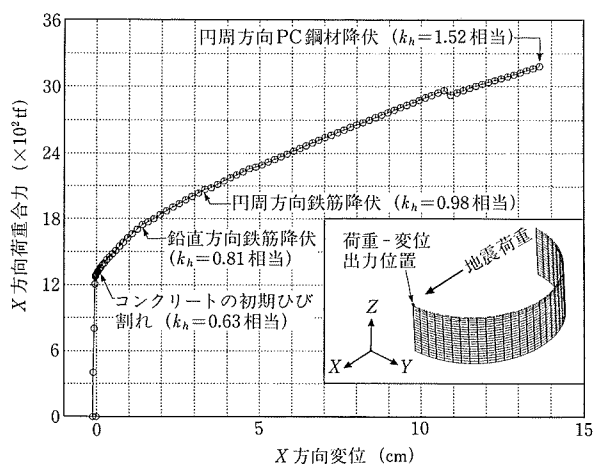


図-5 非線形静的解析 側壁上端の荷重-変位関係

に最も影響を与える荷重は動水圧である。

- このときPCタンク側壁では、まずフープテンションにより鉛直方向のひび割れが発生し、その後鉛直方向鉄筋、次に円周方向鉄筋が降伏し、最後に円周方向PC鋼材が降伏して破壊に至る。
- このときPCタンクの破壊モードとしては、フープテンションによる円周方向軸引張破壊に着目すべきである。
- 側壁の円周方向軸引張荷重-半径方向変位曲線は、コンクリートのひび割れ点で大きく剛性が低下するバイリニア型でモデル化できる。

③ PCタンク指針における耐震設計法

①および②で得られた結果等に基づき、PCタンク指針においては以下のような耐震設計法が採用された。

PCタンク指針では、地震動レベル2に対する耐震計算は原則として震度法により行うこととしている。このときの設計水平震度は、構造物の塑性変形能力を考慮して次式で

求めてよい。

$$K_{h2} = C_s \cdot K_{h02} \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここに、

C_s : 構造物特性係数で、構造物の応答による減衰とじん性による塑性変形能力の程度において適切に定める。

K_{h02} : 構造物の重心位置における基準水平震度で、その値は地盤種別ごとに定められている。固有周期が0.1秒以下でⅡ種地盤の場合 $K_{h02} = 0.8$ となる。

C_s については、②で述べたように円周方向の軸引張力—ひずみ曲線を図-6に示されるようなバイリニア型に仮定し、これにエネルギー—一定則を適用して各種モデルについて試算した結果に基づき、一般的形状のPCタンクでは $C_s = 0.45$ としてよい。

PCタンク指針では、PCタンクが地震時に保有すべき耐震水準を表-4のように定めている。これらの水準が満足されていることの照査は以下のように行う。地震動レベル1に対しては、ひび割れの発生を認めず、コンクリートに発生する引張応力度が許容応力度以下であることを照査する。これについては従来行われてきた震度法による耐震設計と同等である。地震動レベル2に対して保有すべき耐震水準のうち、「人命に重大な影響を与えないこと」はPCタンクが崩壊しないことであり、具体的には円周方向軸引張耐力および鉛直方向曲げ耐力が円周方向軸引張力および鉛直方向曲げモーメントより大きいことを照査する。一方、「PCタンクの機能保持が可能」とは、PCタンクの液密性が確保されることであり、具体的には円周方向応答ひずみが円周方向許容ひずみより小さいことを照査する。この許容ひずみは、地震力除荷後に液密性が確保される程度に復元されるための許容ひずみで、一般の場合は鉄筋の降伏ひずみとしてよい。

- Q_{cr} : 部材のひび割れ発生荷重
- Q_{py} : PC鋼材降伏時の荷重
- Q_{sy} : 鉄筋降伏時の荷重
- Q_y : 部材の仮想降伏荷重
- ϵ_{cr} : ひび割れ発生時のひずみ
- ϵ_{py} : PC鋼材降伏時のひずみ
- ϵ_{sy} : 鉄筋降伏時のひずみ
- ϵ_y : 部材の仮想降伏ひずみで、ひび割れ発生時のひずみと鉄筋降伏時のひずみとの平均ひずみ

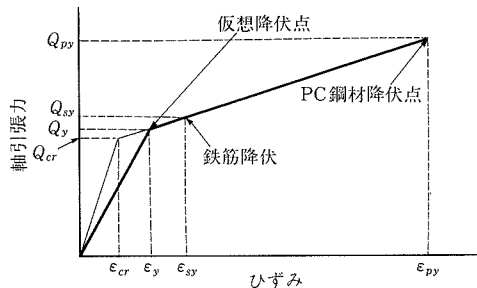


図-6 円周方向の軸引張力—ひずみ曲線

表-4 PCタンクが地震時に保有すべき耐震水準

地震動レベル	耐震水準
地震動レベル1 (L1)	無被害であること
地震動レベル2 (L2)	人命に重大な影響を与えないこと PCタンクに軽微な被害があっても、PCタンクの機能保持が可能であること

④ 新旧の耐震設計法で設計されたPCタンクの比較

代表的な形状のPCタンクに関する試算の結果、新しい耐震設計法で設計されたPCタンクについては、従来の規準で設計されたものと比較して、一般的形状の場合、側壁厚や鉄筋量、PC鋼材量の増加はほとんどないことが確認された。このことは兵庫県南部地震においても軽微な被害しか生じなかったことと対応する。

2.3 設計における技術的展望

(1) 耐震設計法に関する展望

PCタンクがどの程度の地震入力でどのようなモードで破壊するのかについて、応答加速度が1Gを超えるような兵庫県南部地震を経験するまでは十分に議論がなされなかった。この地震後、短時間で検討が行われ、PCタンク指針においてPCタンクの塑性変形能力を考慮した耐震設計法が示された。この耐震設計法の根拠として、1Gクラスの入力に対する線形動的解析や非線形静的解析が行われたが、今後非線形動的解析や実験等が行われ、この耐震設計法を検証していくことが求められる。これらの検討を通じ、より合理的で簡便な設計のあり方が追究される必要がある。

PCタンク指針で示された耐震設計法は一般的な平底円筒形のPCタンクが対象である。高架タンクや直径に比べ水深の大きいタンク、卵形消化槽のような円筒形でない形状のタンクなどに関しても、どのようなモードで破壊するか、どのようにモデル化して塑性変形能力を評価するのかなどについて、十分検討がなされ合理的な耐震設計法が示されなければならない。

(2) 経済性を追求した設計

本文では詳細に触れないが、農水用ファームポンドに関しても、農林水産省の設計指針として発行に向け、現在最終段階に入っている。この指針ではコスト削減を目指した配慮をいくつか行っており、以下については、先取りした形ですすでに通達され、設計に適用できるようになっている。

① これまでは一律に10kgf/cm²で設計されることが多かった余裕圧縮力を、全プレストレス量の1/3程度となるように設定すればよいとし、容量および水深に応じて4~10kgf/cm²の範囲で具体的に示している。

② 容量1000m³以下で側壁の高さが5m以下であれば、側壁鉛直方向にプレストレスを導入せず、鉄筋コンクリート構造として設計してよいとしている。

ファームポンドは、内容水が飲料水ではなく地震時にも漏液が許容され得ることから、すべてのタンクに無条件で適用することはできないが、今後はタンクに求められる性能に応じてこうした経済性を追求する設計も考慮していく必要がある。

(3) 非回転体形状のPCタンク

PCタンクの形状は円筒形が一般的である。しかし、種々の理由で円筒形以外の形状のタンクも建設されている⁴⁾。タンクに求められる機能から卵形形状を採用した下水汚泥消化槽、主に景観上の理由から双曲面形状を採用した配水池、電波障害防止の目的で円錐台形状を採用した配水池などがその代表的な例である。これらに見られるように、円

筒形以外の形状といっても、これまでは構造的利点を生かすため回転体が主であった。

最近では、用地の形状等の理由からその水平断面形状が角形¹⁰⁾や小判形¹¹⁾をしたタンクなどが建設されており、これらは非回転体である(写真-1)。今後はさらに種々の形状のPCタンクが設計されると考えられ、またそうあるべきと考えるが、過度に装飾的にならず、PC構造の合理性をなるべく生かせる形状を選択すべきであろう。

3. 施工における技術的動向と展望

3.1 施工における技術的動向

PCタンクの施工は、建設現場で支保工・型枠を組み、コンクリートを打設し、プレストレスを導入する方法が一般的である。ここでは、ここ数年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で発表されたPCタンクの新しい施工法に関する事例を紹介する。

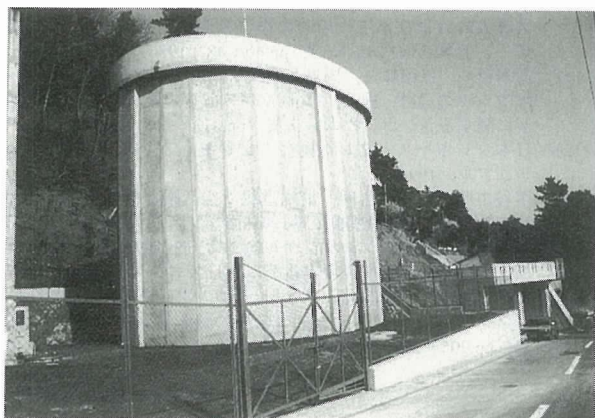


写真-1 小判形形状のPCタンク

(1) プレキャストタンク

PCタンクの側壁および屋根などの部材を分割し、パネル化して工場などで製作し、建設現場で組み立てるもので(図-7)¹²⁾、工期の短縮が図れることが最大の特徴である。

1970年代初め頃から建設されているが、1993年日本プレキャストタンク協会が設立されて以後50基程度の実績がある。

(2) 空気膜型枠工法

PCタンクに多く用いられるドーム屋根を、空気圧で支えられた膜材とその上に施工するモルタルシェルを型枠支保工として施工する工法で(写真-2)、工期短縮が図れることなどが最大の特徴である¹³⁾。

1990年代初めからこれまでに70基を超える実績があり、このうちタンクの最大内径は50mである。

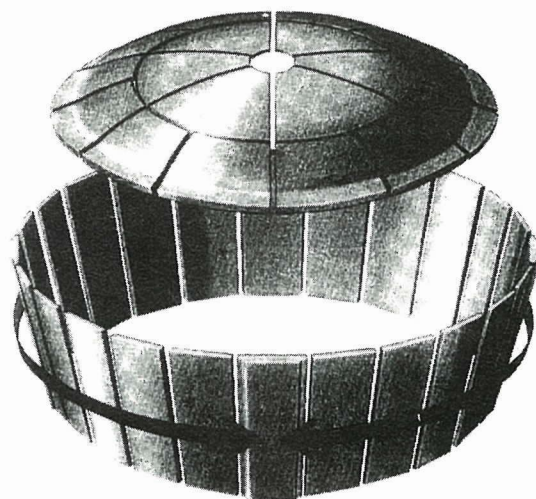


図-7 プレキャストタンク概念図¹²⁾



写真-2 空気膜型枠工法

(3) 側壁のコンクリートを一度に打設する工法

PCタンクの側壁は、水平分割され、1回の打設高さは1.8m程度で段階的に施工されるのが一般的である。標記工法では、側壁全高さの鉄筋、PC鋼材の配置を行い、同じく全高さの外側型枠を組み立てたうえで、内側型枠を組み立てながら側壁全高さのコンクリートを一度に打設するものである¹⁴⁾。工期短縮が図れることが最大の特徴である。

3.2 施工における技術的展望

PCタンクの施工方法は、1970年代に内ケーブル方式が主流になって以来、大きな変化はなく今日に至っている。近年、前節で紹介した事例に示されるようなそれぞれの部材について工期短縮、省力化等を目指した方法が工夫されてきている。しかし、工期短縮等の効果が経済性に十分反映されるところまでには至っていないのが現状と思われる。今後は、工事規模が小さいものが多いこと、厚さが薄い部材であること、円筒形であることなどの特徴を考慮して経済性にもメリットが出せる施工方法を工夫する必要がある。

4. おわりに

日本において約40年の歴史を経たPCタンクに関する最近の技術的動向および展望について、耐震設計法を中心に施工方法等について述べた。PCタンクに関しては、これまでは提供できる性能のバリエーションが限られていたと感じる。車で言えば、高級車のみをユーザーに提供してきた。今後はそれぞれのタンクごとのきめ細かい要求性能に応じた、最高級車から大衆車、軽自動車までに相当する種々の

タンクを意匠や付帯設備まで含めて提供できなければならない。こうしたことができる設計法、設計体系および施工法を追究していくことが課題であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 西尾浩志：伊自良村簡易水道PCタンク，プレストレストコンクリート，Vol.35，No.6，p.55，1993
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：Prestressed Concrete Year Book資料編，1991～1997年版
- 3) 池田尚治：PC円形構造物の現況，最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み，pp.31～73，プレストレストコンクリート技術協会，1986.1
- 4) 畑山義一，井手口哲朗：水道用PCタンクの新しい形態と技術動向，プレストレストコンクリート，Vol.38，No.6，pp.38～46，1996
- 5) プレストレストコンクリート技術協会：兵庫県南部地震PC構造物震害調査報告書，pp.93～102，pp.125～126，1995.4
- 6) 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，1980.3
- 7) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.3
- 8) 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設計施工指針・解説，1998.5
- 9) 同上，pp.245～246
- 10) 木下謙介，林哲司，横山博司：PC角形水槽におけるプレストレスト導入時および水圧作用時のひずみ測定結果の検討，コンクリート工学，Vol.24，No.1，pp.40～48，1986
- 11) 露木賢一，黒田順一，岡島武博，松岡篤：小判形プレキャストPCタンクの設計・施工，第6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，pp.213～218，1996.10
- 12) 日本プレキャストタンク協会：プレキャストPCタンク施工マニュアル，1995.4
- 13) 塩谷由明，井手口哲朗，清水重紀：空気膜型枠(エアドーム工法)によるPC配水池屋根工事，第6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，pp.197～204，1996.10
- 14) 横山博司，村井康彦，坂本義範：プレストレストコンクリートタンク側壁を一度に施工した場合のコンクリート側圧，第6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，pp.205～208，1996.10

【1998年10月13日受付】