

容器構造物における PC 技術

横山 博司*

1. はじめに

国内外において、貯水槽、消化槽、貯油槽等、表 - 1 で分類されるプレストレスト (PC) 容器構造物が建設されている。これら容器構造物の形状は、矩形等とする場合もあるが一般に円筒形で、軸対称シェル構造である。

表 - 1 容器構造物の分類について

| 用途 | 備考 |
|---------|----------------|
| 貯水槽 | 上水、工業、農業、電力、防火 |
| 消化槽・処理槽 | 下水道施設、排水廃液 |
| 貯油槽 | 石油類 |
| ガスタンク | 液化石油ガス、液化天然ガス |
| サイロ | 鉱物、セメント、穀物 |
| その他の容器 | 原子炉格納容器 |

この円筒形容器構造物は、樽 (図 - 1) にたとえることができる。コンクリート側壁は側板に、円周方向 PC 鋼材はたがに相当する。ジャッキを用いて PC 鋼材を緊張し、コンクリートに圧縮力を与えることは、木桶のたがを締めることにあたる。本原理より、水密性に優れた構造となる。

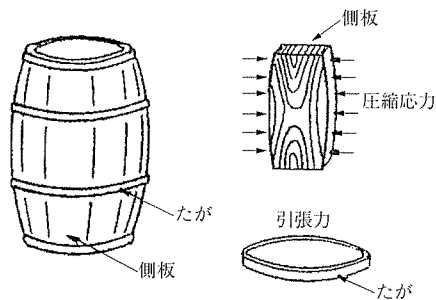


図 - 1 樽の原理

PC 円筒形タンクを最初に利用したのは、アメリカの W.E.Hewett で 1923 年のことである。これは、コンクリートタンクに引張力を与えた鉄筋を巻きつけたもので、わずかなプレストレスが与えられた構造であった。しかし、タ

ンクが空の場合にクリープおよび乾燥収縮がおり、長期間タンクを空にしておいた後では、再び水を入れたときに漏水が認められるようになった。このことからプレストレッシングには鉄筋では不十分であって高強度鋼線を用いる必要が認められた¹⁾。その後、改善され、欧米において PC 容器構造物が広く普及した。

わが国では、1957 年に、最初の円筒形容器構造物として上水道用 PC 貯水槽が建設され²⁾、現在までに 7 700 基を超える実績 (図 - 2) があると推定される^{3) 4)}。

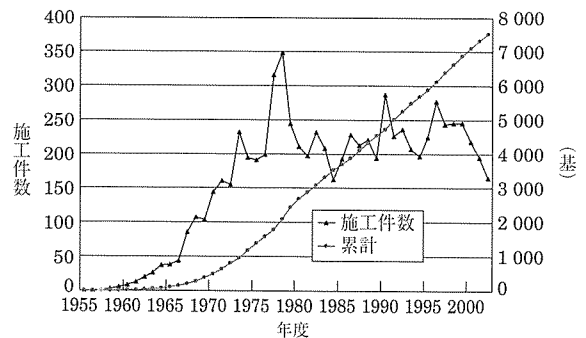


図 - 2 PC タンクの施工実績

ここ十数年での分類別実績により調査した結果、貯水槽が PC 容器実績のほぼ 90 % を占めており、総実績においても貯水槽の実績が圧倒的に多いことがわかる。当初の貯水槽建設以来、消化槽、ガスタンク、原子炉格納容器等の順に PC 容器構造物の適用範囲が拡大してきたものである。

国内の容器構造物における PC 技術は、数多く施工された貯水槽 (以下 PC タンクと呼ぶ) において発展してきたものと考えられる。ここに、PC タンクの設計および施工に関する技術について述べる。そして、表 - 1 に示すその他の構造物についても、その特性についてまとめて記すものとする。

2. PC タンク

2.1 構造

一般的な PC タンクは、底版と円筒形側壁とドーム形状の屋根からなり、図 - 1 に示す“たが”の原理により、側壁が PC 構造となっている。建設された PC タンクは、容量 3 000 m³ 以下のものが大半であるが、1 万 m³ 以上のものも多数あり、実容量 57 000 m³ の PC タンクも施工されている。(写真 - 1 参照)

2.2 設計規準

PC タンクは、当初 1955 年発行の土木学会「プレストレストコンクリート設計施工指針」を用いて設計されていた。



* Hiroshi YOKOYAMA

(株)安部工業所 技術開発部
取締役 部長



写真-1 上水用 PC タンク 57 000 m³

その後、PC タンクに関する規準類が整備され、それらの規準に従い設計されるようになった。以下に、PC タンクの設計に関する規準類を発行年順に列記する。

- ・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年3月(社)日本水道協会
- ・容器構造設計指針・同解説 1984 制定 日本建築学会
- ・設計技術資料 PC タンクの設計
1991年3月 中国四国農政局土地改良技術事務所
- ・容器構造設計指針・同解説 1996 改訂 日本建築学会
- ・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 年版 (社)日本水道協会
- ・土地改良事業設計指針 ファームポンド
1999年3月 農林水産省構造改善局建設部

2.3 耐震設計

PC タンクは、これまでの地震が直接的な原因で、機能に重大な影響を及ぼすような被害は確認されていない⁵⁾。PC タンクの耐震設計は、1978年に発生した宮城県沖地震を契機に、「水道施設耐震工法指針・解説 1979年版」(日本水道協会)が改訂され、その耐震計算例に円筒形地上水槽の耐震計算例が示された。また、PC タンクの設計施工指針として初めて、「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」が1980年に発刊され、これ以後 PC タンクは、震度法により設計水平震度 0.2~0.3 程度で設計されるようになった。

その後、1995年に発生した兵庫県南部地震を経験し、「水道施設耐震工法指針・解説」(1997年版)がまとめられた。PC タンクに関しては、兵庫県南部地震が直接的な原因で、機能に重大な影響を及ぼすような被害はなかったものの、これに準じた基準の改訂が行なわれ、「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年版」が発刊され、地震動としてレベル1およびレベル2の耐震設計が行なわれている。

表-2に水道施設耐震工法指針における設計地震動の大きさを示す。

C_s は構造物特性係数で、塑性変形のエネルギー吸収能力による応答低減率を表している。一般に0.45としている。一般的なPCタンクの設計では、供用時の荷重から決ま

表-2 水道施設耐震工法指針における設計地震動

| | | レベル1 (gal) | レベル2 (gal) |
|-------|------|------------|-------------|
| 基盤 | | 80~100 | 400~500 |
| 地表面 | I種 | 160 | 600~700 |
| | II種 | 200 | 700~800 |
| | III種 | 240 | 400~600 |
| 構造物重心 | I種 | Max 200 | 700~1 000 |
| | II種 | Max 250 | 1 000~1 400 |
| | III種 | Max 300 | 800~1 200 |

上水道施設における設計震度は下式により算出する。
 地震動レベル1 $Kh1 = C_z \cdot Kh 01$ (地域係数×基準水平震度)
 地震動レベル2 $Kh2 = C_s \cdot Kh 02$ (構造物特性係数×基準水平震度)

る断面諸量を与えると、耐震性能は自動的に確保される場合が多いといわれている

最近の設計指針において「兵庫県南部地震が直接的な原因で、機能に重大な影響を及ぼすような被害はなかった」と明記されているが、PCタンクに関する実際の地震時挙動は、その研究が少なく不明な所が多いのが現状である。PCタンクの耐震性能を解明する目的で、容量10 000 m³のPCタンクを対象としてレベル2地震動相当の実地震波を用いた非線形動的解析による研究がここ数年、実施されている⁶⁾。本研究での解析モデルおよび解析結果の1例を図-3および図-4に示す。本研究結果として以下のことが示されている。

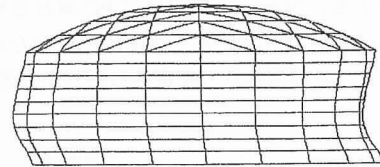


図-3 振動モード図

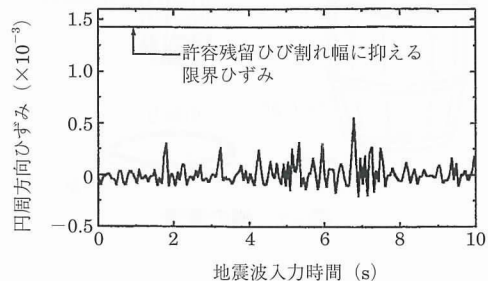


図-4 円周方向ひずみの時刻歴応答

- 1) PCタンク設計施工指針に基づく直径と水慎の比 $D/H = 3.5$ のタンク側壁は、耐震設計以外の条件から決められる断面諸量により、現行指針で規定される耐震性能が十分に付与される。
- 2) 側壁のひび割れ発生や鉄筋降伏による剛性低下を考慮したエネルギー一定則に基づく応答ひずみ算定手法は、動的解析結果に比べ、過大ではあるが、安全側の応答量を推定できることが確認された。
- 3) 強地震動に対し規定の耐震性能を満足させるため、供用時の荷重条件から決められてきた断面諸量を変更する必要がある場合、動的解析に基づく耐震性照査を行なう

ことが合理的である。

本結果は、PCタンクの耐震性能を明らかにするものであり、今後の性能設計への移行等に寄与するものと考えられる。

2.4 施 工

欧米での黎明期において、円筒形 PC 容器構造物は、アメリカの Preload Inc (1943) およびスイスの B.B.R.V (Stahlton A.G.1949) によって開発された PC 鋼線をコンクリート側壁の外周に巻きつける外巻き方式 (図 - 5 参照) で施工され、広く普及した。

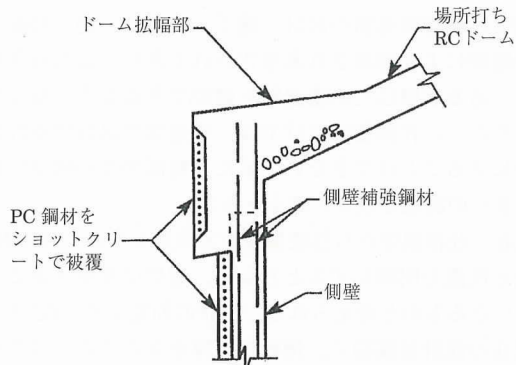


図 - 5 外巻きタンク側壁断面図

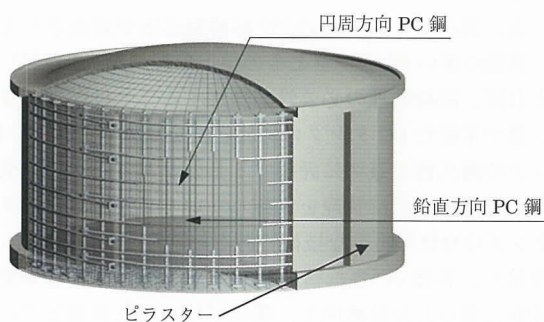


図 - 6 中巻きタンクの側壁断面

当初、国内においても、PC鋼材を側壁コンクリートの側面に巻き付けて緊張定着し、その外面にショットクリートを吹き付けて保護する外巻き工法が採用されていた。本外巻き工法には、1960年(昭和35年)にアメリカより技術導入されていたプレロード工法がある。しかし、ショットクリートを吹き付ける技能者不足と品質管理が難しいことから、PCタンクの施工方法は、次第に側壁部材内にPC鋼材を配置する中巻き工法へと転換していった。本工法では、円周方向プレストレス力はPC鋼材を、ピラスターを用いて緊張定着することにより与えられる(図-6参照)。

その後、施工の省力化を目的として以下に示す工法が開発されてきている。

- ① プレキャスト PC タンク：側壁部材、屋根部材のプレキャスト化であり、1970年代当初より採用されている。
- ② 空気膜型枠工法：ドーム屋根を空気圧で支えられた膜材を用いて施工する工法である。1990年(平成2年)に採用され、これまでに130件以上の実績がある。
- ③ スムーズ PC タンク：X アンカーとプレグラウト PC 鋼

材など摩擦係数の小さいPC鋼材を用いて、ピラスターを省略する工法である。2001年(平成14年)に汚泥消化タンクに初めて採用され、その後PCタンクに採用され、普及が図られている。

PCタンクの黎明期に、中巻き工法への移行以外にも、多くの創意工夫が実施されたものと推察する。しかし、施工の省力化に関する大きな変化は、上記のように、ここ15年の間に実施されている。これは、合理的な施工方法への改善を必要とする時代のニーズであるとも考えられる。

最近、側壁円周方向に数段必要であった横締め鋼材を、らせん状に配置することで1本のPC鋼材の配置とし、小型緊張装置で連続的にプレストレスを与える工法(スパイラル PC タンク 2004年)が開発されている。そして、合理的な構造として金属との複合も提案され、アルミを用いたドームの採用事例(写真-2参照)が増加している。



写真 - 2 アルミドーム屋根の写真

3. その他の容器構造物

3.1 消 化 槽

下水道施設の消化槽にPC容器構造物が採用されている。この消化槽の主な基本形状としては亀甲型と卵形がある。

PC構造物としては、ドイツ、ディビダーク社より技術導入されたPC卵形消化槽が特徴的である。



写真 - 3 PC卵形消化槽

1983年（昭和58年）に横浜市に、国内最初の6800m³のPC卵形消化槽（写真-3）が建設されて以来、数多くのPC卵形消化槽が建設されている。

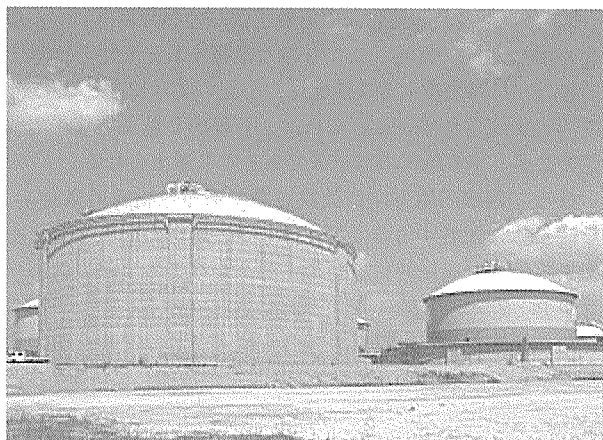


写真-4 18万KL LNGタンク

3.2 ガスタンク（低温タンク）

PC低温タンクの構造は、低温液化ガスを貯蔵する低温金属内槽とPC外槽から成り立っており、内槽と外槽の間には保冷層が設けられている。

3.3 原子炉格納容器

原子力発電用の原子炉格納容器は、外国からの技術導入と多くの検討を行い、PC製にて造られることになり、1982年（昭和57年）にわが国における第1号機として着工された。現状、国内において6基のPCCVが建設されている。

構造物の重要度より、耐震性を含め十分な安全性が検討されているPCCVのPC鋼材配置を図-7に示す。

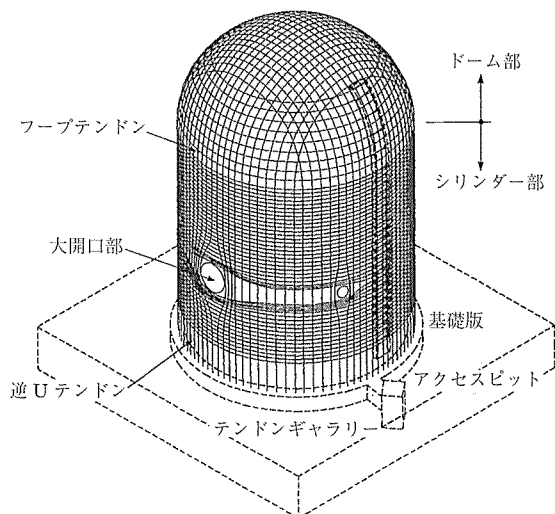


図-7 PCCVのPC鋼材の配置図

3.4 その他

その他のPC容器構造物としてサイロや貯油槽等がある。サイロは、セメントや石炭などを貯蔵する目的で建設されている。最近では、スリップフォーム工法による石炭用の

9万tのPCサイロが建設されている。貯油槽に関しては、防衛庁施設のPCオイルタンクが建設されている。

4. おわりに

PC容器構造物は、プレストレスの理論に適する構造物であり、液体、気体、粉体の保持と遮蔽に適した特性を有している。この50年、国内では、貯水槽、下水処理槽、ガスタンク、原子炉格納容器、サイロ等数多くの構造物が施工されてきた。ここに、PC構造物で実績の多い、PCタンク的设计、施工を中心に各種構造物の事例をPC技術として報告した。

現状の容器構造物の設計、施工、技術は、過去の成功事例や経験により確認され基準化されてきた。これら仕様により、ある水準以上の構造物を建設できるようになっている。ただし、仕様基準だけでは、構造物の保有する性能を明確にすることはできない。また、前例のない構造に対しては多くの課題を残すと考えられる。

現在、仕様規定から性能規定の方向がもてられており、機能と性能を明確にするとともに、適切に照査することが必要になるものと考えられる。従来の知見より、PCタンクが現在の設計地震動で、機能に支障をきたすことはなくとも、その耐震性能を明らかにすることは重要であると考えられる。

一方、現在までに多くのPC容器構造物が建設されており、実績の多いPCタンクとその供用年数（表-3参照）を考えれば、維持管理の必要性が増加することは明らかである。数十年経たPCタンクの劣化状況を調査・分析し、PCタンクの耐久性を適切に評価する必要がある。その成果に基づいて適切な維持管理を実施していく必要があり、メンテナンスは今後の重要な技術であると考えられる。

今後も、各種PC容器構造物がメンテナンスを含め機能と性能に着目した技術向上、開発が実施され発展していくことを期待するものである。

表-3 供用年数とPCタンクの基数

| 経過年数 | 基数 |
|------|------|
| 40 | 31 |
| 35 | 195 |
| 30 | 794 |
| 25 | 1766 |
| 20 | 3082 |
| 15 | 4105 |
| 10 | 5246 |

（平成13年度実績まで（図-2より））

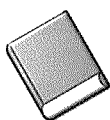
参考文献

- 1) 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，1957
- 2) 西尾浩志：伊自良村簡易水道PCタンク，プレストレスコンクリート，Vol.35，No.6，p55，1993
- 3) プレストレス・コンクリート建設業協会：Prestressed Concrete Year Book 資料編，1991～2003年度版
- 4) 西尾浩志：PCタンクに関する技術的動向と展望，プレストレスコンクリート，Vol.41，No.1，p15，1999

- 5) 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年版
6) 西尾浩志，横山博司，秋山充良：プレストレストコンクリート製タンク側壁のレベル2地震動に対する耐震性能照査，土木学会論文集 No.275/V-58, p85, 2003

- 7) スムーズ PC タンク研究会：カタログ
8) 日本農業土木総合研究所：「水土の知」を語る Vol.6【性能設計を考える】農業水利の明日に向けて

【2004年9月13日受付】



刊行物案内

第1回 *fib* コンGRES 2002 — 21世紀のコンクリート構造 — 論文集

(平成14年10月)

平成14年10月に大阪で開催された標記コンGRESの講演論文集です。
下記の2種類となります。

- | | |
|--|---|
| (1) プロシーディングス1(印刷物 全2巻)： 全ての招待講演論文および採用論文の要旨 (1論文あたり2ページ)を掲載 会員 特価：10 000円(税込み・送料協会負担) 非会員価格：12 000円(税込み・送料協会負担) | (2) プロシーディングス2(印刷物 全8巻)： プロシーディングス1および全ての採用論文 を掲載 会員 特価：30 000円(税込み・送料協会負担) 非会員価格：36 000円(税込み・送料協会負担) |
|--|---|