

PC タンクにおける PC 技術の進展

堅田 茂昌^{*1}・伊藤 朋紀^{*2}

貯水池に代表される容器構造物は、初期の頃は RC 製タンクであったが、コンクリートの引張に弱いという欠点を克服した PC タンクが開発され、これまでに多くの PC タンクが建設されてきた。近年では貯水施設の充実から PC タンクの新設より、維持管理や長寿命化に注目がシフトしてきている。本稿では、これまでの PC タンクの実績や工法、技術基準の変遷のほか、ここ十数年間での PC タンクの技術の進展などをまとめるとともに、今後の展望について述べる。

キーワード：PC タンク，耐震性，耐津波性，維持管理，長寿命化

1. はじめに

貯水池に代表される容器構造物の多くは、初期の頃は鉄筋コンクリート（RC）製タンクであったが、コンクリートは圧縮に強いが引張には弱いという欠点があり、貯水の水圧によりひび割れが発生することが耐久性上の問題であった。ひび割れの幅を小さくするためには、タンクの壁を厚くし鉄筋を多く配置する必要があるが、このためにはコンクリートや鉄筋を大量に使用するため、建設費用が高くなるという問題があった。そこで、あらかじめ水圧相当分の圧縮力（プレストレス）を与え、コンクリートにひび割れが生じない、プレストレストコンクリート（PC）タンクが開発された。

PC タンクの原理は、樽にたとえることができる。樽は、いくつかの側板を「たが」で締め付けることで、側板と側板が密着し、液体が漏れない。PC タンクは、側板に相当するコンクリートを、たがに相当する PC 鋼材で締め付けることで、コンクリートにプレストレスが導入される。そのため PC タンクは、従来の RC タンクのようにコンクリートにひび割れが生じず、耐久性が高い。加えて、プレストレスにより水圧が相殺されるので、RC タンクに比べて壁厚を薄くできる。

国内では 1957 年に国内初の PC タンクが施工されて以来、約 60 年が経過するが、この間に多数の PC タンクが

施工されてきた。本稿では、これまでの PC タンクの実績や工法、技術基準の変遷のほか、ここ十数年間での PC タンクの技術の進展などについて述べる。

なお、PC タンクの用途は、貯水池、処理槽、サイロ、貯油槽、ガスタンク、原子力格納容器などがあるが、これらの PC タンクのうち約 90 % が水道用配水池に代表される貯水池であり、本稿では貯水池用 PC タンクを中心に述べていく。

2. 実 績

1957 年に岐阜県山県市（旧 伊自良村）に国内初の PC タンク（写真 - 1）が施工され、それ以来、上水道の普及に伴い全国各地に PC タンクが建設されてきた¹⁾。国内における PC タンクの施工実績を図 - 1 に示す²⁾。現在までに 8 500 基以上の PC タンクが建設され、とくに 1970 年代から 1990 年代までは年間 200 基から 250 基建設されてきた。一方この十年間（2007 年～2016 年）の建設基数は、年間 50 基前後と 2 割程度まで減少した。この理由として、貯水施設の充実が考えられる。厚生労働省水道普及率の推移³⁾（図 - 2）によれば、水道の普及率は 1950 年が 26.2 % でそれ以降急激に増加し、1980 年には 90 % 以上となった。その後現在まで徐々に増加し、2016 年には 97.9 % となっている。今後、人口の減少に伴い水道利用量の低下が予想され、PC タンクの新設の増加は見込めず、それに変わって、維持管理や施設の更新が課題となってくる。



^{*1} Shigemasa KATADA

(株) 安部日鋼工業
技術工務本部



^{*2} Tomoki ITO

(株) 安部日鋼工業
技術工務本部

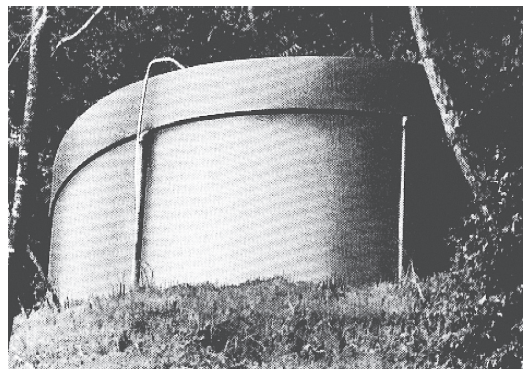


写真 - 1 国内初の PC タンク¹⁾

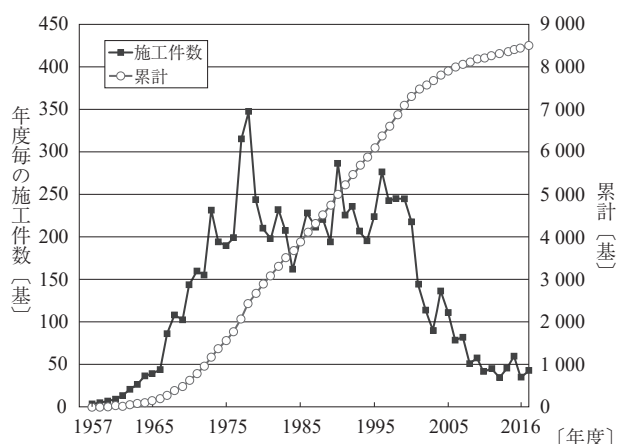


図 - 1 国内の PC タンクの施工件数

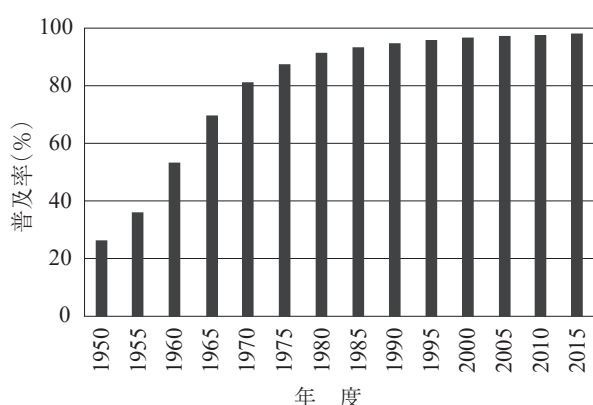


図 - 2 水道普及率の推移 (厚生労働省)

(<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000164506.pdf> を加工して作成)

3. 工法・構造の変遷

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、側壁は PC 構造、底版およびドーム屋根は RC 構造である。図 - 3 に標準的な PC タンクの構造を示す。以下に、PC タンクの構造・工法に関する変遷を示す。

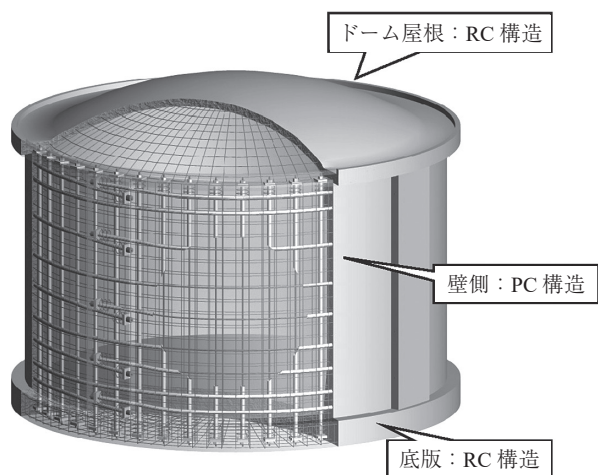
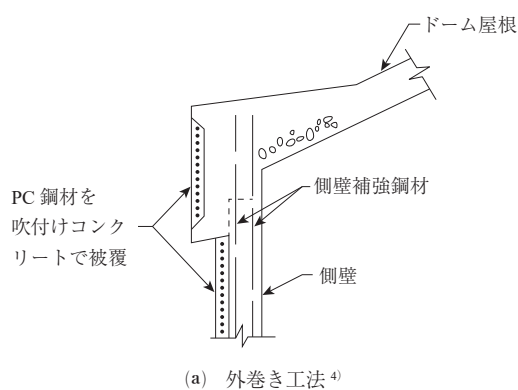


図 - 3 一般的な PC タンクの構造

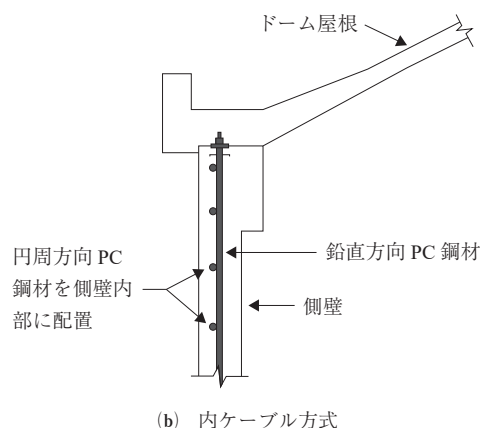
3.1 円周方向プレストレスの導入方法

PC タンクの側壁には、内容水の水压によって発生する円周方向の引張力を打ち消すために、水平方向に PC 鋼材が配置されている。これにより水压に相当する量のプレストレスを導入し、ひび割れが生じない構造となっている。

初期の PC タンクは、PC 鋼材を側壁コンクリートの外側に巻き付けて緊張・定着し、その外面に吹付けコンクリートを施工して PC 鋼材を保護する外巻き工法が採用されていた (図 - 4 (a))。しかしながら、吹付けコンクリートの品質管理の難しさや施工技術者の不足などの課題が顕在化し、1965 年頃からは側壁内部に PC 鋼材を配置する内ケーブル方式が主流となった (図 - 4 (b))⁴⁾。



(a) 外巻き工法⁴⁾



(b) 内ケーブル方式

図 - 4 側壁断面図の一例

3.2 屋根の新工法

従来のドーム屋根の施工方法は、タンク内部に支保工を組み、ドーム形状となるように高さ調整した上に型枠を組み (写真 - 2)、コンクリートを打設していた。この工法は膨大な量の支保工が必要となることや、コンクリート打設後は暗所となるタンク内で型枠・支保工を解体し、小さな開口部より資材を取り出す作業となることから、多数の熟練した熟工・大工を必要とした。そこで、空気圧で膨らませた膜型枠 (シート膜) を使用することによって、型枠・足場・支保工などの組立て解体作業を不要とするエアードーム工法 (空気膜型枠工法, 写真 - 3) が開発され採用が増えてきている。また、コンクリート構造の代わりに、耐久性があり軽量で施工性が良いアルミドーム屋根 (写真 - 4) が採用される場合もある。

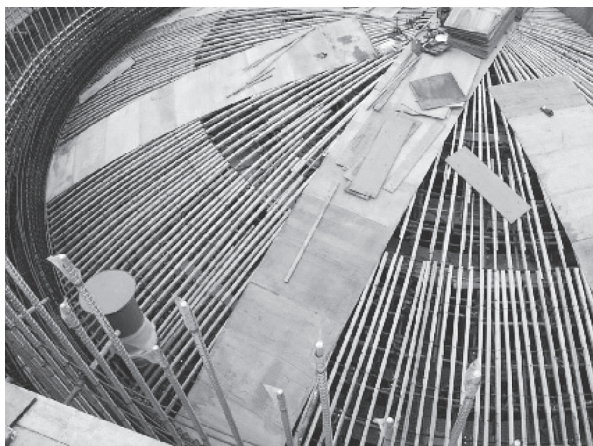


写真 - 2 ドーム屋根の従来工法



写真 - 3 空気膜型枠工法（空気膜昇圧時）

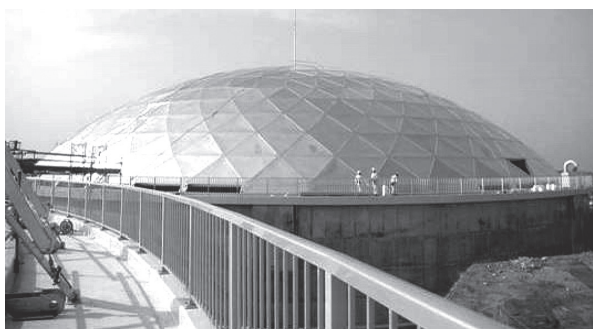


写真 - 4 アルミドーム工法

4. 技術基準の変遷

水道用 PC タンクが準拠すべき指針として、水道施設全般の設計に関する「水道施設設計指針⁵⁾」、耐震工法に関する「水道施設耐震工法指針・解説⁶⁾」、PC タンクの設計および施工に特化した「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⁷⁾」があげられる。各指針は、最新技術や課題、また、大規模な地震が発生した場合には教訓を反映するために随時改訂されている。

4.1 水道施設設計指針

水道施設設計指針は、水道に関する各種施設の設計の基準となるものであり、1955 年に「水道施設基準」が制定され、3 年後の 1958 年に改訂された後、約 10 年ごとにそ

の当時の最新技術や課題に対応するように改訂ならびに改称がされてきた。もっとも新しいものは、2012 年に発刊された「水道施設設計指針」である。本指針のなかでも、総論のコンクリート構造物に関する記述や配水池の章が、PC タンクと関連が深い。とくに水道水と接するタンク内面のコンクリートの防食技術に変遷が見られ、その詳細は 7 章にて記述する。

4.2 水道施設耐震工法指針・解説

水道施設に関する耐震指針として、「水道施設の耐震工法」が 1953 年に初刊、1966 年に改訂版が刊行された。その後、耐震設計法や耐震工法などの進展に伴い、定期的に改訂されている。1979 年には「水道施設耐震工法指針・解説」と改称・改訂がされたが、この指針には、改訂作業の最中に発生した宮城県沖地震（1978 年）で得られた最新の知見も盛り込まれた。また、1997 年には、兵庫県南部地震（1995 年）での経験を踏まえた改訂版が発刊された。この改訂では、設計の対象となる地震動として、従来考えられてきた一般的な地震動（レベル 1）に加えて、発生確率は低いが非常に大きな影響をもたらす地震動（レベル 2）が考慮された。もっとも新しい 2009 年版では、性能設計の導入および経済性照査の概念が取り入れられたことが主な特徴である。

4.3 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

PC タンクの黎明期においては、それぞれの PC タンクがさまざまな考えに基づいて設計および施工されていた。しかしながら、1978 年に発生した宮城県沖地震により被害が発生したことを受けて、1980 年に「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」が発刊され、構造細目が規定された。その後、兵庫県南部地震（1995 年）での教訓を生かした地震時の安全性に関する検討方法や耐震診断、維持管理、補修・補強に関する技術などを追加して、1998 年に「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」が発刊された。

なお、最初の仕様書が発刊された 1980 年以降に建設された PC タンクは、現行の耐震性能をおおむね満足しており、兵庫県南部地震、新潟県中越地震（2004 年）および東北地方太平洋沖地震（2011 年）などの大規模な地震の際にも、PC タンクの貯水機能に重大な影響を及ぼすような被害は生じていない^{8～11)}。

5. 耐震性・耐津波性について

2011 年の東北地方太平洋沖地震の後、東北 6 県で震度 5 以上を観測（震災直後の発表）した市町村の一部と、調査依頼を受けた東北 6 県以外の 2 基の貯水用 PC タンクに対し、目視による外観調査が実施された¹¹⁾。調査した PC タンク数は 364 池で、損傷がなかった PC タンクは 344 池、機能に影響しない軽微な損傷があった PC タンクは 18 池、機能に影響する損傷があった PC タンクは 2 池であった。この機能に影響する構造的損傷が発生した PC タンクのうち、1 池は盛土地盤が崩れて杭が損傷したため、配水池が傾いて RC 構造の底版より漏水した事例で、もう 1 池は高

架水槽の PC タンクを支える RC 造の脚塔が、せん断破壊して PC タンクが落下した事例である。いずれも、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）制定前に施工されたものであり、またこれらの損傷は、PC タンクを支える構造の変状によるものであった。

このように PC タンクの優れた耐震性が広く評価され、その一例として、福島第一原子力発電所内に建設する汚染水貯蔵用 PC タンクの技術的成立性が検討され、2016 年に土木学会より「汚染水貯蔵用 PC タンクの適用を目指してコンクリートライブラリー 114」¹²⁾ が発刊されている。

また、宮城県仙台港では推定高さ 7.2 m の津波が発生し、この津波の影響を受けた船舶給水用 PC タンク 3 池についても調査された。いずれのタンクも電気設備の機能などが喪失していたが、PC タンクの機能は確保され健全であったと評価されている。とくに高砂埠頭 1 号給水タンクは写真 - 5 のとおり、コンテナと推測される流出物の衝突によるものと思われる傷が確認されているが PC タンクの機能には影響はなく、津波にも強いことが認識された。一方、油類を貯蔵する鋼製タンクの中には津波で流され損傷を受けたものがあったため、鋼製の重油タンクの側面に PC 壁を備えた構造の津波対策タンクが新たに採用され、その建設が進んでいる（図 - 5）。

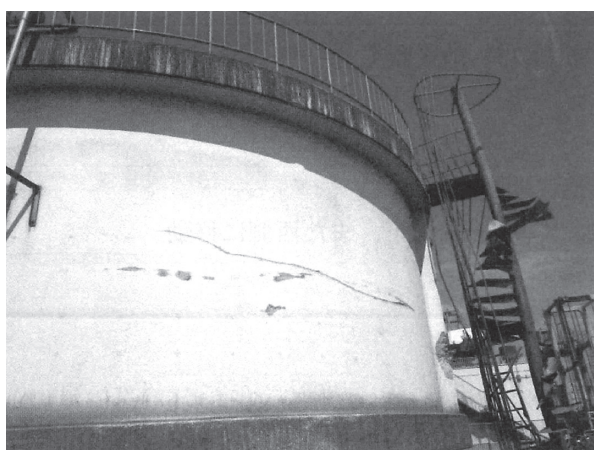


写真 - 5 津波による流出物によると思われる損傷¹¹⁾

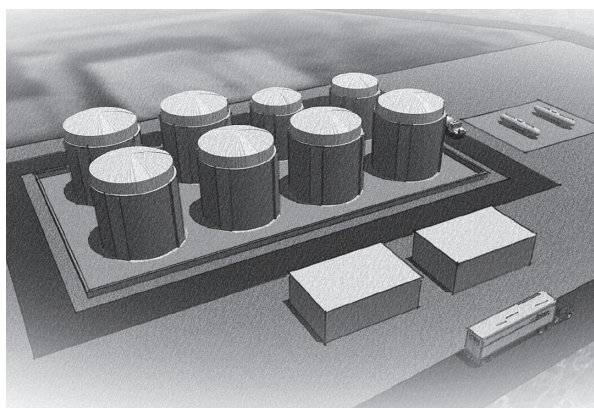


図 - 5 鋼製タンクの側面に PC 壁を備えた構造

6. 維持管理について（補修・補強事例）

わが国では高度成長期以降、大量の社会基盤構造物が建設された。現在、これらの構造物の高経年化が進み、維持管理が課題となってきている。配水池をはじめとするコンクリート製貯水槽についても同様で、建設当時から現在まで問題なく供用されているものや、すでに解体・撤去されているものもあるが、最近では、劣化が見られるタンクに改修（補修・補強など）がなされ、使用され続ける例が増えてきている。以降に、コンクリート製貯水槽の補修・補強事例を紹介する。

6.1 PC タンクの RC 屋根部の取替え工事¹³⁾

本工事は PC タンクの RC ドーム屋根部に、鉄筋の腐食やコンクリートの剥離などの劣化が確認されたため、RC ドーム屋根を撤去し、アルミニウム合金製のドーム屋根に取替えた事例である（写真 - 6）。

本 PC タンクは内径 32 m、有効水深 6.3 m、有効容量 5 000 m³ で、取替工事時点で 32 年経過していた。既設 RC ドーム屋根は、ウォールソーで切断し、クレーンで撤去した。屋根撤去後にアルミドーム屋根を組立設置した。本工事では RC ドームの撤去用にタンク内に足場を設けたため、その足場を利用して PC タンクの側壁上でアルミドームを組み立てたが、アルミドームは軽量であるため、現場のヤードで組み立ててクレーンで一括架設する方法や、タンク内の底版上で組み立てて小型ウインチで吊り上げる方法も実施されている。



写真 - 6 屋根を取り替えた PC タンク

6.2 RC タンクの外ケーブル（PC 鋼材）による補強工事¹⁴⁾

本工事は、角型の RC タンクの漏水防止と耐久性向上のために、外ケーブルを設置した工事である。

タンクの四隅に定着体を設け、外ケーブルにより壁に圧縮力を導入している（写真 - 7）。外ケーブルによる補強工事はこのほかに、円筒形 RC タンクの耐震補強のため伸縮ジョイント部を撤去し、鉄筋を配置してコンクリートを打設した後、定着体を設けて外ケーブルにより緊張力を導入した事例もある。

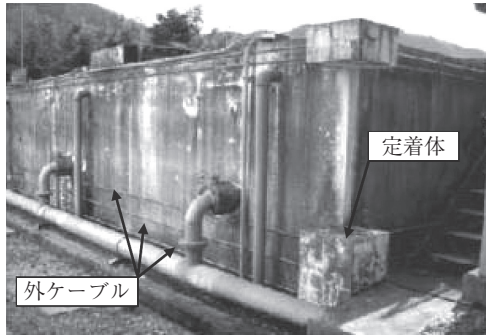


写真 - 7 RC タンクの外ケーブルによる補強

6.3 PC タンクの移設工事¹⁵⁾

本 PC タンクは内径 16.6 m、有効水深 7.5 m、有効容量 1 600 m³ で、平成 12 年に築造されたが、本タンクが高速道路の計画ライン上に位置することが判明した。タンクは漏水もなく健全であったため、移動し再利用することとなった。

タンクの重量は 500 ton で移動距離は 51 m であった（写真 - 8）。移動にあたり底版の中央部は、部材厚が 200 mm と薄いため解体した。移動ルートには、下から順に砂、枕木、山留め鋼材、直径 ϕ 60 mm のコロ、鉄板を設置した。PC タンクを水平移動させるために 50 t ジャッキ 3 台を使用し、1 日最大 8 m、14 日間で 51 m 移動した。移動後は解体した底版中央部にコンクリートを打設した。移動によるクラックの発生はなく、現在も貯水槽として使用されている。



写真 - 8 PC タンクの移動工事

6.4 そのほかの事例

このほかにも、耐震補強として貯水槽の側壁・底版コンクリートを増厚した事例や、底版にせん断補強筋（あと施工アンカー）を追加した事例もある。とくに PC タンクは PC 構造の側壁コンクリート部分の劣化はほとんど見られず、RC 構造の屋根の取替えなどの適切な補修・補強を行えば長寿命化が可能である。

7. 長寿命化への対策

水道用コンクリート製タンクの内面防食は、当初は水セメント比やかぶりに配慮することで対応して、必要な場合

のみ塗装を行うこととされていたが、土木分野での塩害対策や下水道分野での硫酸による劣化の防止を目的とした塗装が広まったことを受けて、水道用タンクの内面においても塗装を施すことが一般的となった。しかしながら近年になり内面防食塗装の劣化が見られるようになり、再塗装が必要となってきた（写真 - 9）。

一方、最新版の水道施設設計指針では、タンク内面の防食対策として防食塗装を施す方法のほかに、鉄筋のかぶりを大きく取ってコンクリート打放しにする方法（無塗装）が記述されている。

PC タンクの側壁内面はつねに水に接しているため、コンクリート中のカルシウム水和物が溶け出す溶脱現象が発生する。これによりコンクリート表面付近はアルカリ性が失われ、鋼材が腐食しやすい環境となるため、一般にいわれる中性化に近い劣化現象が見られる。PC タンク側壁の場合、一般的にコンクリートの水セメント比が小さく密実なため、溶脱の進行速度が比較的遅く、無塗装のままかぶりを厚くする方法がとくに有効である。この場合、かぶり厚を大きくした分のコンクリート量が増えるものの、その費用は新設時の塗装の費用および再塗装の費用と比較してかなり少なく、ライフサイクルコストを抑えることが可能となるため、無塗装タンクが採用され始めている（写真 - 10）。



写真 - 9 防食塗装の劣化状況



写真 - 10 無塗装タンクとアルミドームの組合せ
（写真は屋根施工中）

8. 今後の展望

8.1 PC タンクの ISO 基準 (ISO 18407) について

PC タンクの ISO 基準として ISO 18407: 2018 Simplified design of prestressed concrete tanks for potable water (参考課題: 水道用プレストレストコンクリートタンクの簡易設計基準) が発刊された。この ISO 18407 は、発展途上国などの PC 水道タンクに関する自らの設計基準をもたない国・地域を対象とした規格であり、日本が中心となり作成したもので、「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・同解説」がベースとなっている。本基準の発刊に伴い、インフラ整備が必要とされる諸外国においても PC タンクを設計することが可能となり、RC 貯水池と比較して建設コスト・工期・用地の節約・耐久性などの面で優れる PC タンクの採用が進むことが期待される。

8.2 維持管理について

文献 16 では、著しい材料欠陥や施工不具合などがない場合、科学的な劣化分析結果に基づき、水道施設における池状構造物の劣化症状の進展はかなり緩慢な特性があると報告している。この要因として、水分が多い気相部の雰囲気などの水道施設特有の環境条件や、水密性が求められる構造物のため比較的密実なコンクリートを使用していることがあげられる。したがって、劣化がほぼ進展しないような 1 年周期でコンクリートの状態を点検することは、経済資源の浪費になる可能性が高いと指摘している。

一方、近年になって、PC タンクの RC ドーム屋根部に、鉄筋の腐食やコンクリートの剥離などの劣化が確認されるようになりその補修が課題となっているが、このような深刻な劣化は、アルカリ骨材反応や、材料分離、鉄筋のかぶり不足に代表される初期欠陥に起因するものが多いと考えられ、これらの変状を早期に発見することが重要である。

このように、今後ますます増加が予想される点検や維持管理業務に対し、かぎられた支出を効率的に活用できるよう、精度の良い維持管理システムの研究・開発が期待されている。

8.3 長寿命化について

コンクリート製貯水池においてひび割れが発生した場合、漏水が問題となることがあるが、ひび割れ幅が小さい場合、自己治癒（炭酸カルシウムの生成や未反応のセメントの水和など）により漏水が止まることが確認されている。英国規格 BS8007 Design of concrete structures for retaining aqueous liquids (参考課題: 水性液体貯蔵用コンクリート構造物の設計) によれば、たとえば 0.2 mm のひび割れに対しては水張り試験時に 21 日間水を貯めている間に漏水が止まれば、水張り試験に合格となるなど、具体的に自己治癒の効果が基準に取り入れられている。

一方、PC タンクは水圧に相当する力をプレストレス力として与えているため、常時ではひび割れは発生しない。また、地震時に一時的に大きな力が作用してひび割れが発生しても、地震力が取り除かれればプレストレス力によりひび割れは閉じる傾向にあり、残留するひび割れ幅は小さなものとなる。長寿命化のため内面塗装を廃した無塗装

PC タンクにひび割れが発生した場合も、自己治癒の効果は期待できるが、英国規格のような考え方が国内の基準にも取り入れられれば、無塗装 PC タンクの採用が進むと考えられる。

施工面では、側壁コンクリートの打継目部の締固め不足や木コンのあと埋めの処理不足などが、漏水の原因となる場合があるため、無塗装とはいえ側壁打継部と木コンあと埋め部のみにフェールセーフとしての防水処理を施しているケースがある。この場合、その部分の耐久性は明らかとなっていない。防食塗装の代わりに、無機系コンクリート改質材を適用することで長期耐久性のある防水処理として機能する可能性も考えられ、今後の研究に期待したい。

9. おわりに

本稿では、PC タンクについて、過去 10 年間の進展を中心に、これまでの技術の推移を述べてきた。とくに今後の新設が見込めない貯水池用 PC タンクについては、維持管理や長寿命化の技術やシステムに注目がシフトしてきている。本稿がそれらの研究・開発の一助となれば幸いである。

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ホームページ (http://www.pcken.or.jp/pubinfo/jisseki/todofuken/pdf/29jyucyu_youto.pdf)
- 3) 厚生労働省ホームページ (<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000164506.pdf>)
- 4) 横山博司: 容器構造物における PC 技術, プレストレストコンクリート, Vol.46, No.6, 2004.
- 5) 日本水道協会: 水道施設設計指針, 2012.
- 6) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 2009.
- 7) 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.
- 8) 西尾浩志: PC タンクに関する技術的動向と展望, プレストレストコンクリート, Vol.41, No.1, 1999.
- 9) 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, 1995.
- 10) プレストレストコンクリート技術協会: 新潟県中越地震 PC 構造物震害調査報告書, 2005.
- 11) プレストレストコンクリート技術協会: 東日本大震災 PC 構造物災害調査報告書, 2011.
- 12) 土木学会: 汚染水貯蔵用 PC タンクの適用を目指して コンクリートライブラリー 114, 2016.
- 13) 三木泰徳, 辻 和久, 藤田博久, 高西昇二: 北島町浄水場第 1 浄水池の改修工事, プレストレストコンクリート, Vol.53, No.2, pp.75-81, 2011.3
- 14) プレストレストコンクリート工学会: コンクリート構造診断技術, p.183, 2014.4
- 15) 三堂 聡, 上村剛史, 佐藤久仁夫: 岡崎ファームボンド移設施工報告, 第 19 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.121-122, 2010.10
- 16) 宮本勝利, 板垣竜太郎, 福山雅彦, 坪井智史, 山本昌宏, 田中慎太郎: 水道池状コンクリート構造物の戦略的な維持管理手法の研究開発, 平成 30 年全国会議 (水道研究発表会) 講演集, pp.481-482, 2018.10

【2018 年 12 月 21 日受付】