

PC タンクの長寿命化対策

— 100 年耐用の PC タンクの提案 —

堅田 茂昌*1・伊藤 朋紀*2・河合 真樹*3

国内初の PC タンクが施工されてから 50 年以上が経過しており、全国で 8 200 基以上の施工実績がある。これまでも、より高品質・高耐久な PC タンクを建設するためにさまざまな改善がなされてきた。水道用 PC タンクの長寿命化のためには、内面の防食対策が重要であり、側壁内面については鋼材のかぶり厚を大きくすることでライフサイクルコストを抑えた防食対策となる。

水セメント比が小さく密実なコンクリートを使用する PC タンクでは、側壁内面における溶脱深さとして 10 mm 程度を考慮しておけば、溶脱現象に起因する鋼材腐食を防ぎ 100 年耐用の PC タンクとすることができると考えられる。

キーワード：PC タンク，長寿命化，内面防食，かぶり

1. はじめに

1957 年、岐阜県山県市（旧 伊自良村）に国内初のプレストレストコンクリート製容器構造物（以下、PC タンク）（写真 - 1）が施工されてから 56 年が経過している¹⁾。

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。図 - 1 に年度ごとの PC タンクの施工件数²⁾とその累計を示す。国内における PC タンクの施工実績は現在までに 8 200 基以上あり、このうち約 2 900 基の PC タンクが建設から 30 年以上経過している。その中には現在まで問題なく機能を保持しているものがある一方、経



図 - 1 国内の PC タンクの施工件数

年劣化が確認され補修・補強が必要となったものもある。PC タンクの用途としては、液化天然ガスの貯蔵や下水処理施設として用いられることもあるが、大半が水道用の配水池である。したがって本稿では、水道用の PC タンクについて、これまでの 50 余年の間に見られた工法や構造の変遷と関連する指針類の変遷および水道用 PC タンク特

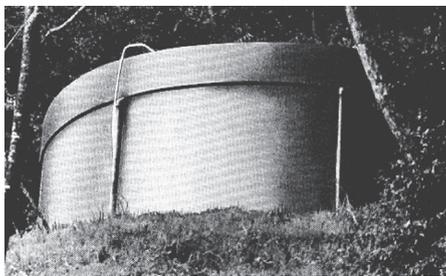


写真 - 1 国内初の PC タンク¹⁾



*1 Shigemasa KATADA

(株) 安部日鋼工業
技術工務本部



*2 Tomoki ITOU

(株) 安部日鋼工業
技術工務本部



*3 Maki KAWAI

(株) 安部日鋼工業
技術工務本部

有の劣化とその対策について述べ、100年耐用のPCタンクの提案を行う。

2. 工法・構造に関する変遷

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、底版および屋根はRC構造である。図-2に標準的なPCタンクの概念図を示す。

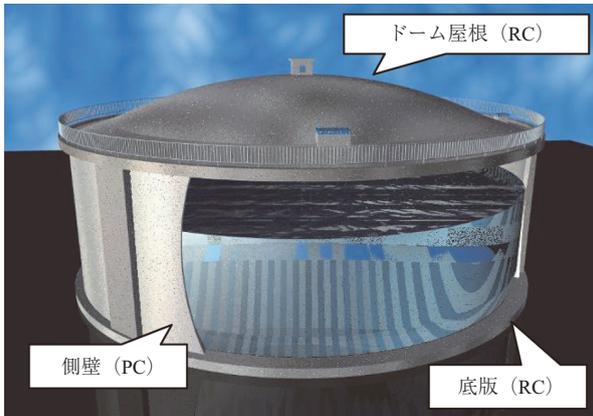


図-2 一般的なPCタンク概念図

以下に、PCタンクの工法・構造に関する変遷を示す。

2.1 円周方向プレストレスの導入方法

PCタンクの側壁には、内容水の水圧によって円周方向に引張力が発生するため、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ようにする必要がある。

初期のPCタンクでは、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-3(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³⁾(図-3(b))。

2.2 側壁下端の構造

PCタンク側壁と底版との結合方法は、自由支持、ヒンジ支持、固定支持の3種類がある(図-4)。このうち、自由支持は底版に対して側壁の回転および水平変位を許すため、側壁下端の曲げモーメントをもっとも小さくできる。また、ヒンジ支持は底版に対して側壁の回転のみを許す接合方法である。固定支持は、側壁の回転および水平方向の変位を許さない接合方法である。

上記のうち、固定支持が側壁下端の曲げモーメントがもっとも大きくなるが、水密性および耐震性はもっとも高いため、現在はこの結合方法が一般的である。

2.3 ドーム屋根の新工法

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調整したうえで型枠を組むことで構築していた。しかしながら、この工法では膨大な量の支保工が必要となることと、解体時の高所での作業のために多数の熟練した熟工・大工を必要とした。

上記の課題を受けて、平成3年に空気膜型枠工法(エア

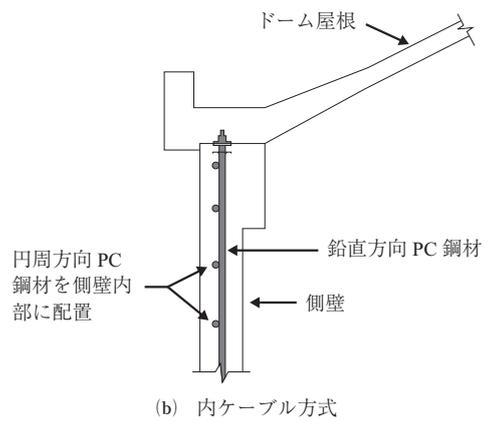
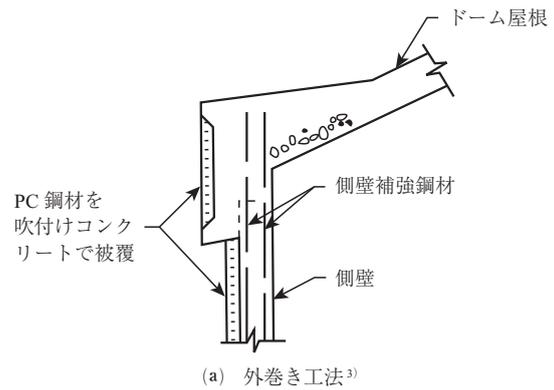


図-3 側壁断面図の一例

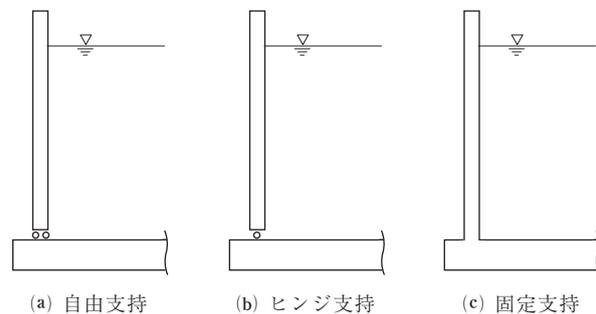


図-4 支持形式

ードーム工法)(写真-2)が開発された。本工法は、空気圧で支えられた膜材の上にモルタルを打設して型枠とし、その上にコンクリートを打設するものである。労働力不足の解消や屋根施工時の安全性の向上に加え、膜材を残したまま供用するため、ドーム内面の防食性にも優れてい



写真-2 空気膜型枠工法(空気膜昇圧時)

○ 特集／調査報告 ○

る。また、平成 11 年には水道用 PC タンクにアルミドームが適用された。アルミドームの施工例を写真 - 3 に示す。アルミドームは軽量で耐久性に優れているため、近年、RC ドームに代わる構造として採用される場合がある。



写真 - 3 アルミドーム工法

3. 関連する指針類の変遷

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⁴⁾」、耐震工法に関する「水道施設耐震工法指針・解説⁵⁾」、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⁶⁾」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。各指針の改訂および改称の変遷を表 - 1 に示す。

3.1 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、PC タンクは総論のコンクリート構造物に関する記述および配水池の章が関連が深い。長寿命化に関しては、PC タンクの防食技術について変遷が見られ、その詳細は 4 章にて後述する。

3.2 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大幅な進展を受けて、従来の耐震工法の枠を越えた新しい総合的な耐震工法の指針として、1979 年に「水道施設耐震工法指針・解説」と改称し、改訂された。この指針には、改訂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⁷⁾。設計の対象となる地震動は、従来考えられてきた一般的な地震動（レベル 1）に加えて、発生確率は低いが大規模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。設計地震動は、1997 年版と同様に 2 段階のレベルが考慮されている。

3.3 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 タンクの設計および施工に特化した指針類が発刊される以前から、多数の PC タンクが全国各地で使用されて

表 - 1 設計・施工に関連する指針類の変遷

	水道施設設計指針	水道施設耐震工法指針・解説	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	国内で発生した大規模な地震
1953		水道施設の耐震工法		
1955	水道施設基準			
1958	水道施設基準解説			
1966	水道施設基準解説	水道施設の耐震工法		
1977	水道施設設計指針・解説			
1978				宮城県沖地震
1979		水道施設耐震工法指針・解説		
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	
1990	水道施設設計指針・解説			
1995				兵庫県南部地震
1997		水道施設耐震工法指針・解説		
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	
2000	水道施設設計指針			
2004				新潟県中越地震
2009		水道施設耐震工法指針・解説		
2011				東北地方太平洋沖地震
2012	水道施設設計指針			

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の検討方法の改訂や耐震診断、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⁷⁻¹⁰⁾。

4. 側壁内面の溶脱と防食対策

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¹¹⁾。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。溶脱現象に起因する鋼材腐食を防ぐためには、コンクリート表面に防食塗装を施す方法、もしくは鋼材のかぶりを厚くして供用中の溶脱深さが鋼材に影響を与えないようにする方法が考えられる。かぶりを厚くして対策とする場合には、かぶりコンクリートの水密性を高くすることも重要である。

鉄筋コンクリートの防食技術に関する指針類の年表を

表-2に示す。表中には前述した水道施設設計指針に加え、土木分野や下水道分野の指針類も併せて示した。また、鋼材の防食に関する記述について要点を記載した。

4.1 年代ごとの防食対策

(1) 1950年代～1970年代

水道施設に関する初期の指針においては、鋼材の防食のためには、基本的には水セメント比や鋼材のかぶりに配慮することで対応し、必要であれば表面保護のための防水モルタルや塗装、ライニングによって侵食を防止することとされていた。

(2) 1980年代～2000年代

1984年に発刊された道路橋の塩害対策指針（案）・同解説では、かぶりを厚くすることの代替として、塗装鉄筋やコンクリート塗装を使用してもよいことが提示された。それ以降、土木分野でも塗装に関する研究が進められ、また、下水道分野で硫酸による侵食からの保護を目的とした塗装が施されるようになると、水道用のタンクにおいても、防食塗装やライニングによってタンク内面を保護することが一般的となった。水道施設設計指針においても、コンクリートの水密性に対して、塗装やライニングの必要性が述べられている。

その一方で、施工後数年から十数年が経過した内面塗装において、劣化や剥離などの耐久性の課題が認められ、定期的な塗り直しが必要であることが分かってきた。防食塗装の塗り直しの費用が高むことやその期間中タンクが使用できなくなるため、鋼製タンク（SUS）との比較において、PCタンクが不利となることもあった。

表-2 防食技術に関する指針類（括弧内は発刊年）

年代	上水道分野（日本水道協会）	土木分野（各学協会など）	下水道分野（日本下水道事業団）
(1) 1950年代～1970年代	<ul style="list-style-type: none"> 水道施設基準（1955年） 水道施設基準解説（1958年） 水道施設基準解説（1966年） 必要に応じて特殊防水モルタル等 水道施設設計指針・解説（1977年） 場合によっては、塗装やライニング 		
(2) 1980年代～2000年代	<ul style="list-style-type: none"> 水道施設設計指針・解説（1990年） 水密性を高めるために塗装やライニングによって対処する必要がある 水道施設設計指針（2000年） 水密性を高めるために塗装やライニングによって対処することも必要である 	<ul style="list-style-type: none"> 道路橋の塩害対策指針（案）・同解説：日本道路協会（1984年） かぶり増、ひび割れ制御等による塩害対策とし、かぶり増の代替として塗装鉄筋またはコンクリート塗装でもよい コンクリートの耐久性向上技術の開発：土木研究センター（1989年） 形状、かぶり増、ひび割れ制御等による塩害対策とし、かぶり増の代替として塗装鉄筋またはコンクリート塗装でもよい 表面保護工法 設計施工指針（案）：土木学会（2005年） 土木業界共通の指針 	<ul style="list-style-type: none"> 塩害対策指針（案）（1987年） 必要場合は防食塗装を行う コンクリート防食塗装指針（案）（1987年） H₂Sに対してタールエポキシ樹脂塗装 コンクリート防食指針（案）（1991年） 有機質被覆材料を追加 コンクリート防食指針（案）（1993年） 新開発された防食被覆材料の追加 コンクリート防食指針（案）（1997年） シートライニング工法の追加 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル（2002年） 性能照査型への移行 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術同マニュアル（2007年） 性能照査型の徹底
(3) 2010年代	<ul style="list-style-type: none"> 水道施設設計指針（2012年） 水密性を高めるために塗装やライニングによって対処することも可能である 防食対策は水槽内面に防食塗装を施す方法、又は鉄筋のかぶりを大きくとってコンクリート打放しにする方法が採用されている（配水池の章〈総則〉） 		

(3) 2010年代

上記のように塗装に課題が認められて以降、自治体によっては塗装ではなく鋼材のかぶりを増やすことで対応している所もある。さらに、2012年に発刊された水道施設設計指針においては、配水池について記述された章の総則(章全体に通用する一般的・包括的な規定)に「防食対策は水槽内面に防食塗装を施す方法、又は鉄筋のかぶりを大きくとってコンクリート打放しにする方法が採用されている」と記述された。

(4) 防食対策の変遷のまとめ

以上より、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、塗装の劣化に起因する課題を受けて、鋼材のかぶりを増やすことによって溶脱による鋼材腐食を防止することも一つの方法として再度認められてきている。

4.2 PCタンク側壁の特性を活かした防食対策

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、溶脱の速度が比較的遅いことが予想され、無塗装のままかぶりを厚くする方法がさらに有利になることが考えられる。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。

5. 内面防食塗装を省略したPCタンクのかぶり厚

以上より、PCタンクの側壁内面における溶脱現象に対して、コンクリートのかぶりを増やすことで対応する場合のかぶり厚の目安を、実績調査によって示すことを考えた。

5.1 中性化深さ試験

水に接するコンクリートの溶脱現象を、一般的な中性化と同様に評価できると仮定し、建設後10年以上経過している内面無塗装のPCタンクを対象とした中性化深さ測定試験を行った。また、その結果から将来の中性化深さの予測を行った。

コンクリートの中性化深さと中性化期間(経過年数)には、一般的に次のような関係があると言われている¹²⁾。

$$y = b \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y : 中性化深さ (mm), b : 中性化速度係数 (mm/√年), t : 中性化期間 (年)

式(1)を用いて、測定したタンクごとの中性化速度係数 b を算出した。また、得られた中性化速度係数を用いて、100年後の中性化深さの予測値を求めた。測定結果および予測値を表-3に示す。ここで、測定結果は参考文献13)などの複数のタンクの調査結果であり、同一のタンクを経時的に調査したものではない。なお、測定した中性化深さが0.0mmであった場合は予測値の算出は行わないこととした。

表-3 中性化深さ測定結果と100年後の予測値

No.	経過年数(年)	中性化深さ(mm)	b (mm/√年)	100年後の予測値(mm)
①	13	1.1	0.305	3.1
②	14	3.8	1.016	10.2
③	14	1.0	0.267	2.7
④	17	2.0	0.485	4.9
⑤	21	3.0	0.655	6.5
⑥	24	5.0	1.021	10.2
⑦	26	3.2	0.628	6.3
⑧	30	0.0	-	-
⑨	31	0.0	-	-
⑩	31	1.2	0.216	2.2

また、100年後の予測値とその平均値を図-5に示した。

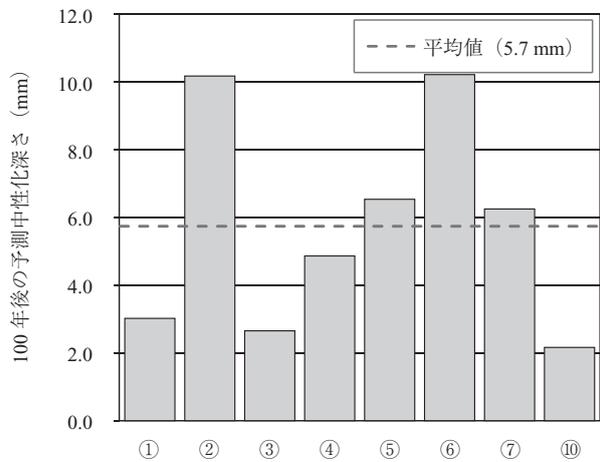


図-5 100年後の予測中性化深さ

表-3および図-5より、中性化深さの100年後の予測値にはばらつきが見られた。これは、それぞれのタンクでコンクリートの配合や環境条件などが異なることが影響していると考えられる。今回の試験の対象とした範囲内では、建設後100年が経過した時点での中性化深さは最大10.2mmとなると予測される。

5.2 かぶり厚の提案

コンクリート標準示方書[設計編]¹⁴⁾の中性化に対する照査方法を参考に、100年後も鋼材の防食機構を保持するために必要なかぶり厚を求めることとした。

これまでの研究により、中性化深さが鋼材位置に到達する以前に鋼材の腐食が開始することが明らかになっている。腐食の開始時期は、かぶり c と中性化深さ y の差である中性化残り c_k (図-6)によって整理される。一般環境下のコンクリートでは、中性化残りが10mm以上あれば鋼材が腐食しても軽微なものにとどまることが多い。一方、あらかじめ塩化物イオンがコンクリート中に存在する厳しい塩害環境では、中性化残りが25mmとなるように設計される。水道水中には消毒用の塩素に起因する塩化物イオンが存在するため、一般環境下と比較して中性化残りを多く設定する必要がある。しかしながら、中性化残りを設定するための十分な資料が得られていないため、安全側

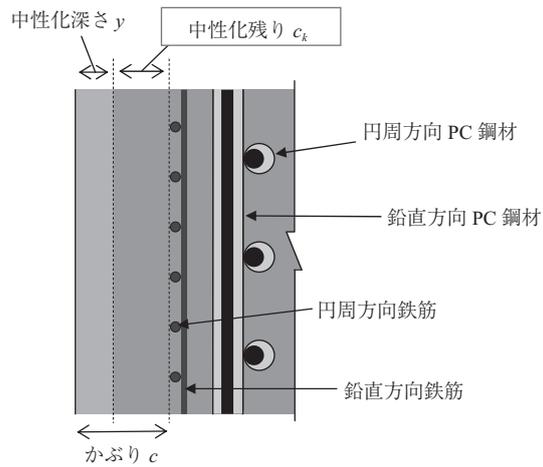


図 - 6 中性化残り

の対処として中性化残りを 25 mm とした。

5.1 より、100 年後の中性化深さの予測値にはばらつきが見られるものの、設計上の安全性を考慮して最大値である 10.2 mm まで中性化が到達する場合を考える。また、中性化深さの予測式の予測精度を考慮して、安全係数を 1.15 とした。以上より、100 年後の中性化深さの設計値 y_d は、以下のとおりとなる。

$$y_d = 1.15 \times 10.2 = 11.7 \text{ (mm)}$$

したがって、必要なかぶり c_d は次のように求められる。

$$c_d \geq y_d + c_k = 11.7 + 25.0 = 36.7 \text{ (mm)}$$

PC タンクのかぶり厚は水に接している部分では 40 mm 以上と規定されている⁶⁾。したがって、水セメント比が小さく密実なコンクリートを使用する PC タンク側壁では、内面塗装を省略した場合でも、指針に従ってかぶりを 40 mm 以上とすれば、100 年後まで鋼材の防食機構は保持されることが考えられる。

6. おわりに

国内で初めて PC タンクが建設されてから 50 年以上が経過しており、これまでにさまざまな改善がなされてきた。水道用 PC タンクの長寿命化のためには、内面の防食対策が重要であり、側壁内面については鋼材のかぶり厚を大きくすることでライフサイクルコストを抑えた防食対策となる。水セメント比が小さく密実なコンクリートを使用する PC タンク側壁では、内面における溶脱深さとして 10mm 程度を考慮しておけば、溶脱現象に起因する鋼材腐食を防ぎ 100 年耐用の PC タンクとすることができると考えられる。

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
- 3) 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
- 4) 日本水道協会：水道施設設計指針, 2012
- 5) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説, 2009
- 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設計施工指針・解説, 1998
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.53 コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 2003
- 12) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2008
- 13) 塩谷由明, 小林 猛：PC 配水池の劣化調査, 第 36 回全国水道研究発表会, 1985
- 14) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013

【2013 年 9 月 3 日受付】