

PC容器の歴史について

横山 博司*1・西尾 浩志*2

1. はじめに

古来より、水や穀物を貯蔵する容器は人々の生活にとって必需品であった。その始まりは、石器、土器であり、縄文、弥生の原始の時代である。時代とともに木製器や金属器などが使用されるようになった。馴染みのある容器としては、図-1に示す短冊形の板を並べて、たがで締めた桶や樽がある。この桶や樽は鎌倉時代に使われはじめたとのことである¹⁾。

生活用具ではなく貯蔵用として容器が必要になり、大型の桶や樽が用いられ、近代になり金属製容器、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート（以下、PCと略記する）製容器が用いられるようになってきた。

貯蔵用の容器は、ものを貯蔵することを目的としており貯蔵物を保持する機能が要求される。液体を貯蔵する容器には液密性が求められる。

PC容器は、図-1の桶によくたとえられるが、短冊形の板がコンクリートで、短冊形の板を締め付けるたががPC鋼

材であり、たがの締め付けにより容器の水密性が向上する特長を有する²⁾。この桶の原理によりコンクリート製水槽に初めてPC技術を応用したのはアメリカの W. E. Hewett で1923年のことである³⁾。その後、欧米で各種PC容器構造物の技術が開発されてきた。

国内では1957年に初めてPC貯水槽が建設されて以来⁴⁾、多くのPC容器構造物が建設されている。以下に、国内のPC容器の歴史について述べる。

2. PC容器の分類について

容器構造物は、矩形等とする場合もあるが、一般的に、円筒形が多く、ほとんどが軸対称シェル構造である。この容器構造物は、内容物（上水、下水、危険物、粒状物、廃棄物）、機能（貯蔵、配水、消化、遮蔽）、設置場所（地上、地下、高架）により分類することもできる。

プレストレスト・コンクリート建設業協会（PC建設業協会）においては、容器構造物を用途別に表-1のように分類している⁵⁾。本文では表-1の分類に従うものとする。

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、穀物など
その他の容器類	



結桶師（三十二番職人歌合）

図-1 桶

3. 国内のPC容器の実績

PC容器構造物に関して、昭和32年～平成2年（1957～1990）における実績は図-2に示すとおりである⁶⁾。最近の資料によれば、1991年～1998年の8年間における分類別実績は表-2に示すように1854件である⁵⁾。国内でのPC容器の歴史は40年ほどであり、その実績は現在約7000件を超えるものと考えられる。

また、表-2の分類別実績が示すように、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。

当初の貯水槽建設以来、消化槽、ガスタンク、原子力格納容器等の順にPC容器構造物の適用範囲が拡大してきた。

4. 貯 水 槽

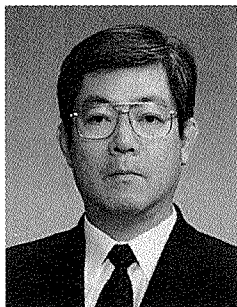
4.1 概 要

PC貯水槽としては、上水、工業、農業などの多くの用途があるが、上水道用の実績が圧倒的に多い。この上水道用のPC貯水槽をここではPCタンクと呼ぶことにする。前述の



*1 Hiroshi YOKOYAMA

(株)安部工業所 技術本部
技術部長



*2 Hiroshi NISHIO

(株)安部工業所 仙台支店
取締役 支店長

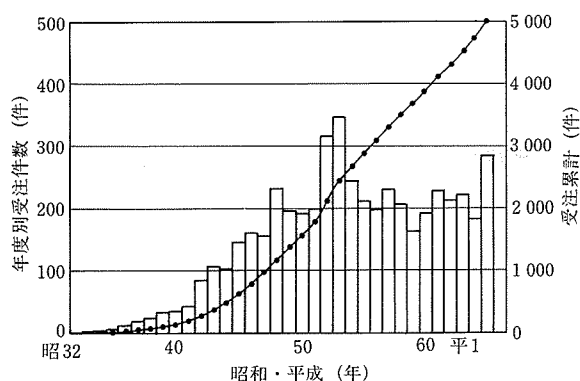


図-2 PC容器構造物の受注実績
(昭和32年度～平成2年度, PC建設業協会資料より)

表-2 容器構造物の用途・年度別発注件数(1991年～1998年)

	貯水槽	消化槽・ 処理槽	貯油槽	ガス タンク	サイロ	その他の 容器類	合 計
'91	213	11	1	1			226
'92	212	19		3		2	236
'93	199	3		1		4	207
'94	178	15		2		1	196
'95	220	3				1	224
'96	236	31			4	6	277
'97	214	22			3	4	243
'98	213	21	2	1		8	245
合計	1 685	125	3	8	7	26	1 854

ようにPC容器の中でPC貯水槽の実績がほとんどであり、このPCタンクの歴史がPC容器の一つの歴史とも言えることより、本文ではPCタンクについて多くを述べることになる。

PCタンクの形状としては、円筒形側壁とドーム形状の屋根をもつ標準型(写真-1)、地上高く貯水する構造の配水塔、高架タンクの高架型、および標準型と高架型を組み合わせた複合型に分けることができる。標準型が一般的で、水圧を受ける側壁がPC構造となっている。

このPCタンクは、1957年に建設された容量85 m³のPCタンクに始まり、水密性、耐久性、耐震性、経済性などの優位性により、水道整備事業の拡大と相まって、昭和40年～50年(1965～1975)にかけて施工件数が直線的に増加した(図-2)。そして、年間施工件数200件前後、総容量50万m³～60万m³程度でほぼ安定して建設されるようになり、現在に至っている⁷⁾。

建設されたPCタンクは、容量3 000 m³以下が70%以上を占める。1万m³を超える大型PCタンクも数多く建設されており、最近では実容量5万7 000 m³のPCタンクが建設されている。最大内径73 mのPCタンクが1967年に、最大水深33.5 mのPCタンクが1971年にすでに建設されており、PCタンクの実績拡大時期における設計施工技術の進歩を推察することができる。

そして、水道施設であるPCタンクは市民生活に密着した公共性を有し、景観への配慮を必要とする構造物である⁸⁾。1975年頃より外観の意匠やデザインを必要とされるようになり、現在では、環境との調和と親近感を重んじたデザインが重視されるようになってきていると思われる。

4.2 設計について

PCタンクにおいては、側壁に作用する静水圧によるフー



写真-1 標準型PCタンク

プテンションを打ち消すように円周方向プレストレス力を与えることを基本としている。一般的に、この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⁹⁾。PC容器構造物の設計圧力に対するプレストレス力は、上記に示す方法が基本となっている。

PCタンクの設計に関する変遷は、耐震設計法の動向を反映していると言える。PC建設業協会PCタンク検討小委員会における成果に基づいてまとめられた文献⁶⁾を参照してPCタンクの設計に関する動向の概要を以下にまとめて示すものとする。

当初、PCタンクは、基本的に1955年に土木学会より発行された「プレストレストコンクリート設計施工指針」に基づいて設計されていた。そして、1978年の宮城県沖地震を契機として「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書(PCタンク仕様書)」が、国内で初めてのPCタンクに関する設計施工指針として、日本水道協会から1980年に発行された。それ以降のPCタンクは、基本的に本仕様書に基づいて設計された。本仕様書での耐震設計は震度法を基本としており、設計水平震度は0.2～0.3で設計された。

1995年の兵庫県南部地震により多くの構造物が予想を上回る多大な被災を受けたことにより、各種耐震基準が見直された。本地震によるPC容器構造物の被災は、他の構造物と比較すると以下の理由で軽微であった。

- ① 構造物の固有周期が0.1秒以下で非常に小さい。
- ② 耐震的な軸対称の壁体構造である。
- ③ 自重が軽く、躯体慣性力の影響が少ない。

しかし、本地震は、従来にない1Gを超える応答加速度を考慮する必要を提起するものであり、PCタンクに関する耐震設計も見直しがなされた。その結果、PCタンク仕様書が改訂され、「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(PCタンク指針)」として日本水道協会から1998年に発行された。本指針では、塑性変形能力を考慮した耐震設計法が示され、PCタンクが保有すべき耐震水準が以下のように規定されている。

地震動レベル1：無被害であること。

地震動レベル2：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、その機能保持が可能であること。

ただし、従来のPCタンク仕様書で設計されたPCタンクは、基本的に本PCタンク指針の耐震基準を満足することが、本改訂時にすでに確認されている。

今回の耐震基準の見直しにおいて、PCタンクの非線形挙動の検討が本格的に実施され、従来不明であった事項が解明された。今後は本検討結果に基づき更なる検討、実験的実証が実施され、より合理的な設計法が追求されていくことが期待されている。

4.3 施工について

当初、PCタンクでは、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年にアメリカより技術導入されたプレロード工法がある(写真-2)¹⁰⁾。一般的には、ピラスターを用いてPC鋼材を緊張定着するのであるが、本工法では機械システムによりPC鋼材を緊張しながら巻き付けていくメリーゴーランド式プレストレスング工法が用いられる¹⁰⁾。

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。本中巻き工法は、1968年から採用されはじめ1970年代には主流となっていた⁷⁾。

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⁷⁾。

- 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。そして、1993年に日本プレキャストタンク協会が設立されて普及が図られている。
- 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年に採用され、これまでに100件以上の実績がある。
- ③ 側壁コンクリートを一度に打設する工法：全高さ外型枠を組み立て、内型枠を組み立てながら側壁コンクリートを一度に打設する工法である。1995年に初めて採用された。

PCタンクの黎明期中巻き工法への移行以外にも多くの

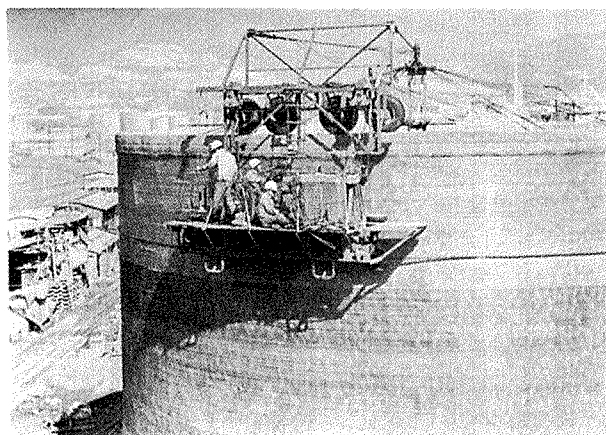


写真-2 プレロード工法

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10年に実施されている。これは、時代のニーズであるとも考えられる。今後、金属との複合の検討(すでにアルミドームの採用例がある)、新素材の採用、機械化等によるPCタンク施工の改善が実施されていくことが期待される。

5. 消化槽、処理槽

下水道施設の消化槽、処理槽に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形と卵形がある。これらの形状とPC技術の適用は、すでに1950年以来、欧米で研究開発が進められたものである。卵形は西ドイツで開発されたものである。本卵形消化槽は消化効率が高まっていることより欧米、とくに西ドイツで多数建設されている。

1958年に尿尿処理槽にPC構造が適用された実績があると言われているが、一般的には1977年に汚泥消化槽にPC構造が適用されたのが、国内で下水道施設にPC容器が採用された最初であると言われている¹¹⁾。このPC汚泥消化槽は亀甲形であり、この形式のPC消化槽はその後にも建設されている。

しかし、1983年に横浜市が、その優秀な機能性に着目し、国内最初の6 800 m³のPC卵形消化槽(写真-3)の建設に着手して以来、数多くのPC卵形消化槽が建設されている。そして、本消化槽が国内においても消化槽の主流となってきた。

現在施工中のものを含めると、この18年間で100件近いPC卵形消化槽の実績がある。最小容量は1 000 m³/基、最大容量は1万2 800 m³/基(1994年建設)で、現在までに建設されたPC卵形消化槽の総容量はほぼ45万 m³である。

このPC卵形消化槽には、液密性、気密性を保持するために、卵形の形状特性を考慮したPC鋼材が図-3に示すように配置されている¹²⁾。



写真-3 PC卵形消化槽

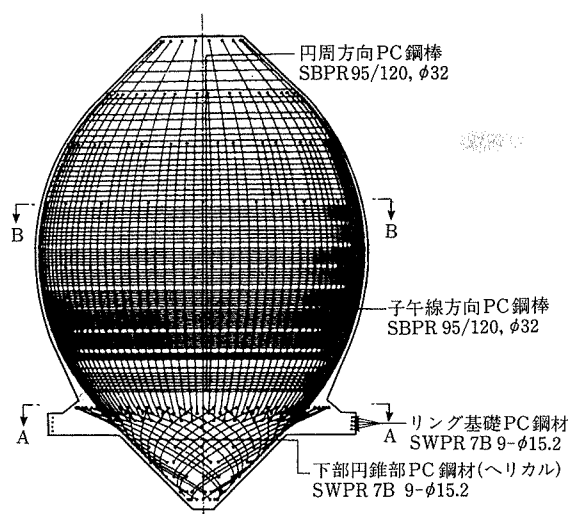


図-3 卵形消化槽のPC鋼材の配置

PC卵形消化槽が多数建設されている西ドイツでは内陸の良好な地盤に建設されることが多いが、国内においては軟弱な地盤に設置されることが多く、より以上の地震に対する配慮が必要なことより、西ドイツとは建設条件が大きく異なる。技術導入にあたってはこれらを配慮して設計施工が行われている¹²⁾。

PC卵形消化槽は、当初クライミング工法（写真-3）により施工されることがほとんどであったが、最近では大型パネル工法で施工される場合も増えてきている。

PC卵形消化槽は、実績の増加に伴い、その機能性、経済性が実証されており、国内の下水道整備の重要性に伴い今後も採用が増加していくものと期待される。

国内の下水道整備は重要課題であり、このためには人口5万人未満の中小市町村の下水道普及の推進が必要となる。この整備に300 m³～1 200 m³の小規模下水処理施設（写真-4）が用いられている。この処理施設にPCプレキャスト式処理槽が採用されている。1987年に最初の440 m³の小規模下水処理施設が建設されて以来、すでに120件以上の実績を築いている。小規模下水処理施設は、地域の下水道普及に必要不可欠であり、今後もPCプレキャスト式処理槽の採用は増えていくものと考えられる。

6. ガスタンク（低温タンク）

燃料ガスはその容積を1/100に圧縮するために低温液化される。これにより輸送と貯蔵が可能になるが、危険性が増大する。代表的な燃料ガスの種類と貯蔵温度を表-3に示す¹³⁾。これらは、低温での貯蔵が必要であり、貯蔵には低温を保持する特別なタンク（低温タンク）が使用される。

低温タンクは、地下式もしくは金属二重殻の地上式が一般的であった。しかし、土地の有効利用、および二次バリアーとしての安全性を確保する目的で、防液堤と保冷外槽との機能をもつ外槽をPC構造とする地上式の低温タンク（PC低温タンク）が欧米で開発され、1960年代にスペインでLNG・PC低温タンクが建設された。

PC低温タンクの構造は、低温液化ガスを貯蔵する低温金

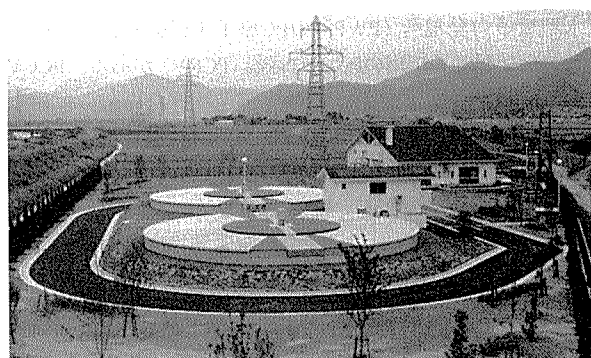


写真-4 小規模下水処理槽

表-3 燃料ガスの種類と貯蔵温度

種 類	略記号	貯蔵温度(℃)
ブ タ ン	L B G	- 5
プ ロ パ ン	L P G	- 45
エ チ レ ン	L E G	-104
天 然 ガ ス	L N G	-164

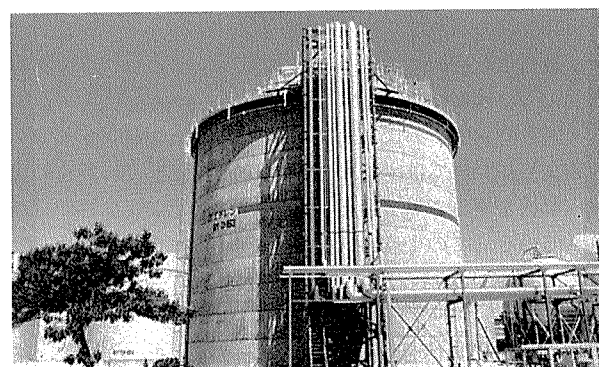


写真-5 PC低温タンク

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。このPC外槽には、漏液時の温度荷重を考慮した液密性を保持するためのPC鋼材が配置されている¹⁴⁾。また、気密性を確保するためにPC外槽の内面は金属製ライナーでシールされている。

当初国内で建設されたPC構造の低温タンクは盛土式で、5 100klのLPG低温タンク（1969年）、6 万 klのLPG低温タンク（1975年）の実績がある。

国内で初めての地上式PC低温タンクである 5 300 klのLEG・PC低温タンクは1979年に建設された（写真-5）。

その後、石油代替えのクリーンで環境に優しいエネルギー対策として、7 万4 000 klのLPG、18 万 klのLNGなどの大型PC低温タンクが建設された。盛土式2件を含め、現在までに14基のPC低温タンクが国内で建設されている。

これらPC低温タンクの実績は、極低温液体の貯蔵、高い気密性と災害時の安全性確保、大型タンクの設計施工などを課題として技術開発が推進された結果であると考えられる。

今後もエネルギー対策としてのPC低温タンクの需要向上が期待される。

7. 原子炉格納容器

原子力発電施設におけるPC容器構造物の適用として、加

圧水型原子力発電所（PWR）のPC原子炉格納容器（PCCV）とガス冷却型原子炉用のPC压力容器（PCRV）がある。PCCVは、冷却材配管破断のような事故が起こった場合の仮想事故荷重時に、耐圧、耐漏洩性、および放射線に対する遮蔽機能をも要求される構造物である¹⁵⁾。PCRVは15気圧～50気圧の原子炉用高圧ガス压力容器である¹⁶⁾。

これら原子力関係のPC容器の研究開発は、アメリカ、フランスを中心に1950年代より開発が進められ、1959年にフランスでPCRVが建設された。1960年以降にPCCVがアメリカを中心として建設され、現在100基以上の実績があると言われている。

国内では1986年に、日本原子力発電（株）敦賀発電所2号機の原子炉格納容器（PCCV）が建設された（写真-6）。その後、関西電力（株）の大飯3号機、4号機、九州電力（株）の玄海3号機、4号機の4基のPCCVが建設されている。

これらPCCVの構造概要は以下のとおりである。

- ・内側に配置されたライナープレートが気密性の保持と放射線の漏洩を防止する。
- ・通常運転時にコンクリートは完全圧縮応力状態であるようにPC鋼材を配置緊張する（図-4）。
- ・緊急時内圧、および地震荷重はPC構造が負担する。

PCCVについては、その重要性から現在までに多くの実験、解析が実施されて、耐震性を含め十分な安全性が確認されている。このような、重要構造物にPCを適用することは、PC容器構造物の技術の発展に大きく寄与するものと考えられる。

国内の電力事情を考えれば原子力エネルギーが必要とされていることより、原子力施設へのPC技術の適用が今後も期待される。

8. おわりに

本文で記述していないが、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、1962年にセメント用の5500tのPCサイロが建設されて以来、セメントや石炭などを貯蔵する目的で建設されてきている。最近では、スリップホーム工法による石炭用の7万tのPCサイロが建設されている¹⁷⁾。貯油槽に関しては、1984年以降に防衛庁施設のPCオイルタンクが建設されている。

PC容器構造物は、PC貯水槽を主として実績を伸ばしてきており、液体、気体、粉体の保持と遮蔽に適した構造であることより各種容器に適用が図られてきた。残念ながら国内のPC容器構造物は、すべて欧米で研究開発されたものである。導入技術ではあるが国内での適用にあたっては、更なる技術検討が実施されてきている。

PC貯水槽に関する技術を基盤として、形状に特色のある卵形消化槽、極低温液化ガス容器である低温タンク、高度の安全性が要求される原子炉格納容器等に適用されることにより、国内PC容器構造の技術向上が図られてきたものと考えられる。

今後は、構造物の性能に着目した設計施工が要求されることより、従来技術の蓄積に立脚して、各種容器構造の特性を把握し技術開発を実施する必要がある。

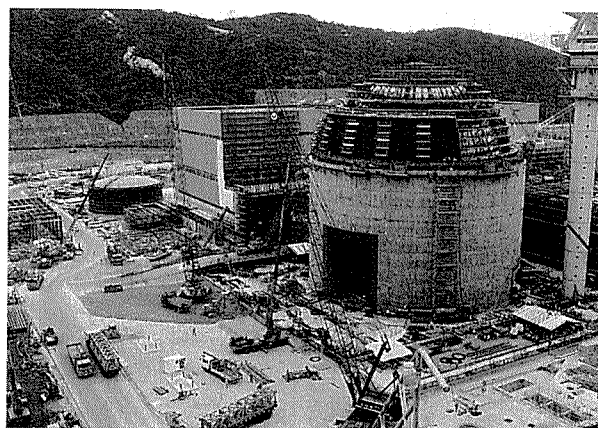


写真-6 PCCV

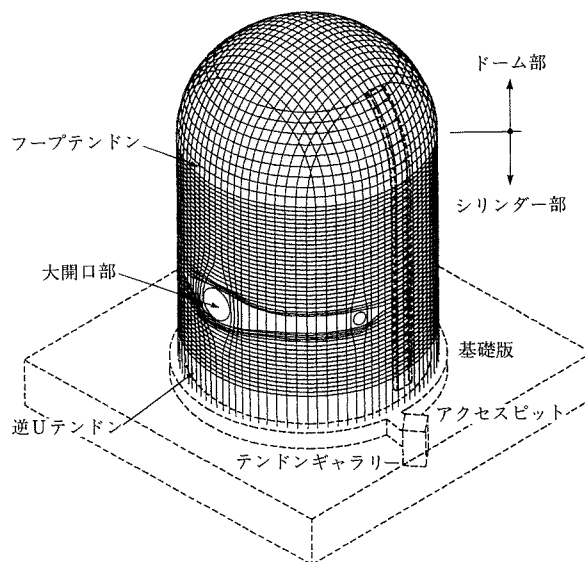


図-4 PCCVのPC鋼材の配置

そして、時代のニーズとして、施工の省力化、機械化が要求されており、品質を確保してこれらを推進していく必要がある。とくに、実績の多い貯水槽に関してはこれらの対応に加えて、維持管理技術の開発も必要となるものと考ええる。

今後も、PC容器構造物の特性を活かした既存技術の向上と新分野の技術開発の推進に期待するものである。

参考文献

- 1) 日本評論社：講座・日本技術の社会史、第7巻、建築、pp.318～322、1983
- 2) 藤井、土木学会（編）：新体系土木工学34 プレストレストコンクリートの力学、pp.1～3、技報堂出版、1981
- 3) 猪股、土木学会（監）：プレストレスト・コンクリートの設計および施工、pp.679～680、技報堂、1957
- 4) 西尾：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
- 5) 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、1991～1998年版
- 6) 井手口：PC容器の歴史、プレストレストコンクリート、Vol.35、No.6、pp.12～13、1993
- 7) 西尾：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、pp.15～20、1999
- 8) 横山：最近のPCタンク的设计事例、プレストレストコンクリート、Vol.42、No.2、pp.86～89、2000

- 9) 鈴木：上水用PCタンクの現状と問題点，プレストレストコンクリート，Vol.20，No.5，pp.5～13，1978
- 10) 岡田：プレストレストコンクリートの設計，pp.297～299，国民科学社，1963
- 11) 山田：下水処理におけるPCタンク，プレストレストコンクリート，Vol.20，No.5，pp.20～24，1978
- 12) 竹田：PCタンクの設計と施工〔PC卵形消化タンクの設計と施工(1)〕，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.4，pp.89～93，1989
- 13) 荒川：プレストレストコンクリート円形構造物，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.1，pp.19～25，1989
- 14) 中島：プレストレストコンクリート製大型LNGタンクの設計および施工ー世界最大級の14万kl極低温タンカー，プレストレストコンクリート，Vol.34，No.5，pp.9～25，1992
- 15) 山口：PC格納容器(PCCV)，コンクリート工学，Vol.24，No.3，pp.78～81，1986
- 16) 青柳：PC圧力容器(PCRV)，コンクリート工学，Vol.24，No.3，pp.81～85，1986
- 17) 石川：リングビーム式スリップホーム工法による超大型石炭サイロの建設ー電源開発(株)橋湾火力発電所ー，セメント・コンクリート，No.631，pp.20～26，1999

【2000年8月31日受付】

◀刊行物案内▶

PPC構造設計規準(案)

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準(案)

プレストレストコンクリート橋の耐久性向上 のための設計・施工マニュアル(案)ー抜粋ー

(平成8年3月)

頒布価格：3点セット 5 000円(送料600円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会