

プレキャストタンクの技術開発

—上水用大型タンクとスラリータンク—

堅田 茂昌*1・村井 篤*2

1. はじめに

円筒形 PC 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、樽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。

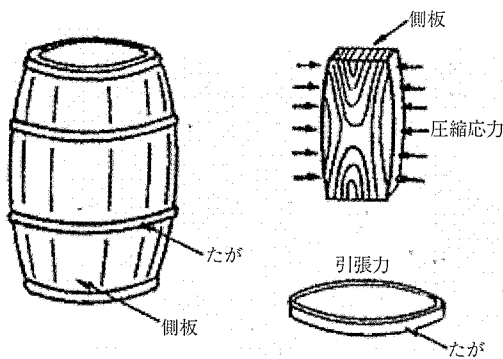


図 - 1 樽の原理

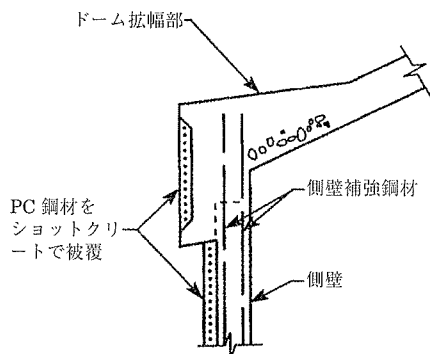


図 - 2 外巻きタンク側壁断面図

円筒形 PC 容器構造物は、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で施工され、広く普及した。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（図 - 2）。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。円周方向プレストレス力は PC 鋼材を、ピラスター部で緊張定着することにより与えられる（図 - 3）¹⁾。

一般的な PC タンクは、設計施工指針に基づく規定および、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が十分に付与されている^{1), 2)}。

本稿では、上述の背景をふまえ、①プレキャストタンクとしては国内で最大の容量を有する側壁下端固定式プレキャスト PC タンクの技術開発、②小規模下水処理施設（PC プレキャスト式処理槽）では実績ある外巻き工法を採用することで側壁部材を薄くしプレキャスト目地の耐震性を解析的に明らかにした PC プレキャスト家畜排せつ物管理施設（以下、スラリータンクと称する）の開発について報告する。

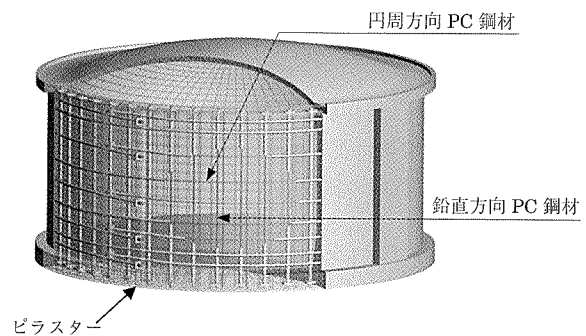
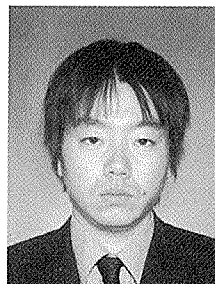


図 - 3 中巻きタンクの側壁断面



*1 Shigemasa KATADA

(株)安部日鋼工業
技術本部 技術部



*2 Atsushi MURAI

(株)安部日鋼工業
大阪支店 技術部

2. 大型プレキャストタンク

本事例は、内径 36.0 m、有効水深 10.0 m、全容量 10 000 m³ という上水用プレキャストタンクとしては国内で最大の容量を有する側壁下端固定式プレキャスト PC タンクである（図 - 4）。本配水池の建設にあたり、コスト縮減、品質向上の課題が設定された³⁾。

2.1 プレキャストタンクにおけるプレストレス

このプレキャストタンクは水密性と耐震性に優れた側壁下端を固定する構造としている。しかし、目地部において

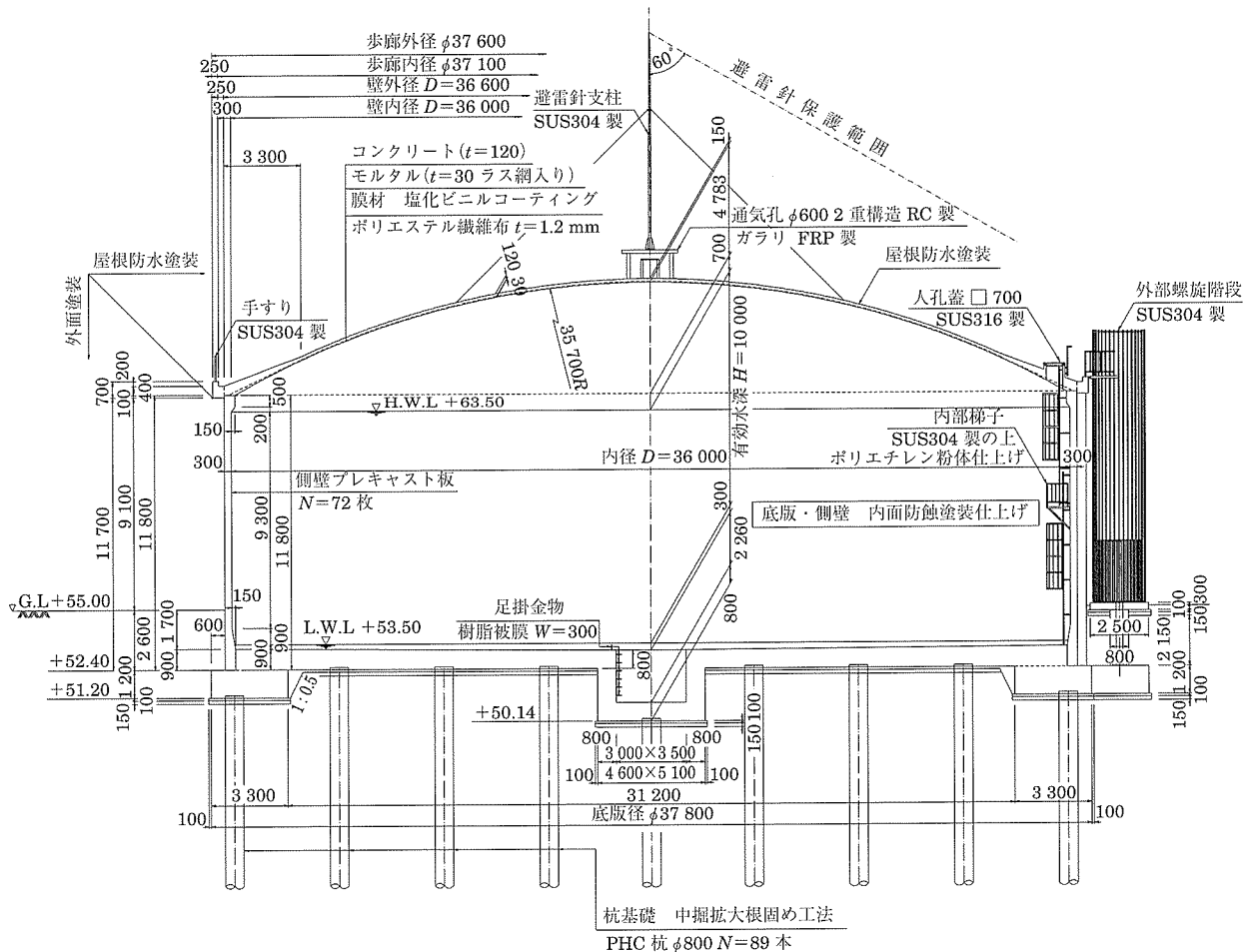


図-4 プレキャストタンク一般図

円周方向鉄筋が連続していない構造であるため、常時（空水、満水）に加えて温度作用時、レベル1地震動においても側壁円周方向全断面において引張応力を発生させないフルプレストレスにする必要がある。また、側壁下端固定の状態でも円周方向プレストレスを導入しても側壁下端付近は円周方向PC鋼材緊張による変形が底版により拘束される。したがって底版打設前の側壁下端自由支持の状態でも1次プレストレスを導入することで側壁断面に残留圧縮応力を確保し、底版コンクリートを打設した側壁下端固定状態で2次プレストレスを導入している（図-5）。

2.2 目地構造

従来、プレキャストタンク目地部のシース連結方法は、

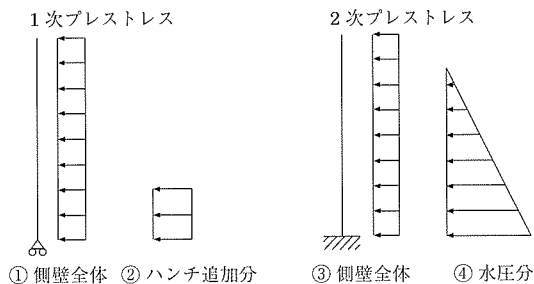


図-5 プレストレスの導入

部材製作の際に部材横締めシース内に挿入してあった連結シースを目地左右の部材から引き出し、お互いを付き合せた後、半割りシースを被せ止水処理を行うことを標準としていた。このシース連結作業は、煩雑であるため連結部を確実に施工することが容易ではない（図-6）。

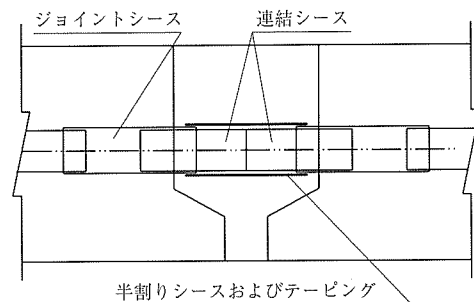


図-6 半割りシースによる連結

本配水池では側壁部材から2～3 cm 突出している鋼製シースに蛇腹シースを取付け連結することで解決した。この方法は、鋼製シースと蛇腹シース接合部の隙間が少なく止水性が高い。また、蛇腹シースを使用することで施工性が向上している（写真-1）。

従来、目地部は無収縮モルタルを使用することで水密性

を確保していた。しかし、この無収縮モルタルが目地部のコスト高の一因であった。無収縮モルタルの代わりに膨張材入りコンクリートを使用することでコストを縮減している（写真-2）。

これら、改善策の妥当性は、目地部の実物大実験によって確認している。

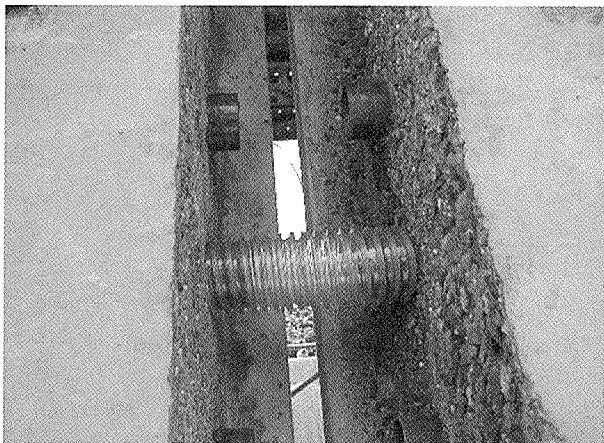


写真-1 蛇腹シースによるシースの連結

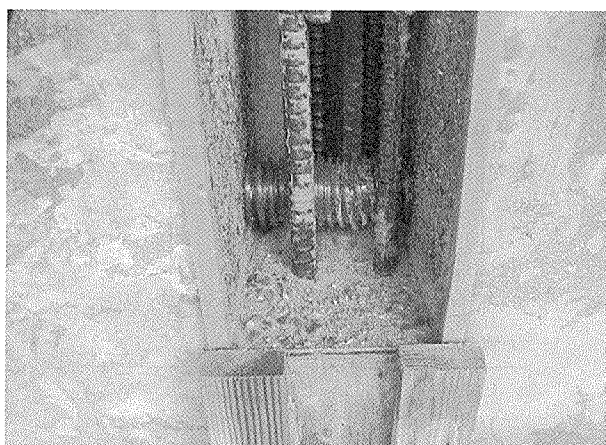


写真-2 目地コンクリートの打継目

2.3 ブラケット足場

本配水池では、側壁下端固定支持構造であるため、側壁部材建込み後に底版コンクリートを打設して側壁と底版を一体構造とする必要がある。よって、底版コンクリート打設時には側壁内側の足場を一時的に撤去する必要がある。工場製作の特性に着目し、側壁部材にインサート金物を埋め込み、パネルの建込み前にブラケット足場をつけることで、先の問題を解決している（写真-3）。

2.4 まとめ

本配水池では、従来工法を改善することで大型プレキャストタンクを実現している。

主な改善点を以下に示す。

- ・目地に膨張材入りコンクリートを使用した。
- ・横締シースの連結に蛇腹シースを用いた。
- ・タンク内足場にブラケット足場を使用した。

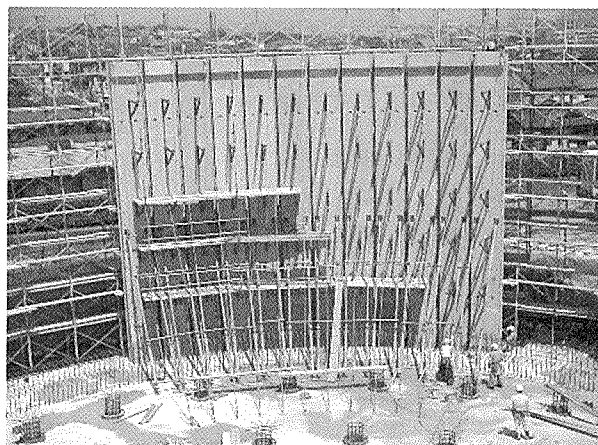


写真-3 ブラケット足場

3. スラリータンク

家畜排せつ物の管理施設であるスラリータンクについて報告する（写真-4）。スラリータンクの開発は、畜産を営む酪農家の受益者負担を軽減するため、高い耐震性を確保しながらイニシャルコストを削減することに端を発している。側壁円周方向 PC 鋼材の配置を、中巻き工法から外巻き工法とすることで側壁部材厚を 250 mm から 170 mm へ削減できる。PC 鋼材には、下水処理槽などで実績のある耐食性に優れた二重被覆のアンボンド PC 鋼材を採用することで黎明期における外巻き工法の問題を解決している。また、型枠形状を単純化することでプレキャスト製品の製造コストの削減を行っている。

通常、プレキャストタンクの目地部は、円周方向鉄筋が連続していないが、中巻き工法では円周方向 PC 鋼材が目地部の補強鋼材として期待できる。これに対し、外巻き工法では、目地部の補強鋼材がないので、目地部の地震時挙動と耐震性を明らかにする必要がある。本章では、目地部に着目した解析による外巻き工法プレキャストタンクの耐震検討について報告する^{4), 5)}。

3.1 背景

近年、農業に起因する環境問題として硝酸性窒素および亜硝酸窒素による地下水汚染が指摘されるようになった。これを受けて平成 11 年 11 月に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行された。同法では「管理の適正化」と「利用の促進」のための処置がうたわれているが、糞尿の野積みや素掘り貯留の禁止が打ち出された。

大規模畜産が多く存在する北海道東部において、家畜排せつ物管理施設としてのスラリータンクの整備が要請され、急速な整備が進んでいる。しかし、北海道東部は地震発生確率の高い特定観測地域に指定されている。また、近隣地にはラムサール条約に登録された霧多布湿原や阿寒国立公園などの特別自然保護地域が存在し、大規模地震時のスラリータンクの破壊漏洩による自然汚染の可能性に大きな関心がおよぶところである。

従来から耐震性が高いといわれている PC プレキャスト構造が、「土地改良事業設計指針ファーム Pond」で規定さ

れている『レベルⅠ地震動での施設の機能保全』のみでなく、レベルⅡ地震時にも内容液を漏洩しないという要求性能を満足できるかについてスラリーシステム研究会において検討が行われた。

3.2 検討目的と構造概要

スラリータンクは、プレキャストブロックを円筒形に立て掛け、外側からPC鋼材によりプレストレスを与える外巻き工法である。

スラリーシステム研究会で定めたタンクを対象に、プッシュオーバー解析とレベルⅠ地震動およびレベルⅡ地震動による地震応答解析により、スラリータンクの耐震性を検討している。

標準タイプとして定めたタンクは、内径 34.5 m、内空高さ 4.5 m、板厚 17 cm であり、54 枚のプレキャストブロックを使用している。PC 鋼材 7 段に、一本あたり 135.3 kN のプレストレスを与えたものである。



写真-4 スラリータンク

3.3 検討方針

3.3.1 基本方針

スラリータンクの耐震性は、プレキャストブロック（以下、パネルと称す）の耐力と合せて、PC 鋼材の耐力や目地部のずれ・開きが問題と考えられた。そこで、このような挙動を捉えられるようなモデル化を行い、プッシュオーバー解析とレベルⅡ地震動による応答解析を行っている。以下に、耐震検討の基本方針を列記する。

(1) タンクの設置条件

PC タンクは、地上式や半地下式などさまざまなタイプがあるが、本検討では、タンク本体の振動性状の把握と地上式の方が耐震性評価にとって厳しいと考えられるため、地上式としている。

(2) 内容液の有無

スラリータンクは、経時的に満液と空液状態の交互に置かれているため、耐震性評価にあたっては、満液時と空液時の二つの状態について検討している。

(3) プレストレス導入

PC タンクは、パネルの外側に設けた PC 鋼材によりプレストレスを導入する構造である。したがって、プッシュオーバー解析および地震応答解析でも、地震荷重を作用させる前に、設計で定めた初期プレストレス量を初期応力（引張力）として加えている。

(4) レベルⅡ地震動

道東地域は、約 100 年間にマグニチュード 7 クラスの地震が 13 回（6 以上は 31 回）発生しており、地震活動度が高い地域である。土木学会や農業土木学会などでは、「レベルⅡ地震動は供用期間内に発生する確率は低いが、大きな地震を与える地震動」と定義される。本検討では、計画地点でもっとも影響を与えると考えられる釧路沖地震（1993.1.15 M7.5）が最大加速度で 917 gal であり、これは気象庁震度階級で「6 強」に相当し、供用期間中まれに起こり得る地震動と見なせることから、この釧路沖地震を検討用地震動として用いている。

3.3.2 プッシュオーバー解析

PC タンクの損傷過程や終局限界状態を把握するため、プッシュオーバー解析を行っている。プッシュオーバー解析では、比較的扁平な円筒形シェル構造であるスラリータンクをできるだけ忠実にモデル化するため、3次元 FEM を用いる。また、パネルをソリッド要素（弾性）で、PC 鋼材をトラス要素で、目地部をバネ要素でモデル化し、タンク側壁全面に慣性力を与える方法で行っている。解析モデル概念図を図-7に示す。なお、目地部については、面内、上下および面外（せん断）の3方向の挙動をバネでモデル化しており、面内については、無収縮モルタル（プレキャストブロックと同程度の強度）材料に基づく no-tension の bi-

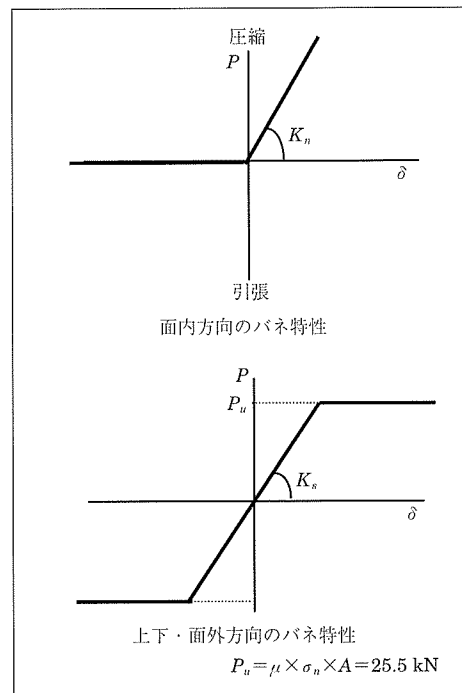
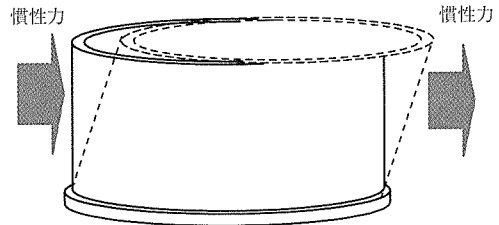


図-7 プッシュオーバー解析概念図

linear型で、上下および面外については、プレストレス導入による目地部の平均圧縮応力度に摩擦係数 $\mu = 0.5$ を乗じた値を上限値としたbi-linear型としている。

3.3.3 地震応答解析

釧路沖地震による地震応答解析は、3次元FEM解析と軸対称FEMの二つの手法により行っている。3次元FEM解析の概念図を図-8に示す。

このうち、3次元FEM解析は、プッシュオーバー解析と同様に、パネルをソリッド要素で、PC鋼材はトラス要素で、目地部はバネ要素でモデル化している。それぞれの特性はプッシュオーバー解析と同じである。この3次元FEM解析に入力する地震動については、以下の手順で行ったものを用いている。

- ① 釧路地方気象台で観測された強震記録を、一次元波動論を用いて設計基盤面まで引き戻して検討用地震動として定義している。
- ② この検討用地震動を設置地盤モデルの設計基盤面に入力して、一次元波動論による応答解析により地表面地震動を求め、これを入力地震動としている。

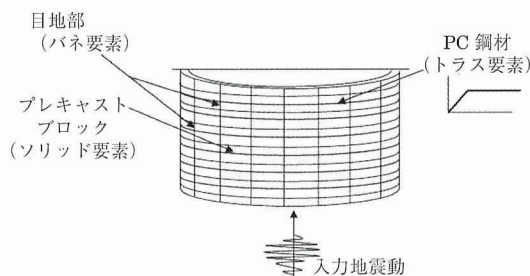


図-8 3次元FEM解析の概念図

3.3.4 耐震性能

「土地改良事業設計指針（ファームボンド）（農林水産省構造改善局建設部）」では、『レベル2地震動に対して、水密性を阻害するようなひび割れや目地の開きが生じることは認められ、内容液の急激な漏洩による二次災害に至る構造物が崩壊するようなことはあってはならない』としている。また、『土地改良施設耐震設計の手引き（農業土木学会）』では、耐震重要度A種に対して『致命的な損傷を防止する』と規定されている。また、レベル1地震動に対しては、いづれも『健全性を損なわない』としている。

各種指針から、スラリータンクに求められる耐震性能を工学的に解釈すると、レベル1地震動に対しては、補修しないで使用可能な状態を保つため弾性状態であることを確認し、レベル2地震動に対しては、目地部、PC鋼材およびパネル本体が終局状態（終局耐力、限界変位、限界ひずみ等）を超えないことを確認することとなる。

表-1 耐震性能（限界値）

	目地部	PC鋼材	パネル本体
レベル1地震動	開かない	$0.6 f_{tm}$ or $0.75 f_{ty}$	鉄筋が降伏しない
レベル2地震動	目地シリングの限界伸びひずみ $\epsilon_v = 200\%$	降伏強度 $\sigma_{tm} = 222 \text{ kN/本}$ (1600 N/mm^2)	終局曲げ耐力 $M_U = 31.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (D16@200)

以上から、スラリータンクにおける各地震動レベルに対する目標とする耐震性能を表-1に示す。

3.4 検討結果

(1) プッシュオーバー解析

目地部の挙動は、図-9を見ると最大変形時の目地部の開き・ずれ量とタンク変位は、パネルが外側に倒れ出す $0^\circ \sim 45^\circ$ 辺りで、円周方向の開き挙動が卓越しており、反対側の $135^\circ \sim 180^\circ$ 付近では、面外ずれとなる半径方向が大きい。最大の開き量は $\delta_{max} = 5.9 \text{ mm}$ となり、また、半径方向の最大ずれ量も $\delta_{max} = 5.9 \text{ mm}$ であった。

円周方向PC鋼材の挙動は、満液時の解析から求められる最上段、中段（4段目）、最下段のPC鋼材は、各段ともプレストレス量は $\sigma_0 = 966 \text{ N/mm}^2$ である。載荷に伴い各段のPC鋼材の引張力は増えるが、最終状態において降伏点（ $\sigma_y = 1600 \text{ N/mm}^2$ ）まで達することはない。

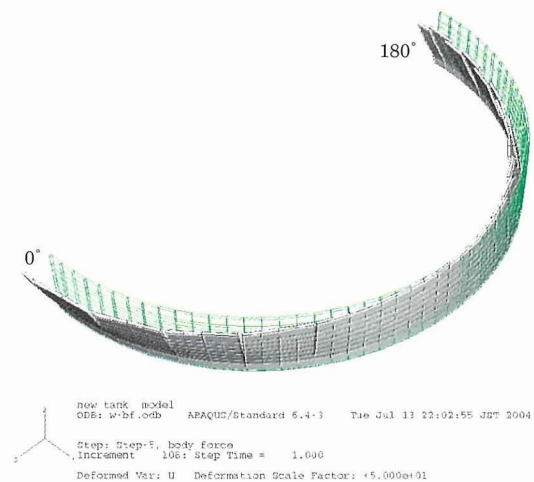


図-9 変形図

(2) 地震応答解析

レベル2地震動に対する耐震性評価として地震応答解析を行っている。解析モデルの 0° および 180° 位置で最大応答変位となる時刻での変形図を図-10に示す。これら変形図から、満液時には、それぞれ最大応答変位が生じる時刻では、パネルが外側に倒れ込む挙動を呈していることが分かる。満液時の最大相対変位は、 $\delta_{max} = 4.09 \text{ cm}$ （変形角 $1/110 \text{ rad}$ ）程度である。これは、空液時と比べて満液時には慣性力が大きく、目地部およびPC鋼材を弾塑性モデルとしているため、目地部で塑性ひずみが生じてい

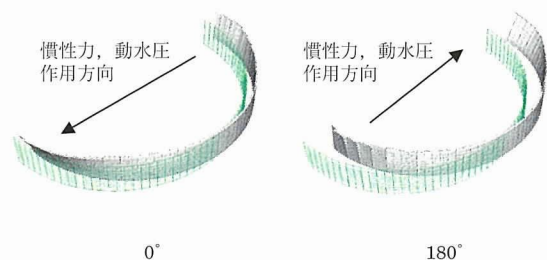


図-10 0° と 180° の最大応答時刻の変形図

る。解析モデルでは PC 鋼材と側壁パネルが共有節点でボンドされている。ただし、PC 鋼材はアンボンドであること。また、平均的な挙動は弾性状態であり、外周の PC 鋼材が降伏していないかぎりには、目地部の塑性およびそれによるタンク本体の残留変形は少なくなる。

3.5 検討のまとめ

スラリータンクのレベル 2 地震動に対する耐震性能を評価し、その結果、各部位とも塑性的な挙動を呈することなく、スラリータンクとしての貯留性、水密性は維持している。ただし、本検討は、既往の強震記録である釧路沖地震を対象としており、地盤の構造によってスラリータンクに加わる地震力が大きく変わることなど、地震動を用いる耐震設計では、地震動の性質（最大振幅、周波数特性、位相特性）や地盤構造に左右されるといった難点がある。

3次元非線形 FEM によるプッシュオーバー解析と地震応答解析を比較することで、スラリータンクがどの程度の耐震余裕度を有しているかを検討した。その結果、スラリータンクの応答変位が釧路沖地震の 2 倍ほど大きくなっても、目地部の開き、ずれの挙動および PC 鋼材の耐力に問題がないと考えられる。

このことは、実際に建設されたプレキャストタンクに構造的な問題が発生していないことから見て取れる。また、PC 鋼材とパネルを定着部以外固定しないことより、PC 鋼材の伸びが地震時の目地の変位に追従し、地震時の原形回復性も向上すると考えられる。

本検討の解析では、PC 鋼材と側壁パネルが共有節点でボンドされ、アンボンド PC 鋼材の挙動を適切にモデル化できていない。今後同様の解析を実施する際には、この点を考慮してモデル化に工夫する必要がある⁵⁾。

4. 最後 に

現在までに多くの PC 容器構造物が建設されており、数

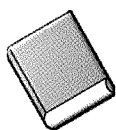
十年経た PC タンクの劣化状況を調査・分析し、PC タンクの耐久性を適切に評価する必要がある。その成果に基づいて適切な維持管理を実施していく必要があり、メンテナンスは今後の重要な技術であると考えられる。

道路橋示方書・同解説Ⅲには、工場製作されるプレストレストコンクリート構造に想定している水セメント比は 36% と解説されている。また、コンクリート構造物の耐久性と水セメント比については、コンクリート標準示方書【施工編】6.4.6 耐化学的侵食性の照査 (2)「最大水セメント比が 45% 以内であることを確認することにより、耐化学的侵食性の照査に代えてよい。」とする規定がある。工場製作されるプレキャスト製品の水セメント比を考えれば、場所打ちによる PC タンクを上回る耐久性が担保されていると考えられる。今後、メンテナンスに関わる技術開発を進め、高耐久な PC 構造物が開発されることを期待するものである。

参考文献

- 1) 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, p.21, 2004
- 2) 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, p.85, 2003
- 3) 久保淵，土田，村井，今尾：大型プレキャスト PC タンクの施工，第 15 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，pp.69-72, 2006.10
- 4) 日本農業土木総合研究所：平成 16 年度 PC プレキャストスラリータンクの耐震性評定業務 報告書，2004.10
- 5) 日本農業土木総合研究所：PC プレキャストスラリータンクの耐震性の検討，JIID 研究レポート，No.26, pp.37-63, 2005.10

【2007 年 1 月 22 日受付】



新刊図書案内

PC技術規準シリーズ

貯水用円筒形PCタンク設計施工規準

頒布価格：会員特価 3 500 円（送料 500 円）

：非会員価格 4 200 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版