

メキシコ アトトニルコ水処理プラントの浄化タンク設計 – Design of the Digester Tanks of the Atotonilco Water Treatment Plant in Mexico –

著：Jose Duro Rodriguez, Eduardo Torralba Bozzano, Alvaro Del Cuvillo Martinez-Ridruejo
 訳：会誌編集委員会海外部会*

本誌はメキシコ アトトニルコ水処理プラントの 15 000 m³ のプレストレストコンクリート製の浄化タンクの設計過程について考察したものである。この事業について、プラントの概要と設計段階においてエンジニアが直面した構造的課題、そしてその解決策に注目し、紹介する。この設計における課題の解決策は、側壁に固定された円周方向と垂直方向の二つのポストテンションシステムである。このシステムにより設計荷重下でのタンクの構造的完全性を保証し、プラントの浄化槽 30 基の早急な建設も両立して行うことができた。

キーワード：水処理プラント，浄化槽，ポストテンション，スライディングフォーム

1. はじめに

アトトニルコ排水処理プラントはメキシコバリーにおいて、水の持続的な使用を可能にする事業の一環としてメキシコ政府と Natural Water Commission (CONAGUA) により 2007 年に設置された。この事業の主な目的は、下水を農業用地の灌漑に適した綺麗な水に転換し、国の中央領域にある帯水層を回復させることである。

このプラント (図 - 1) は 2 億人以上の居住者を抱えるメキシコシティ都市部からの排水の 60 % の処理能力を有している。この施設はヒダルゴのチュラバリーの農業能力を、再生水の利用により 80 000 ha に増やすことを期待されている。標準的で化学的な処理過程を採用した水処理施設で、最大処理能力は 42 m³/s に達する。

このプラントでは汚泥がもつエネルギーを利用し、メタンガスを電気エネルギーに変換して使用している。30 基の浄化槽は汚泥処理施設として設計され、それぞれ 15 000 m³ の貯蔵量を有し、合計 450 000 m³ になる。

2. 浄化槽の説明

アトトニルコ浄化槽は、内壁につながる円周方向と垂直方向二つのポストテンションシステムによるプレストレストコンクリート製タンク 30 基からなる。従来は、これらのタンクの様式は非常に厚い大量の鉄筋コンクリート側壁区画とともに設計・施工された。この方法によるタンクの設計・施工は、タンクの運用年数低減につながるようなひび割れと漏水が散見されていた。プレストレストコンクリートを採用した設計はタンク側壁に恒久



図 - 1 アトトニルコ水処理プラントの航空写真

的な水平圧縮力を全設計荷重下で持たせており、それゆえ、漏れない構造物として保証している。

タンクの円筒壁は全体で高さ 21 m、直径 26 m で 0.45 m の厚さが連続して続いている (図 - 2)。円周方向のポストテンションケーブルの定着装置を支えるために、円状タンクの 1/4 に 4 つのピラスターを側壁内に設置した。タンクの屋根部分は円錐状で厚さは 0.3 m である。タンクの基礎は 0.8 m の鉄筋コンクリートスラブであり、円錐の先端を切り取ったような形状になっている。基礎は埋設され、地盤に支持されている。基礎底版の上に側壁が一体となっており、側壁の一部も地中に埋まっている。

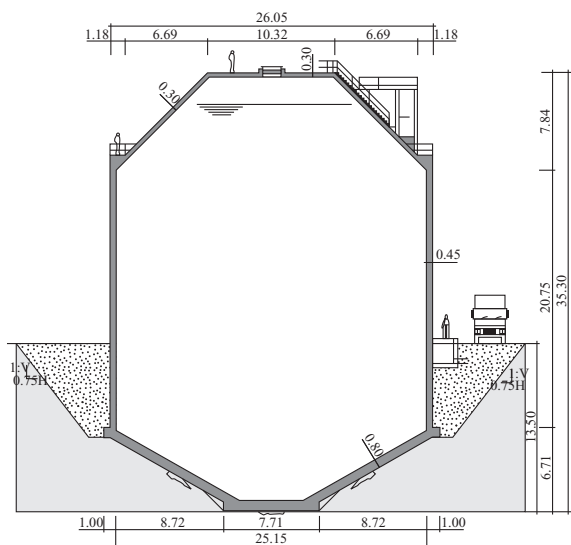


図 - 2 タンク断面図 (単位: m)

従来のタンクの幾何学的なデザインは、垂直方向のプレストレス無しで設計荷重に対して抵抗することができるように、側壁の基部 2 m の壁厚を変化させていたことによる。この幾何学的形状は側壁の型枠の性能を決定づけた。タンクの施工はプラント建設のクリティカルパスであったため、タンク建設の工期の短縮がきわめて重要であった。技術者は元の設計からいくつかの選択肢について検討せざるを得なかった。結論は、スライディングフォームを使用するために、幾何学的に変化する壁厚を均一な壁厚に変更して、設計荷重に抵抗できるように垂直方向のプレストレスを導入することだった。

円周方向の PC 鋼材は壁厚を最小化し、補強鉄筋と組み合わせた構造に最適な解決策をもたらしている。ポストテンションシステムは 2 組の PC 鋼材から構成されている。2 本の鋼材からなるそれぞれの組は、対になったピラスターに固定され、タンクの円周を 180° 囲って配置されている (図 - 5)。同じ高さのそれぞれの PC 鋼材の配置は、コンクリートの側壁に圧縮を加え、使用される鋼材量を最適化するように配置されている。

垂直方向の PC 鋼材は、気密性の保持、ひび割れ発生の低減、とくに地震時のタンクの性能を維持するために設計された。

側壁および屋根の外側は、使用中のタンクの熱損失を最小限に抑えるために、絶縁材料で覆われている。保護シートは、使用中に放出されるガスからコンクリートを保護するため屋根の内面に設置した。

3. 設計条件と構造解析

3.1 モデル化

タンクの解析は、幾何学的な形状と境界条件が再現された 3 次元モデルで行った。解析では、使用時に発生する可能性がある永続的な荷重や、変化する荷重、また突発的な荷重について考慮した (図 - 3)。構造物 - 地盤間の相互作用は、地盤に依存する水平成分と鉛直成分のばね値を用いてモデル化され、静的・動的解析を行った。

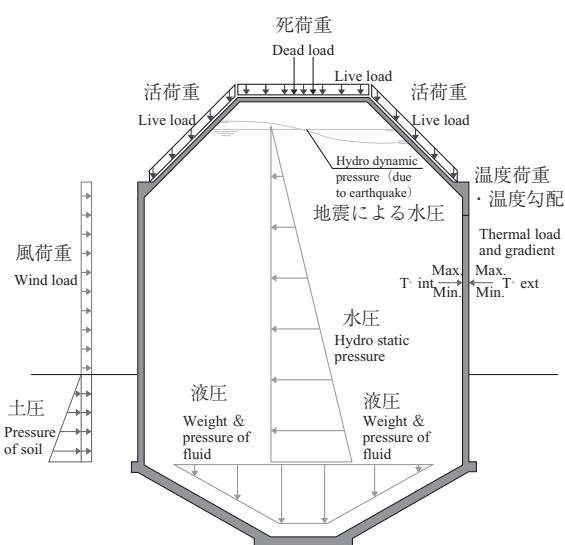


図 - 3 主要な作用荷重

4. 設計条件と構造解析

4.1 主要な作用荷重

液体を收容する構造物に発生する主な応力は、收容されている液体による壁やスラブへの圧力によるものである。汚泥の圧力は容器の全高に作用し、側壁や底版に対しては垂直に作用する。容器内のガスによって生じる内部圧力もこれらの部材に作用する。

土圧は、容器壁面の埋設部分に作用する。また、主働土圧と受働土圧を採用するには側壁の変動が少なかったため、横方向の静止土圧として考慮した。

浄化タンクの性能は、いくつかの要因に影響されるが、主に汚泥の温度に影響される。浄化タンク内部の最適温度は、35℃から 38℃の間で変動する。浄化タンク内部の温度を変化させる環境影響を防ぐため、露出されているタンクの全表面に断熱材として硬質ポリウレタンフォームを使用した。タンクの内側と外側の温度勾配により、タンクには大きな応力が発生する。設計時にこの温度による影響を考慮するため、二つのケースを想定した。第一のケースは、運用中の内部温度と、外部の最低

気温の平均値による温度勾配から得られる応力である。第二のケースは、タンクが空の状態の内部温度と外部の平均気温により得られる応力である。

温度は、年平均最高気温と年平均最低気温の差を2/3に内分する温度を、地表より上の円筒部分に壁高によらず一様に設定した。

4.2 地震動および動的解析：構造物－地盤間の相互作用

耐震設計用応答スペクトルを決定するため、その土地固有の影響を考慮した地震ハザード解析と地震応答解析が導入された。これらの解析手法を導入した意義は、より正確にその土地固有の地震動と特性を得ることにあ

る。その土地固有の影響を考慮した地震ハザード解析は、35年超過確率10%の地震のハザード加速度応答スペクトルを生み出すために導入されたものである。この解析は、影響する可能性がある全地震源、最大マグニチュード、減衰、そして震源からサイトまでの距離を考慮したものである。その土地固有の影響を考慮した地震応答解析は、土層断面のモデル化と地震波の伝播における地盤影響を評価する数値解析により成り立つものである。これらの解析の目的は、地盤調査と動的応答解析に基づく、その土地固有の地盤特性の決定にある。最終的に、一様ハザード加速度応答スペクトルを修正するために、伝達関数を適用し耐震設計用応答スペクトルを作成した。この土地固有の特性を考慮した解析から得られた最大加速度応答スペクトルは、0.22gであった。

タンクが揺れるときに地盤との間に発生する運動学的な力と慣性力を組み合わせることで、動的な構造物－地盤間相互作用を考慮する。結果的に、この相互作用によって構造物の固有振動数が増加する一方で、下端を拘束支持される同形式の構造物と比べると柔軟性が低下することとなる。基礎の剛性と幾何学形状による運動学的な相互作用によって、基礎の変動は低減され、ねじれと傾きが発生する。これらすべての影響を受けた結果、構造物の固有周期は0.2秒となった。

内部に液体を含む構造物の流体力学的影响についてはハウズナーの手法を用いてモデル化された。この手法を用いることで、構造物に作用する慣性力に加えて内部に貯蔵された液体に作用する慣性力を考慮することができる。タンクの壁と底版は、流体の衝撃的、定常的な動きによって発生するどちらの水圧にも耐える必要がある。タンクが動く際に液体が衝突して発生する力が衝撃的水圧であり、液体が振動することで発生する力が定常的水圧である。

4.3 構造設計

タンクの壁における円周方向プレストレスの設計では、2つの限界状態に対する照査を行った。一つ目は圧縮力最大ケースである。これは完成直後のタンク内が空の状態であり、壁コンクリートの圧縮応力度が許容応力度以上にならないことを照査するものである。2つ目は圧縮力最少ケースである。これはタンクが完全に満たさ

れた状態が永続的に続いた状態であり、最大荷重時かつ最少プレストレス力下において壁コンクリートに引張力が発生しないことを照査するものである。

解析において実証されたように、円周方向プレストレス力は壁の高さ方向全体に分配され、水圧によって発生する引張力を相殺している。一方で壁下端では基礎リングが変形しないため円周方向プレストレスが有効に働かず、引張力の発生は不可避となる。同時に、壁下端においては比較的大きな鉛直方向曲げモーメントが働く（図-4）。この断面のひび割れ制御は適切な鉄筋量を配置することで確保している。鉛直方向プレストレスによって軸力が導入されることでこの断面の壁厚は一定を保持し、終局時および供用時に発生する断面力に抵抗している。

これら円周方向に配置されるPC鋼材の配置間隔は下部では0.4mであるが、壁の上部に行くにしたがいその間隔は徐々に広がり、最大で1.0mとなる。壁の高さ方向におけるPC鋼材配置間隔を図-5に示す。1組については赤色で、もう1組については青色で示されている。プレストレス力の損失は最大で25%にも上る。これは主に鋼材の曲線配置の影響である。鋼材は12S15.2相当であり、シースの直径は84mmである。鉛直方向のポストテンションには4S15.2相当の鋼材が使用され、壁の円周方向にそって0.6m間隔で配置されている（図-5、6）。

5. 施工順序

まず第1に、各浄化槽ごとに相当するエリアを掘削した。一方で、地質が分析に合致しているかどうかを確認した。急傾斜が存在したため、暫定的に地盤の安定化を施した。

底版は5分割施工で、中央付近の円版部分と均等に4分割した扇部分からなる。止水材をこれらの分割部分間の施工継ぎ目で使用している。コンクリートの養生は、現地の慣習にしたがって濡れた布により行った。

壁を上昇させながら打設するために、スライディングフォーム工法を採用した。この工法は油圧ジャッキで構成され、壁高方向に間隔を空けて配置されている。ダクトに配置されたジャッキチューブは、円周方向のダクトとの干渉を避けるように偏心させて壁に差し込まれている。これらにより両壁の作業床が支持されている。内側と外側の型枠は、ヨーク（H鋼等で組立てた門型のフレーム）によって横方向に接続されている。作業床は型枠の上端に置かれていて、コンクリート表面を仕上げるための足場が作業床の下で吊るされている。スライディングフォーム工法の利点は、打継ぎのない連続的な一体施工および施工出来形精度の高さにより工期短縮を図ることができることである。また、壁の高さが標準的な高さにおいても工事費を削減することができた（図-7）。

側壁がいったん完成すると、屋根で使用する型枠を支持するために、タンクの内部に高耐力の支柱を取り付けた（図-8）。支柱の安定性を確保するために、定着アン

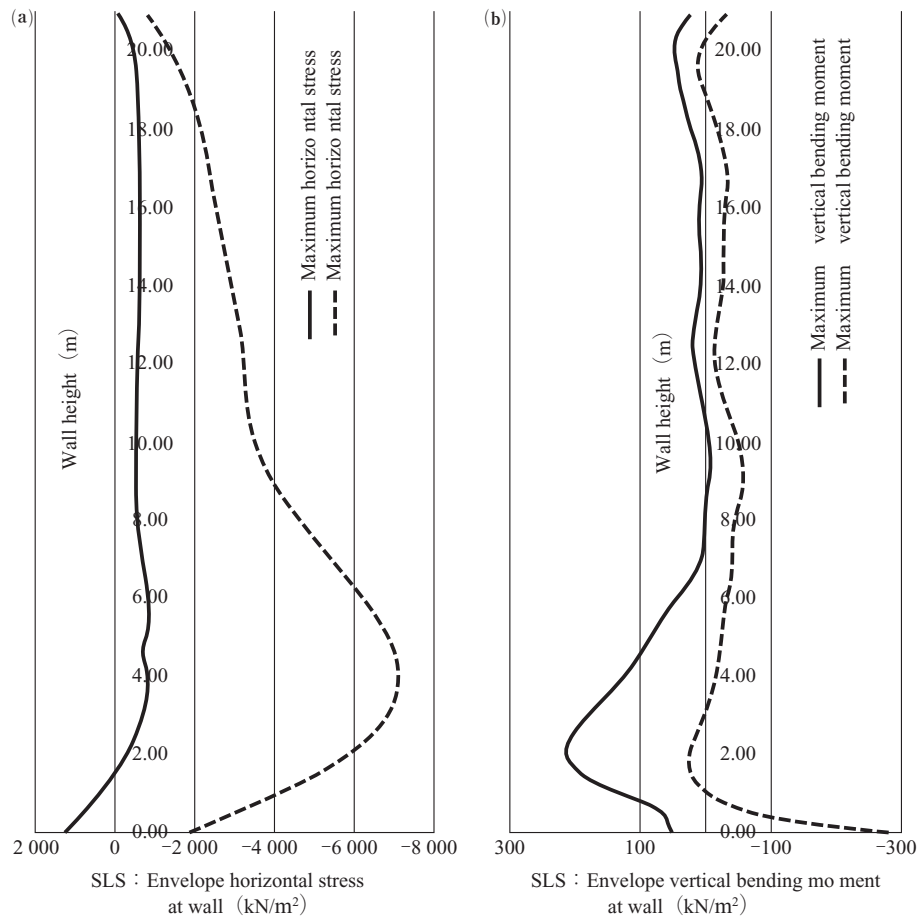


図 - 4 円周方向応力と横方向曲げモーメント

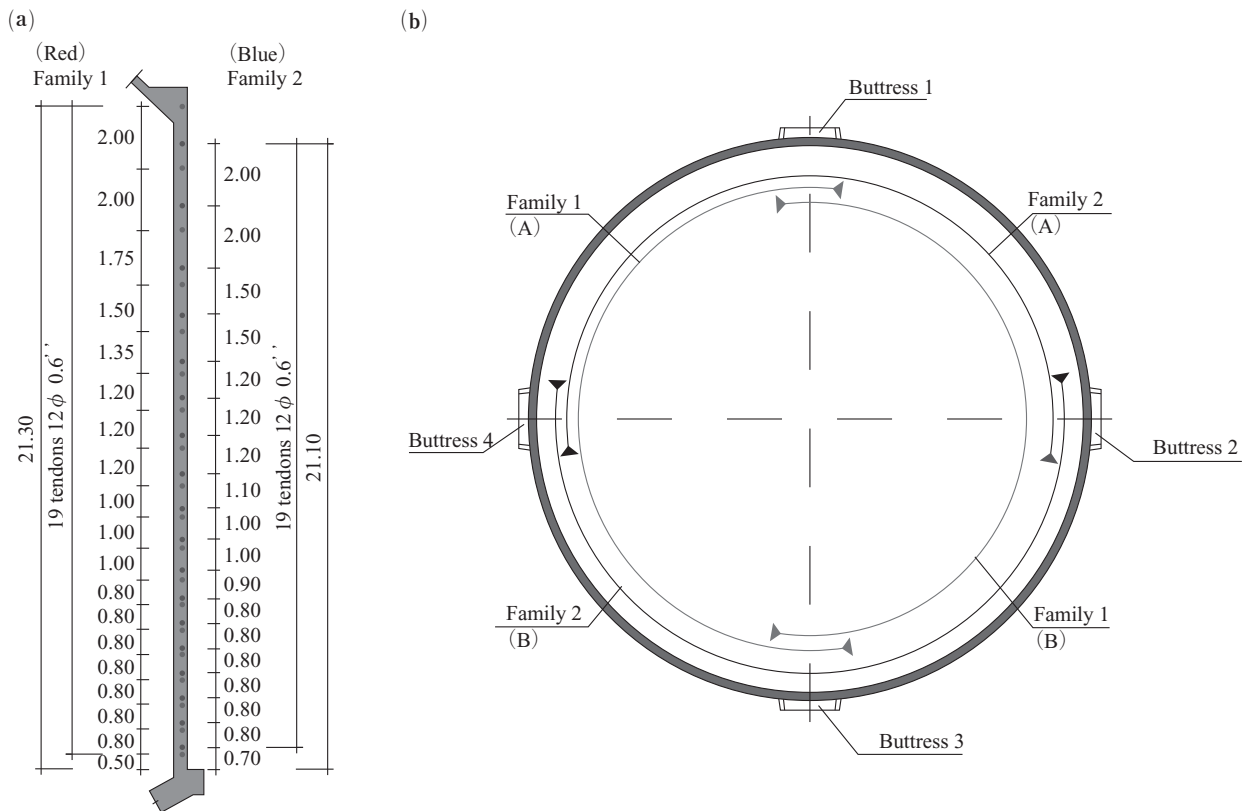


図 - 5 円周方向のポストテンションシステム詳細図, 配置図 (単位 : m)

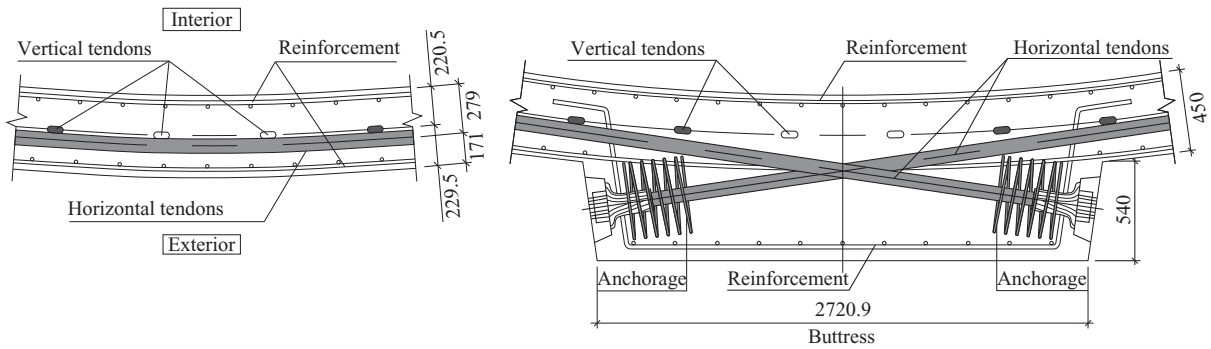


図 - 6 ピラスター詳細図 (単位 : mm)

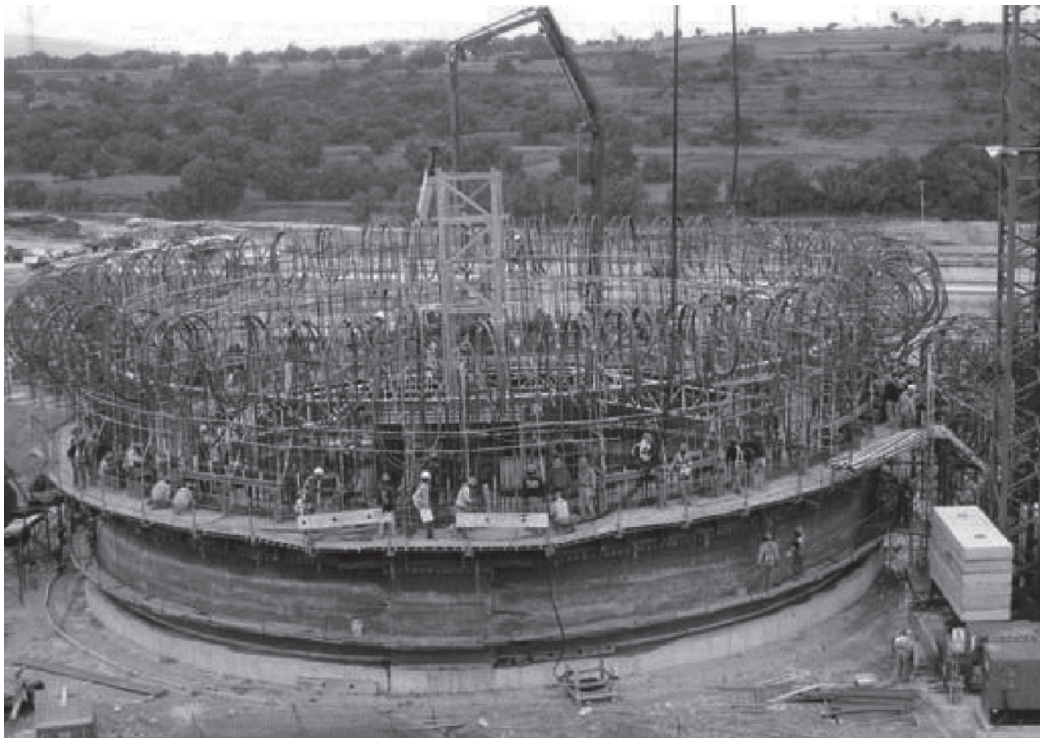


図 - 7 スライディングフォーム工法を使用した側壁の施工

カーを底版に取り付けた。支柱上部から放射状の梁を分離させ、壁のドームリング部を支持させた。これらの放射状の梁を屋根下側の型枠の作業床と支持材として使用した。内部の階段は、屋根から浄化槽への通路として取付けられた。屋根の施工が完成したとき、支柱は屋根の中心部に設計した特殊な開口部から取り除いた。

工期を最小限に短縮するために屋根の外側の型枠を使用するのを避け、いくつかの特殊なコンクリート薬液により屋根が急傾斜でも安定していることを試験した。屋根が完成し、コンクリートが所定の強度に達したとき、PC鋼材の緊張を実施した。まず、鉛直方向のPC鋼材を対称に緊張した。次に、円周方向のPC鋼材を交互に緊張した。また、壁の上側から下側の順に緊張していく。最後に、開口部などに近接する範囲のPC鋼材を緊張した。

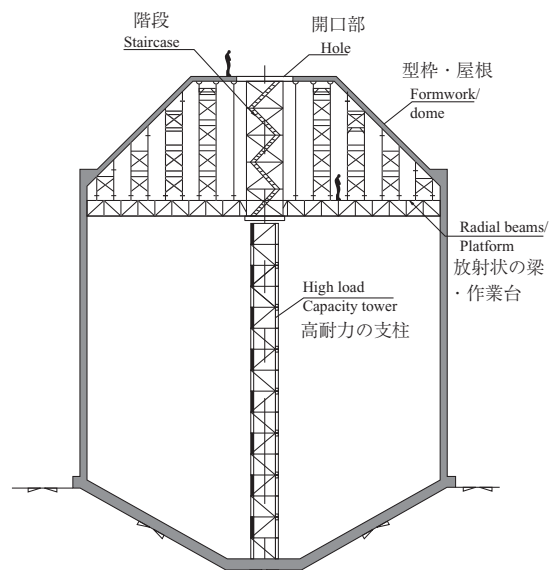


図 - 8 高耐力の支柱

6. 結 論

浄化槽の設計におけるポストテンションシステムの適用により、タンク壁が全設計荷重下で構造の耐用年数中ずっと永続的に水平方向の圧縮状態を確実に維持させている。その結果、漏れの無い構造物を保証することがで

きる。ポストテンションシステムは、多くのピラスターとケーブルが存在し、タンクの建設での使用に適している。また、ポストテンションシステムの適用は、より経済的な壁厚や鉄筋量を可能にし、その結果として建設費の削減や工程短縮を図ることができる（図 - 9）。



図 - 9 建設中の航空写真

This article was first published in English in *Structural Engineering International*, SEI, Vol.25, No.2, IABSE, Zurich, pp.203-207, May 2015.

IABSE: www.iabse.org

* : 会誌編集委員会海外部会委員

秋山 博 (株) 錢高組

横田 剛 (株) ビーエス三菱

三浦 廣高 (鹿島建設 (株))

田原 徹也 (首都高速道路 (株))

田中 慎也 (株) IHI インフラ建設

【2015年8月7日受付】