

水道用PCタンクの新しい形態と技術動向

畑山 義人*1・井手口 哲朗*2

1. 土木のかたち

先人の哲学を学ぶ——。興味の向くまま古い土木施設の姿かたちとその成り立ちを調べていると、大先輩のポリシーとエンジニアリングセンスに触れて感動することがよくある。特にデザインについては、技術の伝承が完璧になされている他の技術分野とは違い、技術思想（景観工学）の源流が高度成長期にいったん途切れているので、過去の蓄積を掘り起こす活動がとても重要なのである。本文では水道用PCタンクをめぐるトピックスとして景観デザインと構造設計技術について述べようと思うのだが、そういうわけで、以前見て感銘を受けたわが国初の本格的な配水塔のことから話を始めたい。

それは東京都水道局駒沢給水所にある。大正12年竣工、当時の渋谷町組合が建設したもので、容量97,852立法尺(2,722 m³)、直高75尺(22.72 m)、直径46尺(13.94 m)2基の堂々たる規模を有し、73年経った今も立派に稼働中である(写真-1)。構造は鉄筋混凝土造(最大厚さ5尺)、壁の内側に厚さ1分の鉄板と厚さ5寸のモルタルが施され、12本の柱形の中には余水吐管が埋め込まれている¹⁾。敷地内に設置されている記念塔によれば、完成直後に関東大震災に遭遇したが被害はなく、構造の優秀さが認められるに至ったとある。当時オフィス街は赤煉瓦から鉄筋コンクリート構造に移行しつつあったが(丸ビルと帝国ホテルが大正12年に竣工し



写真-1 近隣の集合住宅から見た駒沢の配水塔。十分な緑地が緩衝帯となっている。

ている)、表面にタイルや石を貼って見え掛かりを整えるのが一般的であった。しかしこの配水塔はコンクリート打放しであり、モールやコラムの複雑な造形を石ではなくコンクリートで施し、さらに頂部には小ドームや電燈を設けている(写真-2)。その様式は(当時の西洋館がそうであったように)歴史的造形が混在しているが、建築物並みに徹底的に意匠を凝らし、さらに周囲に十分な緑地をとって高木を配し、身だしなみを整えているのである。当時はこんな高さの建造物は珍しく、全方向から眺められることを強く意識したからであろうし、水道という重要なライフラインを象徴する格好のモニュメン



*1 Yoshihito HATAYAMA
清水建設(株)
土木本部設計第一部
景観デザイングループ長



*2 Tetsuro IDEGUCHI
(株)安部工業所
技術本部東京技術部
部長代理

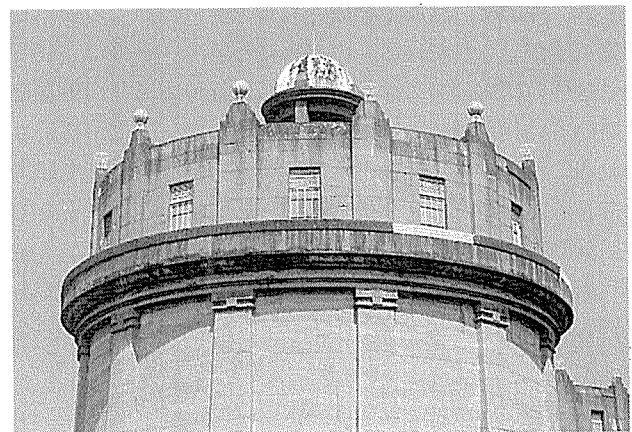


写真-2 監査廊の飾り縁(モール)や柱上部の作り(キャピタル)に注目されたい。



写真-3 1889年(明治24年)に建設されたマンハイムの配水塔。石造りの外殻の中には容量2000 m³の円筒形鋼製タンクが納められている。

トでもあったからだろう。

設計者は全国各地の上水道の創設・拡張に多大な貢献をした中島鋭治博士と、彼の推薦を受けた仲田聰治郎技師である。中島博士が欧米に留学あるいは出張した頃(明治19~23年と明治34~35年)の西欧ではまだ鋼製高架タンクが主流で、RCタンクはやっと現れ始めた頃だった。しかも都市部では鋼やRCの躯体を煉瓦や石材の壁で覆い、窓(もちろん開くはずのない飾り窓)やアーチ、オーダーで装飾して、人が住む建物であるかのようにデザインしていた²⁾(写真-3)。おそらく彼はそれらを手本にして表情豊かな意匠を計画したのだろう。

コンクリートによるこの造形を指して、「当時の建築物や西欧の配水塔と比べて装飾的に今一つだ」などと言うなかれ。タイルや石にまわす資金がなかったので、コンクリートで律儀に「頑張った」のかもしれない。鉄筋コンクリート構造物の創成期にあって、この可塑性の表現力に期待したのかもしれない。いずれにせよ、強い信念がなければできないことなのだから、「よくぞここまで配慮した」とパイオニア・中島博士と仲田技師を讃えたい。『本邦に於ける鉄筋混凝土造「スタンドパイプ」築造の嚆矢』であるだけに、この配水塔は構造設計、施工とも産みの苦しみを味わったと推察されるが、西欧の近代水道の技術を、西欧の景観形成の考え方とともに正しく伝えた記念碑的作品といえるのではないだろうか。

2. PCタンクと景観デザイン

ルーツをたどれば、コンクリートエンジニアとしては誇りに思える遺産に行き着く。コンクリート製の配水塔という「土木のかたち」の原形はこうしてわが国に登場した。

その後、配水塔・高架タンクは鋼製とRC製が、配

水池は半地下式の角型RC水槽が数多く建設されたが、現在はいずれもPCタンクが主流となっている。わが国に初めてPCタンクが誕生(昭和32年)して以来、水密性、経済性、耐久性、維持管理性に優れるPC構造の技術的優位性が次第に認められたのである。と同時に、水道事業数の増大と大型化から、これらの施設が人目に付きやすい立地に次々と建設されるようになった。こうして、次にはタンクの景観デザインが、さらに最近では地球環境保全が俄然問題となってきた。

これらはPCタンクの発展のためにはきれいにクリアしなければならない課題である。特に前者に関しては「景観工学」と「公共施設に相応しいデザイン」に関する理解不足に起因した残念な事例も見られ、今一度「風景の創り方とデザイン手法」を整理する必要性を強く感じるのである。

■景観形成の原則

かつて「機能的なものは美しい」とする機能即美論が存在したが、実際にはそう都合のよいものではない。PCタンクは「地上式の円筒形の躯体にドーム屋根」というスタイルが機能的、経済的に最も有利となるが、合理的に詰めた姿かたちが必ずしも常に美しいとは限らない。特に配水塔や高架タンクは容量や水頭からプロポーションが決められ、立地によっては否応なく風景を切り裂き、人工的なスカイラインをあらわにする。しかも、生活感の希薄な、不気味な風景を創ってしまいがちなので、生活の場に馴染ませるにはデザイン的に相当な工夫を要するのである。

このタンクの宿命は昔から意識され、改善の努力がなされてきたが、その殆どはタンク本体に対する形の工夫であった。しかし、景観的な観点から言えば、それ以前に考慮すべきことがたくさんある。簡単に言うと、タンクのある風景が美しく見える条件を整える作業なのだが、それを橋の景観問題でよく語られる橋梁美学³⁾の手法に倣って説明を試みよう。

第一に、視点と視対象(見る、見られるの関係)、人との近さを熟慮のうえ、まずは周囲の風景に埋没させる方法を検討すべきである。これは山間にタンクのロケーションを設定する、土工や植栽でタンクを覆う、逆に人間の視界を植栽で遮るなどして「存在を感じさせない」手法であり、景観工学的には「消去法」という。この隠蔽主義は広がりのある自然景観の保全を重視する自然公園法のバックボーンでもある。昔の角型RC水槽ならば、地下式であるがゆえに人目に触れにくくかつ環境保全に優れた形態をとることができた(写真-4)。PCタンクとの技術の勝負で淘汰されつつある建造物の方が景観的に優れているというのは何とも皮肉だが、自然環境と隣り合う立地では、消去法が実現できるかどうか

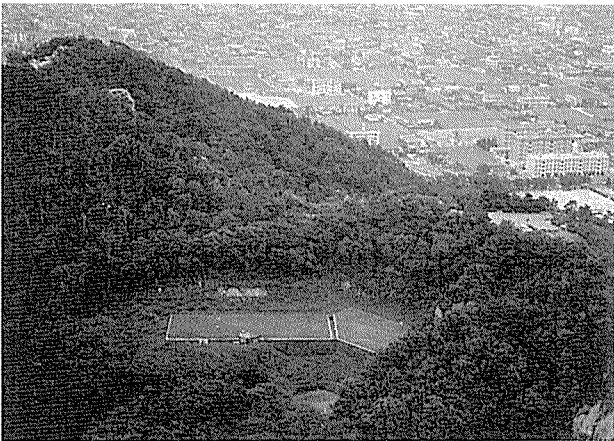


写真-4 山の中腹にある半地下式の角型 RC 水槽。その姿は市街地からは殆ど見えず、また地域の生態系にもやさしい（防府市水道局提供）。



写真-5 小判型の吐水槽。斜面の中腹に半地下構造で納められ、地形、緑環境と見事に調和している。仮にあと3m 地上に現れたとしたら、その存在感は圧倒的なものになっていただろう。

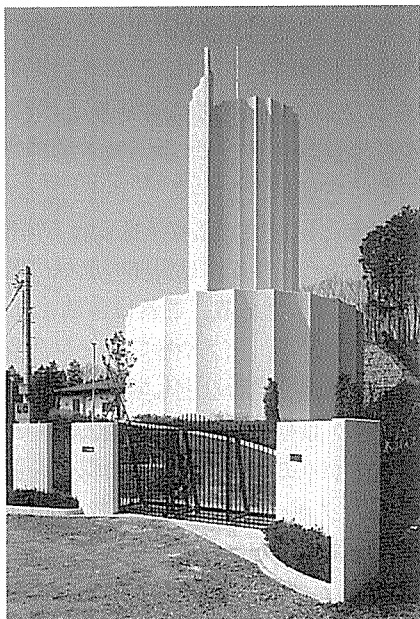


写真-6 壁面を工夫した複合式配水池。露出せざるを得ない場合には、美しい姿を提供するなどして魅力的な新風景を創造しなければならない。

かが景観計画の大きな分かれ目になるのである。

第二に、どうしても姿かたちが露出してしまう場合、形態やスケールを変更し、タンクの存在感を少なくとも周辺景観と同等に近付けるよう工夫する。分割、移設などの大きな手段も視野に入れながら、形態を変えて風景とのバランスを図る手法で、「融和法」という。第一の方法と同様に、本体の形状を変更するだけではなく、土工や植栽をも同時に考慮することが肝要である（写真-5）。

第三に、上記のいずれの方法でもまとまりのある景観が得られない場合に限り、「強調法」を検討する（写真-6）。例えば、周囲の風景が茫洋としていて景観資源的に乏しい場合に、タンクの印象が周囲から際立つようにして全体景観を引き締めるなどの方法がとられる。しかし、タンクのような耐用年数の長い公共施設に対して強調法をとることは、本来は冒険なのだと考えておいた方がよい。景観は時代とともに変遷してゆくものであり、将来の土地利用計画などを正確に把握できるのでなければ、そして余程「力のあるデザイン」を提供できなければ、安易に採用すべきではない。

以上のように、PC タンクは他の公共土木施設と同様に、形を決める以前に「どのように見えるか、どのように見せるか」を周到に計画し、景観のデザイン（風景のデザインと読み替えても大きな違いはないが）を完了しておかなければならない。しかる後に、そのデザインコンセプトに則して敷地全体の諸施設のデザイン（タンクを含めた種々の構造物、アースワーク＝造成、造園など）を同時進行で考えてゆくのである（図-1）。

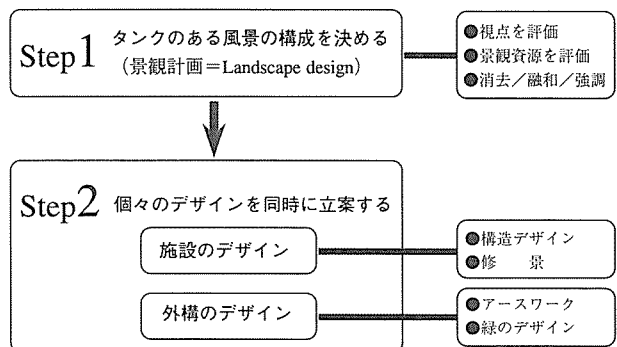


図-1 PC タンクの景観デザインの流れ

■デザイン展開のために

さて、いよいよ本体のデザインを論じる番になった。まずは対象物を観察し、料理方法を整理しておこう。
●デザイン要素：タンクという構造物の「美」に関わる要素を図-2 に列挙した。私たちは優れたデザインを生み出すためにこれらの要素を慎重に組み合わせていく。タンクに限ったことではないが、このうち「形態」こそが美的印象を支配すると言っても過言ではない。「規

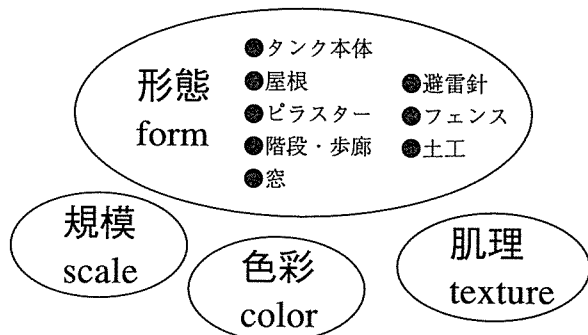


図-2 PCタンクのデザイン要素

「模」は形と機能の検討から決定づけられ、「肌理」(きめ;テクスチャ)と「色彩」は、形の特徴、あるいは力の流れをより効果的に表現する役割を担う。つまり、テクスチャと色は減多にその作品の主題になることはなく、デザインの狙いどころはやはり造形なのである。

●形を決める論理：形態は機能によってもたらされるものだが、美的価値を追及する論理や機能以外の要請から、構造的な必然によらずに決定されることもある。その、非主構造部材を付加したり、景観阻害要因を取り除くことで景観を整える意匠のあり方を「修景」と呼ぶ。ピラスターを延ばしてユニークなシルエットを獲得する、壁にコラムや回廊を設ける、タイルを貼る、樹木を配するのは修景である(写真-1, 3, 6)。写真-7では階段を壁で覆って卵形の断面とし、見る方角によって変化する表情を獲得した。展望台などの機能を付加する場合(写真-8)も、大きな構造変更が伴うとはいえデザイン的な論理としては修景の範疇に入る。



写真-8 公園内にある展望施設を有する配水池。

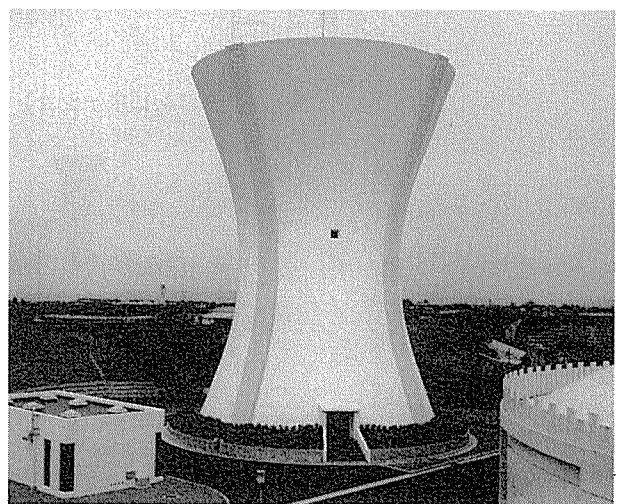


写真-9 双曲面 PCタンク。この形態の設計・施工技術こそ、近未来における PC タンクのデザイン的な発展の鍵となるだろう。

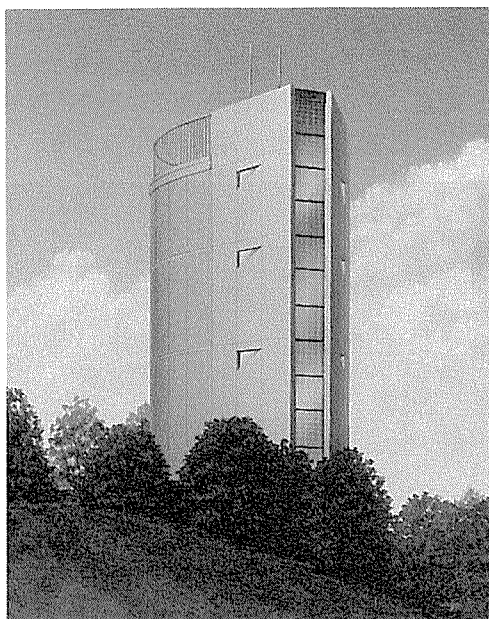


写真-7 大規模な宅地造成地の公園の一角に設けられた高架水槽。住宅に囲まれることを意識し、窓と明かりで生活感を備えた。

一方、あくまでも構造を造形の出発点とし、構造の形そのものに美的表現力をもたせようという立場に立脚する意匠のあり方を「構造デザイン」という(写真-9)。

修景は違和感の生じにくい日常的な意匠に、そして構造デザインは装飾を排したことによる透明感(シンプルで純粋なイメージ)と緊張感を伴う意匠になりやすい。どちらがよいかという問題ではない。いずれも美的表現力は無限にあり、その効果は計画者の力量によって決まる。

●基本的な形態：飲み物の器のデザインは多種多様だが、カップ、コップ、ジョッキ、ボトルなどに分類すれば、デザインの類型化とバリエーションの考案がしやすくなる。これと同様に、上水用 PC タンクの基本形態を整理しておくことはデザインの発想にきっと役立つだろう。ということで、図-3を作成してみた。実は、形を決める論理にはまだ「関係のデザイン」やら「空間デザイン」やらがあって、隣り合う構造物どうしの連携の仕方によって生まれる妙味(対立, 対比, 独立, 融合, 調

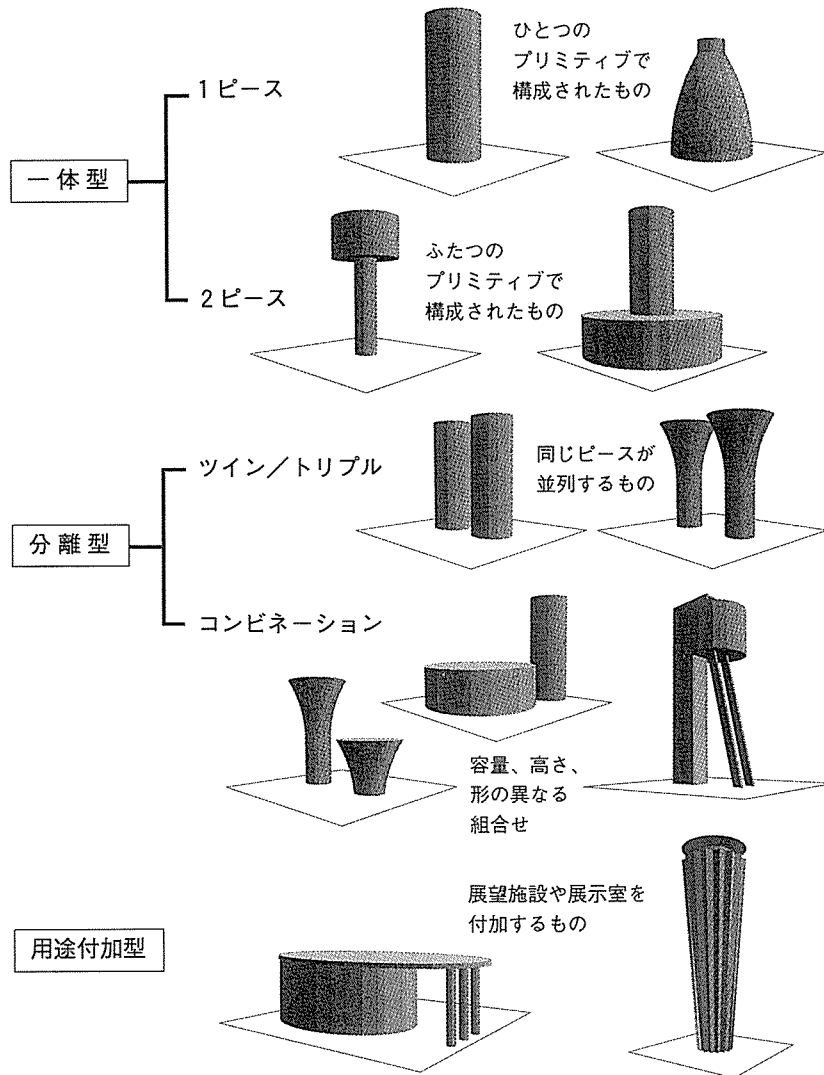


図-3 上水用 PC タンクの基本形態

和……) や切り出された空間の妙味を美的表現に変換できる可能性がたくさん残されている (これは建築群とその内部のスペースを計画する建築家には当たり前の論理である)。PC タンクの景観計画では、そこまで目配りしなければならないのである。

■最近の構造デザイン事例

近年の構造デザイン思潮は、饒舌になりがちなポストモダンの反省から生まれた。しかしこれは以前のモダニズムとも一線を画しており、カラトラバの橋梁作品に代表されるように、必ずしも構造力学的な合理性を第一義とせず、力の流れの視覚化によって構造美を追求するという傾向がある。しかも構造物単独ではなく、周辺環境をも巻き込んだデザインを目指す。もちろん構造の遊びによって機能性、安全性、経済性、維持管理性などが損なわれては本末転倒であるが、構造の冒険を恐れず、現在の材料、設計、施工技術に根差した新しい形態が次々と誕生することは大変好ましい。

PC タンクにおいても、構造による美的表現を中心に

据えた計画がなされるようになってきた。例えば円錐台形状 (ここではプリン型と呼ぶ) のタンクと公園との組合せ (写真-10)、逆円錐台形状 (ここではコップ型と呼ぶ) と小広場の組合せ (写真-11) などで、いずれも

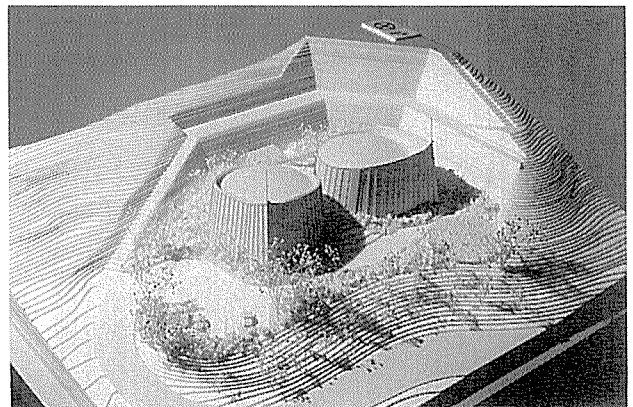


写真-10 公園と一体となった配水池。市街地からの遠景、周囲の散策路からの中近景に配慮し、独創的な形態が求められた。このようなロケーションでは、ランドスケープ計画が極めて重要となる。

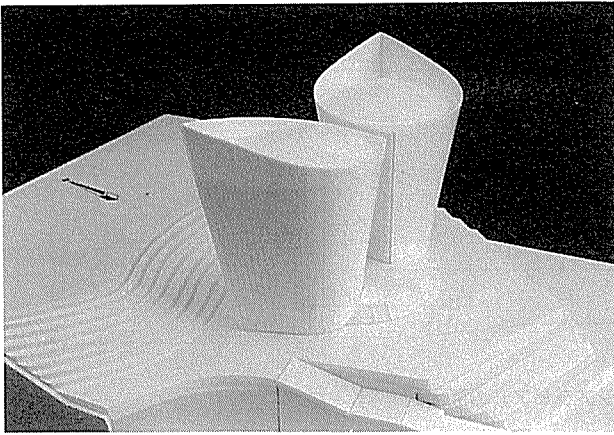


写真-11 山の稜線に位置するため、この姿は数10 km先からも見える。配管と階段を壁で覆い、ユニークなシルエットを得ようとした。計画案。

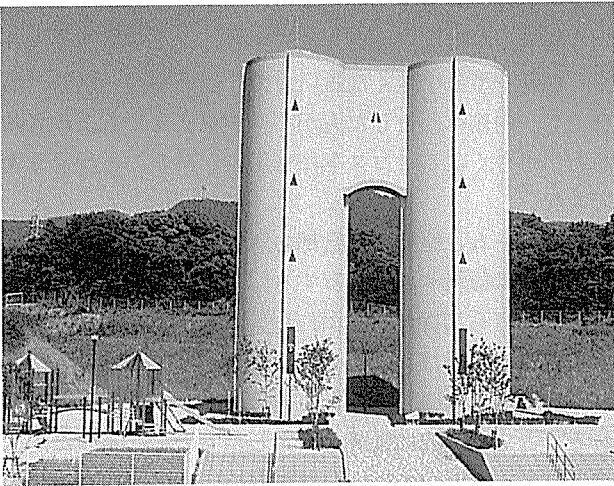


写真-12 連結して耐震効果を増す——維持管理性とデザイン性に優れるツインタイプに、新たな魅力が加わった。



写真-13 このフォルムはリフトアップ機構とセットで計画された。構造デザインは正にエンジニアの仕事である。

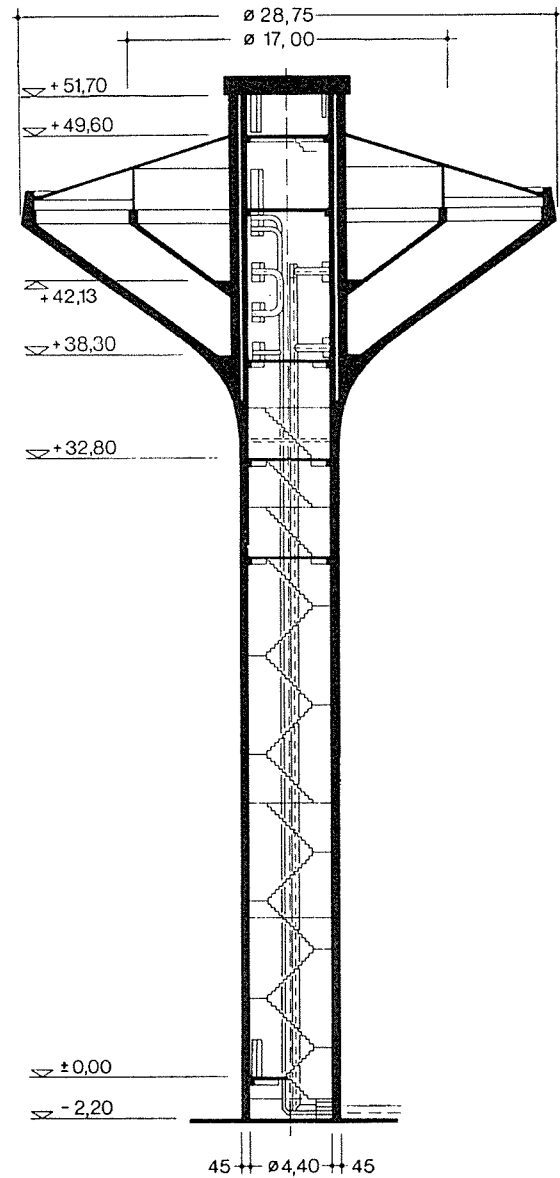


図-4 リヒトシード高架水槽（ドイツ）の断面図

風景とのバランスを意識しながら地形や施設との納まりを図り、PCの特質を遺憾なく発揮したうえで魅力ある景観を提供しようというものである。また、維持管理上有利な二重タンクや隔壁付きタンクを一步進めて2池に完全分離させ、その相互関係をデザインする例（写真-12）も現れた。このように上部を連結することで耐震性が高まるという報告もある¹⁾。

海外ではリフトアップ工法で施工された高架水槽（図-4、写真-13）、大規模な吊り屋根構造を有する容量1 000 000 m³の貯水池（図-5、写真-14）が建設されている。わが国ですぐに適用できるとは限らないが、新しい施工システム、あるいはタンク以外の構造技術とリンクすることで新形態の生まれる可能性がグンと広がってゆくことがみてとれる。

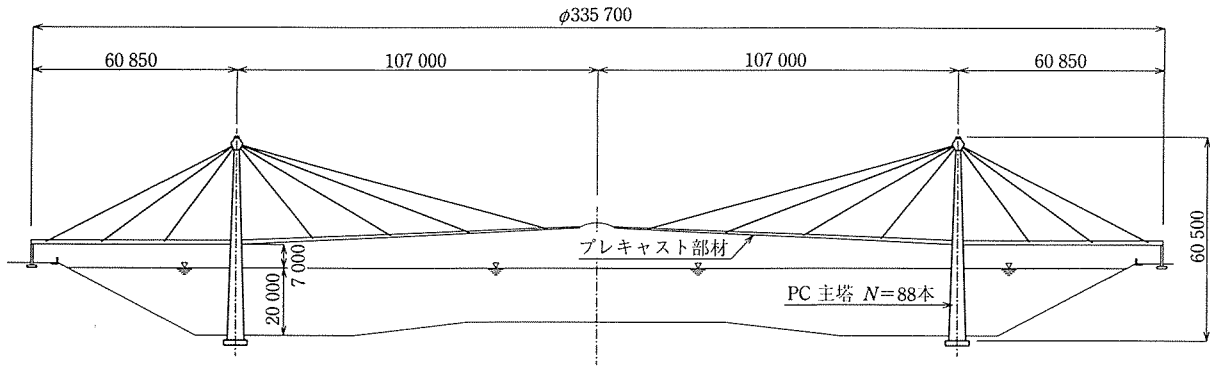


図-5 Muna 貯水池（サウジアラビア）の断面図

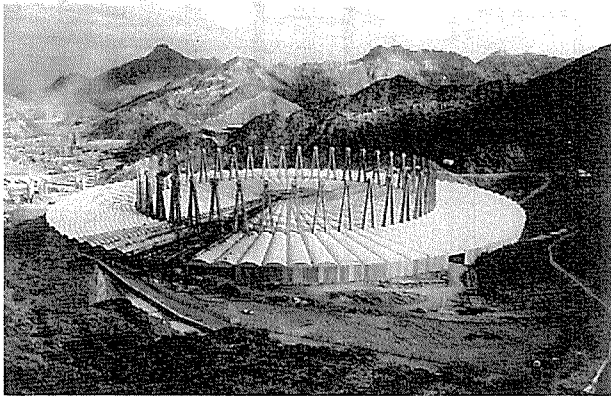


写真-14 プレキャスト部材による吊り屋根は蒸発と汚染を避けるために設けられた。アイデアとは既存の要素の新しい組合せ（J. W. Young）——橋梁技術、ダム技術とのリンクによって新形態が誕生した。

3. 構造設計技術をめぐる話題

このように多様な形態が実現する背景には、確かな構造設計技術が控えていることは言うまでもない。デザインは、しばしば機能性や経済性を向上させようとする発想とは異なる技術的解決を要請し、結果として研究・開発を刺激する。また、コンピュータの発達により構造解析に要する時間が減少し、設計活動の流れも変わりつつある。そして、兵庫県南部地震を契機とした耐震設計に関する考え方の動向にも注目の集まる場所である。

ここでは、このような最近の構造設計技術に関する動向をまとめよう。

■コップ型とプリン型

基本的な直立円筒形タンクに「修景」を施すまでは円筒シェル理論により比較的容易に解析解を導き出すことができる。しかし、写真-10, 11 で紹介したコップ型やプリン型の例のように構造部材としての側壁が傾斜した場合、あるいは写真-9 の例のように曲線部を持つ場合などは、円周方向の剛性をバネで評価したフレーム解析^{5), 6)}や薄肉シェル要素を用いた軸対称シェル有限要素法を用いる必要がある。また、直立円筒型の時には水

圧に見合うプレストレスを導入すればよいのに対し（荷重バランス）、このような傾斜壁の場合には、水圧とプレストレスの作用方向が異なるために、いわゆる応力バランス的な考え方を必要とする。水圧により壁部に発生する断面力を直立円筒型と比較すると、コップ型は大きく、プリン型は小さくなる。また、曲面を持つ側壁の場合でも、内側へ凸とした方が、外側へ凸とするよりも断面力が小さくなる。コストにも影響があることは言うまでもない。

■水底ドームと側壁の結合部の解析

前項では傾斜や曲面を有する配水塔の解析について述べたが、さらに図-6 に示すように枝分かれ部を有する高架水槽の場合は、より高度な解析技術を要する。つまり、側壁部と水底ドームとの結合部にプレストレスを入れることで構造的には最も安定したものとなるのだが、構造設計にあたっては枝分かれ部の応力度分布を適切に評価する必要がある⁷⁾。

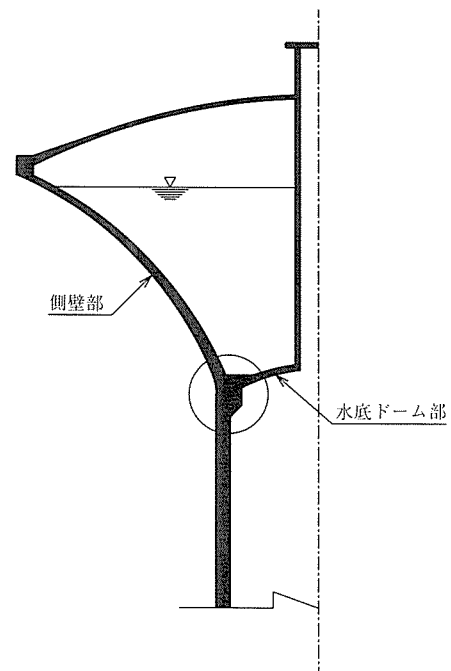


図-6 解析がやや複雑な側壁と水底ドームとの接合部の例

■偏荷重

土工のデザインによって偏土圧が作用する場合や、局部的に水平荷重を受けるケースでは、軸対称回転体モデルに荷重をフーリエ展開することで解析が可能であるが、タンクに梁や柱などが複雑に絡んでくるような場合には、三次元解析による手法も検討しなければならない。

■ピラスターの処理

ピラスターは壁の外側に設けるのが一般的だが、デザイン的には内側に納めたい場合もある。例えば、前述の写真-9のように構造デザインとしてその曲線美を表現するケースでは、いままで一つのアクセントとして利用してきたピラスターを内側へ設け、なだらかな曲面をさらに強調させるという手法が考えられる⁸⁾。そのためにはPC鋼材を急激に内側へ曲げぬようディテールを工夫し、かつ定着部を確実に保護する高度な防蝕技術（例えばFRPライニングなど）を必要とする。

■耐震設計

兵庫県南部地震を契機として大きな話題となっている耐震設計に関しては、土木学会「コンクリート標準示方書」をはじめあらゆる分野でその規準の大改訂がなされている。水道用PCタンクに関しては、耐震設計を含む規準類として(社)日本水道協会「水道施設耐震工法指針・解説(1979年度版)」や「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書(昭和55年3月)」などがあるが、現在これらについても改訂に向けての作業が行われていると聞いている。

しかしながら、現行の指針や規準に基づいて設計を行うと、ほとんどの場合、基礎構造を除くタンク本体については常時の状態で断面や鋼材量が決定されていることや、兵庫県南部地震での調査報告⁹⁾によると、調査対象物件数225件のうち構造体への損傷なしが223件と圧倒的にPCタンクの耐震性能の大きさを示す結果となったことなどから、地震動の大きさに比較的敏感な配水塔タイプや背の高い高架水槽タイプなどを除いては断面や鋼材量の増加はほとんどないものと予想される。

とはいうものの、耐震設計の目的が、強い地震動を受けても構造物の壊滅的な損傷を防ぐための方策をたてることであるからには、土木学会で新しく制定された「耐震設計編」で提示されているレベル2地震動(構造物の耐用期間内に発生する確率の極めて小さい強い地震動)に対する照査は必至であり、その場合、ライフラインとしての位置づけにある水道用PCタンクの保有耐震性能をどの程度に想定するかが議論となるところであろう。兵庫県南部地震で大きな耐震性能を発揮したPCタンクをレベル2地震動に対して現行の弾性域で抵抗させるのは困難なのか、また、ひびわれが発生した後の塑性変形領域で崩壊せずにどのくらい変形を吸収できるかなど、部材の非線形特性を考慮した検討やこれらを設計法としてどのように一般化するかなどの検討が急務となるところである。

4. 未来に向けて

ひとことで言うと、現代社会は、公共土木施設に対して環境保全と景観整備をセットで解決し、かつ耐震性を向上させることを要請している。今後は自然環境地域の開発を避け、土地の高度利用にますます拍車がかかるだろうし、立地が生活の場に近づくからには景観デザインや耐震性能への要求も強くなるだろう。加えて、全国の自治体の水道事業からみると、社会資本整備に資本投下できない「社会福祉の時代=高齢化社会」が到来する前に、現在の平均10~12時間分の貯留確保体制を欧米並みの72時間体制に引き上げたいという事情がある。つまり、ニーズは大きいですが、計画は難しいという事態。PCタンクもいま転換期を迎えているような気がする。

それを視野に入れると、近未来(およそ20年後)の上水用PCタンクはどうなっているだろうか。おそらく、敷地や維持管理の制約から楕円柱、重複円型などの自由な形態が増えているに違いない(構造デザイン=図-7)。敷地を公園風にして開放する例も多くなるだろう。また、複合タンクの需要に合わせ、タンクを分離して周囲の施設、自然環境との関係をデザインする(=関

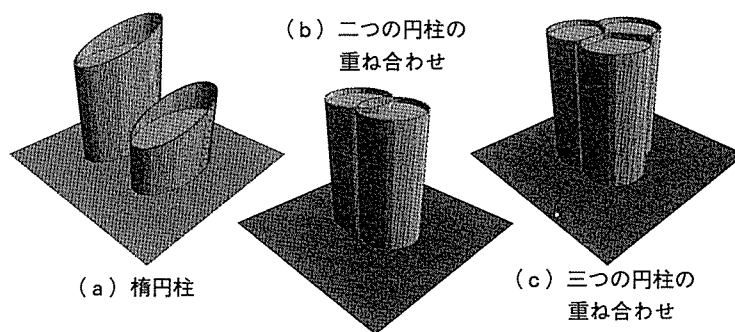
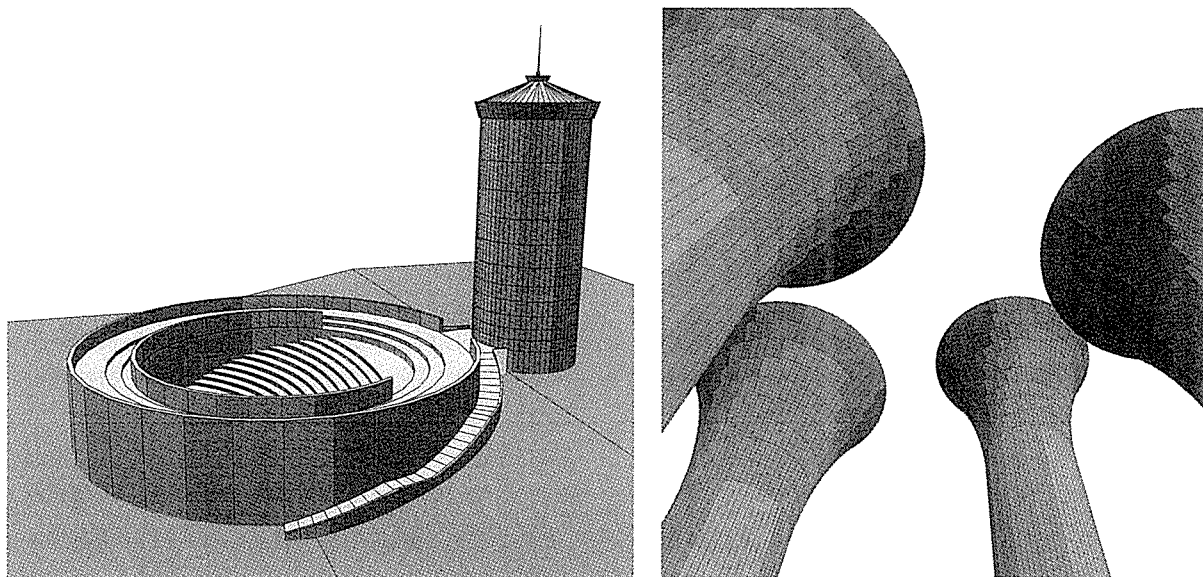


図-7 新構造への挑戦



(a) 低区タンクをドーナツ状にし、多目的空間を創出

(b) タンク群により緩やかに遮断された空間を創出

図-8 より多彩な空間設計へ

係のデザイン)、タンクにより閉ざされた空間を創る(=空間デザイン)などの考え方が発展しているだろう(図-8)。さらに、(今でも例があるが)展望施設などの付加価値をつけて、用途を拡げているかもしれない。

構造技術の面では、可使用時間が非常に長くて精度の良いアフターボンドケーブルが開発されてタンクにも応用されているかもしれない。また、経済性や地震のじん性を高めることができれば新素材を用いた外ケーブル(外巻き)方式も可能となるであろうし、これからの労務者事情を考慮すればプレキャストタンクもより一層の普及と大型化が進んでいるだろう。

心しておかなければならない。その推進者は私たち現代の技術者なのである。

『近未来(およそ20年後)のPCタンクを視野に入れ、新しい形態を生み出し、あるいは新しい用途を拡げるきっかけとなる新鮮な情報を提供する』というのが小文に課せられた使命であった。すでにPC円形構造物を概観した文献¹⁰⁾、水道用PCタンクの造形に関する文献¹¹⁾があるので、ここでは人目に付きやすい水道用の配水塔および高架タンクに限定し、主として景観デザインと構造設計技術に関する動向を紹介した。アイデアレベルの提案もあって実用性はまちまちだが、読者の発想の契機となればよいと考え、思い切って示したものである。

駒沢の配水塔からは、中島博士らの精神と真摯な設計態度を学び取りたい。そして、当時よりも豊かで、技術的にも様々なメニューを持っている現代の私たちは、今

までの技術的蓄積を継承し、発展させる義務があることを確認しておきたい。私たちは現在も未来も、その時代の技術を駆使し、駒沢の配水塔がそうであったように「時代を映す作品」を遺していかなければならないのである。

参 考 文 献

- 1) 中島博士記念事業会編：日本水道史，工政会出版部，1927年
- 2) Bernd und Hilla Becher：WASSERTÜRME，Schirmer/Mosel (München)，1988
- 3) 加藤誠平：橋梁美学，山海堂，1936
- 4) 中村秀明，浜田純夫，三浦房紀，森川慎吾：卵形タンクの振動制御に関する研究，土木学会第44回年次学術講演会，1989
- 5) M. J. N. Priestley：Analysis and Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks，PCI JOURNAL，July-August，1985
- 6) 近藤富男，井手口哲朗，西ドイツにおけるPC卵形消化槽の設計・施工，プレストレストコンクリート，Vol. 26，No. 5，1984
- 7) 尾坂芳夫，秋田宏：PCタンク設計計算上の問題点，コンクリート工学，Vol. 25，No. 6，1987
- 8) 三浦昭爾，田中徹哉，村上洋二：双曲面PC2階層式水槽の設計と情報化施工，コンクリート工学，Vol. 24，No. 10，1986
- 9) 兵庫県南部地震PC構造物震害調査報告書，(社)プレストレストコンクリート技術協会，1995. 4
- 10) 池田尚治：PC円形構造物の現況，最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み，PC技術協会，1980. 6
- 11) 木下謙介：PCタンクの造形と意匠，プレストレストコンクリート，Vol. 24，No. 2，1982

【1996年10月11日受付】