

2階層式大型 PC 双曲面水槽の設計・施工

樋	口	元	一*
三	浦	昭	爾**
八	木	貞	樹***
田	中	徹	哉†
村	上	洋	二††

1. まえがき

近年、構造物の建設に際して、その必要とされる機能に加えて、周辺地域への景観上の配慮や周辺住民に対する環境面あるいは精神面への影響といった点にも重点を置いた設計が要求されつつある。

昨年初め、大阪府箕面市において、総容量 6 000 m³ (高区 2 000 m³, 低区 4 000 m³) の水槽の建設計画に当たり、機能性、経済性および耐久性等のほかに、建設場所の立地条件や周辺景観に対して調和のとれた、また周辺住民への種々の影響等へも配慮を行った特色ある水槽を提案する設計競技が計画された。そして、水槽建設に対して十分な実績と技術力を有する建設業者間で、公共土木工事では全国的にほとんど例をみない設計競技が行われた。

審査の結果、上記設計競技の目的によく合致した優れた作品として今回報告する水槽が採用された。

ここでは、主に PC 側壁に関する設計および施工について報告するものである。

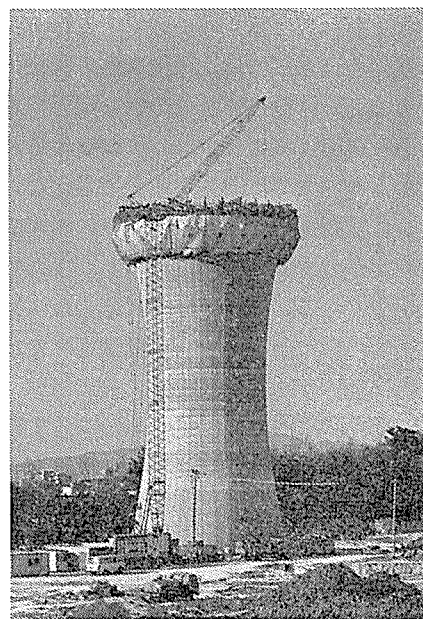


写真-1 施工中の双曲面水槽

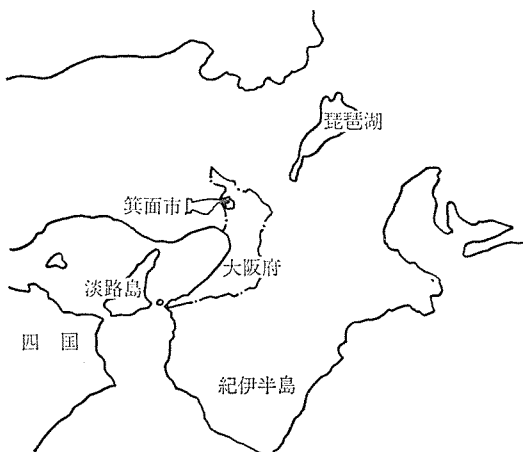


図-1 建設位置図

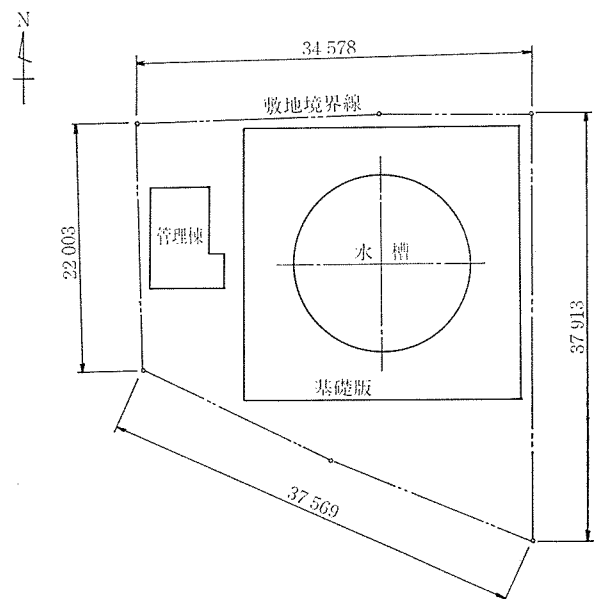


図-2 平面位置図

- * (株) 大林組本店建築設計第 4 部部長
- ** (株) 大林組本店土木第 1 部設計課長
- *** (株) 大林組本店建築設計第 4 部課長代理
- † (株) 大林組本店土木第 1 部設計課長代理
- †† (株) 大林組本店土木第 1 部設計課

2. 設 計

2.1 設計概要

本水槽は、周辺環境に適合した景観であることに重点が置かれていることから、外観形状について種々のタイプの水槽をデザインし、景観上、どのような外観が最も周辺環境に適合するかに着目して、十分な比較検討を実施し、最適な外観形状の選定を行った。

なお、外観形状の検討には、(株)大林組所有の景観図作成プログラム「LAND PERS」を駆使し、あらゆる方向からの景観評価を実施した。

同時に、日影の影響についても、日影図作成プログラム「PLAN GO」にて検討し、周辺宅地への影響が少ないことを確認した。

最適な外観形状の選定後、日本建築学会「容器構造設計指針案・同解説」に準拠して、構造各部の設計を行った。

なお、この指針に記載されていない事項については、以下に示す規準、指針等を準用した。

日本建築学会 「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」

日本建築学会 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

日本建築学会 「建築基礎構造設計規準・同解説」

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標準仕様書」

日本水道協会 「水道施設耐震工法指針・解説」

構造部材の安全性の検定は、部材応力度が許容値以下に収まるようにする許容応力度法によって行った。

側壁に使用した材料の仕様および許容応力度を表一に、実施した設計フローを図一に示す。

2.2 外観基本形状の選定

周辺景観との調和および周辺住民への種々の影響に重点を置いた水槽の外観形状の選定には、立地条件が大きな影響因子となる。

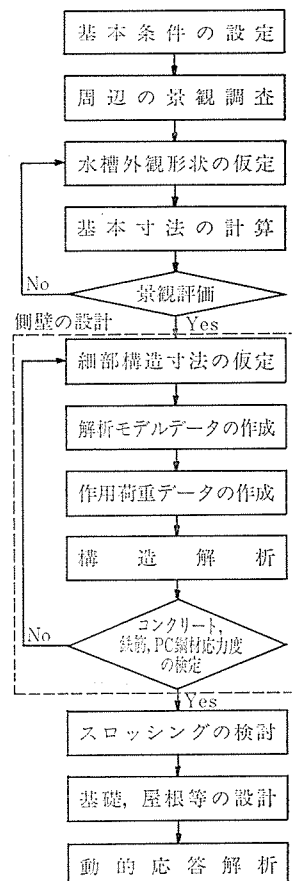
水槽が建設される場所は、計画戸数500戸のニュータウン造りが進められている丘陵地の高台部に位置している。

水槽前面には、将来道路を隔ててすぐに宅地が広がる。また、ニュータウンの隣接地には、豊かな自然林の都市緑地が広がり、水槽の両側部分にも緑地が造成される計画で、周辺は緑豊かな環境と言える。

このような立地条件ならびに水槽が機能上、相当高い構造物になるものと想定されることから、次のような点に目標を置いて、外観形状の比較検討を行った。

○ニュータウンの中にあつて、あるいは緑地を背景として、水槽の存在が違和感を与えず、調和した景観を呈するような外観形状

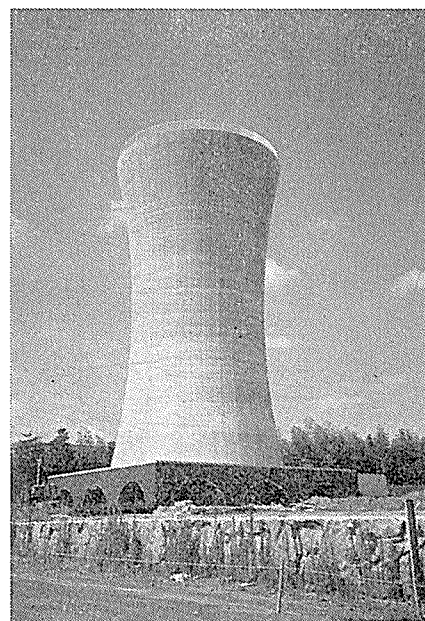
○ニュータウンや周辺地域のシンボリック的存在となり、ランドマークになるものと考えられるので、シンブルで飽きのこない外観形状



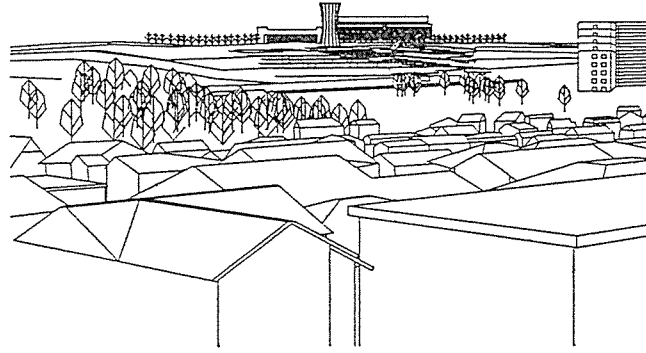
図一 設計フロー

表一 材料の仕様および許容応力度

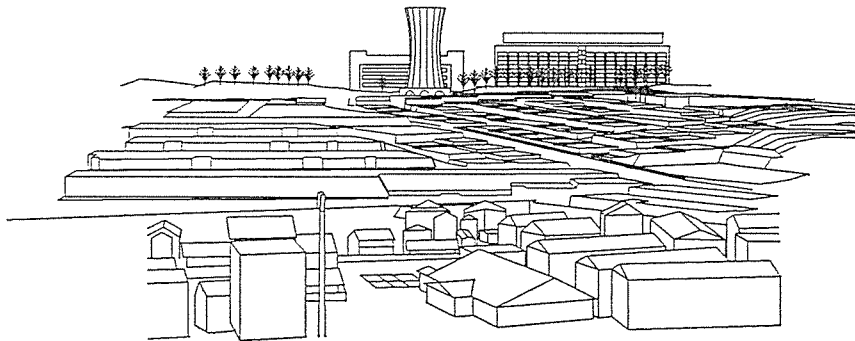
材 料 名	仕 様	許容応力度区分	プレストレス導入直後	通常時		地震時	
				通常時	地震時	通常時	地震時
コンクリート	$F_c=350 \text{ kg/cm}^2$	圧縮応力度	kg/cm ²	157.0	116.0	233.0	
		引張応力度	kg/cm ²	17.4	11.6	23.3	
		せん断応力度	kg/cm ²	—	8.5	12.75	
		付着応力度	kg/cm ²	—	18.3	27.4	
PC鋼材	1 T 21.8	SWPR 19	引張応力度	kg/mm ²	129.0	—	—
	φ 32	SBPR 95/110	引張応力度	kg/mm ²	76.0	—	—
鉄 筋	SD 35	引張応力度	kg/cm ²	—	2 200	3 500	
		せん断応力度	kg/cm ²	—	2 000	3 000	



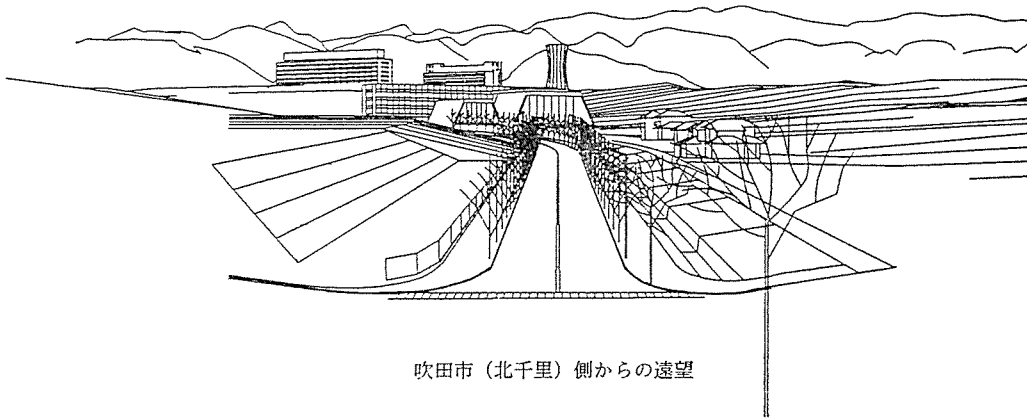
写真一 完成



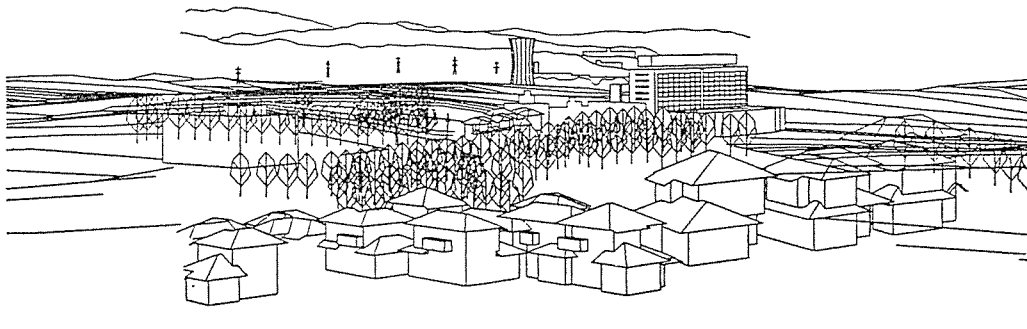
箕面市側からの遠望



箕面市側からの遠望（水槽前面が現在宅地開発中）



吹田市（北千里）側からの遠望



吹田市（青山台）側からの遠望

図-4 景観図作成プログラム「LAND PERS」による景観評価

○周辺住民に対して、圧迫感、威圧感を与えない。また日照および電波に対して、障害を起しにくい外觀形状

比較検討の結果、写真-2 に示すように、高区と低区の水槽を一体構造とし、側壁の鉛直面に双曲線を用いて、中央部分を細く絞った鼓型とすることによって、全体に柔らかみを持たせた外觀形状を選定することにした。

さらに、足元にはヒューマンスケールに合わせたモダンなアーチとタイル壁面を有する飾り壁を配し、その上部には、植樹して周辺との調和を図った。

また、昇降設備や PC 鋼材を定着するピラスターを内部に設置するなど、デザイン上の配慮を行った。

2.3 PC 側壁の設計

(1) 作用荷重の種類と組合せ

PC 側壁は、高区と低区とに分かれた2階層式であるため、① 高区低区ともに満水、② 高区空で低区満水、③ 高区満水で低区空、④ 高区低区ともに空の4通りの状態に対して、通常時および地震時における安全性が十分確保されるように設計を行った。

荷重の種類および組合せを表-2 に示す。

(2) 構造

側壁は、高さ方向に径が漸次変化する、2方向に曲面を持った PC 壁で、鉛直曲面の曲率半径は 72 m、上下端部は、225/1 000 の勾配を持つ直線とした。

切断面の内径および壁厚は、下端部分でそれぞれ 18.6 m、70 cm、最も径の小さい中間部で 13.5 m、45 cm、上端部で 18.2 m、35 cm である。

側壁の全高さは、基礎版より 39.6 m で、基礎版より 25.5 m の位置に中床版を支持する幅 30 cm の支承部がある。側壁の内側には、円周方向 PC ケーブルを定着するための厚さ 25 cm、幅 1.3 m のピラスターが4か所設けられている。

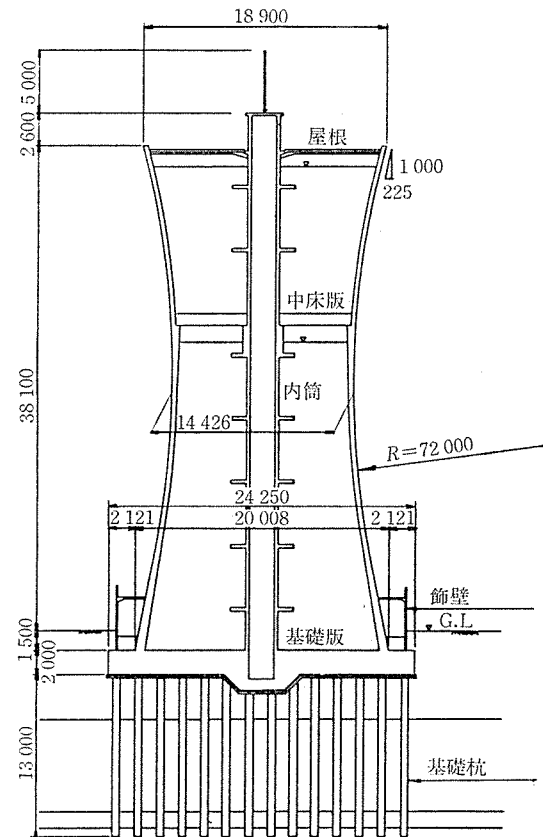


図-5 構造図

表-2 荷重の種類および組合せ

		プレストレス 導入直後	通常時					地震荷重作用時				温度荷重作用時		風荷重 作用時
内容水の有無	高区	空	満水	満水	空	空	満水	満水	空	空	満水	空	満水	
	低区	空	満水	空	満水	空	満水	空	満水	空	満水	空	満水	
荷重組合せ番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
自重		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
積載荷重			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
導入直後プレストレス		○												
有効プレストレス			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
高区静水圧			○	○			○	○			○		○	
低区静水圧			○		○		○		○		○		○	
コンクリートの クリープ乾燥収縮			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
温度											○	○		
地震時慣性力							○	○	○	○				
高区地震時動水圧							○	○						
低区地震時動水圧							○		○					
風荷重													○	

◇工事報告◇

側壁と基礎版は、水密性および耐震性の面から剛結構造を採用し、中床版とは単純支持接合、屋根部とは側壁

の変形が拘束されないように、ヒンジ接合とした。

(3) プレストレス

a) 円周方向プレストレス

円周方向には、内容水による水圧によって、側壁にフープテンションが作用するため、これに対応して円周方向にプレストレスを導入した。

プレストレス量としては、通常時満水状態で円周方向残留圧縮応力度が約 10 kg/cm^2 となるようにプレストレスを与えた。

PC ケーブルは、1 T 21.8 を使用し、これを 157 段配置した。定着方式は、SM 工法による。

円周方向の PC ケーブルの配置を図-6 に示す。

b) 鉛直方向プレストレス

側壁下端が剛結構造であるため、円周方向のプレストレス導入により、側壁の鉛直方向に曲げモーメントが発生する。

これに対処するため、PC 鋼棒 $\phi 32$ を 178 本基礎版から 10 m の高さまで配置し、鉛直方向にプレストレスを導入した。

(4) 構造解析

側壁の構造解析は、側壁が 2 方向に曲面を持つシェル構造であることから、有限要素法による数値解析を行った。

解析は、作用荷重毎に行い、荷重組合せに従って発生応力度および断面力を算出した。

参考に、通常時の各々の状態における円周方向の応力度分布を図-7 に示す。

(5) 地震時の安全性の検定

側壁各部の地震時設計せん断力は、「容器構造設計指針案・同解説」に従って、修正震度法の手法により算出

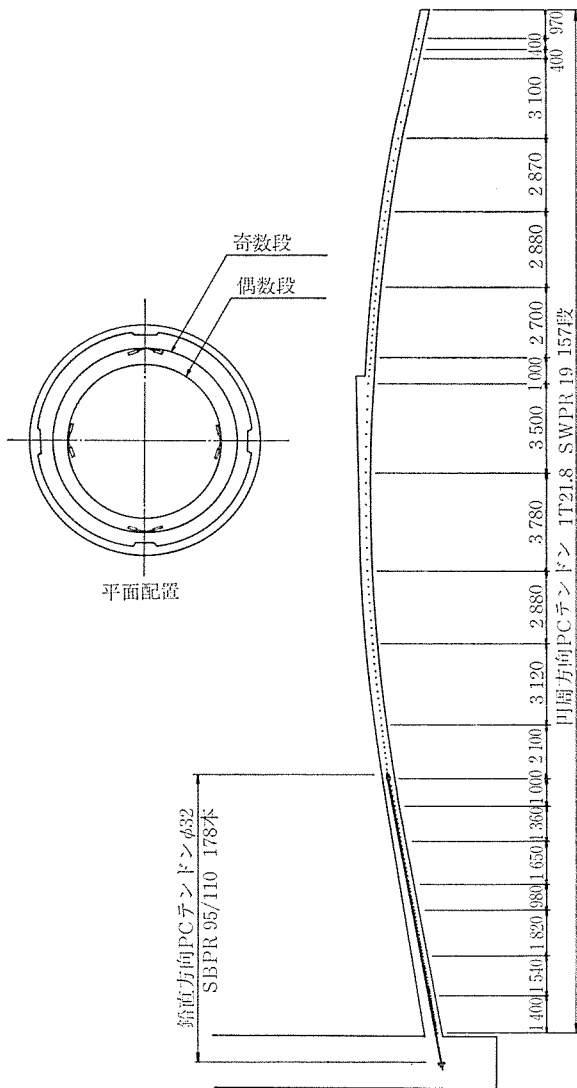


図-6 PC 鋼材配置図

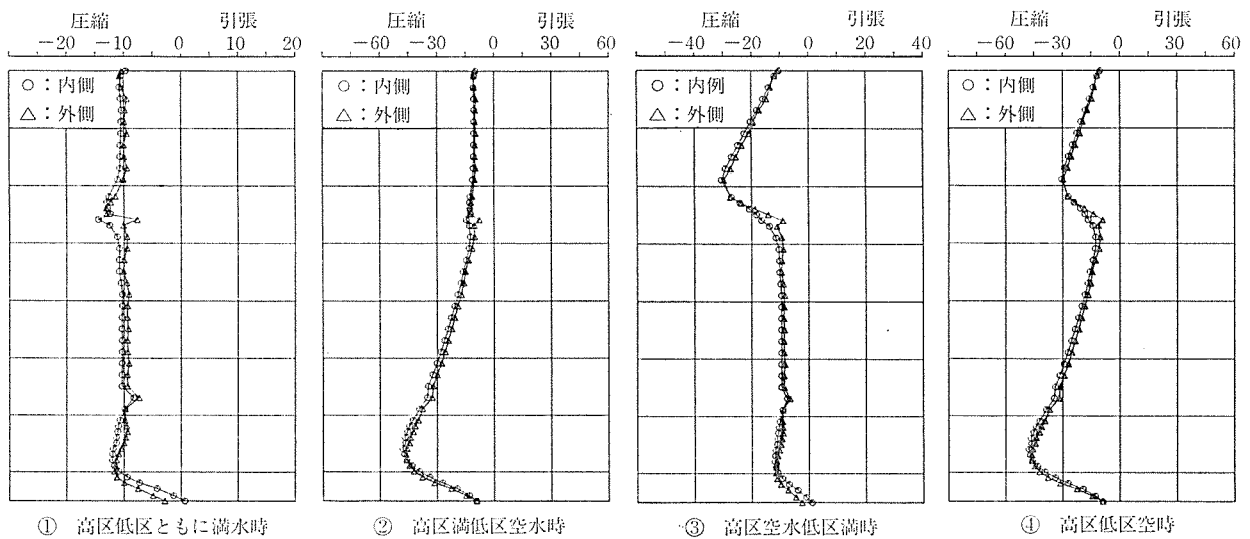


図-7 通常時円周方向応力度 (kg/cm^2)

した。

高区および低区の内容水による地震時動水圧は、HOUSNER の理論により固定水と自由水とに分けて取り扱った。

側壁各部の地震時の安全性の検定は、コンクリートの全断面を有効として求めたコンクリート応力度が、短期許容値以下に収まるようにするとともに、設計せん断力および鉛直荷重の組合せに対して得られる側壁各部の鉄筋およびコンクリートの応力度が許容値以下とすることによって行った。

また別途、水槽を曲げせん断系多質点モデルに置換し、時刻歴応答解析を行って、修正震度法によって算定した設計せん断力に対する照査を行った。

多質点系モデルを図-8に示すが、杭はスウェイとロッキングを考慮したバネに置換した。

内容水は、修正震度法の場合と同様、固定水と自由水とに分けて、慣性質量として固定水のみを考慮した。

入力地震波としては、ELCENTRO 40 NS, TAFT EW および OSAKA 205 EW の3波を用いた。

最大入力加速度は、130 gal とした。これは、地震規模としてマグニチュード 8.2, 震央距離 140 km (紀伊半島沖) と想定して、経験式より算出した値である。

解析結果の一例を図-9, 10 に示す。

この結果によると、動的応答解析結果は、修正震度法による結果にほぼ包含され、よい対応を示している。

したがって、修正震度法による耐震設計で、十分地震時の安全性は確保できるものと考えられる。

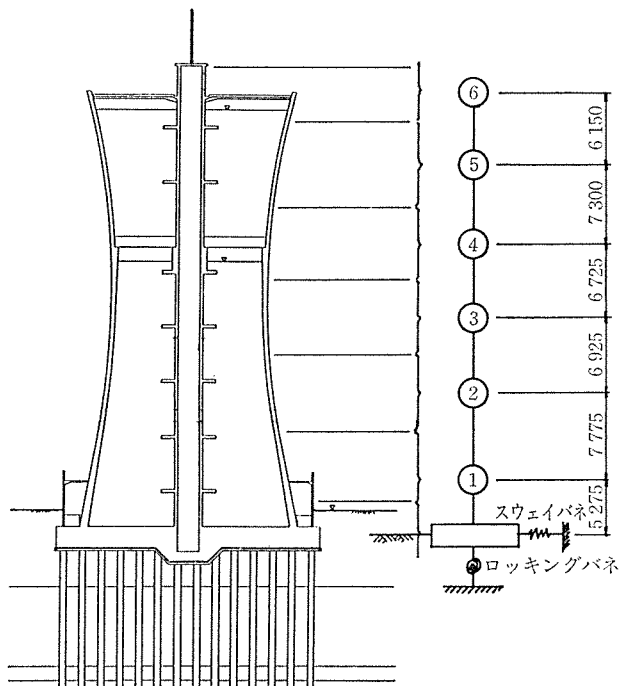


図-8 多質点系モデル

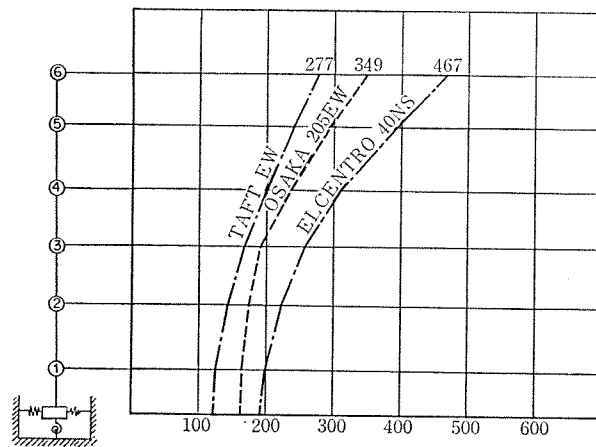


図-9 応答加速度 (gal)

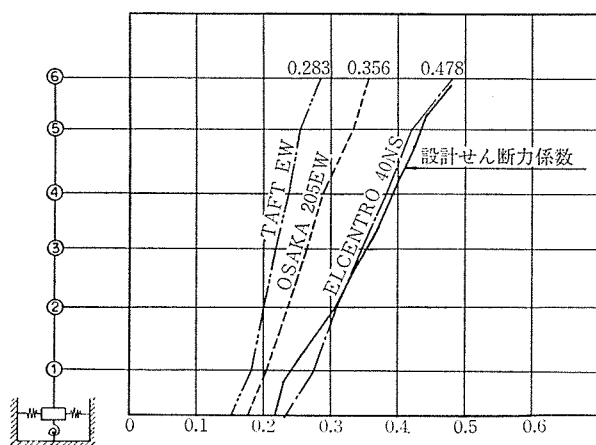


図-10 せん断力係数

2.4 基礎の設計

建設地点における地盤調査結果によると、計画地盤面から約 7 m は盛土で、それから約 7 m は、平均 N 値 8 の粘性土、その下部に N 値 50 以上、厚さ約 4 m の洪積砂礫が存在する。

したがって、基礎形式は、洪積砂礫を支持層とした杭基礎形式を採用した。

側壁および内容水等の重量を支持する基礎版は、一辺が 24.25 m, 厚さ 2 m の鉄筋コンクリート版であり、フラットスラブとして設計した。

杭の設計は、「建築基礎構造設計規準・同解説」にしたがって、通常時および地震時に杭頭に作用する荷重によって発生する杭反力、杭体応力度および変位が許容値以下となるように設計を行った。

2.5 中床版の設計

高区水槽の内容水を支持する中床版は、外周部は側壁により、中心部は内筒によって単純支持された鉄筋コンクリート製のドーナツ版として設計を行った。

中床版が支持される部分に、ラバーパットを敷くことにより、完成後における内容水の水位変動や温度の影響

◇工事報告◇

響等による側壁の変形を拘束しないで、変形拘束による不静定力をできるだけ発生させない構造とした。

ドーナツ版の外径は 6.96 m, 内径は 1.3 m, 厚さは 1.0 m であり, 主鉄筋として D 29 を放射状に 132 本配置した。

2.6 屋根の設計

屋根の構造は, コンクリート自重の軽減および日射の影響によるクラック発生を防止するため, 8本の放射梁と薄いスラブから成る梁スラブ構造とした。

梁と側壁とは, 側壁と屋根部とが互いに変形に対して拘束しないように, ヒンジ接合とした。

3. 施 工

3.1 施工概要

主要工事の工程を 図-11 に示す。

PC 側壁の施工にあたっては, ① その形状が最大勾配 225/1 000 を有する双曲面形状である。② 高さが 39.60 m, 最大水深が 24.30 m (低区配水池) であり, 水槽と

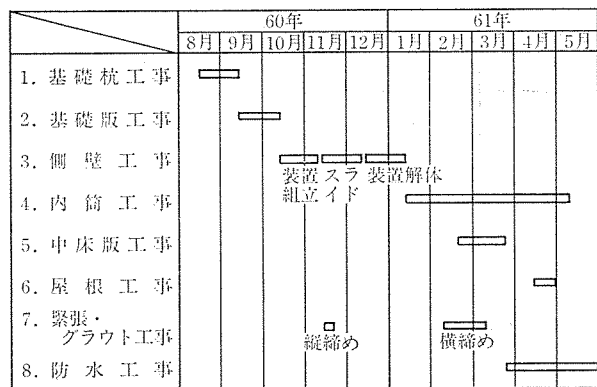


図-11 工事工程表

して完全な水密性を確保する必要がある。したがって, 塔状の構造物を壁厚や形状を自由に変化させながら, 連続的に構築できるスウェーシシステムによるスリップフォーム工法を採用した。

PC 工については, 建築基準法では水槽側壁は耐力壁に相当するため, ボンド方式によるポストテンション方式とした。

3.2 スリップフォーム工事

スリップフォーム 工事は, 図-12 の実施工程に示す

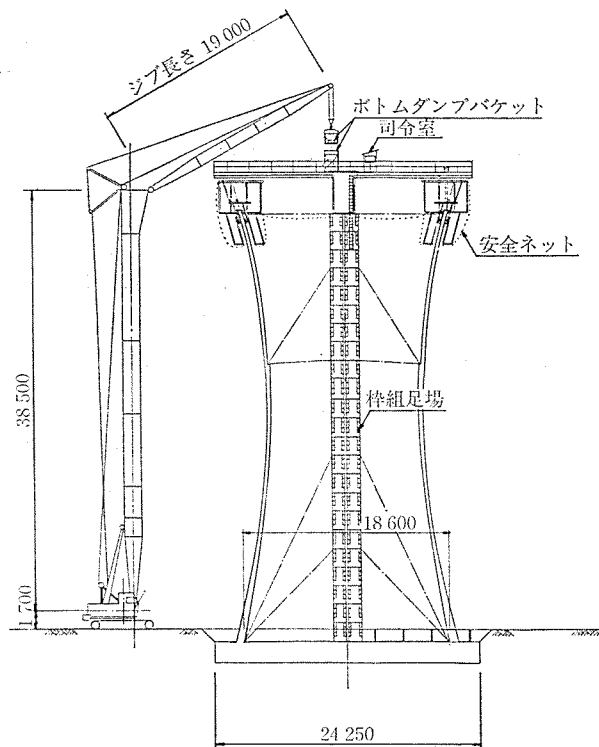


図-13 スリップフォーム工事断面図

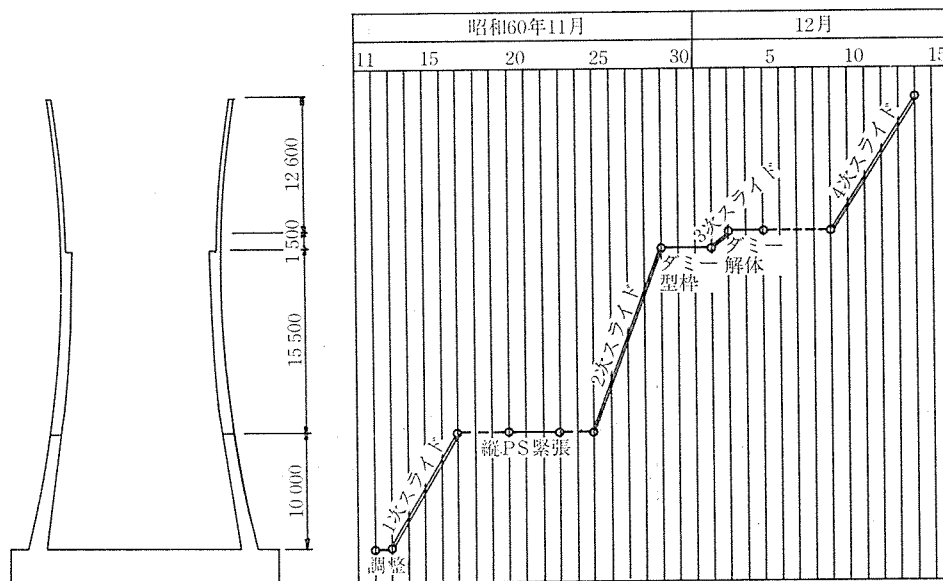


図-12 スリップフォーム工事実施工程表

表-3 スリップフォーム工事上昇速度実績表

	上昇速度 V (m/day)	平均上昇速度 V (m/day)
1次スライド	2.10~3.40	2.90
2次スライド	3.60~5.50	4.40
3次スライド	—	4.00
4次スライド	2.0~3.40	2.80

ように基礎版天端より 10m の位置で鉛直方向の PC 鋼棒の緊張、同じく 25.50m の断面変化部での装置の盛替えにより 1~4 次スライドに分けて行った。

スライド工事そのものは、延べ 14 日間で 2 交替制による昼夜兼行作業で行った。

(1) スウェーター装置

図-13 にこのシステムによる スリップフォーム工事断面を示す。

このシステムは、型枠、この型枠を支えるヨーク、ヨークの間隔を調整する X 形のヨーク継ぎ、上昇用ジャッキ (能力 6t)、直径の伸縮用ジャッキ、それにこれらの装置を中央のセンターリングに連結するスポークワイヤーなどから構成されている。装置および作業時の荷重は各ヨーク毎 (32 ヨーク) に配置された上昇用ジャッキを介して 32 本のロッドに伝え、基礎版天端に支持させた。

(2) コンクリートの打設方法

コンクリートの供給は、ポンプ圧送工法とコンクリートバケット工法にて行った。

ポンプ圧送は、コンクリート量が大きく比較的短時間で打設しなければならないスタート時 (下部 2.0m) に使用した。それ以後については、0.5m³ 用のコンクリートバケットにコンクリートを投入し、クローラクレーンで吊り揚げ、上段作業床に設置したステージホッパー (1.0m³ 2 か所) を介し、カートにて各ヨーク間に配置された軽便ホッパーに投入し、中段作業床の型枠内にコンクリートを打設した。1 回の打設高さは平均 20cm で、バイブレーターで十分締め固めながら連続打設を行った。1 時間当りの平均コンクリート打設量は、1 次スライドで 3.90m³、2 次スライドで 4.30m³、3 次スライドで 2.30m³、4 次スライドで 2.30m³ であった。

(3) スリップフォームの上昇速度

スリップフォームの上昇速度を決定する要因としては、下記が考えられる。

- ① 気象条件 (晴雨, 気温, 風)
- ② 型枠脱型直後のコンクリート初期強度
- ③ コンクリートの打設能力
- ④ 鉄筋, PC 鋼材の配置およびスウェーター装置のスライドにともなう調整作業能力

本工事においては、スライド時期が 11 月中旬から 12

月中旬であり、気温が型枠脱型時のコンクリート強度に大きな影響を及ぼすため、当地域の気象データを過去 10 年間にわたり整理し、各スライドでの計画上昇速度を 1・2 次で 3.10m/day, 3 次で 3.0m/day, 4 次で 2.1m/day とした。

実際の施工においては、1 次スライドで鉄筋・PC 鋼材の配置量が多く若干時間を要したが、2~4 次スライドでは天候にも恵まれ、計画を大幅に上回る速度で施工できた。

(4) 出来型の精度管理

スリップフォーム工法のように連続的に上昇して構造物を構築する場合、鉛直性やねじれ、高さ、真円度などの施工精度を確保することは非常に重要である。

本工事においては、次のような管理方法によって、高精度、高品質を確保した。

① 中心位置・回転

2 台のレーザー鉛直器によって、縦・横 2 方向の変位を測定し、パソコンで解析し中心位置のずれとねじれをブラウン管に表示し、同時に記録し管理した。

② スウェーター装置の水平上昇

各ヨークに取り付けたレベルセンサーによって、ミリ単位で上下方向の高さのバラツキを自動的に調整した。

③ 円の半径・円周の形状

装置の中心より各ヨーク毎に半径を測定し、半径誤差および円周の形状を管理した。

④ 壁厚・壁勾配

壁厚はスケールで、壁勾配は傾斜計を用いて直接計測し管理した。

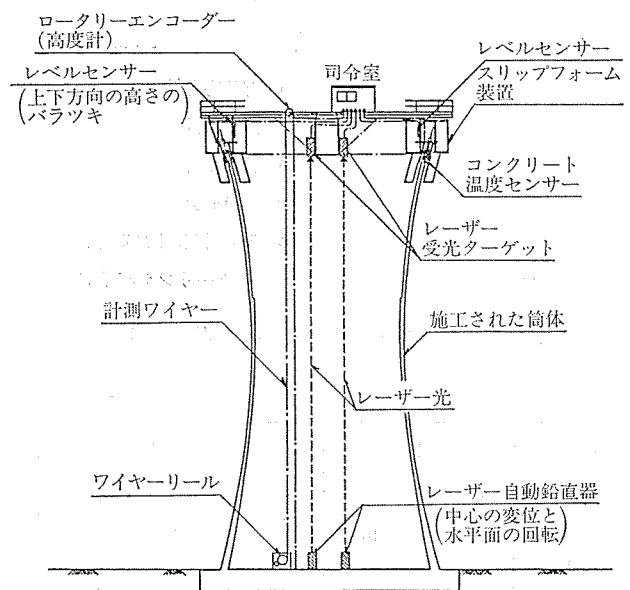


図-14 施工管理システム図

◇工事報告◇

⑤ 高さ

ロータリーエンコーダで測定し管理した。

(5) コンクリートの品質管理

スリップフォーム工事におけるコンクリートの品質管理は、次の2項目に重点を置いて行った。

- ① スライド速度に影響を及ぼすコンクリートの初期強度
- ② 水密性を保持するため、特に基礎版付近については温度ひびわれの発生防止

①については、型枠と同時に上昇する多点式温度センサーでコンクリート温度を測定し、事前に求めてあるコンクリートの圧縮強度と積算温度（コンクリートの養生温度と養生時間の積）の関係から、パソコンを使って型枠中のコンクリート強度をリアルタイムに計算しコンク

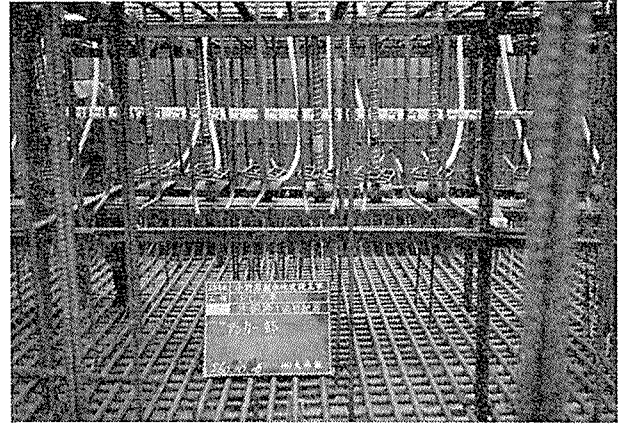


写真-3 鉛直方向 PC 鋼棒基礎版定着部

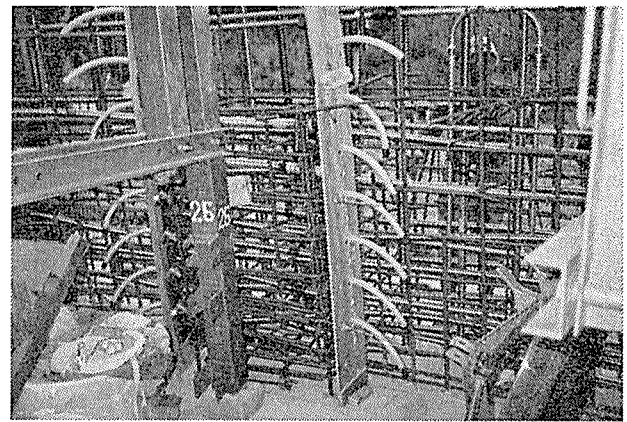


写真-4 側壁ピラスター 水平方向 PC ケーブル定着部

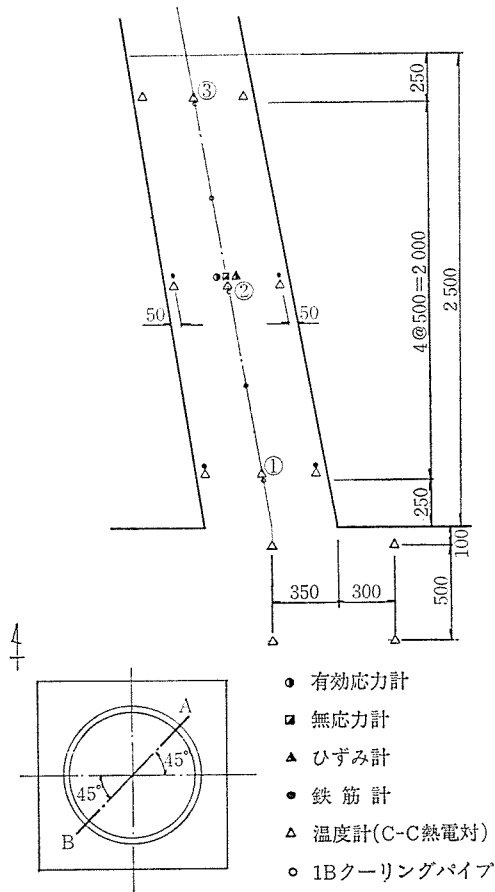


図-15 計測器・クーリングパイプ設置位置図

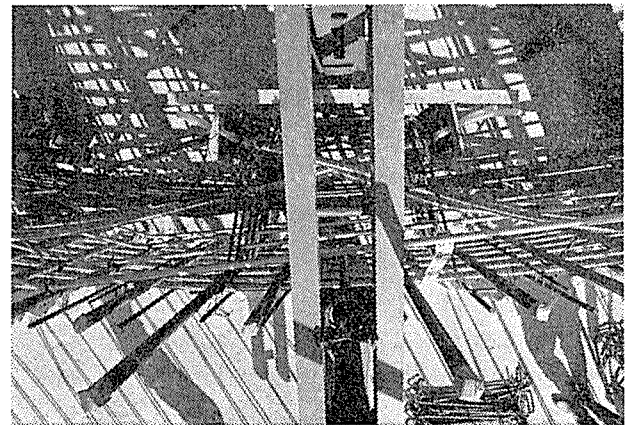


写真-5 側壁ピラスター 水平方向 PC ケーブル定着部

表-4 コンクリート配合表

設計強度 (kg/cm ²)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					施 工 部
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 ポゾリス No. 70	
350N	20	10	4	41	37.7	177	432	635	1 096	1.080	側壁 0~2 m, 10 m 以上
350H	20	10	4	39	36.8	178	456	612	1 096	1.140	
210	20	8	4	60	45.3	166	277	833	1 051	0.693	基礎版
210	20	15	4	60	45.3	180	300	810	1 018	0.750	上記以外の部分

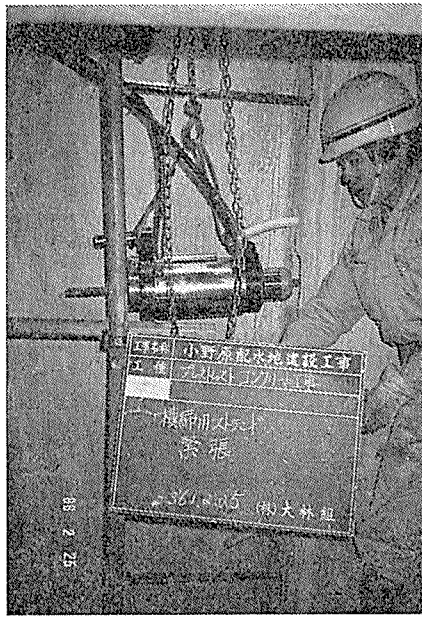


写真-6 水平方向 PC ケーブル緊張

リートの強度推定値をディスプレイし、この強度推定値からスライド速度を管理した。同時に毎日供試体を作製し、4, 5, 6, 7 時間でのコンクリート強度とその養生温度を測定し補足した。ちなみに、型枠脱型時のコンクリート強度は $\sigma_c=1.0 \text{ kg/cm}^2$ 以上とした。

②については、クーリングによりコンクリートの温度を制御した。クーリングは 1B の鋼製パイプを配置し、30~50 l/分 の量の水を通水することにより行った。

クーリングの結果、温度応力によるひびわれの発生は

なく当初の目的は達成できた。

3.3 PC 工事

側壁に配置した、鉛直方向の PC 鋼棒および水平方向の PC ケーブルは次のとおりである。

① 鉛直方向

PC 鋼棒 $\phi 32 \text{ mm}$ 178 本

間隔 @344.3 (下端)~276.9 mm (上端)

設計緊張力 $P_E=64.90 \text{ t/本}$

② 水平方向

PC 鋼より線 19 本より $\phi 21.8 \text{ mm}$ 157 本

間隔 @100~620 mm

設計緊張力 $P_E=42.90 \text{ t/本}$

(1) PC 鋼棒・ケーブルの配置

鉛直方向の PC 鋼棒は、基礎版中に一端がアンカーされるため、基礎版の配筋時に鋼棒およびシースの建込みを行った。このため基礎版中に鋼製フレームを組み立て、鋼棒、シースおよび定着具を支持し、配置精度を確保した。

水平方向の PC ケーブルは、コンクリート打設後に挿入することにし、まずシースの配置を行った。鉄筋を加工したシース支持棚を各ヨーク間に 1~2 本配置し、シースの配置精度を確保した。

ケーブルの挿入は筒体が完成した後となるため、シースのダクト形成確認は、直径 5 mm の PC 鋼線の先端に直径 30 mm の鋼製の球を取り付けた点検具を挿入することによって行った。点検は、スリップフォーム工事

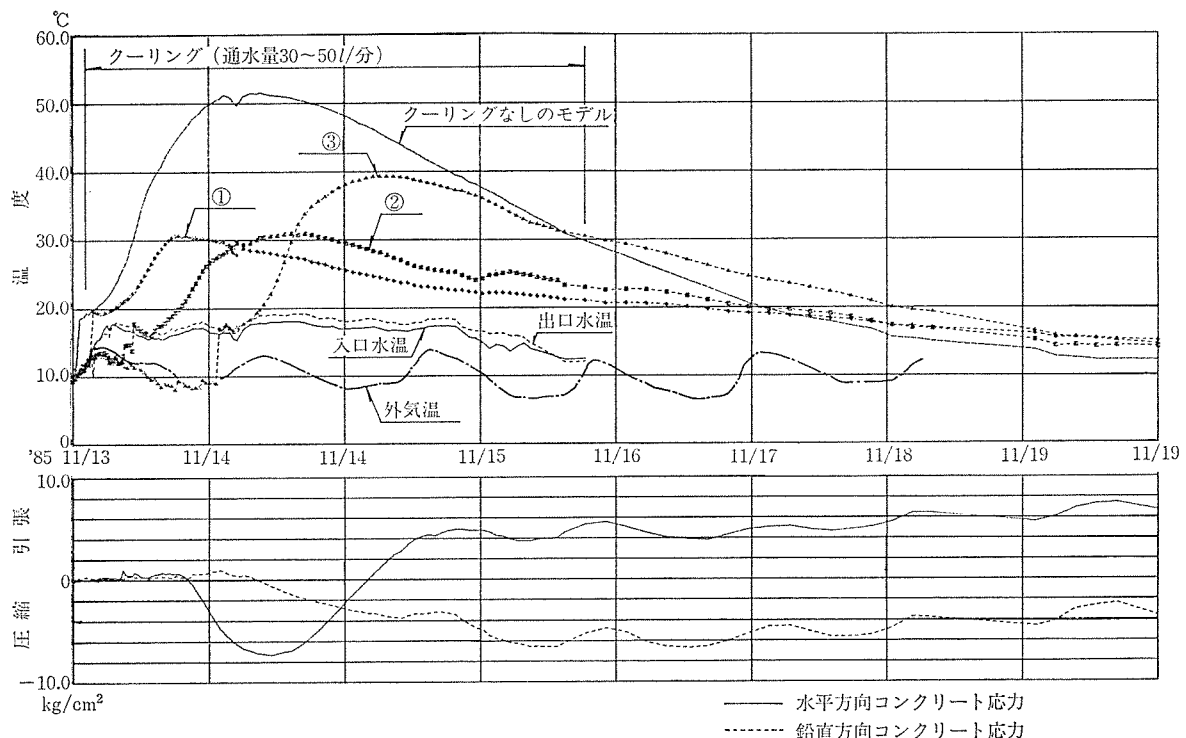


図-16 側壁コンクリートの温度と応力の経時変化

◇工事報告◇

中に全体数について行い、ダクトの形成不良な部分があれば早期に確認し対策が行える体制で臨んだ。

(2) 緊張作業および緊張管理

鉛直方向の PC 鋼棒は、上端定着具の高さまでコンクリートを打設した時点で、スリップフォームを停止して緊張を行った。

緊張に際しては、プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度が所定の値 ($\sigma_c=240 \text{ kg/cm}^2$) を有しているか、事前に採取した供試体の圧縮強度を確認したうえで緊張作業を行った。

緊張順序は、緊張力が偏らないように2組のジャッキを、筒体の中心軸に対して点対称の位置に配置し、1本おきに片引き緊張を行った。PC 鋼棒の実測伸び量の平均値は 46.3~47.0 mm であり、計算上の伸びに対する実測伸び量の割合は $\pm 5\%$ 以内に収まった。

水平方向の PC ケーブルは、スリップフォーム完了後コンクリート中に埋め込まれたシースに PC ケーブルをプッシングマシンにて挿入し緊張を行った。緊張は、緊張力が偏らないように、相対するピラスターに2組ずつ計4組のジャッキを配置し、筒体の下部から上部に向かって、偶数段の円周上の1組(2本)のケーブルの両引き緊張を行い、筒体の上部から下部に向かって奇数段のケーブルを同様に緊張した。見かけの摩擦係数 μ は、0.2~0.4 であった。

緊張作業中に埋設計器の応力計測も同時に行い、所定

のプレストレス導入を確認した。

(3) グラウト注入工

グラウトは事前に試験練りを行い、所定の基準に合致する配合を選定した。

施工中は、強度、膨張率、コンシステンシーの各項目についてグラウトの品質管理を行った。PC グラウトの試験方法は、土木学会基準に準じた。

表—5 グラウトの管理要領

試験項目	試験の時期または試験の回数	管理基準値
強度	午前・午後各1回	200 kg/cm ² (28日圧縮強度)
膨張率	午前・午後各1回	10% 以下
コンシステンシー	全バッチ	流下時間 Jロート 6~12 秒

4. あとがき

既に水槽本体の工事は完成し、ニュータウンの丘にひとときユニークな姿を現わしている。

今回報告した水槽は、積極的に環境との調和を目的に設計・施工されたものであり、本工事例が今後の同種の工事に大いに参考になれば幸いである。

最後に誌面をお借りして、計画から施工まで多大な助言・助力を頂いた方々に深謝の意を表します。

【昭和 61 年 3 月 24 日受付】