

豊中市における大型PC卵形消化槽の設計と施工

村田 信之*1・脇島 秀行*2・東 和司*3・福本 育央*4・長谷川 紘一*5

1. はじめに

大阪空港の滑走路左端にシルバーグレーの半球形構造物が出現した。豊中市が大阪府、兵庫県から事業委託を受けて原田終末処理場に計画した東洋一の容量を誇るPC卵形消化槽である。PC卵形消化槽が、我が国で初めて横浜に建設されて以来、10余年が経過し、現在40数基余りが稼働している。PC卵形消化槽は、従来の円筒形消化槽に比べ、消化効率や汚泥処理能力が優れているため、各地方自治体の採用が増加している。ここ原田終末処理場においても、現在までに13基のRC円筒形消化槽(総容量41410 m³)が建設され、9基が稼働しているが、今後の汚泥処理を円滑に進めるため、これまでの消化槽の稼働状況や消化効率、処理場の規模、立地条件、汚泥の性状等を検討し汚泥処理計画の見直しを行った結果、当処理場としては初めてPC卵形消化槽が採用された。

原田終末処理場では、全体として6基のPC卵形消化槽が計画されており、本工事はその1号基に当たる。

本報文は、国内においては初めて10000 m³を超えた大型PC卵形消化槽の設計と施工について報告するものである。

2. 工事概要

2.1 工事概要

工事名称：猪名川流域下水道原田終末処理場第3系列消化槽築造工事(その2)

工事場所：大阪府豊中市原田西町1-1

工期：平成4年10月～平成6年3月

事業主体：大阪府、兵庫県

発注者：豊中市

施工者：(株)熊谷組

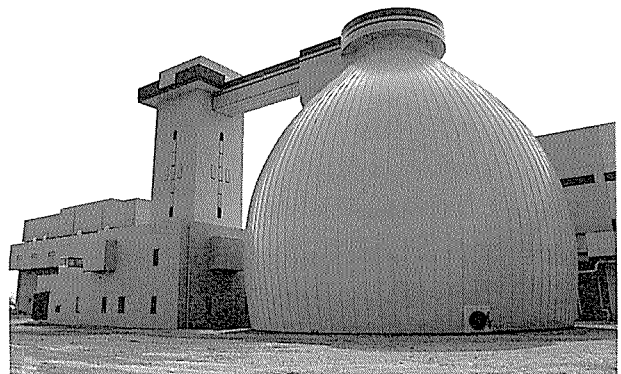


写真-1 完成写真

構造形式：PC卵形消化槽

規模：容量12800 m³

定着工法：ディビダーク工法

基礎形式：杭基礎 上杭 SC 杭φ600 N=176本
下杭 PHC 杭φ600 N=176本

2.2 工事数量

当PC卵形消化槽の主要工事数量を表-1に示す。

表-1 主要工事数量

	規格	数量
コンクリート	$\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$ (高炉, 早強)	2541 m ³
鉄筋	SD295A	431 t
PC網材	SBPR 930/1 180φ32 (DW工法)	18 t
	SWPR 7 B 6 B 12 (DW工法)	87 t
	SWPR 7 B 6 B 05 (DW工法)	31 t
	SWPR 19 1 T 21.8 (SM工法)	10 t
型枠	木製型枠	6268 m ²
杭	PHC杭 φ600, L=8 m (A種)	176本
	SC杭 φ600, L=10 m (t=12 mm)	176本

*1 Nobuyuki MURATA：(株)熊谷組 技術本部土木技術部 PCグループ 係長

*2 Hideyuki WAKISHIMA：(株)熊谷組 技術本部土木技術部 PCグループ

*3 Kazushi AZUMA：(株)熊谷組 大阪支店土木部 作業所長

*4 Ikuo FUKUMOTO：(株)熊谷組 大阪支店土木部

*5 Koichi HASEGAWA：豊中市 下水道部猪名川流域下水道事業所 建設課長

◇工事報告◇

2.3 工事の特徴

本工事の特徴として次の2点が挙げられる。

- 1) 子午線方向のPC鋼材として、下部円錐部から赤道までにPC鋼より線を採用した。
- 2) 消化槽を支えるリング基礎が中空構造となっている。

以上は、いずれも消化槽の規模が大きくなったことに起因するものであるが、施工面においてもこれまでにない新たな検討を必要とした。

3. 設 計

3.1 設計条件

3.1.1 構造寸法

本消化槽は、大阪空港の空域制限より、躯体高さを低く抑えるため躯体の1/3以上が地中に埋設された構造となっている。基礎形式は、リング基礎を介して支持する杭基礎形式を採用した。構造一般図を図-1に示す。また、参考として、ドイツで施工された世界最大規模の卵形消化槽を図-2に、構造比較を表-2に示す。

本消化槽は、ヨーロッパで実績の多い直接基礎形式に比べ、我が国の軟弱な支持地盤や地震時の安定性を反映させた形状となっている。

3.1.2 設計条件

本消化槽の設計にあたって考慮した荷重条件を表-3に、使用した材料およびその許容応力度を表-4に示す。

3.2 設計概要

3.2.1 設計方針

PC卵形消化槽本体の設計については、原則として「建築基準法施行令」およびこの施行令を基軸として定められている「日本建築学会編、容器構造設計指針・同解説」に準拠した。しかし、これらにはPC卵形消化槽の設計手法に関しては具体的に明文化されていないため、消化槽の機能およびプレストレストコンクリート容器構造の特性を考慮して、「日本建築学会編、プレスト

表-2 構造比較

	原 田 (日本)	Bottrop (独)
最大高さ(m)	41.426	47.470
最大内径(m)	27.100	27.160
地上高さ(m)	26.200	40.670
赤道上の壁厚(m)	0.540	0.477
容 量 (m ³)	12 800	15 000

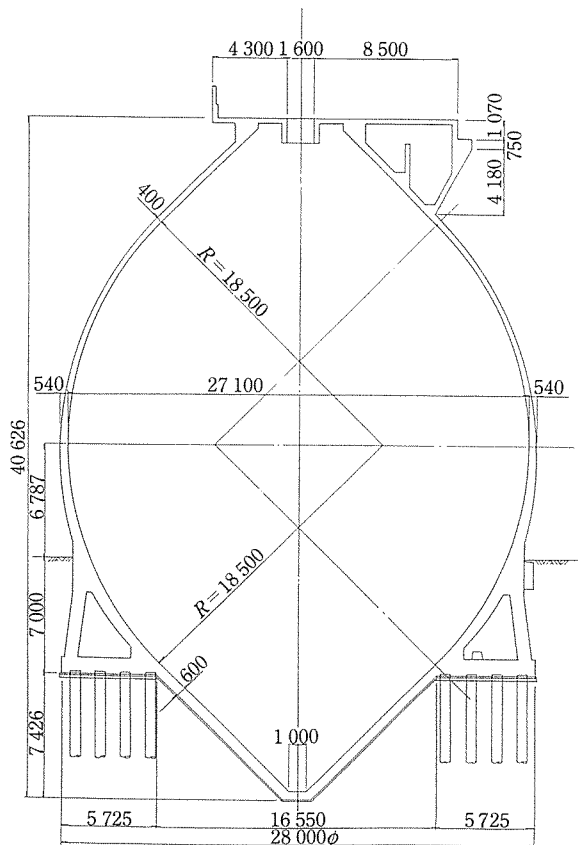


図-1 構造一般図

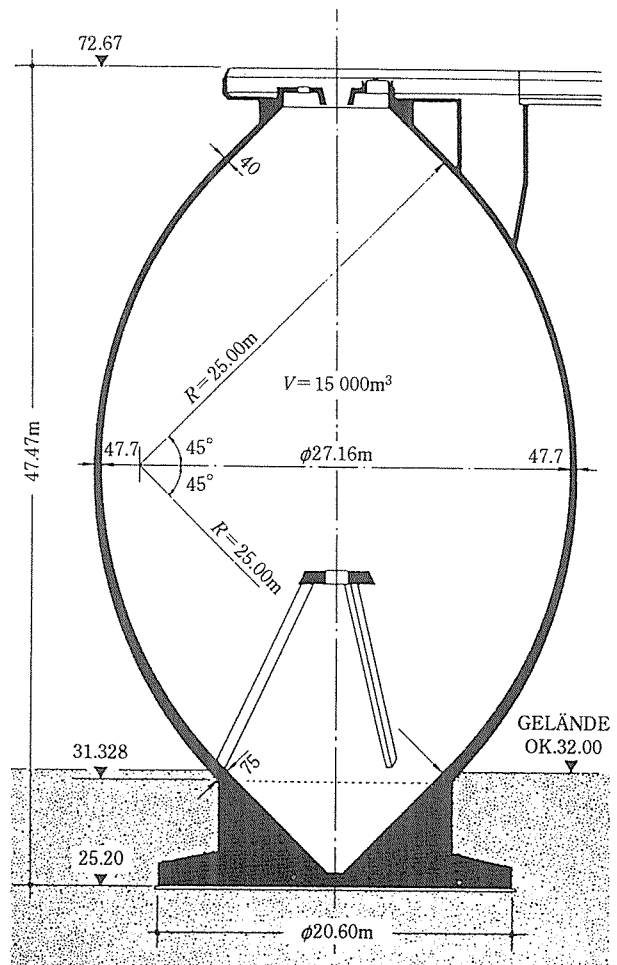


図-2 Bottrop (独) 卵形消化槽

表-3 荷重条件

荷重	摘要	荷重強度
躯体荷重	側壁部, リング基礎部 底板部	コンクリートの単 位体積重量 $r=2.4 \text{ tf/m}^3$
上 載 荷 重	ガスドーム, 検査路, ス ラッジポケット, 連絡橋ア バット	コンクリートの単 位体積重量 $r=2.4 \text{ tf/m}^3$
	連絡橋反力	$R=116 \text{ tf}$
	載機器重量 群集荷重	$W=13.1 \text{ tf}$ $W=0.5 \text{ tf/m}^2$
保温材重量		$r=0.025 \text{ tf/m}$
内部機器重量	全体構造計算時は考慮しない	
液 圧	汚泥の単位体積重量	$r=1.0 \text{ tf/m}^3$
ガ ス 圧	消化ガス圧	$q=0.5 \text{ tf/m}^3$
温 度 荷 重	汚泥温度 $35 \pm 2^\circ\text{C}$ 外気温 夏期 33°C , 冬期 0°C 地 中 地下水位下 15°C 地下水位上 16°C	
	地震荷重	容器部分 基礎部分
風 荷 重		$q=0.27 \text{ tf/m}^2$
土 圧	土の単位体積重量 静止土圧係数	$r=1.8 \text{ tf/m}^3$ $K_a=0.363$
地 下 水 位	地下水位	GL-6.3 m

表-4 材料の仕様および許容応力度

種別	仕 様	応 力 度 の 状 態			許容応力度 (kgf/cm ²)
		使用状態		地震時	
コン ク リ ー ト	$\sigma_{ck}=350$ kgf/cm ²	曲げ圧縮応 力度	プレストレッシング直後		170
			使用状態		135
		軸圧縮応力 度	プレストレッシング直後		132.5
			使用状態		105
		曲げ引張応 力度	プレストレッシング直後		13.5
			使用状態	満液時	0
				空液時	7
			地震時		23.5
			せん断応力度		5.0
			斜引張応力度		8.5
210	kgf/cm ²	曲げ圧縮応力度		70.0	
		軸圧縮応力度		55.0	
		せん断応力度/スラブ		8.5	
P	SBPR 930/1 180 $\phi 32$	プレストレッシング中		85.5	
		プレストレッシング直後		80.7	
		設計荷重作用時		71.2	
C	SWPR19 1 T 21.8	プレストレッシング中		144.0	
		プレストレッシング直後		129.5	
		設計荷重作用時		110.0	
材	SWPR7B 6 B 05, 6 B 12	プレストレッシング中		144.0	
		プレストレッシング直後		133.0	
		設計荷重作用時		114.0	
鉄 筋	SD 295	本体 PC 部材	長期	2 070	2 700
			長期+温度		
		基礎 RC 部材	長期	1 800	2 700
			長期+温度	1 000	1 150

レストコンクリート設計施工規準・同解説」および「日本水道協会編, 水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」の各規準を適用した。

また, 一般の鉄筋コンクリート部材の設計については, 「日本建築学会編, 鉄筋コンクリート構造計算規準」および「日本水道協会編, 水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」を適用した。

さらに, 基礎構造の設計については, 「日本建築学会編, 建築基礎構造設計指針・同解説」に準拠した。

3.2.2 構造解析

構造解析は, 側壁部・下部円錐部・リング基礎部・杭を一体化した軸対称モデルを用いて有限要素法による解析を行った。スラッジポケットなどの頂部付属構造物も軸対称荷重に換算して荷重として取り扱った。

この場合, 側壁部と下部円錐部を薄肉シェル要素とし, リング基礎部はマッシュな構造のためソリッド要素でモデル化した。

図-3 に解析モデルを示す。断面剛性は, コンクリートの全断面を有効とし, コンクリートのヤング係数およびポアソン比はそれぞれ $2.95 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, $1/6$ とした。支持条件は, 基礎杭をバネ要素として評価したが, 円錐部の地盤反力については考慮していない。また, 耐震設計については, 修正震度法にて検討し, 内溶液による動水圧は, 固定水として取り扱っている。なお, 設計

時の構造解析については, すべて完成系モデルで行い, 施工時は, 子午線方向緊張前後における応力状態を把握し, 安全性の照査を行った。

3.2.3 部材の設計

(1) 下部円錐部

本 PC 卵形消化槽の下部円錐部は, 杭に比べて鉛直方向の支持力が非常に小さいため, 特に地盤反力を期待せずに, リング基礎部を支持点とした RC 部材として設計した。

この下部円錐部の円周方向は RC 部材とし, 発生する引張力に対して十分な鉄筋を配置した。また, 子午線方向は運転時にフルプレストレスの状態にあるプレストレストコンクリート部材として設計を行った。

(2) リング基礎部

リング基礎部は, ソリッド要素として解析を行い, 各要素面積と要素応力度から引張鉄筋を直接算出し, それに見合った量の鉄筋を配置した。なお, 支え壁も同様に RC 部材として設計した。

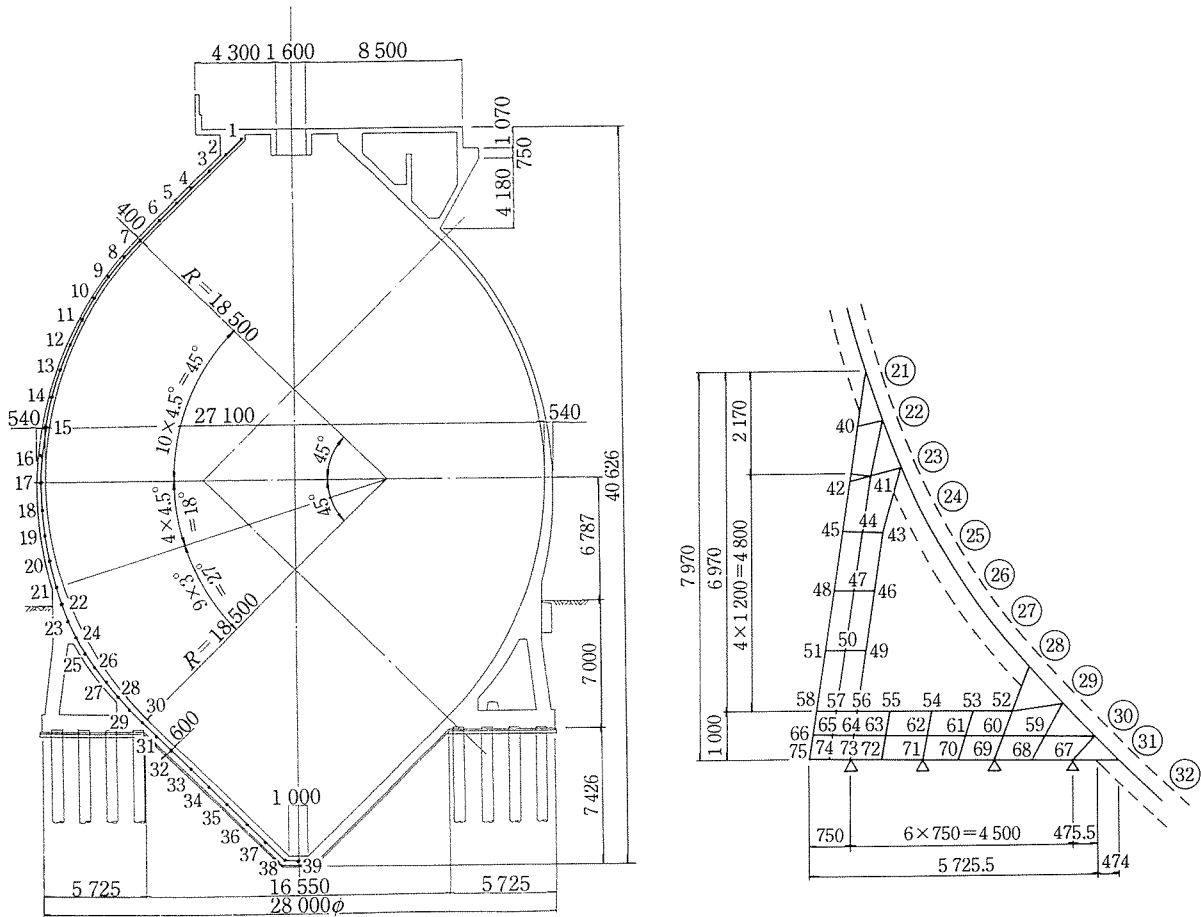


図-3 解析モデル図

(3) 側壁部

側壁部は、内部汚泥の液圧によって発生する引張力を打ち消し、かつ 5 kgf/cm^2 程度の圧縮応力が生じるように円周方向、子午線方向に PC 鋼材を配置することとした。

3.3 PC 鋼材の選定

壁体に配置する円周方向および子午線方向の PC 鋼材および定着部処理は以下のとおりとした。PC 鋼材全体配置図を図-4 に示す。

円周方向 PC 鋼材は、各部材断面に必要なプレストレス力から鋼材配置を全体で 3 グループに分けて配置した。

通常 PC 卵形消化槽では、円周方向 PC 鋼材は躯体に切欠きを設けて定着されるが、大容量ケーブルを採用したことにより定着具が大きくなったため、側壁厚や施工性を考慮し、地中に埋設される壁体の一部に突起定着を設けた。

子午線方向の PC 鋼材については、これまでは自立性があり継手を自由に設けられるとともに定着ロスが少ない PC 鋼棒が使用されてきた。しかしながら、本消化槽は、必要なプレストレス力と鋼材の配置形状を検討した

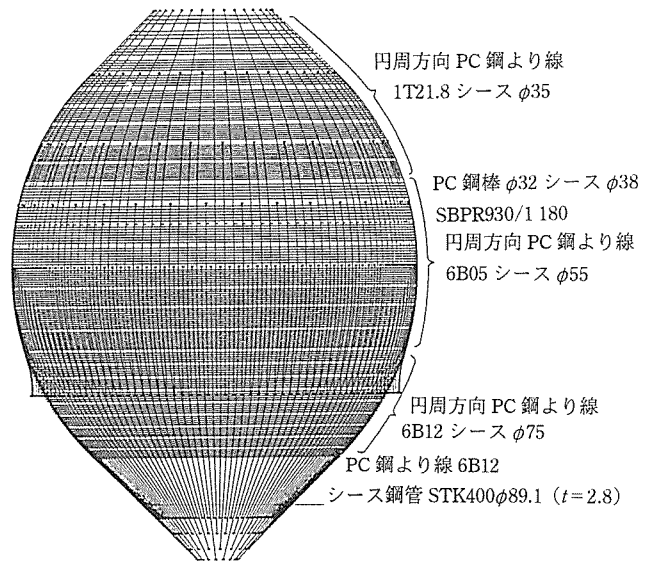


図-4 PC 鋼材配置図

結果、下半球（下部円錐部～赤道）については、PC 鋼棒で対応できないため、PC 鋼より線 (SWPR7B 12-φ 15.2 (6 B 12)) を採用した。PC 鋼より線は継手を設けない構造とし、その自立性を確保するため、シースとして鋼管 (STK-400, φ 89.1, t=2.8) を使用した。なお、

上半球の子午線方向 PC 鋼材は、PC 鋼棒 (SBPR 930/1 130, φ32) を使用した。

3.4 施工時応力解析

PC 卵形消化槽は完成系までに構造系が刻々と変化し、施工時特有の荷重 (クライミングフォーム、足場荷

重等) が作用するため、施工時応力解析を行い、施工途中の応力状態の照査を行った。施工時応力照査は、子午線方向緊張前後の 6 ケースについて行った。

施工途中の応力状態は、表-5 に示すようにいずれのケースにおいても許容応力度を満足しており、十分安全

表-5 施工時の最大引張応力度および発生位置

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
子午線方向緊張前					
円周方向レブス		1/3 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス
子午線方向緊張後					
円周方向レブス	1/3 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス	1/2 プレストレス 全プレストレス

※引張り応力度の単位は kgf/cm²、枠なしは子午線方向引張り応力度、枠ありは円周方向引張り応力度

◇工事報告◇

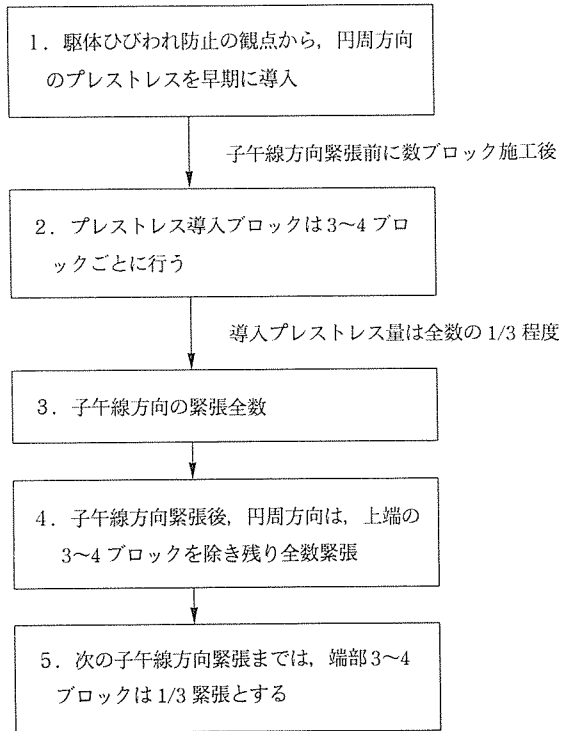


図-5 緊張順序

であることが確認できた。ただし、円周方向緊張の時期および導入プレストレス量によっては、側壁部鉛直方向に過大な引張応力が発生する可能性がある。また、端部の変形も大きくなることが計算結果から判断されたため、図-5に示す緊張順序を基本とした。

3.5 リング基礎部の温度ひびわれ対策

卵形消化槽のリング基礎部および側壁との結合部はマッシュな部材であり、マスコンの温度膨張・冷却収縮により相当数の微細な温度ひびわれの発生が予測されるため、躯体の温度ひびわれ対策が必要となった。コンクリート構造物のひびわれは、コンクリートの引張変形性能がコンクリート自身の温度伸縮挙動や乾燥収縮挙動あるいは構造物の微少挙動に比べて極めて小さいことによるもので、その完全な抑止は不可能である。このため、現設計・施工条件の抜本的な変更は行わず、工事工程や

表-6 ひびわれ抑制対策

ひびわれ対策	具体的な手法	ひびわれ危険率(%) 夏期/春期
ひびわれ対策なし	—	95/90
ひびわれ対策 (I)	1) 低発熱セメントの使用 2) 強度管理材令 (28→91日) 3) 施工上で必要なスランプ量は、高性能減水剤で確保する	80/70 温度で2~3℃低減
ひびわれ対策 (II)	1)+2)+3) 4) プレストレスの導入	10/10 壁の場合
ひびわれ対策 (III)	1)+2)+3) 4) 収縮目地の設置	10/10 基礎部

注) ひびわれ対策 (II) の摘要によるひびわれ危険率は、ひびわれ対策 (I) のひびわれ危険率に (II) によるひびわれ幅の低減率を乗じて求めたものである。また、ひびわれ対策 (III) の効果は、収縮目地による拘束度の低下を評価にいたしたものである。

経済性に支障をきたさない範囲で検討を行った。

リング基礎部の温度ひびわれ抑制対策を表-6に示す。

本施工におけるひびわれ対策は、(II)が「効果/コスト」において有効と考え、側壁部鋼材の1/3を早期緊張し、円周方向に20~30 kgf/cm²のプレストレスを導入した。

4. 施 工

4.1 施工概要

本消化槽は、頂部付属構造物を除き、全体を27ブロックに分割して順次施工した。図-6に施工手順を示す。また、表-7に実施工程表を示す。以下に、躯体構築工事の施工内容について先に述べた工事の特徴に重点をおいて説明する。

4.2 施工方法

4.2.1 土工および基礎工

円錐部掘削に先立ち、掘削および躯体構築のガイドとなるRCリング(高さ0.3m, 幅0.5m, 周長52.0m)を施工した。次に、バックホウにてGL-5.5mまで一

表-7 実施工程表

工種	期間	1992			1993												1994		
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
掘削およびモルタル吹付け工																			
円錐部工																			
リング基礎工																			
側壁工																			
頂部工																			
保温、外装工 内部、防触工																			

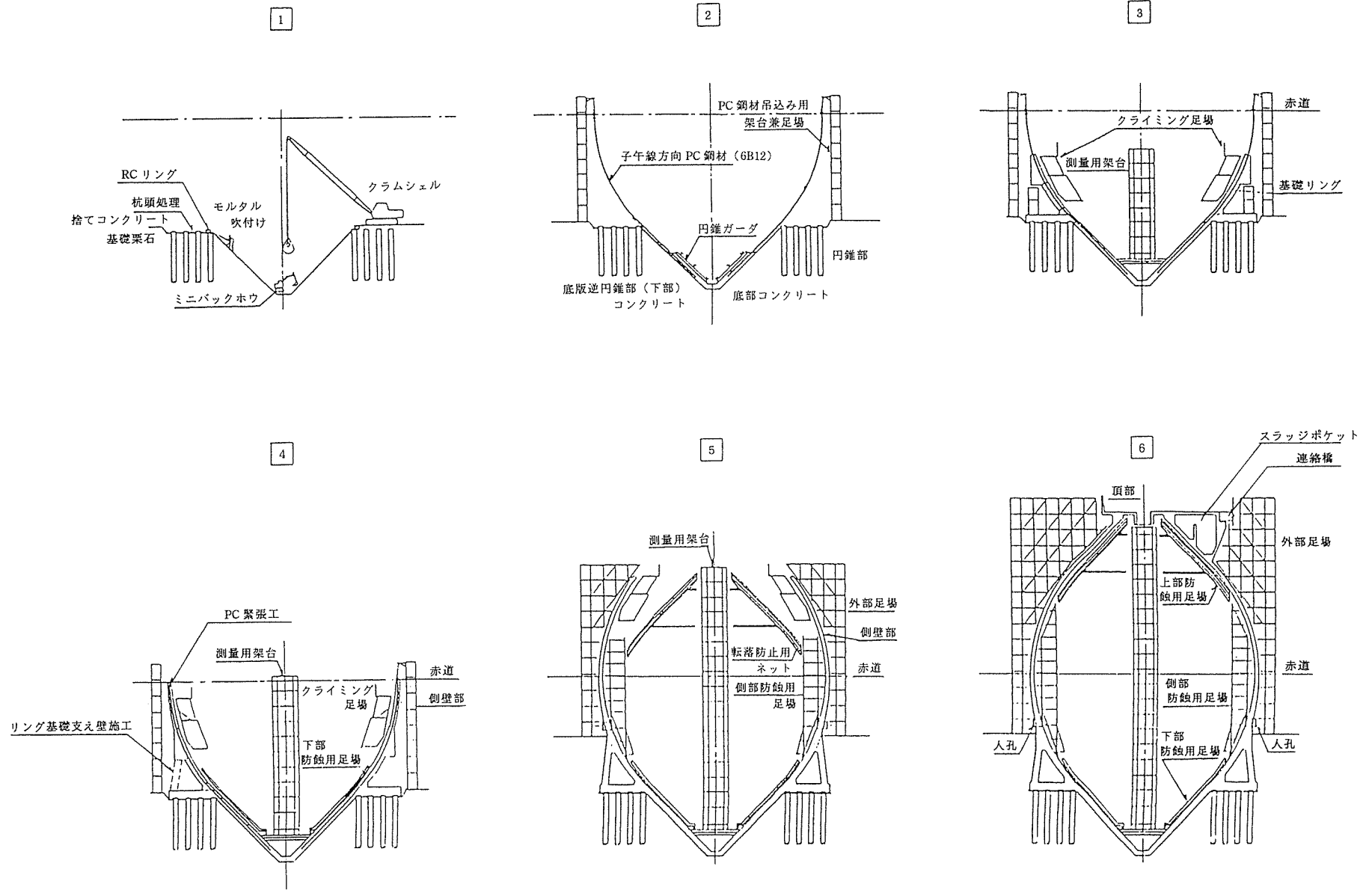


図-6 施工手順図

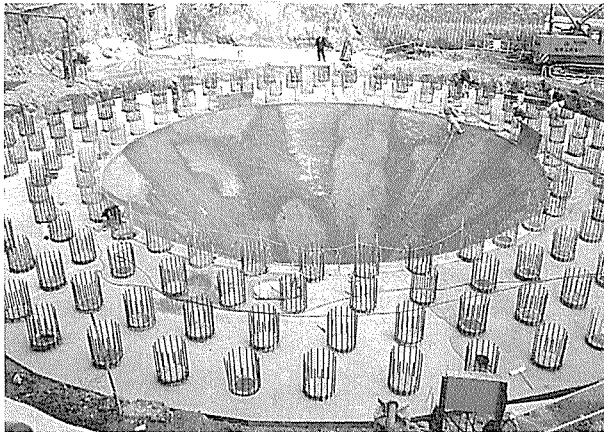


写真-2 下部円錐部の施工

次掘削を行い、続いてクラムシェルとミニバックホウにてGL-8.2 m まで二次掘削を行った。掘削部は、透水性の高い被圧滞水地盤であったため、事前に3本のディープウェルによって掘削面下まで水位を低下させておいた。掘削終了後、全面に金網を設置し、法面保護のためのモルタル(厚さ50 mm)を吹き付けた(写真-2)。このモルタルは、円錐部コンクリート打設時の外型枠の役目も兼ねる。そこで、精度を確保するため、ゲージとなるアングルを放射状に地山法面に沿って設置した。

4.2.2 円錐部の施工

円錐部は、斜長で10.8 m と深いことから、以下の要領で3ブロックに分けて施工した。

- ① 底部の鉄筋組立後、リングプレートと呼ばれる鋼製型枠を設置しコンクリートを打設した。鋼製型枠は、底版部均しコンクリート中に埋め込んだ D16 アンカーボルト4本によって支持した。
- ② 円錐部外側鉄筋(主筋 D32 @100×2段)をすべて組み立て、子午線方向 PC 鋼より線用の受台を取り付けた。
- ③ 地上にて子午線方向 PC 鋼より線を所定の長さで切断し、4タイプ136本の鋼管シースに挿入して定着具まで取り付けた。
- ④ 鋼管シースを空中で正確な位置に保持するための架台をリング基礎外周部に赤道上空まで組み立てる。この架台は、後に側壁部を構築する時の外周足場としても利用した。
- ⑤ 受台上に、50 トンクローラクレーンを使用して鋼管を設置した(写真-3)。この時、架台にかかる荷重がバランスするように鋼管は、対角線に建て込んでいった。
- ⑥ 円錐部内側鉄筋(主筋 D 32 @100×2段)をすべて組み立てた。
- ⑦ コンクリートの打設は2回に分け、それぞれ H

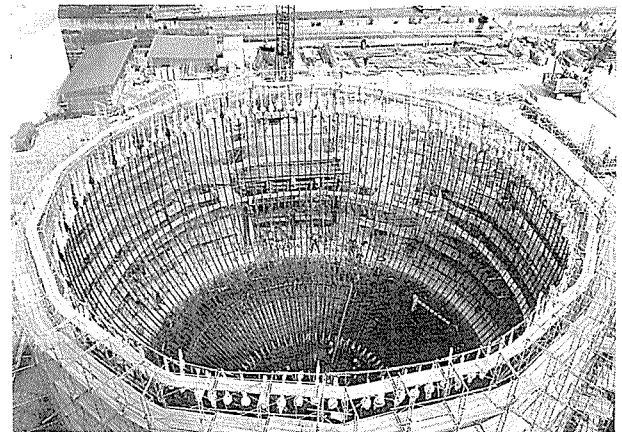


写真-3 子午線方向 PC 鋼材建込み状況

形鋼とリングビームで構成された円錐部専用の鋼製型枠ガーダーに型枠パネルをはめ込み、コンクリートポンプ車により打設した。

4.2.3 リング基礎部の施工

リング基礎部は、従来のハンチを設けたフーチング形式と異なり支え壁形式を採用した。コンクリートは、図-7に示す5つのブロックを他部材の施工と関連させながら、7回に分けて打設した。特に支え壁(5 BL)については RC 構造となっていることから側壁部の構築が赤道まで終了し、子午線方向ならびに円周方向 PC 鋼材を緊張した後、コンクリートを逆打ちにて打設した。また、この部分より円周方向の PC 鋼材(6 B 12)を配置し、側壁部①ブロック打設後、子午線方向の緊張に先行してその1/3を緊張した。緊張作業は、オーバーハングした壁面の切欠き部に大型でかつ重量物であるジャッキをセットする必要があったため、作業は困難を伴った。したがって、ジャッキセットには特別な治具(写真-4)

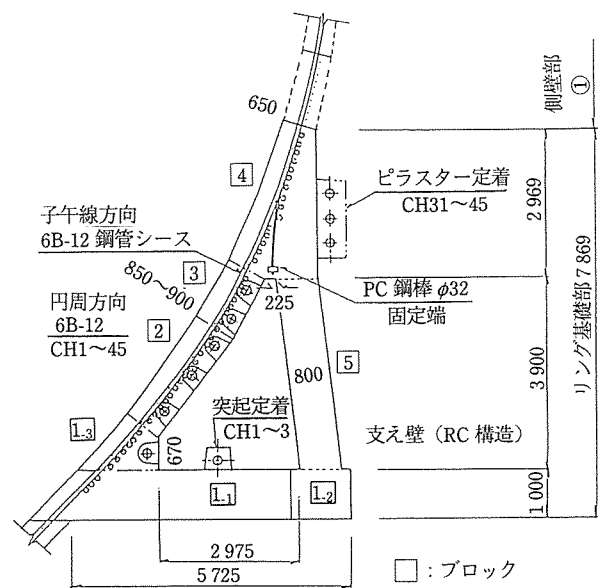


図-7 リング基礎部詳細図

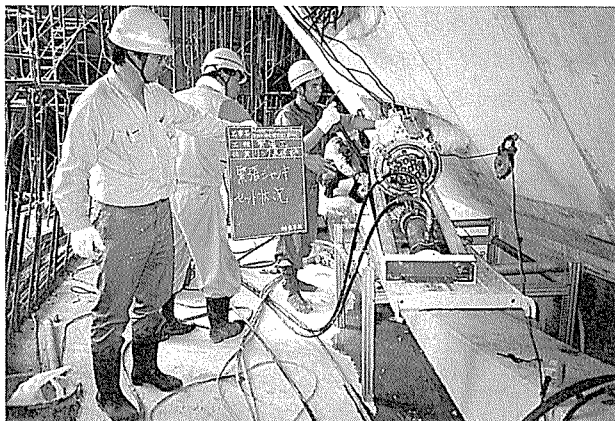


写真-4 緊張ジャッキのセット

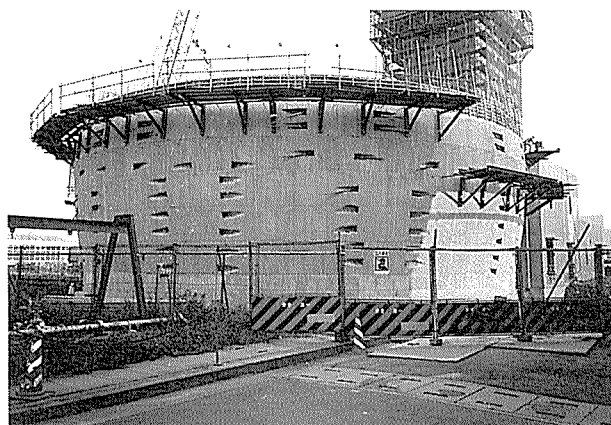


写真-6 ブラケット足場

を使用して行ったが、実績としては1日最高6本(3段)であった。

4.2.4 側壁部の施工

側壁部は、19段のリングセグメント状ブロック(1.5m/1BL)に分割し、ディビダーク式クライミング工法によって施工した(写真-5)。躯体構築時の足場としては、内側のみクライミング足場を採用した。また、外側は外装材の施工を考慮して総足場とし、躯体埋戻し時は、躯体から張り出したブラケット足場を使用することによって作業が連続的に行えるよう配慮した(写真-6)。

クライミング工法は、互いに独立した自走式のクライミング足場とクライミング型枠を使用してコンクリート壁体を順次施工しながら上昇していくものである。クライミング型枠は、円周方向に分割された型枠とこれを押さえる鋼製型枠ガーダーから構成されている。本工事では、円周方向の型枠幅が1m以下となるように分割数

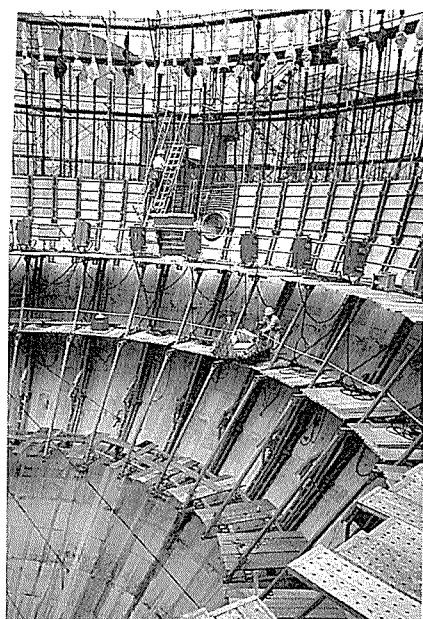


写真-5 クライミング足場

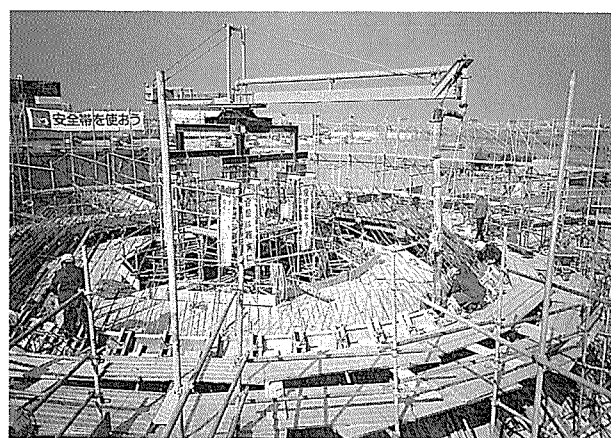


写真-7 回転式コンクリート打設用配管

を最大90とした。クライミング足場は、躯体の形状に合わせて角度を変化できる独立したフレームで構成されている。そこで、円周方向の最大足場配置間隔が3m以下となるように30基配置した。

施工手順は、まず内側クライミング足場を施工位置まで上昇させ、PC鋼材配置後内側鉄筋を組み立てる。次に、内側型枠を固定し、最後に外側型枠を固定してコンクリートを打設する。型枠の位置決めについては、中央の測量架台に光波測距器をセットし、高さと中心からの半径にて管理した。コンクリート打設には、写真-7に示す回転式コンクリート打設用配管(ディストリビューター)を新たに製作し使用した。

4.2.5 頂部工

頂部の施工は、スラッジポケットの一部をプレキャスト化することによって工期の短縮を図った(写真-8)。スラッジポケットは通常、側壁部の施工が完了した後、足場ならびに型枠支保工を組み立て施工される。しかし、今回部材をプレキャスト化したことにより、側壁部並びに頂部ガスドームとの同時施工が可能となった。また、プレキャストブロックを正確かつ堅固に固定することにより、躯体全体の出来形精度を容易に確保すること

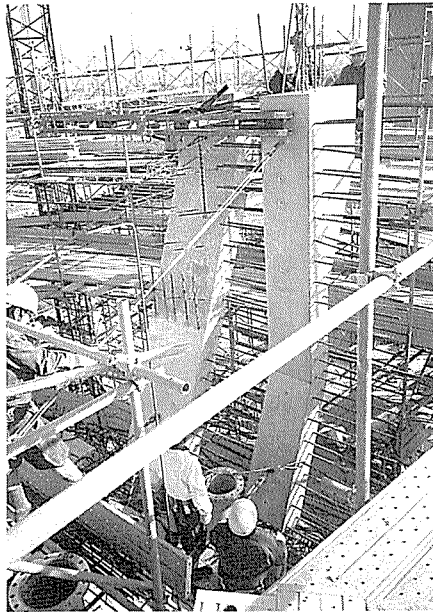


写真-8 スラッジポケットのプレキャスト化

ができた。さらに、コンクリート打設時に特別な支保工を必要としなかったため、高所作業を安全に行うことができた。

4.2.6 その他の工事

躯体構築完了後、保温・外装工・内部防蝕工・連絡橋架設工を並行して行った。消化槽保温材としては硬質ウレタンフォームを使用し、これを外部全面に厚さ 30 mm で吹き付けた。また外装板には、フッ素樹脂鋼板

($t=0.4\text{ mm}$) を採用した。

内部防蝕は、内部全面にエポキシ樹脂を塗布し汚泥の表面が変動する領域より上には、下地にガラスクロスを張り付け補強した。作業は、写真-9, 10 に示すような下部回転足場、側部パイプ足場、上部回転足場を使用して行った。従来はタンクの施工完了後、内部に総足場を組み立てていたが、組立・解体作業の安全性の確保や工期短縮を目的に図-8 に示す回転足場を考案した。

連絡橋の架設は、地表面から 26 m 上空での作業となる。そこで、作業効率と安全性を考慮し橋桁はプレテンション桁とし、壁高欄もプレキャスト部材とした(写真-11)。プレキャスト部材の分割は、建込み位置とクレーン能力を考慮して1ブロック 3 トン以内、片側 8 分

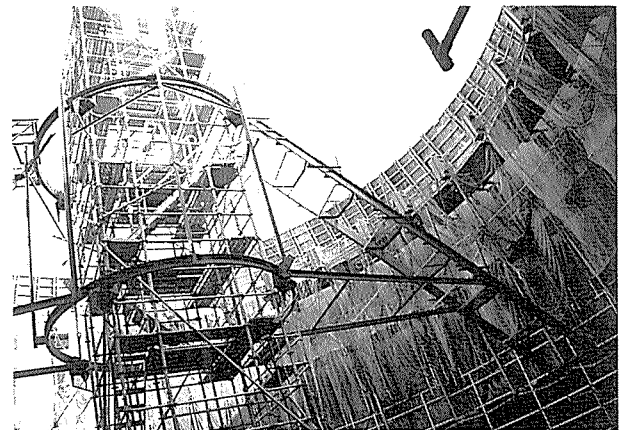


写真-9 回転足場

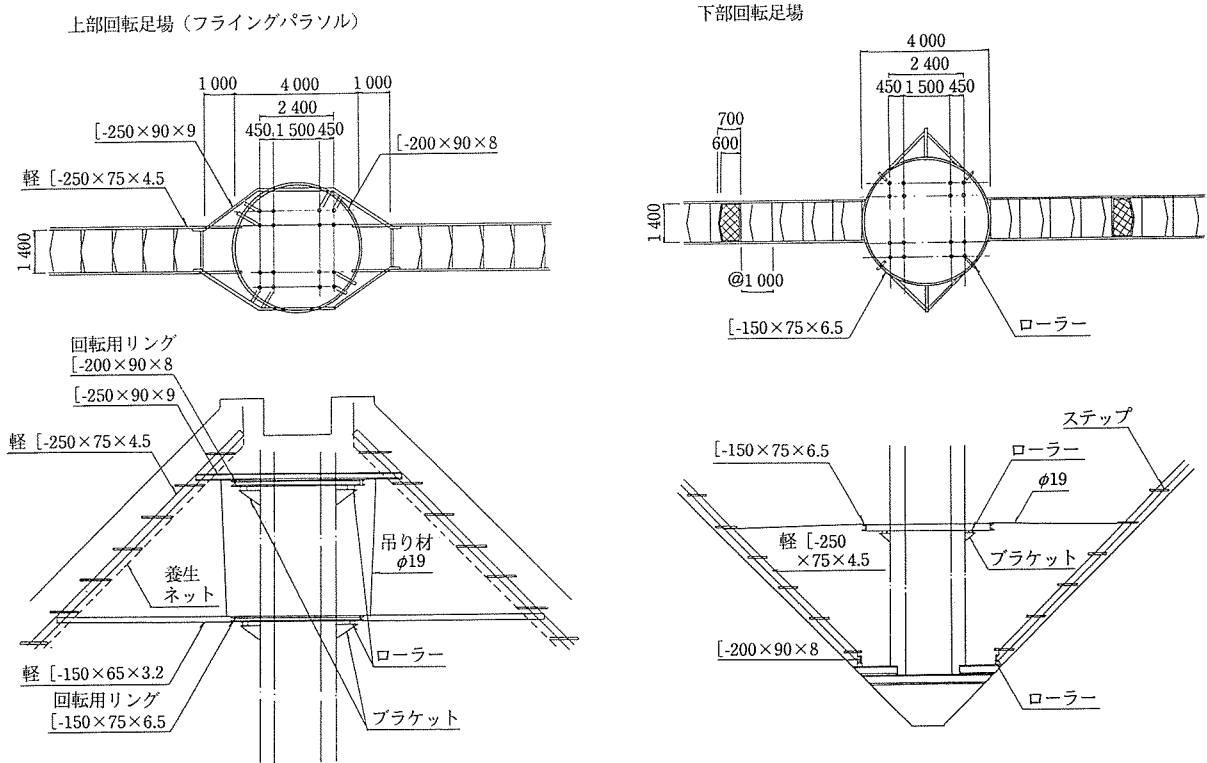


図-8 回転足場

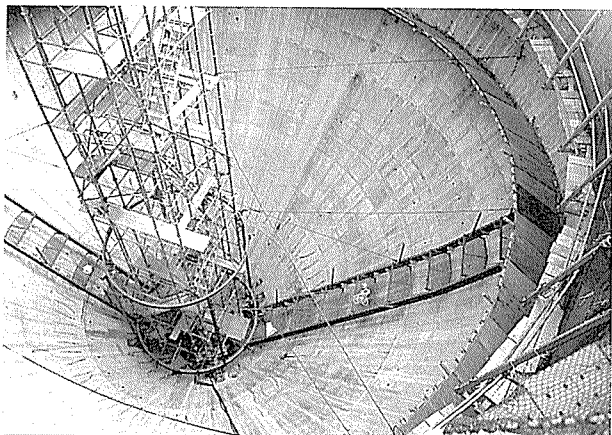


写真-10 回転足場

割とした。ブロックの設置は、両側の高欄2ブロックを1セットとして行った。その結果、連絡橋架設は特別な足場も必要とせず、安全かつ良好な作業ができた。

5. おわりに

大型PC卵形消化槽では、従来の消化槽に比べ大容量のPCケーブルが使用される。このため本工事は、大容量ケーブルの施工、切欠き部の処理、狭隘な作業空間での緊張作業等のPC工事に起因する問題を克服しながらの施工であった。

卵形消化槽のような薄肉シェル部材に大容量ケーブルを適用する場合、定着を考慮した適切な壁厚の確保や定着突起等の設計上の工夫も必要ではあるが、定着具の小

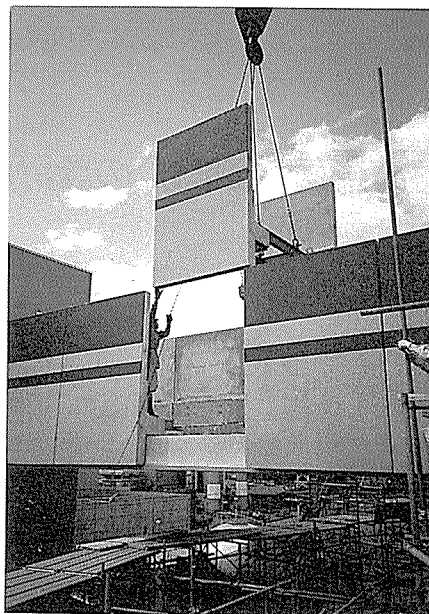


写真-11 壁高欄のプレキャスト化

型化と使用ジャッキの小型軽量化は、必要不可欠である。また、卵形消化槽共通の課題は、型枠資材や作業足場のさらなる効率化を図っていくことである。

最後に本PC卵形消化槽の設計・施工にあたり御指導、御協力をいただいた関係各位に感謝の意を表すとともに、本報告が、今後計画される大型PC卵形消化槽の設計・施工上の参考になれば幸いである。

【1994年7月20日受付】