

城山ダム PC サージタンクの設計と施工について

阿 部 源 次*
伊 藤 豊 文**
松 村 茂 彦***

1. ま え が き

本PCサージタンクは、神奈川県企業庁が神奈川県の工業の発展による発電事業の増強と工業用水の確保を目的とする相模川総合開発事業の一環として計画された連絡水路工事の城山分水槽である。

本分水槽は、調圧水槽をかねたもので地下41mという大容量のためプレストレストコンクリート構造として、計画、実施されたもので、水密性、耐久性などすぐれた性質を十分に発揮できたものと思う。施工については、まだ研究の余地もあるものと思われるが、ここに一例としてその概略をとりまとめて記述する。

2. 構 造 概 要

形 式：プレストレストコンクリート分水槽
工 法：フレッシュナー工法
容 量：8870 m³
側壁高さ：41.00 m
水 深：38.50 m
内 径：16.60 m
側 壁 厚：40.0 cm
施 工：日本鋼弦コンクリートKK

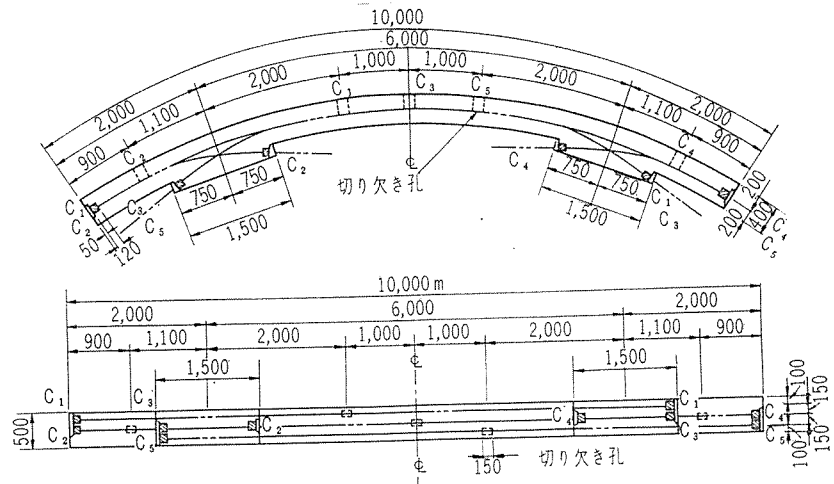
3. 予 備 試 験

(1) 試験の目的

プレストレスト円形構造物の場合、一般にPCケーブルの定着は、円弧の外側に設けるのがPCケーブルの摩擦をできるだけ小さくする意味から、従来行なわれてきたのであるが、本設計の場合、円弧の内側において定着部を設けなければならず、このような場合のPCケーブルの摩擦はどのようになるものか、また定着部におけるコンクリートの応力分布はどのように変化するものかを

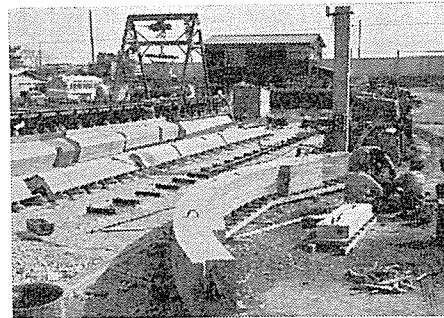
* 日本鋼弦コンクリートKK設計課長
** " 設計係長
*** " 工事課長代理

図-1 試 験 体



設計に先だち、これらの基本的事項の解明を目的として行なったものである。試験体は 図-1 に示すように実物大の円形の試験体を作成し、PCケーブルは 12-φ7 mm フレッシュナーケーブルを使用した(写真-1)。

写真-1



(2) 試験項目

試験項目はつぎの4つの事項について測定した。

- 1) PCケーブルの長さ当りの摩擦係数(λ)の測定。
- 2) 曲線部の角変化による摩擦係数(μ)の測定。
- 3) 実物大の試験体によるPCケーブルの摩擦測定。
- 4) 実物大の試験体によるコンクリート応力度の測定。

コンクリート応力度測定は、抵抗線ひずみ計を用いて測定した。試験体の応力測定位置は 図-2 に示すとおりである。

図-2 コンクリートのひずみ量測定箇所

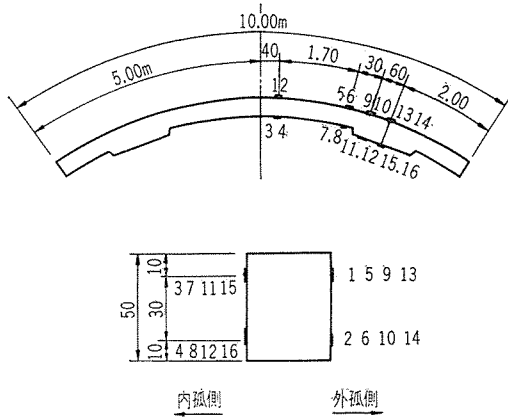


図-3 コンクリート応力度測定表

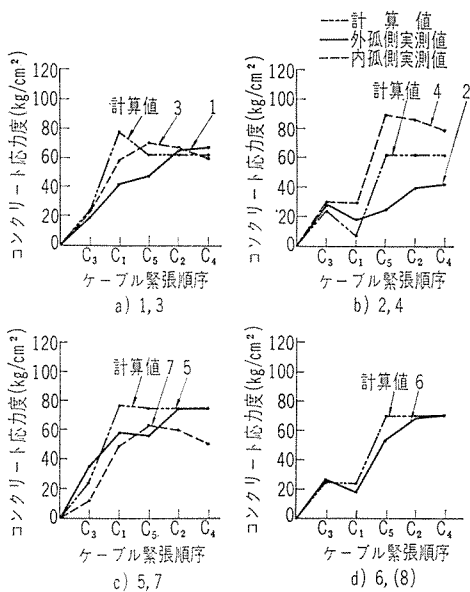
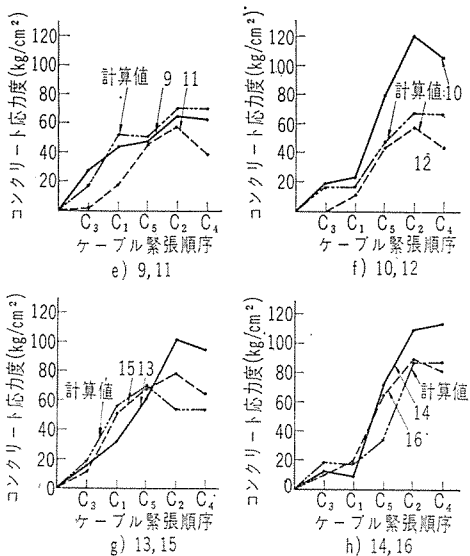


図-4 コンクリート応力度測定表



(3) 試験結果と考察

試験結果は摩擦係数においては $\mu=0.369$, $\lambda=0.0036$ を得た。またコンクリート応力度測定結果と計算値とを比較すると 図-3, 4 に示すとおりである。これによると, PCケーブル定着部付近において局部的引張応力を生ぜず, 円弧の内側にケーブル定着を設けても, なんら支障のないことが確認できた。

4. 設 計

(1) 水槽壁体の設計

a) 内水圧により生ずる応力 水槽の壁体に生ずる応力のフープ方向, 鉛直方向曲げモーメント, せん断力の計算は, 弾性支承上の半無限長のはりと考え Timoshenko の理論により, つぎの一般式で示される。

$$\frac{d^2}{dy^2} \left(F \frac{d^2 w}{dy^2} \right) + \frac{E \cdot t}{r^2} \cdot w = p$$

上式中

$$F = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\nu^2)}$$

E : 弾性係数 ν : ポアソン比

t : 水槽の壁厚 r : 水槽の半径

P : 弾性支承上のはりが受ける分布荷重

また弾性支承上のはりの解に用いられる係数 B は, 次式で求められる。

$$B = \sqrt[4]{\frac{\frac{E \cdot t}{r^2}}{4 E \frac{t^3}{12(1-\nu^2)}}} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 \cdot t^2}}$$

したがって, 壁体に作用する水平方向および鉛直方向の荷重分布は, 水槽高さ h , 半径 r , 壁厚 t に関するもので, $\beta = h^2/2rt$ なる係数が要因となり, B は h の関係となる。

$$B = \frac{\sqrt{3(1-\nu^2)} \cdot \sqrt{2\beta}}{h}$$

以上の計算式より水圧によるフープテンションおよび鉛直方向曲げモーメント, せん断力を求めた。

この場合フープテンションを求めるには, 弾性支承上のはりに作用する反力 p を求める必要がある。

$$p = 2S \cdot B / b \cdot X$$

したがってタンク下端が自由であるときの水圧による荷重, $q(h-y)$ と反力 p との差によって, フープテンションは生じ, 次式によって求める。

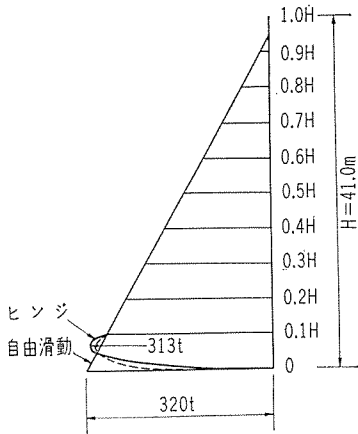
$$P_{yw} = \{q(h-y) - p\} r$$

これを示すと 図-5 のとおりである。

また鉛直方向曲げモーメントは, タンク下端のヒンジを切断したものとすれば, この側壁下端の移動量 w は次式により求める。

$$w = q \cdot h / k$$

図-5 水圧によるフープテンション



ただし $k = Et/r^2$

したがって側壁下端を再び元の位置にもどすためのせん断力 S は、弾性支承上の半無限長のはりと考えれば

$$S = \frac{q \cdot h}{2 \cdot B}$$

となり次式により鉛直方向曲げモーメントが求められる。

$$M_{yw} = \frac{S}{B} \cdot y$$

これを示すと 図-6 のとおりである。

b) 地下水位による外水圧 地下水位により生ずるフープテンションおよび鉛直方向曲げモーメントも、内水圧の場合と同様にして求めた。

これを示すと 図-7, 8 のとおりである。ただし円周方向 prestress 決定においては、安全側に考え外水圧による応力を無視して考えた。

図-7 外水圧による鉛直方向曲げモーメント

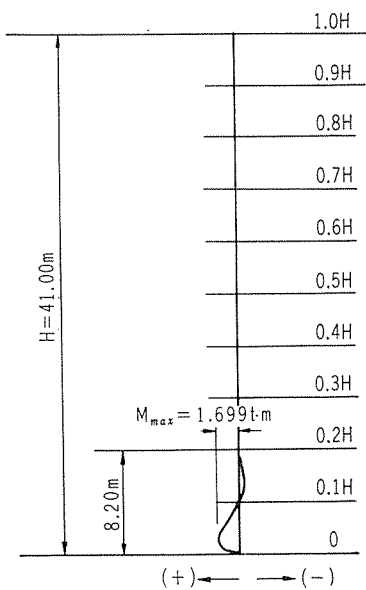
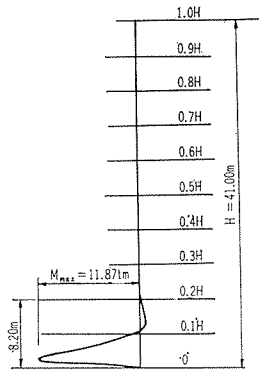


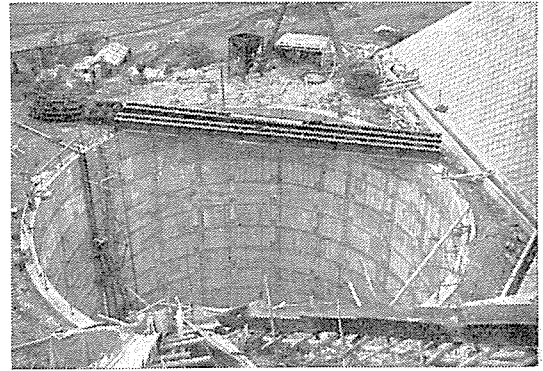
図-6 水圧による鉛直方向曲げモーメント



c) 円周方向 prestress 円周方向 prestress

は、内水圧により生ずるフープテンションに対して、残留応力度を 10 kg/cm^2 として prestress を考えた。土圧は、仮巻きコンクリート完成後内側に PC 壁を打設する方法によったので、PC 壁には考慮しなかった (写真-2)。

写真-2



そこで、水槽の側壁に一律な圧縮応力度 10 kg/cm^2 を与えるために必要な PC 鋼線は、 $12-\phi 7 \text{ mm}$ ケーブルを用いて有効緊張応力度 $\sigma_{pe} = 75 \text{ kg/mm}^2$ とすると、1 ケーブル当りの有効緊張力 $P_e = 34.7 \text{ t}$ となり、側壁 1m 当りの PC ケーブル本数 $N' = 40/34.7 = 1.15$ 本となる。

つぎに水圧に対して側壁の外側より水圧と同一のリング圧縮力を与えるために必要な PC ケーブル本数は、側壁の高さに沿って直線的に変化する。側壁下端における水圧 320 t/m に相応する PC ケーブル本数は、 $320/34.7 = 9.23$ 本/m である。

以上の結果より側壁高さに沿って必要な円周方向 prestress を示せば 図-9 のようになる。また任意の位

図-8 外水圧によるフープテンション

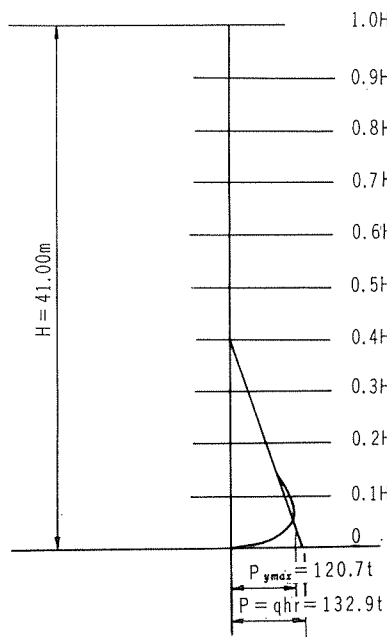
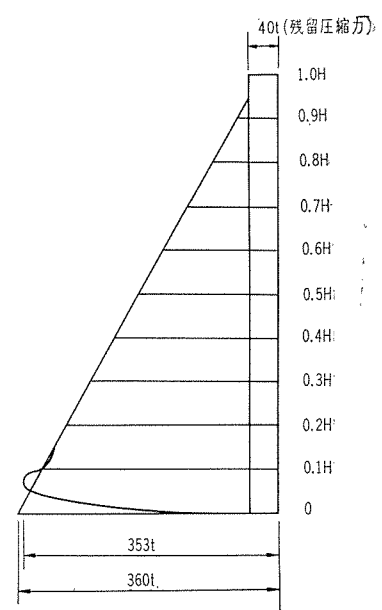
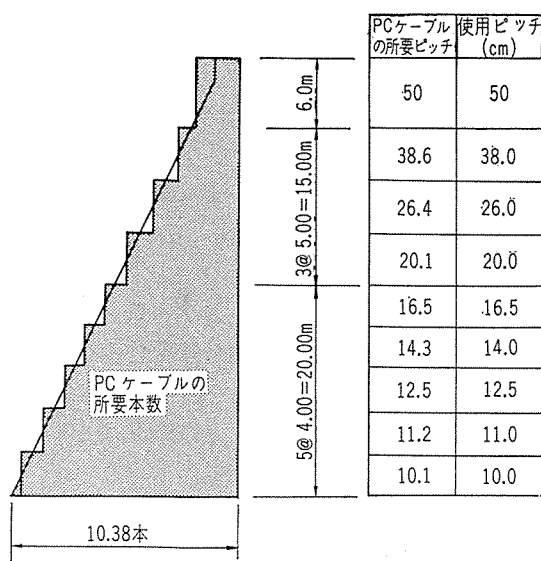


図-9 円周方向 prestress



置における円周方向のPCケーブルの本数およびピッチは、図-10 に示すとおりである。

図-10 高さに沿ってのケーブル本数



施工の都合により一定区間ごとに分割し、この区間においてはPCケーブルのピッチは同一とした。

以上のPCケーブル配置により水槽の低水位時および最高水位時における応力度を表-1 に示す。

d) 鉛直方向プレストレス 側壁に作用する曲げモーメントに対し、鉛直方向プレストレスをPC鋼棒φ27mm(第4種)を使用した。

PC鋼棒の有効緊張応力度 $\sigma_{pe}=73 \text{ kg/mm}^2$ であり、円周を320等分して図-17 に示すように高さ方向にPC鋼棒本数を変化させ、プレストレスの分布を変化させ

表-1 測壁の円周方向合成応力度 (kg/cm²)

y (m)	低水位時 (kg/cm ²)				最高水位時 (kg/cm ²)			
	σ_{ce} 有効プレストレス	σ_{c1} 地下水による圧縮力	σ_{c2} 水圧による引張力	σ_c 合成応力度	σ_{ce} 有効プレストレス	σ_{c1} 地下水による圧縮力	σ_{c2} 水圧による引張力	σ_c 合成応力度
0	50.0	0	0	50.0	50.0	0	0	50.0
0.82	72.7	17.1	-4.6	85.2	72.7	17.1	-42.3	47.5
1.64	81.8	26.7	-6.4	102.1	81.8	26.7	-67.0	41.5
2.46	86.0	30.2	-6.7	109.5	86.0	30.2	-77.0	39.2
3.28	85.8	29.6	-5.4	110.0	85.8	29.6	-78.2	37.2
4.10	83.5	27.3	-3.5	107.3	83.5	27.3	-75.2	35.6
4.92	80.7	24.9	-1.5	104.1	80.7	24.9	-71.1	33.9
5.74	78.5	22.7	-0.1	101.1	78.5	22.7	-68.7	32.5
6.56	76.2	20.6	0	96.8	76.2	20.6	-66.2	30.6
7.38	75.0	18.6	+0.1	93.7	75.0	18.6	-65.3	28.3
8.20	73.0	17.2	0	90.2	73.0	17.2	-62.8	27.4
12.30	64.5	8.7	-	73.2	64.5	8.7	-54.3	18.9
16.40	56.0	0.2	-	56.2	56.0	0.2	-45.8	10.4
20.50	47.5	0	-	47.5	47.5	0	-37.3	10.2
24.60	39.0	-	-	39.0	39.0	-	-28.8	10.2
28.70	30.5	-	-	30.5	30.5	-	-20.3	10.2
32.80	22.0	-	-	22.0	22.0	-	-11.8	10.2
36.90	13.3	-	-	13.3	13.3	-	-3.3	10.0
41.00	10.0	-	-	10.0	10.0	-	0	10.0

た。

鉛直方向の応力度は、低水位時、最高水位時について求めると表-2 に示すとおりである。

5. 施 工

(1) 仮 設 工

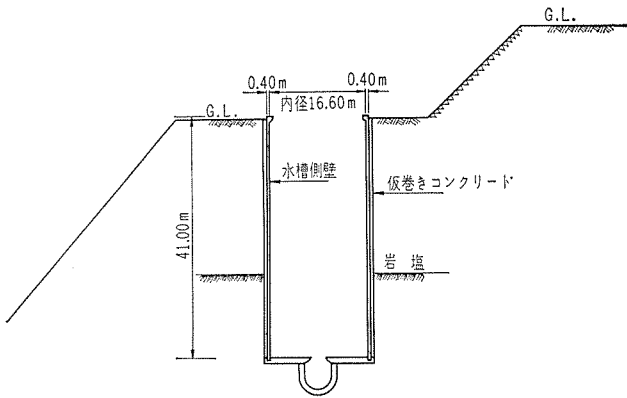
本水槽は図-11 に示すように段丘の肩に施工されるので、ミキシングプラントおよび骨材置場を上段に設置しなければならなかった。プラントは単位打設量 60 m³ から 20 m³/h 能力のプラントとした。

表-2 鉛直方向の合成応力度

(kg/cm²)

y (m)	低水位時 (kg/cm ²)										最高水位時 (kg/cm ²)					
	自重による応力度	有効プレストレス	地下水		低水位		フープ方向プレストレス		合成応力度		自重による応力度	有効プレストレス	地下水		合成応力度	
			内縁	外縁	内縁	外縁	内縁	外縁	内縁	外縁			内縁	外縁	内縁	外縁
0	9.8	56.6	0	0	0	0	0	0	66.4	66.4	9.8	56.6	0	0	66.4	66.4
0.82	9.6	"	-18.5	+18.5	+6.2	-6.2	-43.1	+43.1	10.8	121.6	9.6	"	-18.5	+18.5	47.7	84.7
1.64	9.4	"	-16.7	+16.7	+5.6	-5.6	-38.9	+38.9	16.0	116.0	9.4	"	-16.7	+16.7	49.3	82.7
2.46	9.2	"	-10.1	+10.1	+3.6	-3.6	-23.6	+23.6	35.7	95.9	9.2	"	-10.1	+10.1	55.7	75.9
3.28	9.0	"	-4.5	+4.5	+1.5	-1.5	-10.4	+10.4	52.2	79.0	9.0	"	-4.5	+4.5	61.1	70.1
4.10	8.8	"	-0.6	+0.6	+0.2	-0.2	-1.4	+1.4	63.6	67.2	8.8	"	-0.6	+0.6	64.8	66.0
4.92	8.6	"	+0.6	-0.6	-0.2	+0.2	+1.4	-1.4	67.0	63.4	8.6	"	+0.6	-0.6	65.8	64.6
5.74	8.5	28.3	+0.9	-0.9	-0.3	+0.3	+2.1	-2.1	39.5	34.1	8.5	28.3	+0.9	-0.9	37.6	35.9
6.56	8.3	"	+0.6	-0.6	-0.2	+0.2	+1.4	-1.4	38.9	35.3	8.3	"	+0.6	-0.6	37.2	36.0
7.38	8.1	"	+0.1	-0.1	0	0	+0.3	-0.3	36.8	36.0	8.1	"	+0.1	-0.1	36.5	36.3
8.20	7.9	"	0	0	0	0	+0.1	-0.1	36.3	36.1	7.9	"	0	0	36.2	36.2
12.30	6.9	14.2	0	0	0	0	0	0	21.1	21.1	6.9	14.2	0	0	21.1	21.1
16.40	5.9	"	0	0	0	0	0	0	20.1	20.1	5.9	"	0	0	20.1	20.1
20.50	4.9	"	0	0	0	0	0	0	19.1	19.1	4.9	"	0	0	19.1	19.1
24.60	3.9	7.1	0	0	0	0	0	0	11.0	11.0	3.9	7.1	0	0	11.0	11.0
28.70	3.0	"	0	0	0	0	0	0	10.1	10.1	3.0	"	0	0	10.1	10.1
32.80	2.0	"	0	0	0	0	0	0	9.1	9.1	2.0	"	0	0	9.1	9.1
36.90	1.0	"	0	0	0	0	0	0	8.1	8.1	1.0	"	0	0	8.1	8.1
41.00	0	"	0	0	0	0	0	0	7.1	7.1	0	"	0	0	7.1	7.1

図-11 段丘に施工の PC サージタンク



生コンの運搬は、地下 41m にもなるので、例えばキャリヤーで運搬するものと仮定すれば、1 サイクル当たり 15 分を要し、最大 3~4m³ が最大能力となるので、内径 15cm の鋼管を分水槽の中央に仮設しセントルの中央に降し、フィダーとしてコンクリート運搬を行なった。

セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、混和材は使用しなかった。

図-12 セントルの図

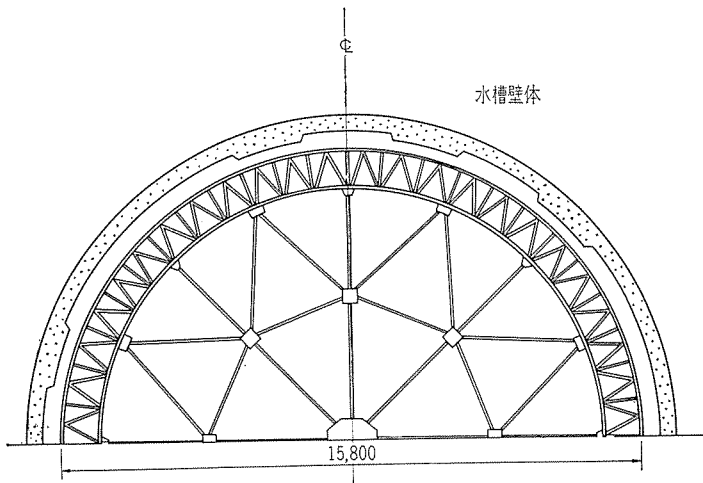
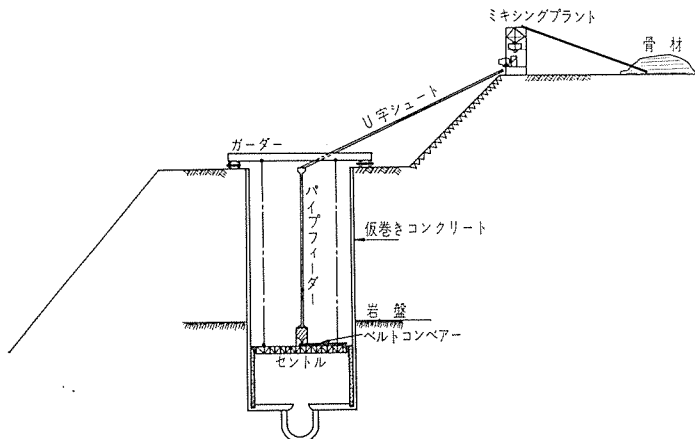


図-13 スライディングフォームによるコンクリート打設方法



(2) 側壁工

側壁用型わくは、底板コンクリート打設後、円形構造のセントル 図-12 を底版上で組み、これにメタルフォームを取りつけ、1.8m リフト型わくとした(写真-3, 4)。

まず地下式水槽のため地上にサンドルを組み、これにプレート ガーダーを架け仮設用ばりとした。このはりを 2 本用い 図-13 に示すように 10t チェーンブロック 4 台を用いて底版上に組まれたセントルを所定の位置につり側壁下端より型わく組みを行ない、コンクリート打設は 1.8m リフトとしスライディングフォームとした。コンクリート打設はセントル中央のフィダー口よりベルトコンベアー 2 台を中心角で 180° 回転できるようにして、円周の相対する 2 点より同時に打設を開始し型わくの片寄りを防止した。コンクリートの締固めは 200V 用

写真-3

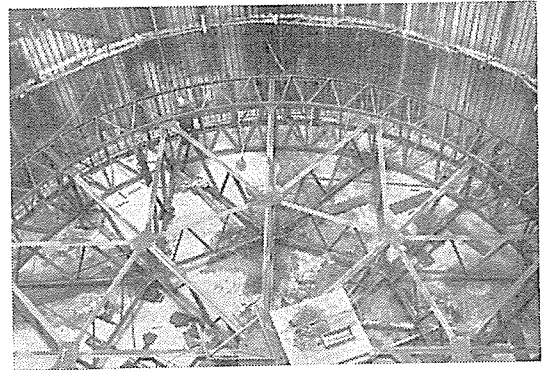


写真-4

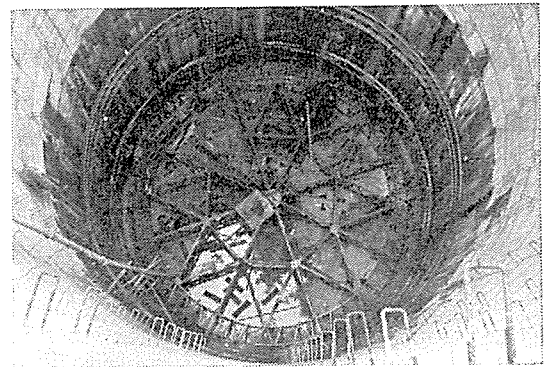
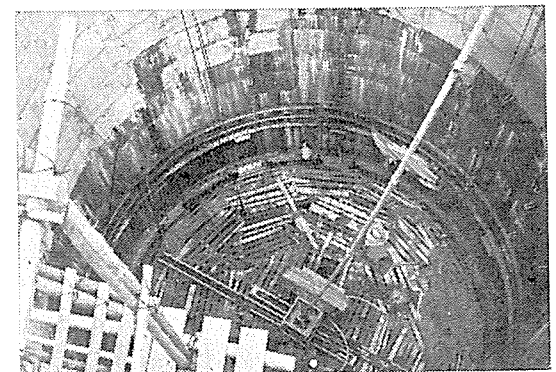


写真-5



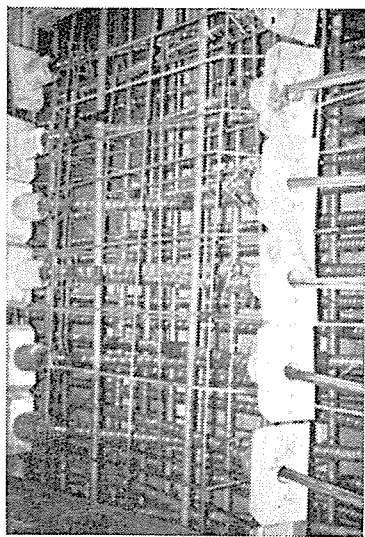
フレキシブル内部振動機を使用して念入りに締固めを行ない、外部振動機は用いなかった(写真-5)。

円周方向および鉛直方向のPC鋼材は、写真-6に示すように非常に密に

写真-6

配線されるので、コンクリート打設は入念に行ないケーブルの移動を起さないように注意した。

打設計画は当初4日サイクルで計画したが、工期短縮の必要から、昼夜通し作業を行ない2日サイクルに短縮した。1回のコンクリート打設量は50m³であったが、平均5時間半で打設した。



コンクリートの養生は冬期でなかったことと、側壁下端より21.6mまでは地下水位で常に湿度の高い状態であったので特別の養生を行わず、21.6m以上では散水養生とした。側壁および底版には防水工は施さなかったが、水密性のコンクリートを打設することができた。

コンクリート打継ぎ目にはすべて横浜ゴムのビノン止水板B-102を用い、ろう水に配慮した。

(3) プレストレッシング

a) 鉛直方向プレストレッシング 円周方向にプレ

ストレスを側壁下端より順次緊張するとき、側壁には作業時の曲げモーメントが生ずる。したがって円周方向にプレストレスを与える前に曲げを生ずる範囲に鉛直方向プレストレスを与える必要がある。また、側壁の鉛直方向PC鋼棒は途中3段に定着部を設けているので、この点にて緊張定着後側壁の立上りを行なうことになる。まず下端より4.92mで第1回目のプレストレッシングを行ない。隔本ごとの未緊張PC鋼棒はカブラーにて継ぎ、所定の位置まで延長した。第2回目は下端より8.20m、第3回は20.50m、最後は最上段と4回にわけて緊張定着を行なった。緊張ジャッキはセンターホールジャッキにて行ない。緊張力は45.5tである。

b) 円周方向プレストレス 円周方向プレストレス

は、12-φ7mm フレッシュネーケーブルで緊張力 $P_t=56.5t$ にて行なった。円周方向一段のPCケーブルは3ケーブルであるから、緊張は6台のジャッキを同時作動させ、伸びの補正を行ないながら定着した。ポンプは200t用電動オイルポンプを使用することにより、作業

時間を短縮することができた。

当初の緊張計画では、側壁コンクリート打設完了後、鉛直方向プレストレッシングを100%導入してから、円周方向プレストレッシングの計画であったが、前述のごとく、工期短縮の必要から、側壁コンクリート打設と併行して下端より緊張作業を行なった。

すなわち側壁コンクリートが20.5mまで打設完了、鉛直方向プレストレス導入されている場合に側壁下端より円周方向プレストレッシング時の応力度を検討した。これを示すと表-3、4のとおりである。

PCケーブルの円周方向配置は図-14に示すように中心角にて120°にて定着端を設け、定着端を30°ずらすことにより緊張力の分布を平均化した。当水槽は、付属設備が一部に設けられるため等分に中心角を40°ずらすことはできなかったのである。PCケーブル定着部の配筋図を示すと図-15のとおりである。

表-3 側壁コンクリート打設とフープ方向プレストレッシングを並行作業時の円周方向応力度

y (m)	プレストレス (kg/cm ²)	地下水圧 (kg/cm ²)	合計応力度 (kg/cm ²)
0	+ 69.5	0	+ 69.5
0.82	+100.2	+4.6	+104.8
1.64	+113.8	+6.4	+120.2
2.46	+119.6	+6.7	+126.3
3.28	+119.2	+5.4	+124.6
4.16	+116.0	+3.5	+119.5
4.92	+112.2	+1.5	+113.7
5.74	+109.2	+0.1	+109.3
6.56	+105.9	0	+105.9
7.38	+104.2	-0.1	+104.1
8.20	+101.5	0	+101.5
12.30	+ 89.7	—	+ 89.7
16.40	+ 77.8	—	+ 77.8
20.50	—	—	—

表-4 側壁コンクリート打設とフープ方向プレストレッシングを並行作業時の鉛直方向応力度

y (m)	鉛直方向プレストレス導入直後の応力度 (kg/cm ²)	側壁自重による軸方向圧縮応力度 (kg/cm ²)	外水圧による曲げ応力度 (kg/cm ²)		フープ方向ケーブル緊張作業中に生ずる最大曲げ応力度 (kg/cm ²)		合計応力度 (kg/cm ²)	
			内縁	外縁	内縁	外縁	内縁	外縁
0	56.6	4.8	0	0	0	0	+61.4	+ 61.4
0.82	〃	4.6	-6.2	+6.2	-35.1	+35.1	+19.9	+102.5
1.64	〃	4.4	-5.6	+5.6	-41.9	+41.9	+13.5	+108.5
2.46	〃	4.2	-3.6	+3.6	-41.5	+41.5	+11.7	+105.9
3.28	〃	4.0	-1.5	+1.5	-33.1	+33.1	+26.0	+ 95.2
4.10	〃	3.8	-0.2	+0.2	-32.4	+32.4	+28.4	+ 93.0
4.92	〃	3.6	+0.2	-0.2	-31.8	+31.8	+28.6	+ 91.8
5.74	24.1	3.5	+0.3	-0.3	-31.1	+31.1	- 3.2	+ 58.4
6.56	〃	3.3	+0.2	-0.2	-30.4	+30.4	- 2.8	+ 57.6
7.38	〃	3.1	0	0	-29.8	-29.8	- 2.6	+ 57.0
8.20	〃	2.9	—	—	-29.2	+29.2	- 2.2	+ 56.2
12.30	8.1	1.9	—	—	-25.6	+25.6	-15.6	+ 35.6
16.40	〃	0.9	—	—	-22.4	+22.4	-13.4	+ 31.4
20.50	〃	0	—	—	—	—	—	—

緊張力分布は、緊張端のもどりを考慮して求めると図-16のようになり、直後の計算値 $P_t=41.4t$ より約2t程度上回っている。

PCケーブルの緊張端応力 $P_t=P_0(1+a)e^{\mu\alpha+2l}$ より

図-17 P C分水槽設計図

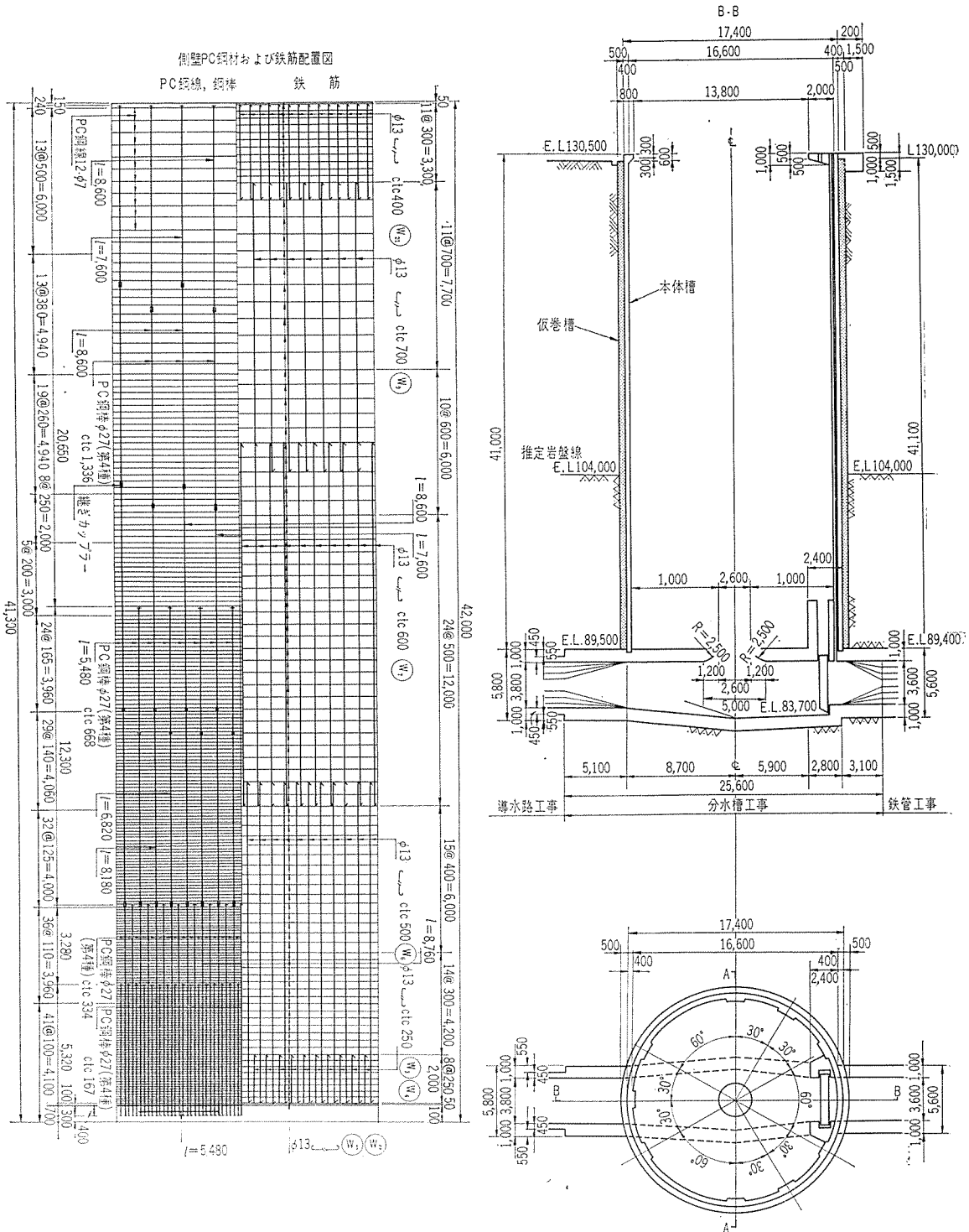


図-14 円周方向 PC ケーブルの定着位置

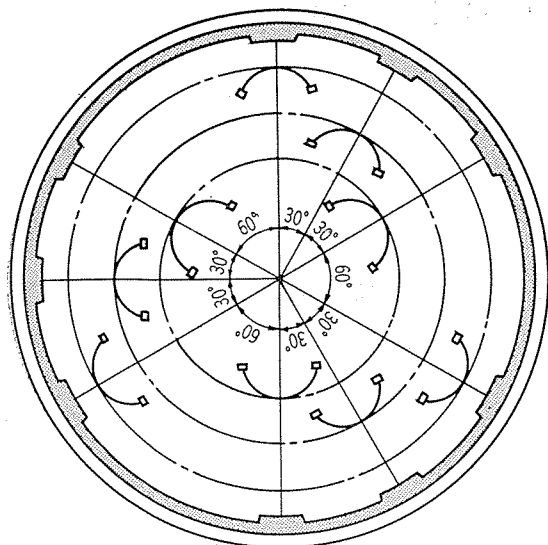
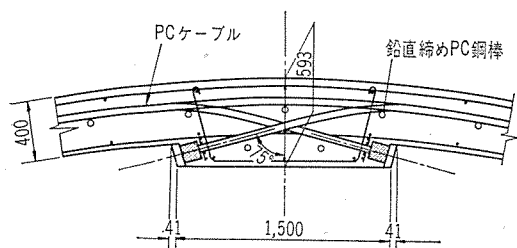


図-15 PC ケーブル定着部詳細

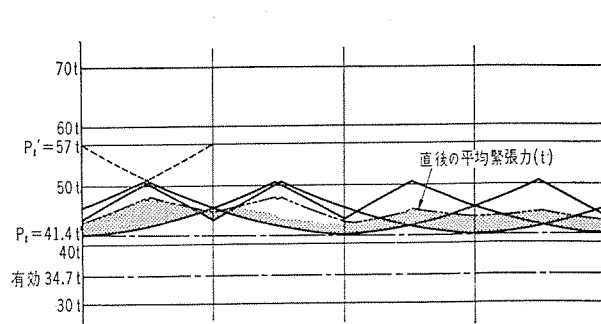


求めると、 $P_t=123.2 \text{ kg/mm}^2$ である。 a はジャッキ内部の摩擦損失で 4% 程度である。図-17 に設計図を示す。

6. あとがき

当分水槽の工事は、昭和 39 年 4 月より同年 8 月末の

図-16 フープ方向の平均緊張力分布図



施工であったが、39 年末当水槽の防護工として PC ばりを架け金網工を行なった。グラウト工、工事材料などについては紙面の都合上割愛させていただき、工事写真もできるだけ載せたいと思ったが、地下工事であって満足に写れていないので一部分のみとなった。

何分文章がまずく判り難い点も多いと思いますがご判読願いたい、本分水槽の設計施工について概略述べたが、今後プレストレスト コンクリート円形構造物の計画に何等かの御参考ともなれば幸と存じます。

参 考 文 献

- 1) 猪股俊司：プレストレスト コンクリートの設計および施工
- 2) 鳥羽茂三郎 外：プレストレスト コンクリート，5 巻 5 号 10 (1963)
- 3) 岡田・神山：プレストレスト コンクリートの設計
- 4) Timoshenko：Theory S. of plates and shells.
- 5) Creasy, L. R.：Presstressed concrete Cylindrica Tanks.
- 6) 遠山・杉原：土木施工，5 巻 11 号，11. (1964)

1964.12.20・受付

「PC 設計施工資料」欄の御利用について

会員各位の御便宜をはかるため協会誌巻末に「PC 設計施工資料」欄を常置し、好評を博しております。より多くのデータを効果的に紹介したいので会社、団体の御利用をお待ちしています。なお、本欄についての御問い合わせは事務局にお願いいたします。

1. 対 象：PC 関係の材料，工法，機器
2. 内容・体裁：製品，工法などの特徴，性能，使用法などを一件あたり会誌 2 ページ分にまとめて掲載する。
用紙は厚紙を用いて切離して利用してできるようにする。
3. 内容の検討：提供先において十分検討されたものを編集委員会でチェックし内容の客観性を確保する。