

# サイダセメント工場のPCサイロの設計と施工

田 中 義 則\*

## 1. ま え が き

サイダセメント工場は、アルジェリア建設資材公団より、丸紅（株）、川崎重工業（株）が受注し、今秋完成を目ざし建設中の年産 50 万 t の中規模セメント工場である。

ここに本施設の内、土建関係施設の設計および施工管理に従事する機会を得ましたので、特にPCサイロの設計と施工について報告する。

## 2. 設 計

本プラントの土建設計はフランス規準を適用して行ったが、PCサイロの設計開始当時（1975年1月）、サイロ構造基準（SNBATI）が公布されていなかったため、当該サイロには、ドイツ基準 DIN 1055, Blatt 6 に基づきサイロ圧、温度応力を算出した。種類および容量は次のとおりである。

- 1) エアーブレンディングサイロ、5 000 t 2 基
- 2) クリンカーサイロ 3 000 t 6 "
- 3) セメントサイロ 3 000 t 5 "

半径、壁厚等はすべて共通であるので、以下、エアーブレンディングサイロ（ホモサイロ）について報告する。

### 2.1 設計条件

- 外 径：15.500
- 内 径：15.000
- 高 さ：39.000 (GL+0.000 より)
- サイロ理論高さ：25.000 m

#### 構造形式

- PC構造：サイロ側壁（鉛直方向はRC造）
- RC構造：サイロ架台、底版
- 基 礎：場所打ち杭（φ 1200）
- 屋 根：RCプレキャストスラブ、鉄骨梁

#### 設計基準強度

- 側 壁  $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$
- サイロ底版、屋根  $\sigma_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2$
- フーチング  $\sigma_{ck} = 230 \text{ kg/cm}^2$

#### 許容曲げ圧縮強度（PC部材について）

- 導 入 時  $\sigma_{ca} = 0.6 \sigma_{ck} = 184 \text{ kg/cm}^2$

設計荷重時  $\sigma_{ca} = 0.42 \sigma_{ck} = 129 \text{ kg/cm}^2$

#### PC鋼材

引張強度 ( $R_G$ ) :  $R_G = 159 \text{ kg/mm}^2$

降伏点強度 ( $T_G$ ) :  $T_G = 135 \text{ kg/mm}^2$

初期応力  $\sigma_i = 135 \text{ kg/mm}^2$

鉄 筋 鉄筋の呼称、許容応力度は CCBA 68 による。

HA 12~HA 20 :  $F_e E 42 \sigma_{en} = 4 200 \text{ kg/cm}^2$

HA 22~HA 32 :  $F_e E 40 \sigma_{en} = 4 000 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma_{en}$  : 降伏点応力度

### 2.2 サイロ壁に作る荷重

#### 2.2.1 内容物による圧力

一般に最大荷重状態は表-1 に示された状態で生じる。鉛直圧力の最大は投入時に生じ次式で表わされる。

表-1

荷 重	粒状のサイロ原料		粉状のサイロ原料	
	有限深さ	無限深さ	有限深さ	無限深さ
垂 直 荷 重 $P_v$	充 填	充 填	充 填	充 填
水 平 荷 重 $P_h$	排 出	排 出	排 出	充=排
壁面マサツ荷重 $P_w$	排 出	充=排	排 出	充=排

$$\max P_v = r \cdot z_{of}$$

$$P_v(z) = \max P_v \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{z_{of}}}\right)$$

サイロ原料のブリッジ崩壊が生じる恐れのある場合

$$P_v(z) = r \cdot h \leq 2 \cdot \max P_v \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{z_{of}}}\right) \text{ とする。}$$

水平圧力の最大は排出時に生じ次式で表わされる。

$$\max P_h = r \cdot \lambda_e \cdot z_{oe}$$

$$P_h(z) = \max P_h \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{z_{oe}}}\right)$$

上記圧力を底版より、 $1.2 \cdot (2r - d)$  か、 $0.75 h$  の内の低い高さの範囲で減少させる (DIN 1055, Blatt 6)。

ここに

$z, \bar{z}$  : (図-2 参照)

$r$  : サイロ半径 (サイロ壁厚中心まで)

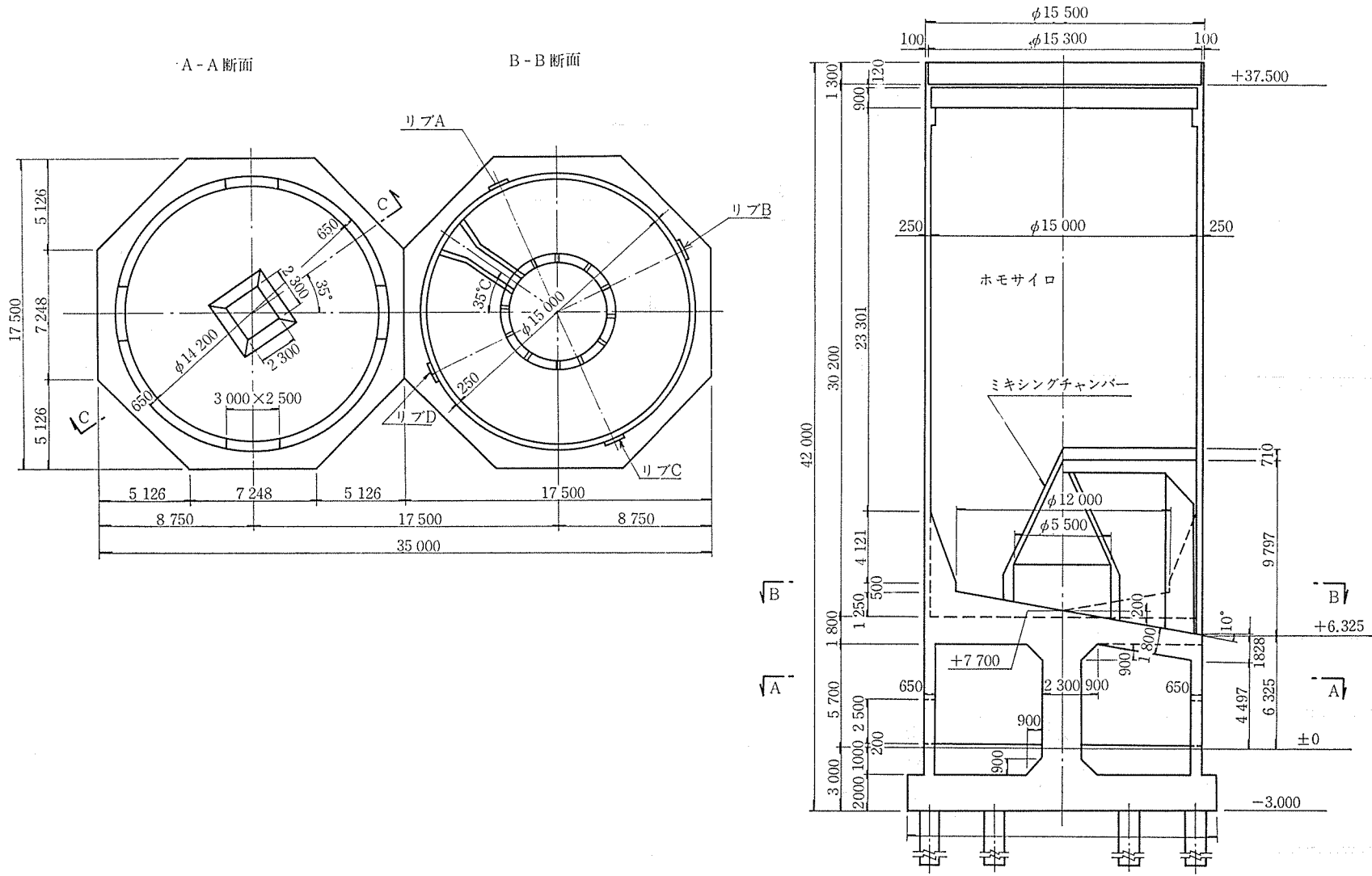
$d$  : サイロ壁厚

$h$  : サイロ高さ

$$L = \sqrt{\frac{r \cdot d}{\sqrt{3}}} : \text{サイロ円筒の弾性長}$$

$F$  : サイロ面積 ( $\pi r^2$ )

\* 八千代エンジニアリング (株) 構造第1部主幹



図一 ホモサイロ構造図

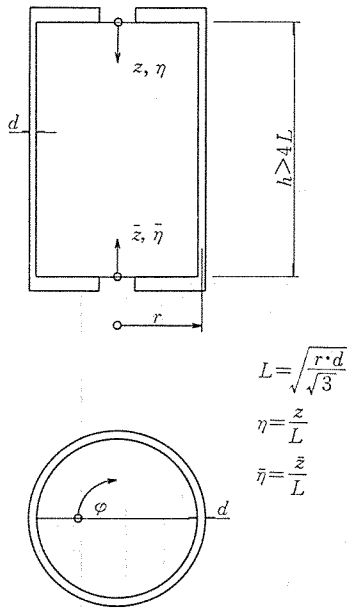


図-2 座標軸

$U$  : サイロ周長 ( $2\pi r$ )

$r$  : 内容物の単位体積重量

$\mu_f$  : 投入時の壁面摩擦係数 ( $\tan \delta_f = \tan 20^\circ$ )

$\mu_e$  : 排出時の壁面摩擦係数 ( $\tan \delta_e = \tan 20^\circ$ )

$\lambda_f$  : 投入時のサイロ圧係数 ( $\lambda_f = P_h/P_v = 0.5$ )

$\lambda_e$  : 排出時のサイロ圧係数 ( $\lambda_e = P_h/P_v = 1.0$ )

$z_{of} = \frac{F}{\mu_f \cdot \lambda_f \cdot U}$  : 投入時理想深度 (m)

$z_{oe} = \frac{F}{\mu_e \cdot \lambda_e \cdot U}$  : 排出時理想深度 (m)

セメントの単位体積重量, 内部摩擦角は, DIN 1055, Blatt 1 より求める。

$$r = 1.7 \text{ t/m}^3 \quad \rho = 20^\circ$$

充填時

$$\delta_f = 1.00 \quad \rho_f = \tan 20^\circ = 0.325 \quad \lambda_f = 0.5$$

排出時

$$\delta_e = 1.00 \quad \rho_e = 0.325 \quad \lambda_e = 1.0$$

### 2.2.2 ミキシングチャンバーによる付加圧力

本サイロは原料混合装置として, 図-1 に示すようなミキシングチャンバーをサイロ槽内に有し, サイロ底版上に配置されたパイプより, 圧縮空気を吹き込み, 原料を攪拌する。この時, 生じる粉体圧の増加, および付加空気圧のサイロ槽内における影響を文献 3) により求めた。最終設計水平圧力 ( $P_h$ ) は 図-3 の実線を用いる。

### 2.3 温度差および乾燥収縮による側壁応力

サイロ内壁と外壁の温度差

$$\Delta T = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{T_i - T_a}{\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{k}\right)} = \frac{d(T_i - T_a)}{0.35 + d}$$

$T_i$  : サイロ内側の壁の温度 ( $T_i = 90^\circ - 44.5 = 45.5$

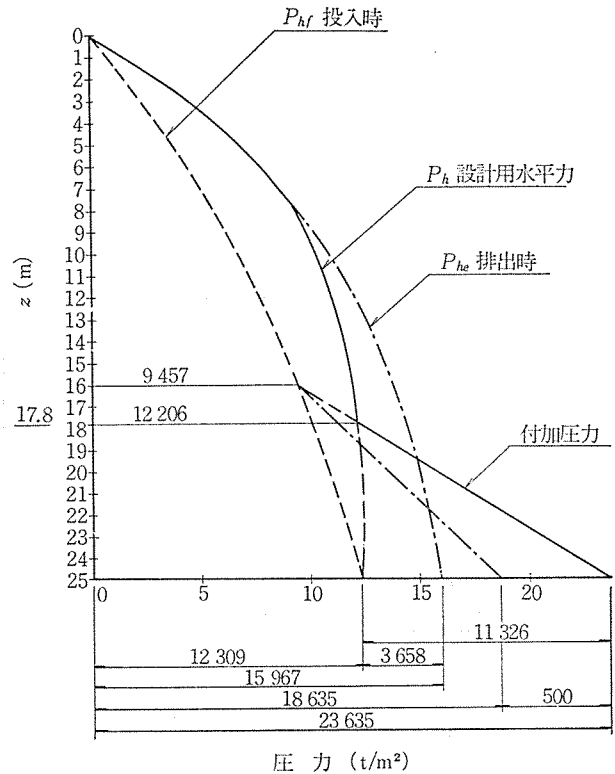


図-3 水平圧力

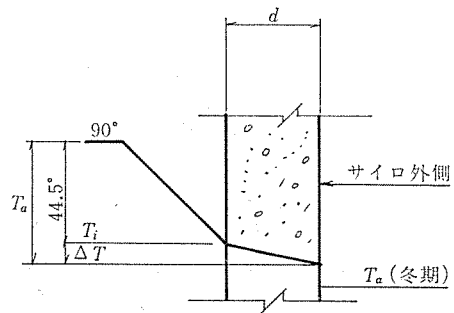


図-4 サイロ壁に生じる温度差

( $^\circ\text{C}$ )

$T_a$  : サイロ外側の温度 ( $-7^\circ\text{C}$ )

$\lambda$  : 鉄筋コンクリートの熱伝導率 ( $1.75 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}^\circ$ )

$d$  : サイロの側壁厚 (m)

$k$  : 熱慣流抵抗 ( $\text{m}^2\cdot\text{h}^\circ/\text{kcal}$ )

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{d}{\lambda} = 0.20 + \frac{d}{1.75}$$

$\frac{1}{\alpha}$  : 熱伝達率の総和 =  $0.20 \text{ (m}^2\cdot\text{h}^\circ/\text{kcal})$

$\lambda$  : 熱伝達率 =  $1.75 \text{ (kcal/m}\cdot\text{h}^\circ)$

$$\therefore \Delta T = \frac{0.25 \times (45.5 + 7)}{0.35 + 0.25} \approx 22^\circ\text{C}$$

### 2.4 一様温度

$$\epsilon_T = \alpha_T \cdot T$$

$$T = 25^\circ\text{C} \quad \alpha_T = 10^{-5}$$

### 2.5 断面力 ( $N_\phi, M_z, Q_x$ ) の計算

#### 2.5.1 円筒に生じる断面力

円筒に生じる断面力は、膜応力と曲げ応力を重ね合わせて求められる。フープテンションを例にとれば、

$$N_{\varphi} = n_{\varphi 0} + n_{\varphi R} + n_{\varphi M}$$

ここに

$n_{\varphi 0}$  : 膜応力状態によるフープテンション

$n_{\varphi R}$  : 曲げ応力状態による縁端反力  $R$  によるフープテンション

$n_{\varphi M}$  : 曲げ応力状態による縁端モーメント  $M$  によるフープテンション

縁端に  $R$ ,  $M$ , が作用した時の断面力は次のとおり。

$$n_{\varphi R} = \frac{R \cdot M}{d} \cdot \beta_1 \quad n_{\varphi M} = -2 \sqrt{3} \cdot \frac{M}{d} \cdot \beta_3$$

$$m_{zR} = R \cdot L \cdot \beta_2 \quad m_{zM} = M \cdot \beta_4$$

$$Q_{zR} = R \cdot \beta_2 \quad Q_{zM} = \frac{2M}{L} \cdot \beta_2$$

$$E \cdot \tau_{\omega R} = \frac{r}{d} n_{\varphi R} \quad E \cdot \tau_{\omega M} = \frac{r}{d} n_{\varphi M}$$

$$E \cdot \theta_R = 2 \sqrt{3} \cdot \frac{R \cdot r}{d^2} \cdot \beta_4 \quad E \cdot \theta_M = \frac{Z \cdot M \cdot r}{L d^2} \cdot \beta_1$$

ここに  $\beta_1 = -2 \sqrt{3} e^{-\eta} \cos \eta$

$$\beta_2 = -e^{-\eta} \sin \eta$$

$$\beta_3 = e^{-\eta} (\sin \eta - \cos \eta)$$

$$\beta_4 = e^{-\eta} (\sin \eta + \cos \eta)$$

$$\eta = \frac{z}{L}$$

荷重による断面力 ( $N_{\varphi}$ ,  $M_z$ ,  $Q_z$ ) は 図-5 に示す。

### 2.5.2 円周方向プレストレス

図-6 のフープテンション  $N_{\varphi}$  に対し、残留応力を  $5 \text{ kg/cm}^2$  として、プレストレスを考えた。PCケーブルは、アルジェリアにおいて、最も一般的に用いられているフレッシュケーブル、 $12\phi 7 \text{ mm}$  を使用し、有効緊

フープテンション

曲げモーメント

せん断力

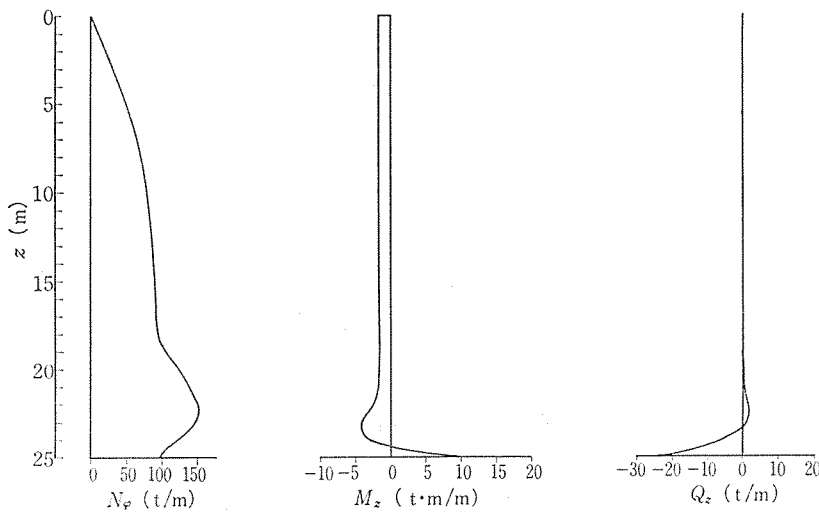


図-5 断面力 ( $N_{\varphi}$ ,  $M_z$ ,  $Q_z$ )

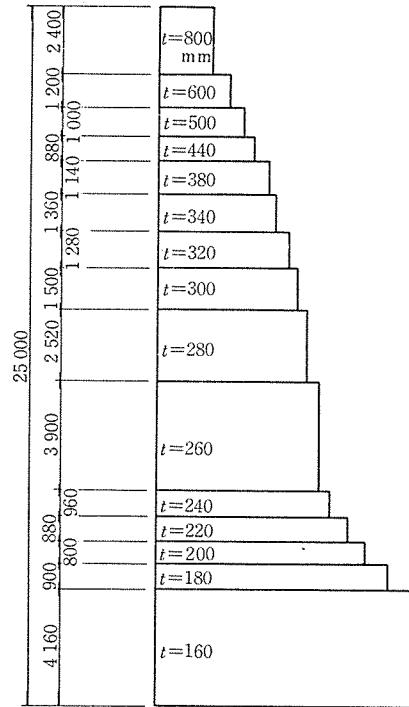


図-6 PCケーブル配置図

張力を次式より求め、小さい方の値  $\sigma_{p2} = 24.35 \text{ t}$  を使用し、ケーブル本数を決定した。

$$\sigma_{p1} = 1.02 \sigma_{p0} - 0.8 \cdot \Delta \sigma_{pi}(x) = 83.4 \text{ kg/mm}^2 \quad (38.5 \text{ t})$$

$$\sigma_{p2} = 0.98 \sigma_{p0} - 1.20 \cdot \Delta \sigma_{pi}(x) = 52.7 \text{ kg/mm}^2 \quad (24.4 \text{ t})$$

PCケーブル配置位置の平均フープテンション  $N_{\varphi}$  は次式による。

$$N_{\varphi} = 1/2 \cdot (N_1 + N_2) \times \frac{1}{2} (e_i + e_{i-1})$$

$N_1$  : Cable  $i-1$  と Cable  $i$  における荷重による軸力  
 $N_2$  : Cable  $i$  と Cable  $i+1$  における荷重による軸力

## 3. 施 工

### 3.1 スライディングフォーム工法

サイロや高架水槽のような水密性を要求されるコンクリート構造物に対し、施工打継ぎ目がないこと。比較的簡単な設備で、足場、型枠、支保工等の段取り変えの手間もなく、工期が短縮され、かつ工程管理が確実に行えるなどの利点をもつスライディング工法が取られる。一方、スライディング工法は、一度スタートすると、長時間の連続作業（当現場

# 報 告

では7日～10日間)となり、開始前の十分な準備と検討が必要である。資材の供給、加工、組立て、労務者のローテーション、各種アクシデントに対する対応策、施工中の業務分担の徹底等が工事の成否を決定する。骨材の在庫管理、コンクリート練り混ぜまで含め表-2のメンバー構成で施工した。

表-2 スライディング作業人員内訳

工 種	人 員	備 考
1. 全体計画	2	工程、資材、労務者、 図面照査
2. PC工	5	PCケーブルセット、 緊張作業
3. 鉄筋工	5	鉄筋準備、配置
4. コンクリート工	6	コンクリート打設、型枠掃除 ミキサー車係り
5. 型枠工	4	スライディング専任 2名 箱抜き型枠、足場掛上階段
6. 左管工	4	表面仕上げ
7. 溶接工	2	挿込み金物セット 溶接段取り
8. 機械係	1	バッチャー、コンプレッサー パイプレーターの点検修理
9. 電気係	1	電気配線
10. クレーンオペレータ	1	タワークレーン
Total	31	

## 3.2 施工順序

サイロをスライディングフォームを用いて施工する場合、下部架台部よりサイロ頂上部までスライドさせたのち、底版を施工する場合と、下部架台部を底版高さまでスライドさせ、一度型枠を解体し、底版施工後上部円筒部をスライドする方法がある。サイダでは、PCサイロであるため、施工用開口が作れないため、下部スライディング→底版→上部スライディングの順序で施工した。

## 3.3 型 枠

幕板は3mmの鉄板に縦リブを30cm間隔に補強し、腹起し材として単管を使用し、現場で簡単に解体組立て

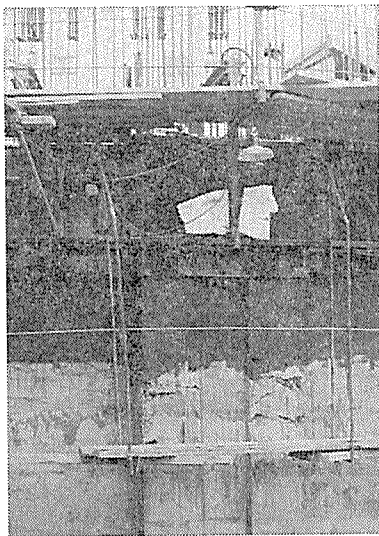


写真-1 スライディングフォーム

が可能で半径の調節は腹起し材の半径を変えることにより約1週間程度で行った。

PCサイロの場合、PCコーン取付け部の型枠が、本体型枠と完全に分離する構造とする必要があり本体型枠上昇後、残ったコーン取付けプレートを順次はずしてゆくことになる。リップ部は、両側の大型パネルと単管で締結されているが、スライディング中の回転ネジレが集中し、そのため、コーン取付けプレートが両側パネルと同時に上る傾向が見られた。これを防止するため、コーン定着プレートは、1段下のプレートにボルトで連結する必要がある。

ヨーク配置は、ジャッキの容量、壁厚、サイロの半径等によって決定され、今回1.7mピッチに配置した。ヨークの配置を決める際、埋込み金物、開孔部箱抜き、屋根梁箱抜き部の関連を十分調整し、できるだけ箱抜き

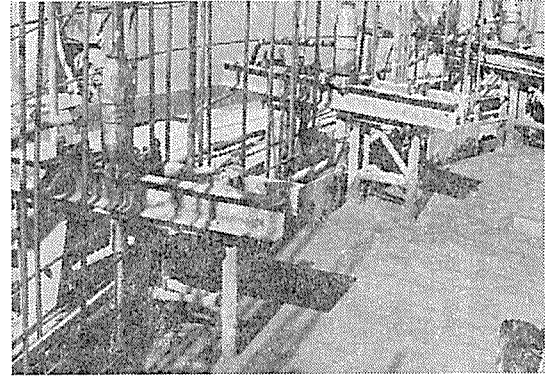


写真-2 ヨークジャッキ(5t)の配置

部をさけるようにヨークを配置することが必要である。ヨーク位置と箱抜き際が重なったため、コンクリート打設完了直後ロッドが座屈を起した。サイロの基数が多く型枠を何回も転用する場合、各サイロとの図面照合を十分に行い必要な処置をとるべきであろう。



写真-3 箱抜き部にロッドがきたため座屈したもの

## 3.4 コンクリート

### 3.4.1 配合

コンクリートの配合の特長は、細骨材として砕石ダストを使用していること。サイロの壁厚が薄く特に壁下端

部において、鉄筋、PC鋼材が密に配置されているため施工性を考慮し最大寸法 15 mm の粗骨材を使用していることである。PC用コンクリートに砕石ダストを用いた経験もなく、強度的にも不安があったが、現場近くに川砂がなく、あっても量的に確保することができず、種種の現場配合テストを行い使用に踏みきった。コンクリートに対する欧米人エンジニアと我々の感覚の違いに悩まされ、上記示方配合決定までに約3か月要した。現地の気候的条件や骨材の品質が結果的には、セメント量の増加水量が増えたが現場配合強度  $\sigma_{ck}=345 \text{ kg/cm}^2$  を確保することができた。参考までにアルジェリア国立試験所 (LNTPB) による配合例を 表-3 に示す。この配合で試験練りしたコンクリートはウォーカーピリティーが悪

て凝結開始時間を調節した。

### 3.4.2 コンクリート打設

コンクリートは、 $0.6 \text{ m}^3$  のホッパーをタワークレーン (パンゴン 150 tm) を用いて直接型枠中に打設した。打設スピードは最も順調にいて時間  $6 \text{ m}^3$  程度であった。コンクリート打設→鉄筋PC鋼材配置および資材揚上の繰返し作業となるため、ひとつの作業ストップが全体作業の停止につながる。したがって労務者の熟練度、気象条件、硬化開始時間等によりミキサー車の配車間隔、積載容量を調整すべきであり、当現場においては、1台当り  $3.0\sim 4.5 \text{ m}^3$  がコンクリートの品質管理からみても適当と考えられる。

### 3.5 PC 鋼材の配置とプレストレスング

PCケーブル ( $12\phi 7 \text{ mm}$ ) は所定の長さ ( $l=29.0 \text{ m}$ ) に加工し、シース内におさめて現場搬入された。スライ

表-3 コンクリートの示方配合

	示 方 配 合								備 考
	水トセ比 メン W/C	砂 率 S/A	単 位 置 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 L/m <sup>3</sup>	
			セメン ト	水	砂	粗骨材 3/15 mm	15/25 mm		
No. 1	53.7%	43.0%	415	223	738	989	—	1.42	現場使用
No. 2			350	270	710	565	600	—	L.N.T. P.B. 配合

く使用できなかつた。夏期においては、外気温が  $40^\circ\text{C}$ 、湿度 20% の非常に乾燥した気候のため、コンクリートの凝結開始が早く、第1基目のスライディング工事は、労務者の不慣れ、段取りの悪さのために鉄筋やPC鋼材配置作業に予想以上の時間を要したので、遅延材によ

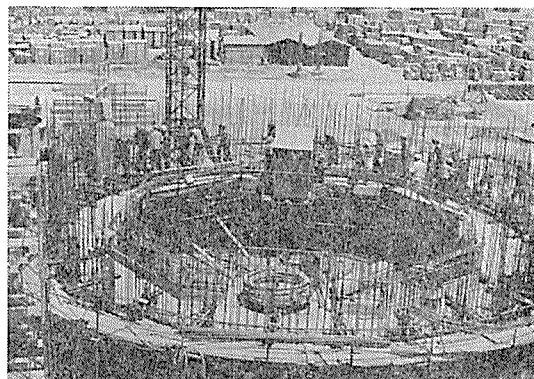


写真-4 PCケーブルの配置と回転ケーブル上のコイル状ケーブル

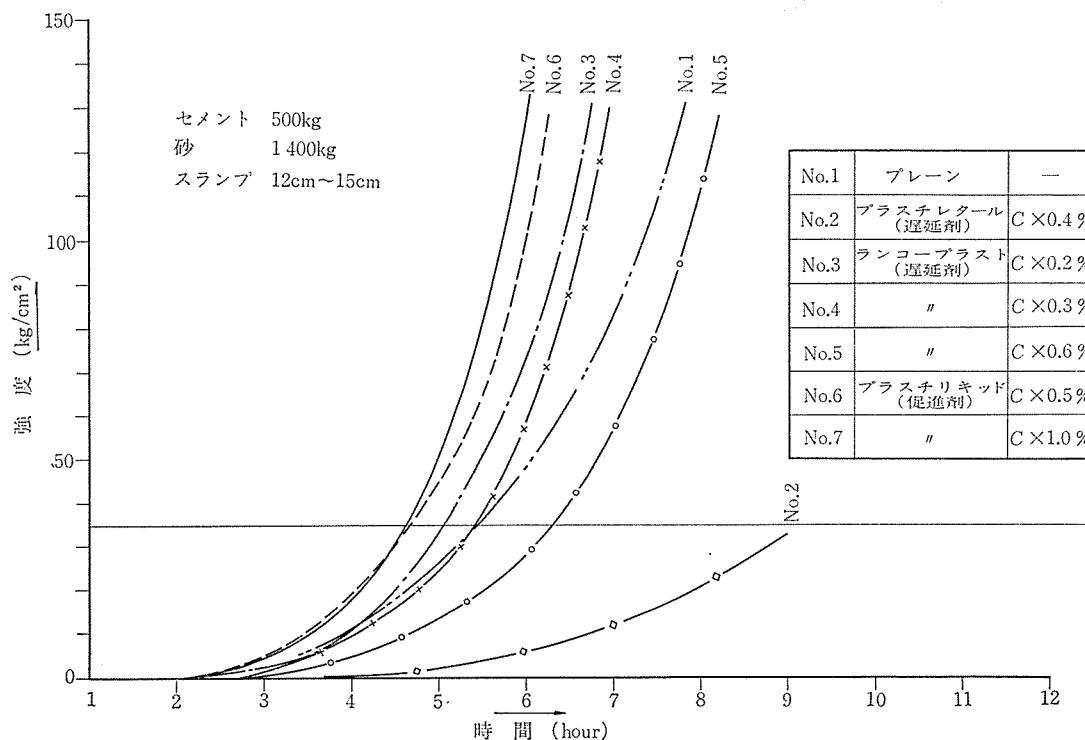


図-7 モルタル凝結試験

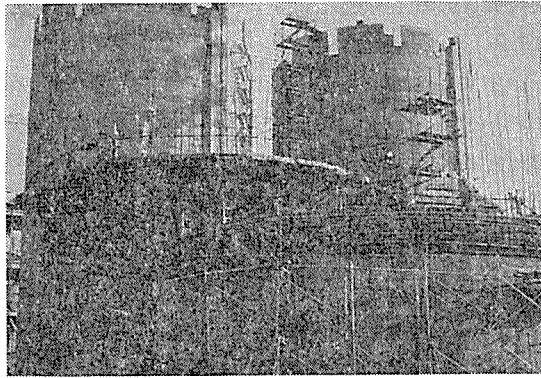


写真-5 上部スライディング中のクリンカーサイロ

ディングフォームへの揚上は、コイル状のままクレーンで作業床上に設けられた回転テーブルに仮置きし、壁内に順次配置する（写真-4）。鉄筋とロッドおよびヨークの間を通して配置するためにシースの破損に神経を使ったが、一般のシースよりも厚めのシースを使うことが良いようである。しかしながらP C鋼材の配置は、10数人



写真-6 緊張作業（ケーブルは約 70 mm 延びている）

の労務者が極めて原始的な方法で行うもので今後改良を要する作業である。スライディングフォーム自体の管理は2人程度のテクニシャンで、すべて操作できるのに比べると一層その感が深い。

プレストレッシングは当初4台のジャッキを使い、4つのリブで同時に行う計画であったが、ジャッキ、および緊張用ゴンドラが2台しかなく、リブA,C（図-1）をサイロ下端から緊張し最上段 Cable 緊張完了後、ゴンドラをリブ B,D に移設し最上段から順次最下段を緊張していった。端部緊張力  $P_t=63.2t/本$  で導入し、緊張管理は圧力と伸びの誤差を計算値の5%以内に収める

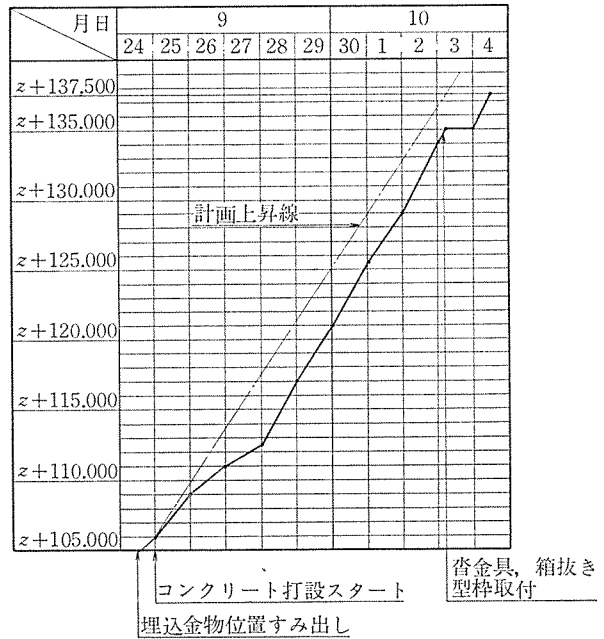


図-8 スライディングフォーム上昇曲線

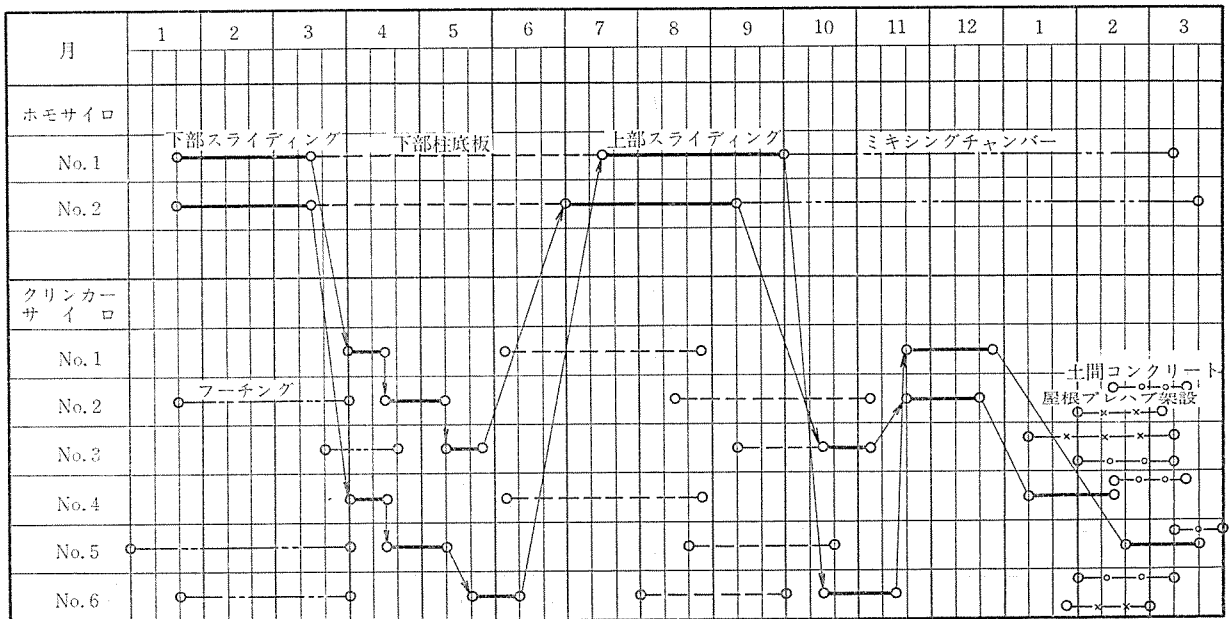


図-9 実施工程

いわゆるA法で行ったが、ヨーロッパではこの方法が簡単のため、広く用いられ、当現場においても、STUP社より派遣された緊張作業員が緊張管理シートを本社に報告する義務を負っているとのことであった。本緊張に先立ち、20本の Cable 試験緊張を行った結果、ケーブル形状がほぼ同一なため、圧力計の読みと伸びのバラツキは、ほとんどなく、その後の緊張値も同一の値を用いた。緊張は平均、20本/日、ゴンドラの設置に1日、したがってホモサイロ1基 218本/20≒11日、Total 12日で緊張作業を完了することが可能である。

### 3.6 実施工程

図-8、図-9 にスライディングフォーム実施工程、および全体工程をしめす。資機材不足に終始悩まされ、計画工程より大幅に遅れた。

### 4. あとがき

気候風土が異なる開発途中国におけるPCサイロの設計および施工に従事し、設計面では、問題発生時に権威

者の文献（しかも欧米諸国）等しか通ぜず日本の建築学会や土木学会規準の英訳が有ればと感じた次第である。

施工面では、常に資材不足、建材の故障に悩まされ、スライディングフォーム工法を行うには、現場状況も満足な状態ではなかったが、工期中途には、労務者も慣れ、機械等も順調に稼働し始め、なんとか9基のサイロを完成させることができたのは、川崎重工サイダ作業所の御協力と、国内の関係諸氏の援助によるものと深謝する次第です。

### 参 考 文 献

- 1) Hans-Joachim, H. : Beitrag zur praktischen. Berechnung kreiszylindrischer Stahlbetonsilos mit polarsymmetrischer Belastung, DIE BAUTECHNIK 7/1965
- 2) DIN 1055 Blatt 6, および Blatt 1
- 3) Martens, P. : Verhalten von staubförmigen Schürtern mit und ohne Luftzufuhr, DIE BAUTECHNIK 3/1970
- 4) Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Strong Granular Materials, ACI Journal 10/1975

### ◀刊行物案内▶

## プレストレスト コンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題

体 裁 : A4判 116 ページ

定 価 : 1500 円 送 料 : 400 円

内 容 : (1) PC橋の施工開始前の諸問題, (2) PC橋の工事ならびに施工管理について, (3) 新しいPC設計方法について, (4) 最近の話題の橋梁

お申込みは代金を添えて, (社)プレストレストコンクリート技術協会へ

### ◀刊行物案内▶

## プレストレスト コンクリート構造の高層建築設計例

本書は、プレストレストコンクリート構造の普及発展のため、1977年10月より11月に至り、日本建築学会関東支部と当協会が共催して行った建築のPC技術講習会に使用されたテキストであります。

内容は15階建のオフィスビルを想定し、構造体の設計に当ってはできるだけ実際に建てる場合に無理のない、経済的で、かつ工法的にも特に難しい点のないようなものを選んであります。

若干余分があります。ご希望者は料金を添え、下記へお申し込み下さい。

体 裁 : B5判 63 頁

頒布価格 : 1,000 円 送 料 : 200 円

申 込 先 : 社団法人 プレストレスト コンクリート技術協会