

クローバー型石炭サイロの設計・施工

三浦 俊悦*1・土田 義三*2・長崎 文麿*3

1. はじめに

神奈川県横浜市磯子区に位置する電源開発(株)磯子火力発電所の更新工事は、既設の発電所(出力265MW×2基)を稼働しながら新1号機(600MW)を建設し、運転開始後に既設を廃止して、その跡地に新2号機(600MW)を建設するという、「ビルト・スクラップ&ビルト」方式の工事である。

その一環として、平面形状が四つ葉のクローバー型であるプレストレストコンクリート構造の石炭貯蔵サイロを建設し、平成12年3月から供用を開始している(写真-1, 2)。

石炭火力ではカロリー調整やSO_x対策等のために2~3種類を混炭して燃焼させることが多く、そのために屋外貯炭方式ではエリア分けしたり、サイロ方式では複数基を使い分けしたりしている。磯子火力発電所の場合は環境対策等のためにサイロ方式を採用したが、極めて狭隘な敷地を有効利用するために世界最大級の10万t貯炭容量のサイロ1基のみとし、その内部を隔壁で区分することによって多炭種での運用を可能とした。

本サイロを「クローバー型サイロ」と称しているが、形状の特長は、4炭種の収納が可能で、かつ外周筒体壁および十字隔壁に石炭の内圧に抵抗するためのプレストレスを有効に導入できることにある。

今回、設計と施工に関して、主にプレストレス工法の概要を報告する。

2. 計画概要

工事件名：磯子火力発電所更新工事既設兼用石炭サイロ

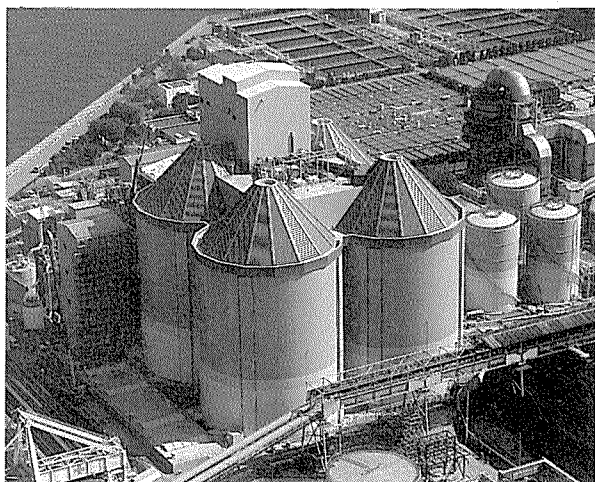


写真-1 北側鳥瞰

新設工事

貯炭能力：10万t(2.5万t×4槽)

設計：一般：(株)開発設計

構造：(株)開発設計

監理：電源開発(株)

施工：佐藤工業(株)・開発工事(株)JV

工期：平成9年3月1日～平成11年9月30日

図-1～3にサイロの配置、断面および平面を示す。

サイロは、4槽で構成される群サイロで、1槽あたり2.5万t、4槽合計で10万tの貯炭能力を有する。平面構造は外周筒体壁と各槽を区切る十字隔壁からなり、各層の内法直径は30.0m、構築物最高部高さはGL+54.5mである。4槽を一体化構造にしたことにより、2.5万tサイロ×4基に比較して約3割の敷地縮小効果がある。

屋根は円錐台の鉄骨屋根を4つ組み合わせで構成されており、円錐台の中心に囲まれたGL+48.0mの部分には陸屋根が設けられ、ベルトコンベヤーと集塵器が配置されている。石炭はコンベヤーと一点投入式のシューターを介して各槽に配分され、貯蔵された石炭は自動払出し機(RDM)によりホッパー下のトンネルから払い出される。

なお、屋根形状が特徴的であるが、円錐台にした理由は景観対策ではなく、一点投入の際の石炭の積付け形状に対してデッドスペースが小さくなるようにしたためである。

3. 設計

サイロ各部の構造区分は、図-4のとおりである。

筒体壁地上部は、石炭圧による膜引張力を打ち消すた

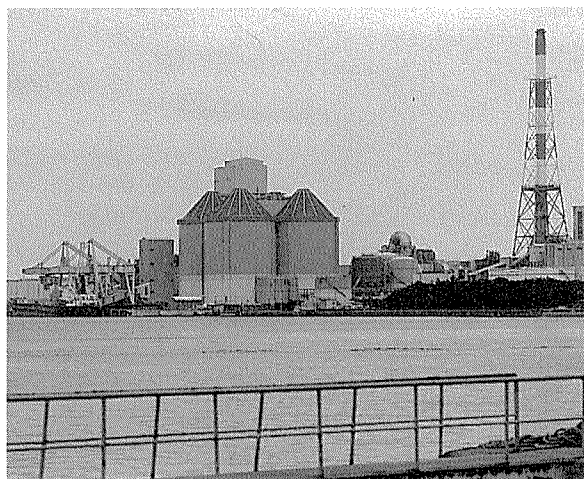


写真-2 西側立面

*1 Shun-etsu MIURA：電源開発(株)新磯子火力建設所 所長代理

*2 Yoshizou TSUCHIDA：佐藤工業(株)首都圏業務部 建築部門 技術グループ 副部長

*3 Fumimaro NAGASAKI：(株)ピー・エス エンジニアリング事業部 エネルギー関連室長

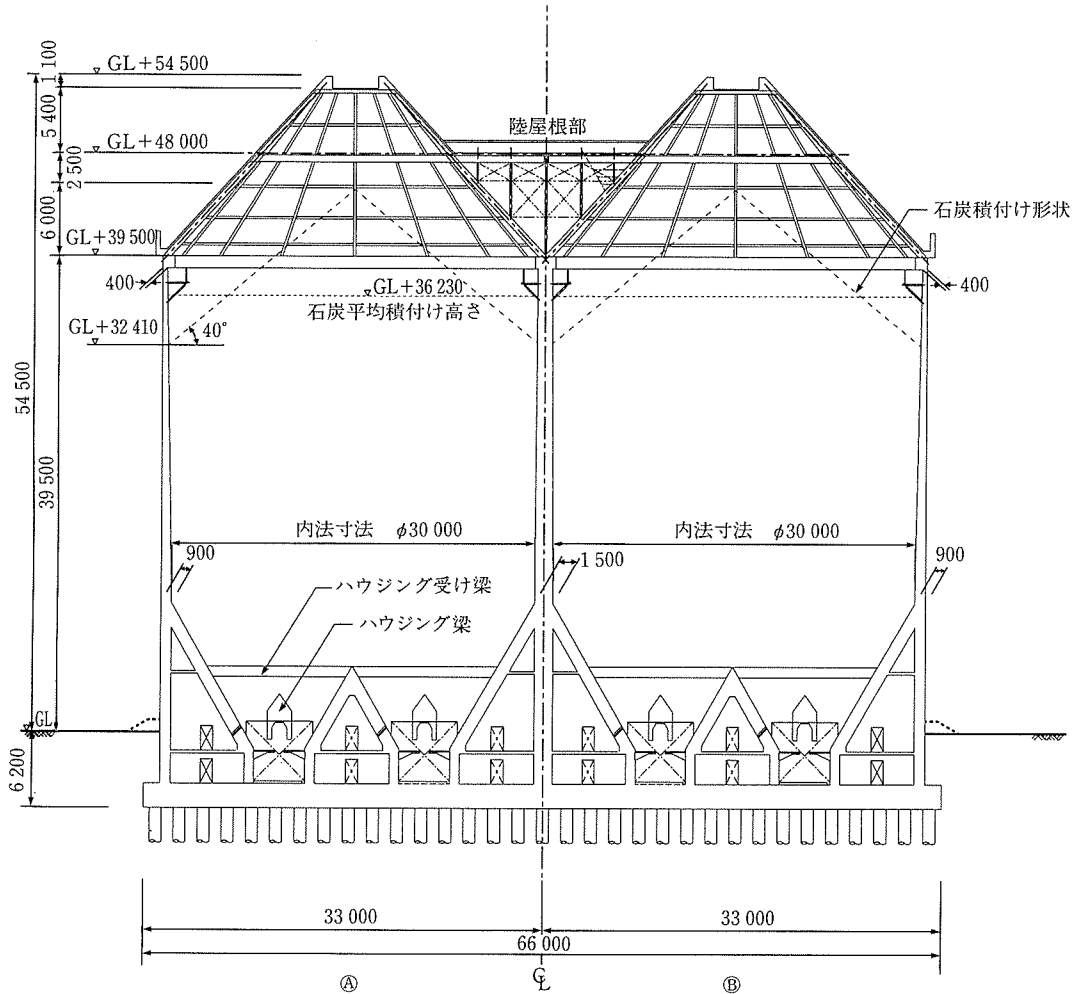


図-2 断面図

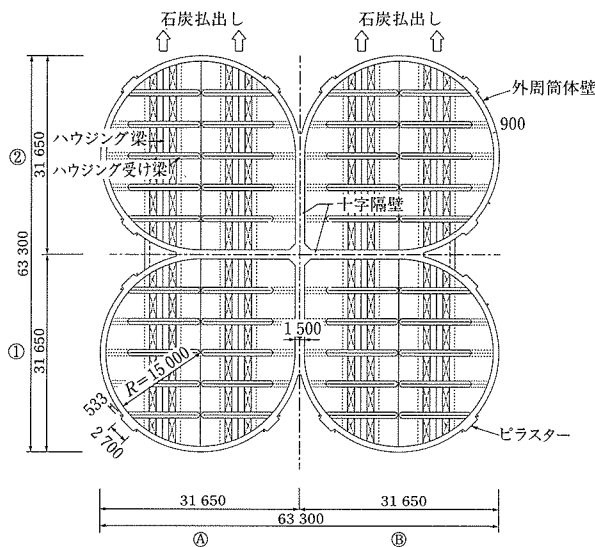


図-3 平面図 (GL+10.6m)

● 緊張材：PC鋼より線 (SWPR7B 7本より $\phi 15.2\text{mm}$)
 なお、PC鋼より線の力学的諸元を表-2に、PC鋼より線の許容張力一覧を表-3に示す。

(3) プレストレスの導入量

緊張材を円周方向に配置する。その構成を図-5に示す。

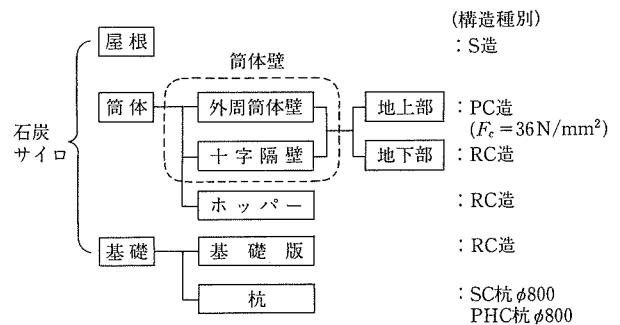


図-4 サイロ各部の構造区分

緊張材の摩擦損失を考慮したプレストレス分布を下式により算定した。

$$P_x = P_0 \times \Sigma e^{- (\mu \alpha + \lambda L)}$$

ここに、 P_x ：緊張端からの距離が ΣL の位置におけるプレストレス

P_0 ：緊張端におけるPC鋼線引張力

α ：角度変化 (rad)

μ ：摩擦係数 (1/rad) $\mu = 0.25^*$

λ ：摩擦係数 (1/m) $\lambda = 0.004^*$

ΣL ：緊張端からの距離

*「プレストレスコンクリート設計施工規準」¹⁾に準拠

ピラスター (定着部位) を筒体外部に配置することとし、12カ

表-1 設計クライテリア

設 計 法		長 期	短 期	終 局 時
		許容応力度設計	許容応力度設計	終局強度設計
荷 重	筒 体 壁	$C_d=1.0$ ($\gamma=1.0$)	$C_d=1.0$ ($\gamma=0.8$)	$C_d=1.0$ ($\gamma=0.8$)
	ホ ッ パー	$C_d=1.0\sim 2.0$ ($\gamma=1.0$)	$C_d=1.0\sim 2.0$ ($\gamma=0.8$)	$C_d=1.0\sim 2.0$ ($\gamma=0.8$)
	地震力 (容器構造設計指針による) ³⁾	—	設計降伏せん断力/1.5	設計降伏せん断力
面内せん断力に対する設計	RC規準 耐震壁設計式に準拠 ⁴⁾	長期許容応力度以下	短期許容応力度以下	終局強度以下
面外せん断力に対する設計	RC規準 柱設計式に準拠 ⁴⁾	長期許容応力度以下	短期許容応力度以下	—
軸力+モーメントに対する設計	RC規準 柱設計式に準拠 ⁴⁾	長期許容応力度以下	短期許容応力度以下	終局強度以下

C_d : 動的圧力係数
 γ : 単位体積重量 (t/m³)

表-2 $\phi 15.2\text{mm}$ PC鋼より線の力学的諸元 (JIS G 3536 SWPR7 BL)

0.2%永久伸びに対する荷重 (kN)	引張荷重 (kN)	伸び (%)	リラクゼーション値 (%)
222以上	261以上	3.5以上	2.5以下

表-3 PC鋼より線 ($\phi 15.2\text{mm}$ B種) 許容張力一覧

呼称	緊張材ユニット	より線本数	引張荷重 P_u (t)	降伏荷重 P_y (t)	定着完了時 $0.8P_y$	プレストレス導入時 $0.85P_y$	シース径 (mm)	
							内径 ϕ	外形 D
E6-3	6-3	3	79.8	67.8	54.24	57.63	50	53
E6-4	6-4	4	106.4	90.4	72.32	76.84	50	53
E6-5	6-7	5	133.0	113.0	90.40	96.05	55	62
E6-6		6	159.6	135.6	108.48	115.26	65	72
E6-7		7	186.2	158.2	126.56	134.47	65	72

定着部の滑り量6mmを考慮すると、使用PC鋼材はプレストレス導入時の許容張力によって決定される。

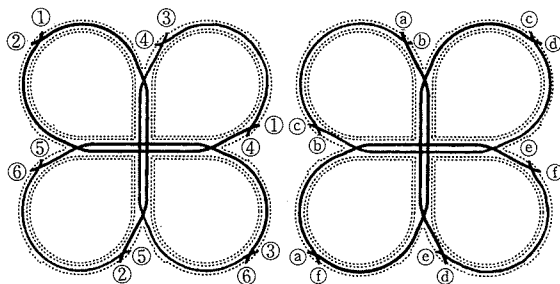


図-5 緊張材配置・平面構成

所のピラスターのうち、 N 段目および $N+1$ 段目ではそれぞれ6本の緊張材を6カ所のピラスターに定着した。定着位置を交互に変えることによって、プレストレスの均等化を図った。

なお、緊張材の配置形状は2タイプとなり、タイプ1は外周筒体壁部に、タイプ2は十字隔壁部に配置される。緊張力計算位置を図-6に示す。図中、T.P.は緊張材配置の平均的な曲率が切り替わる接点を示す。なお、プレストレス分布算定時の条件は以下のとおりである。

- 緊張材は、円筒部において外壁外面から300mmの位

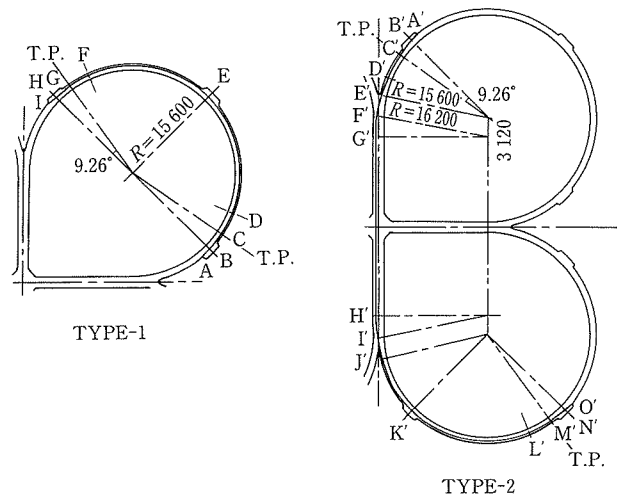


図-6 緊張力分布計算位置

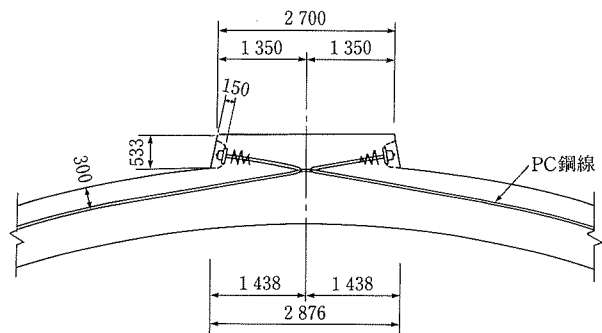


図-7 ピラスター形状

置に配置することを標準とする。

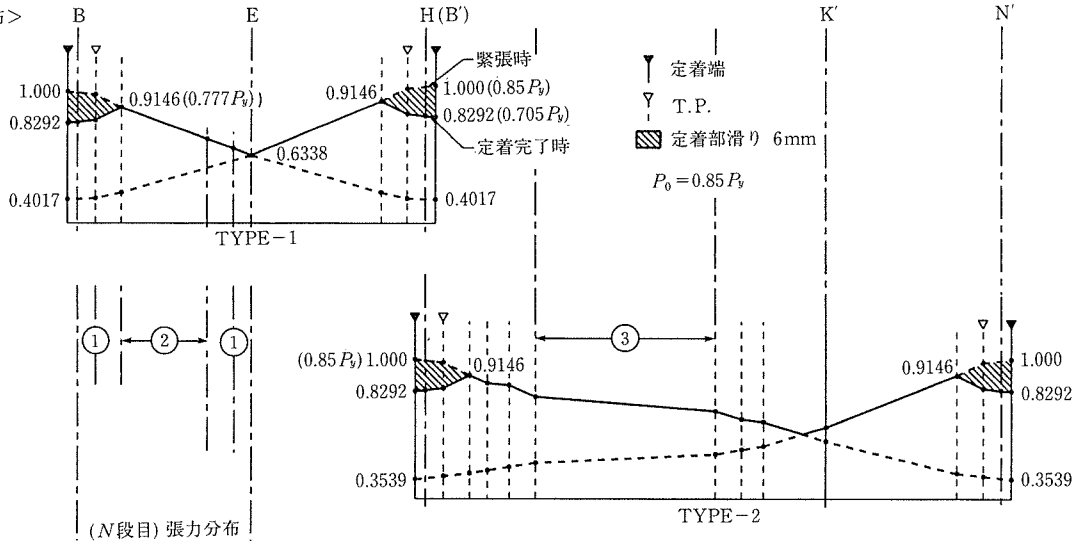
- ピラスター形状は図-7に示すように設定する。
- 定着時セット量は6mmとする*。

*[VSL工法設計施工基準]²⁾

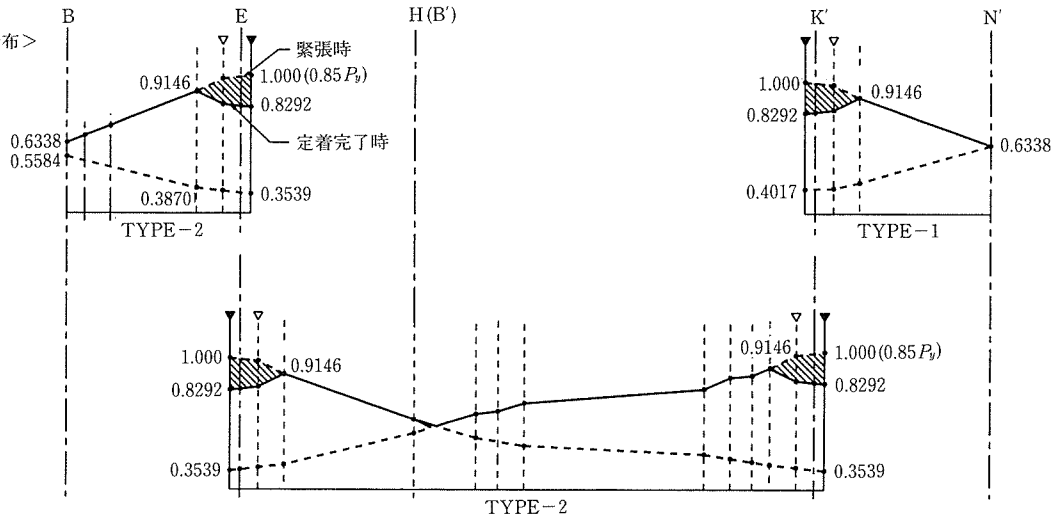
プレストレス分布図を図-8に示す。計算結果より、外周筒体壁一般部の平均張力は $0.797P_0$ 、十字隔壁部の平均張力は $0.755P_0$ となり、平均摩擦損失は25%と設定した。

高さ方向の緊張材の配置および緊張材張力等を表-4に示す。

<[N段目]張力分布>

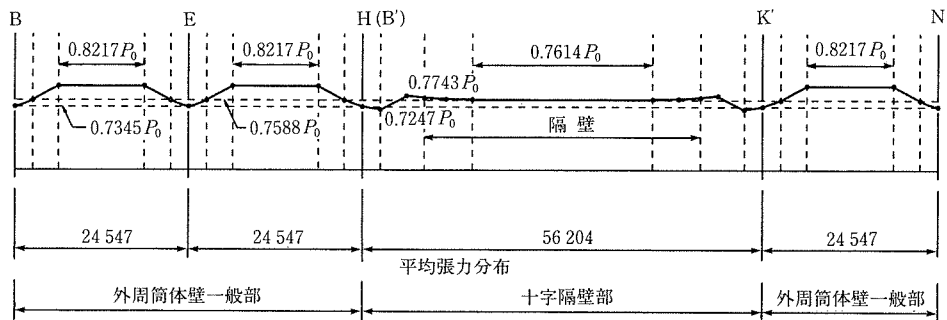


<[N+1段目]張力分布>



<平均張力分布>

[N+1段目]および[N段目]の同一点の緊張力より平均張力を算定する。



- ・外周筒体壁一般部 (A~B, B~C, およびD~E)

$$\text{平均張力 } T = [2543(0.7345 + 0.7588)P_0 + 3667(0.7588 + 0.8217)P_0 + 12127 \times 0.8217P_0] / 24547 = 0.797P_0$$

- ・十字隔壁部 (C~D)

$$\text{平均張力 } T = (38802 \times 0.7614P_0 + 17402 \times 0.74P_0) / 56204 = 0.755P_0$$

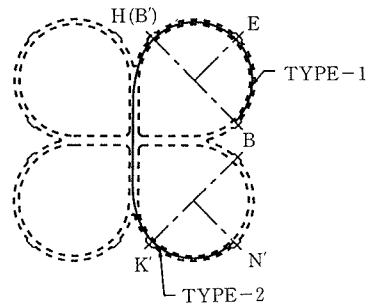


図-8 プレストレスの分布

表-5 使用材料数量

名 称	仕 様	単 位	数 量	備 考
PC鋼より線	JIS G 3536 SWPR7B	t	159.9	
シース (ジョイント含む)	内径55 mm, 板厚0.40 mm, L=6 m	本	1 260	E6-3, 4, 5
シース (ジョイント含む)	内径65 mm, 板厚0.40 mm, L=6 m	本	2 860	E6-7
ジョイント予備用シース	内径60 mm, 板厚0.40 mm, L=0.3 m	本	350	E6-3, 4, 5
ジョイント予備用シース	内径70 mm, 板厚0.40 mm, L=0.3 m	本	590	E6-7
シースサポート	L=36.86 m/セット	セット	396	L形鋼
減水剤	ノンブリーディング粘性型	kg	840	
セメント	普通ポルトランドセメント	kg	83 500	

区間であり、施工中のシースの損傷を防ぐため、ユニット E6-5 と同様の内径 ϕ 55 mm, 鋼管厚0.40 mmの剛性の高いシースを使用した。

ユニットE6-5は内径 ϕ 55 mm, 鋼管厚0.40 mm, E6-7は内径 ϕ 65 mm, 鋼管厚0.40 mmの標準のものを使用した。ここで、E6-3, 4, 5, 7とは、VSL工法におけるユニットの表示であり、たとえばE6-3の場合、定着具がEタイプで、PC鋼より線の径が「6」インチ (=15.2 mm), PC鋼より線の本数が「3」本を示す。

③ PCグラウト混和剤

PCグラウト用混和剤としてノンブリーディング・粘性型の減水剤を使用した。

④ 筒体壁のコンクリート配合

PCケーブルを配置する筒体壁のコンクリートの配合を表-6に示す。

(2) 使用機械

PCケーブルの挿入、緊張およびグラウト工事に使用した機械を表-7に示す。

4.2 シース設置

シースサポートの配置は、シースの保持間隔 1 mを基本とし、円周部では4度ピッチとした。部材は形鋼と棚筋に

ϕ 9 mmの棒鋼を使用し、1本目はベースプレートを溶接し、コンクリート面にボルトで設置できる構造とし、2本目以降はボルトで継ぎ足せる構造とした。

スリップフォーム施工時は図-10に示すようにヨーク材に形鋼の円周金物を取り付け、そこにサポートガイドを取り付けた。シースサポートはサポートガイドに差し込み、下端をすでに設置されているシースサポートに接合した。

緊張端部はピラスター端部型枠に木製箱抜き型枠、スリーブ鋼管、支圧板、トランペットシースをボルトで固定し、スパイラル筋は鉄筋に結束線で固定した。端部箱抜きは厚さ30 mmが必要であり、通常、鋼製型枠を使用することが多いが、今回は柾材 $t=30$ mmを使用して解体しやすく、周りにスポンジを張り付けたものを型枠に打ち付けた。

スリップフォーム施工時のピラスター端部型枠はせき板を使用し、この部分はスリップフォーム装置からスライドする構造として打設コンクリートに存置させた。

4.3 ケーブル挿入

ピラスター部外部足場にプッシングマシンを設置し、PC鋼より線を1本ずつシースに挿入した。ケーブル長は隔壁を通るものが84.7 m, 筒体外周の円弧のみのものが53.2 mの2種類あり、挿入速度は80 m/分程度とした。

PC鋼より線のコイル配置スペースの都合で主に北側と南側からの挿入計画とした(図-11)。

プッシングマシンは重量物(400 kg)であることから、外部足場のビティ枠に鋼管角パイプ(100×100)を渡してチェーンブロックで吊して高さを挿入位置に合わせ、上下の移動もチェーンブロックで行った。

表-6 筒体壁コンクリート配合

設計基準強度 (N/mm ²)	セメント種類	スランブ	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)
36	普通ポルトランド	10 cm (流動化後18cm)	43.8	158	361

表-7 使用機械一覧

名 称	仕 様	単 位	数 量	備 考
プッシングマシン	22 kW	台	2	
プッシングマシン	2.5 kW	台	4	
高速カッター		台	2	
溶接機		台	2	
ホイストクレーン	100 kg, 40 m, 100 V	台	4	
グラインダー		台	6	
チェーンブロック	1 t	台	12	
VSLジャッキ	ZPE-70×200	台	12	E6-3用
VSLジャッキ	ZPE-100×210	台	12	E6-4用
VSLジャッキ	ZPE-170×200	台	12	E6-5, 6, 7用
VSLフロントジャッキ	ZPE-170FJ×200	台	2	E6-5, 6, 7の後方空間のない部分
グラウトポンプ	35E型, 3.7 kW	台	2	吐出量 約30 l/min
グラウトポンプ	OKP-60 MS, 5.5 kW	台	1	吐出量 約60 l/min
ミキサー		台	4	

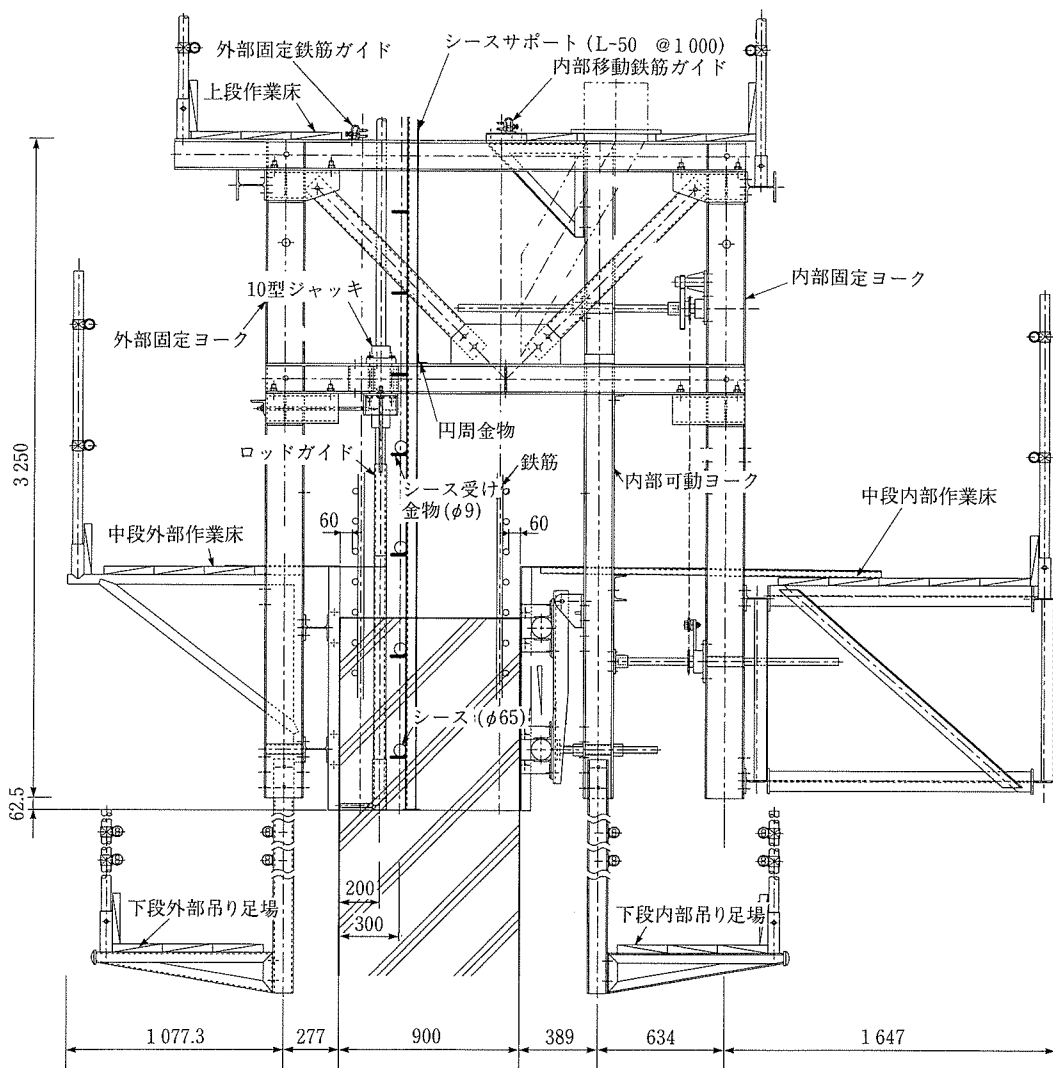
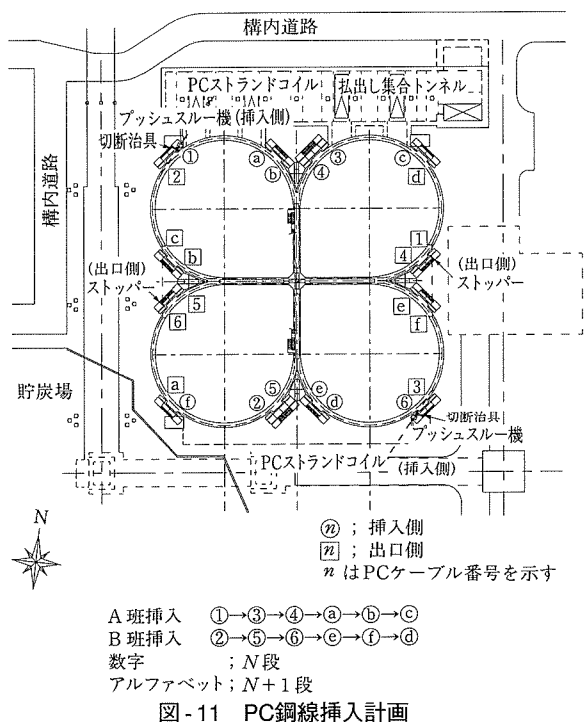


図-10 シースサポート計画図



Y字部分のピラスターが近接している場所ではプッシングマシンの段取替えを減らすため、2インチのサクシオンホースと単管パイプで鋼線を導き、隣接のピラスターから鋼線挿入を行った。これにより、プッシングマシンの高さ調整の回数も減り作業効率がアップした。

所定本数の鋼線挿入が終了した後、緊張に必要な余長(躯体より70 cm)を残し、グラインダーで鋼線を切断し、防錆のためラップで覆った。

4.4 緊張

(1) 試験緊張

N段の1段目の6ケーブルについて試験緊張を行い、摩擦係数と見かけのヤング係数を求め、この数値を用いて緊張計算を行い緊張管理図を作成した。

試験緊張は1ケーブルに対して交互に緊張側、固定側として行い、6ケーブル×2=12のデータを得た。

試験緊張の手順を図-12に示す。

(2) 試験緊張結果

試験緊張の結果を解析し、緊張計算に使用する係数を以下のように決定した。

摩擦係数 $\mu = 0.160$

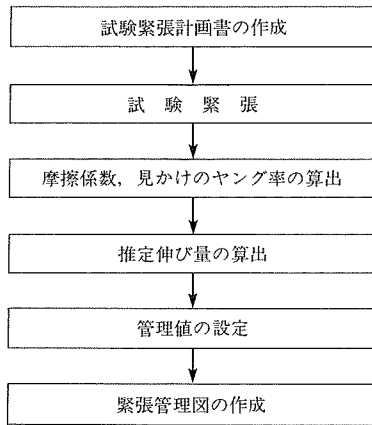


図-12 試験緊張の手順

見かけのヤング係数 $E_p = 200\ 270\ \text{N/mm}^2$

(3) 緊張管理図

PC鋼より線の3本~7本のタイプ別およびジャッキのタイプ別に緊張計算を行い、プレストレス導入時のジャッキ圧力、伸び量を求め、荷重計示度と伸び量による管理図を作成した。

なお、試験緊張で得られた摩擦係数 $\mu = 0.160$ は、設計値 ($\mu = 0.25$) より小さく摩擦損失が設計より少なくなるが、安全側であるため端部緊張力は設計どおりとして施工を行った。設計と施工時のプレストレス分布比較を図-13に示す。

(4) 本緊張

本緊張はN段を全段緊張した後にN+1段を緊張する手順で進め、1段の6ケーブルを同時に両引きでサイロ全周に均等にプレストレスが導入されるように行った。

ジャッキは緊張力に合わせて70t, 100t, 170t用の3種類用意し、東側のピラスターは垂直コンベヤーの鉄骨によ

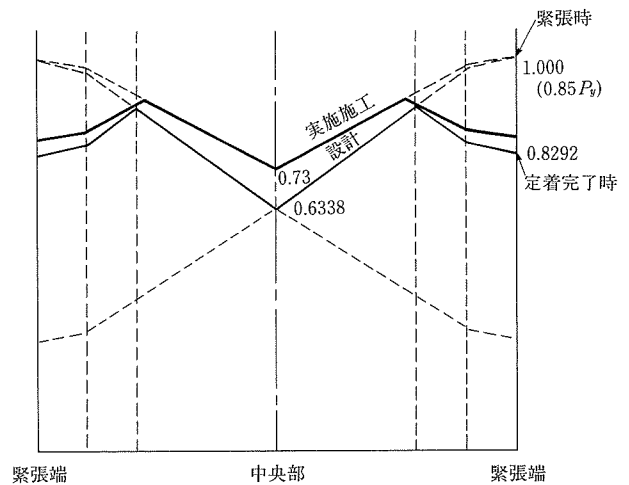


図-13 設計および施工時のプレストレス分布比較

り作業空間が狭いため、このケーブルのみフロントジャッキを用いた。

緊張管理は現場ユニットハウスに6台のパソコンを設置し、ケーブルごとに伸び量を入力して管理図による管理を行った。ジャッキ操作者との連絡は無線で随時行い、緊張開始合図および段階ごとのジャッキ圧力、伸び量の管理を行った。

荷重段階はジャッキ圧力計で1段階目を10MPaとし、2段階目以降は5MPaずつ増加させた。

図-14にケーブルごとの管理図を、図-15にグループ管理図を示す。グループ管理の結果、緊張力誤差で1.3%以内、伸び量誤差で1.5%以内となった。

4.5 グラウト注入

緊張終了後、PC鋼より線をくさびより5cm残して切断し、グラウトキャップを取り付けてグラウトを行った。

ケーブル 1-1 緊張順序: 1
緊張結果 緊張日 平成11年5月18日

補正全伸び量 (mm)	495.2	比較値 σ (%)	-0.3	判定
計算全伸び量 (mm)	494.6	許容範囲 (%)	± 5	OK
測定導入緊張力 (MPa)			47.5	
計算導入緊張力 (MPa)			47.3	

伸び量計算条件

摩擦係数 μ	0.160
摩擦係数 λ	0.004
鋼材弾性係数 $E(\text{N/mm}^2)$	2.00×10^5

測定値

応力度	伸び量		合計
	内側	外側	
47.5	170.0	270.0	440.0
40.0	139.0	221.0	360.0
35.0	120.0	190.0	310.0
30.0	103.0	155.0	258.0
25.0	82.0	122.0	204.0
20.0	65.0	90.0	155.0
15.0	45.0	53.0	98.0
10.0	20.0	30.0	50.0
0 補正			55.2
補正伸び			495.2

荷重伸び関係図

直線式 $P = A \times L \div B$
 $A = 0.096$ $B = 5.307$
 $\gamma = 0.99988$

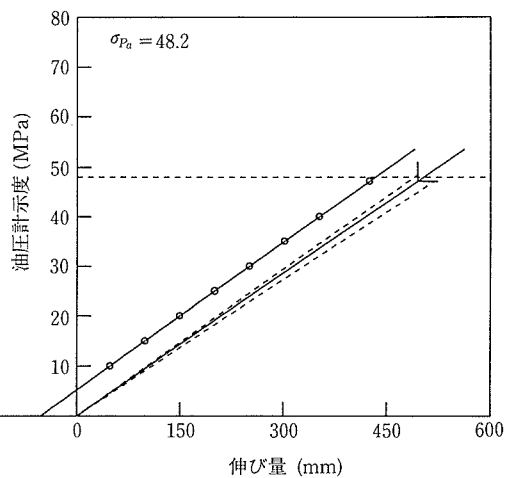
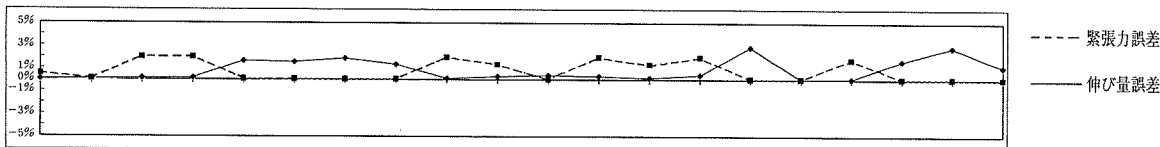


図-14 ケーブル1本ごとの管理

施工箇所：N段(J型)

N 1~23段		N 25~37段		N 39~41段		N 43~45段		N 47~55段	
設計緊張力(MPa)	47.3	設計緊張力(MPa)	40.5	設計緊張力(MPa)	33.8	設計緊張力(MPa)	36.6	設計緊張力(MPa)	48.5
設計伸び量(mm)	494.6	設計伸び量(mm)	494.7	設計伸び量(mm)	494.8	設計伸び量(mm)	494.3	設計伸び量(mm)	494.3

ケーブル No.	1-1	1-2	1-3	1-6	3-1	3-2	3-3	3-6	5-1	5-2	5-3	5-6	7-1	7-2	7-3	7-6	9-1	9-2	9-3	9-6
緊張力 (MPa)	47.5	47.3	48.2	48.2	47.3	47.3	47.3	47.3	48.2	47.9	47.3	48.2	47.9	48.2	47.3	47.3	48.1	47.3	47.3	47.3
誤差 (MPa)	0.2	0	0.9	0.9	0	0	0	0	0.9	0.6	0	0.9	0.6	0.9	0	0	0.8	0	0	0
伸び量 (mm)	494.2	494.6	494.8	495	502.3	501.9	503.5	500.9	494.9	495.7	496.2	495.8	495.1	496.3	508.4	494.6	494.7	502.4	508.2	499.8
誤差 (mm)	-0.4	0.0	0.2	0.4	7.7	7.3	8.9	6.3	0.3	1.1	1.6	1.2	0.5	1.7	13.8	0.0	0.1	7.8	13.6	5.2
緊張力誤差 (%)	0.4	0.0	1.9	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.3	0.0	1.9	1.3	1.9	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0
伸び量誤差 (%)	-0.1	0.0	0.0	0.1	1.6	1.5	1.8	1.3	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3	2.8	0.0	0.0	1.6	2.7	1.1



グループ No.	N 1段	N 3段	N 5段	N 7段	N 9段
緊張力平均 (MPa)	47.8	47.3	47.9	47.7	47.5
誤差 (MPa)	0.5	0.0	0.6	0.4	0.2
伸び量平均 (mm)	494.7	502.2	495.7	498.6	501.3
誤差 (mm)	0.0	7.5	1.0	4.0	6.7
緊張力誤差 (%)	1.1	0.0	1.3	0.8	0.4
伸び量誤差 (%)	0.0	1.5	0.2	0.8	1.3

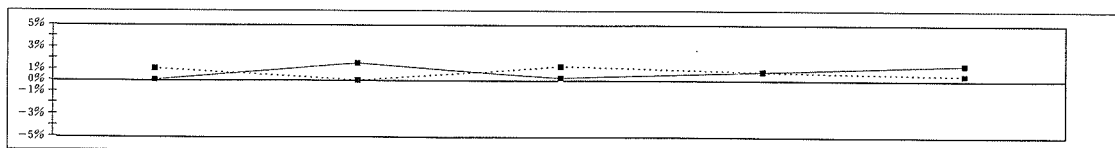


図-15 緊張管理 (グループ管理)

グラウト材はシーす内に空隙の残りにくいノンブリーディング・粘性型の減水剤を使用した。

グラウトの排出は目視で行い、注入量は流量計で確認した。

グラウト材の配合を表-8に示す。

5. おわりに

今回の「クローバー型サイロ」は、礫子火力発電所という特殊条件下における独特の工夫であった。

プラント設計側からの最初の間合せは、通常の円形サイロの内部を十字に壁で仕切れないかというものであったが、計算では、石炭偏載時の面外方向の応力から仕切り壁が厚くなりすぎて、構造的に成立しなかった。その後、いろいろな形状の群サイロを検討した結果、最終的に思っていたのが、四つ葉のクローバー形状であった。

基本計画は電源開発㈱が実施したが、その際、社内外の

表-8 グラウト材の配合

使用材料	セメント C (kg) (普通セメント)	水 W (kg)	混和剤 P (kg) (GF-1720)	水セメント比 W/C (%)
1m ³ あたり	1303.8	586.7	13.04	45

多くの方々にご助言やご協力を賜った。また、施工でも筒体の形状が複雑なため、躯体工事、屋根鉄骨工事、安全管理等、高度な技術を要するところもあったが、関係者の協力により無事完成することができた。ここに改めて感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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，1987
- 2) VSL協会：VSL工法設計施工規準，1995.5
- 3) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説，1996
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991

【2001年1月11日受付】