

(130) 覆土式地下タンクにおけるプレストレスの適用

大成建設(株)	土木設計第2部	正会員	○守屋 雅之
東京ガス(株)	生産技術部		中野 正文
東京ガス(株)	生産技術部		堤 洋一
大成建設(株)	横浜支店		岡本 剛治

1. はじめに

発展を続ける首都圏のガス需要に対応するため、東京ガス(株)では、横浜市鶴見区扇島に現在工場を建設中である(図-1)。この扇島工場の最大の特徴は、土地の有効利用、景観の向上、周囲の環境との調和等の観点から、地下式貯槽の屋根上に覆土を行うことである。このため、屋根を従来の鋼製に代え、鉄筋コンクリート製とした。

本報はこの主要施設のうちTP1LPG(低温液化石油ガス)地下式貯槽(60,000kl)の、鉄筋コンクリート製ドーム屋根(以下「RCドーム屋根」と呼ぶ)の設計特にプレストレスの適用および施工概要について報告したものである。

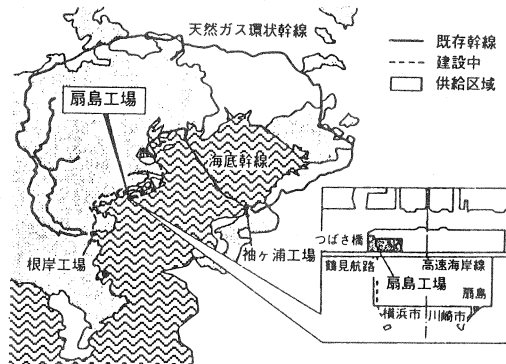


図-1 扇島工場位置図

2. 構造概要

構造概要を図-2に示す。本貯槽は、内径45m、液深37.8m、容量60,000klを有する、底板、側壁の厚さ1.5mの剛結型底版形式の地下タンクである。

屋根は、設計基準強度 $f'_{ck}=30N/mm^2$ 、中央で0.6m、端部で1.25mの厚さを有するライズスパン比(高さ/直径)1/10のRCドームとなっている。

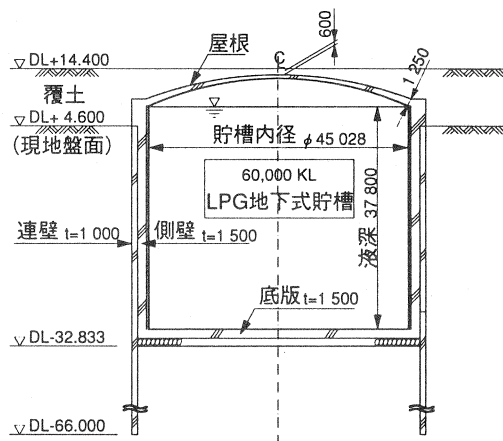


図-2 一般構造図

3. RCドーム屋根の構築概要

RCドーム屋根の施工法として、底版上から所定の屋根位置まで支保工を組みコンクリートを打設する方法があるが、本貯槽の場合、内径約45m、高さ約42mの巨大な支保工が必要となり、支保工に多くのコストが必要になること、施工に多大な時間を要することが予想された。屋根工事のコスト低減および工程短縮を図る事を目的とし、図-3に示すようなりフトアップ工法を採用することとした。

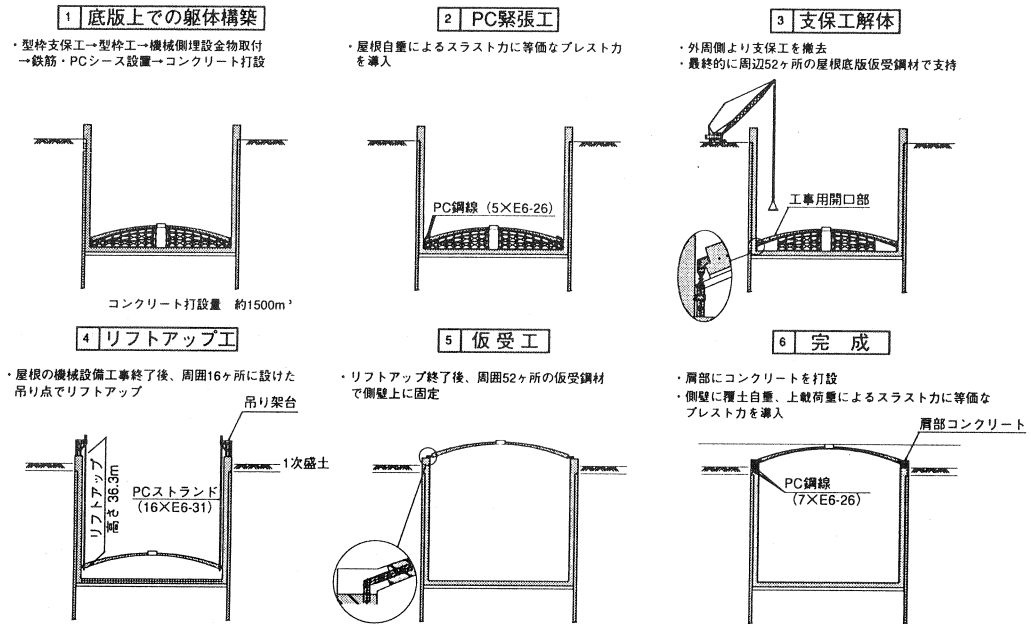


図-3 RCドーム屋根施工手順

まず、屋根を側壁の施工と併行して底版上で構築し、自重による水平スラスト力（水平に押しつける力）相当のプレストレスを屋根端部円周方向に配置したPCケーブル（VSL工法 5本×E6-26）を用いて導入し、型枠支保工を解体後、機械工事である内装保冷材及びメンブレンを取付け、リフトアップを行った。リフトアップはVSLジャッキ（500tf）を16台使用して行ない、総重量4,130tfの屋根を3日間で約36m吊り上げた。側壁との取り合いは、52箇所の仮設鋼材（H-428×422×35×35、SM490）で仮受けし、肩部（つなぎ部分）の配筋後速やかにコンクリートを打設した。

最後に、側壁頂部円周方向に配置されたPCケーブル（VSL工法7本×E6-26）により覆土自重および上載荷重による水平スラスト力に相当するプレストレスを導入した。

#### 4. RCドーム屋根の設計

##### 4.1 プレストレス導入の考え方

###### (1) 屋根部

屋根は、自重による水平スラスト力により、リフトアップ時に、屋根に大きな引張力が発生する。そこで屋根に入る有害なひびわれを防止する為に、屋根端部円周方向にPCケーブルを配置し、円周方向に緊張することにより自重による水平スラスト力相当のプレストレスを導入することとした。また、このプレストレスにより鉄筋量の低減を図った。

###### (2) 側壁部

完成後は、自重の他に覆土自重および上載荷重が作用する。屋根部に、屋根自重による水平スラスト力相当のプレストレスを導入していることから、覆土自重および上載荷重によるスラスト力により、屋根端部や側壁頂部に大きな引張力が発生する。そこで、屋根と一体化後の側壁頂部円周方向にPCケーブルを配置し、円周方向に緊張することにより、覆土自重および上載荷重による水平スラスト力相当のプレストレスを導入し、屋根端部や側壁頂部に発生する引張力による影響を軽減させ、鉄筋量の低減を図った。

4.2 プレストレス導入量の設定

リフトアップ時に、屋根に導入するプレストレスは、図-4に示す解析モデルにより水平スラスト力を算定し、これを打ち消す大きさとした。また、側壁頂部に導入するプレストレスも同様にして算定した。検討の結果設定したプレストレスの仕様を表-1に示す。また、PCケーブルの配置図を図-5、図-6に示す。

表-1 PCの仕様

		屋根	側壁
必要プレストレス力設計導入力(tf)		1254	1876
緊張材	仕様	SWPR7B 26S15.2B(E6-26)	SWPR7B 26S15.2B(E6-26)
	断面積(mm <sup>2</sup> )	3606	3606
	引張荷重(tf)	691.6	691.6
	降伏点荷重(tf)	587.6	587.6
	必要本数	5本	7本
	設置位置	R=20.6m~21.5m (部材中心)	R=24.617m

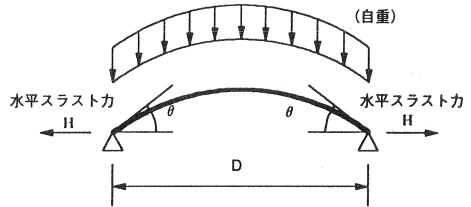


図-4 解析モデル

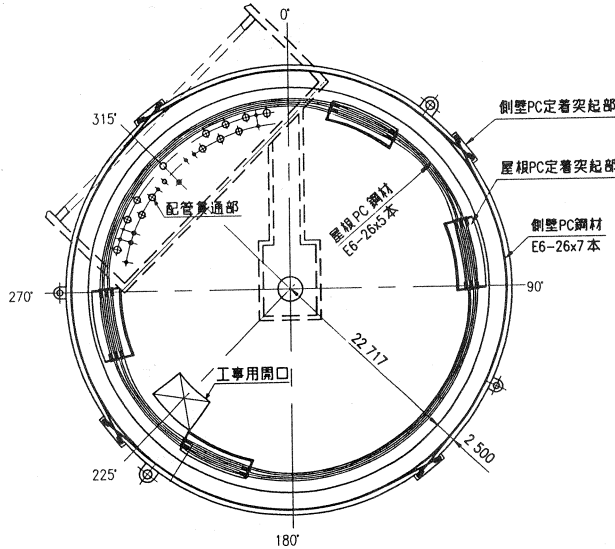


図-5 平面図

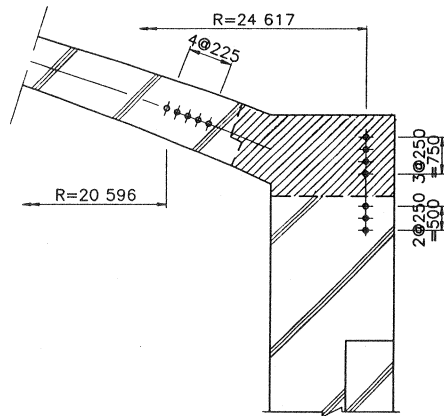


図-6 断面図

4.3 屋根の耐力照査

(1) リフトアップ時の検討

リフトアップ時に屋根に作用する荷重として、プレストレス力と自重があるが、それぞれ下記に示す理由から、円周方向に不均等な分布となった。

- ・プレストレスカ-①図-5に示すように、屋根には工事用の開口部、配管貫通部等があるため、定着突起部を円周方向に均等に配置することが不可能なこと。
- ②定着部付近は曲率をもたないことから、腹圧の作用しない区間ができること。
- ③PCケーブルの本数が奇数(5本)であり、定着部が3本と2本の箇所ができること。
- ④摩擦やクリープの影響で、PC鋼線の緊張力が円周方向に変化すること。

図-7に緊張力の分布を示す。

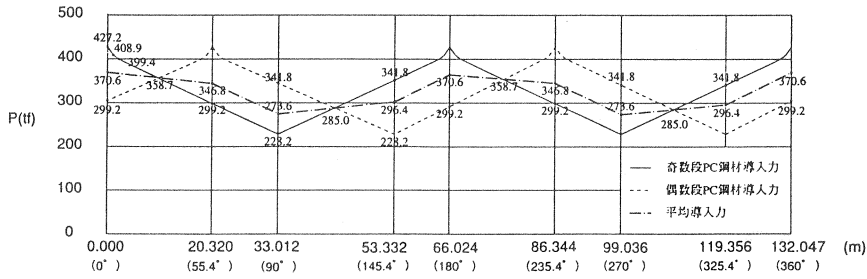


図-7 円周方向の緊張力の分布

・屋根の自重-①工事用の開口部、PCケーブル定着用突起部、内装の重量等のバラツキ等。

そこで、プレストレス力と自重の円周方向のバラツキを考慮するために、3次元FEM解析を行い、リフトアップ時の屋根各部の応力の検討を行った。なお、屋根は弾性シェル要素で、リフトアップケーブルは弾性バネ要素でモデル化した。図-8に解析モデルを示す。

また、荷重は、自重とプレストレス力の他に、ジャッキ反力のアンバランス荷重を考慮した。このアンバランス荷重は過去の実績から最大ジャッキ反力の20%とし、これを図-8に示すジャッキの油圧管理の系統毎に交互に作用させた。

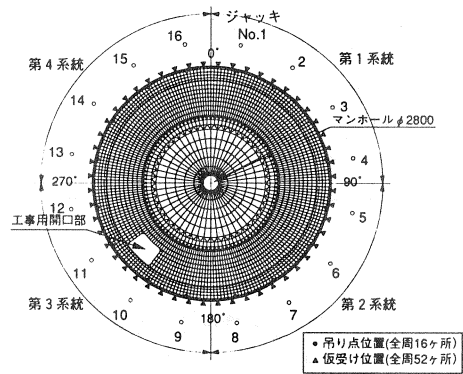


図-8 3次元シェルモデル

解析の結果、発生した断面力を基に算定した鉄筋の最大発生応力度は $1200\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下となり、リフトアップ時に、問題となるようなひびわれは発生せず、<sup>4)</sup>屋根の健全性を確保できることが確認できた。

(2) 完成系におけるRCドーム屋根の設計

RCドーム屋根の設計は、屋根に作用する荷重に対して屋根-側壁-底版一体の3次元シェルモデルを用いたFEM解析により断面力を算定し、限界状態設計法にて部材の安全性を照査した。解析モデルを図-9、考慮した荷重を表-2示す。

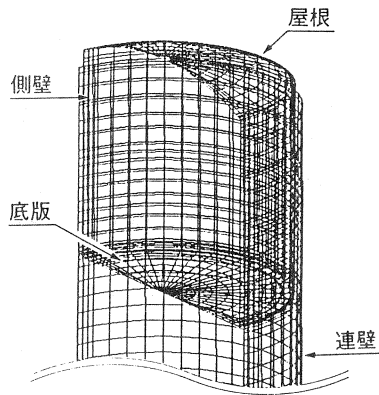


図-9 構造解析モデル

側壁に導入したプレストレス力は、平均的な値を荷重として評価したが、その際連壁は、3次元弾性シェルとして考慮する場合と考慮しない場合の2ケースを考えた。また、リフトアップ時に屋根に導入したプレストレス力と同様に側壁に導入するプレストレス力も円周方向に波打ちすることから、その影響をバックチェックした。なお、側壁の定着突起部の配置は、屋根の円周方向のバラツキを補完するようにした(図-5参照)。

表-2 考慮した荷重

	荷重の種類
常時	屋根自重、覆土自重、ガス圧、温度荷重、プレストレス力、上載荷重
地震時	・静的震度法 地震時土圧、慣性力、動液圧等 ・貯槽-地盤連成系動的解析 指針レベル地震波-3波

地震の影響については従来の静的震度法による検討とあわせて、応答変位法による検討、さらには、水平加振と鉛直加振を同時に考慮した貯槽-地盤連成系動的解析により得られた0.2秒毎の断面力を用い、部材の安全性を照査した。

その際の、設計震度、入力加速度はLNG地下式貯槽指針<sup>5)</sup>により設定した。(土丹上面で水平震度0.15もしくは水平加速度150Gal、鉛直はそれぞれの1/2とした。)

またドーム形状を呈していることから、盛土荷重、屋根自重による座屈に対する安定性を「IASS(国際シェル立体構造学会)鉄筋コンクリートシェルの座屈指針案」<sup>6)</sup>に基づく検討並びに幾何学的及び材料非線形解析をおこない、安全性を確認した。

#### 4.4 屋根部PC定着突起部の検討

屋根部PC定着部の構造を、図-10(a)に示す。当初定着突起部間の距離が長いことから、PC定着部は、図-10(b)に示すような形状にしていたが、導入プレストレスに対して、屋根の厚さが薄いため、導入プレストレスにより、屋根に大きな曲げモーメントが発生することが前述の解析で判明した。そこで図-10(a)に示す構造とし、曲げモーメントの発生を抑え躯体への影響を低減した。

また定着突起部に発生する引張力に対して補強を行った。

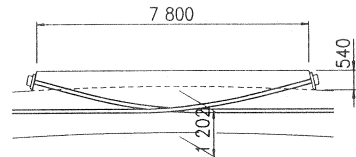


図-10(a) PC定着部の構造1

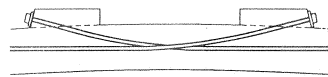


図-10(b) PC定着部の構造2

### 5. 屋根PCの施工

#### 5.1 シース管の設置

今回一般部は、スパイラルシース管を用いたが、定着突起部については、屋根のせん断補強鉄筋等を密に配置することから、薄型鋼管とし、鉄筋組立中のシースの損傷がないようにした。

#### 5.2 PCの緊張工

PCケーブルの配置模式図を図-11に示す。PCの緊張は500tfのVSLジャッキを2台使用した。

#### 5.3 試験緊張工

PCストランドとシース管の摩擦係数および、見かけのヤング係数は、PC鋼材の配置形状等により大きく変動する可能性がある。そこで、設計で設定している定数と実際の定数を比較検討するために、本緊張を行う前に試験緊張を行った。今回、コンクリートの圧縮強度が設計基準強度の90%以上(27N/mm<sup>2</sup>)であることを確認後、緊張するケーブルの内10本中の3本について試験緊張を行った。試験緊張の結果を表-3に示すが、設計値より低い値となり問題ないことが判った。

#### 5.4 本緊張工

本緊張は、定着突起両端にジャッキをセットして行う両引き緊張とした。また、緊張管理は本数が少ないことから、摩擦係数をパラメータとして管理する手法をとった。尚、10本の緊張順序は、緊張により定着部背面に発生する引張応力の影響が、なるべく小さくなるよう下記に示す手順で行った。

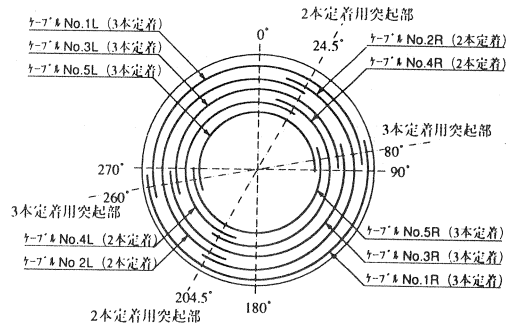


図-11 PCケーブル配置模式図

表-3 試験緊張の結果

項目		試験結果	設計値
摩擦係数 $\mu$	平均値	0.25	0.3
	上限値	0.28	
	下限値	0.22	
みかけのヤング係数 $E_p$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均値	$1.918 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$

2L, 2R (50%) → 4L, 4R (100%) → 1L, 1R (100%) → 3L, 3R (100%) → 5L, 5R (100%) → 2L, 2R (50%)  
 本緊張の管理結果より、 $\mu$ 値は0.25~0.28の範囲となり本作業は安定した状態で行われ、設計通りのプレストレスが導入されたと判断された。

### 5. 5 グラウト注入工

シース管内部には空隙およびブリージング水が発生しないようにすることが必要である。そこで、グラウトの配合は現在市販されている中で高粘性、ノンブリージングタイプのものを用いた。

試験練りの配合を表-4に、結果を表-5に示す。

尚、本グラウトの施工は、地上に混練りのプラントを設置し、グラウトポンプにて、高低差約35m下の屋根の定着部に圧送し行った。尚、この時注入補助として排気側からバキュームポンプを併用した。

表-4 試験練り配合

W/C (%)	セメント (kg)	水 (kg)	混和剤 (kg)	備考
35	1471	515	44	1m <sup>3</sup> 当り

表-5 グラウト試験練りの結果

流下時間 (秒)	ブリーディング率 (%)			圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	1h	3h	20h	$\sigma_7$	$\sigma_{28}$
練り直後	3.1	4.8	0.0	562	631

### 6. まとめ

プレストレス導入後、支保工を撤去したが、ひびわれ等の躯体への悪影響は認められなかったことから、想定通りのプレストレスが作用したものと考えられる。

また、RCドーム屋根のリフトアップ工事は、500tfのVSLジャッキ16台を、4系統に分割し、様々な施工計測を行いながら慎重に進めた(写真-1参照)が、その結果、隣あう系統間の吊り点の最大相対鉛直変位は2mm、水平方向のずれも5mm程度と、予測した変形より小さな値に収まりリフトアップを完了した。

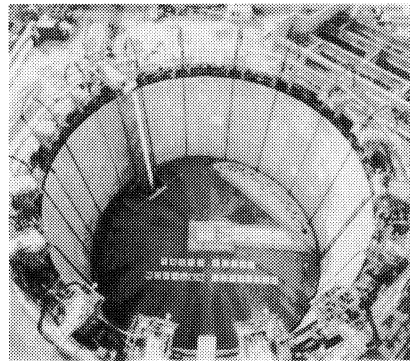


写真-1 リフトアップ状況

### 参考文献

- 1) 津田 勝利・中野 正文・堤 洋一・坪根 康雄：コンクリート製ドーム屋根の設計及び構築概要，土木学会第52回年次学術講演会，1997
- 2) 守屋 雅之・堤 洋一・岡本 剛治・園部 文明：コンクリート製ドーム屋根へのプレストレス導入，土木学会第52回年次学術講演会，1997
- 3) 高木 宏彰・堤 洋一・井関 英生・相原 孝次：コンクリート製ドーム屋根のリフトアップ計画と設計一，土木学会第52回年次学術講演会，1997
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成8年度版)設計編
- 5) 資源エネルギー庁；LNG地下式貯槽指針，昭和56年12月
- 6) 半谷裕彦・高山 誠・真下和彦：IASS鉄筋コンクリートシェル of 座屈指針，quarterly column 101 pp.75~81, 1986.7
- 7) VSL協会：VSL工法 設計施工基準，平成7年1月
- 8) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，昭和59年2月
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編，平成6年2月