

## つくばエキスポセンター プラネタリウムドームの設計と施工

鈴 木 善 夫\*  
菽 坂 詳\*\*  
青 山 定 男\*\*\*  
加 藤 裕 司\*\*\*

### 1. はじめに

この報告のプラネタリウムドームを持つ建物は、科学万国博覧会の展示施設中唯一の恒久施設で、その建設地は主会場より離れた研究学園都市の中心部の、学園センタービルと松見公園の中間に位置している。ドームの内部は、直径 25.6 m の世界最大のプラネタリウムが設置されるほか、高品位 TV 大画面等映像を主体とした催物、各種学会、国際会議等の開催が可能になっている。

### 2. 工事概要

工事名称：国際科学技術博覧会政府出展館

つくばエキスポセンター（仮称）建築工事

工事場所：茨城県新治郡桜村吾妻 3 の 1

設 計：日本設計・佐藤武夫設計事務所共同企業体

監 理： ”

施 工：大林組・銭高組・福田組・常総開発共同企業体

ドーム施工：オリエンタルコンクリート（株）

建物概要：

建築面積； 6 134 m<sup>2</sup>

延べ面積； 10 497 m<sup>2</sup>

階 数； 地下 1 階地上 2 階塔屋 1 階

構 造； RC 造，一部 SRC 造。ドーム部分 プレキャストプレストレストコンクリート造

ドーム形状；

直 径 36.9 m

ラ イ ズ 10.7 m

角 度 130°

外部仕上げ タイル圧着

内部仕上げ 断熱材貼付

### 3. 設 計

ドームの構造は、建物が永久施設であること、外部仕上げが壁・屋根ともにタイル張りであることなどから、コンクリート構造として設計した。我が国の現場打ちコンクリートドームの施工実績は、水道用 PC タンク、サイロ等に数多くあり、解析方法も確立されている。しかし問題は工期であった。建物の 2 階床スラブ施工後、ステージングを組み上げ、型枠、鉄筋の配筋、コンクリート打設、強度の発現を待って支保工を解体し、プラネタリウム用スクリーン下地鉄骨の架設をする工程だとプラネタリウムの施工が間に合わなくなってしまう。そこでプラネタリウム用スクリーン下地鉄骨を先に施工し、後にプレキャストプレストレストコンクリート版を架設しドームを造ることにした。

#### 3.1 ドーム応力の解析

図—2、図—3 に伏図、断面図を示す。

ドームの応力解析はコンピューターを使用し、有限要素法によって行った。使用プログラムは日本電子計算（株）の“FINAL/TANK”である。このプログラムは円筒、球形などの軸対称殻を軸対称シェル要素を用いた有限要素法により解析するものである。図—4 に応力解析用モデルを示す。縦リブ（経線方向リブ）は入力できないので版厚を 2 cm 増して 10 cm とした。

入力データ

LOAD 1 支点反力：PC 版架設後支保工除去による支点反力移行

LOAD 2 設備荷重：シャンデリア昇降装置

LOAD 3 仕上げ、積載、設備、雪荷重

LOAD 4 地震力：加速度 0.4 G

LOAD 5 プレストレスによるもの：円周方向 PC 鋼材緊張による応力

入力用諸条件

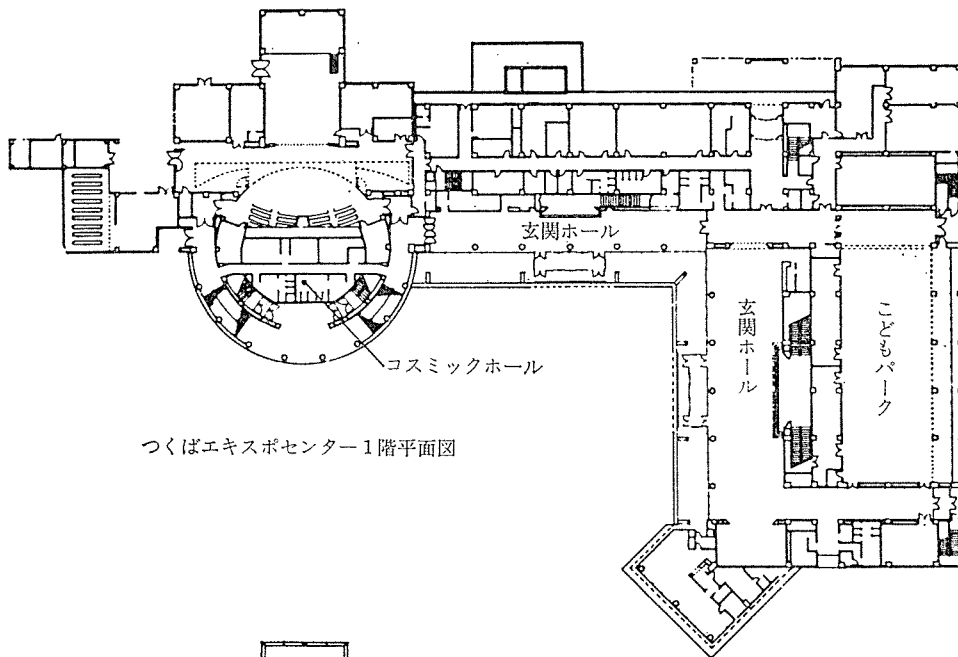
コンクリート設計基準強度  $F_c = 400 \text{ kg/cm}^2$

コンクリート弾性係数  $E_c = 3.25 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$

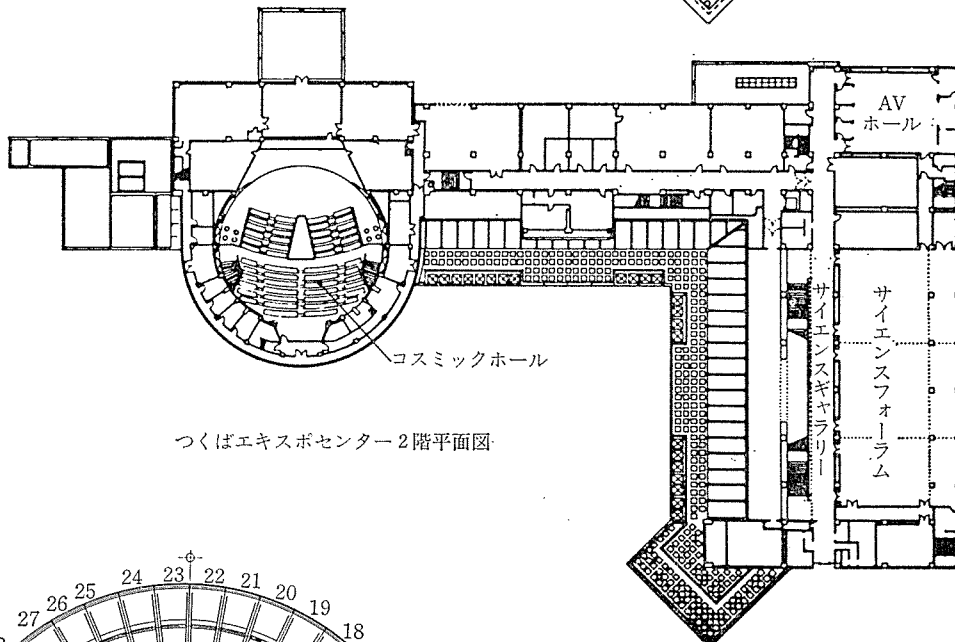
\* 佐藤武夫設計事務所構造部長

\*\* 佐藤武夫設計事務所主任

\*\*\* オリエンタルコンクリート（株）建築支店



つくばエキスポセンター1階平面図



つくばエキスポセンター2階平面図

図-1 平面図

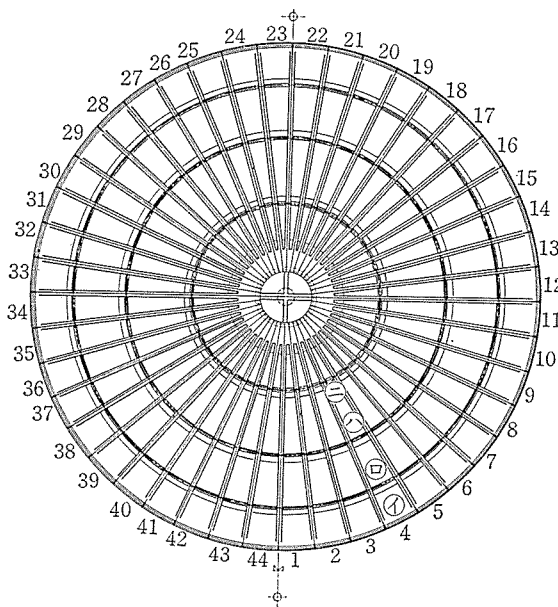


図-2 伏 図

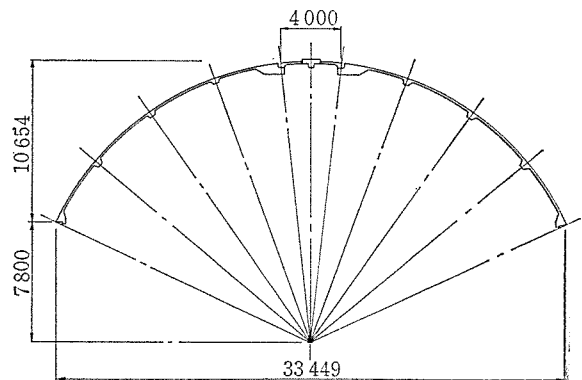
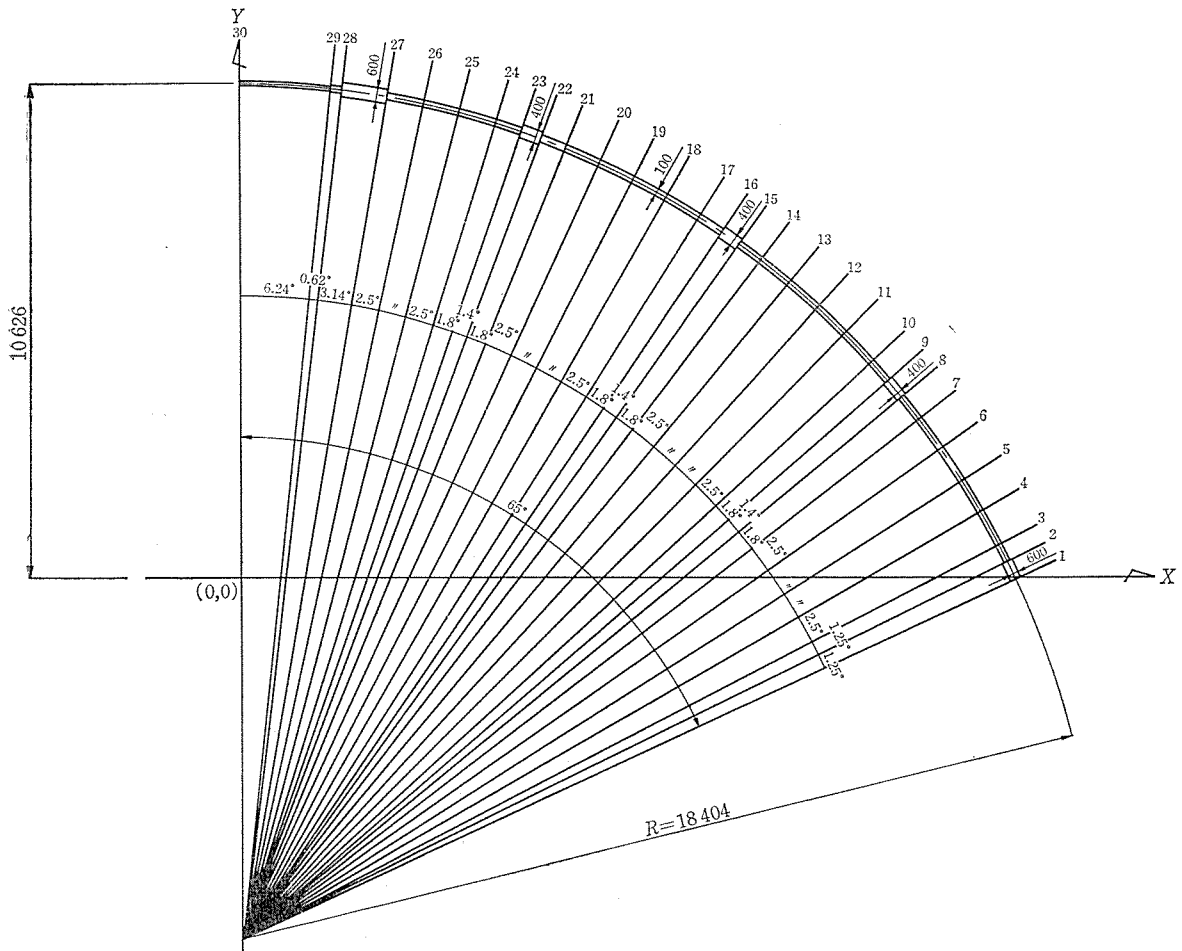
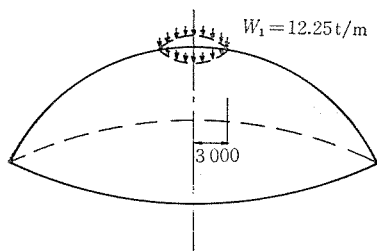


図-3 断面図



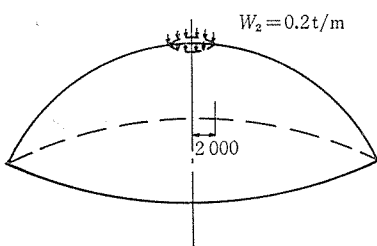
図—4 応力解析用基準座標および構造モデル

1. 支点反力



図—5

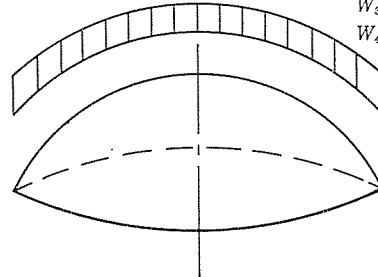
2. シャンデリア昇降装置



図—6

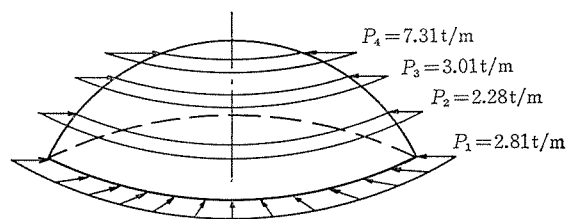
- 3. 仕上げ+積載+設備荷重
- 4. 仕上げ+積載+設備荷重+雪

$W_3 = 0.165t/m^2$   
 $W_4 = 0.245t/m^2$



図—7

5. プレストレス力



図—8

ポアソン比  $\nu=0.1667$   
 線膨張係数  $\alpha=1 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$   
 支承部拘束条件  
 鉛直方向 変位拘束  
 半径方向 変位についてバネ常数  $k=143.9 \text{ t/m/m}$   
 円周方向 " "  
 曲げについてはすべて自由とする。

以上により解析した結果を次に示す。出力結果のすべてにおいて曲げ応力は微小であるので無視する。

3.2 円周方向プレストレスの決定

プレストレス量は垂直荷重（水平荷重）による円周方向の引張応力に見合う量を算出し、目地に引張力が生じないように 横リブの位置に PC 鋼材を配置する。PC 鋼材は 21.8φ ストランドを使用し、アンボンド CCL 工法とした。これにより緊張時の摩擦ロスが少なく有効緊張

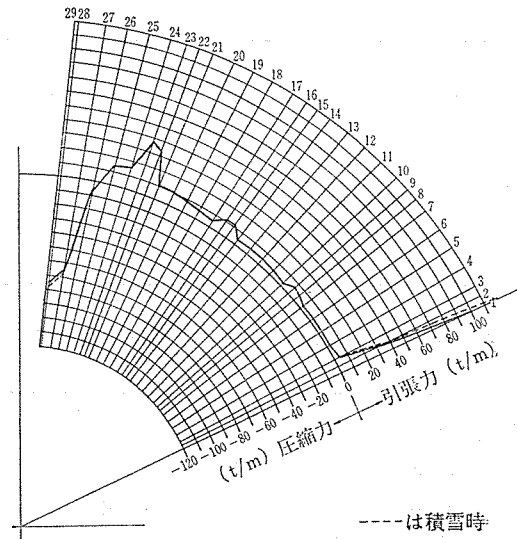


図-11 鉛直荷重時応力 ①+②+③

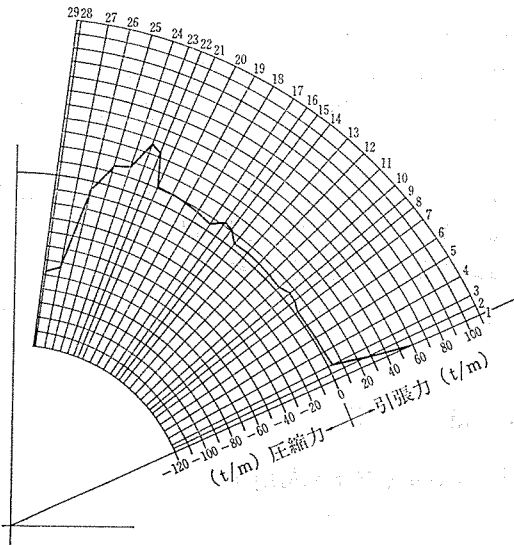


図-9 支点反力移行 ①

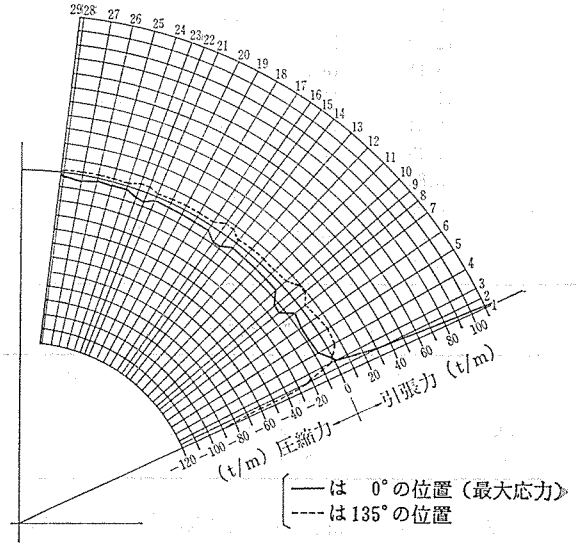


図-12 地震時応力

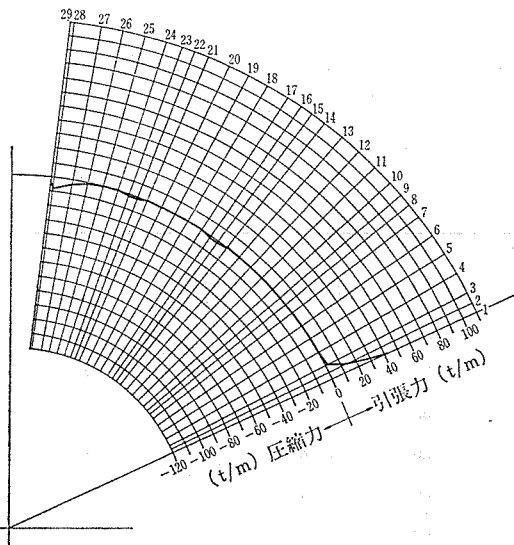


図-10 設備荷重, 仕上げ, 積載, 雪 ②+③

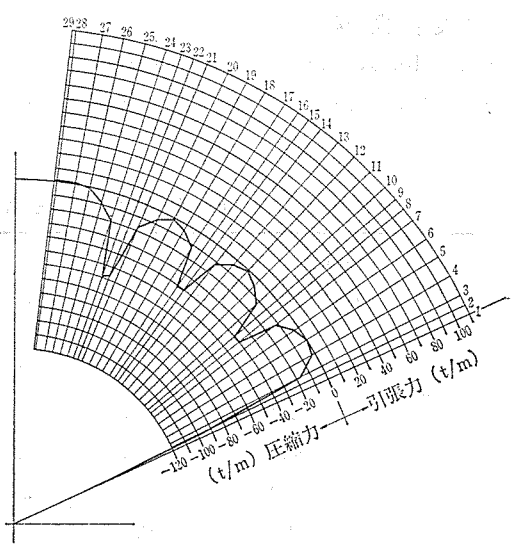


図-13 プレストレスによる応力

表-1

NOOD No.	鉛直荷重時 円周方向引張応力 $N_T$ の合力 $\Sigma N_T$ (t)	水平荷重時 円周方向引張応力 $EN_T$ の合力 $\Sigma EN_T$ (t)	$\Sigma N_T + \Sigma EN_T$ (t)	IT 21.8 SWPR 19 PC ストランド の有効緊張力 (t)	P C スト ランド 数 (本)	有効緊張力 (t)	プレストレス導入による 円周方向圧縮応力 $\Sigma PNT$ の合力 (t)
1~5	39.75	28.47	68.22	31.06	3	93.18	91.71
5~12	18.49	38.13	56.62	32.08	2	64.16	71.70
12~19	33.01	26.04	59.05	31.79	2	63.58	72.35
19~26	78.21	16.26	94.47	30.66	3	91.98	106.47

表-2 設計荷重時、積雪時における円周方向の応力度  
(-は圧縮, +は引張を表わす)

NOOD No.	設計荷重時 応 力 度 $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	積 雪 時 応 力 度 $\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	NOOD No.	設計荷重時 応 力 度 $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	積 雪 時 応 力 度 $\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	-40.02	-33.33	16	-9.87	-10.09
2	-18.11	-15.85	17	-10.08	-10.46
3	-13.52	-12.54	18	3.15	2.95
4	-1.00	-1.06	19	9.59	9.49
5	3.40	3.35	20	5.04	4.90
6	-1.36	-1.31	21	-8.41	-8.72
7	-12.49	-12.53	22	-12.17	-12.45
8	-18.11	-18.14	23	-7.88	-8.08
9	-11.50	-11.55	24	-5.21	-5.54
10	-12.94	-13.07	25	6.10	5.87
11	-1.43	-1.38	26	-10.54	-10.99
12	3.86	3.91	27	-35.87	-36.79
13	-0.02	-0.06	28	-24.37	-25.18
14	-10.68	-10.94	29	-21.22	-22.18
15	-15.50	-15.79			

表-3 使用材料強度

コンクリート	$F_{28}=400$ kg/cm <sup>2</sup> (早強セメント)
鉄筋	SD 30
PC 鋼材	17.8φ SWPR 19
埋込金物	SS 41

力が大きくとれ、目地部からの漏水に対しシーす、グラウト、アンボンド材シール、グリス等鋼材を五重六重に保護できるためである。表-1 に結果を示す。また各要素での応力度を 表-2 に示す。

No. 5, 12, 18, 19, 20 の点で引張応力が生じているが、縦方向リブの効果により実際には圧縮側になるものと思われる。

表-4 縁応力度、各種安全度の検討 (-は圧縮, +は引張)

	脱枠, 養生, 運搬 $\sigma'_{上}$ $\sigma'_{下}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	架 設 $\sigma_{上}$ $\sigma_{下}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ひび割れ安全度			破 壊 安 全 度		
			$M_{脱}$ (tm)	$M_{cr}$ (tm)	$M_c/M_{脱}$	$M_{脱}$ (tm)	$M_B$ (tm)	$M_B/M_{脱}$
			$M_{架}$ (tm)		$M_c/M_{架}$	$M_{架}$ (tm)		$M_B/M_{架}$
4	-43.6	-56.3	15.9	27.2	1.71	15.9	60.4	3.80
	-2.4	-9.3	14.4		1.89	14.4		4.19
7	-30.5	-47.2	13.8	31.2	2.26	13.8	78.1	5.66
	-32.7	3.1	20.0		1.56	20.0		3.91
10	-24.4	-42.4	4.1	23.3	5.68	4.1	68.7	16.77
	-47.1	-2.1	12.7		1.83	12.7		5.41

## 2.3 プレキャスト部材の設計

ドームをプレキャスト化するに当たり、

- ① 運搬が可能であること (通常は幅 2.5 m 以下)
- ② 架設重機の使用が可能な重さ, 大きさであること
- ③ 1 部材の大きさが小さくても, 部材数が多くなっ

て目地長さも長くなり, 現場施工が煩雑になることなどを考慮し, 本設計では縦割り 44 等分にするとして, 頂部は円板をはめ込む形式としたが, 寸法の関係で 2 枚に分けることにした。

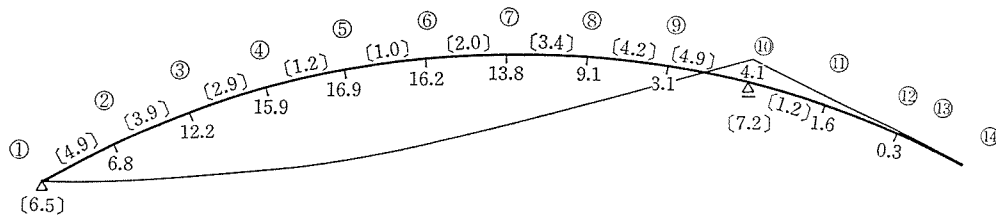
ドーム部材はその性質上組立てを完了してしまえば曲げ応力はほとんど生じないので, 非常に薄い部材でよい。したがって部材の厚さ・リブの大きさ等は製作時, 運搬時あるいは架設時の応力で決定される。使用材料強度を 表-3, 施工時応力を 図-14 に示す。各点の縁応力度および安全度の検討を 表-4 に示す。

運搬時の衝撃については, ひび割れ安全度が 1.56 倍以上あるので安全である。

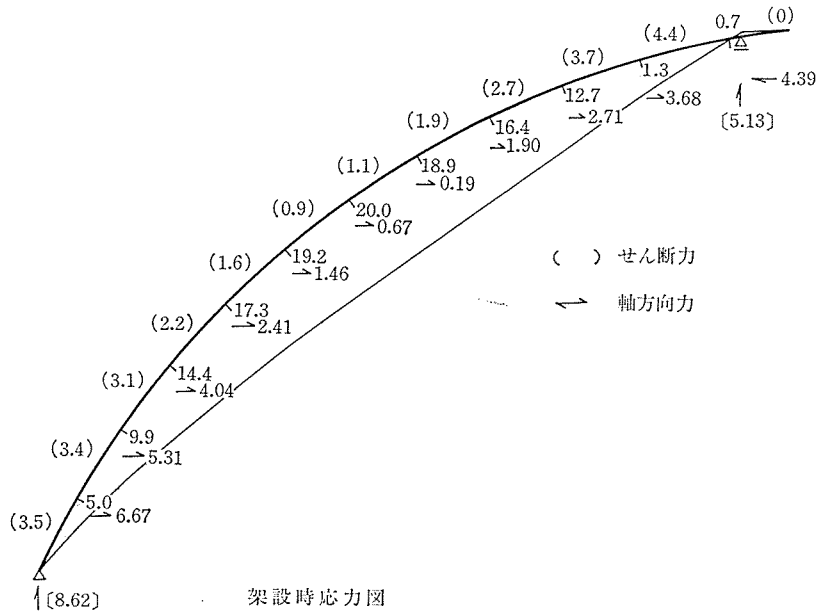
## 4. 施 工

### 4.1 プレキャスト部材製作

プレキャスト版の形は 44 ピースともすべて同じであるが, 横方向 (緯線方向) プレストレス導入用ストランド位置の違いにより側面型枠の種類が 19 種類となった。そこで基本型枠は一基とし, ストランド位置の型枠のみ取り換えることができるよう工夫した。部材の高低差が約 3.4 m あるので足場が必要となり, 作業荷重が型枠に作用しないようにした。型枠の設置は定盤上に基準



脱枠、養生、運搬時応力図



架設時応力図

図-14

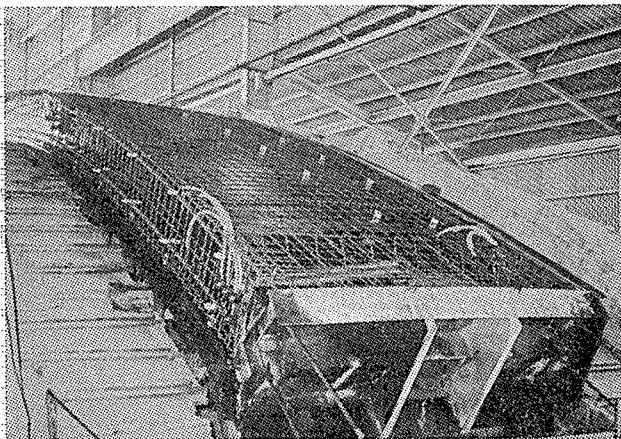


写真-1

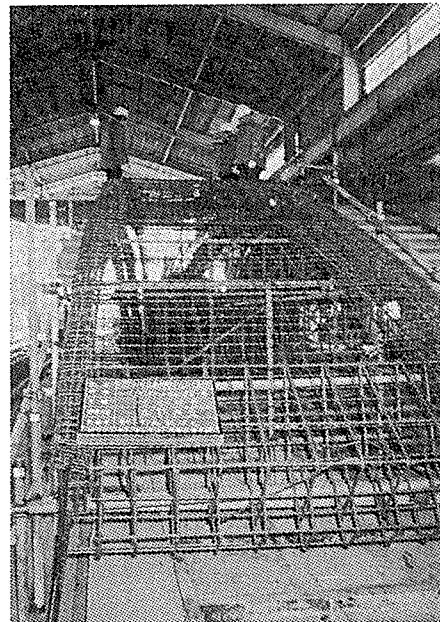


写真-2

線を書き、レベルと下げ振りによって寸法を確認した。またコンクリート打設毎に移動、変形等をチェックする基準とした。鉄筋組立ての時間を短縮するために型枠の横に鉄筋組立て場を作り前もって組立てておき、クレーンで吊り上げ配筋した。コンクリートの強度、材料、調合は下記による。

設計基準強度： $F_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$

調合強度： $F_{28}=500 \text{ kg/cm}^2$

プレストレス導入時（脱型時）強度： $350 \text{ kg/cm}^2$

材料：セメント 早強ポルトランドセメント  
 粗骨材 鬼怒川産 砕石 20mm  
 細骨材 鬼怒川産 川砂 5mm  
 混和剤 ポゾリス No. 70

コンクリート圧縮強度試験成績は平均値で表わす。

表-5 調 合 表

スランプ の 範 囲 (cm)	空気量の 範 囲 (%)	水セメント 比 (W/C) (%)	細骨材率 S/A (%)	水 量 W (kg/m³)	セメント量 C (kg/m³)	細骨材量 S (kg/m³)	粗骨材量 G (kg/m³)		混和剤量 (l/m³)
							砕 石 20 mm		
6±1.5	4±1	38.3	45.0	159.7	428	783	964		4.28

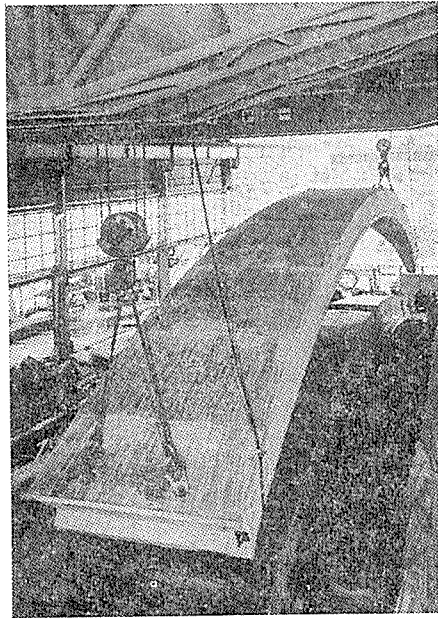


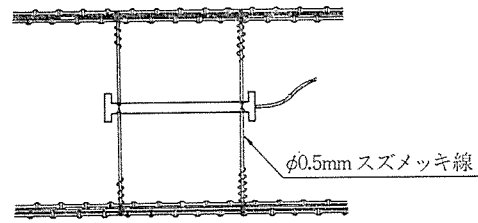
写真-3

材令 1日 359 kg/cm²~401 kg/cm²  
平均 374.8 kg/cm²  
28日 500 kg/cm²~560 kg/cm²  
平均 533.3 kg/cm²

製作は当初2日に1ピースであったが、9ピース目から1日1ピースずつ製作した。部材は寸法、出来形、PC鋼材用シーす位置等厳重な検査をした後、製品番号を付けてストックした。またストック中に版の内側に断熱材を糊付した。

4.2 プレストレス導入応力測定について

部材が湾曲しており、プレストレス導入方向に対して直角にリブが付いているため、プレストレス導入時の応力を測定しその影響を調査した。



図のように所定の取付け位置近傍の鉄筋を利用し、スズメッキ線で固定する。

図-16 ひずみ計取付け要領

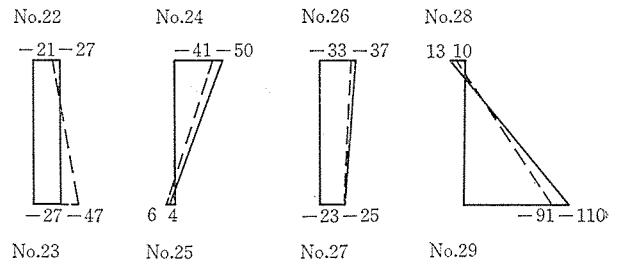


図-17

応力測定の概要

埋設ひずみ計 モールドゲージ PML-60

(東京測器)

ひずみ計取付け位置図 図-15 参照

ひずみ計取付け要領図 図-16 参照

コンクリート強度  $F_c = 375.7 \text{ kg/cm}^2$

コンクリートヤング係数  $F_c = 2.78 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

縁応力度 図-17 参照。実線は計算値、点線は測定値を示す。

測定結果については計算値と測定値とは概ね一致していると思われる。数値の違いは次のような理由と推測する。

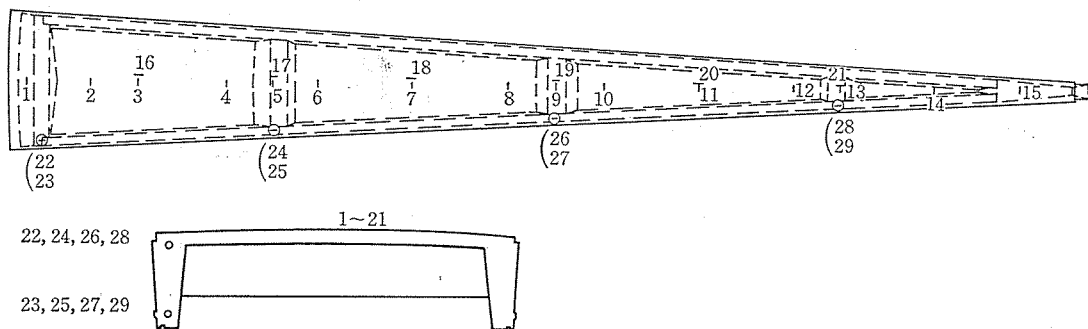


図-15 ひずみ計取付け位置図

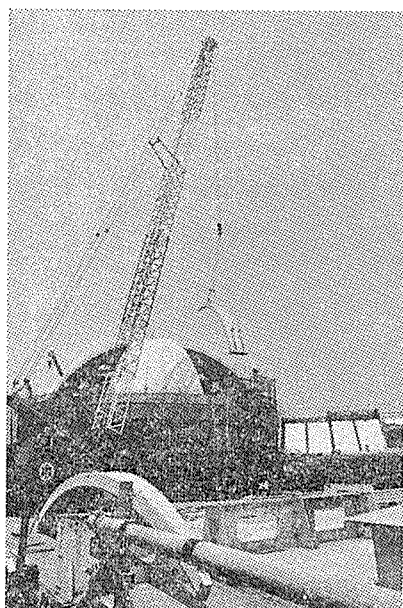


写真-4

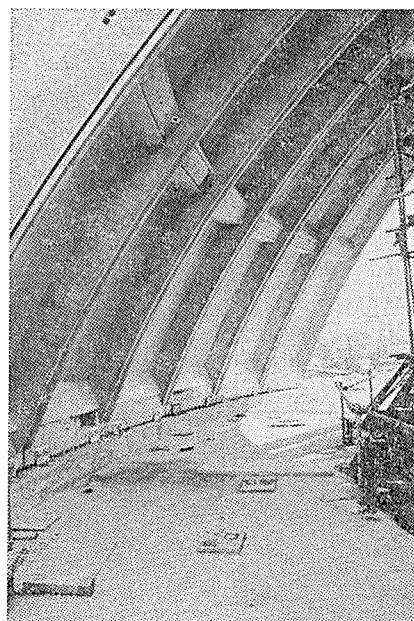


写真-6

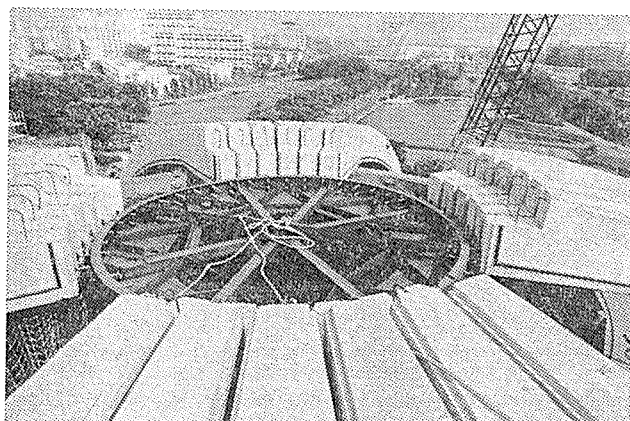


写真-5

- ① 部材の吊り方で勾配が生じた。
- ② テストピースと製品との弾性係数の違い。
- ③ No. 22, No. 23 の端部ではセンサーの位置で曲げモーメントが生じている。

#### 4.3 架設、組立て

製作工場よりトレーラー運搬された PC 部材 (1 枚 16 t) は、場内に仮置きされ、その後、400 t 機械式クレー

ンにより吊り上げ、部材の先端を、中央部に強力サポートで組まれた支保工の上へ据え付けた (写真-4)。この時、支保工に変形が生じないように、部材が常に左右対称となる状態を保つよう留意し、4 方向から架設した。また、架設中の耐震性を考慮し、部材の脚部はプレートで結合し、頂部は鋼材リングから出ているボルトで部材間の仮接合をして、安全性を確保した (写真-5, 6)。

全部材の架設終了後、円周方向の PC ストランド (アンボンドケーブル  $\phi 21.8$ ) 挿入作業を行ったが、考えていたよりも楽に通線ができた。

工期は架設が順調に進んだので、当初の予定よりも短縮され、搬入から架設までわずか 13 日で完了した。実施工程表を下記に示す。

目地部は深さ 490 mm に対し幅が 38 mm と狭く、手作業は困難なため、円周方向のシースジョイント部および目地シール材は、予め製作工場に貼り付けておき、PC ストランド挿入後ただちに無収縮モルタルの充填を行った。無収縮モルタルは、プレユーロックモルタルタイプ (小野田セメント (株)) を使用した。

プレストレス導入は、目地モルタルの圧縮強度 280

表-6 PC ドーム架設および搬入実施工程表

月 日	6 月				7 月								
	27 (水)	28 (木)	29 (金)	30 (土)	1 (日)	2 (月)	3 (火)	4 (水)	5 (木)	6 (金)	7 (土)	8 (日)	9 (月)
PC ドーム架設				4P/4P		6P/10P	8P/18P	6P/24P	4P/28P	4P/32P	4P/36P	4P/40P	4P/44P
PC ドーム搬入	4P	4P	4P		4P		4P	4P	4P	4P	4P	4P	4P
PC ドームストック累計	4P	8P	12P	8P	12P	6P	2P	0	0	0	0	0	0

1. 搬入は、4 ピース/1 日として、架設が 1 日 4 ピース以上になることを予測して、現場内に PC ドーム部材を最大 12 ピース、ストックできるようにして、6 月 27 日~29 日までは、ストック作業のみとした。
2. 架設は、6 月 30 日より開始して、7 月 9 日に完了した。架設の実働日数は、9 日間であった (事前の架設工程は 11 日間)。



表-7 緯線方向応力測定値

(kg/cm<sup>2</sup>)

ゲージ No. 測定ステップ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-14	-6	-3	-3	0	-4	-7	-8	1	-11	10	-7	-8	-11	3
3	-17	1	-22	-4	1	-7	-7	-22	6	-23	30	-15	-14	-20	-4
4	-12	-5	0	-10	-15	-11	2	-18	2	-25	21	-14	-8	-16	2
5	-10	-6	1	-10	-13	-12	1	-17	2	-23	17	-13	-6	-14	0
6	-7	-5	3	-12	-12	-16	-4	-20	-5	-17	3	-9	-1	-9	1
7	-15	0	3	-1	-7	-6	-7	-8	-10	0	-3	12	8	3	4
8	-16	-1	1	-3	-9	-9	-10	-13	-14	-7	-8	5	1	-1	2
9	-17	-2	-1	-5	-10	-11	-10	-15	-14	-13	-3	0	-3	-6	0
10	-15	-1	0	-5	-8	-11	-11	-14	-8	-16	4	-1	-7	-13	-1

kg/cm<sup>2</sup> ( $F_c=400$  kg/cm<sup>2</sup>) を確認した後、4 台の油圧ジャッキにより、最下段の PC ストランドから頂部に向かって順次緊張作業を行い、部材相互の一体化をはかりシェルを構成した。その後、アンボンドケーブルとシースの間にグラウト注入を行った。

支保工の解体は、プレストレス導入が完了した後ただちに行われ、ドーム頂部より搬出した。このため頂部のプレキャスト版 2 枚は、プレストレス導入後に架設されることになった。これは頂部の版の有無によるドーム応力への影響が計算上はほとんど無いことも確認した。

#### 4.4 プレキャストドーム屋根版の応力測定

本測定は 44 枚のプレキャスト版で構成されたドーム状の屋根に図-8 によるプレストレスを導入した場合のひずみを測定し、プレストレス導入効果を調査することを目的に行った。

##### 応力測定概要

埋設ひずみ計、その取付け位置等は 4.2 に同じ。

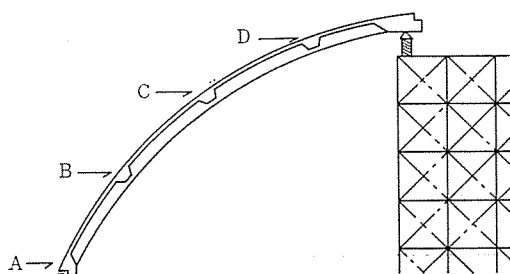
コンクリート強度:  $\bar{F}_{103}=621$  kg/cm<sup>2</sup>

コンクリートヤング係数:  $\bar{E}_c=3.26 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>

測定ステップを 図-18 に示す。

測定値を 表-7 に示す。

測定値と計算値の比較を各ステップ毎に 図-19~



##### ステップ

- |            |               |
|------------|---------------|
| 1. A 部緊張前  | 6. C 部緊張完了    |
| 2. A 部緊張完了 | 7. D 部緊張前     |
| 3. B 部緊張前  | 8. D 部緊張完了    |
| 4. B 部緊張完了 | 9. 頂部支保工取外し前  |
| 5. C 部緊張前  | 10. 頂部支保工取外し後 |

図-18 測定ステップ

図-23 に示す。

## 5. 考 察

測定結果を見ると、埋込みセンサーの精度、コンクリートの温度上昇等により測定値にバラツキも見られるが、概ね、次のようなことが言える。

- ① プレストレスを導入した付近では、比較的計算値に近い値を示している。(A), (B), (C) 位置。
- ② (D) 位置 (No. 13) についてはステップ 7, 8 の比較により、プレストレスの導入効果がはっきりと

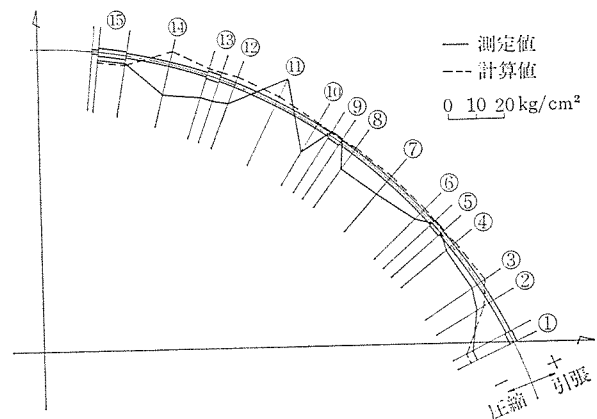


図-19 応力度図 (A) 1 段目緊張

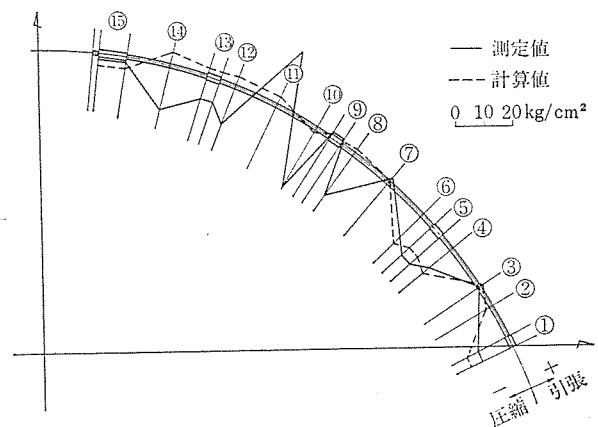


図-20 応力度図 (B) 2 段目緊張

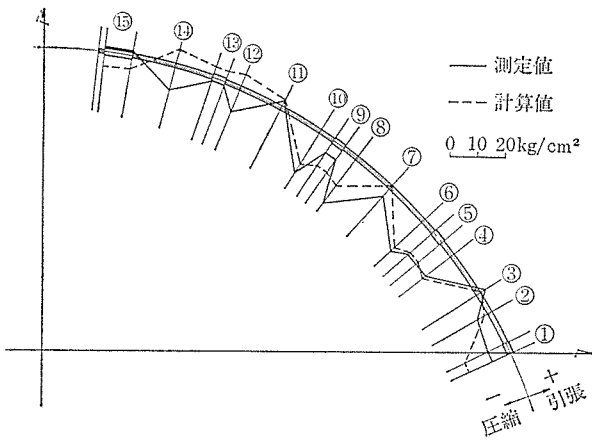


図-21 応力度図 (C) 3 段目緊張

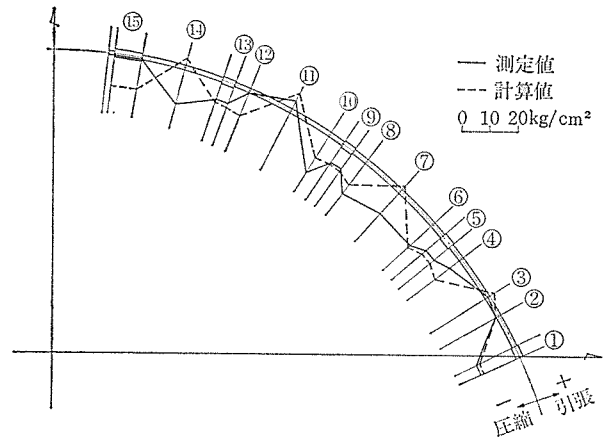


図-23 応力度図 (E) 頂部支保工取外し後

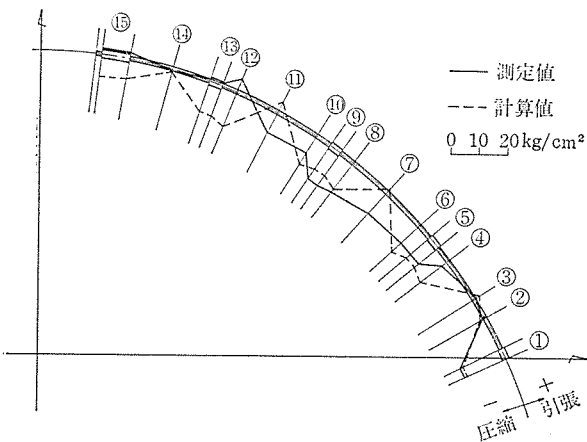


図-22 応力度図 (D) 4 段目緊張

認められる。

- ③ 測定点 No. 3, 7, 11, 14 では計算値よりも圧縮応力度が大きい。これは経線方向のリブ梁の影響と思われる。
- ④ 図-19, 20, 21 を比較するとプレストレスを導入した場所および既に導入完了した部分は計算値に近い値を示すが、導入されていない部分はバラツキが大きい。これはプレストレスを導入した部分からシェ

ル面となっていくことを示しているのに対し、計算値の方は全体をシェル面と仮定し、その一部にプレストレスを導入した値を使用しているためと思われる。

以上、計算値で引張応力が生じている No. 3, 7, 11, 14 の所で、測定値では No. 3, 7, 14 で圧縮応力、No. 11 では引張応力が生じているが計算値よりも小さくなっている。したがってプレストレス導入効果は十分発揮されたと推測される。

## 6. おわりに

近年、宇宙への関心が高まる中で、ハレー彗星の大接近など夜空への関心も高まり、各地にプラネタリウムの建設計画があると聞くが、この報告が計画の一助になれば幸いである。

最後に今回の工事に際し御指導いただいた建設省・筑波研究学園都市施設管理センターの方々と JV の方々をはじめ関係者各位に誌上を借りて厚く感謝の意を表します。

【昭和 60 年 2 月 6 日受付】