

吊り屋根構造を用いた体育館

岡 本 剛*

要 旨 愛媛県西条市に西条市立体育館がわが国で初めての吊り屋根構造による建物として竣工した。設計の概要および施工について報告する。

1. は し が き

西条市立体育館を設計するにあたって、その建築工事予算はきわめてきりつめたものであった。体育館のごとき大空間をおおう工費の安い屋根構造としてシャレ屋根が考えられる。しかしこの場合にはシャレ屋根よりも工費が安いだらうと予想される吊り屋根構造を採用した。欧米では吊り屋根構造を用いた集会所のごとき建物はすでに数例つくられている。しかしわが国では吊り屋根構造は初めてのことであり、工事請負会社の工事に対する不慣れ、設計細部の研究不足、等のため工期は多少遅延した。しかし一般にこの工法は他のいかなる工法（例えば鉄骨造やシャレ構造）にくらべて最も安全かつ確実に施工しうるので、作業機械を装備するならば他のすべての工法よりも最も安く、かつ最も早く建築されることができると考えられる。

2. 建 物 の 概 要

建物の規模は図面からわかるとおり、屋根周囲の縁ばりはプランにおいて二つの放物線を組合わせたものであって、その長径は 48 m、短径は 43.2 m、縁ばりの最高部の高さは 12.6 m、最低部の高さは 6.2 m である。内部中央にはバレーボール用コートがあり、コートをはさんでその片側に 3 階建の観覧席が、他の側には集会用の映画スクリーンつきの舞台が設置されている。屋根

表-1

建 物 名 称	西条市体育館
建 物 所 在 地	愛媛県西条市
建 築 設 計	坂倉準三建築研究所
構 造 設 計	岡本建築設計事務所
施 工 (一 般)	清水建設KK
〃 (P C 部 門)	別子建設KK
建 築 面 積	地階 187.10
	1 階 1 382.40
	2 階 293.10
	3 階 246.30
	計 2 108.90 m ²
工 期	着工 1960 年 9 月 13 日
	竣工 1961 年 6 月 10 日

* 岡本建築設計事務所代表取締役

周囲の縁ばりは、その下に並ぶ多くの壁によって支持される。

縁ばり長軸(図-5 y 軸)に平行に吊り綱を 1.20 m 間隔に 2 本ずつ張り渡し、縁ばりに定着する。この吊り綱はその上にのせられる厚さ 5 cm、縦横が 1.10×1.14 m のプレキャスト コンクリート板の荷重を支える。この吊り綱と直交して配置する上方にそった抑え綱が吊り綱の変形を防止して、屋根面を安定させる。吊り綱として P C 用鋼棒 24 φ (第 3 種) が、抑え綱として P C 用鋼棒 16 φ (第 3 種) が用いられた。

吊り屋根の施工順序は、

(1) 縁ばり間に y 軸方向に吊り綱を張り渡し、この吊り綱の上に抑え綱を配置する。

(2) 吊り綱上にプレキャスト ブロック板をのせる。

(3) プレキャスト版間のすき間に目地コンクリートを打つ。吊り綱方向の目地は 2 本の吊り綱がコンクリートで被覆されるのでコンクリート リブとなっている。

この場合、図-5 において縁ばりに近接した位置において、吊り綱と抑え綱および縁ばりによって仕切られた形は正方形でないので、上記のプレキャスト板をのせることができない。この部分は目地コンクリート打と同時にコンクリートを現場打とする。

(4) 目地コンクリートの強度発生後、吊り綱を緊張し、次に抑え綱を緊張してコンクリート板およびリブにプレストレスを導入する。

この屋根スラブの形は、完成後ハイパボリック パラボロイド形になるように選定されているので、吊り綱上におかれたプレキャスト板は完成後、プレストレス コンクリート ハイパボリック パラボロイド (Hyperbolic Paraboloid) シャレとなる。従って屋根はシャレとして剛性が増すばかりでなく、この屋根スラブ上にその後作用する設計積載荷重、雪荷重、風荷重に対して屋根スラブはきれつを生ずることがないのは当然であるが、これらの載荷荷重に対してはこの屋根は吊り屋根としてではなくハイパボリック パラボロイド シャレとして働らくものと思われる。

縁ばりおよびこれを支える壁、この壁を支える布基礎はすべて普通鉄筋コンクリートであるが、吊り綱の張力によって、二つの放物線形アーチの縁ばり基部には x 軸

方向の水平推力を生ずる。この推力をうけるため 図-3のごとく控え柱と引張柱を、二つの縁ばり基部間に、つなぎばりを設けた。水平推力をうける引張柱および地中つなぎばりはプレストレスト コンクリートとした。

2. 構造設計

両端をヒンジで支持された吊り綱上に一様分布荷重が載るとき、この綱は懸垂線形となる。この場合、懸垂曲線の中央部のライズがスパンにくらべてそれほど大きくないときは、この懸垂曲線を放物線と見なしても大差はない。すべての吊り綱上に同じ等分布荷重がのって、たわんだ綱の形を同じ放物線とすると、綱の引張力は同一となる。抑え綱も放物線形になるようにえらぶと、すべての抑え綱に同一緊張力を与えればよいことになる。直立する2組の吊り綱および抑え綱によって作られる綱の形をハイパボリック パラボロイド（以下 H P と略称することにする）形に選ぶと、上の二つの条件を満足させてくれる。

H P の形は次式で示される。

$$z = \frac{x^2}{h_1} - \frac{y^2}{h_2}$$

この建物の吊り屋根の形として次式で与えられる形が選ばれた。

$$z = \frac{x^2}{146} - \frac{y^2}{180} \quad (\text{単位: m}) \quad (1)$$

縁ばりの形(水平面投影)として次の放物線形にした。縁ばり中心線にて

$$y = 24.0 - 0.05144x^2 \quad (\text{単位: m}) \quad (2)$$

縁ばりに吊り綱の引張力が作用した場合、各吊り綱の引張力は同一であるから縁ばりには曲げモーメントを生ぜず軸圧縮力のみが生ずる。すなわち引張力をうける吊り綱には高張力鋼が、圧縮のみをうける縁ばりには鉄筋コンクリートが使用されており、材料の性質の利点が最も有効に利用されることになる。

(1), (2) 式より縁ばり中心線の高さは

$$z = 0.1333y + 0.005555y^2 \quad (3)$$

となる。ただし z の原点は放物線アーチの基部における位置とする。

吊り綱および抑え綱の形を放物線とみなすとき、その形は (1) 式より、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \text{吊り綱} \quad z &= 0.0055555y^2 \\ \text{抑え綱} \quad z &= -0.006858711x^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

で与えられる。

吊り綱上にのる荷重は

固定荷重

プレキャスト コンクリート板 厚さ 5 cm	144 kg/m
リブ (7 cm × 23.5 cm)	40

PC鋼棒	10
防水	11
合計	205
積載荷重 $60 \text{ kg/m}^2 \times 1.2 \text{ m}$	75 kg/m ²

上記の積載荷重は雪荷重 60 kg/m^2 に相当するものである。建築基準法では雪荷重は短期荷重として取りあつかうことになっているが、ここでは長期荷重として取りあつた。

前節にのべた吊り屋根の施工順序に従って次の諸荷重に対して計算が行なわれた。

荷 重

- (1) 吊り綱にプレキャスト ブロック板をのせ、目地コンクリートを打つ
- (2) a) 吊り綱を緊張し次に b) 抑え綱を緊張してスラブにプレストレス力を導入する。
- (3) コンクリートのクリープおよび収縮
- (4) 積載荷重
- (5) 風荷重 (上方への吸引力として $120 \text{ kg/m}^2 \times 0.5 = 60 \text{ kg/m}^2$)
- (6) 温度変化 $+15^\circ\text{C}$ および -30°C

上記の荷重 (2) すなわち スラブにプレストレス導入時におけるコンクリートの応力度を次の条件になるようにする。

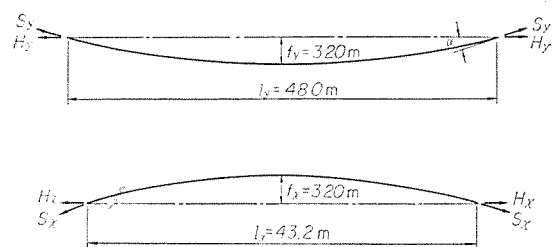
条件 (a) コンクリート圧縮応力度 y 方向 12 kg/cm^2 以上
x 方向 6 kg/cm^2 以上

条件 (b) 積載荷重時にスラブに引張力を生じない。

吊り綱が水平面にて一様分布荷重をうけた場合、その形は放物線となる。この場合の綱の端部における引張力の水平分力は

$$H_y = \frac{wl_y^2}{8f_y}$$

図 A



で与えられる。従って綱の引張力 S_y は

$$S_y = H_y / \cos \alpha = \frac{wl_y^2}{8f_y \cdot \cos \alpha}$$

抑え綱を緊張し屋根スラブにプレストレス力を与えると、吊り綱に一様分布の荷重が下方に作用すると仮定すると、抑え綱の緊張 1 t に対し吊り綱の引張力の増加は

$$S_{y, s_x=1} = 1.22 \text{ t}$$

となる。

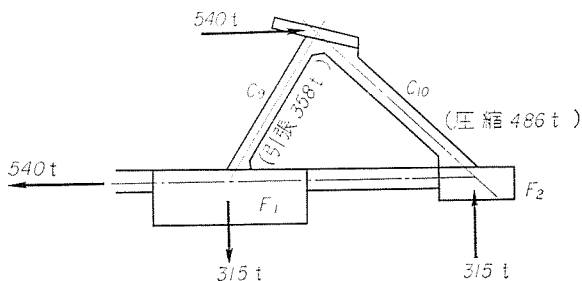
吊り綱に $D.L. = 0.205 \text{ t/m}$ が載荷されたときの吊り綱の引張力は

表-2 吊り屋根の諸荷重に対する吊り網および抑え網の引張力およびコンクリートの応力度

荷 重	吊り網引張力 (t)		抑え網引張力 (t)		コンクリート圧縮応力度 kg/cm ²			
	単独	合成	単独	合成	y 方向		x 方向	
					単独	合成	単独	合成
1 D.L.	19.1	0						
2 プレストレス力導入	18.2	37.3	3.6	3.6	12.0	12.0	6.0	6.0
3 クリーブ後		34.6		3.1		10.2		5.1
4 L.L. (60 kg/m ²)	5.3	39.9	-1.1	2.0	-6.9	3.3	1.9	7.0
5 風 (-60 kg/m ²)	-5.3	29.3	1.1	4.2	6.9	17.1	-1.9	3.2
6 温度 -30°	4.9		1.1					
7 (3)+(6)		39.5		4.2				
8 (3)+(4)+(6)		44.8		3.1				
9 (3)+(5)+(6)		34.2		5.3				
最大または最小値		44.8		5.3		3.3		3.2

1. 吊り網 2-24 Pφ, 抑え網 1-16 Pφ を使用する

図 B



$$S_{y,DL} = 19.1 \text{ t}$$

吊り網を $P_1 = X_1$ で緊張するとき、屋根スラブ コンクリートの圧縮応力度は

$$\sigma_{y,P_1} = \frac{X_1}{A_y} = \frac{X_1}{765} = 0.00129 X_1$$

抑え網に緊張力 $P_2 = X_2$ を与えると

$$\sigma_{x,P_2} = \frac{X_2}{A_x} = \frac{X_2}{600} = 0.00167 X_2$$

$$S_y = 1.22 X_2$$

$$\sigma_{y,P_2} = -\frac{S_y}{A_y} = -\frac{1.22 X_2}{765} = -0.00160 X_2$$

上の条件 (a) に対し下の連立方程式がえられる。

$$\begin{cases} \sigma_{y,P_1} + \sigma_{y,P_2} = 0.012 \text{ t/cm}^2 \\ \sigma_{x,P_2} = 0.006 \text{ t/cm}^2 \end{cases}$$

上式をとりて $X_1 = 13.8 \text{ t}$

$X_2 = 3.6 \text{ t}$

をうる。従って吊り網、抑え網の引張力は

$$S_y = X_1 + 1.22 X_2 = 18.2 \text{ t}$$

$$S_x = X_2 = 3.6 \text{ t}$$

となる。

上記の諸荷重に対する吊り網、抑え網の引張力およびコンクリートの応力度を表

図 C(1) 鉛直変位

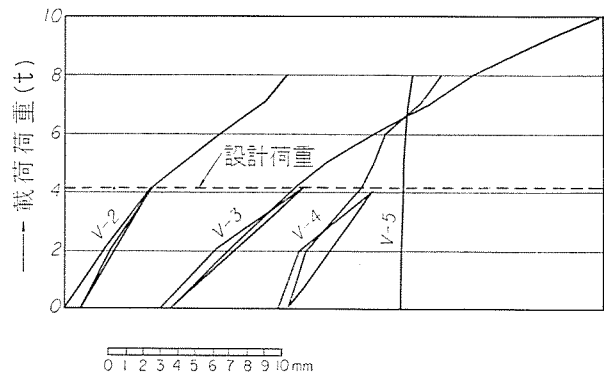
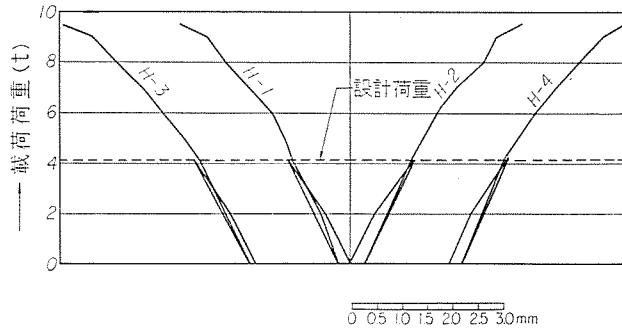


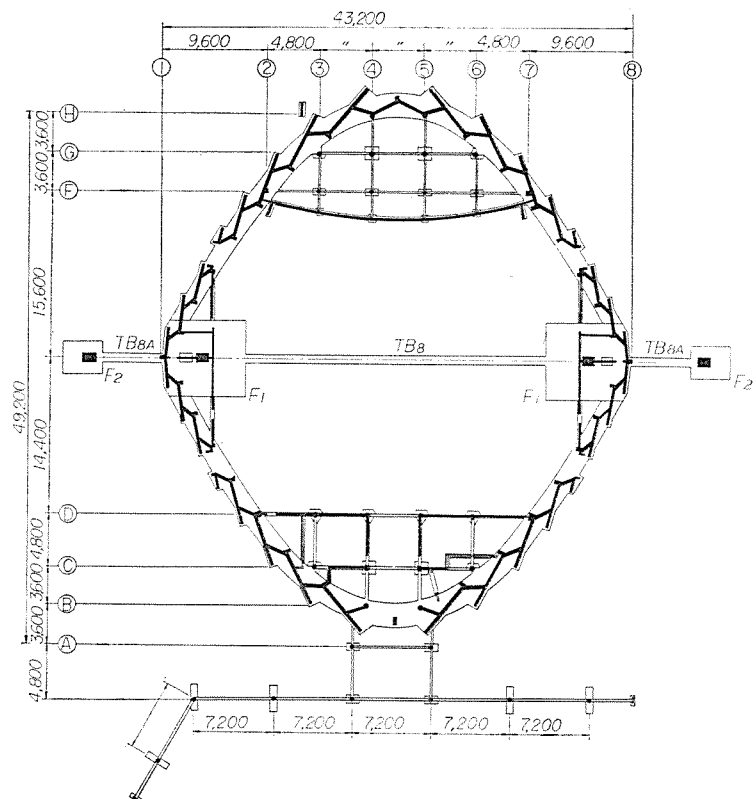
図 C(2) 水平変位



—2 に示す。ただし吊り網として、2-24 Pφ 抑え網として 1-16 Pφ (いずれも第3種鋼棒) が用いられる。

屋根周囲の縁ばりの基部に発生する水平推力は 540 t に達する。これを支えるためハ形をした2本の柱 C₉ および C₁₀ を用い (図-3) 左右2組の基礎 F₁, F₂ 間を

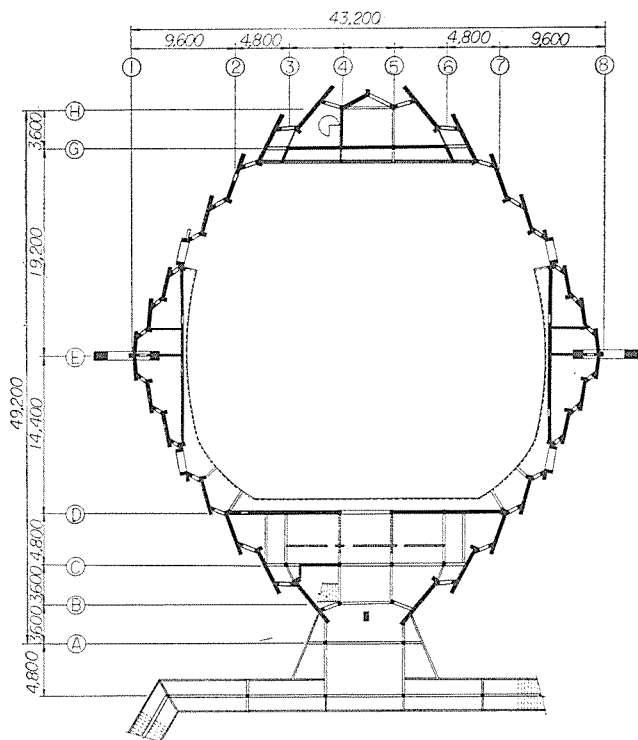
図-1 基礎伏図



地中ばり TB_8 でつなぐ。柱 C_9, C_{10} , 地中ばり TB_8 , 基礎 F_1, F_2 に生ずる反力は次のとおりとなる。

- $C_9 = 358 \text{ t}$ (引張)
- $C_{10} = 486 \text{ t}$ (圧縮)
- $TB_8 = 540 \text{ t}$ (引張)
- $F_1 = 315 \text{ t}$ (引張)
- $F_2 = 315 \text{ t}$ (圧縮)

図-2 2階床伏図



柱 C_9 の引張力に対して 12-7φ ケーブル 10 本を用いて柱にプレストレス力を与えた。地中ばりにも 12-7φ を用いてプレストレス力を導入した(巻末付図 A1)。

4. 模型実験

施工に先立って本建物の 1/7 大のモルタル製模型を作り載荷試験を行なった。図-6 にその主要寸法および、たわみ測定のためのダイヤルゲージの取付位置、ひずみ測定のためのワイヤーストレインゲージの貼布箇所を示す。

写真に見るとおり 36 点集中荷重をもって等分布荷重にかえた。

設計荷重(模型の屋根自重+載荷装置重量=2386 kg, および載荷荷重=4159 kg)まで順次荷重をまし、一たん荷重を除去し再び載荷し、載荷荷重 9.5 t に上昇せしめたところ、吊り綱のコンクリートリブにき裂つが数カ所発生したので載荷を中止した。

ストレインゲージの測定は機械の故障のためよい結果がえられなかった。図 C にたわみの測定を示す。

5. 施工

(1) 吊り綱および抑え綱鋼棒の配置

縁ばり(RC)の配筋後、吊り綱および抑え綱の鋼棒端部のラッパ形シースを縁ばり内に配置し、このシース内に鋼棒を挿入し縁ばりのコンクリートを打った。1本の長さ 7.20 m の吊り綱鋼棒は作業用ステーシングから立てた仮支柱で受けてカップラーで接続された。このス

図-3 E 通断面図

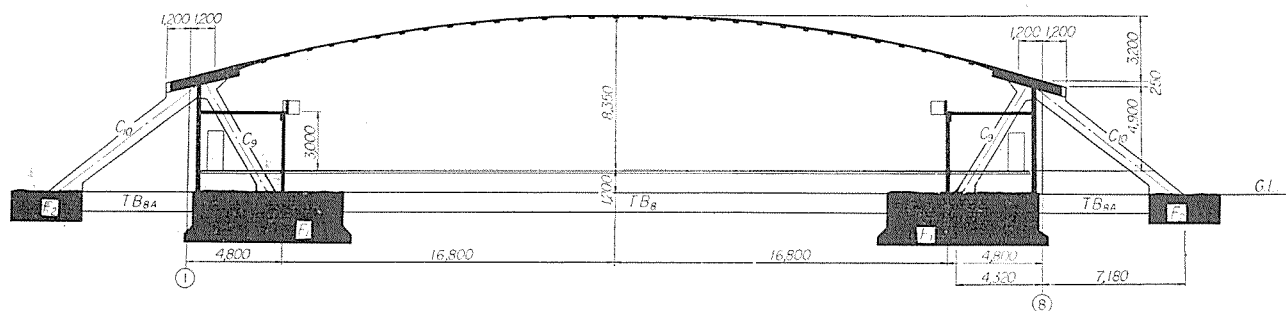


図-4 縦断面図

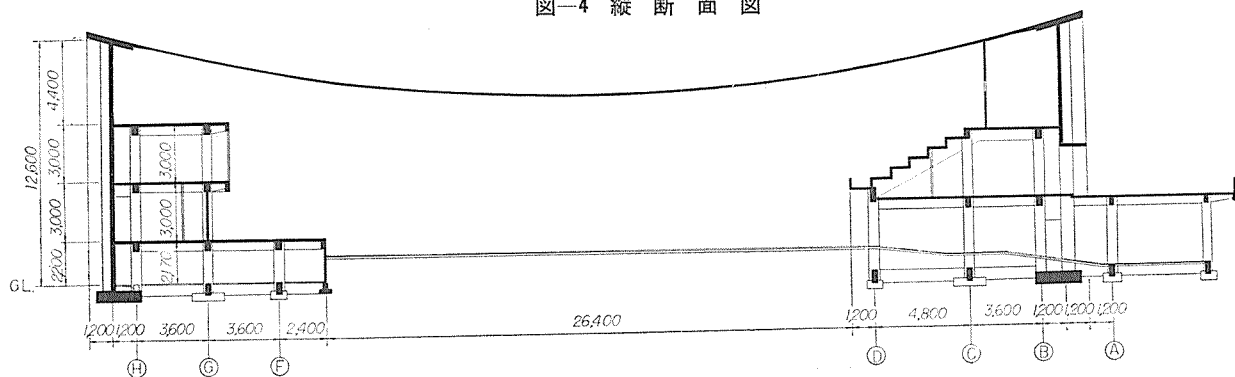


图-5 屋根伏图

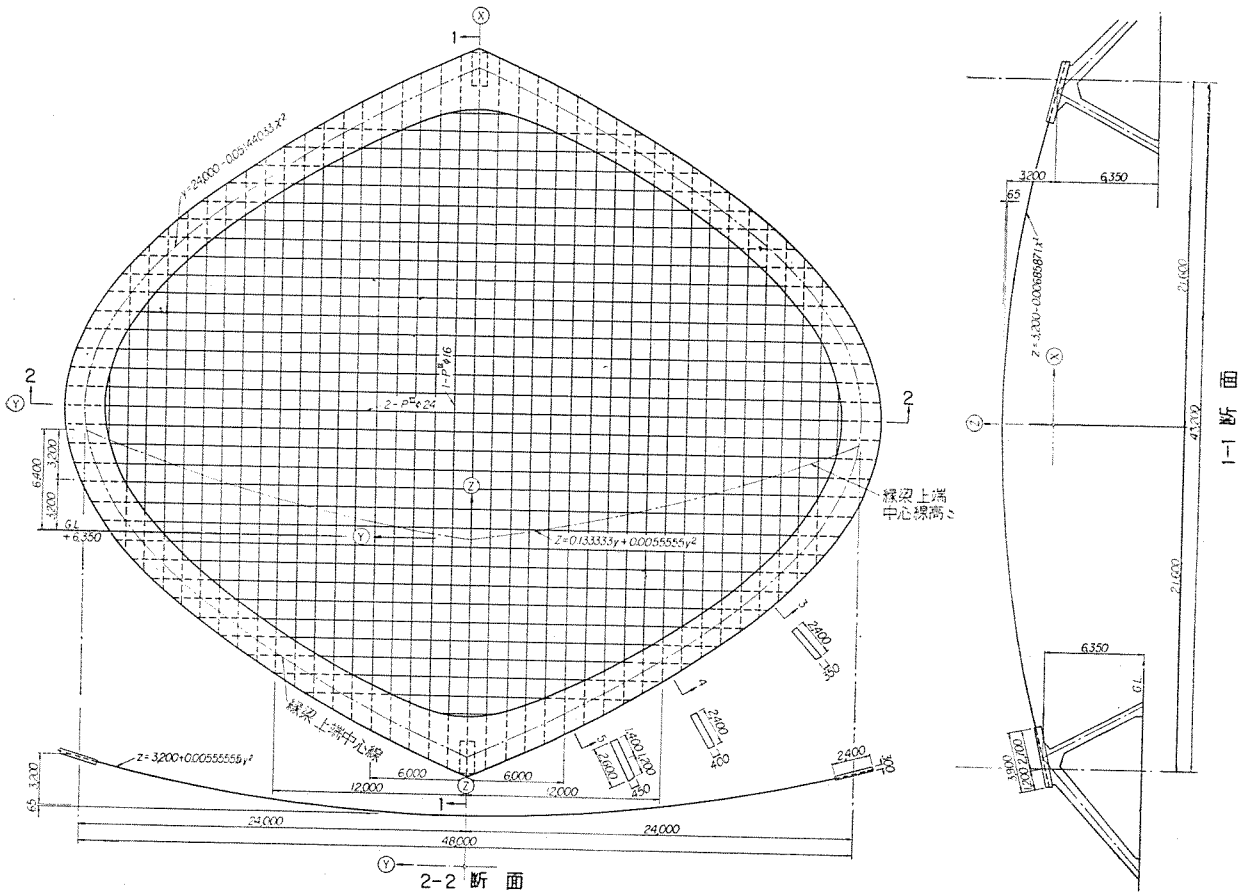
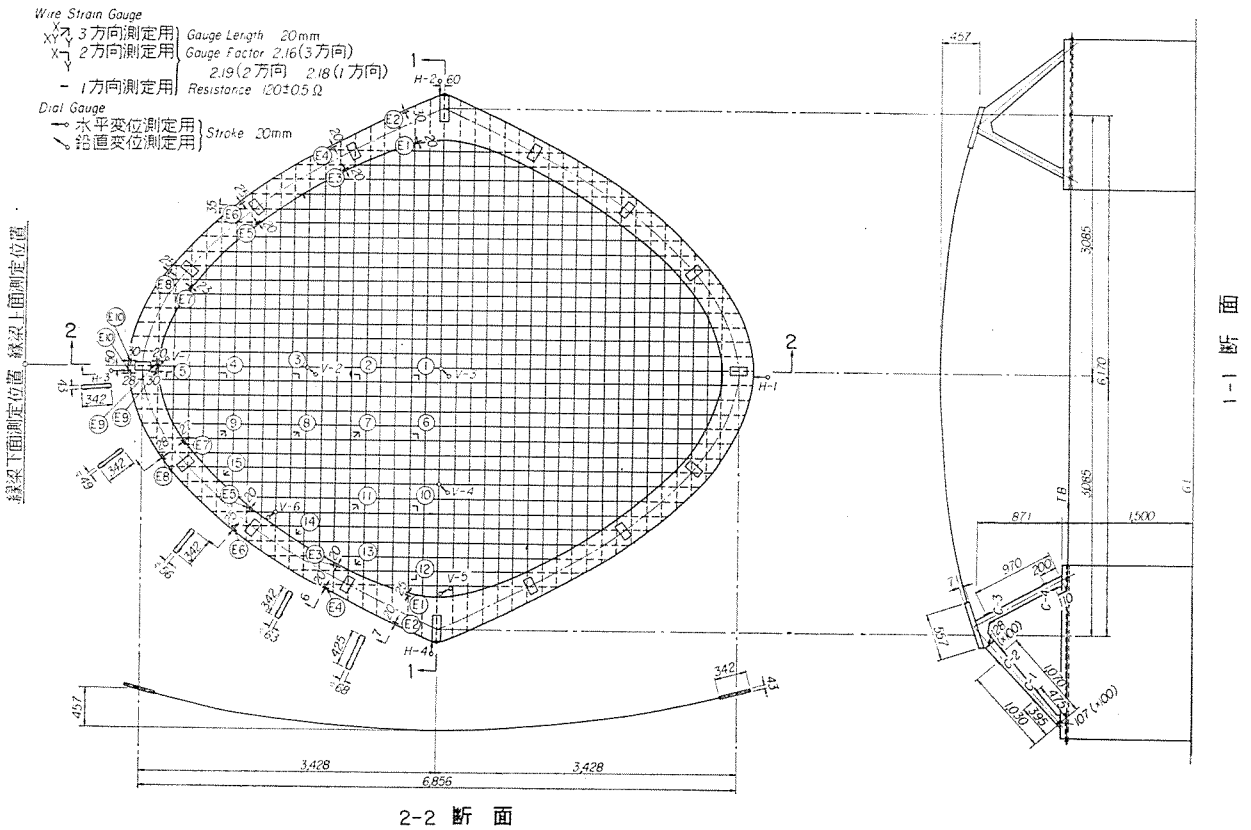
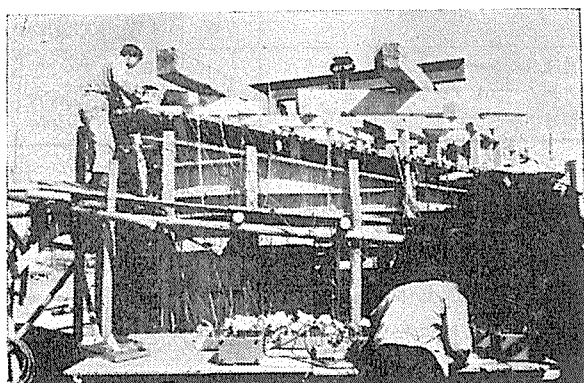


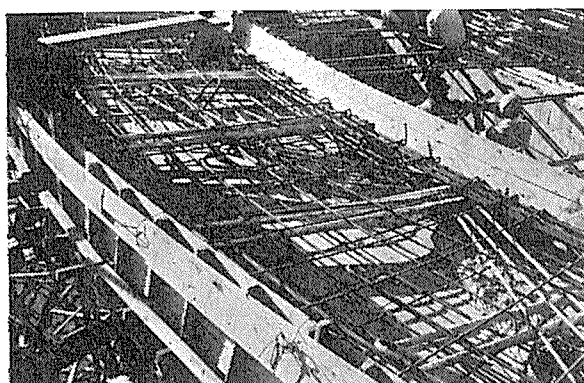
图-6 体育館模型測定位置



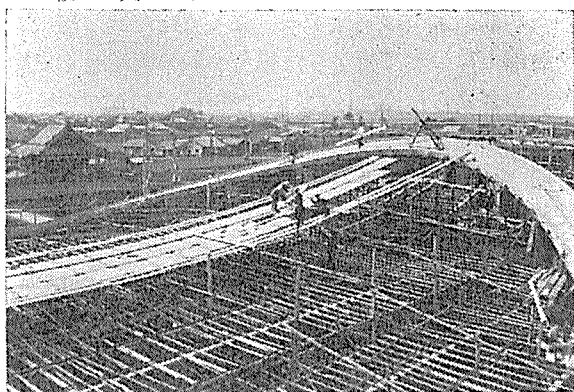
写真一 実物の1/7大のモルタル製模型の載荷実験を行なっているところ。



写真二 屋根縁ばりの鉄筋の間に吊り綱 24φのシーが貫通しているの見える。



写真三 RC縁ばり間に吊り綱としてPC鋼棒 24φがかけ渡され、その上に抑え綱 16Pφがかけられている。吊り綱上にプレキャストコンクリート屋根板が3列のせられているの見える。

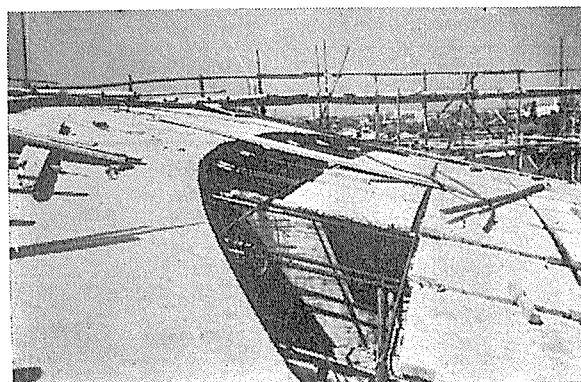


テーシングは後で屋根パネルの目地型わくの取り付け、電線用配管、照明器具の取り付け、天井吹付け等の作業に有効に利用された。

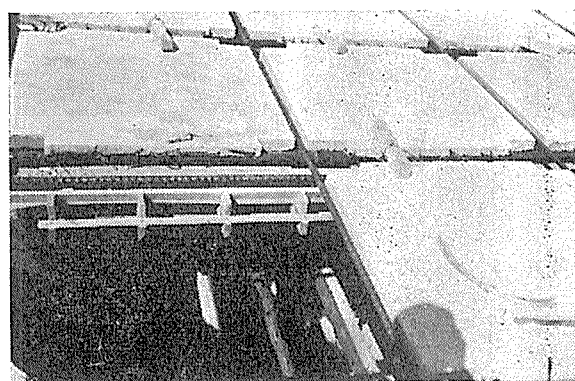
次につり綱鋼棒 24φのライズが所定の位置になるように鋼棒を仮緊張する。この位置を定めるためには吊り綱の中央点、すなわちx軸上の高さを各鋼棒について調べればよい。

次に屋根板ブロックを吊り綱上にのせ、目地コンクリートおよび異形部分屋根の現場打コンクリートを打った

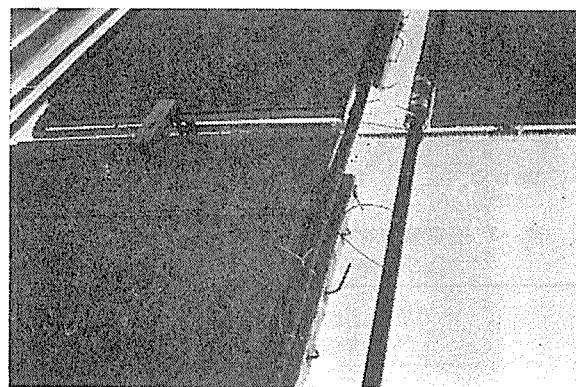
写真四 吊り綱の端部では正方形のプレキャスト屋根板がのせられないので、この部分は目地コンクリートとともに現場打コンクリートを行なう。



写真五 2本の吊り綱をコンクリート被覆するためのリブ型わくがプレキャスト屋根板から吊下げられている。



写真六 プレキャスト屋根板の厚さは5cmで下面には木毛板が打込まれている。屋根板はその両端で吊り綱にのせられ、かつ落ちないように番線で吊り綱に結束されている。



のち、吊り綱 24φ鋼棒を緊張し、ついで抑え綱 16φ鋼棒を緊張する。緊張は1回の緊張で行ない、緊張後グラウト注入を行なった。

鋼棒の配置後、屋根ブロックの載荷、目地コンクリート打、吊り綱および抑え綱の緊張にともなって生ずる屋根板の上下方向への移動は、屋根中央点において実測された値は表一に示される。この値は計算値ときわめてよく一致している。

(2) 施工上の注意すべき箇所

表-4 コンクリートの調合および強度

施 工 箇 所	調 合 (kg)			スランブ (cm)	w/c	セ メ ン ト	混 和 剤	強 度 kg/cm ²		所要強度 (kg/cm ²)
	S	G	C					1 W	4 W	
屋 根 縁 ば り	798	1 006	338	8	50	普通ポルトランド	ボゾリス		305	210
屋根目地コンクリート	467	1 392	400	7	45	アサノペロセメント	ボゾリス	229		350
地 中 ば り	798	1 006	338	6	45	普通ポルトランド	ボゾリス	271		350

写真-7 4枚のコンクリート屋根板の隅角部から2本の吊り綱と1本の抑え綱が見える。吊り綱、鋼棒のカップラーシースをその上から抑え綱が圧するのでカップラーシースがへこんでいる。シース内のカップラーの自由な移動を困難にするおそれがある。カップラーシースの位置を両方向の綱の交点に設けることは避けるべきである。

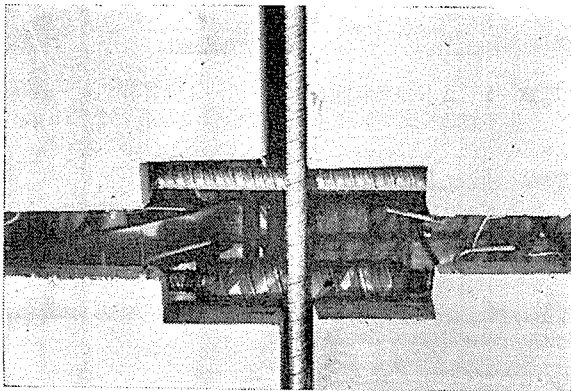


写真-8 吊り綱のリップコンクリートを屋根板のすき間から打込んでいるところ。



表-3 各荷重に対する屋根板中央点のライズ変化および鋼棒張力

	ライズ (cm)		鋼 棒 張 力
	実測値	計算値	
1. 鋼 棒 自 重	310.0	310.0	1.05
2. 屋根ブロック載荷	326.0		7.90
3. 目地コンクリート	329.5	328.3	9.80
4. 吊り綱緊張	328.0	327.3	18.70
5. 抑え綱緊張	328.3	327.7	21.00 (予定値)

(a) 鋼棒定着部のアンカープレートは鋼棒軸と正しく直角に置かれねばならないが、アンカープレート直下のコンクリート面を鋼棒軸に直角にコンクリート打ちすることが困難であった。アンカープレートを正しい角度にするために、その下に硬練モルタルをつめこんだが、グラウト穴がモルタルでふさがれた箇所がで

た。ビニールホースをアンカープレートのグラウト穴を通してシース内部まで挿入すればよいと思う。

(b) グラウト注入時にグラウトが外部にこぼれ、コンクリート打放し面をよごした。アンカープレートのグラウト穴にビニール管を挿入して注入を行えば、このような欠点は除かれる。

(c) アンカープレートの位置は縁ばり外周より、へこんだところにあるが(巻末付図A3)この凹部の大きさが小さすぎてジャッキが挿入できないことが起った。かかる場合にはコンクリートを、はつりとらねばならないので、むだな時間を要することになる。

(d) 鋼棒 24φ と 16φ との定着部が同一箇所を生ずる所が8カ所あり、ジャッキ挿入に支障をきたした。これは 16φ の定着位置を少しずらせばよい。

(e) 鋼棒の継手カップラーの位置を付図A2のように吊り綱と抑え綱の交点においたが、これは失敗であった。カップラーシースが直交する鋼棒によって、へこまされてしまい、悪くするとカップラーによって鋼棒の移動が、さまたげられるおそれがある。カップラーの位置はかかる位置をさげねばならない。

(f) 吊り綱と抑え綱とはその水平投影面上で直交しているが曲面上では斜交する。従って正方形の屋根ブロックを網上にのせて行なった場合Y軸の両端近くで抑え綱内におさまらなくなった。やむを得ず抑え綱を水平方向に曲げたり、ブロックをはつりとったりしておさめた。

(3) コンクリート

使用されたコンクリートの調合およびその強度等は表

表-5 材料の数量

	単位	数 量	
鋼 材	普通鉄筋	t	140
	PC鋼線 7φ	t	4.50
	PC鋼棒 24φ		9.05
	” 16φ		2.55
計	t	156.10	屋根延坪(418坪)に対し 0.0385 t/坪
コンクリート	土間コンクリート	m ³	97
	F ₂₈ =180 kg/cm ²	”	219
	F ₂₈ =210 kg/cm ²	”	1 092
	栗石コンクリート	”	285
	F ₂₈ =350 kg/cm ²	”	34
計	”		
型 わ く	一般型わく	m ²	3 680
	打放部分型わく	”	4 680
	屋根リップ型わく	”	659

—4 のとおりである。

6. 所要資材および工事費

所要材料の数量は表—5に掲げるとおりである。P C 鋼棒の使用量は屋根延坪に対し 0.0277 t/坪であり、P C 鋼材および普通鉄筋の建築延坪に対する量は 0.288 t/坪できわめて少ない。

建築費は

建築工事	5 290 万円
電気および衛生工事	1 078 万円
計	6 368 万円

で、建築工事費のうち、構造関係の工費は

土工事、杭打、盛土	156 万円
R C, P C	2 583 万円
計	2 739 万円

である。

わが国で初めての吊り屋根の設計であるので、施工にあたり何か思わぬ困難が生ずるかもしれない心配があったが、工事は全く安全にかつ順調に何らの事故なく無事竣工した。施工者である清水建設および別子建設の関係者に深謝する次第である。

付 記 本文 5.「施工」は現場の作業に従事した別子建設 K K 長崎美代喜氏の報告にもとづいて、その主要な点を述べた。 1961.9.12・受付

土木学会よりグラウト試験器具の申込みにつきまして以下のとおり通知がありましたのでお知らせ致します。

昭和 36 年度改訂・土木学会
プレストレスト コンクリート設計施工指針グラウト
指針案におけるグラウト試験器具の申込受付について

土木学会誌 9 月号 68 ページで急告いたしましたとおり土木学会ではプレストレスト コンクリート設計施工指針の改訂とともに、グラウト指針案を制定いたしました。そのうち 1 章、3 章の試験器具については下記の要領で申込みを受付けます。なお試験器具については所定の試験目的を達せられることを確認した土木学会の検定保証証の添付してある器具を御使用下さい。土木学会が一切の手続きを行っております。土木学会の保証証のないものは試験器具性能について責任を負いかねます。

流下方法試験器具は製作寸法の誤差、グラウト流下面の表面仕上げ誤差、耐久性についての欠陥の有無、材料の品質について、また体積方法試験器具ではポリエチレン袋の寸法、材質につき規定に合格するよう検定を行ないます。

なお、2, 4, 6 章の試験器具については、土木学会北海道支部（札幌市北 3 条西 6 丁目 北海道土木部河川課内、電・札幌（5）9111）へお問合わせ下さい。

記

1. 申 込 先：東京都新宿区四谷 1 丁目 土木学会事業課 [TEL 351—5138 (代表)]
2. 申 込 方 法：料金（別掲、現金書留、為替）に 4. の申込書式に示された所定事項を書込んだ書類を同封のこと。
3. 送 付 時 期：申込受付の日より 1 週間以内に申込者に製作所より直接発送する予定（ただし品切の場合は送付予定日を通知します）
4. 申 込 書 式：

グラウト試験器具申込書			
1. 試験器具名	第 章	方法試験器具	
2. 個 数	組		
3. 希望納期	昭和 年 月 日		
4. 送付先	住所	氏名	
5. 連絡先（できれば東京の連絡電話番号）			
土木学会事業課御中			
氏名			

申込書式はハガキの大きさと紙質は問いません。
はっきり御記入下さい。
料金を必ず御同送願います。

5. 料 金

- グラウト指針案 第 1 章 流下方法試験器具 7 500 円（送料とも）
- グラウト指針案 第 3 章 体積方法試験器具 400 円（100 枚一組、送料とも） 土木学会事業課