

広島児童図書館の構造設計

—円錐形シエルの設計—

坪井善勝・若林実

1 まえがき

1924年 Zeiss ではじめて殻構造として筒型ものが建設されて以来約30年の間多くの理論の発展とともに、欧米では急速の発展がなされ、工場、市場、競技場、飛行機格納庫等に利用されてきた。殻構造には大スパンを少量のコンクリートと鋼材とで覆い得るという大きな特徴があるにもかかわらず、わが国ではほとんど実例が存しなかつたことは、設計と施工の経験のなかつたこととともに曲面構造に対する無理解乃至は不安感があつたためではなからうか。しかし幸い近年二三その実例を見、わが国においても漸く殻構造の設計と施工の経験も積まれ、殻構造建設の気運も高まりつゝある。

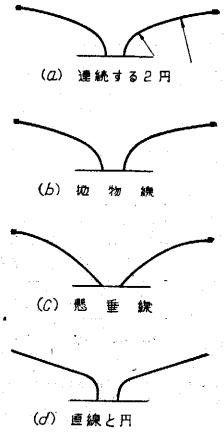
昨春東大丹下研究室の案になる広島児童図書館が設計されたとき、その構造設計を当研究室が担当し、設計とともに模型実験、現場実験の機会を得た(アート写真参照)。ここに用いられた構造は特異な朝顔型で機能的にもすぐれているため現在松山体育館の事務室として建設中であり、更に広島の平和公園にも数個建設の予定である。この建物の構造設計、模型実験あるいは実物実験は将来の設計に対する参考となる点が多いことを考え、その概略を述べたいと思う。

2 構造計画

この建物はシエルとそれを支える基礎だけのきわめて簡単な構造であるから、構造計画には強度及び施工上有利な母線の形を決定することに重点がおかれた。

このような形のシエルでは軒先の部分に切線方向の引張力が働き、ヘヤークラックが発生する可能性がある。このためはじめは軒先にテンションリングを設けて、こ

の部分の切線方向の引張力をとらせる方針で第1図のように母線を(a)連続する2円、(b)拋物線、(c)懸垂線等種々検討した。しかし鉄筋コンクリートのテンションリングはコンクリートに亀裂が入ることを予想すれば鉄筋だけの剛性しか考えられないから、その効果は少く結局周辺の部分に引張力が働くことになるので、仮件の簡単化をも考えて(d)図のように直線と円とで母線を構成し、



第1図

テンションリングは設けなかつた。設計では軒先にI型鋼が廻っているが、これは計算上強度メンバーではなく、サッシュを取付けるためのものである。サッシュがシエルを突上げて曲げを起すことを嫌い、サッシュの取付けにはエキスパンションジョイントを用いた。なおもし、テンションリングに元応力を加えて大きな圧縮力を与えることができれば、(a)~(c)のような母線を使つてシエルに全然引張を起さぬようにすることも可能である。

3 応力計算

構造体の概略の寸法は第2図の通りである。これに加わる荷重として第1表の種類が考えられるが、各応力の組合せの中 $[P+S]_{短} < 1.5[P]_{長}$, $[P+W]_{短} < 1.5$

“建築”特集号

表紙 理工学研究所の3m風洞による教室内の通風実験
—本文8ページ—

特集

広島県児童図書館の構造設計……………坪井善勝 1
—円錐形シエルの設計—……………若林実

教室の通風……………勝田高司 8

ブラウン管直視型生研式残響計……………渡辺要 11
石井聖光

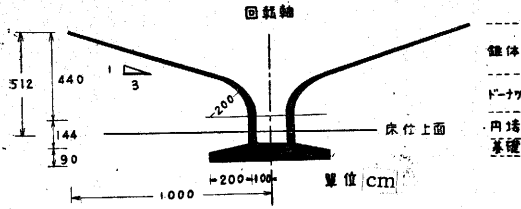
色彩調節と工場配色……………星野昌一 15

住居家具試作報告……………池辺陽 20
白石浩二

研究速報

IIS NEWS……………24

[P]長が成立するから[P]長, [P+K]短, $[P + \frac{S_1+S_2}{2}]$ 短が決定的となる(第1表参照)。風荷重は窓の破れた場合をとつたが, 破れない場合の風力係数はこれよりも小さく, 又逆対称条件による応力はKの計算で概算される。



第2図
第1表

種類	荷重 kg/cm ²	全面	逆対称
自重 P_0	350	$\rightarrow P$	
雪 P_s	60	$\rightarrow S_1$	$\rightarrow S_2$
風 P_w	93	$\rightarrow W$	
地震 P_k	60		$\rightarrow K$

次に計算要旨は次の通りである。

- (1) 錐体部分の応力計算 } ……膜応力理論で計算
 - (2) ドーナツ部分
 - (3) 円塙部分 } ……煙突と同じ設計式で計算
- ただし錐体とドーナツとの接続部分, ドーナツと円塙との接続部分等の不連続部分は, 幾分太目に設計し, 応力攪乱状態に備えた。なおこれらについては6節で述べる模型実験によつて充分の強度をもつことを確認した。

応力計算に用いる記号は第3図を参照して,

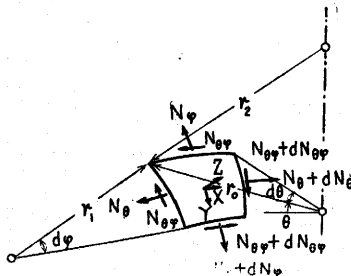
- N_φ, N_θ : 単位長に働く軸方向力
- $N_{\theta\varphi}$: 単位長に働く剪断力
- X, Y, Z : 単位面積に働く外力

である。

(A) 軸対称荷重時 (P, S_1)

Y方向とZ方向の釣合から次の方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r_1 r_0} \cdot \frac{d(N_\varphi r_0)}{d\varphi} + \frac{N_\theta}{r_0} \cos\varphi &= -Y \\ \frac{N_\varphi}{r_1} - \frac{N_\theta}{r_2} &= Z \\ r_0 &= r_2 \sin\varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$



第3図

(1)を積分すれば

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{1}{r_0 \sin\varphi} \left[r_1 r_0 (\cot\varphi \cdot Z - Y) \sin\varphi d\varphi + C \right] \\ N_\theta &= \frac{r_0}{\sin\varphi} \left(\frac{N_\varphi}{r_1} - Z \right) \end{aligned} \right\} (2)$$

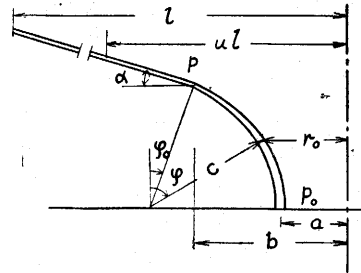
a) 自重による応力

i) 錐体部分

単位面積当りの荷重を p とすれば

$$Y = p \sin\varphi, \quad Z = -p \cos\varphi$$

又第4図を参照して



第4図

$$r_1 d\varphi = ds = dx / \cos\alpha, \quad r_1 \rightarrow \infty, \quad u = x/l$$

とおけば,

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= -\frac{pl}{2u \sin\alpha \cos\alpha} (1-u^2) \\ N_\theta &= pl u \cot\alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ii) ドーナツ部分

第4図を参照して, この部分の厚さの変化を考へて

$$p_\varphi = p_0 \sin\varphi, \quad p_0 = p / \sin\varphi_0, \quad Y = p_\varphi \sin\varphi = p_0 \sin^2\varphi$$

$$Z = -p \cos\varphi = -p_0 \sin\varphi \cos\varphi$$

とおけば

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{-0.2pl}{\sin\varphi_0 (0.3 \sin\varphi - 0.2 \sin^2\varphi)} \\ &\quad \left[C_6 - 0.3 \cos\varphi + 0.05 (2\varphi - \sin 2\varphi) \right] \\ N_\theta &= \frac{(0.3 - 0.2 \sin\varphi) pl}{0.2 \sin\varphi} \\ &\quad \left\{ \frac{0.2 \sin\varphi \cos\varphi}{\sin\varphi_0} + \frac{N_\varphi}{pl} \right\} \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに C_6 は錐体部分との境界条件によつて決る積分常数で. $C_6 = 1.0681$ 。

b) 両側雪 (S_1) による応力

i) 錐体部分

水平面の雪荷重を p とすれば

$$\left. \begin{aligned} Y &= p \sin\alpha \cos\alpha, \quad Z = -p \cos^2\alpha \\ N_\varphi &= -pl \frac{1-u^2}{u} \operatorname{cosec}\alpha \\ N_\theta &= 2pl u \cos^2\alpha \operatorname{cosec}\alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ii) ドーナツ部分

この部分に加わる雪荷重を無視して

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{C}{r_0 \sin\varphi} = \frac{C'}{\sin\varphi (0.3 - 0.2 \sin\varphi)} pl \\ N_\theta &= \frac{r_0}{r_1} \frac{N_\varphi}{\sin\varphi} = \frac{1.5 - \sin\varphi}{\sin\varphi} N_\varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに C^1 は錐体部分との連続条件から決る常数で

$$C^1 = 0.4735$$

(B) 逆対称荷重時 ((S_2, K))

一般曲面に対する釣合式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} (N_{\varphi} r_0) + r_1 \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + N_{\theta} r_1 \cos \varphi &= -Y r_1 r_0 \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} (N_{\theta\varphi} r_0) + r_1 \frac{\partial N_{\theta}}{\partial \theta} - N_{\theta\varphi} r_1 \cos \varphi &= -X r_1 r_0 \\ -\frac{N_{\varphi}}{r_1} + \frac{N_{\theta}}{r_2} &= -Z \end{aligned} \right\} (7)$$

上の 3 式より N_{θ} を消去すれば

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} (N_{\varphi} r_0) + r_1 \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + N_{\theta\varphi} r_2 \cos \varphi &= -r_1 r_0 (Y - Z \cot \varphi) \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} (N_{\theta\varphi} r_0) + r_2 \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \theta} - N_{\theta\varphi} r_1 \cos \varphi &= -r_1 r_0 (X - \operatorname{cosec} \varphi \frac{\partial Z}{\partial \theta}) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

錐体に対しては

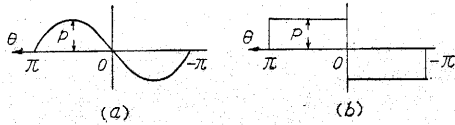
$$r_0 = ul, \quad \varphi = \alpha, \quad r_1 \rightarrow \infty, \quad r_1 \partial \varphi = -\sec \alpha \partial r_0$$

を代入すれば(8)式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_{\varphi}}{\partial u} + \frac{N_{\varphi}}{u} - \frac{\sec \alpha}{u} \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \theta} &= l(Y \sec \alpha - Z \operatorname{cosec} \alpha) \\ \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial u} + \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{u} &= l(X \sec \alpha - \sec \alpha \operatorname{cosec} \alpha \frac{\partial Z}{\partial \theta}) \end{aligned} \right\} (9)$$

a) 逆対称雪 (S_2)

逆対称雪の計算は第 5 図 (b) のような場合も検討したが、計算の簡単のため (a) のような場合を計算した。



第 5 図

i) 錐体部分

$$X = 0, \quad Y = p \sin \theta \sin \alpha \cos \alpha, \quad Z = -\frac{p}{2} \sin \theta \cos^2 \alpha$$

を(9)式に入れて積分し、更に(7)の第 1 式を用いて

$$\left. \begin{aligned} N_{\varphi} &= -\frac{pl}{3} \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \frac{1-u^3}{u^2} \\ N_{\theta} &= plu \sin \theta \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \\ N_{\theta\varphi} &= -\frac{pl}{3} \cos \theta \cot \alpha \frac{1-u^3}{u^2} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

ii) ドーナツ部分

地震荷重時と同じ偏微分方程式を用い、(ドーナツ部分の雪を無視)

$$N_{\varphi} = S_{\varphi} pl \sin \theta, \quad N_{\theta\varphi} = S_{\theta\varphi} pl \cos \theta$$

$$N_{\theta} = \frac{r_2}{r_1} N_{\varphi} = \frac{1.5 - \sin \varphi}{\sin \varphi} N_{\varphi}$$

とおけば

$$\left. \begin{aligned} dS_{\varphi} &= -\left\{ \frac{1.5 - \sin 2\varphi}{1.5 - \sin \varphi} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} S_{\varphi} - \frac{1}{1.5 - \sin \varphi} S_{\theta\varphi} \right\} d\varphi \\ dS_{\theta\varphi} &= -\left\{ \frac{1}{\sin \varphi} S_{\varphi} - \frac{2 \cos \varphi}{1.5 - \sin \varphi} S_{\theta\varphi} \right\} d\varphi \end{aligned} \right\} (11)$$

を使用し、初期条件を入れて順次求めることができるが、ここでは別解法として次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} S_{\varphi} &= -M/2pl r^2 \sin \varphi \\ S_{\theta\varphi} &= S_{\varphi} \cos \varphi, \quad M = 0.3289 pl^3 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

b) 地震荷重 (K)

i) 錐体部分

$$X = p \sin \theta, \quad Y = p \cos \theta \cos \alpha, \quad Z = p' \cos \theta \sin \alpha$$

(9)に入れて積分すれば

$$\left. \begin{aligned} N_{\varphi} &= -\frac{pl}{3} \left[u - \frac{3}{u} + \frac{2}{u^2} \right] \cos \theta \sec^2 \alpha \\ N_{\theta} &= -pl u \cos \theta \\ N_{\theta\varphi} &= -\frac{2}{3} pl \frac{1-u^3}{u^2} \sin \theta \sec \alpha \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

ii) ドーナツ部分

ドーナツ部分の水平力を無視すれば(8)の右辺は零となるから

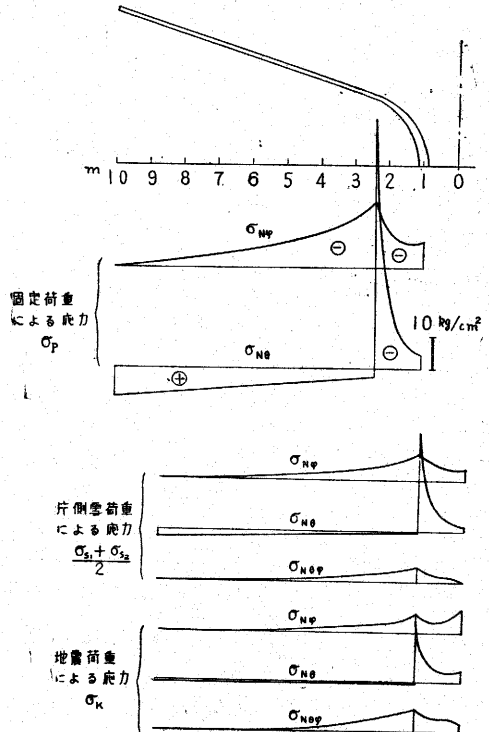
$$\left. \begin{aligned} (1.5 - \sin \varphi) \frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \varphi} + (1.5 - 2 \sin \varphi) \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} N_{\varphi} + \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial N_{\theta\varphi}}{\partial \varphi} - \frac{2 \cos \varphi}{1.5 - \sin \varphi} N_{\theta\varphi} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

$$N_{\varphi} = S_{\varphi} pl \cos \theta, \quad N_{\theta\varphi} = S_{\theta\varphi} pl \sin \theta$$

$$N_{\theta} = \frac{r_2}{r_1} N_{\varphi} = \frac{1.5 - \sin \varphi}{\sin \varphi} N_{\varphi}$$

とおき

$$\left. \begin{aligned} dS_{\varphi} &= -\left\{ \frac{1.5 - 2 \sin \varphi}{1.5 - \sin \varphi} \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} S_{\varphi} + \frac{1}{1.5 - \sin \varphi} S_{\theta\varphi} \right\} d\varphi \\ dS_{\theta\varphi} &= \left\{ \frac{1}{\sin \varphi} S_{\varphi} + \frac{2 \cos \varphi}{1.5 - \sin \varphi} S_{\theta\varphi} \right\} d\varphi \end{aligned} \right\} \dots (15)$$



第 6 図 荷重による応力度

ドーナツの始点では

$$N_\varphi = S_\varphi pl \cos \theta, N_{\theta\varphi} = S_{\theta\varphi} pl \sin \theta$$

であるから、これより始めて(5)によつて順次計算していく。なおこの場合の検算式として

$$\left. \begin{aligned} Q &= 4r_0 \left\{ \int_0^{\pi/2} (-) S_{\theta\varphi} \sin^2 \theta d\theta \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{\pi/2} S_\varphi \cos^2 \theta \cos \varphi d\theta \right\} \\ &= -\pi r_0 \{ S_{\theta\varphi} + S_\varphi \cos \varphi \} pl \\ M &= 4r_0^2 \int_0^{\pi/2} S_\varphi \cos^2 \theta \sin \varphi d\theta \\ &= \pi r_0^2 S_\varphi pl \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

以上の諸式によつて各荷重に対する応力を計算すれば第6図の通りである。たゞしすべて応力度にて表わしてある。

4 配筋

錐体部分とドーナツ部分の応力は、前節の第6図のように $\sigma_{N\theta}$ についても $\sigma_{N\theta}$ についてもほとんどすべての箇所自重による応力が他によるものの2倍以上になっているので、鉄筋についてもコンクリートについても長期で設計される。 $\sigma_{N\theta\varphi}$ については地震時の応力が問題となる。計算上放射状筋は必要でなく、環状筋のみが計算によつて決定される。なおドーナツの上端の $\sigma_{N\theta}$ は曲げが起ることによつて緩和されるものと考えた。

円嚮部分の縦筋は計算上不必要であるが、この部分を柱と考えれば鉄筋比が0.8%は必要であり、本設計では約1.2%入っている。この部分の剪断応力度は10.2kg/cm²となつて、短期の許容応力度を上まわるから、鉄筋のみで剪断力に耐えるように設計してある。

なお仮定したコンクリート強度は135kg/cm²で許容地耐力は長期で10t/m²とした。

基礎版の応力計算には鉛直力、地震力、とも円版の式を使用した。

5 工事概要

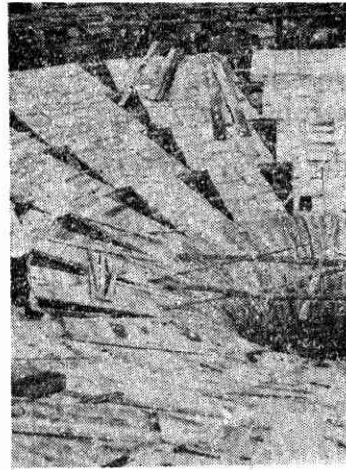
本工事に使用した主要資材量は次の通りである。

第2表 主要資材量(基礎まで含む)

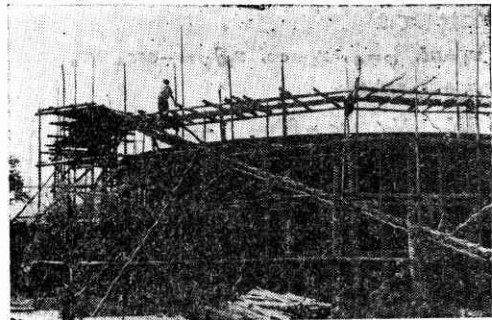
種類	単位	総量	床坪当り
面積	坪	室内	80.02
		テラス	15.17
鉄筋コンクリート量	立坪	19.20	0.202
鉄筋(13mmφ異形)	吨	7.80	0.081
型枠面積	面坪	121.0	1.30

鉄筋はすべて異形鉄筋で、環状筋はフラッシュバット溶接で継手なし。錐体の部分の型枠は大半径式の假枠(6尺×2尺)を使用した(第7図)。

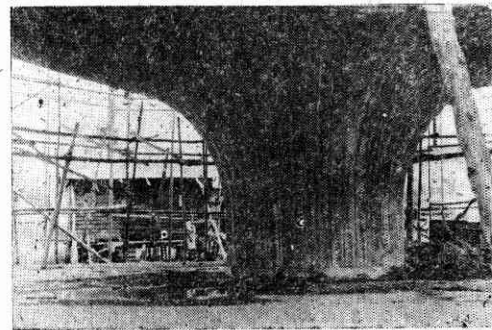
ヘアクラックを防止するために、鉄筋のほかにワイヤーメッシュを一面に埋込み、粉末度5%のセメントを使用してコンクリートの収縮を少くした。



第7図 型枠は大半径式を使用



第8図 支柱を取外す直前



第9図 支柱取外し後の内部

3) 6 模型試験

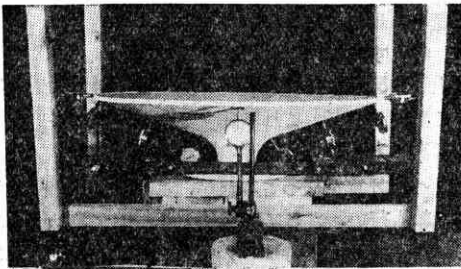
このシエルの設計に當つて、理論的な計算と同時に模型試験を行つて、設計したものがどの程度の安全性をもつか、水平垂直変位の理論と実験値との関係あるいは亀裂の発生進展の状況から適当な配筋を如何にすべきか等を実験的に確めた。実験の結果模型は予想以上の強度を有し、実際の建物も充分の強度を発揮し得るであろうことが確められた。すなわち、鉛直荷重に対しては設計荷重の2.1倍に堪え、片側雪荷重、週辺ナツシュの突上げ等はほとんど問題とする程のこともなく、水平力に対しても震度0.36に相当する水平力に耐えてなお充分の強度

をもつことが確められた。

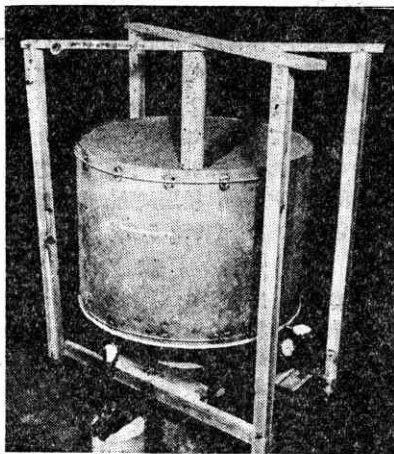
模型は工作上の都合から厚さを1/20(0.6cm)とした他はすべて実物の1/30に縮尺し、モルタルを以て作成した。すなわち円錐形周辺の半径33.3cm、厚さ0.6cm、総高21.0cm、円錐部分の半径は3.3cm、厚さ1.2cm、基礎版半径13.3cm、厚さ3.0cmである。

モルタルの調合は1:2.17、水セメント比48%試験当日の圧縮強度206kg/cm²、針金の降伏点は3274kg/cm²で、配筋は実物と同じ許容応力度を計算して必要な最低量をもつて設計した。模型の配筋状況と、実験前の形状をアート写真(表紙裏)に示す。

測定にはダイヤルゲージを用いて鉛直と水平の変位を測つた(第10図)。



第10図 測定装置

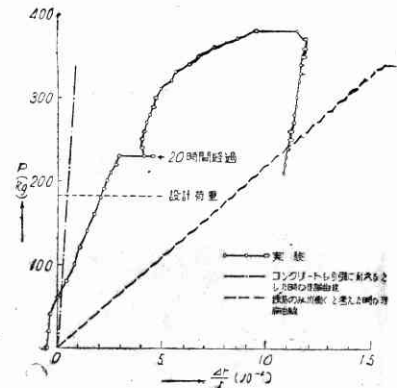


第11図 設計荷重まで載荷した時

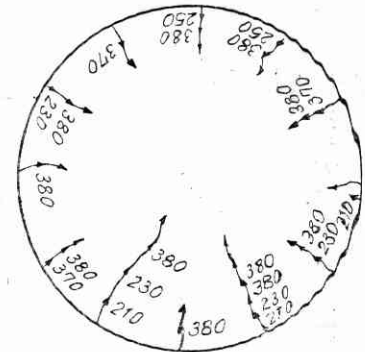
荷重として鉛直荷重に対しては砂を以て載荷したが(第11図)、乗せるべき砂の量は次のように決められる。すなわち模型に生ずる応力度が実物と等しくなるようにすればよい。鉛直荷重による外周の水平方向歪度と荷重との関係および亀裂の状況とを第12図に示す。図中鎖線はコンクリートに亀裂が入らないとしたときの理論値で、点線は全面に亀裂が入り鉄筋だけが耐えるとしたときの理論値であり、実験値はこの間にはさまれる。なお初期亀裂は210kgのときに発生し、最後には円周上ほぼ12等分点にそれぞれ母線方向に向う亀裂が一樣に発生した。

水平力に対する実験では自重に相当する砂を乗せ、更

に縁端部をロープを用いて水平に引張り滑車を通して重錘をかけた(第13図)。最大荷重のとき震度にして約0.36であつた。その他片側雪荷重、部分的載荷等も行つたが、新しい亀裂は見られなかつた。

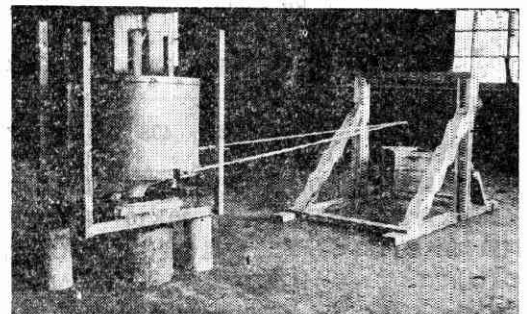


第12図a 荷重とリングの伸び



- 1) 数字は荷重kg
- 2) 数字のない所は長期感荷により伸長した亀裂

第12図b 亀裂状況



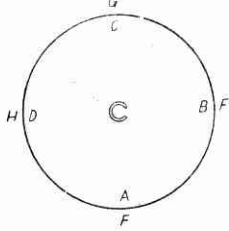
第13図 水平力の載荷

7 現場試験

前述のように模型実験を行つて充分の強度をもつことが確められたが、清水建設および広島市建築課の厚意により現場実験の便を与えられた。すなわちコンクリートの仮枠支柱を取外す前後における軒先の沈下と軒先の水平方向の伸びを測定し、更に両側又は片側雪荷重に相当する砂をのせてその安全性を確かめ理論値、模型実験、および実物試験の三者の関係を求めた。

軒先の撓みの測定には軒先から銅線を2本さけて、1

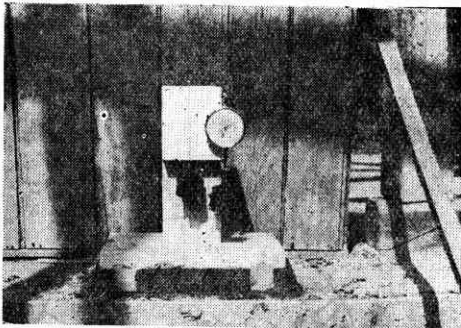
本はさげふりを取っけ方眼紙で直読, 他はダイヤルゲージの軸に結びつけた(第14図, 15図). 軒先のリングの伸びは検長1mの木製測定具を作つてダイヤルゲージにて測定した。



A, B, C, D.....リングの伸びの測定箇所
E, F, G, H.....撓みの測定箇所

第14図

第15図
撓みの測定

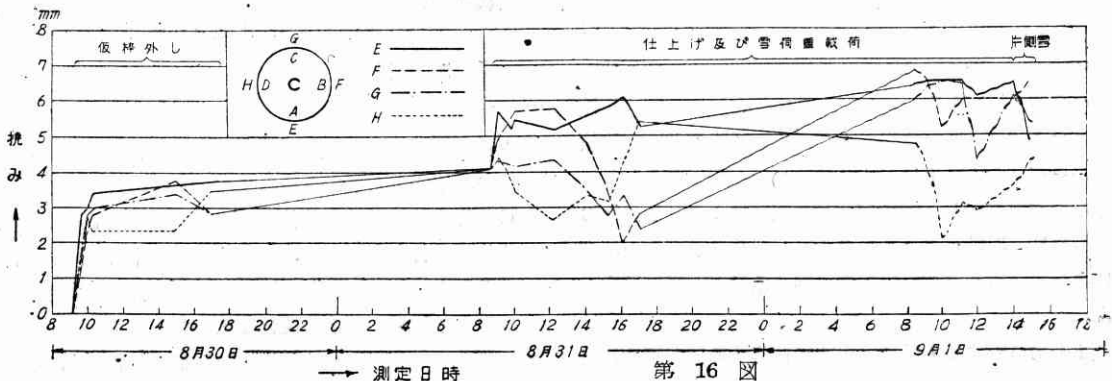


仮枠の支柱は外側から順次外してゆき, 1列毎に測定を行つて行つた。第16図は軒先の撓みをあらわすが, これより求めた値と模型実験とを比較すると第3表が得られる。実物では模型実験から得られた値よりやや小さい値となり4~6mm程度であつた。リングの伸びは,

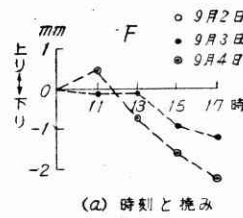
第3表

荷重状態	模 型		実 物		
	荷重 w	撓み	荷重 w	撓み mm	
	kg	mm	kg/m ²	実物試験	模型より推定した値
コンクリート版のみ	149	0.18	288	4.0	5.4
コンクリート版, 仕上材料, 雪満載	211	0.29	408	6.2	8.7

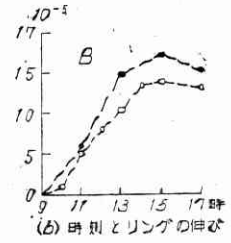
毎日の温度変化による伸縮が大きく, 後に温度変化による変形を測定して補正した結果, 10×10^{-5} 程度で模型試験の値の約1/2であつた。気温の変化よりむしろ太陽の直射によつてシエルは複雑な変形をしているが, この



量は測定の結果撓みが2mm程度, 伸びは $30 \sim 40 \times 10^{-5}$ 程度で規則的に変動している。第17図はこの一例であ



(a) 時刻と撓み



(b) 時刻とリングの伸び

第17図

る。しかし軒先の移動には何ら拘束を与えるものがないから応力は起つていない。なお上記の測定の結果, 仮枠取外しから3日~6日間における測定でクリープは認められず, 又当初心配された軒の部分の亀裂は, 現在まで全然認められていない。

8 むすび

以上児童図書館の構造設計に関連した計算法と実験について概観したが, これに関する問題はなお多い。たとえば二次応力としての曲げの問題があり, ウラソフの理論によつた計算を行つてみたが, これと普通の近似解法との比較も行い, さらに実験値と比較してみたいと思つている。また地震時のロッキングのことも考えれば, はたして地震力は水平に働くものであるかもなお検討する必要があろう。

昨年末には松山の体育館の構造設計を行い, スパン50mの球形殻を設計した。この建物は現在施工中であり, 模型実験で充分安全なることが確かめられたが, 現在由げ応力の測定を行つている。これらに関しては稿を改めて報告するつもりである。なお児童図書館の応力計算は坪井研究室の秋野金次君が, 模型試験は青木繁君が主として担当したものである。(1953-5-26)

文 献

- (1) 新建築1953. 5. P. 6
- (2) 坪井善勝, 若林実, 秋野金次; 殻構造について(その1) 日本建築学会研究報告22号 1953. 5. P. 99
- (3) 坪井善勝, 青木繁; 殻構造について(その2) 日本建築学会研究報告22号 1953. 5. P. 101
- (4) 田治見宏; 扁平な倒立円錐殻の解 日本建築学会研究報告22号 1953. 5. P. 163
- (5) 坪井善勝; シャーレン 設計例 建築雑誌1953-7. 発表予定

