

この風圧力や地震力に対して構造体をもっとも効果的に抵抗させるために各シェルには縁梁を付け、三角形断面の鉄筋コンクリート梁によって隣接のシェルとたがいに結合した。また自重によってシェルが外側に開きだそうとする力に抵抗させるためにシェル最下部につなぎ梁をとり付けた。

8枚のシェルの厚さは縁梁の近傍を除き 12 cm とし、約 2 m 間隔に縦横にリブをいれた。このリブ断面は 22 cm×36 cm で平にならすとシェルの厚さは 20 cm, 曲げ剛性の点では 30 cm の厚さのシェルに相当することになる。またこのリブは屋根材 (ステンレス) の取り付けを容易にし、その間の空間は断熱空気層になっている。

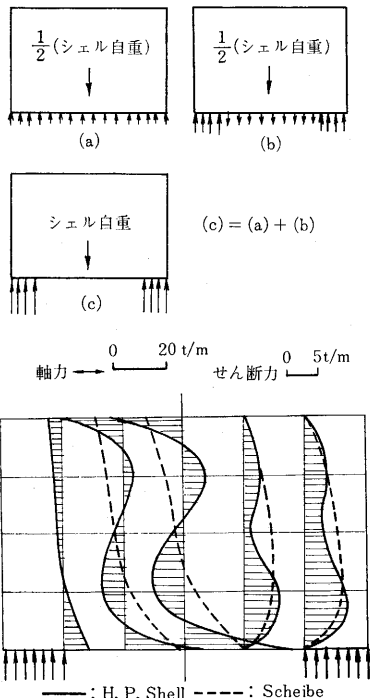
3. 解 析

さきに述べたように、この構造は自重に対しては構造的に有利な型をしているが、シェル I は下部にスパン 20 m にわたって開口部をもっているために局部的に大きな面内軸力、せん断力が発生する。差分法によって解析した結果をシャイベと比較して図・3 に示す。

つぎに水平力をうけた場合について説明する。

いま図・4 のように右手系の直交座標 xyz をとれば H.P 曲面は: $Z = -(f_0/l_x \cdot l_y) x \cdot y = -kxy$ で表わされる。いま

- t : シェルの厚さ (リブの丈を除いた)
- t_m : 軸力 (N_x, N_y) に抵抗する厚さ
- t_b : 曲げモーメント (M_x, M_y) に抵抗する厚さ



図・3

- l : リブの間隔
- b : リブの幅
- h : リブの丈
- w : シェルのたわみ
- ϕ : 応力関数

とし、

$$\alpha = 2(t/t_b)^3 + 4h/l(b/t_b)^3, \beta = 2t_m/t$$

$$\gamma = 24k/Et_b^3, \zeta = 2kEt_m, R = 12\rho/Et_b^3$$

とおけばシェルの基本式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \alpha \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \gamma \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} &= R \\ \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + \beta \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} + \zeta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。

i) 地震力をうける場合の境界条件

辺 \overline{AB} : 縁梁の軸力を N_b , 断面積を A_b , シェルの x 方向の軸力を N_x とすれば

$$N_b/A_b = N_x/t_m \rightarrow \frac{A_b}{t_m} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial y^2} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}$$

点 A では軸力が 0 であるから

$$\frac{A_b}{t_m} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \Big|_x = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_0, \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0$$

また曲げモーメントが 0 より

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

シェルと縁梁の相対たわみが 0 より、縁梁の幅を B_b , 丈を H_b とすれば

$$\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + 2 \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = \frac{B_b H_b^3}{t_b^3} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$$

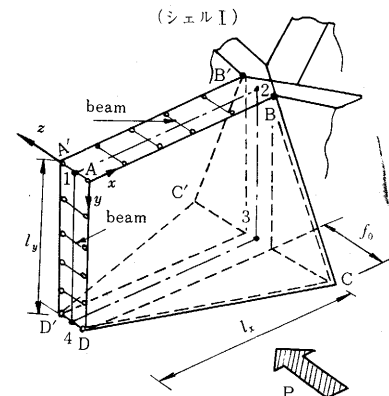
辺 \overline{AD} : 辺 \overline{AB} と同様にして求められる。

辺 \overline{BC} : $N_{xy} = tG \frac{\partial v}{\partial x}$ および $N_y = t_m E \frac{\partial v}{\partial y}$

より

$$\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} + 2 \frac{t_m}{t} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x \partial y^2} = 0$$

$N_x = 0$ より $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0$



図・4

研 究 速 報

$M_w=0$ より $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0$, また $w=0$

辺 \overline{CD} : 辺 \overline{BC} と同様にして求められる。

ii) 風圧力をうける場合の境界条件

風圧力をうける側のシェル ABCD (図・4) の境界 \overline{AB} には $-x$ 方向の荷重が作用することになるから、シェル $A'B'C'D'$ が無荷重状態であることを考慮すれば、次の二つの条件を用いた解を重ね合わせればよいことになる。

$$\textcircled{1} \begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0, & \frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+2 \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y}=\frac{B_0 H_0^3}{t_0^3} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ \text{荷重項: } 0.5 P \end{cases}$$

$$\textcircled{2} \begin{cases} w=0, & \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \\ \text{荷重項: } 0.5 P \end{cases}$$

辺 \overline{AD} も同様にして求められる。応力函数 ϕ およびその他の辺に関する条件は i) の場合と同じである。

iii) 風圧力をうける場合の風下のシェルに対する境界条件

辺 \overline{AB} には縁荷重として換算せん断力だけが与えられることになるから、次の二つの条件を用いた解を重ね合わせればよい。

$$\textcircled{1} \begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0, & \frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+2 \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y}=\frac{B_0 H_0^3}{t_0^3} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ \text{荷重項: } -0.5 P \end{cases}$$

$$\textcircled{2} \begin{cases} w=0, & \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \\ \text{荷重項: } 0.5 P \end{cases}$$

IV) シェル IV に対しても他のシェルと同様にして求められるが図・5 に示したように辺 \overline{AC} の境界条件に対しては座標軸を 45° 回転した \bar{x} , \bar{y} 軸に関して式をたてる方が便利である (図・5 参照)。

いま辺 \overline{AC} における条件を示せば

$$M_{\bar{y}}=0 \rightarrow \frac{\partial^2 w}{\partial \bar{x}^2}-2 \frac{\partial^2 w}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}}+\frac{\partial^2 w}{\partial \bar{y}^2}=0$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \bar{x}^4}=\frac{V_{\bar{y}}}{EI_{\bar{x}}} \rightarrow \frac{\partial^4 w}{\partial \bar{x}^4}+4 \frac{\partial^4 w}{\partial \bar{x}^3 \partial \bar{y}}+6 \frac{\partial^4 w}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{y}^2}+4 \frac{\partial^4 w}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}^3}+\frac{\partial^4 w}{\partial \bar{y}^4}=\frac{\sqrt{2} D}{EI_{\bar{x}}}\left(3 \frac{\partial^3 w}{\partial \bar{y}^3}-\frac{\partial^3 w}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}^2}+\frac{\partial^3 w}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{y}}-3 \frac{\partial^3 w}{\partial \bar{y}^3}\right)$$

シェルと縁梁の \bar{x} 方向における相対変位が 0 の条件から

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{x}^2}-2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}}+\frac{\partial^2 \phi}{\partial \bar{y}^2}=-\frac{\sqrt{2} t_m}{A_{\bar{x}}}\left(\frac{\partial \phi}{\partial \bar{y}}-\frac{\partial \phi}{\partial \bar{x}}\right)$$

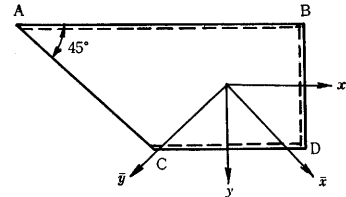
が得られる。

はじめにあげたシェルの基本式 (1) および境界条件

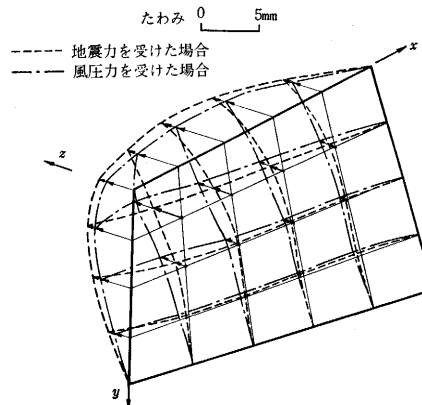
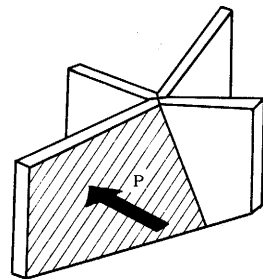
式をすべて差分形式に書き改めシェル I に関して計算した結果を図・6~図・11 に示してある。

4. 実 験

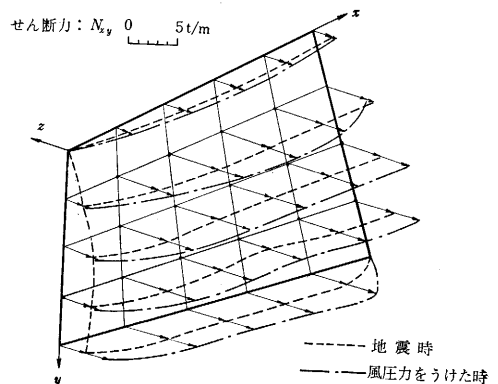
実験はアクリルの模型により、自重をうけた場合および水平力をうけた場合についておこなった。解析ではシェルの境界条件を単純化した場合における解を求めたの



図・5



図・6



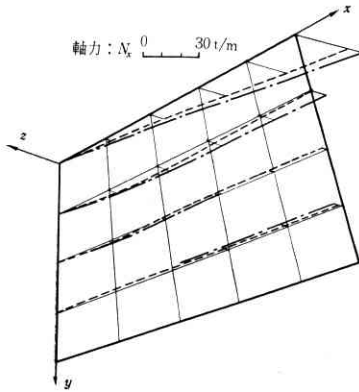
図・7

で特に隣接シェルとの境界線上における応力を調べることは重要である。図・12は自重をうけた場合におけるシェル I と II, III と IV の各境界上の曲げモーメントを示したもので開口部の影響がよくでている。

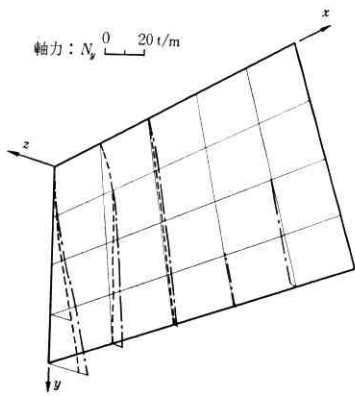
(1965 年 11 月 13 日受理)

設計：丹下健三，都市建築設計研究所

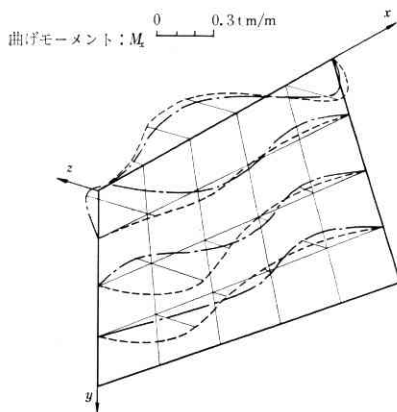
施工：大成建設株式会社，所長：木村 進，主任：小山田 進



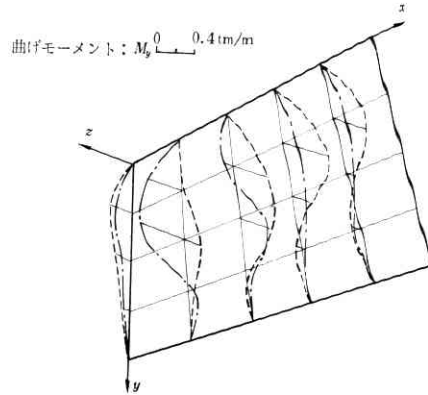
図・8



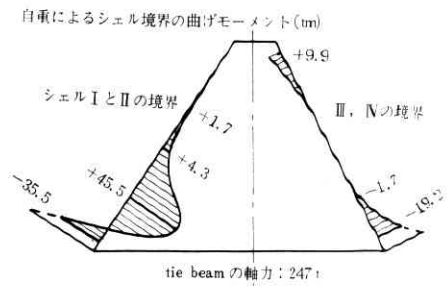
図・9



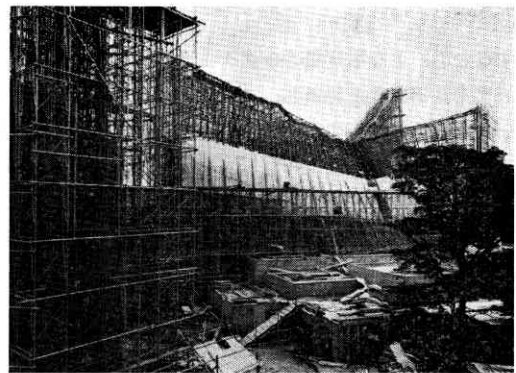
図・10



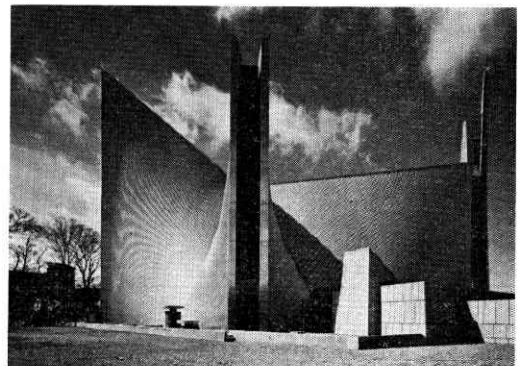
図・11



図・12



写真・2 シェルの型枠・配筋作業



写真・3 北々東より見た全景，左端上部が最高部で 39m，右端は鐘楼で高さ 61m