

I-8 防波ウエル構造解析についての一考察

北海道大学工学部	正員	芳村	仁
北海道大学工学部	正員	荻澤	憲吉
北海道大学工学部	正員	三上	隆
北海道大学工学部	正員	佐々木	康彦
大成建設(株)	正員	井上	兆男

1. はしかり

海に沈着した発電所の取水施設を海底トンネル方式で行なう場合、取水口の到達立坑の施工は海上にジャブネットを設置し、それよりリバースサーキュレーションドリル(大口径掘削機)にて立坑を削孔する工法がとられる。外海の波浪作用が厳しい波浪の影響からそれらを保護する目的で、図1のようにジャブネットに直接防波ウエルを取付けた。上記荷重条件下での防波ウエルの力学挙動は相当複雑になることが予想され、それらを定量的に明確にすることは設計上、重要なことと思われる。

本報告は、この種の荷重一構造系に対して、解析解法および有限要素法による解析を試み、併せて模型実験により解析手法の妥当性の検討を行なったものである。

2. 円筒シェルの解析解法

まず、Kirchhoff-Love の仮定に立脚した薄肉円筒シェルの微小変形理論における基本的関係式のいくつかを記しておく。円筒シェルと座標系の各記号および変位成分 u, v, w の正の向きを図2に示す。なお、以下では簡単のため偏微分を次の様に書くものとする。() $\equiv \partial() / \partial (S/R)$, () $\equiv \partial() / \partial \theta$

(広義の)歪一変位関係式:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= u'/R, \quad \epsilon_\theta = (v + w)/R, \quad \gamma_{s\theta} = (u + v')/R \\ \kappa_s &= -w''/R^2, \quad \kappa_\theta = -(\omega'' - u')/R^2, \quad \kappa_{s\theta} = -(2\omega' - u'')/R^2 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

断面力・断面モーメント一変位関係式:

$$\left. \begin{aligned} N_s &= (K/R)[u' + v(v + w)] \\ N_\theta &= (K/R)[(v + w) + v u'] \\ N_{s\theta} &= N_{\theta s} = \{(1 - \nu)K/2R\}[u + u'] \\ M_s &= -(\bar{D}/R^2)[w'' + v(\omega'' - u')] \\ M_\theta &= -(\bar{D}/R^2)[(\omega'' - u') + v \omega''] \\ M_{s\theta} &= M_{\theta s} = -\{(1 - \nu)\bar{D}/2R^2\}[2\omega' - u''] \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_s &= -(\bar{D}/R^2)[w'' + v(\omega'' - u')] \\ M_\theta &= -(\bar{D}/R^2)[(\omega'' - u') + v \omega''] \\ M_{s\theta} &= M_{\theta s} = -\{(1 - \nu)\bar{D}/2R^2\}[2\omega' - u''] \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、 $K = Eh/(1 - \nu^2)$, $\bar{D} = Eh^3/12(1 - \nu^2)$

なお、断面力・断面モーメントの正の方向・向きは、図3に示す。

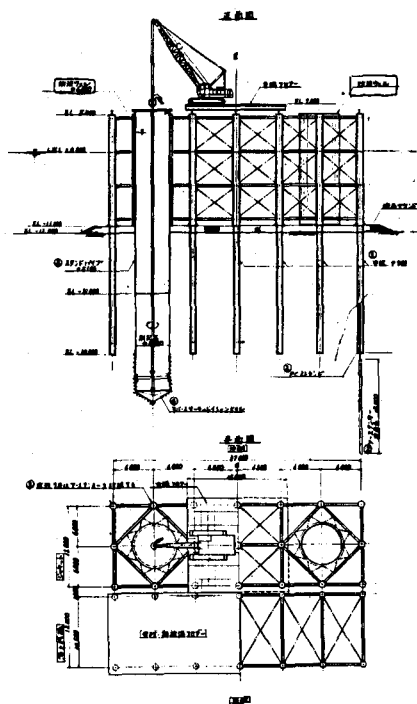


図1 ジャブネットと防波ウエル

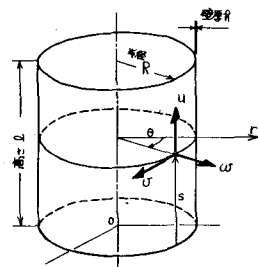


図2 円筒殻と座標系

釣合方程式:

$$\left. \begin{aligned} R(N'_s + N'_{s0}) + R^2 X &= 0 \\ R(N'_\theta + N'_{s0}) + (M'_\theta + M'_{s0}) + R^2 Y &= 0 \\ -RN_\theta + M''_s + 2M'_{s0} + M'_\theta + R^2 Z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

基礎方程式:

$$\left. \begin{aligned} [U'' + (1-\nu)U''/2 + (1+\nu)U''/2 + \nu\omega'] + (R^2/K)X &= 0 \\ [(1+\nu)U''/2 + (1-\nu)U''/2 + U'' + \omega'] \\ + k[(1-\nu)U''/2 + U'' - \omega'' - \omega'''] + (R^2/K)Y &= 0 \\ [\nu U' + U' + \omega'] \\ + k[-U'' - U'' + \omega'''' + 2\omega'''' + \omega'''] - (R^2/K)Z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, $k = (E/R)^2/12$

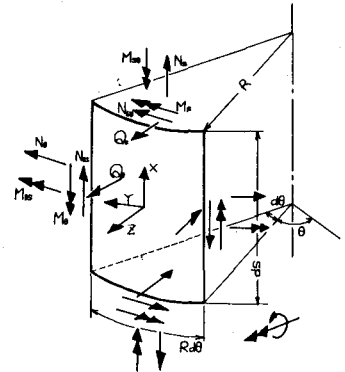


図3 断面力と断面モーメント

円筒シェルの静的解析は, 与えられた境界条件を満足するように基礎

方程式を解けばよい。しかし, 基礎方程式は変位 U , V , ω に関する三元の連立偏微分方程式であり, これを数学的に厳密に解くことは非常に困難である。

ここでは, 円筒シェルの解(一般解)を同次解と特解に分ける。同次解については, 円筒方向にフーリエ級数展開し, 軸方向は近似基礎方程式から解析的に求める。特解については, 円筒方向・軸方向ともフーリエ級数展開し, 2重フーリエ級数展開された荷重に対応する特解のフーリエ係数を, 基礎方程式(近似化されていない式)から代数的に求める。このようにして得られた同次解と特解の和である一般解が境界条件を満足させ, 円筒シェルの解を得る。

<同次解> まず, 近似基礎方程式を導く。釣合方程式(4)で, 第2式の面外せん断力の項($R \cdot Q_\theta = M'_\theta + M'_{s0}$)を無視し, $X=Y=Z=0$ とすると,

$$\left. \begin{aligned} N'_s + N'_{s0} &= 0 \\ N'_\theta + N'_{s0} &= 0 \\ -RN_\theta + M''_s + 2M'_{s0} + M'_\theta &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。また, 断面モーメント-変位関係式は, 面内変位 U , V の項を無視した式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} M_s &= -(E/R^2)[\omega'' + \nu\omega''] \\ M_\theta &= -(E/R^2)[\omega'' + \nu\omega''] \\ M_{s0} = M_{\theta 0} &= -(1-\nu)(E/R^2)\omega'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

近似釣合方程式(6)とこの(7)式を用いて各断面力を ω で表わすと,

$$\left. \begin{aligned} N_\theta &= -(kK/R)[\omega'''' + 2\omega'''' + \omega'''] \\ N'_{s0} &= -N'_\theta \\ &= (kK/R)[\omega'''' + 2\omega'''' + \omega'''] \\ N''_s &= -N'_{s0} \\ &= -(kK/R)[\omega'''' + 2\omega'''' + \omega'''] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{以上 (8)}$$

つぎに(2)式より円筒シェルの適合条件式を導くと次式となる。

$$\nu N'_s - N'_s - N'_\theta + \nu N'_\theta + 2(1+\nu)N'_{s0} + (1-\nu^2)X(K/R)\omega'' = 0 \dots\dots\dots (9)$$

この適合条件式に(8)式を代入して整理すると, 次式が得られる。

$$\nabla^4 \nabla^4 \omega + \frac{(1-\nu^2)}{R} \omega'''' = 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここで, $\nabla^2() = [()'' + ()'']^2$

この(10)式が 近似基礎方程式 であり, ω に関する 8 階の微分方程式となる。

この近似基礎方程式を解き, 同次解を求める。

円筒方向にフーリエ級数展開し, 軸方向には解析解を用いる。まず, ω については

$$\omega = \sum_{\lambda} H e^{\lambda \beta} \cos \lambda \theta \dots\dots\dots (11)$$

とおくと, θ に関して基礎式(10)を満足する。

ここで, $\beta = S/R$, H : 未定定数(積分定数)

(11)式を(10)式に代入し, λ に関する 8 階の特性方程式より 8 つの λ を決定すると, ω は次のように得られる。

$$\begin{aligned} \omega = \sum_{\lambda} & (A_\lambda \cos \beta_\lambda \beta + B_\lambda \sin \beta_\lambda \beta) e^{\alpha_\lambda \beta} \\ & + (C_\lambda \cos \beta_\lambda \beta + D_\lambda \sin \beta_\lambda \beta) e^{\alpha_\lambda \beta} \\ & + (E_\lambda \cos \beta_\lambda \beta + F_\lambda \sin \beta_\lambda \beta) e^{-\alpha_\lambda \beta} \\ & + (G_\lambda \cos \beta_\lambda \beta + H_\lambda \sin \beta_\lambda \beta) e^{-\alpha_\lambda \beta} > \cos \lambda \theta \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, $A_0 \sim H_0$: 未定定数

$$\alpha_{1,2} = (\mu \pm \sqrt{\mu^4 + 16\eta^4 + 4\eta^2}) / 2\sqrt{2}$$

$$\beta_{1,2} = (\mu \pm \sqrt{\mu^4 + 16\eta^4 - 4\eta^2}) / 2\sqrt{2}$$

$$\mu^4 = (1 - \nu^2)/k \quad \dots\dots\dots \text{以上 (13)}$$

今, 円筒シェル両端面の境界条件が同じで, さらに軸方向の荷重分布がシェル高さの中央点に関して対称な場合を考える。軸方向座標 z ($= y/R$) の原点をその中央点にとると, この場合 $\bar{w}(z) = \bar{w}(-z)$ が成立するので, (12) 式の未定定数群には次の関係が存在する。

$$A_0 = E_0, \quad B_0 = -F_0, \quad C_0 = G_0, \quad D_0 = -H_0$$

したがって,

$$\bar{w}_1 = \sum_n \{ (A_0 \cos \beta_{1,2} z + B_0 \sin \beta_{1,2} z) e^{\alpha_{1,2} z} + (C_0 \cosh \beta_{1,2} z + D_0 \sinh \beta_{1,2} z) e^{\alpha_{2,2} z} \} \cos n\theta \dots (14)$$

と置くと, (12) 式は

$$\bar{w} = \bar{w}_1 + \bar{w}_2 \dots\dots\dots (15)$$

で表わされる。ただし,

$$\bar{w}_2(z) = \bar{w}_1(-z) \dots\dots\dots (16)$$

すなわち, (12) 式の $\bar{w}(z)$ は, (14) 式に $z = -z$ を代入した値と $z = z$ を代入した値の和で得られる。

この $\bar{w}_1$ に対応する断面力・断面モーメント等は, (14) 式を (7), (8) 式に代入し適宜微分・積分を行なって求められる。

さらに, $\bar{w}_2$ に対応する断面力・断面モーメントを考える。 $\bar{w}_1, \bar{w}_2$ の z による m 階の導関数を $\bar{w}_1^{(m)}, \bar{w}_2^{(m)}$ で表わすと, (14), (16) 式より次の関係が成立する。

$$\bar{w}_2^{(m)}(z) = (-1)^m \bar{w}_1^{(m)}(-z) \dots\dots\dots (17)$$

$\bar{w}_1, \bar{w}_2$ に対応する断面力等に添字 1, 2 を付けて表わすと, (17) 式の関係より, たとえば

$$\begin{aligned} \bar{N}_{\theta 2}(z) &= -(kK/R) [\bar{w}_2'''(z) + 2\bar{w}_2''(z) + \bar{w}_2'(z)] \\ &= -(kK/R) [-\bar{w}_1'''(-z) + 2\bar{w}_1''(-z) + \bar{w}_1'(-z)] \\ &= \bar{N}_{\theta 1}(-z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{S\theta 2}(z) &= -(1-\nu)(D/R^2) [\bar{w}_2''(z)] \\ &= -(1-\nu)(D/R^2) [-\bar{w}_1''(-z)] \\ &= -\bar{M}_{S\theta 1}(-z) \end{aligned}$$

となる。すなわち, $\bar{w}_2$ の z による偶数階の導関数よりなる量は,

$$\bar{N}_{\theta 2}(z) = +\bar{N}_{\theta 1}(-z), \quad \bar{N}_{\theta 2}(-z) = +\bar{N}_{\theta 1}(z),$$

$$\bar{M}_{S\theta 2}(z) = +\bar{M}_{S\theta 1}(-z), \quad \bar{M}_{S\theta 2}(-z) = +\bar{M}_{S\theta 1}(z)$$

で得られるのに対し, $\bar{w}_2$ の z による奇数階の導関数よりなる量は,

$$\bar{N}_{S\theta 2}(z) = -\bar{N}_{S\theta 1}(-z), \quad \bar{M}_{S\theta 2}(z) = -\bar{M}_{S\theta 1}(-z)$$

となることがわかる。これにより, 以上の関係に注意すれば, 断面力・断面モーメントの同次解は $\bar{w}_1$ に対応する部分だけ計算するとよいことになる。

この様にして得られる断面力・断面モーメントの同次解の一節を示す。

$$\begin{aligned} \bar{N}_s &= \mu^2 k (K/R) \sum_n \eta^n \{ -\Phi_1^1(z) \cdot A_0 + \Phi_1^1(z) \cdot B_0 \\ &\quad + \Phi_1^2(z) \cdot C_0 + \Phi_1^2(z) \cdot D_0 \} \cos n\theta \\ \bar{M}_s &= (D/4R^2) \sum_n \{ a\Phi_1^1(z) + b\Phi_1^2(z) \} \cdot A_0 \\ &\quad + \{ -b\Phi_1^1(z) + a\Phi_1^2(z) \} \cdot B_0 \\ &\quad + \{ c\Phi_1^2(z) + d\Phi_1^2(z) \} \cdot C_0 \\ &\quad + \{ -d\Phi_1^1(z) + c\Phi_1^2(z) \} \cdot D_0 \} \cos n\theta \end{aligned}$$

ここで,

$$\Phi_1^{1,2}(z) = 2 \cosh \alpha_{1,2} z \cos \beta_{1,2} z$$

$$\Phi_2^{1,2}(z) = 2 \sinh \alpha_{1,2} z \sin \beta_{1,2} z$$

$$a = [-4(1-\nu)\eta^2 - (\varphi - \psi)\mu]$$

$$b = [2\mu^2 + (\varphi + \psi)\mu]$$

$$c = [-4(1-\nu)\eta^2 + (\varphi - \psi)\mu]$$

$$d = [2\mu^2 - (\varphi + \psi)\mu]$$

$$\varphi = (\sqrt{\mu^4 + 16\eta^4 + 4\eta^2})^{1/2}$$

$$\psi = (\sqrt{\mu^4 + 16\eta^4 - 4\eta^2})^{1/2}$$

<新解> 基礎方程式(5)を用いて新解を求める。

まず, 荷重を次のように2重フーリエ級数に展開する。

$$\left. \begin{aligned} X &= \sum_m \sum_n X_{mn} \cos \lambda z \cos n\theta \\ Y &= \sum_m \sum_n Y_{mn} \sin \lambda z \sin n\theta \\ Z &= \sum_m \sum_n Z_{mn} \sin \lambda z \cos n\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

変位についても同様

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U} &= \sum_m \sum_n \tilde{U}_{mn} \cos \lambda z \cos n\theta \\ \tilde{V} &= \sum_m \sum_n \tilde{V}_{mn} \sin \lambda z \sin n\theta \\ \tilde{W} &= \sum_m \sum_n \tilde{W}_{mn} \sin \lambda z \cos n\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

ここで, $\lambda = m\pi R/Q$ 。この両式を基礎方程式(5)に代入して次式を得る。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{U}_{mn} \\ \tilde{V}_{mn} \\ \tilde{W}_{mn} \end{Bmatrix} = \frac{R^2}{K} \begin{Bmatrix} X_{mn} \\ Y_{mn} \\ Z_{mn} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } A_{11} &= \lambda^2 + (1-\nu)M^2/2, \quad A_{12} = A_{21} = -(1+\nu)\lambda M/2, \\ A_{13} &= A_{31} = -\nu\lambda, \quad A_{22} = (1-\nu)\lambda(1+k)\lambda^2/2 + (1+k)M^2, \\ A_{23} &= A_{32} = M[1+k(\lambda^2+M^2)], \quad A_{33} = 1+k(\lambda^2+M^2). \end{aligned}$$

この三元連立方程式(20)から $\tilde{u}_{mn}$, $\tilde{v}_{mn}$, $\tilde{w}_{mn}$ したがって、
解 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$, $\tilde{w}$ が求められる。断面力・断面モーメント等の
解も、ここで求められた変位を各関係式に代入すると得ら
れる。たとえば、

$$\begin{aligned} \tilde{N}_\theta &= (K/R) \sum_m \sum_n [-\lambda \tilde{u}_{mn} + \nu(n \tilde{v}_{mn} + \tilde{w}_{mn})] \sin \lambda \beta \cos m \theta \\ \tilde{M}_\theta &= (D/R^2) \sum_m \sum_n [\nu n \tilde{v}_{mn} + (\lambda^2 + \nu M^2) \tilde{u}_{mn}] \sin \lambda \beta \cos m \theta \end{aligned}$$

〈一般解〉 円筒シェル的一般解は、以上の
同次解と特解の和で得られる。ここで、同次解は4
つの未定数を含む。(一般には8つの未定数
を含むが、ここでは両端での境界条件が同じで、
さらに軸方向荷重分布が円筒シェルの中央断面に
関して対称な場合を考えているので4つとなる。)
この4つの未定数は、円筒シェルの一端での境
界条件より決定される。

3. 有限要素法による解法

ここで用いた有限要素法は、図4に示す円筒要素を使い荷重および変
位を円筒方向(θ 方向)にフーリエ級数展開する方法である。つまり、荷
重の分布を、円筒方向にフーリエ級数展開し、 θ の三角関数で表わされる
波形の和と考える。各々の波形については、荷重分布とこれに対する変位・
断面力の分布形が同じ形の波で表わされるから、これらのピーク値の対比
がつかねば全体の変位・断面力分布が得られる。

ここでは、剛性マトリックス、等価節線荷重の算出手順の詳細は省略
するが、要素内の軸方向変位分布は面内変位 u および v は1次式、 w は3
次多項式を用い、歪-変位関係式および断面力・断面モーメント-変位関
係式は、2. 円筒シェルの解析解法で述べた(1), (2)と(3)式を用いて
誘導した。

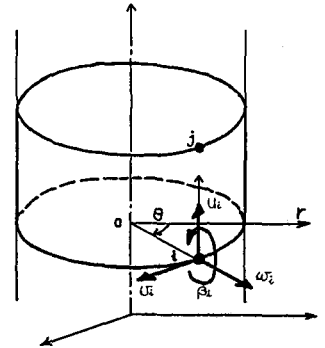


図4 円筒要素モデル

4. 解析結果(解析解と有限要素解の比較)

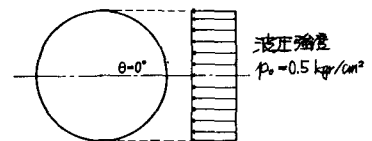
高さ方向5m間隔で支持されている防波ウェル部分を取
出し、波圧を受ける両端固定の円筒シェルにモデル化し解析を
行なう。その断面諸元等は、

$$l = 5.0 \text{ m}, \quad R = 3.0 \text{ m}, \quad h = 2.0 \text{ cm}$$

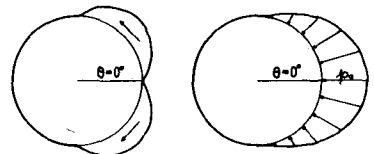
$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2, \quad \nu = 0.3 \quad \text{である。}$$

ウェルに作用する波圧は相当複雑になると予想されるが、こ
こでは軸方向および直径上に等分布な波圧(図5の(a)参照)が
作用する場合を想定した。図5の(b), (c)は(a)の垂直方向、
半径方向の波圧成分を示している。なお、計算に用いた波圧強
度は $p_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ である。

解析解法における荷重のフーリエ級数展開項数 (m, n)
は、最終値に対する誤差が0.1%となるに必要な項数までと
した。有限要素法は、固定端近傍の応力状態を考慮して80等分
割とし、フーリエ級数の展開項数は30項程度で十分収束しているが、本報告では40項で計算した。
両手法とも、境界条件は $u=v=w=\partial w/\partial s=0$ である。



(a) 円周方向波圧分布



(b) 円周垂直方向成分 (c) 半径方向成分

図5 波圧分布

得られた計算結果は、解析解および有限要素解とよく一致し、グラフ上での差を明確にすることができないので、表1に両者の数値の比較を示す。

変位 w 、断面力 (N_s, N_θ) および断面モーメント (M_s, M_θ) の軸方向・円周方向分布状況を図6～図10に示す。各図からわかるように、円周方向分布はかなり複雑な形状を示しているが、正・負値のピークは N_θ を除くいずれの場合にも $\theta=0^\circ$ 、 75° に表われている。このことは、上記荷重条件下における変位・応力挙動の大きな断色と思われる。

以上の解析で明らかのように、解析解と有限要素法とも実用上十分な精度で一致しており、造形構造物のような複雑な荷重・構造系に対しても適切なモデル化を行なうことにより、この解析が可能なるものと思われる。

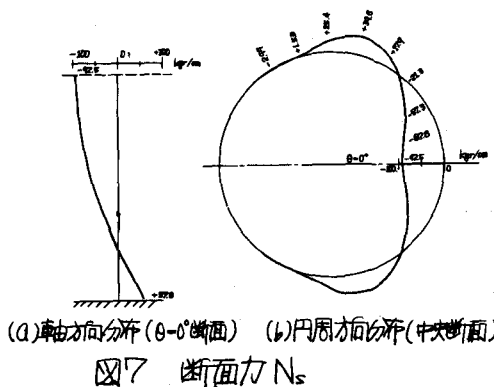
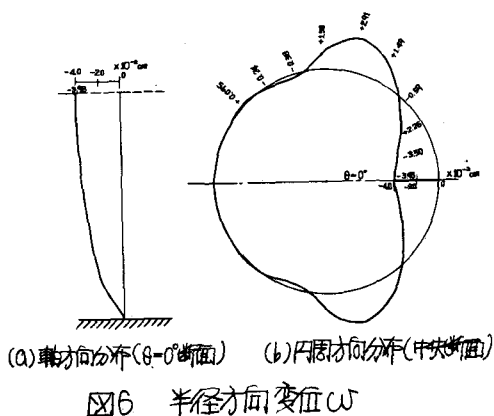


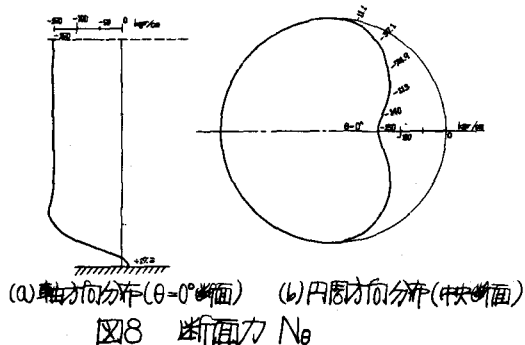
表1 解析解と有限要素解の比較

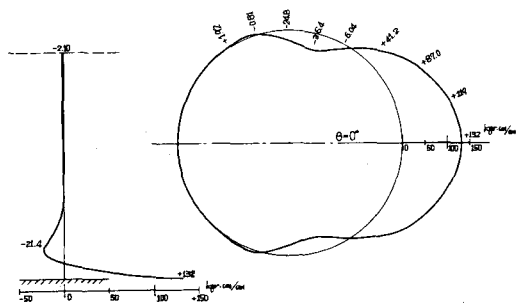
$\theta=0^\circ$ 断面での水平変位 w の比較

中央断面 からの距離 m	水平変位 w , cm	
	解析解 $\times 10^2$	有限要素解 $\times 10^2$
0.00	-3.9800	-3.9794
0.25	-3.9495	-3.9489
0.50	-3.8584	-3.8578
0.75	-3.7074	-3.7068
1.00	-3.4976	-3.4970
1.25	-3.2309	-3.2304
1.50	-2.9187	-2.9182
1.75	-2.5837	-2.5833

$\theta=0^\circ$ 断面での断面モーメント M_s の比較

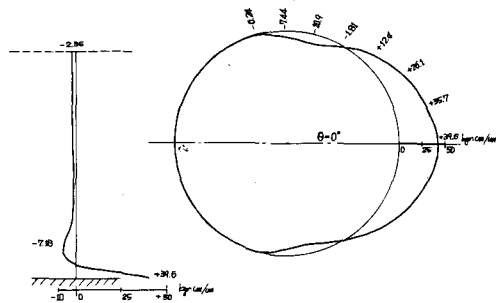
中央断面 からの距離 m	断面モーメント M_s kg-cm/cm	
	解析解 $\times 10$	有限要素解 $\times 10$
0.00	-0.2075	-0.2098
0.50	-0.1995	-0.2046
1.00	-0.1917	-0.1929
1.50	-0.0819	-0.0849
1.875	-0.5795	-0.5757
2.00	-1.3198	-1.3188
2.125	-2.0972	-2.1416
2.25	-1.8260	-1.8746
2.375	2.0746	2.0422
2.50	13.214	13.095





(a)軸方向分布($\theta=0^\circ$ 断面) (b)円周方向分布(固定端)

図9 断面モーメント M_θ



(a)軸方向分布($\theta=0^\circ$ 断面) (b)円周方向分布(固定端)

図10 断面モーメント M_θ

5. 模型実験

ここでは、有限要素法による理論値の妥当性を検証するためにひずみ測定実験を行なったので、以下これについて述べる。

試験体(防波ウェル部分)は実構造物の $1/12$ で、その諸元は $l=42\text{cm}$, $R=25\text{cm}$, $t=0.16\text{cm}$ であり、ウェルの両端は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 9\text{mm}$ の鋼板に溶接により固定されている。図11にその側面図を示す。荷重状態としては、軸方向および円周方向に等分布荷重が載荷された場合を想定した(図11参照)。載荷システムは、試験体、バレット、油圧ジャッキ、ロードセルより構成されており、荷重の検出はロードセルによった。防波ウェルの外面42箇所にひずみゲージを貼付し、軸方向および円周方向ひずみの測定を行なった。

表2に代表的な数点のひずみ値を有限要素解とを比較を示す。有限要素法の計算は両端固定とし、80等分割、荷重展開項数は30である。

表は $\theta=75^\circ, 105^\circ$ (θ の取り方は図11参照)の長さ方向中央点における軸方向ひずみ ε_s と円周方向ひずみ ε_θ を示したものである。ただし、()内の値が有限要素法による結果である。表からわかるように、計算値は実験値と十分よく一致しており、ほぼ満足すべき結果が得られた。

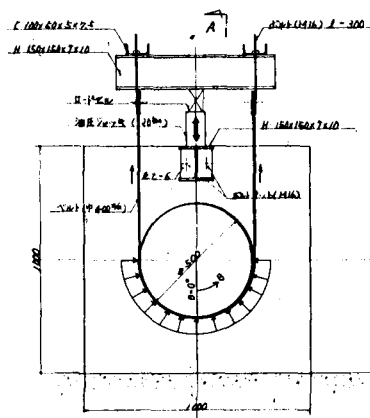


図11 試験体側面図

表2 実験値と理論値(有限要素法)の比較

載荷荷重 (t)	$\theta=75^\circ$ (内側)		$\theta=105^\circ$ (内側)		$\theta=105^\circ$ (外側)	
	ε_s	ε_θ	ε_s	ε_θ	ε_s	ε_θ
0.85	-45(-41)	56(38)	52(43)	-88(-93)	70(59)	54(59)
1.00	-53(-49)	66(45)	62(50)	-105(-110)	83(70)	63(70)
1.26	-67(-61)	82(57)	77(63)	-132(-138)	104(88)	79(87)
1.50	-75(-73)	97(68)	90(75)	-159(-165)	121(105)	94(105)
2.00	-104(-97)	106(90)	120(100)	-209(-219)	162(139)	122(139)

—: 圧縮, 乗数 $\times 10^6$

6. おすひ

この種の荷重を受ける円筒シェル構造の解析と模型実験により設計上の一指針が得られたと思う。なお、大規模模型実験などにより、そのモデル化の妥当性の確認があれば一層合理的なものとなる。

参考文献

- 1) 西村敏雄: ベクトルとシェル構造, 朝倉社, 1977