

I-24 衝撃内圧を受ける円筒形シェルの リブの補強効果

室蘭工業大学研究生	正員	高橋	和久
室蘭工業大学	正員	岸	徳光
同上	正員	松岡	健一
日本大学生産工学部	正員	能町	純雄

1. まえがき

最近の土木・建築構造物が大型化に伴い、薄肉シェル構造物も多く用いられるようになった。これらのシェル構造物には、各種タンク、圧力容器やパイプシステム、大型の屋根構造、或いはクーリングタワー等が挙げられる。これらの構造物に対する荷重条件も使用条件、構築条件に応じて種々考えられる。ここでは、シェル構造物の中で特に圧力容器、或いはパイプシステムのような円筒形シェルに衝撃内圧が作用したときの耐衝撃性について検討を行なうものとする。圧力容器の耐衝撃性に関しては谷山らがリブ付円筒容器全体に内圧急上昇の荷重を作用させたものをモデルとして解析を行ないリブの効果について検討を行なっている(1) 2)。しかしながら、底盤付きの容器の場合、底盤(の蓋)の変形モードが円筒部の変形モードより卓越しているため、円筒部にもその連成効果が存在するものと考えられる。本論文ではこの底盤の変形モードの連成効果を取り除いた真のリブの効果を検討するために無限長のリブ付円筒形シェルを考え、谷山らと同様の衝撃的内圧急上昇荷重を作用させ、解析を試みた。尚、解析理論は任意形状の軸対称シェルを対象として有限帯板理論による解析式を定式化したものであり、解析は周方向は有限Fourier変換を施し時間方向にはModal-analysis法を適用するものとする。

2. 解析理論

軸対称シェルのリング状要素を円錐台要素として定式化を行なう。尚、定式化の方法は文献3)によるものとする。以下にその概要を示す。

(1) 要素内の変位仮定

円錐台要素において、図-1のように変位成分を仮定する。

要素内の任意点の変位分布を、面内変位 u 、 v に関しては s の1次式、法線方向変位 w を3次式、とそれぞれ仮定すると i - j 要素内の各変位は次のようになる。

$$\begin{aligned} u &= (1-\xi) u_i + \xi u_j, \quad v = (1-\xi) v_i + \xi v_j \\ w &= (1-3\xi^2 + 2\xi^3) w_i + (3\xi^2 - 2\xi^3) w_j \\ &\quad + L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \beta_i - L(\xi^2 - \xi^3) \beta_j \end{aligned}$$

ただし、 $\xi = s/L$ とする。..... (1)

(2) ひずみと変位の関係

文献3)に従って各ひずみ成分を変位成分で表わすと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{\partial v}{\partial s}, \quad \epsilon_\theta = \frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{1}{r} (v \sin \alpha + w \cos \alpha) \\ \gamma_{s\theta} &= \frac{\partial u}{\partial s} - \frac{\sin \alpha}{r} u + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \quad \kappa_s = - \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \end{aligned}$$

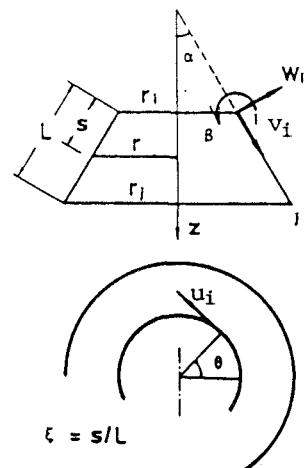


図-1 円錐台要素の変位仮定

$$\kappa_{\theta} = -\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\cos \alpha}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial w}{\partial s}$$

$$\tau_n = 2 \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial s \partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\cos \alpha}{r} \frac{\partial u}{\partial s} - \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{r^2} u \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式に (1) 式を代入して、整理すると、ひずみベクトルは変位の θ に関する 2 階の微分方程式として得ることができる。

ここで、 θ 方向に有限 Fourier 変換を施すことによりひずみの像関数を求めることができる。これを Matrix の形で整理すると次のようになる。

$$\{C_m[\varepsilon]\} = [B]\{C_m[\Delta]\} \quad \dots\dots (3) \quad \text{ここで、}\{C_m[\]\}\text{は有限 Fourier 変換を意味する。}$$

(3) 断面力とひずみの関係

要素を等方性シェルと仮定すると、断面力ベクトルはひずみ成分を用いて容易に表わすことができる。

(3) 式と同様に像関数として示すと次のようになる。

$$\{C_m[F]\} = [D]\{C_m[\varepsilon]\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4) 運動方程式

仮想仕事の原理を用いて要素の剛性関係式を求め、全体座標系に変換して力の釣合いと変位の適合条件を考慮して重ね合わせを行ない、構造全体の剛性関係式を得ることができる。更に、固有値、固有ベクトルを求め、直交関係を考慮して非連成一次方程式に変換する。それに Duhamel 積分を施して像関数の基準ベクトルを求め、これを θ 方向に逆変換して真の動的変位が求まる。従って、ひずみ、或いは断面力も容易に求めることができる。

3. 数値解析

(1) 解析モデル

円筒形シェルの解析モデルとして無限長のスチール製 ($E=2100000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu=0.3$, $\rho=7.85 \text{ g/cm}^3$) 円筒体 (半径: $R=60 \text{ cm}$, 板厚: $h=1.2 \text{ cm}$) のリブなし、リブ (厚さ

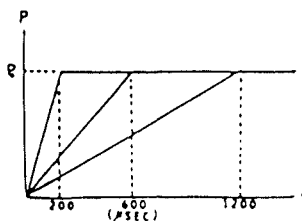


図-3 荷重タイプ

180, 120, 90, 60 cm の等間隔に配したものの 6 タイプ を考えた。尚、実際の解析は図-2 のように、円筒体の一部 (長さ 360 cm) を切り取り更に、構造の対称性を考慮し半スパンで行なった。要素の分割数はデータを入れ易くするために、リブなし、リブの間隔 360, 180 cm の 3 タイプは半スパンを 18 等分し、リブの間隔 120, 90, 60 cm の 3 タイプはリブ間を 18 等分している。また、リブ付の円筒体はリブを一要素として解析を行なった。荷重は内圧急上昇を考え、円筒全体に図-3 のような内圧の立上がり時間が $200 \mu \text{sec}$, $600 \mu \text{sec}$, $1200 \mu \text{sec}$ の 3 タイプが作用するものを想定した。尚、Fourier 級数は構造と荷重の軸対称性より 1 項のみとし、減衰は考慮していない。

(2) 解析結果

各時間について、リブなしの任意点、リブを間隔 360, 60 cm に配した円筒体のリブ間の中央におけるそれぞれの周方向の応力の変化を調べたものが図-4 (a)~(c) である。またリブを間隔 360, 180, 60 cm に配

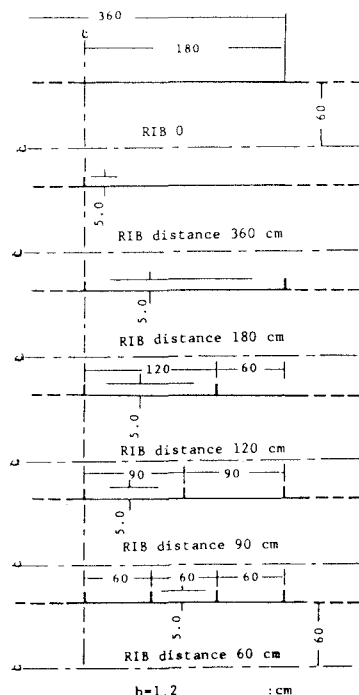


図-2 解析モデル

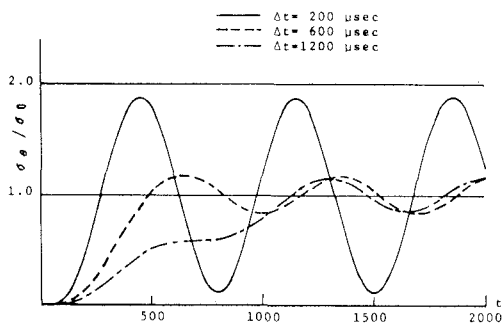
した円筒体のリブ点の周方向の応力の変化を調べたものが図-5 (a)~(c)である。応力は以後、全て円筒体に静的に内圧が作用している時の周方向の応力 (hoop-stress) $\sigma_0 = P_0 R/h$ で無次元化して整理している。図-4によると、リブの有無、間隔に関係なく内圧の立上がり時間 Δt が $200 \mu\text{sec}$ のときは振幅がほぼ2.0の正弦波分布となっており、 Δt が、 $600 \mu\text{sec}$, $1200 \mu\text{sec}$ と長くなるにつれて振動の振幅も小さくなり、時間が経過すると共に静的な値1.0にスムーズに漸近していく様子がわかる。リブ点の周方向応力は図-5に示す通りリブ間の中央の応力に比べてやや小さく(約80%)となっており、その変化の様子はリブの間隔により差はあまり見られないようである。

次に、 Δt が $200 \mu\text{sec}$ の場合における、荷重載荷後の周方向応力の最初のピーク ($450 \mu\text{sec}$ 後) における各地点の分布を調べたものが図-6である。これによると、リブ点近傍の応力の減少はリブの間隔や場所に関係なく各リブでほとんど違いが見られずリブから20cm前後離れたところでは逆に応力が増加している様子がわかる。その他の円筒部ではリブの間隔に関係なく、リブなしの円筒体とあまり違いが見られない。

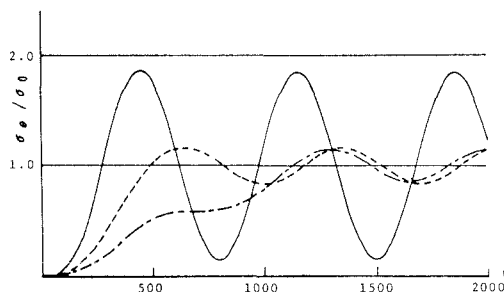
更に、リブの厚さや長さの変化が円筒体に及ぼす影響について検討した。図-7はリブを間隔120cmに配した円筒体でリブの厚さをそれぞれ2.4, 3.6cmにしたものに $\Delta t = 200 \mu\text{sec}$ の内圧を作用させて、周方向の応力の各地点の分布を、図-6にならって示したものである。図より、リブ厚が1.2cmのものと比べると、厚さが増すにつれてリブ点及びその近傍の応力の減少効果は大きくなっているようであるが、リブの影響範囲はリブ厚によってほとんど変化しないようである。図-8は同じ円筒体でリブの長さを2.5, 10.0cmにし、同じく $\Delta t = 200 \mu\text{sec}$ の内圧を作用させ、周方向の応力の分布を図-6にならって示したものである。この場合もリブ厚の変化と同様、リブ点及びその近傍での応力の減少効果の差異は現れているが、効果の及ぶ範囲は変わらず、また他の円筒部では変化が見られない。

4. 考察及びまとめ

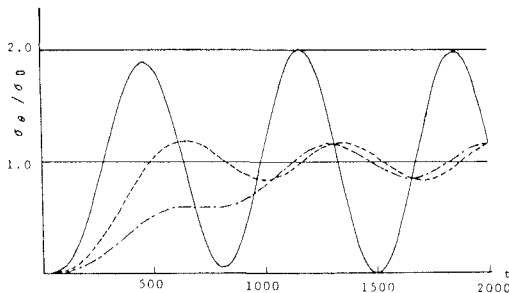
以上、解析結果より次のことが明らかとなった。



(a) RIB 0 任意点

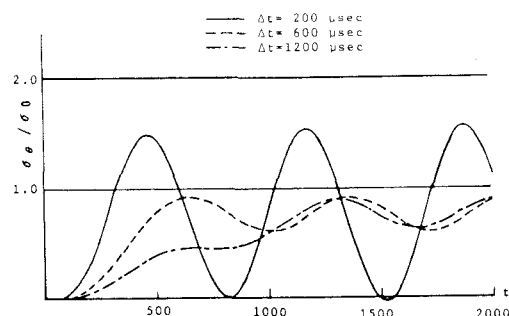


(b) RIB distance 360 cm



(c) RIB distance 60 cm

図-4 リブ間中央の周方向応力の時間分布



(a) RIB distance 360 cm

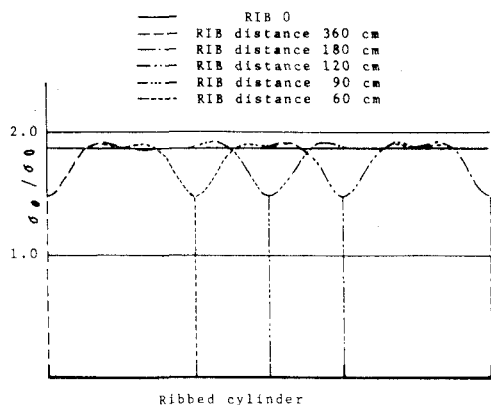


図-6 周方向応力の各地点の分布

(1) 内圧の立上がり時間が短い場合、動的な最大応力は静的な値の約2倍となっており、立上がり時間が長くなると時間の経過と共に徐々に静的な値に漸近していくようである。

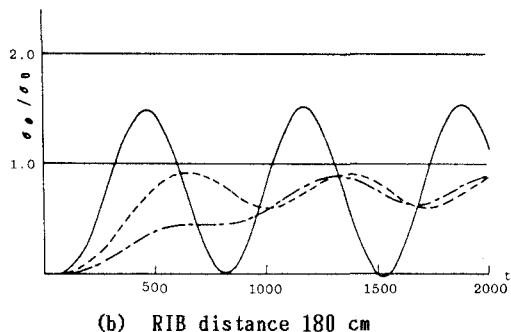
(2) リブの効果は局所的で、その効果の及ぶ範囲はリブから15~20cm程度であり、20cm前後では逆に応力が多少増加している。このような挙動は、リブの間隔配置や厚さ、長さによってあまり変化を受けないことが明らかとなった。

(3) 本文では示していないが谷山らの研究 1) 2) と比較してみると、変形モードやリブの荷重分担効果等はほぼ同様の傾向を示し、顕著な差異は見られないことが明らかとなった。これより底盤がついているような場合も、円筒形シェルを用いることによって同様に評価が可能なものと考えられる。

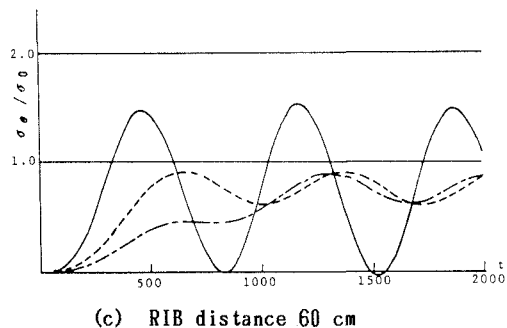
今後、更に詳細を検討して行きたい。

参考文献

- 1) 谷山剛、岸徳光、松岡健一、能町純雄：リブ付円筒体の衝撃応答解析について、土木学会北海道支部論文報告集、第41号、pp.77~80 1985。
- 2) 谷山剛、岸徳光、松岡健一、能町純雄：リブ付円筒体シェルの衝撃応答解析について、土木学会第40回学術講演会講演概要集、第1部、pp.107~108 1985。
- 3) 川股重也 著：シェル構造解析、日本構造協会編、倍風館。



(b) RIB distance 180 cm



(c) RIB distance 60 cm

図-5 リブ点の周方向応力の時間分布

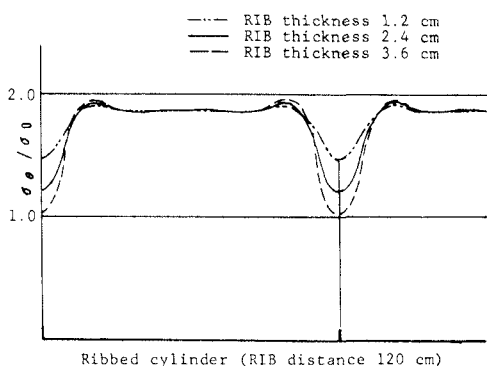


図-7 リブ厚の変化による影響

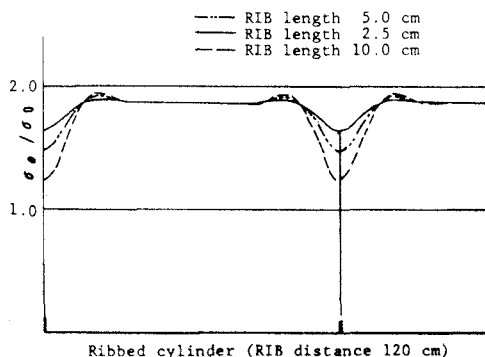


図-8 リブ長の変化による影響