

I—13 集中外力を受けるリブ付円筒形シェルの動的応答

室蘭工業大学大学院	学生員	谷山 剛
室蘭工業大学	正員	岸 徳光
同上	正員	松岡 健一
日本大学	正員	能町 純雄

1. まえがき

近年、土木、建築構造物においても衝撃荷重に対する安全性の検討が要求され、合理的な設計手法の確立が急がれている。著者等は先に、リブ付円筒形シェルに等分布内圧が作用する場合の応答解析を行いリブの有効性について検討を行った。^{1) 2)}ここでは、アクリル円筒形模型に衝撃集中荷重を載荷した場合の実験値^{3) 4) 5)}と理論結果との比較を行い、さらにリブの有効性について検討を行った。尚、理論は任意形状の軸対称シェルの対象として、有限要素法的な考え方に基づいた有限帯板理論により解析式を定式化するものであるが、解析は周方向に有限フーリエ変換を施し、時間方向にはModal-Analysis法を適用して行うものである。

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、定式化することにする。定式化の方法は文献6)の誘導過程に従って行うこととした。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 に対しては S の線形変化に、また法線方向変位 W を3次放物線に仮定する。すると i - j 要素内の各変位は、

$$\begin{aligned} U &= u^{(i)} u_i + u^{(j)} u_j, & V &= v^{(i)} v_i + v^{(j)} v_j \\ W &= w^{(i)} w_i + w^{(j)} w_j + \beta^{(i)} \beta_i + \beta^{(j)} \beta_j \quad \dots (1) \end{aligned}$$

ただし、 $\xi = s/L$ として

$$\begin{aligned} u^{(i)} &= v^{(i)} = 1 - \xi, & u^{(j)} &= v^{(j)} = \xi \\ w^{(i)} &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, & w^{(j)} &= 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ \beta^{(i)} &= L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3), & \beta^{(j)} &= L(-\xi^2 + \xi^3) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

(2) ひずみと変位の関係

文献6)に従って各ひずみ成分を変位成分で表すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{\partial U}{\partial s}, & \epsilon_s &= \frac{\partial V}{r \partial \theta} + \frac{1}{r} (U \sin \alpha + W \cos \alpha) \\ \gamma_{s\theta} &= \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{\sin \alpha}{r} V + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}, & \kappa_s &= -\frac{\partial^2 W}{\partial s^2}, & \kappa_\theta &= -\frac{\partial^2 W}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\cos \alpha}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial W}{\partial s} \\ \tau_n &= 2 \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial s \partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{\cos \alpha}{r} \frac{\partial V}{\partial s} - \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{r^2} V \right) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

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られる。

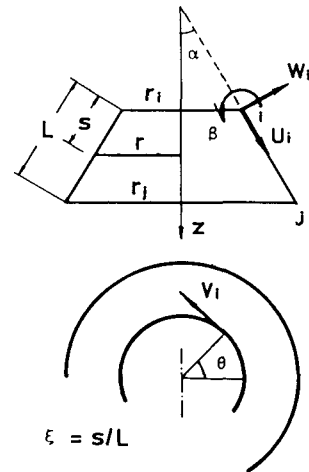


図-1 円錐台要素の変位仮定

ここで、 θ 方向に有限フーリエ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。これをマトリックスの形で整理すると以下になる。

$$\{\bar{\epsilon}_m[\epsilon]\} = [B] \{\bar{\epsilon}_m[\Delta]\} \dots \quad (4) \quad \text{ここで} \{\bar{\epsilon}_m[\]\} \text{は有限フーリエ変換を意味する。}$$

(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すことができる。(4) 式と同様に像関数として示すと以下になる。

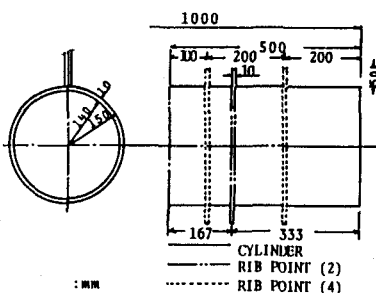
$$\{\bar{\epsilon}_m[F]\} = [D] \{\bar{\epsilon}_m[\epsilon]\} \dots \quad (5)$$

(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、全体座標系へ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せを行い、構造全体の剛性関係式を得ることができる。さらに、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運動方程式に変換する。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あるいは断面力も容易に求めることができる。

3. 実験結果と理論解析結果との比較

図-2 に実験³⁾ に用いた円筒体の断面形状とアクリル材の材料定数を示している。これと同じモデルで理論解析を行った。この理論解析において、分割数は円筒の半分の 20 分割し、さらに荷重作用点とリブの接点で分割、リブを 2 分割とした。合計で 21~25 の要素とした。この分割数は文



Span Length	l = 100 cm
Elastic Rod	l = 50 cm
Drop Weight	W = 1.9 Kg
	d = 25 cm
Acryl resin	E = 30000 Kg/cm ²
	v = 0.38
	p = 1.18 Kg/cm ³

図-2 模型寸法図

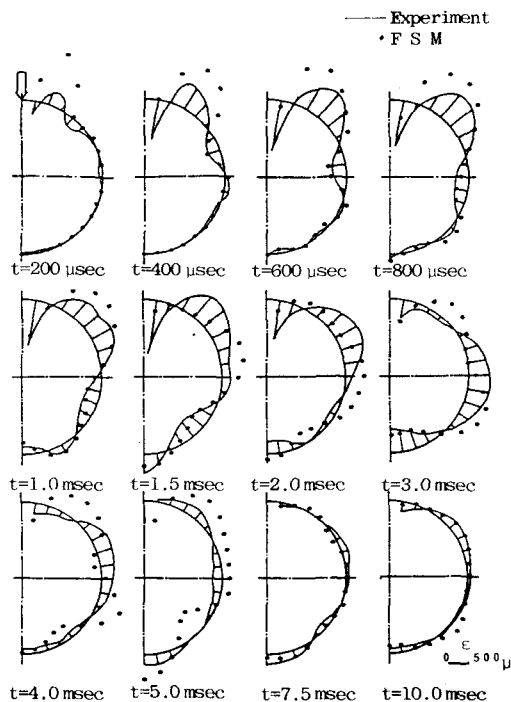


図-3 周方向ひずみの分布 (リブなし)

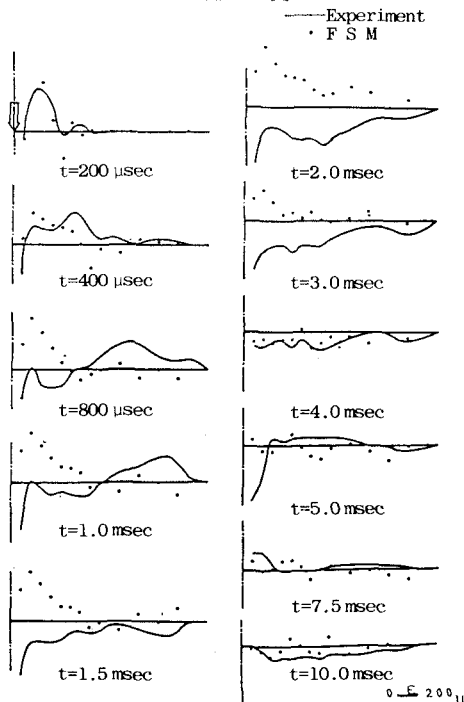


図-4 軸方向ひずみの分布 (リブなし)

献1)により妥当であると思われる。さらにフーリエ級数の考慮する項を $m = 51$ までとし、ガウス積分の次数を $NG = 5$ までとした。荷重は入力ひずみを換算してさらに折れ線分布で近似した。これは従来の三角形分布としたものよりは良い精度が得られると思われる。

リブのない場合のスパン中央外表面周方向ひずみの周方向分布と上縁軸方向ひずみの軸方向分布を各時間について表したのが図-3と図-4である。両図より周方向、軸方向への弾性衝撃波動の伝播の概要を知ることができる。詳細を検討すると図-3では理論値も実験値も局所ひずみと断面変形が顕著に示されており、また、衝撃初期においては理論値が実験値よりも多少大きく示されているがモード的にも妥当であると思われる。しかし、時間が長くなるとモード的にも差が生じ理論値と実験値が合わなくなっている。図-4でもまた、局所ひずみが顕著に示されているが、理論値と実験値が合うのはごく初期のときだけでかなり実験値と異なるように思われる。

次にリブが2本の場合と4本の場合について同様に示した図が図-5～図-8である。これらの図ではスパン中央部での周方向ひずみに関してはリブの影響がみられなく図-3と同様の傾向が現れている。また軸方向ひずみに関しては衝撃のごく初期ではリブの影響がみられず、理論値と実験値とがかなりよく合っている。しかし、 $t = 800 \mu\text{SEC}$ 前後よりリブの効果が現れてきている。このリブの効果も局所的で他の部分にその効果が伝播しているようにはみられない。

4. まとめ

集中外力を受けるリブ付円筒形シェルの動的応答について解析を行ったが、その結果として次のようなことがいえる。

- (1) 理論値、実験値ともに局所的ひずみと断面変形が顕著に示されている。
- (2) 衝撃初期において理論値と実験値とがよく合っているが、時間が経過すると合わなくなってくる。

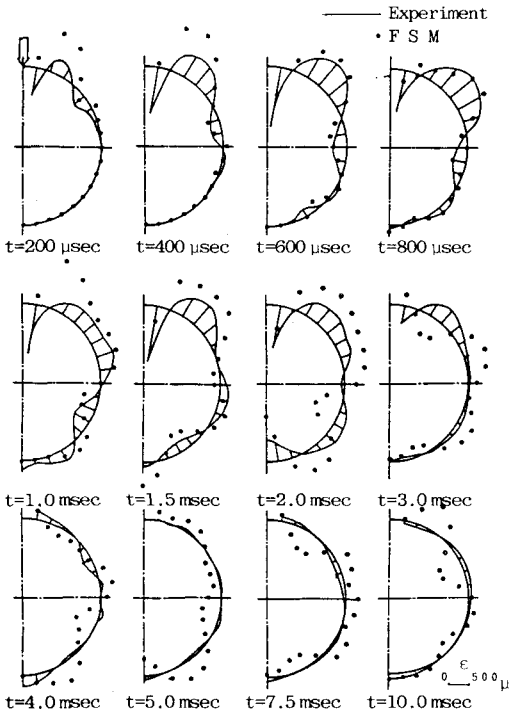


図-5 周方向ひずみの分布 (リブ2本)

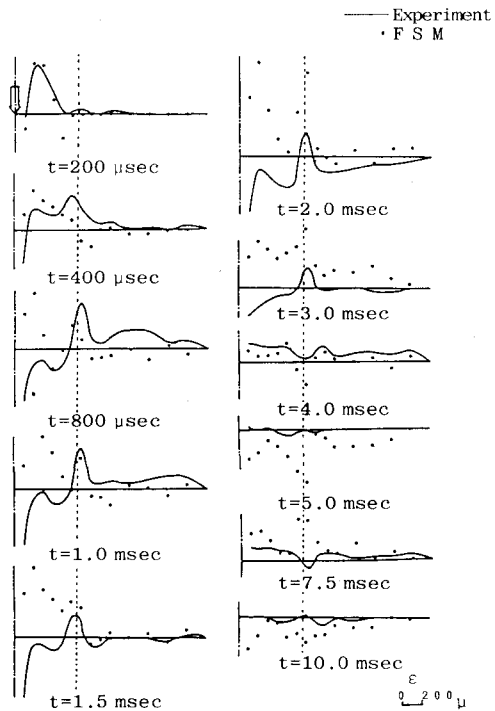


図-6 軸方向ひずみの分布 (リブ2本)

(3) 軸方向ひずみについて、衝撃初期にはリブの影響が小さく時間の経過とともに現れてくる。

(4) リブの効果は局所的であり荷重分担効果は小さい。

以上、理論値と実験値の比較とリブの効果について検討を行ったが、今後は衝撃荷重載荷後について減衰を考慮して減衰定数を入れて検討し、他の断面についても数値解析を行ってさらに検討を加えていく予定である。

尚、本論文の数値解析は北海道大学大型計算センター HITAC M-280を用いて行い、実験データのデジタル化は室蘭工業大学情報処理センター図形処理システムFACOM 9430を用いて行ったものである。

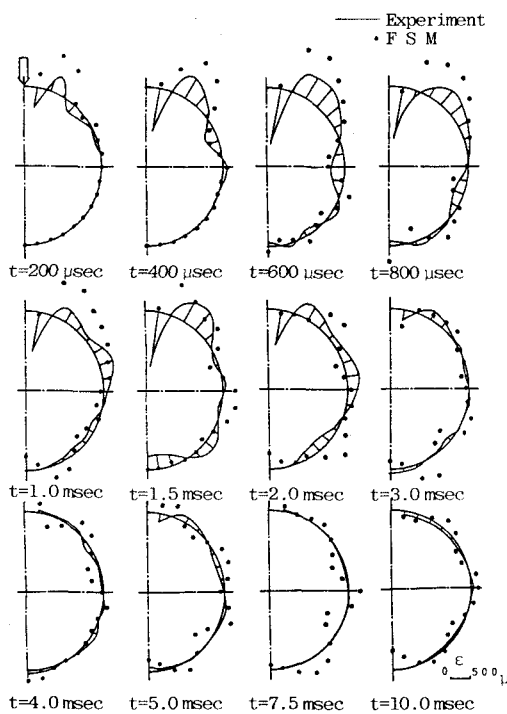


図-7 周方向ひずみの分布 (リブ4本)

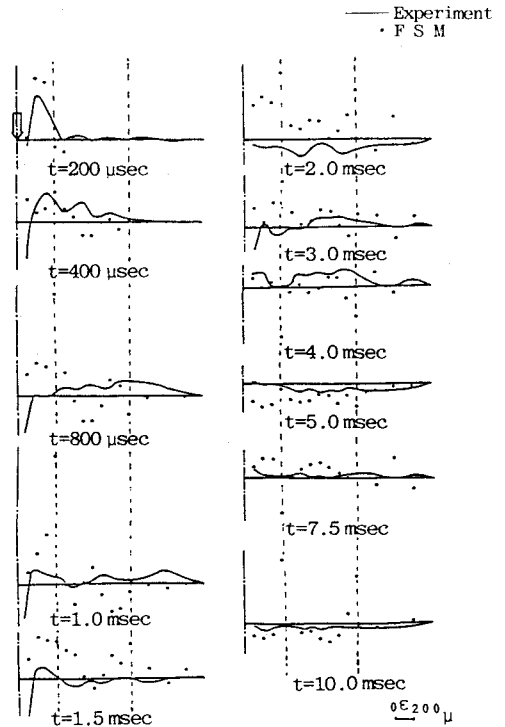


図-8 軸方向ひずみの分布 (リブ4本)

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、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) 岸徳光、高野博、能町純雄 : 衝撃荷重による円筒体の動的挙動について、土木学会第37回学術講演会講演概要集、第1部、PP. 403~404、1982
- 4) 岸徳光、松岡健一、能町純雄、高野博 : 薄肉円筒体の曲げ衝撃特性について、土木学会北海道支部論文報告集、第39号、PP. 12~16、1983
- 5) 岸徳光、松岡健一、能町純雄 : 回転シェル構造体の衝撃応答解析について、土木学会第38回学術講演会講演概要集、第1部、PP. 125~126、1983
- 6) 川股重也 著: シェル構造解析、日本構造協会、倍風館