136 面内弾性支持された薄肉円筒シェルパネルのカオス振動実験

Experiments on Chaotic Oscillations of a Shallow Cylindrical Shell-Panel

with In-plane Elastic Support

	IE	永井健一	(群馬大)	正山口誉夫(群馬大)	
0	学	柳沢 大	(群大院)	村田。健。《《松下冷機(株)》	
	Ē	丸山真一	(群馬大)	1. "此来,她说了你说道道。"他说:"我是一个话吧。 2. "我们的你们的你们的你们就是你的吗?"	
4.1		Ken-ichi NAGAI, Gunma University, Tenjin-cho1-5-1, Kiryu, Gunma			
		Takao YAN	IAGUCHI, Gunn	na University	
		Dai YANAGISAWA, Postgraduaduate school Gunma University			
		Ken Murata, MATSUSITAREIKI.Co.Ltd.,			
		Shinichi MARUYAMA, Gunma University			
Ke	We	ords :Chaos, Vi	bration of Continu	ous Systems, Nonlinear Vibrations	

1. 緒 言

輸送用機械の高速化,軽量化に伴い,薄肉で軽量な構造 要素が要求される。薄肉要素は曲率を持つことで剛性が高 くなる.しかし,荷重の増大や振動荷重の下では非線形振 動が発生しやすい.また,薄肉シェル構造の振動挙動は曲 率や拘束条件の変化に大きく影響を受ける。ゆえに,理論 解との相互比較により推算し,実験と理論の双方から振動 挙動の解析をすることは重要である.

本報では面内弾性支持された偏平円筒シェルを用いて振 動実験を行った.また,シェルパネルの解析法^{(2),(3)}を用い て数値実験を行い,実験結果との比較を行った.まず,実 験からシェルパネルの基本特性を調べる.ついで実験から の得られた基本特性と理論解の比較を行う.これから,拘 束条件として等価に置き換えたばね定数を設定する.つい で,非線形振動実験を行い,カオス振動について実験と推 定したばね定数を与えた理論解の双方から吟味した.

2. 円筒シェルパネル及び支持装置

偏平円筒シェルパネルと支持枠の概要を図1に示す. 試験片に厚 さ h = 0.20 mm の燐青銅板を用いる. 一方向にロール加工し,円 筒状の曲率をつける. ここで,円筒の真直方向を x 軸,円周方向 を y 軸とする. その後正方形状に切り出し,両面に白色塗装を施 す. 拘束条件に,たわみに関する境界条件として単純支持,面内 方向に関する境界条件として弾性支持を考える. そこで,厚さ 0.072 mmのフィルムをシェルの表裏交互に張り付け支持枠と接合 した. これより,境界でたわみと曲げモーメントが最小となる条 件を得た.



Fig. 1 Shell panel and Fixture

シェルの形状を実測した結果、板厚 h=0.24 mm、矢高 $H=0.4 \pm 0.1$ mm であった. これより、曲率半径 $R=5400 \pm 600$ mm を得る.後述する無次元化式より曲率係数 $\alpha=15\pm2$ となる.また、シェルの諸量は、ヤング率: E=111.49 GPa、密度: $\rho=7.47 \times 10^3$ 、ポアソン比: v=0.33 を用いる.

3. 実験要領

実験装置は、円筒シェルパネルに周期横加速度を与える 電磁振動試験装置と、振動応答の検出・記録・分析装置か らなる.実験の整理のため、次の無次元量を導入する. $[\xi, \eta] = [x, y] / a, \alpha = a^2 / Rh, w = W / h, \omega = 2\pi f / \Omega_0$

[p_d, p_s] = [a_d, a_s] $\rho a^4/D$, $q_s = Q_s a^2/Dh$ ここで, ξ , η は座標を示す. α は曲率, wはたわみ, ω は 加振角振動数, p_d, p_s はそれぞれ動的荷重振幅, 分布荷重 を示す. q_s は集中荷重である. ただし, $\Omega_0 = \sqrt{D/\rho h}/a^2$ は振動数に関する定数, $D = E h^3/12 (1 - V^2)$ は曲げ剛性で ある. はじめに, シェルの復元力特性, 線形固有振動数, 固有振動モードの測定を行う. その後, シェルに周期横荷 重を加え, 加振実験を行う. 周波数応答曲線,時間波形, ポアンカレ写像図を記録し, 得られた時間波形から周波数 分析, リャプノフ指数を求める.

4.実験結果と理論解の比較

4.1 シェルパネルの基本特性 シェルの復元力特性を求めた.実験結果をプロットで図2に示す.縦軸は集中荷重 q_s ,横軸は静的平衡位置からのたわみ w である.図よりシェルは負の復元力を含む漸軟-漸硬のばね特性を持つことがわかる.また、シェルの線形固有振動数および固有振動モードを測定した.シェルの弾性拘束と等価な、x, y軸方向のばね定数 k_x, k_y をそれぞれ推算した.これから、曲率 $\alpha = 15.0$,ばね定数 $k_x = 0.01 k_y = 1 \times e^{-14}$ を得た.図に実線で示す.以下、非線形理論解の数値実験はこれにより得られた k_x, k_y を用いてを行う.

4.2 **蒋肉シェルパネルの周波数応答曲線** 加振加 速度振幅 p_d = 490 のもとで周波数掃引実験を行った. 結果 を図3に示す. 図中の (*i*, *j*) は固有振動モードを表し, *i*, *j* はそれぞれ *x*, *y* 軸方向の半波長の数に対応する. 線形固有 振動数 をあわせて示す. 加振角振動数 ω = 30-40 と ω = 45~50 でカオス振動と思われる非定常応答が認められ る.後述する分析からカオス振動であることが確認できた. また, それぞれの領域における時間波形を収録し, 周波数

日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2002 宇都宮-講演論文集〔2002-9.6~7,宇都宮〕

分析を行った.領域 ω = 45~50 では加振振動数に対して 1/2次の分数次調波共振応答,領域 ω = 30~40 では加振振 動数に対して3/4次の亜分数次調波共振応答が現れた.以 下,この領域を $C_{(1,1;1/2)}$, $C_{(1,1;3/4)}$ と表す.

4.3 ポアンカレ写像図 領域 $C_{(1,1;1/2)}$ における,実験と理論解のポアンカレ写像(位相角 $\theta = \pi/3$)を図5に示す.実験では加振周波数 $\omega = 52.6$,理論解では $\omega = 50.0$,減衰比 0.007を用いた.縦軸は無次元速度 w_{or} ,横軸は無次元振幅wである.実験と理論解において,同様な模様がみられた.また,理論解より各振動モードごとのポアンカレ写像図を図6に示す.これより,領域 $C_{(1,1;1/2)}$ のカオス振動応答に主要な振動モードは(1,1),(1,2),(3,2),(3,1)の4モードであることが分かる.

4.4 最大リャプノフ指数 時間波形を用いて、最大 リャプノフ指数 λ_{max} を求めた.結果を図6に示す.実験の 縦軸は λ_{max} ,横軸は埋め込み次元 e である.理論の縦軸は リャプノフ次元 dL,横軸は自由度 Ic である.最大リャプ ノフ指数 λ_{max} は e = 8 で収束し、自由度4であることがわ かる.理論解でも同様に、自由度4で収束することがわかる. ここで得られた自由度の数4が、ポアンカレ写像より得られ た振動モードの数4と一致した.

5. 結言

面内に弾性支持された薄肉円筒シェルパネルのカオス振 動実験を行った.理論解析によるカオス応答の数値解と実 験結果との比較を行った.結果を以下に示す.

(1)円筒シェルの静的変形,ならびに線形固有振動数は曲率と面内弾性拘束の変化に極めて大きな変化を持つ.

(2)ポアンカレ写像図,最大リャプノフ指数より,最低次 モードの1/2次分数次調波共振近傍のカオス振動応答に含 まれる主要な振動モードの数は4程度である.



Fig. 2 Static deflection of the shell panel



Fig. 3 Freqency response curve of the shell panel



Fig. 4 Poincaré map of the chaotic response



Fig. 5 Poincaré map of the chaotic response, Analysis: Pd = 490, $\omega = 50.0$

damping ratio 0.007, $\theta = \pi/6$



Fig. 6 Maximum Lyapnov exponent related embedding dimension and Lyapnov dimension related *Ic*

参考文献

- Nagai, K. and Yamaguchi, T., High Pressure Technology, ASME, PVP- Vol, 297 (1995), 107-115.
- (2) Yamaguchi, T. and Nagai, K., Nonlinear Dynamics, **1** 3(1997), 259-277.
- (3) Yamaguchi, T.and Nagai, K., AMD-vol.-238, ASME 2000.