

(昭和 60 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

多層ベローズの応力解析

正員 大 坪 宏* 小 林 和 子**
田 代 佳 行*** 大 森 保***

Stress Analysis of Multilayer Bellouws

by Hiroshi Ohtsubo, *Member* Kazuko Kobayashi
Yoshiyuki Tashiro Tamotsu Ohmori

Summary

Expansion bellows are widely to absorb thermal expansion of tubes in pipeline system. Considering narrow piping space and small number of special positions where pipes are strongly fixed, the designing of pipelines for ship service requests the expansion bellow to have shorter effective length and smaller spring rate.

The accurate stress-strain analysis concerning the deformation of bellows is necessary in order to assure the safety of the pipeline system. However, the mechanical behaviour of multilayer bellows has not been sufficiently analysed.

Stress and strain applied to a monolayer bellow and a multilayer bellow during loading of axial deflection and internal pressure were experimentally measured with strain gage, and also calculated with the aid of elastic finite element method. The measurement and calculation were conducted with a 200 A-diameter bellow made of type 304 stainless steel.

In the course of the finite element analysis, the gap/friction elements were developed to model the inter-surface between each layer of the multilayer bellow. The friction coefficient was assumed to be 0 or 10000.

When axial deflection was applied to a monolayer bellow, it was found that the calculated results from the finite element method were in good accordance with the experimental results from actual measurement. In case of a multilayer bellow, the calculated results coincided well with the observed results when the friction coefficient was 0. It was noted that strain and stress generated in a multilayer bellow were much smaller than those in a monolayer bellow.

In case of internal pressure, the finite element results of a monolayer bellow fitted to the measured results. The measured values of stress and strain in a multilayer bellow were nearly equal to those in a monolayer bellow. Whereas the calculated values of stress and strain in a multilayer bellow with the friction coefficient of 0 were a little larger than the observed values. However, it was confirmed that the finite element method was more suitable for the stress analysis of multilayer bellows than the EJMA equation.

Multilayer bellows have an advantage over monolayer bellows with respect to endurance because smaller amount of stress is generated through loading, in the former than the latter.

1 緒 言

ベローズはおもに配管系の熱膨張の吸収を目的として、配管中に設置される。ベローズを使用することにより、配管レイアウトを簡素化し、構造物自体を小型化することができる。船舶関係の用途としては、エンジンの

過給機の出入口、排気マニホールド、重油などの燃料配管、スチーム配管があり、また、LNG 船であれば、LNG 配管のあらゆる場所に使用される。船舶内では、特に配管スペースが狭いこと、強固な固定点がとれないことから面間隔が短く、かつバネ反力の小さい伸縮継手が要求される。また、運転条件も苛酷になり高度の安全性も要求される。この要求に合致するのが今回開発された多層ベローズである。

配管、装置の安全性を保証するためには、ベローズの

* 川崎製鉄(株) 技術研究本部 鉄鋼研究所

** 川崎製鉄(株) 千葉製鉄所

*** トーフレ(株) 技術部

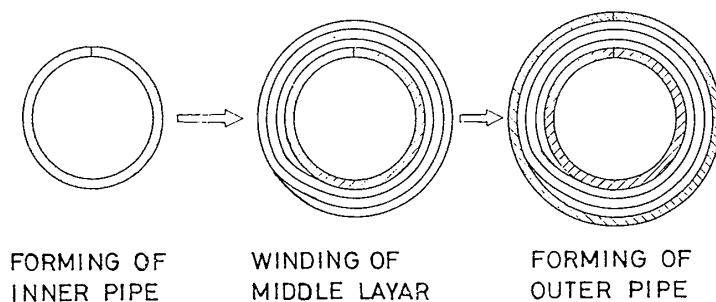


Fig.1 Manufacturing process of the newly multilayer bellows

挙動解析が十分行われていることが必要であり、単層ベローズに関しては、多くの研究がなされて来たり^{1),2)}。しかしながら、多層ベローズに関する理論的な解析結果の報告はきわめて少ない。

本報では、単層、多層ベローズにおいて、軸圧縮変位および内圧を付与したときに発生するひずみ、応力を実験的、および有限要素法により数値的に解析し、多層ベローズの有利性を検証した。

2 多層ベローズの製造工程

従来の製法による多層ベローズは、管の中に別の管を差し込み、その後波付加工を施すことにより製造される。しかしながら、管自身完全な真円でないため、各層間にすきまが生じ、そのため、いく重にも重ねていくことには限界がある。

今回開発された多層ベローズの製造工程の概略図を図1に示す。最内層の管を製管した後、その外側に板を張力下でうず巻き状に巻きつける。さらに最外層を製管する。したがって、各層間にすきまはなく何層でも製造可能である。

3 実験方法と計算方法

3.1 実験方法

実験に供したベローズの寸法は、単層、多層とも口径

200 A (外径 239.5 mm, 内径 203.0 mm), ピッチ 25 mm, 板厚 1.2 mm, 山高 18.0 mm であり、山数は5山である。また、多層ベローズの層数は4層である。材料は SUS 304 である。これらのベローズの山部、谷部、腹部の各位置にひずみゲージをはり付け、軸方向の圧縮変位、および内圧を付与したときの各位置のひずみ量を測定した。さらに、子午線方向ひずみ ε_m 、円周方向ひずみ ε_θ から、子午線「方向」応力 σ_m 、円周方向応力 σ_θ を、

$$\sigma_m = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot (\varepsilon_m + \nu \varepsilon_\theta) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_m) \quad (2)$$

より求めた。ヤング率 E は 20000 kg/mm^2 、ポアソン比 ν は 0.3 とした。

3.2 計算方法

外力を負荷したときに発生するひずみ、応力を有限要素法により数値解析した。使用したプログラムは MARC プログラムである。計算モデルを図2に示す。対象とする問題の対称性から、2.5 山の場合を計算した。図中 A 点はフランジに溶接で固定された位置に相当し、B 点は軸方向の中央部に対応する。また、軸対称問題として取り扱った。境界条件は、

(1) 軸圧縮変位

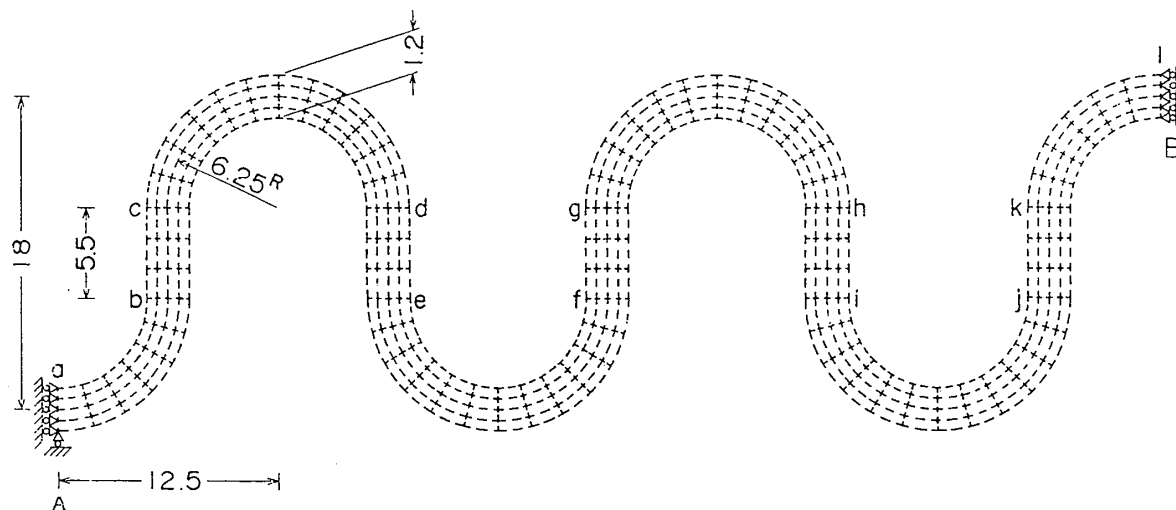


Fig.2 Finite element model

$$\left. \begin{array}{l} \text{A点: 軸方向変位}=d, \text{ 半径方向変位}=0 \\ \text{B点: 軸方向変位}=0, \text{ 半径方向変位}=自由 \\ \text{ベローズ内外面: 自由表面} \end{array} \right\} (3)$$

(2) 内圧

$$\left. \begin{array}{l} \text{A点: 軸方向変位}=0, \text{ 半径方向変位}=0 \\ \text{B点: 軸方向変位}=0, \text{ 半径方向変位}=自由 \\ \text{ベローズ内面: 内圧}=P \\ \text{ベローズ外面: 自由表面} \end{array} \right\} (4)$$

である。

弾性解析のみを行っており、材料定数は $E=20000 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.3$ とした。数値計算に用いた要素は8節点軸対称要素 (MARC 要素タイプ 28) であり、要素数は300、節点数は380である。

多層ベローズの応力解析を行う場合には、各層間ではすべりながら力の伝達が行われる。そこで、この点を考慮するため、各層間にギャップ/フリクション要素 (MARC 要素タイプ 12) を導入した。摩擦係数 $\mu=0$ と $\mu=10000$ の場合を計算した。 $\mu=0$ のときは接線方向の力 (摩擦力) は0である。各層は接触中自由に変位する。 $\mu=10000$ のときは、相対する節点間の相対すべり量は0となり、摩擦力の合力は接触面に垂直な力に摩擦係数を乗じたものよりも小という条件が満足されている。したがって単層の場合に類似し、異なるのは各層が離れるか接触されるかが考慮される点である。

4 実験結果と計算結果

4.1 軸圧縮変位

単層ベローズに軸方向の圧縮変位 (5 mm) を付与したときの外表面に発生する子午線方向のひずみの実測値と計算値を図3に示す。実測値と計算値は、傾向、絶対値とも良く一致していることがわかる。山部は正、谷部は負のひずみが発生し、腹部の中央で0となる。また山部、谷部の中心から 30° の位置に最大のひずみが発生

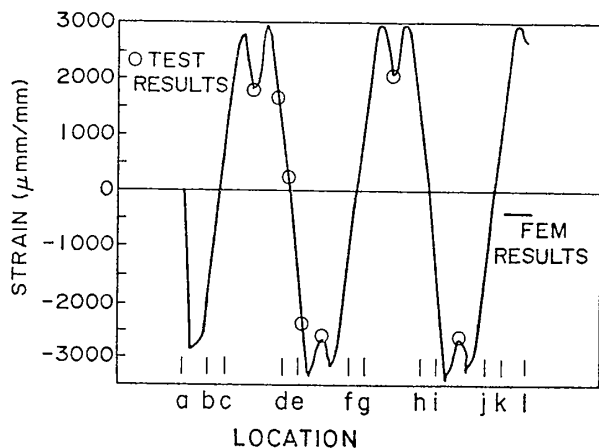


Fig. 3 Meridional strain of outer surface due to axial deflection (monolayer bellows, $d=5 \text{ mm}$)

する。単層ベローズに発生する子午線方向および円周方向の応力を図4に示す。実測値と計算値は良く一致し、計算値を見ると、子午線方向応力、円周方向応力とも山部で正、谷部で負、腹部で0となる。山部、谷部の中心で応力の絶対値は最大となり、ひずみ量が最大となる位置と 30° ずれている。

つぎに、多層ベローズに軸方向の圧縮変位 ($\alpha=5 \text{ mm}$) を付与したときの子午線方向のひずみの実測値と計算値を図5に示す。まず $\mu=10000$ の場合に注目すると、単層の場合と傾向、絶対値ともほぼ一致する。 $\mu=0$ の場合には、ひずみ量は $\mu=10000$ 、および単層に比べはるかに小さい。実測値は $\mu=0$ の結果と良く一致し、実験的にも数値解析的にも、多層の方が発生するひずみ量は小さいことがわかる。ひずみ分布の傾向は、単層と同様であり、山部で正、谷部で負、腹部中央で0となり、山部および谷部の中央から 30° の位置でひずみの絶対値は最大となる。子午線方向の応力分布を図6に示す。実測値は $\mu=0$ の結果と良く一致し、単層に比し、発生する応力ははるかに小さい。応力分布は単層と異なり、単層

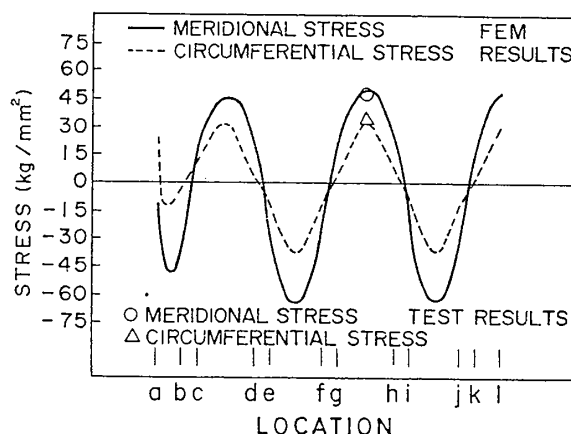


Fig. 4 Meridional stress and circumferential stress due to axial deflection (monolayer bellows, $d=5 \text{ mm}$)

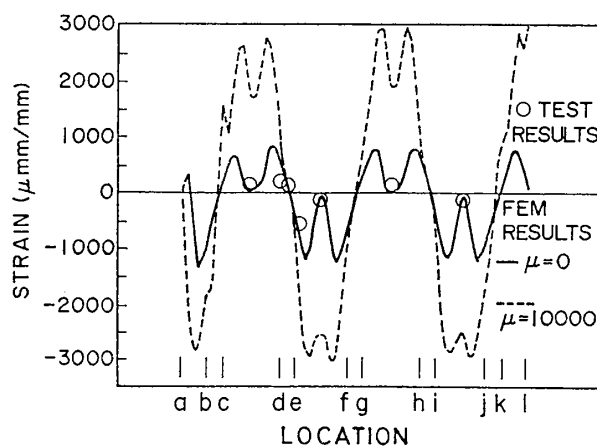


Fig. 5 Meridional strain of outer surface due to axial deflection (multilayer bellows, $d=5 \text{ mm}$)

の場合は山部、谷部で絶対値は最大となったが、極小値を示している。

4.2 内 圧

単層ベローズに内圧を負荷したときの子午線方向のひずみの実験値と計算値を図7に示す。実験値、計算値と

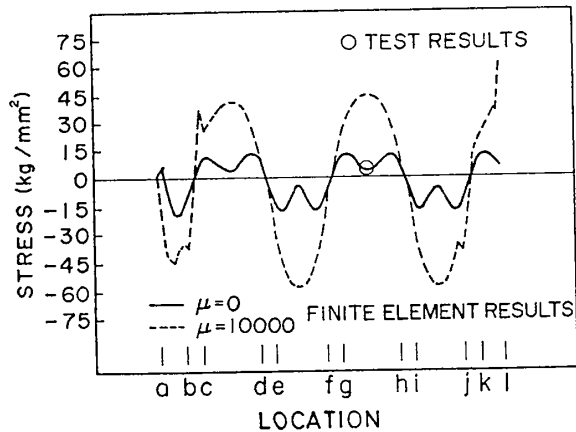


Fig. 6 Meridional stress of outer surface due to axial deflection (multilayer bellows, $d=5$ mm)

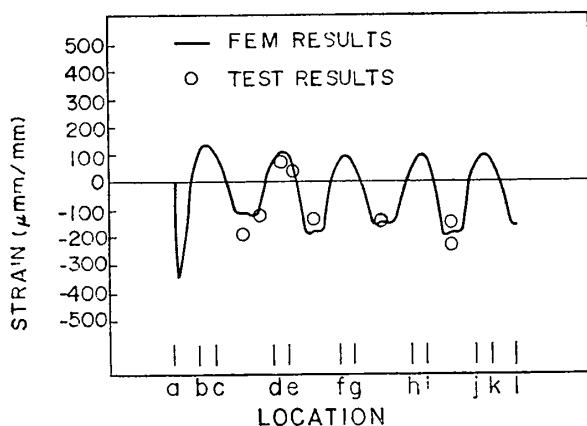


Fig. 7 Meridional strain of outer surface due to internal pressure (monolayer bellows, $p=5$ kg/cm²)

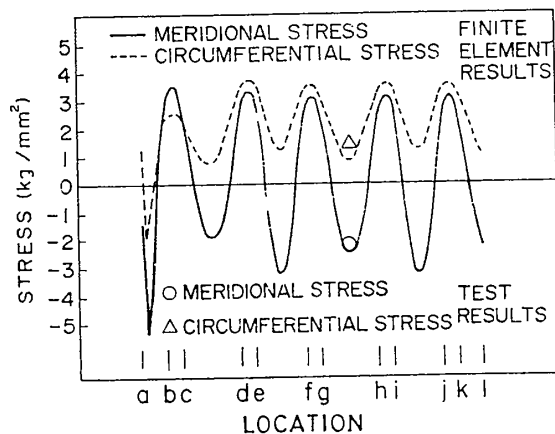


Fig. 8 Meridional stress and circumferential stress of outer surface due to internal pressure (monolayer bellows, $p=5$ kg/cm²)

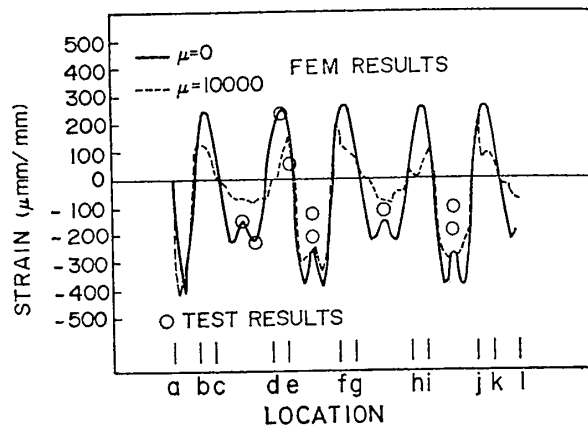


Fig. 9 Meridional strain of outer surface due to internal pressure (multilayer bellows, $p=5$ kg/cm²)

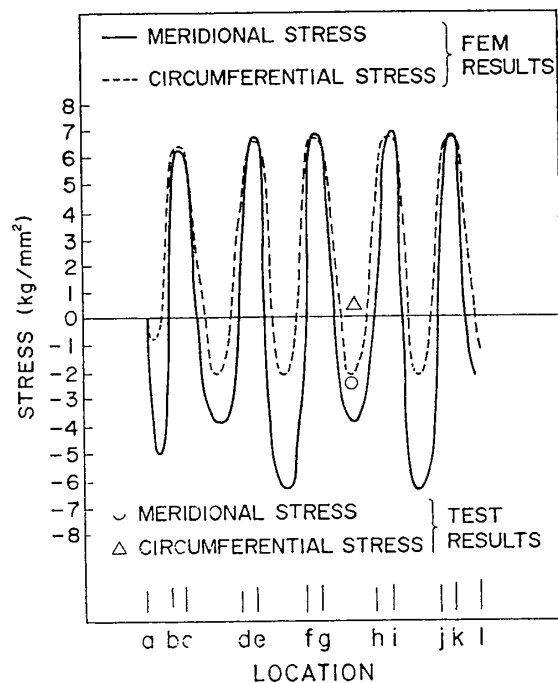


Fig. 10 Meridional stress and circumferential stress of outer surface due to internal pressure (multilayer bellows, $p=5$ kg/cm²)

も、山と谷には、負のひずみが発生し、腹の部分には正のひずみが発生する。傾向のみならず、絶対値もほぼ一致している。円周方向の応力と子午線方向の応力を図8に示す。計算値と実験値はほぼ等しい。

つぎに、多層ベローズに内圧を負荷したときの子午線方向のひずみの実験値と計算値を図9に示す。まず実験値に着目すると、山部および谷部は単層ベローズと同等である。腹部のひずみの絶対値は、山部、谷部と同じ位であり、単層ベローズより大きい。計算値に関しては、 $\mu=0$ の結果が谷部では、実験値より大きい、山部、腹部では実験値に近い。実験値、計算値とも単層に比べ多層の方が腹部のひずみ量が多いが、山部、谷部と同

程度の大きさであり、しかも内圧 5 kg/cm^2 で約 200μ であるので問題とはならない。軸圧縮変位のときには、 $\mu=10000$ としたときの計算値は単層の結果と類似していたが内圧のときには、単層の結果との差は大きい。この点に関しては、理由は明らかではない。

子午線方向の応力および円周方向の応力の実験値と計算値を図 10 に示す。計算値は $\mu=0$ のときのみを示している。子午線方向と応力に関しては、計算値の方が実測値より大きい値を示している。実測値は単層と同程度の大きさとなっている。一方円周方向の応力に関しては、計算値を見ると、山部、谷部で極小値を示す傾向は単層と類似しているが、山部、谷部とも負となっている。山部の実験値は、単層より絶対値で小さい値となっている。

5 考 察

単層および多層ベローズに外力が負荷されたときに発生するひずみ、応力を解析したが、多層ベローズに発生するひずみ、応力は、単層に比べ、軸圧縮変位を負荷したときにははるかに小さく、内圧を負荷したときには、実験的には同程度の大きさであり、数値解析的にもわずかに大きい程度であった。

しかしながら、EJMA (Expansion Joint Manufacturers Association) では、内圧を負荷したときに発生する子午線方向の曲げ応力を

$$S = \frac{P}{2n} \cdot \left(\frac{W}{t_p} \right)^2 \cdot c_p \quad (5)$$

S : 子午線方向曲げ応力 (psi)

P : 内圧 (psig), W : 山高 (in)

t_p : 一層の板厚 (in), c_p : 補正係数とし、

$$0.35 \cdot S \leq S_A \quad (6)$$

S_A : 材料の降伏応力

と規定している³⁾。(5)式によると、内圧を負荷したとき発生する子午線方向の曲げ応力は、層数に比例して大きくなる。

ここで、(5)式での計算値と、今回の実験値および計算値(絶対値)を比較してみると、単層の場合には、EJMA : 3.2 kg/mm^2 , 実験値 : 2.4 kg/mm^2 , FEM : 2.5 kg/mm^2 であり、多層の場合には、EJMA : 9.5 kg/mm^2 , 実験値 : 2.6 kg/mm^2 , FEM : 3.9 kg/mm^2 (山), 6.2 kg/mm^2 (谷)となる。EJMA の式は、単層ベローズでは、わりとあてはまるが、多層ベローズでは発生応力を大きく見積り過ぎ、問題が残る。

6 結 言

単層ベローズと多層ベローズに軸方向の圧縮変位および内圧を付与したときに発生するひずみ、応力を実験的に、および有限要素法により数値解析的に求めた。

軸圧縮変位を加えたときは、多層ベローズの方がはるかに発生応力が小さく、単層ベローズの約 10 分の 1 となっている。内圧を負荷したときには、発生応力は単層と同等である。ベローズの総合的な耐久性は、繰り返し寿命で評価されるが、発生応力が小さいと、疲労寿命は著しく向上し、この点で多層ベローズは有利である。

参 考 文 献

- 1) H. E. Mcloy etc : FATIGUE LIFE PREDICTION OF BELLOWS JOINTS AT ELEVATED TEMPERATURE, ASME, PVP-vol. 51, 1981.
- 2) C. Becht : STRESS ANALYSIS OF BELLOWS, ASME, PVP-vol. 51, 1981.
- 3) Standards of the Expansion joint Association, Section C, Issue 1, 47.