曲管の断面扁平量を用いた応力管理法

東京ガス㈱ 導管部 幹線メンテナンス技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ　正会員　○飯村 正一

1. はじめに

外力に対して管路を安全に維持管理するために、発生している応力を知ることは重要である。当然、管路は供用状態にあるから、非破壊診断が原則である。この観点から、ひずみゲージによる測定方法はほとんど用いることができない。そこで、ここでは外力によって生じた扁平量から理論的に応力を推定するという方法を実用性の観点から検討した結果を示す。曲管の理論解析法としては Karman が良く知られているが、本研究では Rodabaugh & George [1] の理論をベースに、これに若干の式の追加を行なったものを用いた。その結果、実用的には十分な精度で応力推定ができることが確かめられた。

2. 断面扁平量から応力を算出する方法

曲管に面内曲げ、面外曲げモーメントが作用したときの管軸、管周方向応力 σ_{iL}、σ_{iC}、σ_{oL}、σ_{oC} は、Rodabaugh & George によると、

$$\sigma_{iL}=\frac{k_p Mr}{I(1-\nu^2)}f_1(\phi)\ ,\ \sigma_{iC}=\frac{k_p Mr}{I(1-\nu^2)}f_2(\phi)\quad ,\ \sigma_{oL}=\frac{k_p Mr}{I(1-\nu^2)}f_3(\phi)\quad ,\ \sigma_{oC}=\frac{k_p Mr}{I(1-\nu^2)}f_4(\phi)\qquad (1)$$

と表わされる。ここで ϕ：管の周方向角度（図1参照）、ν：ポアソン比、R：曲管の曲率半径、r：管半径、t：管厚、I：管の断面2次モーメント、M：曲管の作用モーメントである。また、k_p はたわみ係数と呼ばれ、$\lambda=tR/r^2\sqrt{1-\nu^2}$ と置くと、λと内圧 P の関数である。1例として $f_1(\phi)$について具体的に記述すると、

$$f_1(\phi)=(1+\frac{3d_1}{2})\sin\phi+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\{d_n(1-2n)+d_{n+1}(2n+3)\}\sin(2n+1)\phi\pm\frac{\nu\lambda}{2}\sum_{n=1}^{\infty}d_n(2n-8n^3)\cos 2n\phi\qquad (2)$$

となる。d_n も k_p と同様λと内圧 P の関数となる。n を何次の項まで採れば良いかについては、λの値によって異なり、λが小さくなるほど高次の項まで必要となるが、λ=0.1 程度であれば 3 次までで十分とされている。そこで d_n は、

$\psi=PR^2/Ert$ ，$C1=5+6\lambda^2+24\psi$ ，$C2=17+600\lambda^2+480\psi$ ，$C3=37+7350\lambda^2+2520\psi$　と置くと、

$$d_1=\frac{(C2C3-110.25)}{6.25C3-C1(C2C3-110.25)}\ ,\ d_2=\frac{7.5C3}{6.25C3-C1(C2C3-110.25)}\ ,\ d_3=\frac{78.75}{6.25C3-C1(C2C3-110.25)}$$

と書くことができる。ここで、面内曲げ、面外曲げモメントが作用したときの半径方向の最大断面変形をそれぞれ、e_i ，e_o とし、理論における断面方向変位の式を展開し、モーメントMとの関係として求めると、

$$M_i=\frac{EIe_i}{k_p rR(2d_1+4d_2+6d_3)}\qquad (3)$$

$$M_o=\frac{EIe_o}{k_p rR(d_1-3d_3)}\qquad (4)$$

となる。面内曲げにおける断面の半径方向変位は図1において 0 °と 180 °を結ぶ方向が最も大きく、90 °と-90 °方向には符号が反対で、前者よりも小さな値となる。面外曲げにおける断面の半径方向変位は、0,90,180,-90 °において 0 となり、そこから 45 °ずれた位置で最大となる。したがって、面内および面外の両方向の曲げが作用した状態であっても 0 °と 180 °方向の扁平量 $2e_i$、45 °と-135 °方向の扁平量 $2e_o$ を測定すれば、(3)、(4)式によって外力であるM_i, M_o を算定することができ、

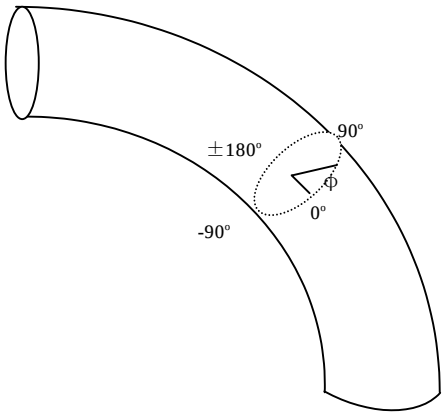

図1. 曲管の角度の定義

キーワード　曲管, 応力, 面内曲げ, 面外曲げ, Rodabaugh & George , 断面扁平

連絡先　〒105-8527　東京都港区海岸　1-5-20　ＴＥＬ03-5400-7542　E-mail:siimura@tokyo-gas.co.jp

M_i, M_oが得られれば、(1)式から断面の任意の位置での応力を計算することができる。

3. 実 験[2]

API-X60 規格の肉厚 12.7mm、φ610mm、曲率半径 1.5DR のモナカエルボ(λ=0.138)に袖管を溶接し、一方をフランジを介して定盤に取り付け、他方のフランジを油圧ジャッキで内曲げ、外曲げ方向に荷重を負荷した。

口径変化の測定位置はエルボの中央断面とし、ノギスを用いて2方向について測定した。また、中央断面付近には検証のための2軸ひずみゲージを15度ピッチで取り付けた。実験の概要を図2に示す。

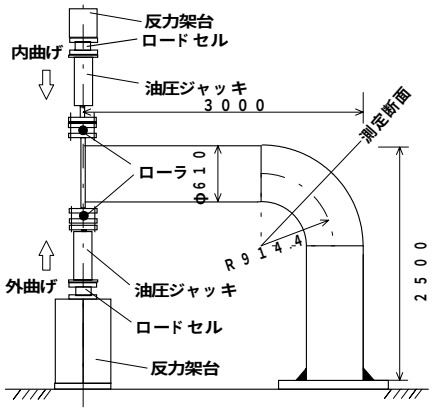

図2 実験の概要

4. 実験結果

図3にノギスによって測定された口径変化量とひずみゲージによって測定された最大応力(円周方向)との関係を示す。モナカエルボは 2 つ割のものを縦(管軸方向)に溶接して作られていることから、0-180方向の方が90--90方向よりも変形し易い。また、理論的にも前者の方が大きくなることから、純粋にシームの影響を分離することは難しい。当該材料の降伏応力は約 410MPa であるが、外曲げ方向(図3において応力が負の方向)についてみると、この値をはるかに超える範囲まで扁平量との直線性がみられる。

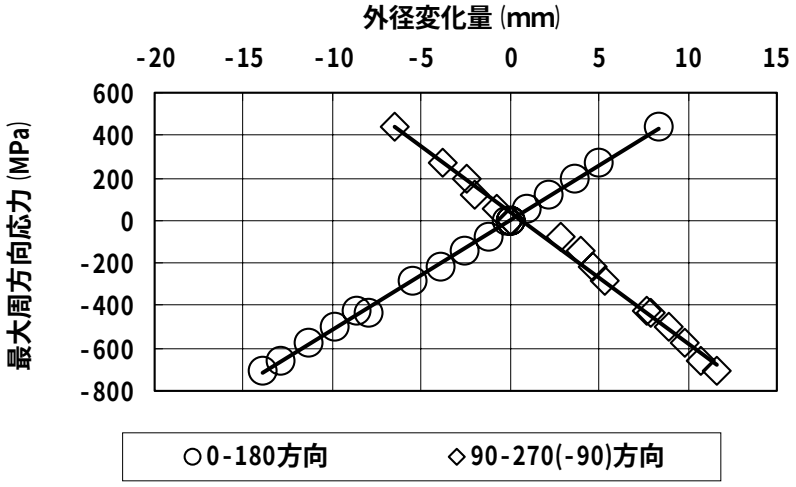

図3. 外径変化量と最大応力との関係

5. 解析との比較

図3の0-180°方向の扁平量の測定結果から、最大円周方向応力が400MPaにおける扁平量は外曲げ、内曲げともに約 8mm である。このときの断面変形を本提案手法によって計算した結果を図4に示す。また、外径変化(扁平)量を(2)式に代入し、M_iを求めるとM_i＝1.7×10^{5}N･m となる。このM_iを(1)式に代入し、応力分布を計算すると図5の実線が得られる。実験値と較べ軸方向応力については、ピーク位置は合っているものの、値には若干の乖離がみられる。円周方向応力はピーク位置にいくぶんずれがあるが最大値はほぼ一致している。以上より、ノギスで得られる程度の精度の扁平測定値であっても、本提案手法によれば、実用的に十分な精度の応力推定が可能であるといえる。

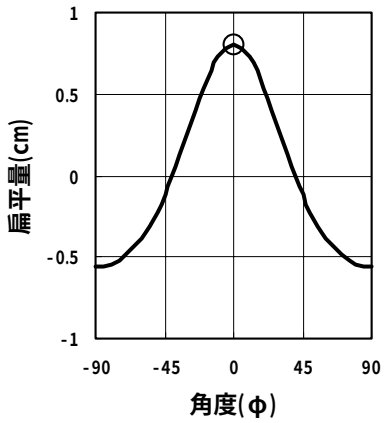

図4. 断面変形

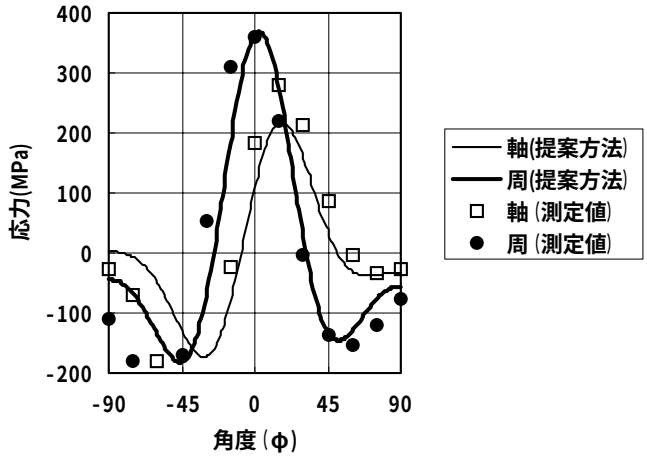

図5. 提案方法と測定値の応力比較

【参考文献】

[1] Rodabaugh,E.C.,and George,H.H., “Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress Intensification Factors of Curved Pipe or Welding Elbows,” Trans. ASME,Vol.79,1957,pp.939-948.

[2]飯村,境:磁歪応力測定法の曲管偏平応力評価への適用検討,第57回土木学会全国大会年次学術講演会,2002