

# 磁気異方性センサを用いた曲管の非破壊応力評価法について

Non-destructive method for the measurement of stress in bent pipes with magnetic anisotropy sensor

東京ガス(株) 正員 飯村正一 (Shoichi Iimura)

## 1. はじめに

維持管理の観点からパイプラインの安全性を評価するためには応力状態を知ることが必要である。構造物に対する応力測定では、ひずみゲージによる測定が一般的であるが、既設パイプラインの応力状態をひずみゲージを用いて測定するためには切断等の応力解放作業を伴った、いわゆる破壊検査でないと難しい。一方、供用下のパイプラインの多くはこのような破壊検査を行うことは不可能であり、自ずとその適用範囲は限られていた。このような背景からパイプラインの応力を非破壊的に、かつ簡便に測定・評価できる手法として、磁気異方性を利用した応力測定法(以下磁歪法とよぶ)に着目し、その利用技術を開発してきた。

曲管には製作時に発生した大きな応力が残留している。この状態で外力が加わると、測定された応力には沈下などの外力によって発生した応力の他に残留応力による応力が含まれていることになる。応力解放などの手段を検討する上で必要となるのは外力によって発生している応力の値である。そこで磁歪法で測定された値を、曲管に発生する応力について弾性論などを用いて導かれた理論式に回帰することで、外力によって発生する応力のみを分離できるか否かについて検討してきた。まず、面内曲げモーメントが作用するモナカエルボについての測定値を Karman による理論式に回帰する方法について検討し、良好な結果を得た<sup>[1]</sup>。引き続き高周波バンドについての検討を行い<sup>[2]</sup>、これら2種類の曲管についての検討結果を示した<sup>[3]</sup>。その後、面外曲げが作用したときの曲管の応力を分離する方法について検討した。面外曲げに対しては Rodabaugh & George<sup>[4]</sup>(以下「R & G」と略す)の理論式を用いた。これは、面内曲げに対して適用した Karman の理論は面内曲げについて表現したものであり、面外曲げに対しては適用対象外となるからである。実験はマンドレルエルボについて行った。面外曲げが作用したときの

外力による応力も、面内曲げの場合と同様の方法で精度良く測定できることを示した<sup>[5]</sup>。

以上のように、これまでの結果から面内曲げ、面外曲げが単独で作用した場合については、磁歪法の値を曲管の扁平応力理論式に回帰することで、外力による応力と製作時の残留応力とを実用的には十分な精度で分離できることが示された。本報では面内および面外曲げ荷重が同時に作用した場合について検討した結果を示す。対象とした曲管は第3報<sup>[5]</sup>で用いたものと同じ製法で作られたマンドレルエルボである。

## 2. 磁歪法による応力測定の原理

磁歪法では図1に示すような磁歪センサを測定対象物上において測定する。被測定物の透磁率とよばれる磁気的な性質は引張応力方向に僅かに大きくなり、磁気的な異方性が生じる。このとき、コアEに巻いたコイルに電流を流すと、センサの足E<sub>1</sub>から出た磁束のうち大部分は最短距離で直接E<sub>2</sub>へ向かうが、E<sub>1</sub>D<sub>1</sub>間及びD<sub>2</sub>E<sub>2</sub>間はE<sub>1</sub>D<sub>2</sub>間及びD<sub>1</sub>E<sub>2</sub>間に比べて透磁率が $\mu_x - \mu_y$ だけ大きいために、一部は矢印の様にコアDの中を流れる。以上の磁気回路を交流磁界で形成すると、コアDに巻いたコイルには誘導電流が流れ、(1)式で表されるような電圧が生じることになり、比例定数Kを知ることによってこの電圧から応力を求めることが可能となる。

$$\begin{aligned} V &= K_o \cdot (\mu_x - \mu_y) \\ &= K \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $K_o, K$ : 励磁条件、材料磁気特性等で決まる定数

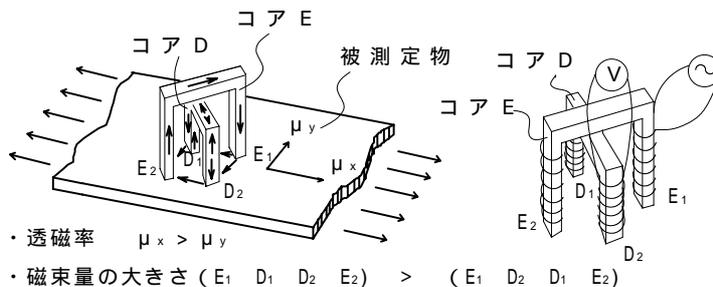


図-1 磁歪センサの動作原理

3. Rodabaugh & George による曲管の扁平応力理論とデータ処理方法

曲管には面内および面外曲げモーメント( $M_o$ )が作用しているものと仮定する。このときの管軸、管周方向応力  $\sigma_{il}$ ,  $\sigma_{ic}$ ,  $\sigma_{ol}$ ,  $\sigma_{oc}$  は、R & G によると、

$$\begin{aligned} \sigma_{il} &= \frac{k_p M_i r}{I(1-\nu^2)} f_1(\phi) \\ \sigma_{ic} &= \frac{k_p M_i r}{I(1-\nu^2)} f_2(\phi) \\ \sigma_{ol} &= \frac{k_p M_o r}{I(1-\nu^2)} f_3(\phi) \\ \sigma_{oc} &= \frac{k_p M_o r}{I(1-\nu^2)} f_4(\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

と表わされる。ここで  $\phi$ : 管の周方向角度、 $\nu$ : 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、 $M_i, M_o$ : 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、 $f_1(\phi)$  と内圧  $P$  の関数である。 $f_1(\phi)$ ,  $f_2(\phi)$ ,  $f_3(\phi)$ ,  $f_4(\phi)$  について具体的に記述すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} f_1(\phi) &= (1 + \frac{3m_1}{2}) \sin \phi + \\ &\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \sin(2n+1)\phi \\ &\pm \frac{\nu\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(2n-8n^3) \cos 2n\phi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_2(\phi) &= \nu(1 + \frac{3m_1}{2}) \sin \phi + \\ &\frac{\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \sin(2n+1)\phi \\ &\pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(2n-8n^3) \cos 2n\phi \end{aligned} \quad (4)$$

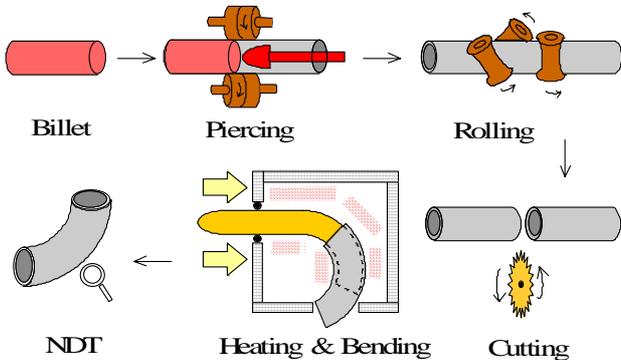


図-2 マンドレルエルボの作り方

$$\begin{aligned} f_3(\phi) &= (1 + \frac{3m_1}{2}) \cos \phi + \\ &\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\phi \\ &\pm \frac{\nu\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(-2n+8n^3) \sin 2n\phi \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f_4(\phi) &= \nu(1 + \frac{3m_1}{2}) \cos \phi + \\ &\frac{\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\phi \\ &\pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(-2n+8n^3) \sin 2n\phi \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $m_n$  も  $k_p$  と同様  $P$  の関数となる。 $n$  を何次の項まで取れば良いかについては、 $\lambda > 0.1$  であれば3次までで十分とされている。

次にモーメントによって扁平応力が発生している曲管部の表面を磁歪法で測定し、測定結果を統計処理し、(2)~(6)式に回帰する。ここで、磁歪法によって測定される応力は直交2方向の差、すなわち  $\sigma_{il} - \sigma_{ic}$  であるが、回帰を行うと未定係数であるモーメントが確定されるので、結果として円周方向および軸方向の応力に分離することができる。

4. 実験方法

JIS-PT370sch40 規格の肉厚 10.3mm、呼び径 300A、曲率半径 1.5 DR (45.72cm) のマンドレルエルボ(  $\nu=0.22$ )に袖管を溶接したものを供試体とした。図-2にマンドレルエルボの製作方法の模式図を示す。一方の袖管の端部には荷重を負荷し易くするためのフランジ板を溶接した。もう一方のフランジ板は供試体を鉛直面から30度傾斜させて床に固定するために袖管とは傾けて溶接により取り付けた。荷重は図-3に示すようにフランジ板に油圧ジャッキを鉛直上下方向に押し当てて与えた。これにより、曲管には面内および面外曲げ荷重を負荷した。

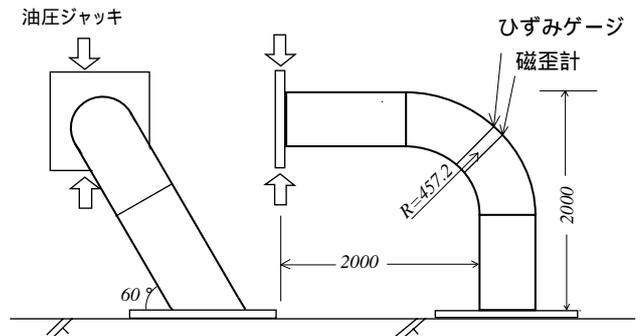


図-3 荷重負荷方法

中央断面付近には検証のための2軸ひずみゲージを15度ピッチで全周に取り付け、直近において円周方向に5度ピッチで磁歪測定を行った。

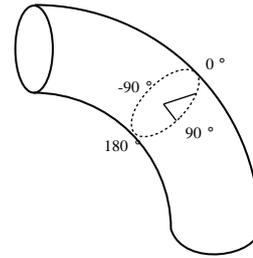


図-5 曲管の角度の定義

## 5. 実験結果と考察

### (1) 製作時残留応力の分離

図-4にジャッキの荷重が無負荷のときの磁歪法による測定結果を示す。同図の角度は図-5に示すように定義した。図-4の実線はR & Gによる理論式に回帰を行って得られた曲線を示す。左図が面内曲げの理論式への回帰、右図が面外曲げの理論式への回帰を示す。製作時に発生した $\pm 100$  MPaに達する応力が残留しているマンドレルエルボであるが、理論式に回帰することによって、実用的には無視できる程度の大きさまで残留応力が低減できることが示されている。これは、残留応力の位相と外力によって発生する応力の位相がずれていることによる効果であり、残留応力を分離するためのフィルターとして理論が有効であることを示している。また、フィルター効果は面内曲げに対するよりも面外曲げに対する方が高いことがみられる。

### (2) 外力による応力の分離結果

図-6にジャッキの押し下げ荷重25 kNのときのひずみゲージによって測定された応力の直交2方向の差(軸方向応力-円周方向応力)および磁歪法で測定された応力(主応力差)をR & Gによる面内曲げの理論式に回帰して得られた曲線を実線および破線で示す。丸印はひずみゲージによって測定された応力を示す。最大応力は円周方向に発生している。ひずみゲージの値の回帰曲線と磁歪法の値の回帰曲線はほぼ一致していることから、磁歪法による測定値に含まれている曲管製作時の残留応力はほぼ消去され、面内曲げ外力による応力のみが抽出されているとみなされる。

図-7は図-6と同様にひずみゲージによる応力と磁歪法による応力をR & Gの理論式に回帰した結果を示す。ただし、図-6では面内曲げの理論式に回帰した結果であるが、図-7は面外曲げの理論式に回帰した結果を示す。

図-8は、図-6で得られた回帰曲線と図-7で得られた回帰

曲線を、軸方向および円周方向についてそれぞれ重ね合わせた結果を示す。ひずみゲージによる応力の回帰線と磁歪法による応力の回帰線は極めて良い一致がみられる。

図-6～8について、ひずみゲージによる測定値と回帰曲線との比較を行うと、図-8の回帰曲線が最もひずみゲージの値に近いことが分かる。このことは、面内曲げと面外曲げを同時に受ける曲管に発生している外力による応力の測定が可能であることを示している。

## 6. おわりに

曲管は応力低減を目的として3次元構造の配管ユニットとして用いられることが2次元構造で用いられることよりも多い。これは3次元の方が2次元よりも応力低減効果が大きいことによる。したがって、3次元構造の配管に沈下などの外力が作用すると、曲管には面内曲げの成分と面外曲げの成分が発生することとなる。このような応力状態にある曲管であっても、磁歪法による測定値を面内曲げによる応力状態を表現する理論式と面外曲げによる応力状態を表現する理論式に独立に回帰し、それぞれの回帰で得られた曲線を加算することによって、実用的には十分な精度での応力測定が可能であるといえる。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたりましては JFE エンジニアリング株式会社殿に協力いただいたことを記すとともに、担当の同社研究員、境 禎明氏に感謝の意を表します。

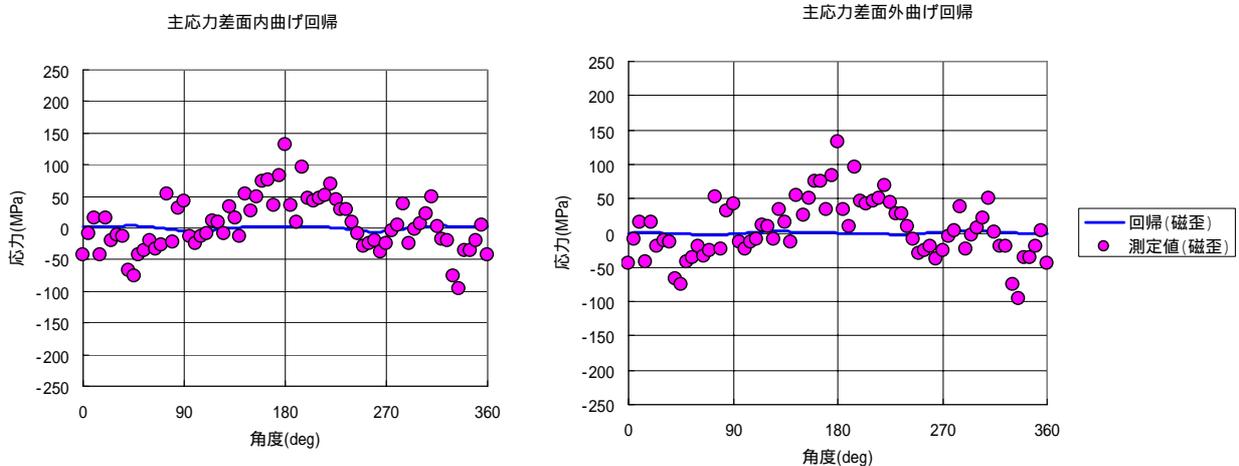


図-4 無負荷時の磁歪測定値のR & G式回帰

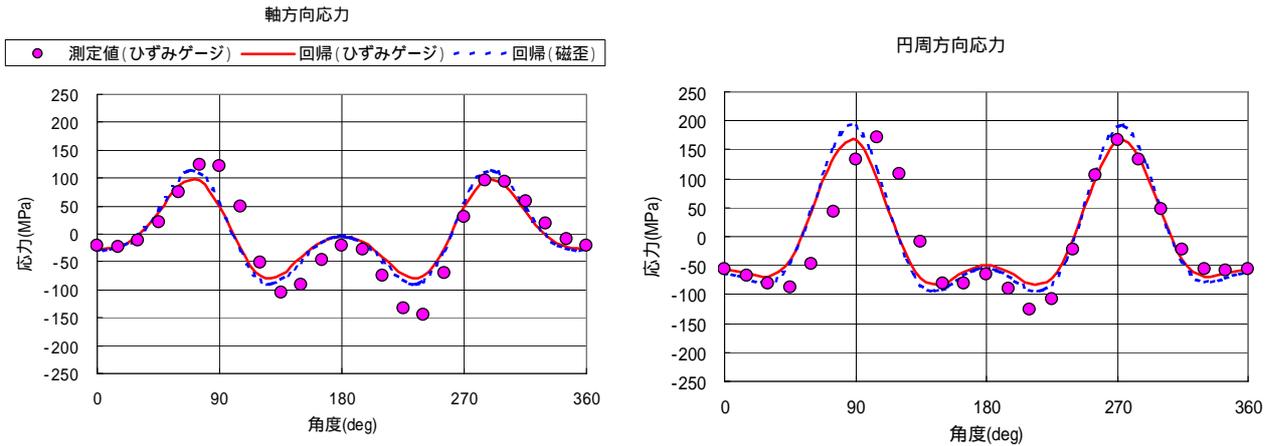


図-6 測定値の面内曲げ理論式への回帰結果

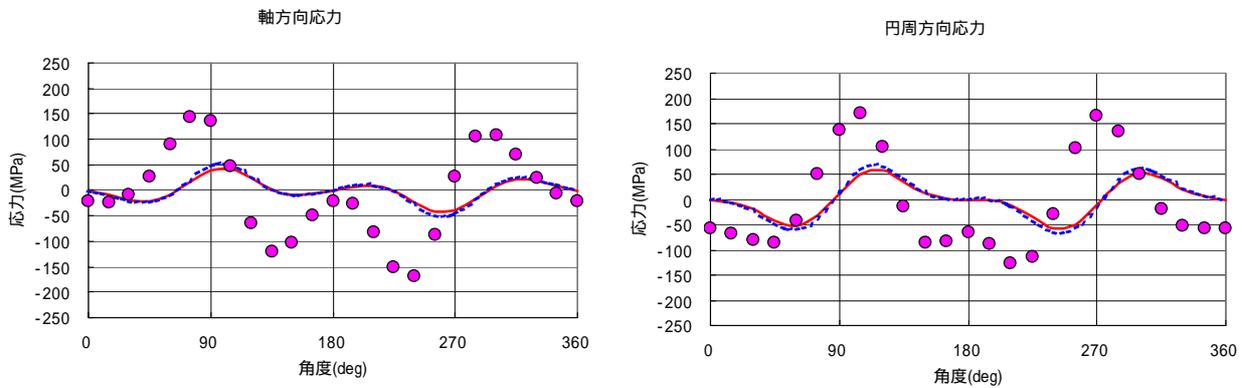


図-7 測定値の面外曲げ理論式への回帰結果

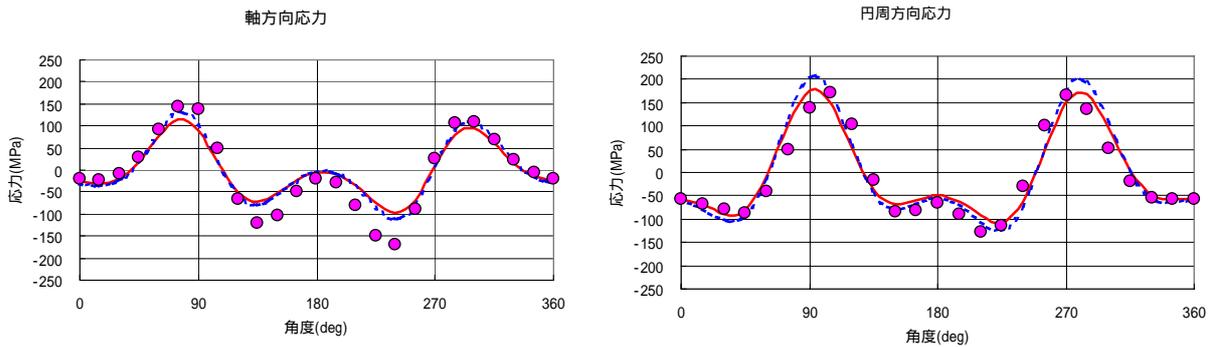


図-8 測定値の面内曲げ理論式への回帰曲線と面外曲げ理論式への回帰曲線の加算結果

参考文献

- 1) 飯村正一, 境 禎明: 磁歪応力測定法の曲管扁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講演概要集, 第 部門, pp.477-478, 2002.
- 2) 飯村正一, 境 禎明: 磁歪応力測定法の曲管扁平応力評価への適用検討(第2報), 第 58 回土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集, 第 部門, pp.687-688, 2003.
- 3) S. Imura, Y. Sakai: Non-destructive method for the measurement of stress in bent pipes, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Greece, pp.219-224, 2003.
- 4) Rodabaugh, E.C., and George, H.H., Trans. ASME, Vol.79, 1957, pp.939-948.
- 5) 飯村正一, 境 禎明: 磁歪応力測定法の曲管扁平応力評価への適用検討(第3報), 第 59 回土木学会全国大会年次学術講演会講演概要集, 第 部門, pp.205-206, 2004