



磁気異方性センサを用いた曲管の発災後残留応力の非破壊診断

飯村正一

東京ガス株式会社、上級主幹 博(工)

e-mail: siimura@Tokyo-gas.co.jp

要 約

磁歪技術を応用し地震によって発生した応力が曲管部に残留しているか否かを、非破壊で診断するための手法を開発した。この方法によれば主応力差の全応力が測定される。曲管には製造時に発生した大きな応力が残留していることから、測定値から残留応力を分離するために、Rodabaugh と George による曲管の応力計算理論式に測定値を回帰することを試みた。その結果、外力によって発生した応力のみを軸方向と円周方向に分けて精度良く取り出すことができた。開発された手法による診断可能な上限応力値は降伏応力の 55%程度であり、大きな残留応力の存在のために同じ材質の直管に適用した場合に比べ上限応力値が低いことから、地震によって発生した応力が残留しているか否かの一次判断手法として用いることを提案した。

キーワード：磁気異方性センサ、曲管、残留応力、非破壊診断

1. はじめに

地震後パイプラインに発生した被害の程度を点検する際に、残留している応力の大きさが弾性範囲内程度に留まっていると、目視での応力の有無の判断には困難を伴うことが予測される。結果的に影響無しとした中に分類されることは間違い無い。発災後間もない期間であれば、パイプラインからの漏洩の有無での判断が第一の優先事項となるであろうから仕方がないところであるが、復旧が一段落した時点における点検では、発災直後の点検において外観上健全と判断された箇所であっても、地盤変動によって弾性限度程度の応力が残留している可能性があることも念頭においた、慎重なる調査が求められることも考えられる。

地震によって発生した応力が顕著に残留する箇所としては曲管部が考えられる。曲管を含む配管系では、地盤変動によって直管部に発生した軸力により地盤との間で滑りが発生し、その結果直管部でのひずみが低減し、そのしわ寄せとして曲管部には大きなひずみが発生することが考えられる。曲管が曲げを受けると、同じ大きさの曲げモーメントを直管に与えた場合に較べ、発生する応力のはるかに大きくなる。これは曲げを受けると、曲管断面は大きく扁平することに起因する。著者らは、曲管を含む管路が地盤沈下を受けた場合に、曲管に発生する外力による応力を非破壊で診断する技術として、2つの手法について実用的な観点からの検討を行ってきた。ひとつは曲管が曲げを受けた場合に曲管断面中央部に発生する断面扁平量を測定して解析的に応力を推定する方法である^{1)、2)}。もうひとつは、磁気異方性センサを用いる方法(以下当該手法を磁歪法、用いる計器を磁歪計と略す)^{2)、3)}である。なお、曲管の応力診断に適用可能と思われる方法としては、筆者が提案する方法以外に、ひずみゲージを用いる方法、X線法、音弾性法、バルクハウゼンノイズ法などが挙げられるが、実験室では無く実現場で適用可能であること(X線法が外れる)、非破壊診断が可能であること(ひずみゲージ法、X線法が外れる)、作業安全性に問題が無いこと(X線法が外れる)、迅速且つ信頼性のある診断結果が得られること(X線法、音弾性法、バルクハウゼンノイズ法が外れる)と条件を全て満足する方法はこれらの中には見当たらない。

筆者が提案する扁平法は、もうひとつの方法である磁歪法に較べて高い応力域までの診断が可能であるものの、地震前の断面寸法(外径)の情報が不可欠となる。磁歪法は地震前の情報は必要とせず、地震後の測定値のみから地震等の外力によって発生した応力を診断することができる。反面診断可能な応力の上限は扁平法に較べて低くなる。それぞれ得失があるものの地震によって発生した応力が地震後に残留しているか否かの第一次判断に用いる手法としては磁歪法の方が目的に合致すると判断される。なお、第2章の磁歪法による測定原理に示すように、磁歪計によって測定されるのは主応力差(直交2方向の差)となる。曲管にはその製造時に発生した100MPaを超える大きな主応力差が残留している^{2)、3)}。また、磁歪計による測定では全応力(製造時残留応力と地震によって発生した応力の合計値)が測定される。したがって、単純に測定された値全てが地震によって発生した応力であるとの判断は適当ではない。そこで、本報ではまず曲管製造時に発生した残留応力のパターンを調べた。その結果、磁歪法による主応力差の測定値から、曲管製造時に発生した残留応力を分離し、地震等の外力によって発生し、発災後も残留している軸方向応力と円周方向応力とを、非破壊で診断する方法を見出した。なお、この手法については前述のように既に提案を行っている^{2)、3)}が、既往の報告では磁歪法とひずみゲージによる測定結果の乖離の原因についてはその理由を明確に示すことができていなかった。そこで本論文では、この乖離の原因を明らかにするとともに、磁歪法では応力が降伏値以下で感度低下が発生することを述べ、磁歪法の適用限界について示す。

2. 磁歪法による応力測定の原理

磁歪式応力測定法は、強磁性体が磁化されたり応力がかけられたりすると、引張応力方向には磁化

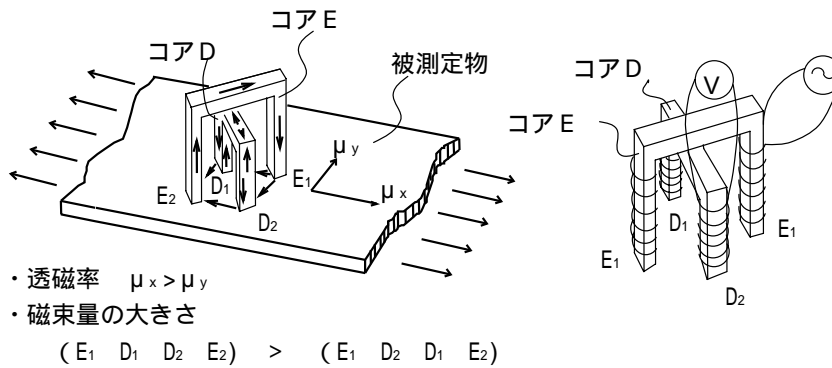


図 1 磁歪法による応力測定の実理

し易く、その直角方向には磁化し難いということに着目し、互いに垂直な二方向の磁氣的性質の差を検出することで、その部位にかかっている応力を測定する方法である。

図 1 に示すような磁気異方性センサを測定対象物上に置く。測定対象物の透磁率 μ は引張応力方向に僅かに大きくなる。これを図に示すような回路を構成し、コア D に巻いたコイルに流れる誘導電流による電圧 V として検出すると、

$$\begin{aligned} V &= K_0 \cdot (\mu_x - \mu_y) \\ &= K \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。すなわち、電圧 V は透磁率の直交 2 方向の差 $\mu_x - \mu_y$ と比例する関係となり、同時に直交 2 方向の応力差 $\sigma_x - \sigma_y$ とも比例関係となる。したがって、式(1)の関係から、磁歪法で測定される応力は主応力差となる。ただし、 K_0 、 K は励磁条件、材料磁気特性などで決まる定数である。

この方法では各種応力履歴による内部残留応力や死荷重応力などの主応力差の全応力が測定できることになる。この技術を利用し、真直ぐな鋼管が曲げ変形すると管軸方向と管周方向での透磁率に差が出ることから、この差を電圧として取り出し応力を測定するコンパクトな装置が開発されている⁴⁾。本研究では、この装置を用いた応用研究を行うものである。この装置で用いられるセンサは先端が平らで直径が約 25mm 程の大きさのものである。測定する場合には、被測定物にセンサを 10mm 以内程度まで近付ける必要がある。ただし、ひずみゲージや X 線法のように被測定物の表面を研磨する必要は無く、表面が比較的平らである（被測定物の表面からセンサ先端までの距離をほぼ一定に保つことができる）ならば必ずしも接触させる必要は無い。この方法の特徴は、精度、可搬性に優れ、計測時間も短く、塗覆装の上から測定できるなど非破壊性の面からも優れている。しかし、材料によって特性が異なることから材料毎の較正曲線を求めておくことが必要となる。



図2 曲管の曲げ方向と角度

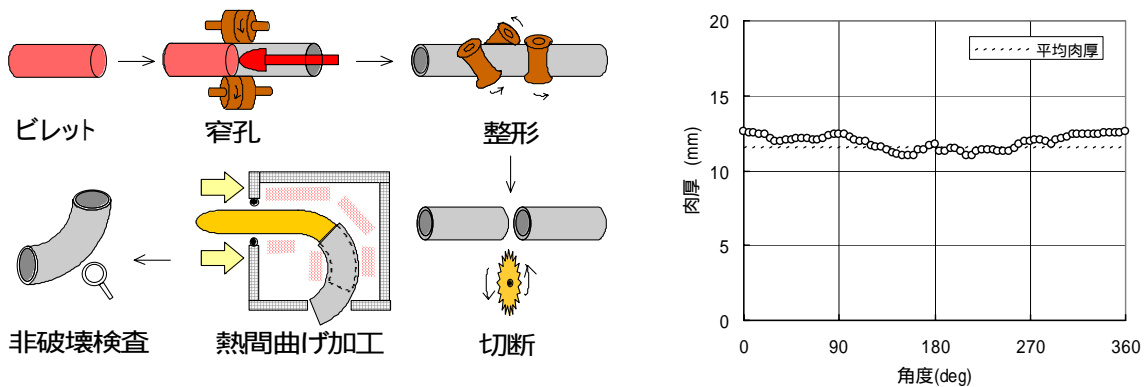


図3 マンドレルエルボの作り方と肉厚分布

3. 地震外力によって曲管部に残留した応力の診断

3.1 曲管に残留する製造時応力の分離

図2左図に曲管の曲げ方向の定義を示す。曲げ方向としては面内曲げと面外曲げに区別され、面内曲げについてはさらに(a)の内曲げと(b)の外曲げに区別される。面外曲げについては外曲げと内曲げの区別はない。曲管は、通常三次元配管を構成する配管要素として用いられる。したがって、曲管に接続されている直管部に軸力などが作用すると、曲管部には面内曲げと面外曲げが同時に作用することとなる。

(1) マンドレルエルボの製造方法と製造時残留応力

曲管の製造法は、モナカエルボ、高周波バンド、マンドレルエルボの3つに大別される。この中で、モナカエルボ、高周波バンドの製造時残留応力については、面内曲げが単独で作用した時の磁歪法を用いた応力診断法の検討で既に報告している³⁾。本研究では、面内曲げおよび面外曲げが同時に作用したときの応力診断法を検討することを目的としていることから、試験の容易さを考慮し、比較的口径の小さいマンドレルエルボを用いることとした。具体的には呼び径300mm、曲率半径1.5D(457.2mm)、

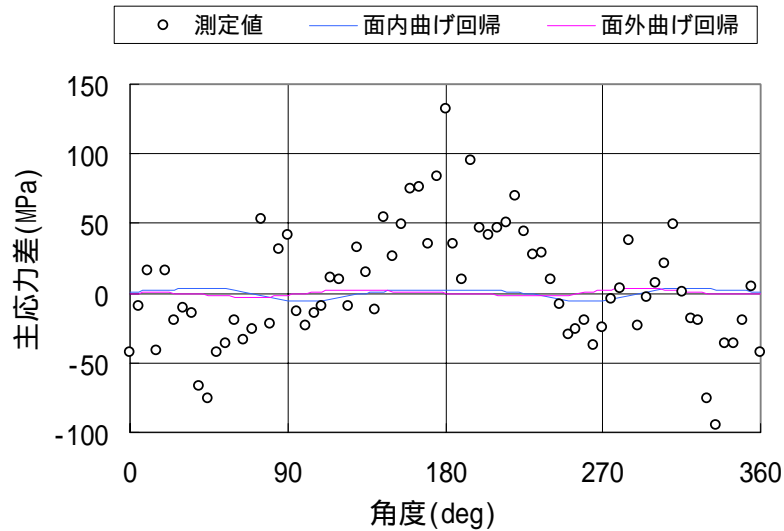


図4 マンドレルエルボの残留応力

開き角度(図2の α) 90° のものを試験に供した。マンドレルエルボの作り方を図3左図に示す。中実丸棒の中をくり抜いてシームレス鋼管を作り、炉の中で加熱して軟らかくした状態でマンドレルという曲がった心金の中に挿入し曲管にするという方法で作られる。図3右図に中央断面における肉厚分布を示す。この供試体の公称厚さ(JISの規格値)は10.3mmであるが実測値の平均は11.6mm、最小は10.48mmであり、最小値も公称値を上回っている。この曲管はパイプを曲げて作られるが、高周波バンド(パイプを高温で軟らかくした状態で曲げて作られる)などでみられる背中部で薄く、腹部で厚いという特徴は見られない。むしろ、背中側で厚く、腹側で薄いという通常の逆の肉厚分布を示しており、この曲管の特殊な加工方法がこの肉厚分布からも窺われる。

図4に磁歪法を用いて、中央断面(図2の $\beta=45^\circ$ の断面)において、曲管単体を床置きした状態で測定した主応力差の値を印で示す。測定は円周方向に 5° ピッチで行った。図より、マンドレルエルボの外表面には曲管製造時に発生した最大130MPaに達する主応力差が残留していることが見られる。このエルボのミルシートから読み取れる実際の降伏応力は350MPaであるから、製造時の残留主応力差は降伏応力のほぼ40%に達していることになる。

本報の第一の目的は発災後、重要パイプラインの曲管部に、応力が残留しているか否かを非破壊で診断する手法を提供することにある。なお、磁歪法による測定では全応力(製造時残留応力+地震によって発生し残留した応力)が測定されてしまうこととなる。しかしながら、曲管には降伏応力の40%程度の製造時(但し主応力差としての)応力が残留していることから、生データがそのまま地震に起因しての応力(外力によって発生した応力)とはならない。地震などの外力によって発生した応力を

診断するためには、測定値から製造時残留応力を分離する必要がある。そこで、曲管に曲げモーメントが作用したときに、発生する応力を計算する理論に着目する。

(2) 曲管の曲げ変形解析

曲管に面内曲げが作用したときの挙動を、初めて理論的に示したのは Von Karman⁵⁾である。その後、Vigness⁶⁾が Karman の理論の面外曲げへの拡張を行った。Rodabaugh と George⁷⁾ (以下 R&G と略す) は Karman と Vigness の理論に内圧の効果を加えた。この理論に至って初めて内圧作用下での面内および面外曲げを扱えることになる。このような理由から本研究では、R&G による理論を援用することとした。曲管に曲げモーメント M が作用したときに曲管外表面、あるいは内表面に発生する応力を管軸方向応力 σ_l と管周方向の応力 σ_c に分けて考える。曲管に作用する曲げモーメントとしては面内曲げモーメント (M_i) と面外曲げモーメント (M_o) に区別する。面内曲げモーメントが作用したときの管軸方向の応力を σ_{il} 、管周方向の応力を σ_{ic} 、面外曲げモーメントが作用したときの管軸方向の応力を σ_{ol} 、管周方向応力を σ_{oc} と表わすと、R&G 理論では、

$$\sigma_{il} = \frac{k_p M_i R}{I(1-\nu^2)} \left[\left(1 + \frac{3m_1}{2}\right) \sin \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \sin(2n+1)\phi \right. \\ \left. \pm \frac{\nu\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(2n-8n^3) \cos 2n\phi \right] \quad (2a)$$

$$\sigma_{ic} = \frac{k_p M_i R}{I(1-\nu^2)} \left[\nu \left(1 + \frac{3m_1}{2}\right) \sin \phi + \frac{\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \sin(2n+1)\phi \right. \\ \left. \pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(2n-8n^3) \cos 2n\phi \right] \quad (2b)$$

$$\sigma_{ol} = \frac{k_p M_o R}{I(1-\nu^2)} \left[\left(1 + \frac{3m_1}{2}\right) \cos \phi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\phi \right. \\ \left. \pm \frac{\nu\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(-2n+8n^3) \sin 2n\phi \right] \quad (2c)$$

$$\sigma_{oc} = \frac{k_p M_o R}{I(1-\nu^2)} \left[\nu \left(1 + \frac{3m_1}{2}\right) \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{m_n(1-2n) + m_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\phi \right. \\ \left. \pm \frac{\lambda}{2} \sum_{n=1}^{\infty} m_n(-2n+8n^3) \sin 2n\phi \right] \quad (2d)$$

と表わされる。ここで k_p はたわみ係数と呼ばれ、弾性論で計算される撓みと梁理論で計算される撓みの比であり式(7)となる。また、 ϕ : 管の円周方向角度 (図2参照)、 ν : ポアソン比、 r : 管半径、 I : 管の断面2次モーメント、 R : 曲管の曲率半径である。

式(2)は級数で表されているので、適用にあたっては n を何次まで取れば良いかを定める必要がある。R&G は、計算誤差を10%内に抑えるためには、パイプ係数 λ を

$$\lambda = tR / (r^2 \sqrt{1 - \nu^2}) \quad (3)$$

とした場合に、 $\lambda > 0.1$ の曲管（本研究で用いた供試体の λ は 0.22）であれば、3 次までで十分としている。そこで、 $n=3$ として m_1 、 m_2 、 m_3 を求めると式(4)となる。なお式(3)における t は管厚を示す。

$$m_1 = \frac{3(C_2 C_3 - 110.25)}{6.25 C_3 - C_1 (C_2 C_3 - 110.25)} \quad (4a)$$

$$m_2 = \frac{7.5 C_3}{6.25 C_3 - C_1 (C_2 C_3 - 110.25)} \quad (4b)$$

$$m_3 = \frac{78.75}{6.25 C_3 - C_1 (C_2 C_3 - 110.25)} \quad (4c)$$

ただし、 C_1, C_2, C_3 は式(5)である。

$$C_1 = 5 + 6\lambda^2 + 24\psi \quad (5a)$$

$$C_2 = 17 + 600\lambda^2 + 480\psi \quad (5b)$$

$$C_3 = 37 + 7350\lambda^2 + 2520\psi \quad (5c)$$

また、 ψ は内圧 P に関するパラメータでヤング率を E とすると式(6)である。

$$\psi = PR^2 / Ert \quad (6)$$

一方、たわみ係数 k_p は式(7)となる。

$$k_p = \frac{1}{C_4 + C_5 + C_6 + C_7} \quad (7)$$

ただし、 C_4, C_5, C_6, C_7 は式(8)である。

$$C_4 = 1 + 3m_1 + 2.25m_1^2 \quad (8a)$$

$$C_5 = 0.25(m_1^2 + 34m_2^2 + 74m_3^2 - 10m_1m_2 - 42m_2m_3) \quad (8b)$$

$$C_6 = \frac{\lambda^2}{12}(36m_1^2 + 3600m_2^2 + 4410m_3^2) \quad (8c)$$

$$C_7 = \psi(12m_1^2 + 240m_2^2 + 1260m_3^2) \quad (8d)$$

ここで、曲管に面内曲げが作用したときの主応力差の分布 $\Delta\sigma_i$ が式(9a)で表わされると仮定する。

$$\Delta\sigma_i = M_i \cdot f_i(\phi) + N_i \quad (9a)$$

式(9a)の $M_i \cdot f_i(\phi)$ は、式(2a)と式(2b)の差をとったときの右辺を置き換えたもの、 N_i は軸応力を示す。曲管に面外曲げが作用したときの主応力差の分布 $\Delta\sigma_o$ についても同様に、

$$\Delta\sigma_o = M_o \cdot f_o(\phi) + N_o \quad (9b)$$

とする。 $M_o \cdot f_o(\phi)$ は、式(2c)と式(2d)の差をとったときの右辺を置き換えたもの、 N_o はやはり軸応力を示す。式(2)で示される応力はいずれもその周期は 360° であるから、 $\Delta\sigma_i$ 、 $\Delta\sigma_o$ も同じ周期となる。

マンドレルエルボは、図3に示すようにパイプを曲げて作られることから、図4に示す磁歪計の測定値には、曲管が曲げられたときの応力分布に相関関係を有す成分が含まれている可能性が考えられる。そこで、磁歪計の測定値を式(9)に線形回帰を行い、未定係数であるモーメントと軸応力を求めた。モーメントと軸応力が確定すると、それらを式(9)に代入することで、主応力差の分布を計算することができる。このようにして得られたのが、図4における青とピンクの実線である。前者は式(9a)、後者は式(9b)に回帰して得られた回帰曲線を示す。青い実線から読み取れる主応力差の最大値は 4MPa、ピンクの実線から読み取れる主応力差の最大値は 2MPa と実測の最大残留主応力差の値である 130MPa に較べると非常に小さい。このことは、残留応力の分布の周期と外力によって発生する応力分布の周期とは全くずれていることを示している。言い換えると、マンドレルエルボの残留応力には、曲管を曲げたときに発生する応力分布に相関関係を有す成分はほとんど含まれていないことを示す。

3.2 マンドレルエルボの面内面外曲げ試験方法

本供試体には、面内曲げと面外曲げを同時に作用させる必要がある。このためには供試体を鉛直に固定して、ジャッキを傾斜させる負荷方法と、供試体を傾斜させて固定し、ジャッキ荷重を鉛直方向に負荷する方法があるが、本研究では試験のし易さを考慮して後者の方法を選択した。具体的には以下の通りである。まず、残留応力測定に用いた曲管の両側に長さ約 150cm の袖管を溶接した。一方の袖管端部には厚さ 2cm のフランジ板を溶接し、もう一方の袖管端部には管軸とフランジ板のなす角度が 60° となるように傾斜させてフランジ板を取り付け、このフランジ板を図5に示すように床にボルトで固定した。曲管中央断面には 15° ピッチで全周に 2 軸のひずみゲージを貼付した。

荷重は、まず上に押し上げる向きにひずみゲージの最大値をモニターし、弾性範囲に留まっていることを確認しながら 32kN まで加えた。次に、ジャッキの向きを変え、下向きにジャッキのストローク限度まで荷重を加えた。このときの荷重は 55kN で、ひずみゲージの最大値は弾性領域を超えていることを確認した。測定は、各荷重ステップにおいて、ひずみと磁歪について行った。磁歪測定は、中央

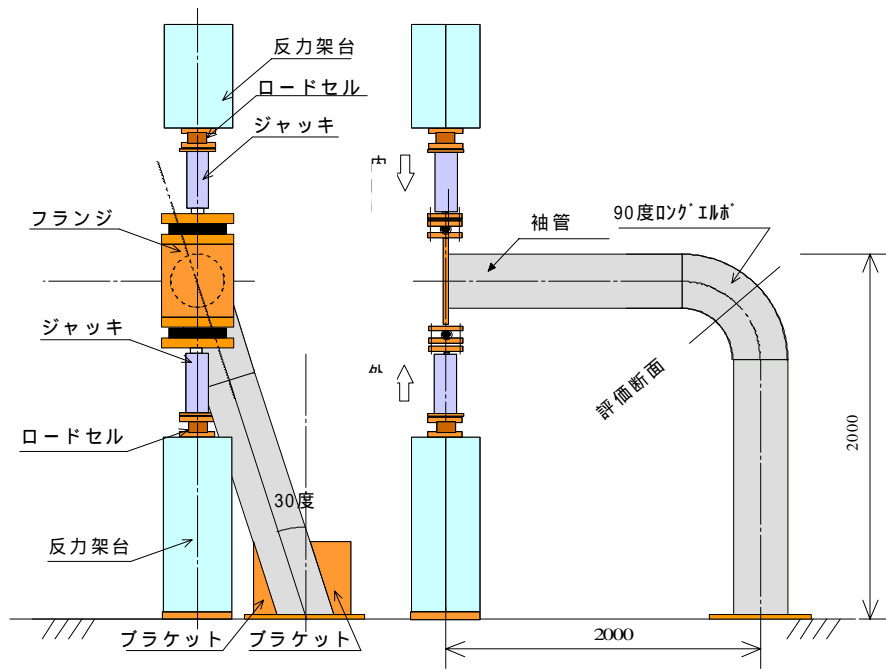


図5 载荷方法

断面において5°ピッチで全周とした。

3.3 試験結果と考察

(1) 既往の試験結果からみた本供試体測定値に含まれる応力成分

図5において傾斜角度を0度に（供試体を鉛直に）固定した供試体に、面内曲げを加える実験を行い、磁歪計の測定値から外力（ジャッキ荷重）によって発生した応力を抽出する方法を既に報告している³⁾。図6にモナカエルボを用いたときのジャッキ荷重ゼロ（無負荷）の場合の磁歪計の測定値と、測定値を式(9a)に回帰して得た回帰曲線を実線で示す。ただし、図4の測定値のように曲管単体での磁歪測定ではなく、袖管やフランジ板を取り付けて、供試体として床に固定した状態での測定値を示す。したがって、この測定値には供試体の自重によって発生した応力が含まれている。他には、曲管製造時の残留応力、袖管を溶接したときのゆがみによって発生した応力も含まれている。しかし、これら3段階で発生した応力の中で、曲管に外力が作用したときの応力分布形状を示すのは、自重による応力のみ（モナカエルボは半身ずつプレスで成型し、2つを合わせて溶接して作られるために曲管を曲げたときの応力分布は残留していない）とみなされる。そこで、測定値を式(9a)に回帰を行って回帰曲線（図6の実線）を求めた。その後、この回帰曲線は供試体の自重から計算された主応力差の分布と合致することが確認されている。ジャッキ荷重が作用した場合についても、測定値を式(9a)に

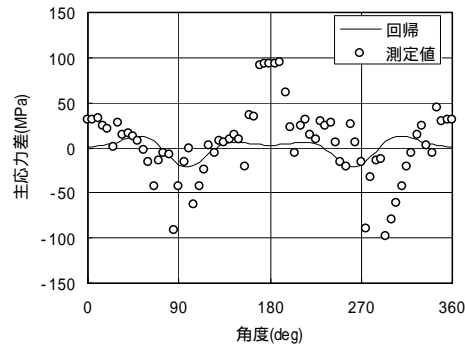


図6 モナカエルボを用いた供試体の無負荷時の測定値と回帰曲線の比較

回帰することで、ジャッキ荷重と自重によって発生した応力が測定値から抽出できることが確認されている。また、マンドレルエルボを用いた面外曲げ試験についても、測定値を式(9b)に回帰を行うことで、外力によって発生した応力のみを測定値から抽出できることが確認されている。

これらの結果から、例えば図6に示される測定値と回帰曲線とは全く一致していないという一般的に行われる評価方法は、本論文では妥当ではない。あくまでも、得られた回帰曲線はどのような応力分布を示しているかという観点でまず評価を行い、その結果として回帰を行なうことの妥当性を議論すべきものである。

以上の事実から、図5の載荷方法で測定された値には、式(9a)で表現される成分と式(9b)で表現される成分が含まれているとみなすことができる。

(2) 本供試体についての測定結果と自重による応力の評価

図7に、下方向ジャッキ荷重(内曲げ荷重)0、10、20kNのときの磁歪計およびひずみゲージによる測定値と、それらの値を式(9a)、式(9b)の応力計算式に回帰して得られた回帰曲線との比較を示す。左図が式(9a)への回帰結果、右図が式(9b)への回帰結果を示す。図の縦軸は主応力差、横軸は円周方向角度(図2右図の ϕ)を示す。なお、磁歪計による測定値は前述したように主応力差であるので測定値をそのままプロットしている。ひずみゲージにより測定された軸方向ひずみ ε_L と円周方向ひずみ ε_C は、式(10)により応力に変換し、軸方向応力 σ_L と円周方向応力 σ_C の差を計算しプロットした。

$$\sigma_L = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_L + \nu\varepsilon_C) \quad (10a)$$

$$\sigma_C = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_C + \nu\varepsilon_L) \quad (10b)$$

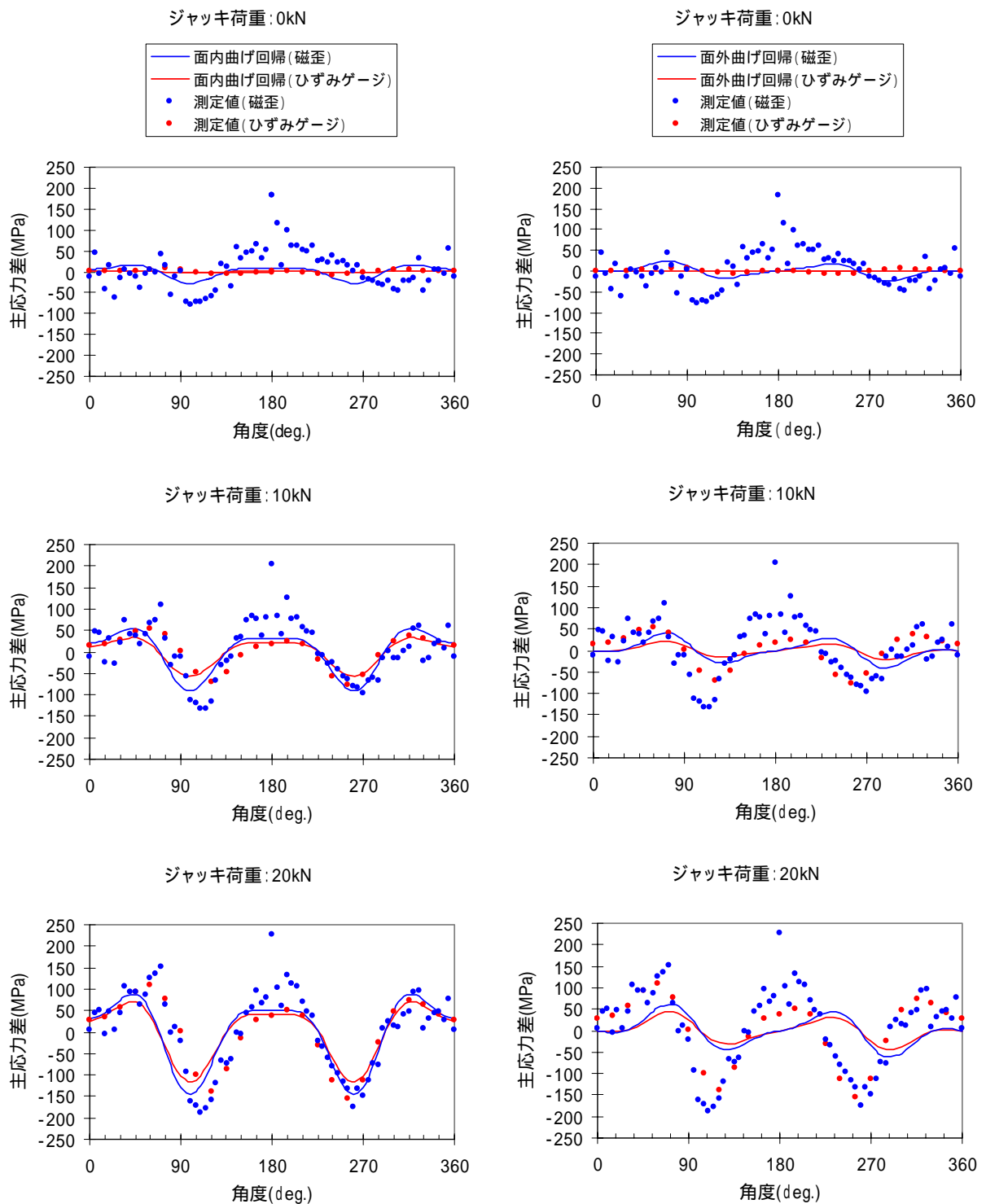


図7 内曲げ方向ジャッキ荷重と測定値の変化 (その1)

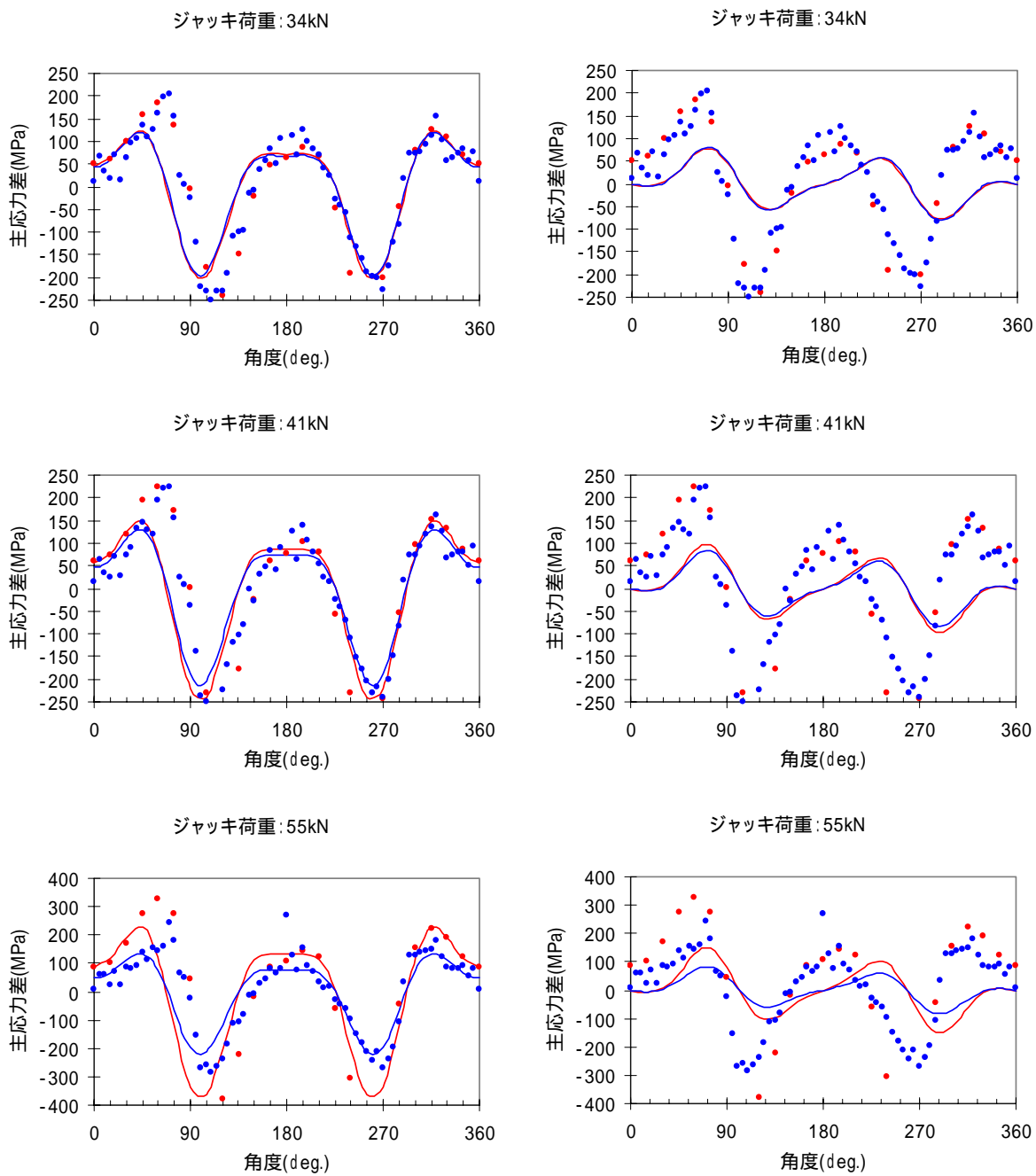


図 8 内曲げ方向ジャッキ荷重と測定値の変化 (その 2)

また、図 8 は下方向ジャッキ荷重 34、41、55kN が作用したときの測定値と回帰曲線の比較を示す。図 7、図 8 で用いている記号は同じものを指しており、青丸が磁歪計の測定値、赤丸がひずみゲージの

測定値を示す。左図には磁歪計およびひずみゲージによる測定値を(9a)に回帰して得られた曲線を青い実線で、ひずみゲージによる主応力差の値を同式に回帰して得られた曲線を赤い実線で示す。同様に、右図には式(9b)に回帰して得られた曲線を青および赤の実線で示している。

図4の曲管単体での残留主応力差の最大測定値と、図7のジャッキ荷重ゼロのときの磁歪計による最大測定値を較べると、例えば180°において突出している値は前者が130MPa、後者が180MPaと、後者の方が大きい。この差は袖管溶接の影響と加力治具、袖管および曲管自身の自重によって発生したものとみなされる。また、磁歪計の値の回帰曲線から読み取れる最大主応力差も生データと同様に、面内曲げの場合で約28MPa(左図)、面外曲げの場合で23MPa(右図)と、図4に示される単体のときのそれぞれの値4MPa、2MPaと較べて大きくなっている。そして、曲げの方向は面内内曲げ方向であることから、28MPaと4MPaの差は加力治具、袖管および曲管自身の自重による曲げモーメントが主たる原因とみなされる。面外曲げについても同様に解釈される。一方、ひずみゲージの値はジャッキ荷重ゼロであるこの時点が基準となる。当然のことながら、この時点におけるひずみゲージの回帰曲線から読み取れる最大値はゼロとなる。したがって、ジャッキ荷重が大きくなっても、磁歪計およびひずみゲージの感度が同じであれば、ジャッキ荷重ゼロにおける赤と青の曲線(初期値)の差は保持される筈である。

図7、図8において、磁歪測定値の回帰曲線(青い実線)とひずみゲージ測定値の回帰曲線(赤い実線)との差をみていくと、ジャッキ荷重が20kNまでは初期(荷重0kNのとき)の差が面内曲げ回帰(左図)と面外曲げ回帰(右図)の両方ともに保持されている。

図9は上方向ジャッキ荷重(外曲げ荷重)0、5、27、32kNのときの磁歪計およびひずみゲージの測定値と、それらの値を式(9a)の応力計算式に回帰して得られた回帰曲線との比較を示す。ここでは図7、図8と異なり、面内曲げの応力計算式への回帰結果のみが示されている。ジャッキ荷重0kNのケースは図7の同じ荷重の時のグラフと同じものを示す。外曲げ荷重に対しては5kNの状態からひずみゲージ測定値からの回帰曲線(赤い実線)が磁歪測定値のそれ(青い実線)を上回っている。荷重27kN程度までは回帰曲線同士の差は同程度である。

以上の事実より、青い実線と赤い実線の差は自重による応力が含まれているか否かであるとみなされる。言い換えると、磁歪計では自重によって発生した応力が測定できるのに対して、ひずみゲージでは自重による応力が測定されていないことを示す。

(3) 磁歪測定値の感度低下

図8からジャッキ荷重が34kNでは青い曲線と赤い曲線が一致している。更にジャッキ荷重が大きくなると、それまでとは逆に、ひずみゲージの回帰曲線の方が相対的には大きくなり、荷重の増加とともにその差は広がっている。更に子細にみると、ジャッキ荷重34kN以上では磁歪測定値の回帰曲線が示す主応力差の値は荷重とともに増加が鈍くなっている。これに対してひずみゲージによる測定値の回帰曲線はジャッキ荷重とともに増加している。これが両者の差が拡大していく理由である。図7、図8に示された以外の全荷重ステップについても両者の差を比較した結果、25kNまではほぼ初期値の差が保持されていることが確認された。

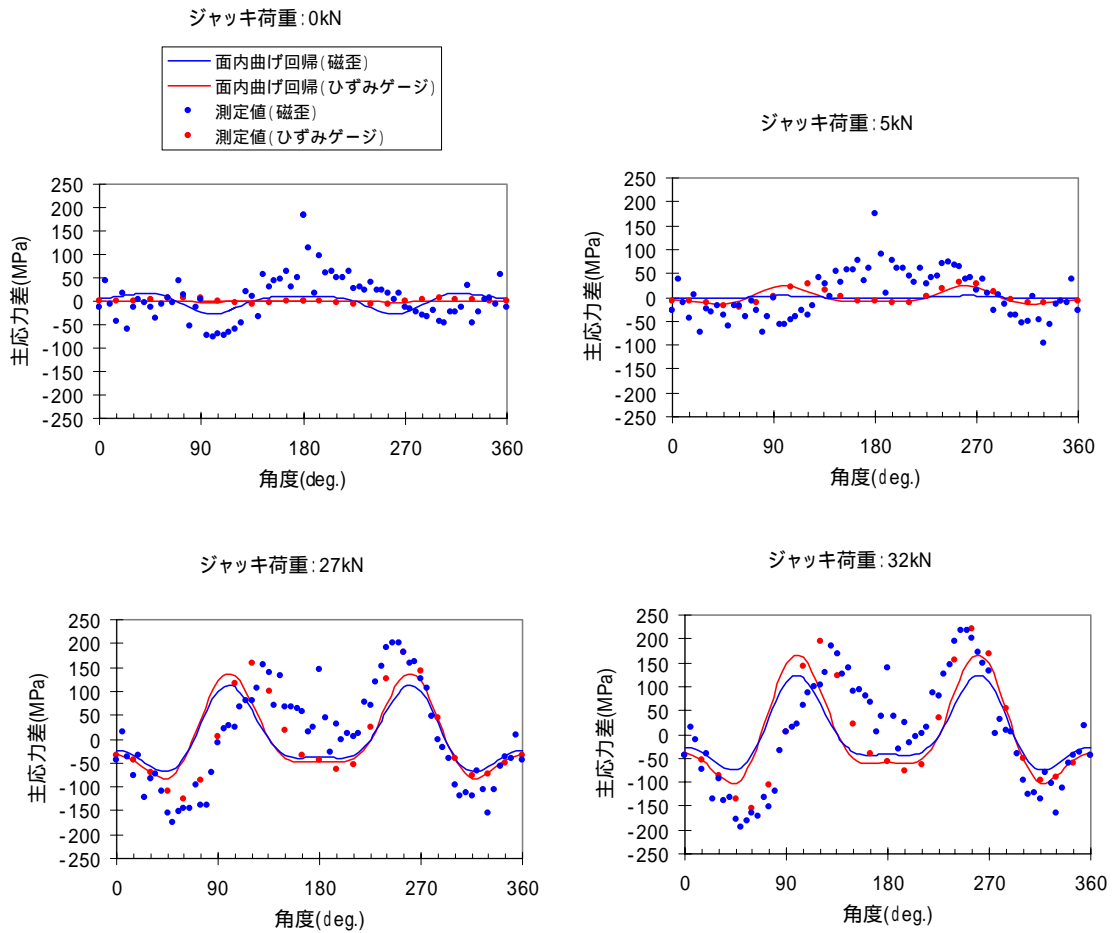


図9 外曲げ方向ジャッキ荷重と測定値の変化

図9はひずみゲージによる測定値が弾性に留まる範囲での測定結果であるが、32kNでは青い曲線と赤い曲線の差がそれまでとはやや開いており、磁歪計の感度低下が始まっていることが窺われる。

これらのグラフより、磁歪計では応力が高くなると感度が低下することが分かる。磁歪法の適用可能範囲は、感度がひずみゲージのそれと一致する範囲とみなすことが妥当である。どの程度の応力まで適用可能かをみるためには、主応力差では具合が悪い。そこで以下のようにして主応力差から軸方向応力と円周方向応力に分離を行った。

(4) 磁歪測定値から外力に対応する軸、円周方向応力を特定する方法と診断可能範囲

内曲げジャッキ荷重が25kNのときの磁歪およびひずみゲージによる測定値を図7、8に示したと同様に面内曲げと面外曲げの応力計算理論式(9a)、(9b)に回帰を行い、未定係数としての面内曲げモーメント、面外曲げモーメントおよび軸応力を求め、それらを式(2)に代入し、軸方向応力と円周方向応力を計算した結果をひずみゲージによる測定値と比較した。図10の青い実線(磁歪)と赤い実線(ひずみゲージ)は面内曲げによって発生していると推定された軸および円周方向応力分布、赤丸はひず

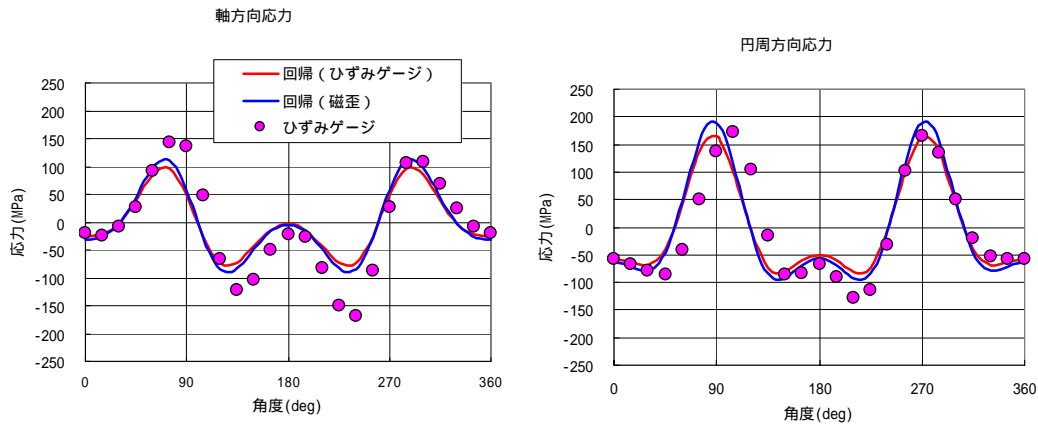


図 10 磁歪測定値およびひずみゲージ測定値から分離された面内曲げ対応の軸および円周方向応力分布の比較

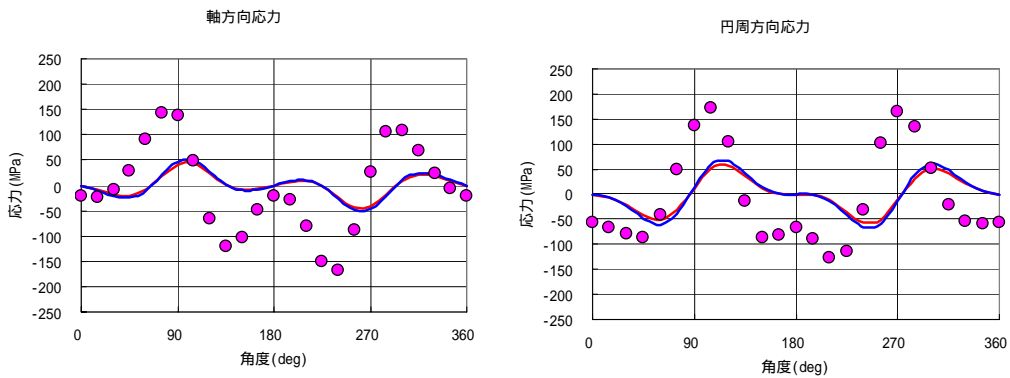


図 11 磁歪測定値およびひずみゲージ測定値から分離された面外曲げ対応の軸および円周方向応力分布の比較

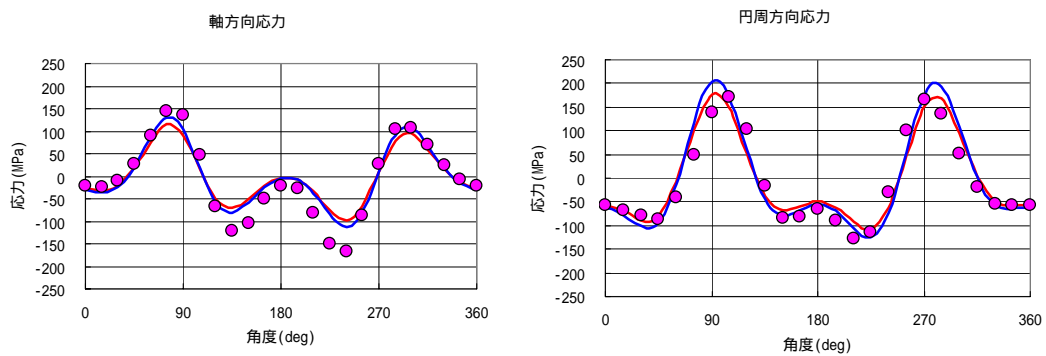


図 12 磁歪測定値の応力計算理論式への回帰から特定された面内面外同時作用時の応力

みゲージ測定値を示す。同様に図 11 の青い実線（磁歪）と赤い実線（ひずみゲージ）は面外曲げによって発生していると推定された軸および円周方向応力分布、赤丸はひずみゲージ測定値を示す。ここで、ひずみゲージの測定値である赤丸は面内曲げによって発生した応力分と面外曲げによって発生した応力分には分離されていない（できない）ことを念頭に置く必要がある。

図 12 は、図 10 と図 11 に示された軸方向応力同士、円周方向応力同士を加算して求めた応力分布を、ひずみゲージ測定値と比較して示したものである。青い実線が磁歪測定値、赤い実線がひずみゲージ測定値の回帰から得られた曲線に対応している。角度 180 度前後において、軸方向の応力が、ひずみゲージの測定値と回帰曲線とで乖離がみられるが、これは図 3 の肉厚分布からみられるように、この位置における肉厚の不均一の影響と考えられる。最大応力は円周方向に発生している。青い実線が赤い実線をやや上回っているが、前述のようにひずみゲージの値には供試体の自重による応力が無視されていることを示している。

以上のことから、面内曲げと面外曲げが同時に作用している状態であっても、測定値を面内曲げに対応する計算式（式(9a)）と面外曲げに対応する計算式（式(9b)）に独立に回帰を行い、未定係数としての面内曲げモーメント、面外曲げモーメントおよび軸応力を求めれば、軸および円周方向応力に分離して診断することができるといえる。

また、ほぼこの荷重ステップがこの曲管材料について感度が保持される上限とみなされることから、角度 90 度における円周方向応力、約 200MPa がこのマンドレルエルボの診断可能な上限応力となる。材料の降伏応力 350MPa に対しては 55% の比率である。

なお、曲管の製法としては、他にモナカエルボ、高周波ベンドがあり、製法が異なると曲率半径比（曲率半径 / 外径）や材料グレードが異なる。著者らの実験では製法が異なると、製造時残留応力値（ただし、主応力差）や分布形状が異なることが確認されている。適用範囲については、やはり大きな製造時残留応力が存在しているために、同じグレードの直管に適用した場合に比べ低くなる傾向が観察されており、モナカエルボの場合で降伏応力の 45% 程度であることが確認されている。

4. おわりに

地震後に曲管部に残留した応力を非破壊で診断する方法として、磁歪技術を用いる方法を提案した。磁歪計によって測定される応力は主応力差の全応力である。曲管には製造時に発生した大きな応力が残留していることを実測から示し、地震などの外力によって発生した応力が残留しているか否かの診断を行うためには、測定値から残留応力を分離し、外力によって発生している応力を特定する必要があるとともに、主応力差として測定された値を軸方向応力と円周方向応力に分離する必要があることを示した。これら 2 点を解決する方法として、磁歪計の測定値を R & G が提案する応力計算理論式に回帰する方法が有効であることを、実験におけるひずみゲージで測定された値との比較で示した。曲管に面内曲げと面外曲げが同時に作用していても、測定値を面内曲げの応力計算理論式と面外曲げの

応力計算理論式に独立に回帰し、それぞれの回帰から得られる面内曲げモーメントと面外曲げモーメントをR & Gによる理論式に代入し軸および円周方向応力を求め、軸および円周方向応力同士を加算することで、応力診断が可能であることも示した。また、本提案方法によれば、供試体の自重によって発生する応力も容易に診断できることが明らかとなるとともに、既往の研究で見られた磁歪法とひずみゲージによる測定結果の乖離の原因は自重が測定されているか否かの違いであることが明らかとなった。

本提案の手法は測定可能な応力上限が降伏応力の半分強程度と低いことから、地震などの外力によって発生した応力が残留したか否かの一次判断に用いるべき手法と位置付けられるものであり、大きな応力が残留しているようなケースに対しては別途の診断手法が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては JFE エンジニアリング株式会社殿に多大なるご協力をいただきましたことを記すとともに、担当された株式会社ジャパンテクノメイトの境 禎明氏（元 JFE エンジニアリング株式会社エンジニアリング研究所研究員）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯村正一：外力による断面扁平を利用した曲管の応力診断、土木学会論文集 No. 798/ -68、2005年、pp. 17-30.
- 2) 飯村正一：曲管の非破壊応力診断法について、土木学会応用力学論文集、Vol. 8、2005年、pp. 931-942.
- 3) Iimura, S. and Sakai, Y. : Non-destructive method for the measurement of stress in bent pipes, D.V. Hemelrijck, A. Anastasopoulos & N.E. Melanitis (eds), Emerging Technologies in NDT, Balkema, Rotterdam, 2004, pp.219-224.
- 4) 境禎明、卯西裕之：磁気ひずみ法を利用した鋼管の曲げ応力測定・評価技術、非破壊検査、Vol. 53、No. 12、2004年、pp. 767-771.
- 5) Von Karman : Ueber die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federrnder Ausgleichrohre, Z. VDI, Vol.55, 1911, pp.1889-1895.
- 6) Pardue, T.E. and Irwin Vigness : Properties of thin-walled curved tubes of short-bend radius, Trans. ASME, Vol.73, 1951, pp.77-87.
- 7) 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.

（受理：2005年12月20日）

（掲載決定：2006年8月29日）

Non-destructive Diagnosis of Residual Stress in Bent Pipe After an Earthquake Using the Magnetic Anisotropy Sensor

IIMURA Shoichi

Senior Engineer, Tokyo Gas Co., Ltd., Dr. Eng.

ABSTRACT

A method of utilizing the principle of magnetostriction to perform non-destructive diagnosis to determine whether or not there is residual stress produced by an earthquake in a bent pipe has been developed. The method is used to measure total stress of the principal stress difference. Because large stress produced during the manufacture of a bent pipe remains in the pipe, an effort was made to separate the residual stress from the measured value by regressing the measured value to a theoretical stress calculation equation for bent pipe by Rodabaugh and George. As a result, only the stress produced by external force was precisely obtained divided into longitudinal and circumferential stress. Because the upper limit stress value that can be diagnosed by the method is approximately 55% of the yield stress, it has been proposed as a method to be used to make a primary judgment of whether or not stress produced by an earthquake remains.

Key Words: Magnetic Anisotropy, Bent Pipe, Residual Stress, NDT