

磁歪測定における曲管の測定位置の影響と曲管の断面変形が直管部応力測定値に及ぼす影響について

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

パイプラインの安全なる維持管理のためには最大応力が発生する位置とその大きさを知ることが重要となる。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いけない。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。

最大応力は直管部よりも曲管部に発生することが多い。そこで、直に曲管部の応力診断を行うことを目指した。一方、曲管には 100MPa を超える製造時の応力が残留していることが磁歪測定の結果明らかになったため、全応力が測定される磁歪法の測定値から残留応力を分離する必要が生じた。このため、筆者らは、曲管の応力計算理論式を利用することに着目し、測定値を理論式に回帰することを試みた。その結果、残留応力が測定値から分離され、外力のみによる応力を特定することができることを示した^{1),2)}。この曲管を直接測定するという方法では、中央断面における測定を前提としているが、供用状態にある曲管では種々の障害物が近接し、中央断面における測定が無理な場合も想定される。そこで、測定位置が中央断面から外れた場合の測定値への影響について調べた。

また、磁歪法を用い直管部に生じた曲げ応力を非破壊で診断する技術については境ら³⁾によって既に提案されている。しかしながら、曲管部に近いところでは直管部であっても曲管の断面扁平の影響を受けている筈である。その結果、測定値は梁の曲げ応力から外れた応力分布を示すことが予測される。そこで、境らの手法を適用するためには曲管部からどの程度の離隔が必要かについても調べてみた。

2. 磁歪法による応力測定の実験

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

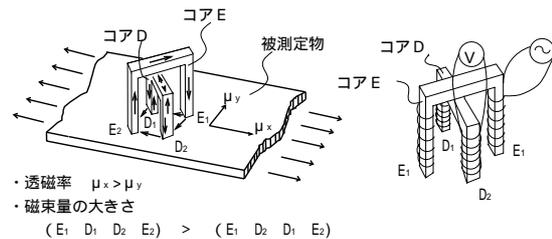


図-1 磁歪測定原理図

電流を流すと、センサの足 E_1 から出た磁束のうち大部分は最短距離で直接 E_2 へ向かうが、 E_1D_1 間及び D_2E_2 間は E_1D_2 間及び D_1E_2 間に比べて透磁率が $\mu_x - \mu_y$ だけ大きいため、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、式(1)で表わ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。

$$V = K_o \cdot (\mu_x - \mu_y) \quad (1)$$

$$= K \cdot (\sigma_x - \sigma_y)$$

ただし、 K_o, K : 励磁条件、材料磁気特性等で決まる定数である。

3. 試験方法

口径 300mm、曲率半径 1.5D のマンドレルエルボの両側に、図-2に示すように 1500mm と 4000mm の長さの袖管を溶接し、端部に厚さ 20mm のフランジ板を取り付けた。短い方の袖管を鉛直向きに立て、端部のフランジ板と床面をボルトで固定した。長い方の袖管端部のフランジ板には油圧ジャッキを押し当て下方方向に载荷を行ない、そのときの発生応力を、配管各部においてひずみゲージおよび磁歪計を用いて測定した。

図-2に示す記号A(9断面)、B、C、Dの位置では、磁歪計を用い円周方向に 5°ピッチで全周を測定した。さらに、記号Bの位置においては、15°ピッチで半周、記号Dの位置では、背(0度)、横(90度)、腹(180度)の3箇所でも2軸ひずみゲージによる測定も行った。また記号Aの断面で直管と曲管の境界部(溶接部)から 300mm、

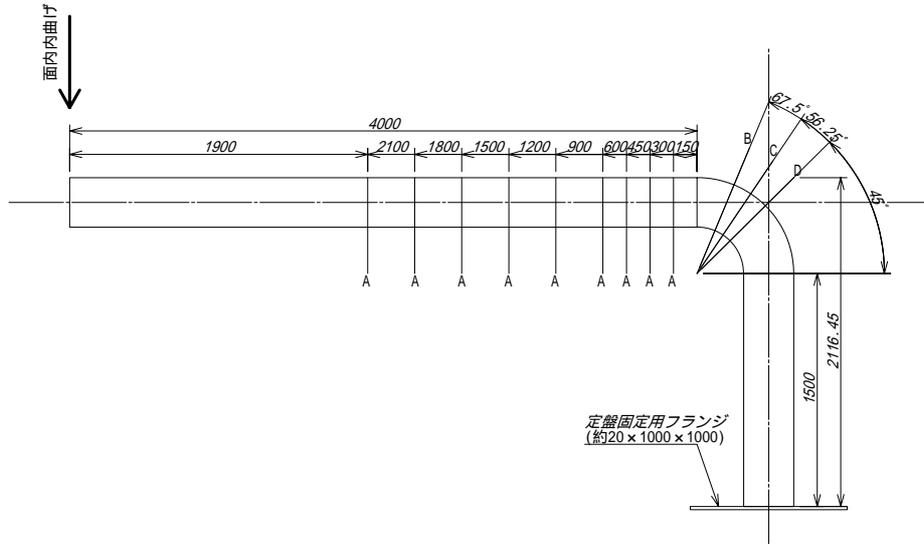


図 - 2 荷重方法と測定位置

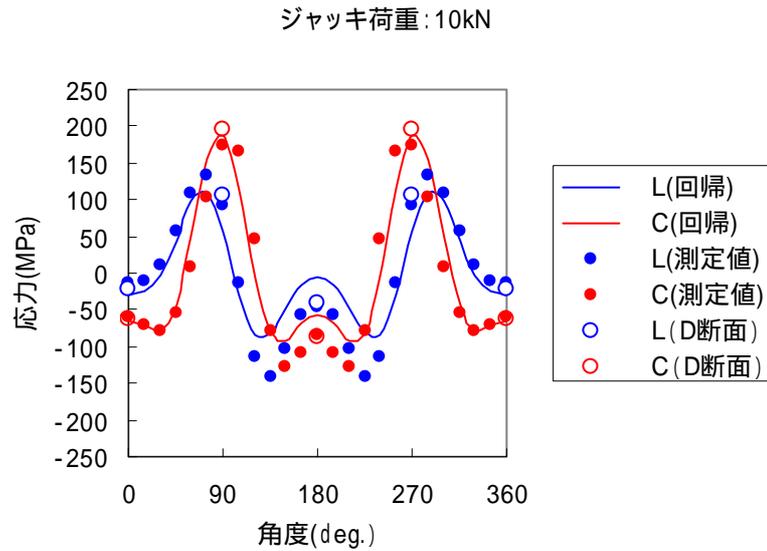


図 - 3 断面Bにおける応力分布と断面Dにおける応力分布の比較

900mm 離れた位置においても、円周方向に 15° ピッチで半周について、ひずみゲージによる測定を行った。

4. 試験結果

4.1 曲管における測定位置が中央断面からずれた場合の影響

ジャッキ荷重 10kN のときに、B 断面においてひずみゲージで測定された応力分布と、D 断面の 0 度、90 度、

180 度の 3 箇所でのひずみゲージによる応力値の比較を図 - 3 に示す。この図において、白抜きのはデータは断面 D における測定値、それ以外については断面 B における測定値を示す。図の実線は Rodabaugh と George⁴⁾ (以下 R&G と略す) による曲管の応力計算理論式に回帰し、軸方向と円周方向に分離された応力の回帰曲線を示す。また、 σ_L は軸方向応力、 σ_C は円周方向応力を示す。

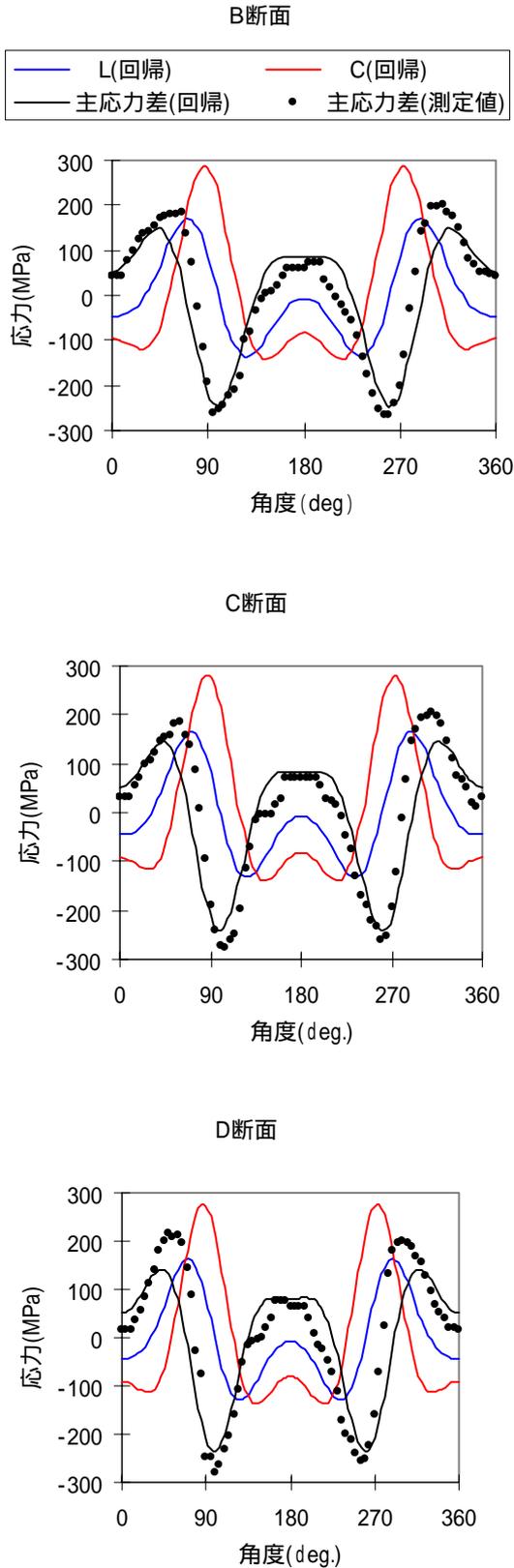


図 - 4 磁歪法による測定値、回帰曲線の測定断面位置（断面 B、C、D）の違いの比較

ひずみゲージの測定値は、供試体の自重が無視された

(図 - 2 に組み立てた状態を初期値としているため) 値であり、同条件で断面 B と断面 D に作用するモーメントを計算すると 0.96:1 となる。90 度における応力が 0 度、180 度に較べて大きいことから、90 度における軸方向応力と円周方向応力の平均値について B 断面と D 断面で比較すると 0.92 : 1 となり、計算上のモーメント比との差はひずみゲージの測定誤差程度でしかない。

断面 B、C、D において磁歪計で測定された値を R&G による応力計算理論式に回帰し、軸方向と円周方向の応力に分離した結果を図 - 4 に示す。図には主応力差の回帰線も黒い実線で示している。測定値と黒い実線との間で乖離がみられるが、測定値には曲管製造時の残留応力が含まれているのに対して、実線にはそれが除かれ、外力のみによる応力となっていることに因る^{1),2)}。最大応力である 90 度付近における円周方向応力について、3 断面で比較すると殆ど同じ値を示している。磁歪計による測定では、供試体の自重が加味された応力値が測定されることから、計算で断面 B、C、D に発生するモーメントの比を求めると 0.95 : 0.975 : 1 となり、やはり殆ど差がない。これらのことから、障害物などがあって中央断面における測定が不可能な場合には、開き角度 90 度の場合、22.5 度程度ずらした測定を行っても測定値の差は小さいと云える。なお、曲率半径が大きな曲管の場合には、測定断面と中央断面における計算モーメントの比で調整する方法が考えられる。R&G 理論に限らず曲管の応力計算理論は、曲管全体に一樣な曲げモーメントが作用するとして理論展開が行われている。開き角度が大きくなる方向であれば、測定位置が中央断面からより大きくずれたとしても問題無く理論式の適用が可能と見なされるが、逆に開き角度が小さくなった場合にどの程度の角度のずれまで理論が適用できるかは、別途検討する必要がある。

4.2 曲管の断面扁平が直管部における磁歪測定値におよぼす範囲

図 - 5 は、直管と曲管の境界部から 1D (300mm) と 3D (900mm) 離れた位置において、ひずみゲージによって測定された応力分布を示す。図中の実線は測定値を滑らかに結んだものであり、特定の式に回帰して得られたものではない。境界からの離隔が 1D の場合の応力分布形状は、曲管部においてみられる応力分布に近い。離隔が 3D の場合の軸方向の応力分布は円形断面の梁が曲げを受けたときの表面の応力分布である余弦関数の形状を示している。

境らの方法³⁾は、梁とみなした直管に軸力と曲げが作用したときの管表面の応力を表現する次式、

$$\sigma = A + B \cos(\theta - C) \quad (2)$$

に測定値を回帰し、曲げ応力である B 成分と角度 C を求めるという方法である。1D の位置における磁歪測定値を式 (2) に回帰して、B の曲げ応力を求めても良い精度での曲げ応力の算出は期待できないことが図から予測される。

図 - 6 は直管部において磁歪計を用いて測定した値を式 (2) に回帰を行い、求めた曲げ応力 B を、曲管と直管の境界部からの距離を横軸に取りプロットしたものである。白丸が B の値、黒丸は断面扁平の成分となる $\cos 2\theta$ の式に回帰して得られた扁平応力を示す。図において太い実線が梁の単純曲げに対応する応力分布を示

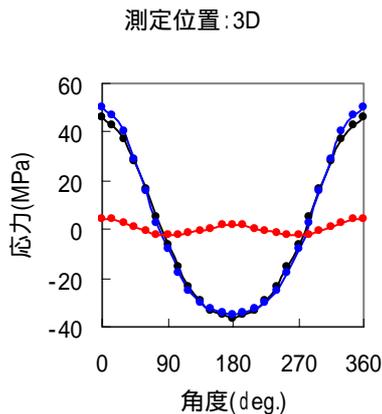
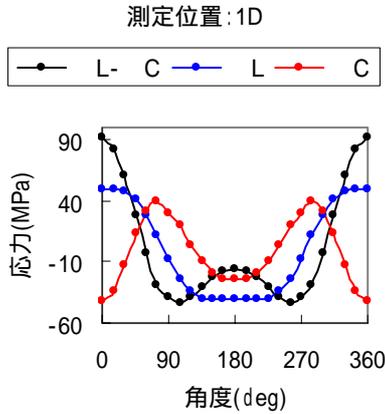


図 - 5 曲管近傍の直管部におけるひずみゲージから求めた応力分布の測定位置の違いの比較

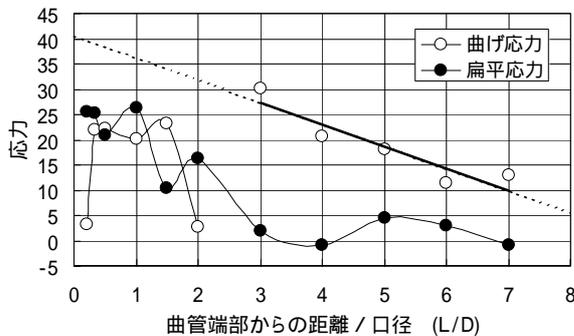


図 - 6 曲管部からの離れが直管応力におよぼす影響

す。この直線に載っている範囲は距離 L が口径の 3 倍以上の場合である。したがって、直管部における磁歪の測定値を式 (2) に回帰して曲げ応力を求める場合には離隔を口径の 3 倍以上取る必要があることを示している。ただし、任意の距離における、応力分布を理論的に求めておかならばこの限りではない

5. おわりに

現場において曲管部の磁歪測定を行う際に、障害物を避けて測定位置を中央断面からずらしても、開き角度 90 度の曲管の場合で 1/4 (22.5 度) 程度のずれであれば問題無いことが確認された。さらに、曲管に接続されている直管部において磁歪測定を行う場合、直管と曲管の境界部から 3D 以上の離隔を確保しないと、梁理論に回帰して曲げ応力を取り出すという境りによる手法が適用できないことが分かった。

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るとともに、担当の同社研究員、境 禎明氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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、pp . 931-942、 2005 .
- 2) 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, pp. 219-224, 2004.
- 3) 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、pp . 767-771、2004 .
- 4) 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, pp.939-948, 1957.

