

磁気異方性センサを用いた曲管部の応力測定におけるセンサ感度の影響

Effect of sensibility of the magnetic anisotropy sensor on evaluated stress values in elbows subject to bending

(株)キャプティ (研究時 東京ガス) ○正員 飯村正一 (Shoichi Iimura)
J F Eエンジニアリング(株) 境 禎明 (Yoshiaki Sakai)

1. はじめに

輸送パイプラインのような重要管路の沈下のおそれのあるところには、地盤沈下による影響を管理する目的で、沈下棒が建設時に取り付けられる。定期的に水準測量を行い、沈下量から管路変形を把握し、弾性床上の梁理論など¹⁾に基づき導かれた簡易式²⁾を用いて、管路の応力評価が行われる。このようにして評価された応力が管理値を超えた場合には、スポット的に管路を露出させ、筆者らが提案する2つの方法(ひとつは、磁気異方性センサを用いる方法³⁾⁻⁹⁾で、もうひとつは、外力によって生じた曲管又はそれに接続されている直管の断面扁平量を測定し、計算で曲管部に発生する応力を算出する方法^{4),10),11)}によって非破壊的に応力確認が行われ、基準値を超えている場合には、切断、ライナー調整、土圧を撤去しての高さ調整¹²⁾などの応力を低減させるための措置(以下、応力解放工事と呼ぶ)が講じられる。しかしながら、磁気異方性センサを用いる応力診断法は、原理として磁性材料の磁歪効果を利用する方法であることから、応力が降伏応力に近づくにつれ、センサ感度が低下するという欠点がある。本報では、製作方法の異なる2種類の曲管を組み込んだ供試体に曲げモーメントを負荷し、曲管部に塑性域に達するひずみを発生させ、ひずみゲージで測定された応力/ひずみ値と比較することにより、磁気異方性センサの感度低下特性について調べた。

2. 試験方法

開き角度(図1における角度 α) 90° で、呼び径600mmのモナカエルボ(図2の作製方法参照)と呼び径300mmのマンドレルエルボ(図3の作製方法参照)の両端に、図4に示すように、直管(袖管と呼ぶ)を溶接し、一端を床に対して鉛直に固定し、他端にジャッキ荷重を加え、曲管中央断面(図1において $\beta=\alpha/2$ の断面)において、ひずみゲージおよび磁気異方性(以下適宜、磁歪と略す)センサにより応力/ひずみを測定した。

表1に曲管の諸元と

袖管の寸法を示す。

なお、ひずみゲージは中央断面の外周半断面(ϕ が $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲)に円周方向に 15° 間隔で2軸のものを貼付した。磁気異方性センサによる測定は、円周方向に

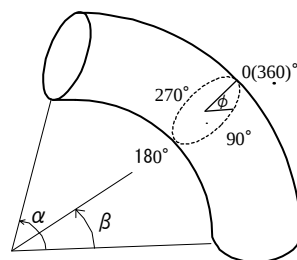


図1 角度の定義

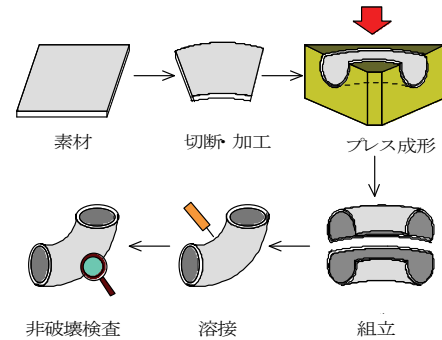


図2 モナカエルボの作り方

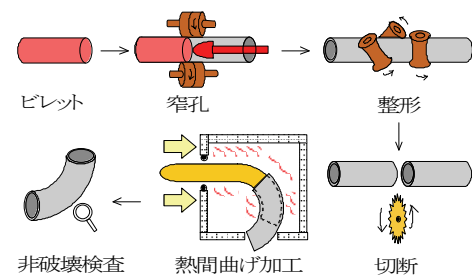


図3 マンドレルエルボの作り方

5° ピッチで全周について行った。

3. 試験結果

3.1 モナカエルボ

ジャッキ荷重は、まず図5の(b)方向に $0 \rightarrow 24.5 \rightarrow 49 \rightarrow 73.5 \rightarrow 98 \rightarrow 147 \text{ kN}$ と載荷したのちに除荷

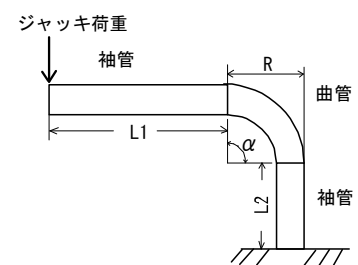


図4 荷重試験方法

表1 曲管の諸元と袖管の寸法

	モナカ エルボ	マンドレル エルボ
外径(mm)	610	310
肉厚(mm)	17.6	10.3
曲率半径 R(mm)	914.4	465
規格降伏点(MPa)	410	220
L1(mm)	1782	1300
L2(mm)	1275	1200

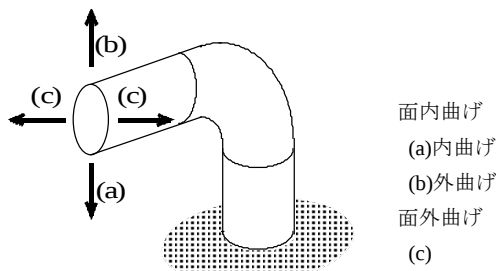


図5 荷重方向

(0 kN)した。次に、図5の(a)方向に 19.6→39.2→58.8→78.4→117.6kN と载荷したのちに再度除荷した。最後は、図5の(b)方向に 149→172→196→221→236kN と载荷したのちに、除荷した。各载荷では、最大のひずみゲージ値を監視しながら行い、弾性範囲（ただし、最後の载荷は塑性域まで負荷）に留めた。

図6に、図5の(b)方向ジャッキ荷重が 0、49、98、147、196、236kN のときの磁気異方性センサによる実測値(赤い○印)およびひずみゲージによる実測値(青い△印)を、円周方向角度 ϕ との関係で示す。赤および青い実線は、曲管に曲げモーメントが作用したときの曲管中央断面に発生する管軸および円周方向応力を算定するために、Rodabaugh&George¹³⁾（以下、R&G と略す）によって提案された理論式に、実測値を回帰させて得られた主応力差（＝管軸方向応力－円周方向応力）に関する回帰曲線を示す。著者らの既存研究^{5),6)}から、ジャッキ荷重が 0 のときの赤い実線は、供試体の自重によって発生するモーメントを、R&G 式に代入して得られる主応力差の曲線に一致することが確かめられている。したがって、この赤い実線と赤い○印との差は、曲管を製作したときに発生した応力とみなされる。ひずみゲージから求められた主応力差の値である青い△印（または、青い△印をR&G 式に回帰させて得られた青い実線）は、ジャッキ荷重が大きくなるにつれて増大しているが、磁気異方性センサによる測定値は、(d)の 147kN 以上ではほとんど飽和している。

図7の白い□印は、図6の各図（これ以外の荷重ステップも含む）におけるひずみゲージによる

実測値の中の最大値（ただし、絶対値としての）とジャッキ荷重との関係を示す。ジャッキ荷重が負の領域は、下方方向に荷重を加えた場合（図5の(a)の荷重方向）を意味し、ジャッキ荷重が-117kN の場合を除くと、ジャッキ荷重と主応力差、円周方向応力、管軸方向応力とは線形性を示している。赤い○印は、図6に示す赤い実線から抽出される絶対値が最大となる値を、図6に示す荷重ステップ以外についても抽出し、ジャッキ荷重との関係で示したものである。ジャッキ荷重が 100kN を超えると、磁気異方性センサの感度が急激に低下している。なお、緑の△印は、赤い○印から自重分を取り除いた値を示す。

図8は、図6における赤および青の回帰曲線から算出された最大円周方向応力（図6以外の荷重ステップについても含む）同士をプロットしたものである。45° 線上にある範囲が磁気異方性センサの診断可能領域とみなされるが、円周方向応力で 250MPa 程度が診断可能な上限となり、これは規格降伏点の 60%に相当する。

3.2 マンドレルエルボ

ジャッキ荷重は、まず図5の(c)方向に 0→6.3→11.9→

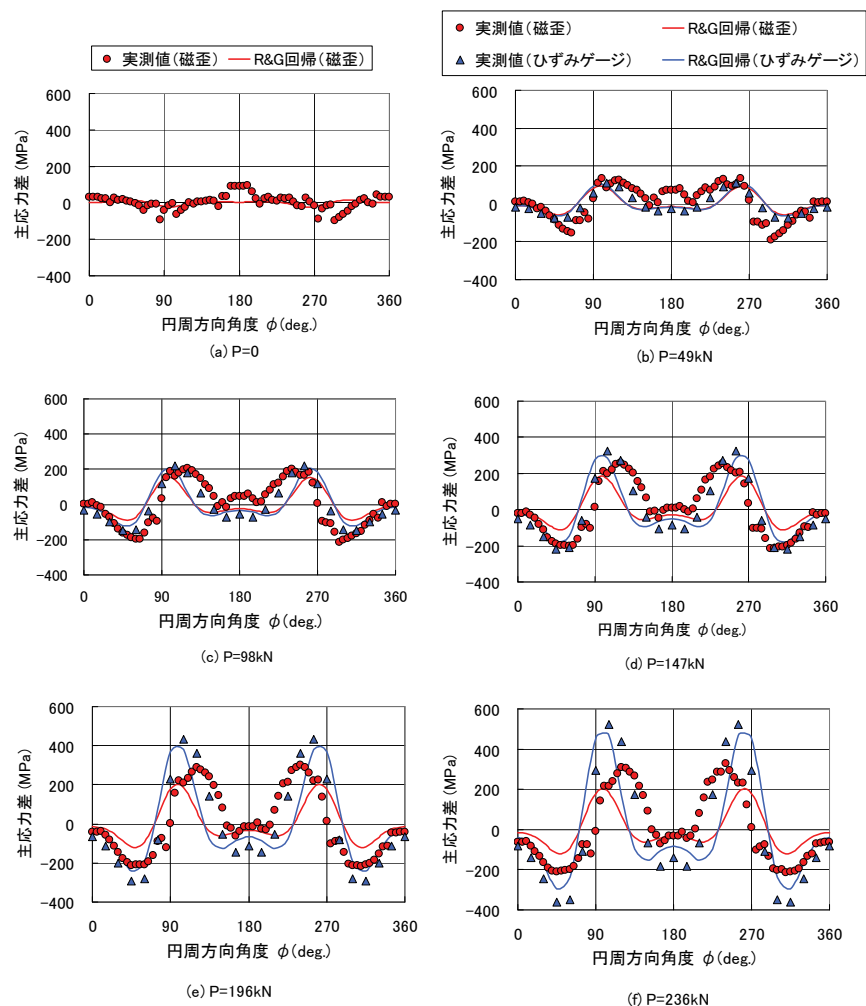


図6 磁歪測定値とひずみゲージ測定値の比較

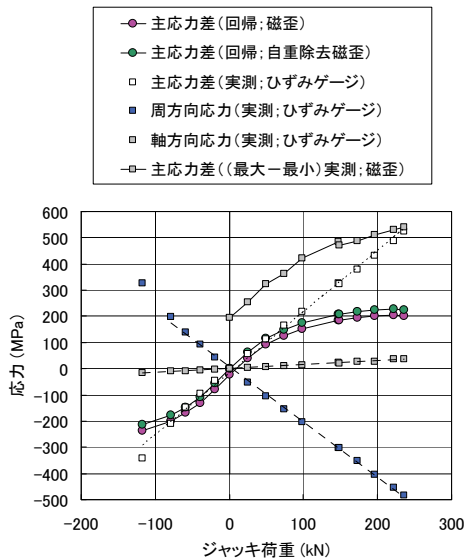


図7 最大実測値とジャッキ荷重との関係

17.7→23.3→29→32.1kN と載荷した後に除荷した。次に、(a)方向に 4.8→9→13.6→18→21.7→25.6→28.7kN と載荷し、除荷した。その後(b)方向に 4.6→9→13.6→18→22.1→26.3kN と載荷し、一旦除荷したのちに、同じ方向に 27.2→31.7→38.2→46.7kN と載荷し、除荷した。

図9に、図5の(b)方向に0、9、18、27.2、31.7、46.7kN と載荷したときのひずみゲージによる実測値と磁気異方性センサによる実測値を、円周方向角度 ϕ との関係で示したものである。記号の意味は、図6と同じである。この図のひずみゲージの実測値である青い Δ 印(したがって、青い実線)には供試体の自重によって発生した応力分が含まれている。赤と青の曲線同士を比較すると、ステップ(b)のジャッキ荷重9kNおよび(c)の18kNにおいて、赤い実線と青い実線がほぼ一致している。ステップ(d)以降では青い実線が赤い実線を上回り、ジャッキ荷重が大きくなるほどその差は開く傾向を示している。

図10は、全荷重ステップ(ただし、図5の(c)方向載荷を除く)について、図7と同様のプロットを行ったものである。白い $\square$ 印について見ると、ジャッキ荷重27.2kNまではジャッキ荷重とは線形性を示しているが、ジャッキ荷重31.7kNではそれまでの増加率を大きく上回って主応力差の値が増加している。主応

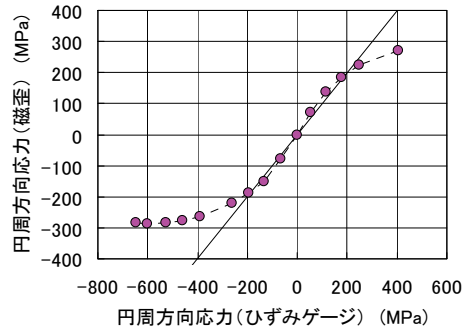


図8 回帰線から算出した円周方向応力同士の比較

力差に対応する円周方向応力も同様であるが、管軸方向応力については逆にそれまでよりも低減している。また、ジャッキ荷重31.7kN以上の3ステップの値だけについて見ると、ジャッキ荷重とは線形性を示している。

図11は、赤および青の主応力差に関する曲線から算出された円周方向応力同士を、全荷重ステップについて

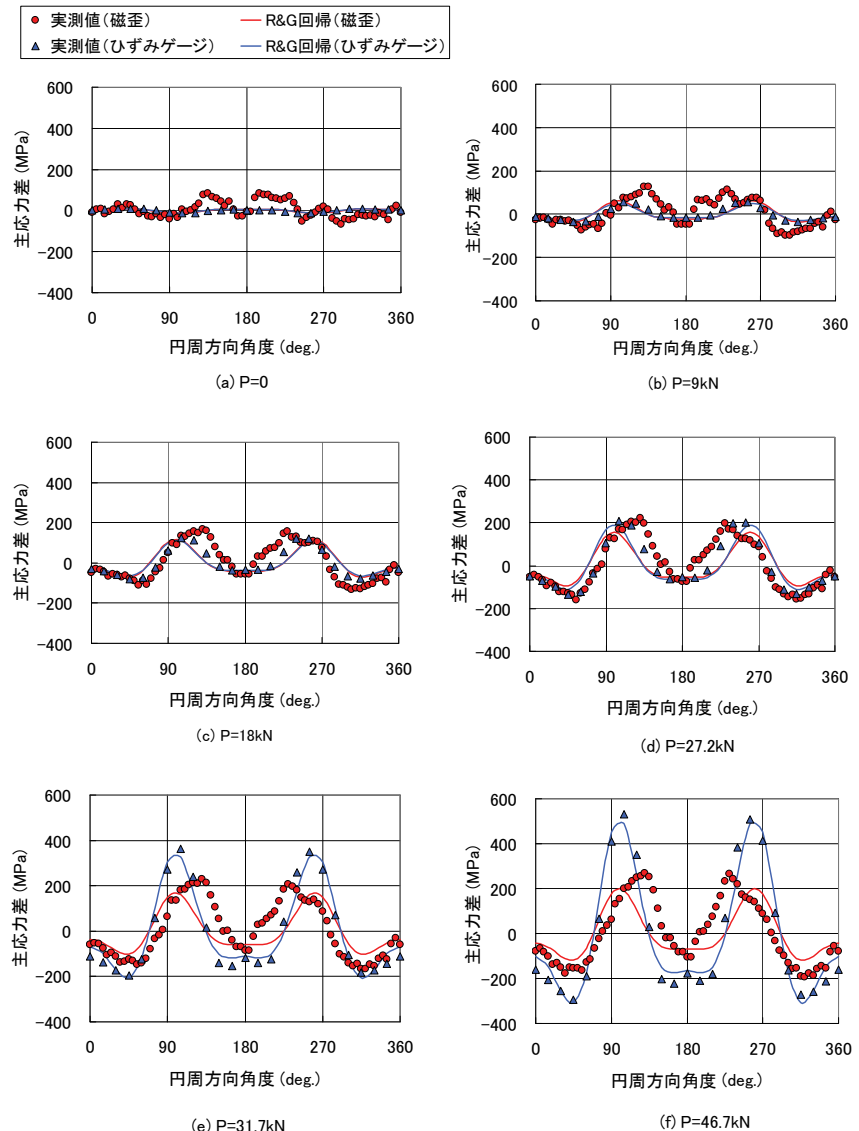


図9 磁歪測定値とひずみゲージ測定値の比較

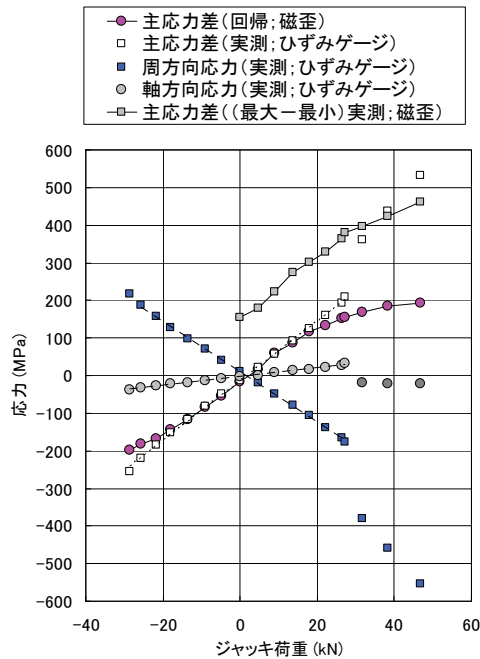


図 10 最大実測値とジャッキ荷重との関係

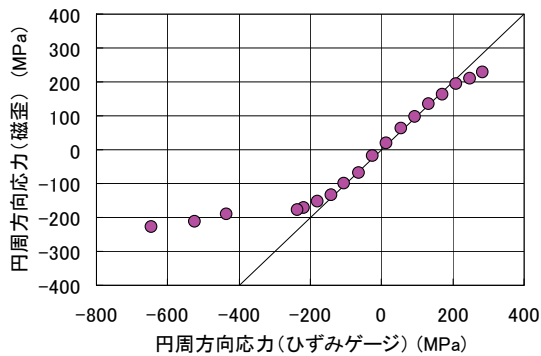


図 11 回帰線から算出した円周方向応力同士の比較

プロットしたものである。45° の線に載っている範囲が磁気異方性センサの診断可能領域とすると、±220MPa程度が上限となり、ほぼ規格降伏点に相当する。

3.3 磁歪実測値を直接利用した高感度診断法の可能性

図 7 および図 10 のグレーの□印は、各荷重ステップにおいて、磁歪測定値の最大実測値から最小実測値を減じた値とジャッキ荷重との関係を示す。感度（単位ジャッキ荷重に対する、応力の変化量）は、ひずみゲージ（白い□印）に較べると低いものの、磁歪測定値の R&G 式への回帰曲線である赤い○印よりは高い。このことから、グレーの□印を用いることで、現行方法（磁歪測定値を R&G 式に回帰させ、回帰曲線から円周方向応力を算出する方法）を上回る高感度な応力診断法の開発の可能性が考えられる。その実現性は、同じ製作方法、同じ材質、同じ口径で作られた曲管は、同じ切片と傾きを有す直線式で一意的に表現できるか否かで判断することとなる。

4. おわりに

診断可能上限応力値を 2 つの曲管について比較すると、モノカエルボが規格降伏点の 60% 程度であるのに対して、マンドレルエルボではほぼ 100% という結果であった。しかしながら、ミルシートなどに記載される実際の降伏点が規格降伏点を数十% 程度上回することは稀なことではないことを考慮すると、本来このような比較は実際の降伏点に対する比率で行うべきであると言え、本報で示す値は参考程度にしかならない。いずれにしても、磁気異方性センサの診断可能応力上限値は、降伏点以下であることを念頭に置く必要がある。

参考文献

- 1) Hetenyi, M. : Beams on Elastic Foundation. Ann Arbor : The University of Michigan Press, 1946.
- 2) Iimura, S. : Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement, *JCBM*, Elsevier, Vol.18, No.6, pp.469-479, 2004.
- 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*, pp.219-224, Balkema, Rotterdam, 2004.
- 4) 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.
- 5) 飯村正一，境禎明：磁気異方性センサを用いた曲管の非破壊応力診断 一面内曲げ，非破壊検査，Vol.55, No.10, pp.536-542, 2006.
- 6) 飯村正一，境禎明：磁気異方性センサを用いた曲管の非破壊応力診断 一面外曲げへの拡張，非破壊検査，Vol.55, No.11, pp.580-587, 2006.
- 7) 飯村正一：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，日本地震工学会論文集，Vol.6, No.4, pp.1-18, 2006.
- 8) 飯村正一，山口宏樹：磁気異方性センサによる曲管及びその近傍の非破壊応力測定における測定位置の影響評価，土木学会論文集F，Vol.65, No.1, pp.94-105, 2009.
- 9) 飯村正一，境禎明：磁気異方性センサを用いた管路応力の非破壊診断精度の向上，非破壊検査，Vol.59, No.1, pp.38-44, 2010.
- 10) 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/VI-68, pp.17-30, 2005.
- 11) 飯村 正一，山口 宏樹：袖管部断面扁平量からの曲管部応力評価簡易法，土木学会論文集 F，Vol.65, No.4, pp.567-575, 2009.
- 12) 飯村 正一，山口 宏樹：高さ調整による埋設管路の沈下応力解放工事を支援する簡易応力推定手法，土木学会論文集 F，Vol.64, No.3, pp.283-294, 2008.
- 13) 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.