

磁歪応力測定法の曲管偏平応力評価への適用検討(第3報)

東京ガス(株) 導管部 幹線メンテナンス技術グループ^{*1} 正会員 飯村 正一
JFEエンジニアリング(株) エンジニアリング研究所^{*2} 正会員 ○ 境 禎明

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有効である。構造物に対する応力測定では、ひずみゲージ法(以下ゲージ法とよぶ)によるものが一般的であるが、既設パイプラインの応力状態をゲージ法で測定するためには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。以上のような背景から著者らは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^[1]。本報告では第1報^[2]、第2報^[3]に引き続き、高圧ガス幹線用マンドレルエルボに面外曲げ荷重を負荷し、磁歪法で測定した応力分布を理論式に基づいて処理することによって、偏平応力を精度良く評価できることを紹介する。

2. Rodabaugh&George の偏平応力理論

モーメントが作用する曲管に発生する偏平応力を説明したものとして、Kármánの偏平応力理論が知られているが、本検討ではKármánの式を発展させたRodabaugh&George(以下R&Gと略す)の理論式^[4]を用いた。R&Gの式では φ : 管の周方向角度とし、 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 : 曲管の面外曲げ方向の作用モーメントとすると、管軸、管周方向応力 σ_L , σ_C は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L &= \frac{kMr}{I(1-\nu^2)} f_1(\varphi) \quad , \quad \sigma_C = \frac{kMr}{I(1-\nu^2)} f_2(\varphi) \quad , \quad \lambda^* = \frac{tR}{r^2\sqrt{1-\nu^2}} \\ f_1(\varphi) &= \left(1 + \frac{3d_1}{2}\right) \cos \varphi + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{d_n(1-2n) + d_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\varphi + \frac{\nu \lambda^*}{2} \sum_{n=1}^{\infty} d_n(8n^3 - 2n) \sin 2n\varphi \\ f_2(\varphi) &= \nu \left(1 + \frac{3d_1}{2}\right) \cos \varphi + \frac{\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \{d_n(1-2n) + d_{n+1}(2n+3)\} \cos(2n+1)\varphi + \frac{\lambda^*}{2} \sum_{n=1}^{\infty} d_n(8n^3 - 2n) \sin 2n\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表される。なお(1)式中の λ^* はパイプ係数、 k はたわみ係数とよばれるものである。また d_n は λ^* と内圧の関数として定義できるが、これらについての説明は煩雑になるのでここでは省略する。そこで外力、あるいはモーメントによって偏平応力が発生している曲管部の表面応力を磁歪法で測定し、測定結果を統計処理によって(1)式に回帰することによって、偏平応力分布を評価することが可能と考えられる。

3. 実験方法

JIS-PT370-sch40 規格の肉厚 10.3mm、呼び径 300A の曲管に袖管を溶接し、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面外方向に押して荷重を負荷した。測定位置は曲管の中央断面とし、曲管の外側を0度として、管周方向に5度ピッチで全周を磁歪法で計測した。また磁歪法の測定位置の近傍には、検証のためのひずみゲージを15度ピッチで全周に取り付けた。実験の概要を図1に示す。

4. 実験結果

磁歪法で直接求められる応力は直交2方向の応力差、すなわち $\sigma_L - \sigma_C$ であるが(1)式を用いて σ_L , σ_C に分離することができる。測定結果の一例として図2～図3にゲージ法及び磁歪法(それぞれG, Mで表示)で求めた応力分

キーワード: 磁歪, 応力測定, パイプライン, 維持管理, 偏平応力, Kármán, Rodabaugh&George

*1 〒105-8527 港区海岸 1-5-20 TEL 03-5400-7542 FAX 03-3437-9177

*2 〒514-0393 津市雲出鋼管町1番地 TEL 059-246-3052 FAX 059-246-2790

布を示す。同図にはゲージ法の測定応力と同結果をR&Gの式に回帰したもの(それぞれMeas., Cal.で表示)及び磁歪法の結果をR&Gの式に回帰したものを併記してある。

図2は無負荷状態での測定結果であり、ゲージ法の測定値は当然ゼロである。これに対して磁歪法では原理的に絶対的な応力が測定されるために、管のもつ残留応力によって偏平応力分布が算出されている。但しこのレベルは十分に小さいものである。図3は17.7kNの面外曲げ荷重を負荷したときの測定結果であるがゲージ法、磁歪法共に偏平応力分布が現れており、R&Gの式に回帰した結果はゲージ法、磁歪法で非常に一致している。

供試管はシームレス鋼管を炉中で加熱しながら、型に合わせて成型したマンドレルエルボとよばれるものであり、曲げ加工時の残留応力が存在していると考えられる。しかしながら残留応力の分布は偏平の応力分布と周期、位相が異なるため、R&Gの式に回帰することによってフィルタリング除去されたと考えられる。

5. まとめ

今回のマンドレルエルボに対する検討から得られた知見をまとめると以下となる。

- ） 管表面の応力を磁歪法で測定し、その結果をR&Gの式に回帰することによって実用上十分な精度で面外曲げ時の偏平応力を抽出・評価できた。
- ） 製造時の残留応力は偏平応力成分と周期、位相が異なるため、R&Gの式に回帰することによってフィルタリング除去できることが分かった。

6. おわりに

磁歪法は供用下のパイプラインの応力を非破壊的に評価できる唯一の技術である。今後は直管部から曲管部まで、パイプライン全体の安全性を評価できるツールの1つとして本技術の開発、改良を進めていきたいと考える。

【参考文献】

- [1] S. Iimura, Y. Sakai: Non-destructive method for the measurement of stress in bent pipes, 3rd. Int. Conf. Emerging Technologies in Non-Destructive Testing Greece, pp.219-224, 2003.
- [2] 飯村 正一, 境 禎明: 磁歪応力測定法の曲管偏平応力評価への適用検討, 第57回年次学術講演会講演概要集, 第 部門, pp.477-478, 2002.
- [3] 飯村 正一, 境 禎明: 磁歪応力測定法の曲管偏平応力評価への適用検討(第2報), 第58回年次学術講演会講演概要集, 第 部門, pp.687-688, 2003.
- [4] E.C.Rodabaugh, et al., Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress-Intensification Factors of Curved Pipe or Welding Elbows, TRANSACTIONS OF THE ASME, Vol.79, pp.939-948, 1957.

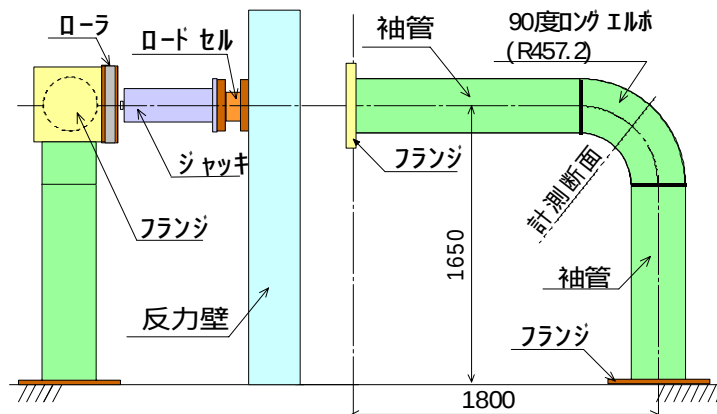


図1 実験の概要

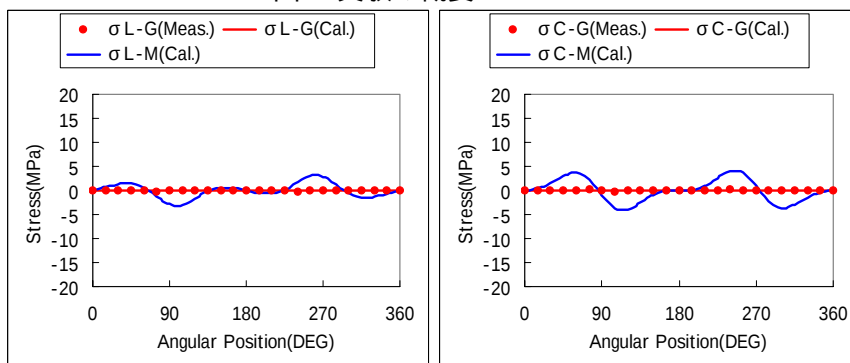


図2 無負荷時の測定結果(左: σ_L , 右: σ_C)

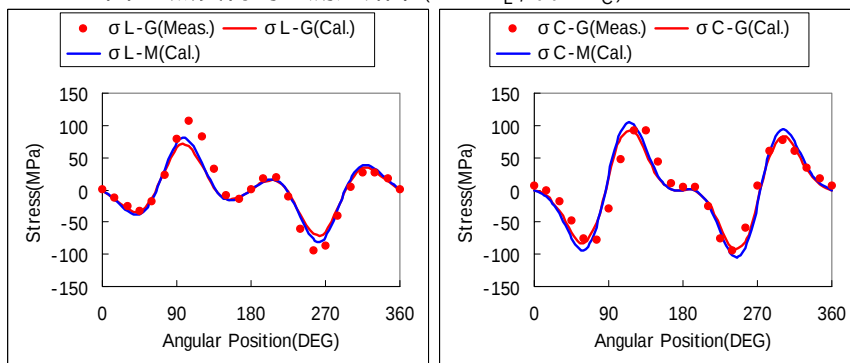


図3 17.7kN負荷時の測定結果(左: σ_L , 右: σ_C)