

曲げ加工をうけた鋼製支保工部材の応力状態に 関する基礎的研究

State of residual stress in curved H-beam used for tunnel support

芥川真一¹⁾・大井健史²⁾・太田道宏²⁾・安原幸二²⁾・口池尚子³⁾・松岡敬⁴⁾・織田卓哉⁴⁾

Shinichi AKUTAGAWA, Kenji OI, Michihiro OTA, Koji YASUHARA, Naoko KUCHIKE, Takashi MATSUOKA and Takuya ODA

A magnetic anisotropy sensor is built on the principle of the magneto-strictive effect in which changes in magnetic permeability due to deformation of a ferromagnetic material is measured in a nondestructive manner, which then can be translated into the absolute values of stresses existing on the surface. This technique was applied to measure stresses of H-beams, used as tunnel support structures, to confirm expected measurement accuracy. The results show that this method could be one of the promising technologies for non-destructive stress measurement for safe construction and probably maintenance of rock structures.

Key Words : Non-destructive stress measurement, NATM tunnel, residual stress

1. はじめに

近年、建設現場において安全性の向上、省力化など多くの理由から情報化施工が強く推し進められている。また、現経済状況下では土木構造物の設備保全は不可欠な懸案事項であると言える。これらの問題を考慮する上で構造物に作用している実際の応力レベルを詳細に知ることは重要である。

一方で、主に現状のトンネルにおいては、内壁面に建て込まれる支保構造部材にひずみゲージを取り付けて得られたデータや他の情報と共に、逆解析により応力場を求めている。しかし、ひずみゲージ設置の煩雑性、コスト削減の面などから、より簡便に測定できる装置は強く望まれるものであるが、近年、磁歪法を用いて応力を測定する装置が開発され、鋼管、鋼橋などの分野で実使用されて成果をあげている^{1),2)}。著者らはこれをトンネル鋼製支保構造部材に対して適用し、その応力状態の計測をこれまでに進めて来た。

磁歪法を用いたこれまでの研究^{3),4)}で、曲げ加工を受けた鋼材には50~150MPa程度の残留応力が生じていることが推定された。これは併行して行った3次元塑性解析結果とオーダーがやや異なる結果を示すものとなった。そこで、本研究では残留応力のオーダーを確認するために、ひずみゲージを貼付してから供試体中央部を切断する方法(セクションング法)を用いて、曲げ加工された鋼材の残留応力を計測することとした。また、切断の前後で磁歪法による計測も行った。本論文では磁歪法、ひずみゲージ法、数値計算の3種類の方法から推定されるH形鋼材の残留応力状態を比較し、トンネルで使用されている重要支保構造部材の応力状態を確認するものである。

1) 正会員 Ph. D. 神戸大学工学部建設学科

2) 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科

3) 正会員 神戸大学工学部建設学科

4) 正会員 中電技術コンサルタント (株)

2. 磁歪法の概要¹⁾²⁾

磁歪式応力測定法では被測定物に対して写真-1のような磁気異方性検出センサ（以下、磁気プローブ）を測定対象物に当てて測定する。この磁気プローブは様々な種類が存在するが、主に4本足を持つ円柱形状（今回の測定に用いたものは直径2cm、高さ3cm）であり、その4本足には対角線上に、それぞれ励磁用コイル（図-1のE1、E2の場所）、検出用コイル（図-1のD1、D2の場所）が巻かれている。今、図-1に示すような応力状態を考えると、被測定物の透磁率（磁束の通りやすさ）は引張り方向にわずかに大きくなっており、磁気異方性が生じている。

磁気プローブを被測定物に置き、励磁用コイルに電流を流すとE1E2間に磁束が流れるがその大部分は直接E1からE2に向かう。しかし一部は矢印の示す経路もたどるが、磁気異方性が生じている場合、E1D1間、D2E2間はE1D2間、D1E2間に比べ透磁率が $\mu_x - \mu_y$ だけ大きいので実際矢印に示す経路に磁束が流れる。このため検出用コイルには電圧が生じることになる。この電圧 V は、

$$V = N(\mu_x - \mu_y) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで N は励磁条件、被測定物の磁気的特性、およびプローブと被測定物の距離（リフトオフ）などによってきまる定数である。

透磁率の異方性は主応力差に比例するので、結果として

$$V = k(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (2)$$

と表せる。ここで σ_1 、 σ_2 は被測定物に作用している主応力、 θ はプローブ方向と σ_1 方向とのなす角、 k は応力感度である。プローブ方向とは図-2で矢印の方向である。応力感度とは応力と出力電圧を関係づける係数であり、材料によって異なるため、あらかじめその材料について応力と出力電圧との関係を示す較正曲線を作っておく必要がある。この応力-出力電圧関係は被測定材が弾性挙動範囲内ではある程度の線形関係を示し、工学的に取り扱える性質を有する。しかし、塑性挙動範囲になると、この関係がくずれるため注意する必要がある。

従って、応力と出力電圧とを関係づける係数 k があらかじめ既知である必要があるが、このプローブを回転させて出力電圧が最大になる方向を求めれば、そのときのプローブ方向が主応力 σ_1 の方向であり、出力電圧から主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ を求めることができる。プローブで測定されるのは主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）とその方向（ θ ）のみであるから、個々の主応力を求めるためにせん断応力差積分法を用いて計算を行う。この磁歪式応力測定装置で求める応力は、非測定物の表面から約0.2mmまでの平均応力である。



写真-1 磁歪式応力測定センサー

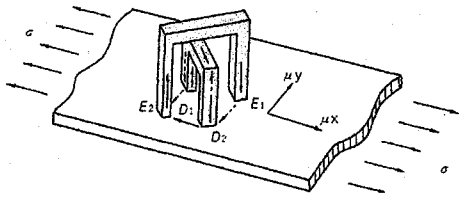


図-1 センサーの構造と応力状態

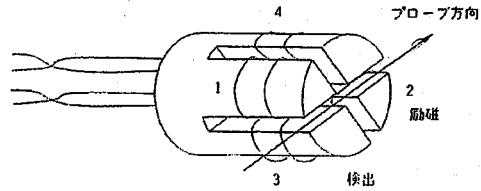


図-2 センサーの細部構造

またその精度としては、橋梁分野への適用例²⁾から 10～20MPa 程度の誤差であることが分かっており、それは鋼材の応力状態を把握する目的で用いた場合、降伏応力 (250MPa 以上) を考慮すると工学的には十分な解像度を有していると考えることが出来る。

3. これまでの経緯

これまでの研究^{3),4),5),6)}で、実際のトンネルにおいて磁歪法を用いて支保構造部材の応力を測定し、既設のひずみゲージデータや設計計算値との比較を行った。また、トンネル支保工に用いる部材は、圧延加工された真っ直ぐな H 形部材を冷間曲げ加工することにより作成されるが、その前後においてどのような応力変化が生じるのかについても磁歪法による計測を行った。その結果、本研究で用いた磁歪センサーは 10～20MPa 程度の誤差で応力の絶対値を読み取ることが確認できた。また、曲げ加工を受けた H 形部材についてはその中央部付近でフランジ、ウェブとも 50MPa から 150MPa 程度の残留応力が表面に存在していることが推定される結果となった。これは、通常の鋼材の降伏応力が 250MPa 程度であることを考えると無視できない大きさであり、設計計算においても考慮を要すると思われる大きさである。

そこで、実際に冷間曲げ加工によってそのような大きな残留応力が発生するのかどうかを別の角度から検討するために汎用有限要素解析ソフト ABAQUS/Standard を用いて大変形塑性解析を行った。この際、解析に用いた鋼製支保工モデルは、200×200×8×12(mm)の H 形鋼であり、対称性を考慮し、図-3 のように全長 1m の半分とした。実際の部材は全長が約 2m であるが、この解析ではモデルの全体に渡って均等な曲げ変形を生じさせるため、その一部分だけをモデル化することとした。これには計算時間を短縮する目的もある。モデルは 3 次元ソリッド要素を用いて作成した。

今回の解析では、部材の中央が固定端の部分にあると考え、その反対側の面に強制的な回転変位を与えることにより、曲率半径が 6000mm となるように曲げ加工解析を行った。また、ここでは簡単のため圧延加工により生じる残留応力は考慮しないもの（即ち解析の初期段階で応力はゼロ）とした。解析で用いたヤング率は 2.1×10^5 MPa、ポアソン比は 0.3 である。また、破壊基準は Von-Mises を用いた。

解析で得られた曲げモーメント応力と回転角を用いて、載荷力とひずみの関係を図-4 に示す。解析では、図-4 のように弾塑性的に曲率が与えられていき、曲率半径 6000 mm となるように弾性的に除荷が行われることを考慮して必要回転角を決定した。

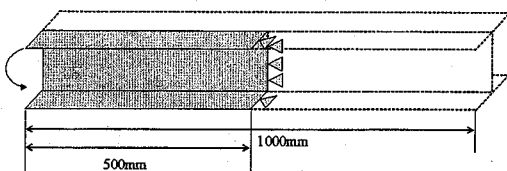


図-3 全長 1m 部材の半分のモデル

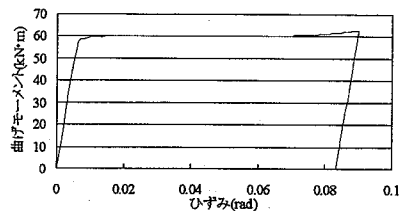
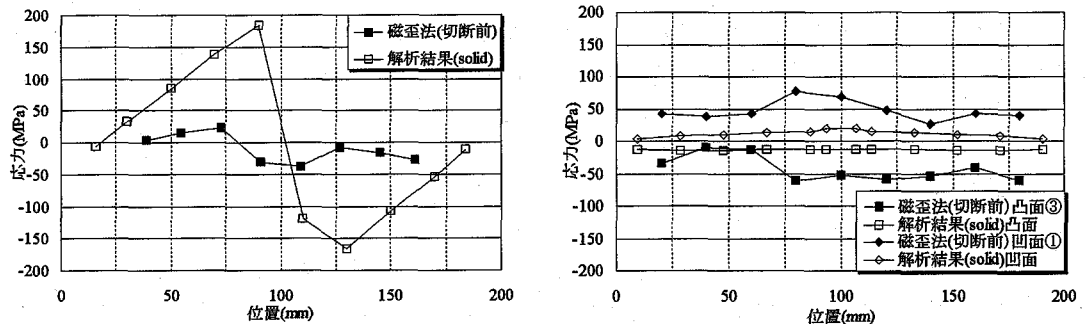


図-4 曲げモーメント力と回転角の関係

図-5に曲げ加工終了時の応力状態の比較を示す。磁歪法のデータは曲げ部材について曲げ加工終了後載荷実験を行っているが、基本的に曲げ加工終了後のデータと考えてよい。この比較から、ウェブについては解析の方が大きな残留応力の存在を示唆しているのに対し、磁歪法では小さな計測値が得られている。一方、フランジについては、凸側、凹側ともに、解析結果よりも磁歪法による計測結果の方が大きな残留応力の存在を示している。このように、応力値の符号が概ね整合しているのに対し、絶対値が大きく異なることについては解析の初期における残留応力の取り扱いなどを含め、不明な点が多いため、実際に部材を切断することによって開放ひずみを計測し、そこから、残留応力の絶対値を確認することが必要と考えた。



(a) ウェブ面の残留応力比較(左が凸面, 右が凹面)

(b) フランジ面の残留応力比較

図-5 残留応力比較

4. 切断実験

残留応力分布の様子と応力値を検証するために、長さ 2000mm、曲率半径 6000mm に塑性加工された H200×200×12×8 の鋼製支保工の中央部(軸方向 140mm)にひずみゲージを図-6 のように貼付し、切断実験を行った。切断の方法は写真-2 のような機械を用いて、図-6 における切断線 1、切断線 2 の順に切断した。また、切断前後に磁歪法による応力計測を行った。その際の計測位置は図-7 の通りである。計測に用いたひずみゲージは東京測器研究所の 3 軸ひずみゲージ(型番: FRA-3-5-11L)である。

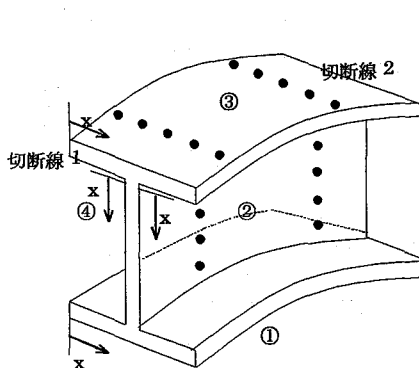
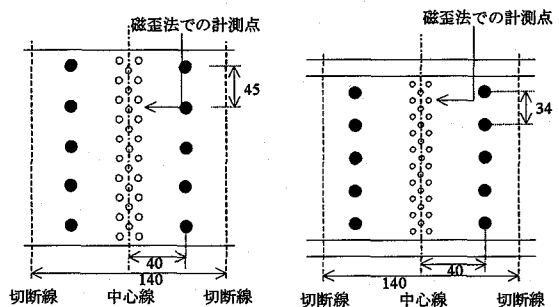


図-6 H鋼の切断線(黒丸はひずみゲージ)



(a) フランジ面

(b) ウェブ面

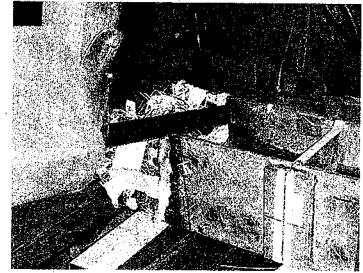
図-7 磁歪法の計測位置、

およびひずみゲージの貼付場所(mm)

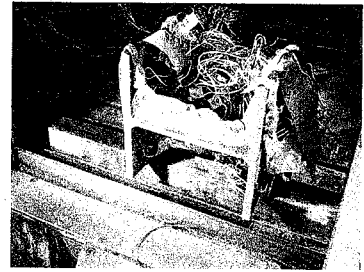
切断前後での磁歪法による計測結果(絶対値及び変化分 ΔY (=切断前-切断後)), 切断後のひずみゲージ法による計測結果を図-8 に示す。ひずみゲージ法による値は 3 軸ゲージのうち、H 鋼の軸方向に平行なゲージのデータのみを用いた。また、取得されるデータは切断によって生じる開放ひずみであるため、計測によって得られた値にヤン

グ率 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ をかけ、さらに符号を反転させたものを「切断前に存在していた残留応力」としてデータ処理した。切断中におけるひずみゲージの値は随時得られたが、ここでは最終の値だけを示す。ここで、磁歪法による測定値は鋼材の中心線上での値であり、また、ひずみゲージ法での測定値は鋼材の中心線に対して対称に位置する2つのゲージの値を平均して求めた。ここでは、切断前後の磁歪法による計測結果の差がひずみゲージから求められる開放応力と等しくなるかどうかを検討のポイントとなる。

フランジ面については磁歪法による測定値($\angle Y$)が概ね 30MPa 程度以内であるのに対し、ひずみゲージによる値もそれとほぼ同程度となっている。凸面と凹面でデータの大小関係が入れ替わっているが、その原因は不明である。ウェブでは、磁歪法による値($\angle Y$)が凸側で 20MPa (引張り) 程度、凹側で 50MPa 程度 (圧縮) となっているのに対し、ひずみゲージによる値は 50MPa (引張り) から 100MPa (圧縮) 程度となっている。正負の符号は合致しているが、ひずみゲージによる値はウェブの端部 (フランジに近い部分) になるほど磁歪法による値よりも絶対値として大きな残留応力があつたことを示している。これらのデータを図-5 に示した解析結果と比較すると、フランジについては概ねオーダーが一致しているといえる。しかし、ウェブについては解析結果は非常に大きな残留応力を出しており、またその分布形状も実験結果とは異なるようである。これは先にも述べたように、圧延後の冷却過程で生じる残留応力分布を初期状態として解析に取り入れていないことなどが原因となっていると思われるが、その点は今後の課題である。

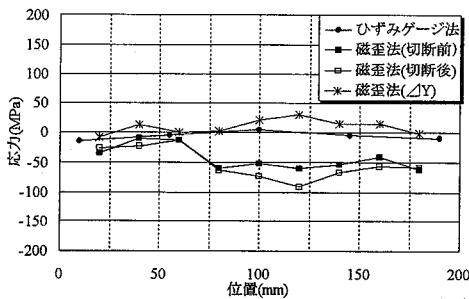


(a) 切断の様子

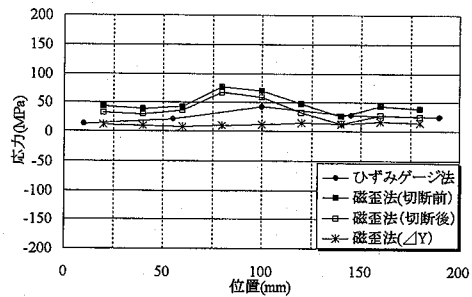


(b) 切断面

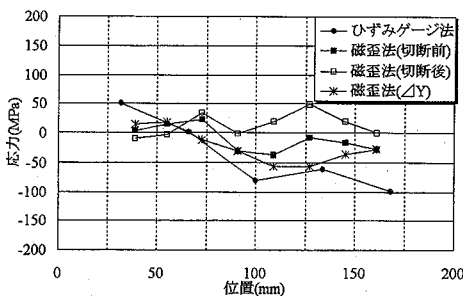
写真-2 切断の様子



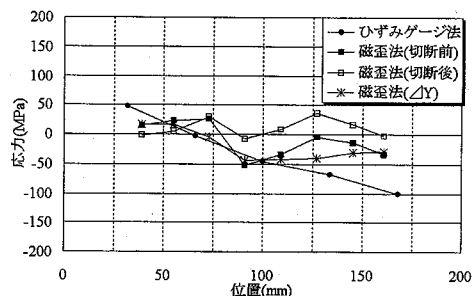
(a) フランジ凸面③



(b) フランジ凹面①



(c) ウェブ面④(左が凸面, 右が凹面)



(d) ウェブ面②(左が凸面, 右が凹面)

図-8 切断前後の磁歪法およびひずみゲージデータの比較

また、図-8において切断後の磁歪法データに注目すると、フランジで70～80MPa程度、またウェブでは40～50MPa程度の残留応力が残っていることを示唆している。切断された中央部は幅が14cmとなり、かなり小さなブロックとなっているため、この状態でもまだそのようなオーダーの残留応力が存在しているのかどうかは第2次の切断実験で確認する予定である。

5. まとめ

NATMトンネルで重要な支保構造部材として用いられている冷間曲げ加工により作成されているH型鋼について、その応力状態を磁歪法、数値計算、および切断を伴うひずみゲージによる計測によって計測し比較した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) ここで用いた磁歪式応力測定装置の測定精度は10～20MPa程度であることが分かった。
- 2) 圧延後の冷却過程で生じる残留応力を考慮しない場合の大変形塑性解析においては、フランジの残留応力は他の方法で求めたものと同程度あるいはやや小さ目のオーダーとなったが、ウェブについては非常に大きな残留応力が得られた。これについては、他2手法のデータのオーダーがほぼ等しくなっていることから、計算の方法（初期応力の設定など）に不備があることが推定される。これは今後の検討課題である。
- 3) 切断の前後で計測されたデータについては、フランジ、ウェブともに磁歪法とひずみゲージによる計測結果が概ね同程度のオーダーとなった。また、符号についてはともに一致した。このことから磁歪法による計測結果は信頼できるものであることが確認できた。
- 4) 幅14cm程度の小さなブロックとなった状態でも、磁歪法では数十MPa程度の残留応力がいまだに存在していることが推定されるため、この原因については第2次の切断実験（このブロックをさらに再分割する実験）によって確認する必要があることが分かった。

謝辞

切断実験の際に切断機を快くお貸しくださった兵庫ベンダー株式会社の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 境 慎明, 清水謙司, 小川安雄, 塩川征夫: 磁気異方性を利用した鋼管自動応力測定システム, センサー技報, 12巻8号, p76-81, 1992.
- 2) 村井亮介, 池田誠, 安福精一: 磁歪応力測定法の鋼橋への適用に関する研究(第1報: 製作・据付各段階における応力変化の測定), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, vol.6, pp.306-307, 1999.
- 3) 芥川真一他: 磁歪法によるトンネル支保構造物の応力測定の可能性について, 第12回トンネル工学研究発表会論文・報告集, pp.247-252, 2002.
- 4) 芥川真一他: 磁歪法によるトンネル支保構造部材の曲げ加工後の応力測定, 第12回トンネル工学研究発表会論文・報告集, pp.253-256, 2002.
- 5) S.Akutagawa, M.Ota, K.Yasuhara, K.Matsuoka and T.Oda: Application of magnetic anisotropy sensor for nondestructive stress measurement of support structures used in construction of underground space, Proceeding of The 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment, pp.359-364, 2003.
- 6) S. Akutagawa, K. Matsuoka, H. Sekimoto, T. Kobayashi, T. Uda, M. Ota and K. Yasuhara: Use of Magnetic Anisotropy Sensor for Nondestructive Stress Measurement of H-beams Used in Tunnel Support Systems, Proceedings of the 39th US Rock Mechanics Symposium, MIT, pp.2691-2696, 2003.