

NATM トンネルで使用する鋼製支保工部材の 応力状態に関する検討

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

芥川真一*・大井健史**・太田道宏**・安原幸二**・口池尚子***

Shinichi AKUTAGAWA, Kenji OI, Michihiro OTA, Koji YASUHARA, Naoko KUCHIIKE

A magnetic anisotropy sensor is used for nondestructive measurement of stress on surfaces of a ferromagnetic material, such as steel. The 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 of the material. Proper treatment of boundary conditions allows determination of stress tensor completely on surfaces of H-beam flanges, for example. 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 of underground structures.

Key Words: H-beam, 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重要な懸念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等から逆解析により実際の応力場を求めている。しかし、ひずみゲージ法の煩雑性、コスト削減の面などから、より簡便に測定できる装置が望まれるものであるが、近年、磁気を用いて応力を計測する装置(磁歪式応力測定法(以下、磁歪法))が開発され、鋼管、鋼橋の分野で実使用され成果をあげている^{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きた。

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。そこで今回、この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共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。一回の切断では応力解放が十分でなかったため、さらに切断を試み、応力解放を試みた。また、一回目の切断前後での磁歪法による計測も行った。本論文ではひずみゲージ法、磁歪法から推定される残留応力の比較をし、トンネルで使用されている鋼製支保工部材の応力状態を確認するものである。

* 正会員 Ph.D. 神戸大学 工学部 建設学科

** 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程

*** 正会員 神戸大学 工学部 建設学科

2. 磁歪法の概要^{3),4),5),6)}

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 $\mu_x - \mu_y$ だけ大きいので実線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 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。また、この磁歪式応力測定装置で求まる応力は、非測定物の表面から約0.2mmまでの平均応力である。

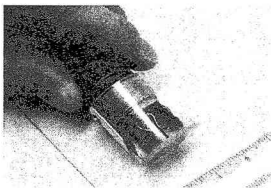


写真-1 磁歪式応力測定センサ

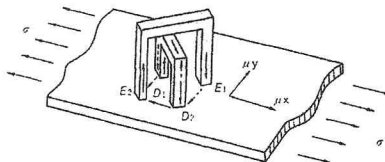


図-1 センサの構造と応力状態

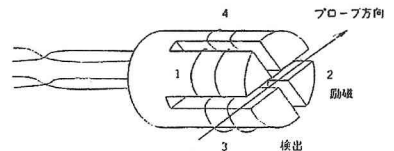


図-2 センサの細部構造

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計測し、既設のひずみゲージデータ、設計計算値との比較を行った。また、トンネルに用いられる支保構造部材は真っ直ぐなH形鋼を冷間曲げ加工することによって作成されるが、その曲げ加工前後でどのような応力変化が生じるか磁歪法を用いて計測を行った。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、曲率半径6000mmとなるような曲げ加工を受けたH形鋼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100MPa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(図-3、4)。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、この残留応力のオーダーが確かなものであるかを確認するため、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であると考えた。

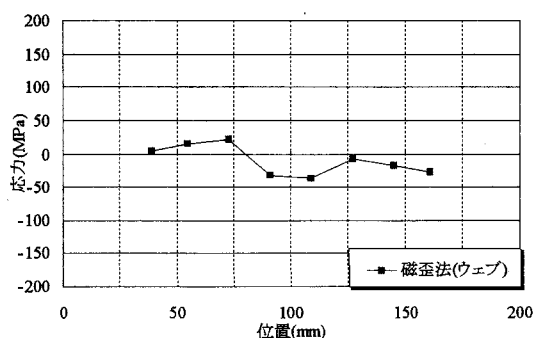


図-3 ウェブの応力状態

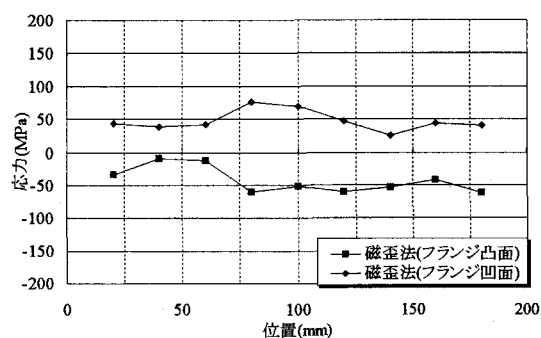


図-4 フランジの応力状態

4. 切断実験

残留応力分布と応力値を確認するために、長さ2000mm、曲率半径6000mmのH形鋼の中央部に図-5のようにひずみゲージを貼付し、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-5における切断線1、切断線2の順に切断し、その両切断線の間隔は14cmである。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-6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。

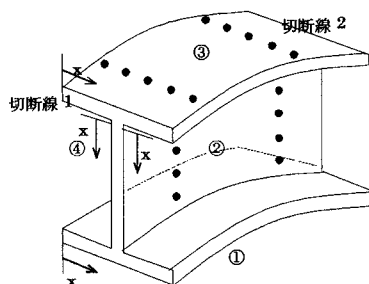


図-5 H形鋼の切断線(黒丸はひずみゲージ)

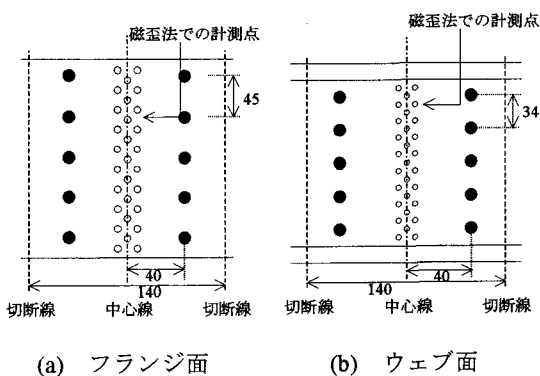


図-6 磁歪法の計測位置、

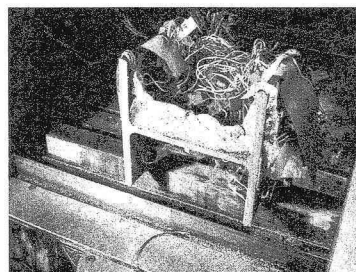
およびひずみゲージの貼付位置(mm)

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 (=切断前一切断後)), 切断後のひずみゲージ法による計測結果を図-7に示す. ひずみゲージ法による値は3軸ゲージのうち, H形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.

フランジ面については磁歪法による測定値(ΔY)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(ΔY)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.

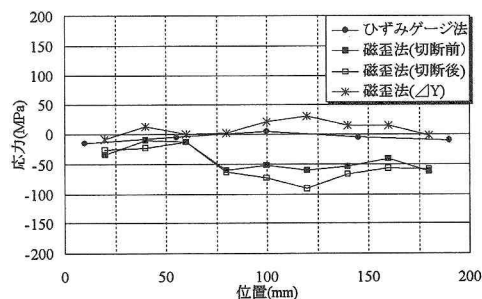


(a) 切断の様子

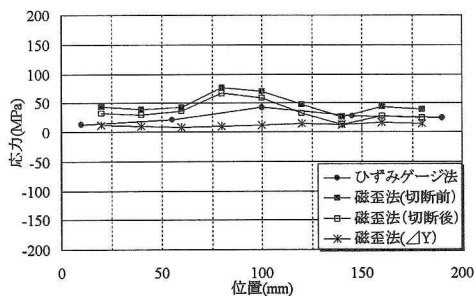


(b) 切断面

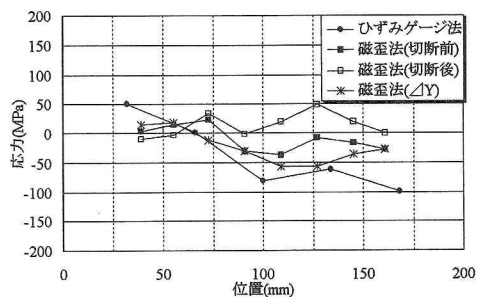
写真-2 切断の様子



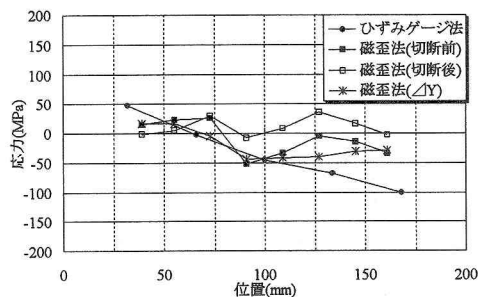
(a) フランジ凸面③



(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-7 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-7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

検証するため、さらに小さなブロックに切断した。

2回目の切断は、1回目の切断実験で幅14cmとなった鋼材の中央部に新しくひずみゲージを貼付、図-8に示すように切断線1,2の順に切断した。その後、中央部分のウェブとフランジを切り離し片2.5cmとなるように細断した。

中央部分でのひずみゲージ法による計測結果と1回目の切断前後での磁歪法での測定結果を図-9に示す。図-9でのひずみゲージ法の値は1回目の切断実験と同様の方法でデータ処理を行った。

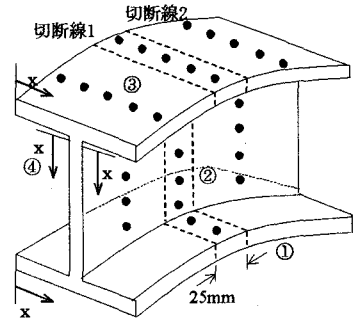
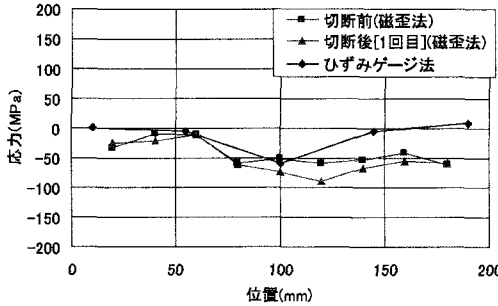
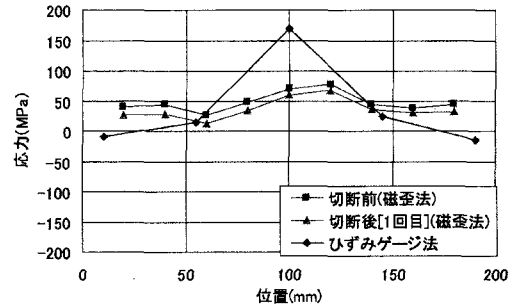


図-8 切断線



(a) フランジ凸面③

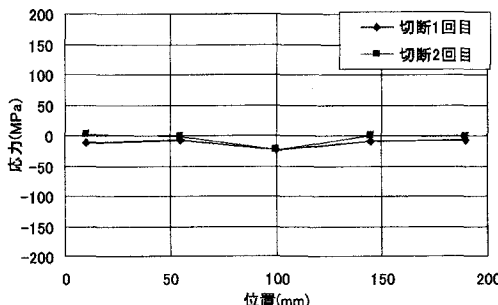


(b) フランジ凹面①

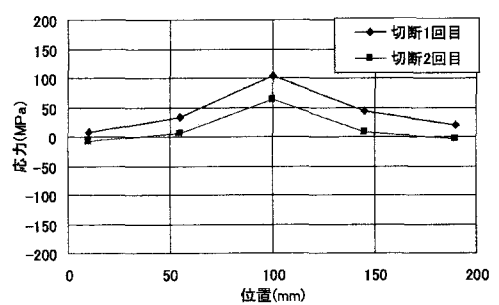
図-9 計測結果

図-9においてひずみゲージでの測定結果と1回目の切断後の磁歪法とを比較するとフランジ凸面では中心付近ではほぼ一致した値であるが、端部に行くにつれてその差が大きくなっている。また、それとは逆にフランジ凹面では中心部で大きく異なった値を示している。

切断線1側において切断1回目と2回目の比較を行ったグラフを図-10に示す。ここで、切断1回目の値は1度目の切断でひずみゲージによって計測された値と2度目の切断で計測された値とを足したものである。つまり、切断前に鋼材に存在していた残留応力を示すものとなる。



(a) フランジ凸面③



(b) フランジ凹面①

図-10 切断線1での切断による応力変化

図-10の切断1回目と図-9での磁歪法による切断前の値は計測位置が異なるため、単純には比較できるものではないが、簡便のため比較すると20MPa程度の差が生じていることが確認できる。また、さらに小さく鋼材を細断したが、それによる応力変化はほとんど見られなかった。最後に、今回の切断実験の際に用いたH形鋼のこれまでの応力変化の履歴を図-11に示す。ここでの最大曲げピークの値は鋼材の降伏応力を示している。

5. まとめ

NATM トンネルで鋼製支保工部材として用いられている冷間曲げ加工によって作られる H 形鋼について、その応力状態を磁歪法と切断に伴うひずみゲージ法によって計測した。今回の 2 度における切断実験の結果わかったことは以下のとおりである。

- 1) 1 度目の切断で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。
- 2) 1 度目の切断で幅 14cm のブロックになった状態でも磁歪法で計測すると、まだ数十 MPa の残留応力が存在することが推定された。そこで 2 回目の切断を行いさらに小さなブロックにすることで、ほぼその残留応力が開放されていることが確認できた。このことから冷間曲げ加工された H 形鋼には 50～100MPa 程度の残留応力が存在していることが分かった。

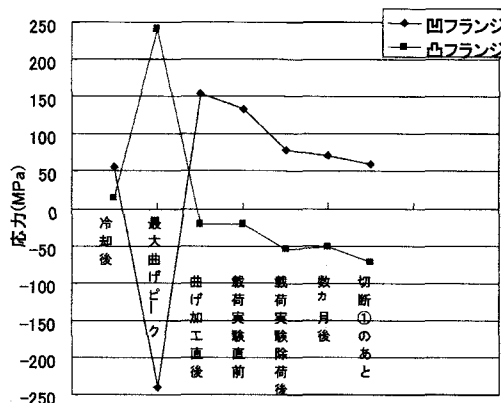


図-11 H 形鋼の応力履歴

謝辞

磁歪センサーによる計測においては中電技術コンサルタント（株）松岡氏、織田氏にご協力いただいた。また、切断実験においては兵庫ベンダ株式会社、神戸工業試験所の諸氏にご協力いただいた。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 境 禎明, 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, pp76-81, 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.