

磁歪法によるトンネル支保構造部材の 応力測定の可能性について

THE POSSIBILITY OF A NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF STRESS TENSOR ON SURFACES
OF H-BEAMS USED FOR TUNNEL SUPPORT BY USING A MAGNETIC ANISOTROPY SENSOR

芥川真一¹⁾・松岡敬²⁾・関本宏³⁾

小林正治⁴⁾・安原幸二⁵⁾

Shinichi AKUTAGAWA, Takashi MATUOKA and Hiroshi SEKIMOTO

Tadaharu KOBAYASHI and Koji YASUHARA

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 magnetostrictive effect in which changes in magnetic permeability due to deformation of a ferromagnetic material. And it can show the absolute values of stresses existing on the surface of the material. Proper treatment of boundary conditions allows determination of stress tensor completely on surface of H-beam flanges, for example. And then we try to use the sensor first to measure stresses on surfaces of four straight H-beams having the length of 2m which is used as structural elements in tunnel support systems.

Key words: stress measurement, magnetostriction method

1. はじめに

「トンネルや地下空洞の支保構造にどのような荷重が作用しているか？」を知ることは岩盤工学、トンネル工学などにおける設計、施工、計測など一連の作業が最終的にどのような結果に収斂したかを確認するために必要な重要事項の一つである。現在、支保構造物の負荷応力を求める手法としては、ひずみゲージを用いる方法が一般的であるが、この方法は支保構造物に発生する相対的なひずみを求めるものである。したがって既設構造物に作用している応力を求める場合には、応力開放という破壊的な方法をとらなければならない。応力の非破壊測定方法として、金属材料の電磁誘導の原理を利用し、その表面の応力状態を計測できる磁歪法と呼ばれる応力測定法¹⁾³⁾がある。この測定方法は強磁性体材料を対象として開発が行われてきた技術であり、金属試験片、橋梁部材などを対象としてその適用性は確認されている³⁾。そこで今回は磁歪法を用いて、トンネルで用いる支保工であるH鋼に生じている表面応力を計測することにした。その第一歩として、まず工場製作段階のまだ曲げ加工処理の行われていないH鋼材を対象として載荷荷重のない時の応力測定を試みた。

1) 正会員 Ph.D. 神戸大学 工学部 建設学科

2) 正会員 中電技術コンサルト

3) 正会員 阪神高速道路公団

4) 正会員 前田建設

5) 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程

2. 磁歪法の原理

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 E_1 、 E_2 の場所）、検出用コイル（図-1 の D_1 、 D_2 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。

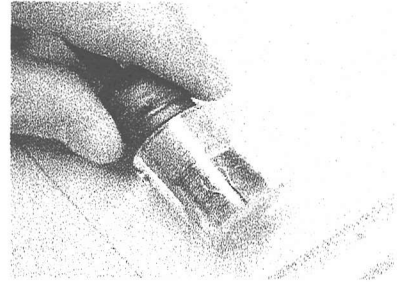


写真-1 磁気プローブ

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 E_1E_2 間に磁束が流れるがその大部分は直接 E_1 から E_2 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、 E_1D_1 間、 D_2E_2 間は E_1D_2 間、 D_1E_2 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 $\mu_x - \mu_y$ は主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ 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。今回は弾性挙動範囲内の部材を対象とするので応力-出力電圧関係は線形関係と近似する。

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後述するせん断応力差積分法を用いて計算を行う。

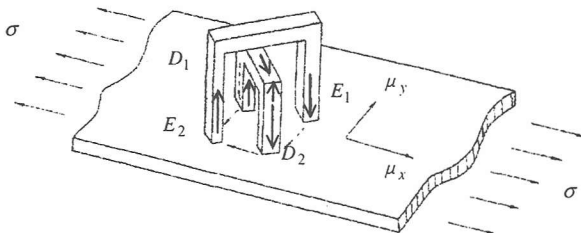


図-1 被測定物上の磁気プローブ

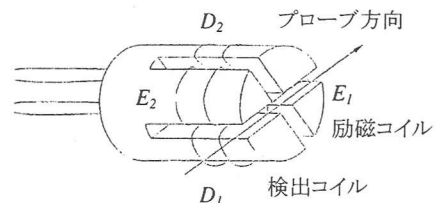


図-2 磁気プローブ

図-3 に示すように被測定物表面に x,y 軸を設け、それぞれに平行な一辺が約 20mm 程度の正方形を考え、この面を上面とする厚さ s の直方体に作用する力の釣り合いについて考える。この厚さ s は磁界の浸透深さ程度を考え、

$$s = \left(\frac{\rho}{\pi f \mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 ρ は比抵抗、 f は励磁コイルに発生させる電圧の周波数、 μ は透磁率である。鋼鉄では $\rho = 10^{-7}$ [Ωm]、透磁率 $\mu = 500 \times 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] (ただし真空の透磁率を $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] とする。H(ヘンリー)とは電磁気学におけるインダクタンスの量の単位である。)、本測定装置で用いた $f = 1[\text{kHz}]$ を考慮すると、 $s = 0.23$ [mm] となる。つまり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ことがわかる。

この直方体の各面に作用する平均応力を図-3 に示すように、面に垂直な成分 σ と平行な成分 τ とに分けて考える。まず磁気プローブを用いて a, b, c, d 点の、 θ と $\sigma_1 - \sigma_2$ の値を求める。ここで θ は主応力 σ_1 と x 軸とのなす角であり、 σ_1 の方向から反時計回りに x 軸までの角度として測定する。それらの値を式(4)に代入することにより各点のせん断応力 τ_{xy} ($\tau_a \sim \tau_d$) を求める。式(4)は弾性解によるものである。

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta \quad (4)$$

次に直方体の上面(板の表面)と下面(深さ s のところに考えた面)に応力は作用しないと仮定すると、x 方向の釣り合いから、

$$\sigma_c = \sigma_a + (\tau_b - \tau_d) \quad (5)$$

となる。ここで、先ほど求めておいた b 点、d 点の τ_b , τ_d を式(4)に代入することにより、c 面に作用する垂直応力 σ_c が a 面の σ_a に対する増分として与えられることになる。もし a 面として被測定物の端面を選べば、 $\sigma_a = 0$ であるから σ_c そのものが求まる。このような測定を繰り返すことで図-2 の e 点、f 点…等における σ_x を順次求めることができる。しかし、誤差を次々と積算していくことになる。このように各点(c, e, f, …)での σ_x が求まると、 σ_y は弾性解析より、

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (6)$$

として各点(c, e, f, …)の y 方向の応力を求めることができる。

$$p = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y \quad (7)$$

であり、

$$q = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (8)$$

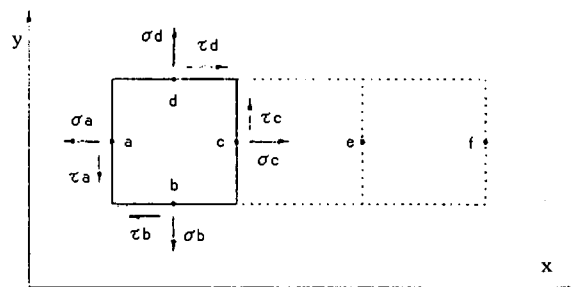


図-3 直方体成分の応力分布

とおくと q はプローブによる測定で得られる値であり、主応力は、

$$\sigma_1 = (p + q) / 2 \quad (9)$$

$$\sigma_2 = (p - q) / 2 \quad (10)$$

として求めることができる。

3. 鋼製支保工の応力測定

(1) 応力計測の方法

実際の応力計測では、応力分布を求めたい位置に図-4 の様な H 鋼の幅(今回のケースでは 200mm)方向に計測線を定めたガイド紙を貼り付け、1 列 10 点、3 列計測で合計 30 点の計測を行う。計測の後、フランジ両端部で $\sigma_x = 0$ となっていることを条件として、2. で示したせん断応力差積分法を用いることで 3 列中の真ん中の列の σ_x 、 σ_y 分布を計算し、求めることができる。具体的には図-3 の a,b,c,d,e が図-4 の a,b,c,d,e 点に対応してせん断応力差積分法を用いる。ウェブ面に関してはフランジの厚さ分、計測線長さが異なることを考慮し、フランジ面と同様の方法で異なるガイド紙を作成し計測に用いた。

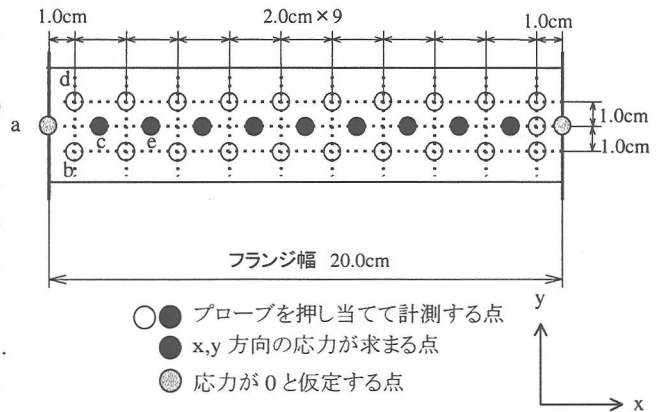


図-4 応力計測点位置ガイド紙

(2) 鋼製支保工(直線部材)の応力測定

サンプル供試体として、4 本の H 鋼直部材を用意した。それぞれの中央部分において上下フランジ面、左右ウェブ面の合計 4 面に計測線を配置し、無荷重状態で部材表面の応力測定を行った。応力測定の実際の状況を写真-2 に示す。測定データは代表的な鋼材(SS400)の誘導電圧-応力の感度直線を仮に使用することとして処理した。それぞれ 4 本の供試体の上下フランジ面、左右ウェブ面における応力測定結果を図-5 に示す。ただし引張を正とする。図中の S-1,R6000 等とは各部材の名称である。フランジ、ウェブのそれぞれに初期残留応力が存在することが確認された。特にフランジ中央部分においてはその大きさが 20~100MPa 程度であることが分かった。このことは文献 4)においても既に記載されているとおり、応力の値、分布傾向ともに合致している。またこのような傾向が現れる理由として、ローラー加工部材の冷却期間に、ウェブ部分とフランジ中央部同士が共に引っ張り合う形となって応力を生じさせたためだと考えられる。ウェブ左右面のフランジ結合部では引っ張り応力と圧縮応力が対照的に発生している。これは H 鋼製作時の冷却期間にウェブ面のどちらかに偏った応力集中が起き、そのため左右符号が異なる応力状態が生じたも

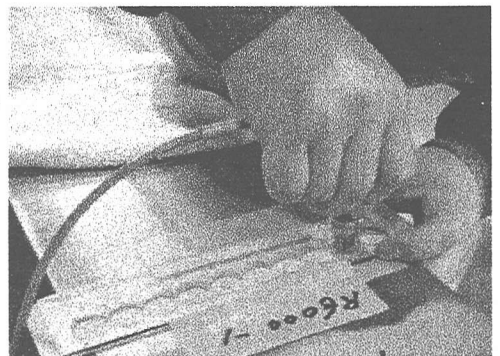


写真-2 実際の応力測定状況

のと考えられる。ウェブ中央部では左右両面とも圧縮応力が発生している。部材どうしの比較を行うと、4 本すべて上下フランジ面、左右ウェブ面において、応力の大きさ、分布傾向とも似ていることが確認できる。

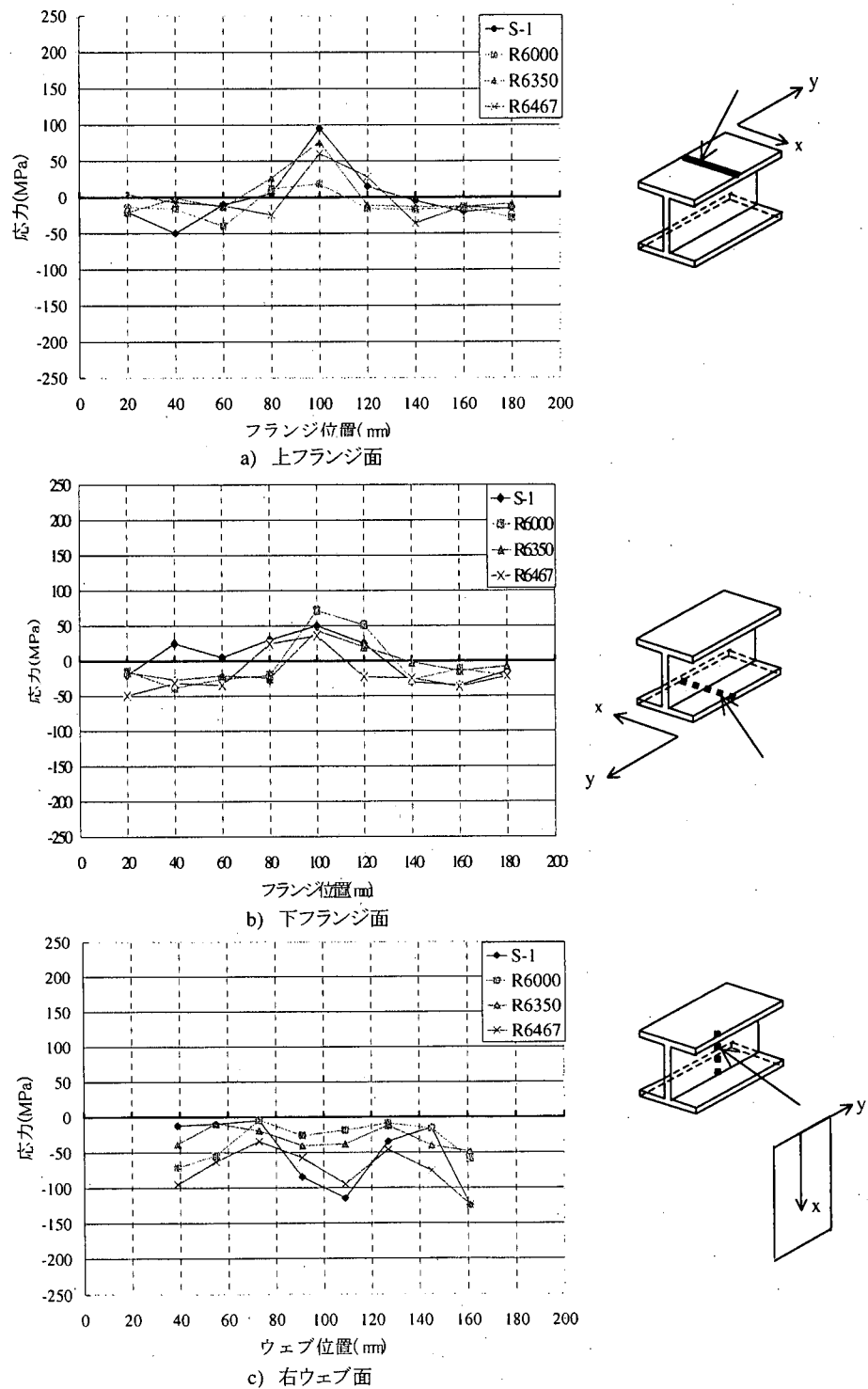


図-5 直線部材の軸方向応力分布

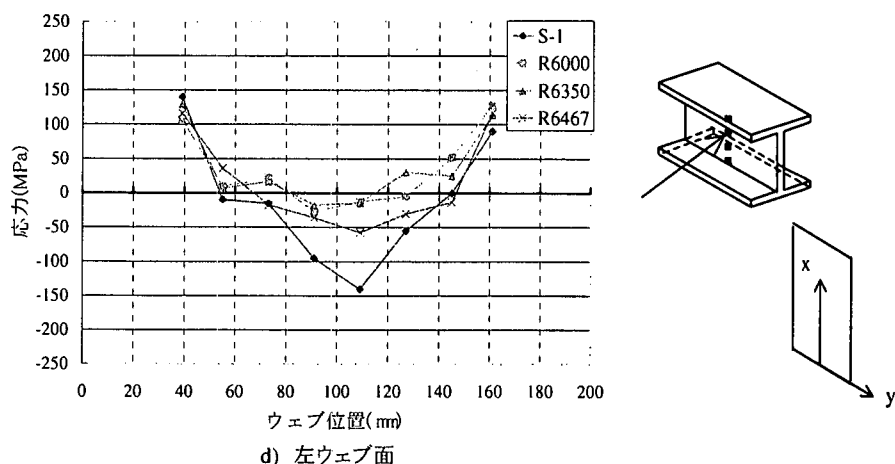


図-5 直線部材の軸方向応力分布(続き)

4. まとめ

今回用いた磁歪法センサーの測定誤差は10~20MPaであることが分かっている³⁾。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、最終破断応力のレベル(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。この計測方法では材料が塑性化した場合のデータ処理においてまだ改良の余地があるが、低応力状態から降伏応力状態に達するまでのプロセスを計測することは十分に可能である。また、あらかじめ配線などをしなければ使えない多くの計測装置(変位計、ひずみゲージ)とは対照的に「計測したい場所ですべて測れる」という利点を持っている。また、塗装などの表面処理があっても計測に問題はない。

今回トンネル構造物への適用への第一歩として鋼製支保工として用いられているのH鋼の応力測定を行った。特に今回は工場製作段階の真っ直ぐな部材を対象とした。その結果として、文献4)にも指摘されているように、無荷重状態においてもすでに残留応力が発生していることが確認された。磁歪法によって求めたデータの処理においては金属の応力履歴を分析した必要であることから、今後も詳細な検討が必要である。複数の部材を測定することにより、普遍性も確認できた。

今後の課題として、今回対象とした鋼製支保工に曲げ加工を施した状態、あるいは現場において荷重履歴を受けていく過程での応力測定が簡便に行えるかどうかについて検討を進めていくことである。

謝辞 今回研究に御協力していただいた中電技術、兵庫ベンダーの関係各位、また神戸大学工学部建設学科口池技官に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 壇上賢一：磁気異方性を用いた応力測定技術の開発、プラントエンジニア、pp.42-49、1991.
- 2) 柏谷賢治：磁気センサーによる残留応力の非破壊測定法、機械の研究、Vol.41、No.5、pp.40-44、1989.
- 3) 安福精一他：磁気を用いた鋼構造物の応力測定、橋梁と基礎、pp.33-39、2001.
- 4) 土木学会：座屈設計ガイドライン、鋼構造シリーズ2