

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

NON-DESTRUCTIVE STRESS MEASUREMENT OF H-BEAMS BEFORE AND AFTER MECHANICAL BENDING BY USING A MAGNETIC ANISOTROPY SENSOR

芥川真一¹⁾・松岡敬²⁾・関本宏³⁾

小林正治⁴⁾・太田道宏⁵⁾

Shinichi AKUTAGAWA, Takashi MATUOKA and Hiroshi SEKIMOTO

Tadaharu KOBAYASHI and Michihiro Ota

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. We try to introduce this method to tunnel support system. And firstly we used the sensor to measure stresses on surfaces of four straight H-beams having the length of 2m. This time we bent three of them in a factory to make curved H-beams for tunnel support with approximate radius of 6m, for which the second measurement was conducted.

Key words: stress measurement, magnetostriction method

1. はじめに

建設現場において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。トンネル構造物においても同様の事が言える。しかし現在のトンネル支保構造(H 鋼部材)に働く応力計測はひずみゲージ法が一般的である。この方法でも測定点数を増やすことで実際の応力状態を知ることは可能である。しかし、ひずみゲージ設置の煩雑性などから、現実には測定点の増加は難しく、逆にコスト削減の面から省略されることも多い。よって現在、応力レベルを直接、かつ簡便に測定できる測定法は強く望まれている。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がある¹⁾²⁾。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、そのような応力測定法を用いてトンネル支保構造部材(H 鋼)の応力測定を行うことが可能かどうかを検討した⁵⁾。その結果、適用が十分可能であることが判明したためトンネルで用いられる代表的な支保構造部

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

材であるH鋼について曲げ加工を行う前後でどのような応力状態がH鋼に発生しているかを計測することを試みた。

2. 磁歪法の特徴

磁歪法では被測定物(鋼などの強磁性体)の透磁率が応力状態によって変化すること(磁気異方性)を利用し、磁気プローブを被測定物に押し当てて回転させることによって得られた最大出力電圧とその方向を鋼材の応力感度を用いて主応力差と最大主応力の方向に換算する。測定点列の上下にも同様に測定を行うが、これは上下部で得られた値と被測定物の端部(フランジ両端部)での応力境界条件を考慮し、せん断応力差積分³⁾⁵⁾を行うことで、主応力差とその方向として得られた結果を測定点列での x , y 方向応力に分離することが可能となるからである。またこの装置で測定される応力は励磁コイルに発生させる電圧の周波数などの条件により、表面から深さ約0.23mmまでの平均応力として求まる。

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-1 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、フランジ両端部での応力の境界条件を利用して、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。

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。

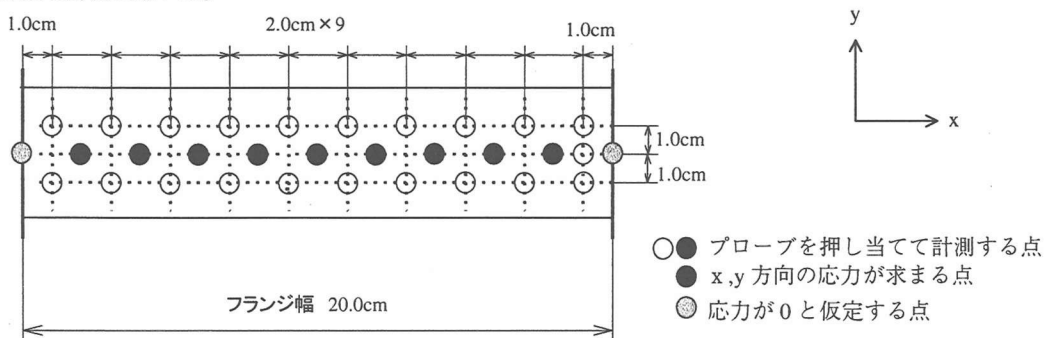


図-1 応力計測点位置ガイド紙

(2) 鋼製支保工(曲げ加工を施した部材)の応力測定

磁歪法で応力測定を終えた直線部材を写真-1に示すベンダー機で曲率半径が約6mとなるように曲げ加工を行った。そして直線部材の応力計測点と同じ個所である梁の中央部(上下フランジ面、左右ウェブ面)において、磁歪法を用いて部材表面の応力を計測した。測定データは代表的な鋼材(SS400)の誘導電圧-応力の感度曲線を仮に使用することとして処理した。曲げ加工前、後の結果を合わせて、代表として1本の部材の上下フランジ、左右ウェブ面について図-2に示す。引張を正とする。曲げ加工を

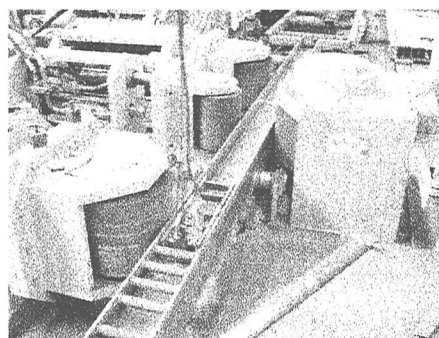


写真-1 曲げ加工の様子

行った直後には凸フランジ面には中央部で150MPa程度におよぶ圧縮応力が発生している。それに対応して凹フランジ面中央部には同程度の引っ張り応力が発生している。このようなレベルの応力が発生していること自体が一見奇異に写るが、曲げ加工時にH鋼が受ける応力履歴を考慮すると、この応力状態に至った経緯を理解することが出来る。即ち、ローラー加工で冷却されたH鋼にフランジ中央部で50MPa程度の残留引っ張り応力が残った状態となる。曲げ加工を施されている僅かの時間内に限っては、凸フランジ面には引っ張り側の降伏応力を超えた応力が発生し、また凹フランジ面には反対に圧縮側の降伏応力を超えた応力が発生する。その状態（継続時間は僅かであるが）で、H鋼は大きな塑性変形を起こし、結果的に一定の曲率を持った曲げ部材が出来上がる。この部材は曲げ加工を行う機械から出てきた瞬間に弾性応力を回復するが、その時までには発生した永久塑性ひずみなどの影響で、凸側に圧縮、凹側に引っ張りの応力を発生した状態となると考えられる。

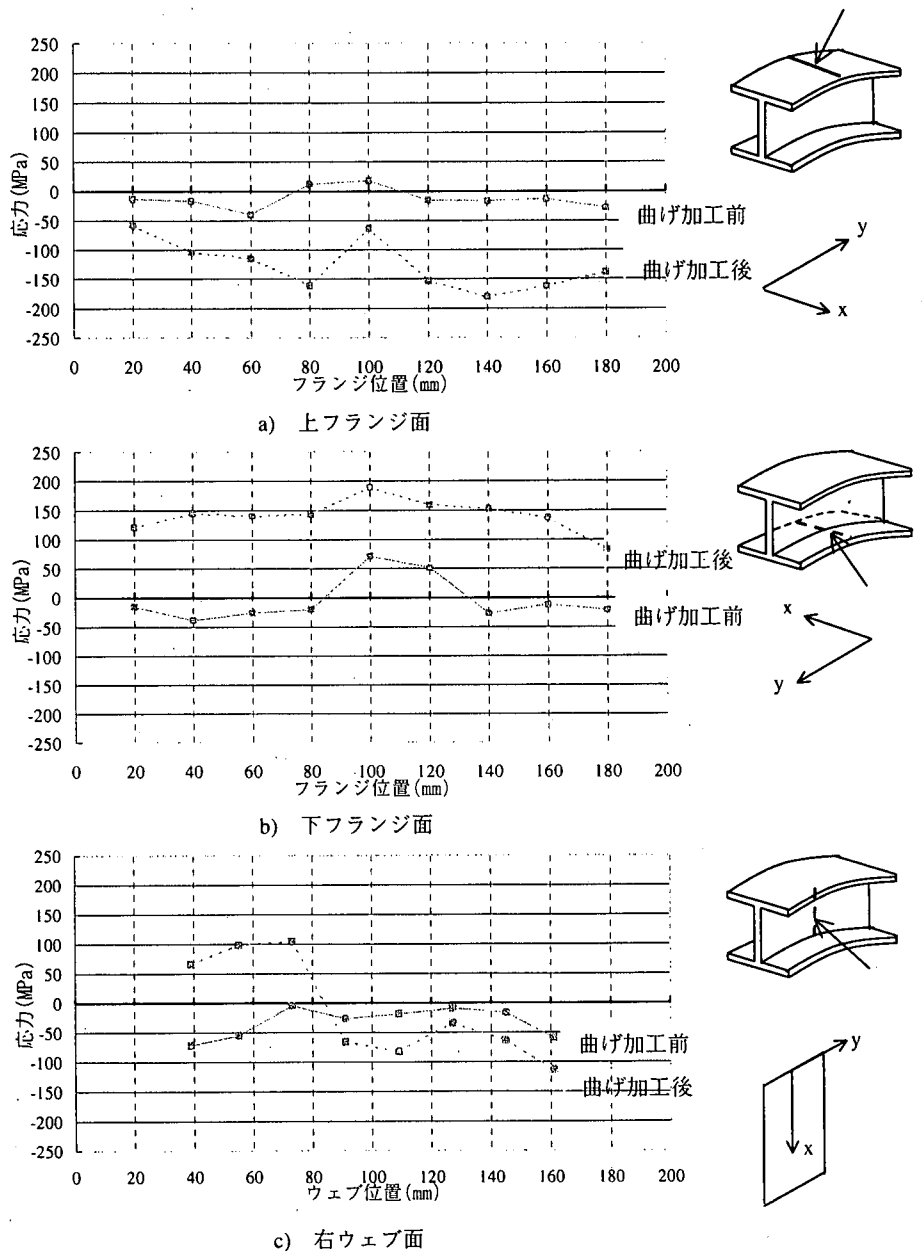
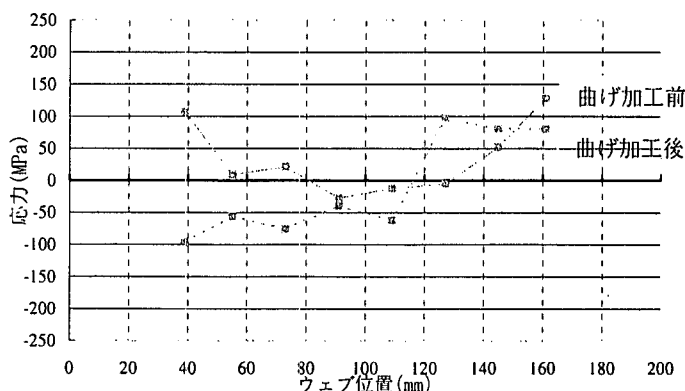


図-2 曲げ加工前後の応力計測結果の比較



d) 左ウェブ面

図-2 曲げ加工前後の応力計測結果の比較(続き)

4. まとめ

トンネル支保構造部材 (H鋼) の応力測定を行うことが可能かどうかを検討した結果、適用が十分可能であることが判明した磁歪法を用いて、トンネルで用いられる代表的な支保構造部材であるH鋼について曲げ加工を行う前後でどのような応力状態がH鋼に発生しているかを計測することを試みた。測定データは代表的な鋼材 (SS400) の誘導電圧-応力の感度曲線を仮に使用することとして処理したのだが、部材に曲げ加工を施すことにより、残留応力が150MPa、あるいは200MPa程度にも及んでいる可能性があることがわかった。ただこの値は仮の誘導電圧-応力の感度曲線を用いて求めた値であるから、実験を行いこれらのH鋼部材独自の誘導電圧-応力の感度曲線を求める必要がある。また、このような応力状態であるH鋼がトンネルなどの現場に搬送され立て込まれるが、ここで確認されたような残留応力が存在することは設計ではほとんど考慮していない。残留応力自体が存在することは多々あることであり、その応力レベルが設計において、ある程度無視できる場合は問題はない。しかしながら、ここで計測された150MPa、あるいは200MPa程度にもおよぶ残留応力が存在しているならば、それを考慮しないことは大きな問題である。また、今回はトンネルに用いられる曲げ部材に注目したが、仮設状態でのH鋼の応力、あるいはシールドトンネル掘削機の内側表面、様々な場面で用いられる鋼板など計測可能対象は多岐に及ぶため、今後も磁歪法のトンネル構造物への適用の可能性について検討する予定である。

謝辞 今回研究に御協力していただいた中電技術コンサルタント、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
- 5) 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、投稿中2002