

大断面トンネルの鋼アーチ支保工に作用する荷重の 非破壊計測の一例

An example of non-destructive measurement of loads in steel ribs
used for a large-scale NATM tunnel

大井健史*・志村常彰*・芥川真一**

桜井春輔***・佐藤淳****・恩田雅也****

Kenji OI, Tsuneaki SHIMURA, Shinichi AKUTAGAWA,

Shunsuke SAKURAI, Jun SATO, Masaya ONDA

Non-destructive stress measurement technique using a magnetic anisotropy sensor was applied for investigation of loads acting in steel ribs used for a large scale NATM tunnel. This technique can be used to read stresses existing on surfaces of steel structures directly, while reading error level is expected to be 10 to 20 MPa. The measurement results indicate that part of the steel ribs could have been exposed to very high stress during construction.

Key Words: Non-destructive stress measurement, NATM tunnel, steel ribs

1. はじめに

従来、トンネル掘削においては注目断面から切羽が十分に遠ざかった段階では、周辺の支保構造物、及び、地山の变形挙動は収束し、「動きは止まる」はずである。しかし、今回、注目した大断面トンネルの断層部分においては切羽が十分に進行したあとにも、注目断面付近の鋼アーチ支保工に、わずかながら応力が増加する傾向が続いた。断面付近の吹付けコンクリートの動きはほぼ収束していることから、両者の挙動が異なる背景には何らかの理由がある可能性が指摘された。そこで、今回は新しい応力測定手法として注目している磁歪式応力測定装置を利用した応力測定を通じて断層部付近での鋼アーチ支保工の応力状態を解明することを試みた。

2. 大断面トンネルの概要

今回、計測を行った大断面 NATM トンネルは上り線、下り線の2本から構成されており、その間隔は約55mである。代表的なトンネル断面図を図-1に示す。

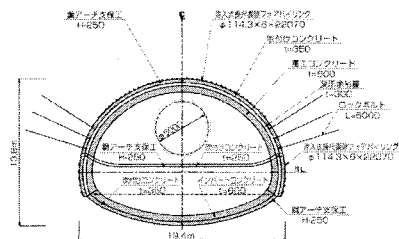


図-1 トンネル断面図

* 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科
** 正会員 Ph.D. 神戸大学工学部建設学科
*** 正会員 Ph.D. , 工博 (財)建設工学研究所
**** 正会員 日本道路公団

トンネル周辺の地質は、トンネルのほぼ中央に、活断層を含む大規模な断層破碎帯が分布し、その西側は第三紀鮮新世の堆積岩、東側は第四紀更新世の火山岩が分布している。今回応力測定が行われた計測断面はその断層破碎帯に位置する。周辺地質図を図-2に示す。

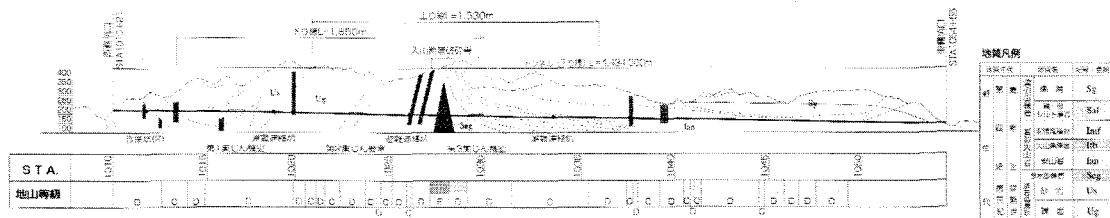


図-2 計測断面周辺の地質構造

計測を行った断層部付近における吹付けコンクリートの軸方向応力の系時変化を図-3に、鋼アーチ支保工の系時変化を図-4に示す。図-3、図-4から分かるように、吹付けコンクリートの軸方向応力はほぼ収束しているにもかかわらず、鋼アーチ支保工の応力は増加する傾向が続いている。そこで、磁歪法による計測を通して、断層部付近の鋼アーチ支保工作用荷重を計測し、挙動解明のための資料を収集することとした。

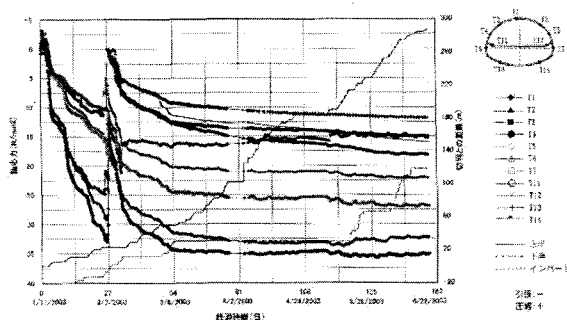


図-3 吹付けコンクリートの軸方向応力の系時変化

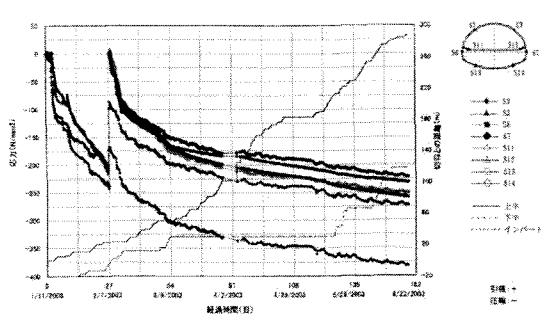


図-4 鋼製支保工の軸方向応力の系時変化

2. 磁歪法の概要^{1),2),3)}

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-5のE1、E2の場所）、検出用コイル（図-5のD1、D2の場所）が巻かれている。今、図-5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、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-6 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．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 程度までの平均応力である．

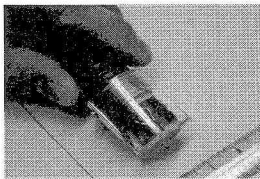


写真-1 磁歪式応力測定センサ

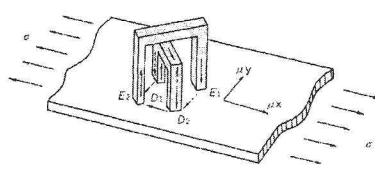


図-5 センサの構造と応力状態

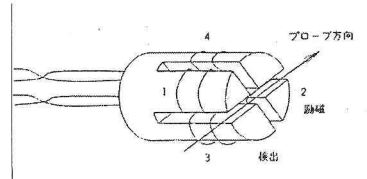


図-6 センサの細部構造

3. 応力感度曲線

応力感度曲線を作成するために，鋼材の応力-出力電圧関係を知る必要がある．そこで，その関係を知るために鋼材の4点曲げ載荷試験を行った．図-7 に載荷試験のモデル図を示す．

ここで用いた供試体には，実際の大断面トンネルに用いられている鋼材(SS540, H-250×250×9×14mm)を使用した．曲げ加工を施していない鋼材(直材)，上半用支保工の曲率(10228.6mm)で曲げ加工された鋼材，下半用支保工の曲率(7740.2mm)で曲げ加工された鋼材の3本を試験体として用い，それぞれ上凸状態，下凸状態での載荷を行った．

図-8 に，この試験で直材について得られた出力電圧と応力の関係を示す．ここでの応力は，ひずみゲージから得られたひずみにヤング係数をかけて求められた応力である．また，凡例はフランジ端部からの位置(mm)を示している．

図-8 よりフランジ端部から 85, 95, 105 及び, 145, 155, 165mm の位置における結果は応力が零の時に出力電圧がほぼ零を示すことから，この 6 箇所での結果から残留応力を算出するための応力感度曲線(図-9)を次のように求めた．

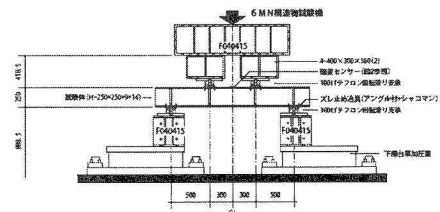


図-7 載荷試験

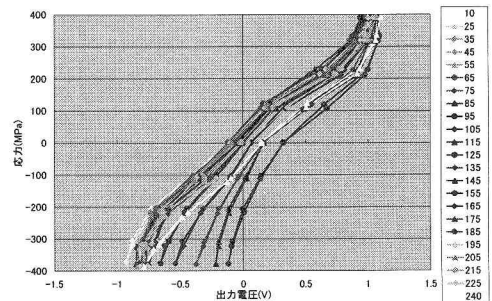


図-8 直材の応力と出力電圧の関係

$$y = 895.86x^5 - 503.77x^4 - 588.08x^3 + 126.71x^2 + 462.33x \quad (3)$$

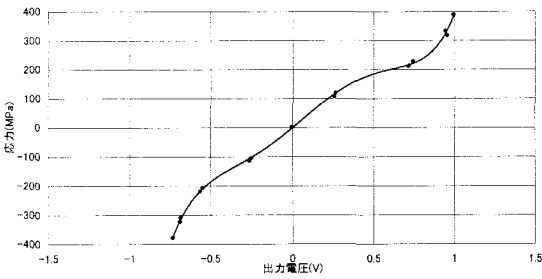


図-9 応力感度曲線

4. 大断面トンネルでの現地計測

大断面トンネルにおける計測は2003年10月4日、2003年12月13日、2004年3月27日の3回で行った。計測日程を表-1に、計測日時と切羽位置との関係を図-10に示す。

表-1 計測日程

項目	断面番号	10月4日	12月13日	3月27日
下り線	STA1027+25	上半2箇所 ヤード	下半2箇所 ヤード	2箇所 上半収束 4箇所 下半収束
下り線	STA1027+75	上半2箇所 ヤード	下半2箇所 ヤード	— 4箇所 下半収束
上り線	STA1028+01	3箇所 上半収束	— 3箇所 下半収束	—
上り線	STA1028+12	3箇所 上半収束	— 3箇所 下半収束	—
備考		現地計測1	現地計測2	現地計測3

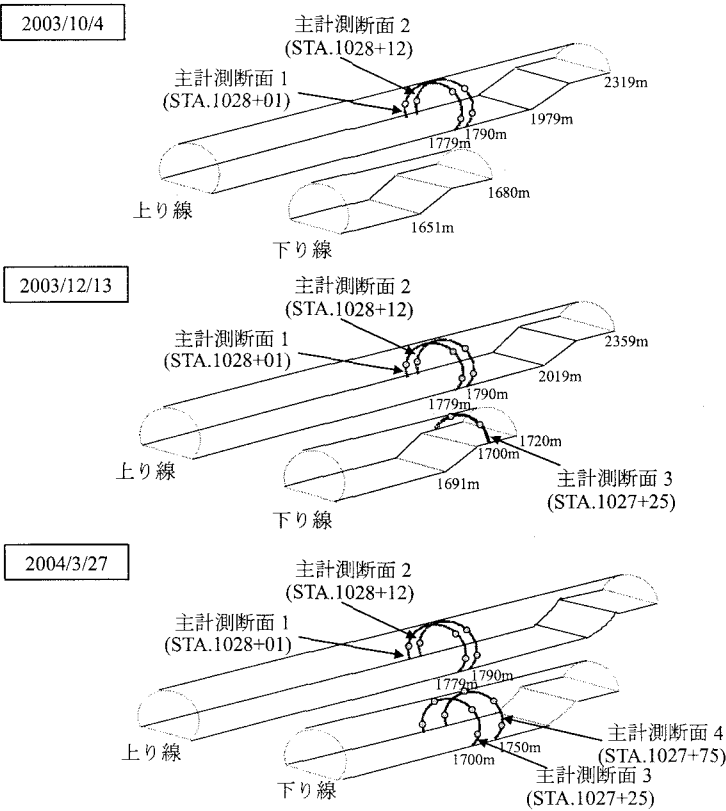


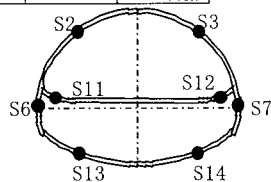
図-10 計測日時と切羽位置との関係

ここで、磁歪法では現状での応力が測定されるため、支保工に貼り付けられているひずみゲージとの比較を行う際に注意が必要である。磁歪法で計測された現場建て込み直前の鋼材の応力と建て込み後の応力との差をとることで、ひずみゲージから求まる応力との比較を行う。磁歪法から計測された応力変化とひずみゲージから求めた応力値との比較を行ったものを表-2に示す。また、応力計測の位置を図-11に示す。

表-2 から分かるように初期残留応力は概ね 400MPa 程度の引張り応力となっている。これは、下り線トンネルにおいて用いられる支保工部材の計測値である。上り線の計測対象支保工では初期値をとることが出来なかったため、この値を仮の初期値として、そこからの増分について考察することにする。

表-2 磁歪法とひずみゲージによる応力測定値の推移と比較

断面	計測ポイント	初期残留応力	1回目 (磁歪法) 2003/10/4	2回目 (磁歪法) 2003/12/13	3回目 (磁歪法) 2004/3/27	応力変化 (1回目) 磁歪法	応力変化 (1回目) ひずみゲージ	応力変化 (2回目) 磁歪法	応力変化 (2回目) ひずみゲージ	応力変化 (3回目) 磁歪法
		R	M1	M2	M3	M1-R	S1	M2-R	S2	M3-R
		応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)	応力(MPa)
1	1028+01右上S3	287.0	-100.1	-105.8		-387.1	-398.8	-392.8	-410.9	
	1028+01左下S6	401.4	253.1	262.7		-148.3	-307.1	-138.7	-313.4	
	1028+01右下S7	401.4	95.8	83.5		-305.7	-306.2	-318.0	-316.7	
2	1028+12右上S3	287.0	-103.5	-105.1		-390.5	-522.8	-392.1	-537.5	
	1028+12左下S6	401.4	39.6	45.0		-361.9	-265.8	-356.4	-277.7	
	1028+12右下S7	401.4	49.1	33.6		-352.3	-355.4	-367.8	-370.4	
3	1027+25左上S2	318.5		67.7	32.7			-250.8	-211.4	-285.8
	1027+25右上S3	315.3		107.7	101.7			-207.6	-146.4	-213.6
	1027+25左下S6	411.6			246.5					-165.0
	1027+25右下S7	440.8			215.1					-225.7
4	1027+75左上S2	253.7			10.0					-243.6
	1027+75右上S3	273.3			85.3					-188.0
	1027+75左下S6	382.9			273.3					-109.6
	1027+75右下S7	421.7			278.0					-143.7



5. 現場計測のまとめ

第 1 回目の計測時には上り線において切羽がかなり進んでいたため、初期値からの増分としては最大で 390MPa 程度の圧縮応力がかかっていることが分かる。また、このときに測られているひずみゲージの値から換算した応力と比較しても、磁歪法による計測結果は妥当なものであることが十分に理解できる。断面 1028+12 においては、ひずみゲージがからの応力値が 500MPa を超える値となっており、磁歪法との差が大きい。この点については、鋼材の降伏応力が 440MPa 程度であることを考慮すると、降伏したあとも増え続けたひずみに単純に弾性係数をかけているために、実際には存在できない応力値が計算されているものと判断できる。

第 2 回目の計測においては、上り線は、切羽の位置がさらに進んだだけであるため、応力の変化は少ない。これは、磁歪法、ひずみゲージ法のどちらにおいても同様の現象を捉えている。下り線トンネルについては、上半切羽がまだ遠くないため、支保工には 200 から 250MPa 程度の圧縮応力が作用している段階であることが分かる。

第 3 回目の計測では、上り線については切羽の位置がさらに進んでいるが、十分に計測箇所から離れているためその影響は少ないと考えられるため、上り線の計測は行わなかった。下り線トンネルについては、切羽の進行に伴い、支保工には 100 から 250MPa 程度の圧縮応力が作用していることがわかる。

また、断層付近の支保工に作用している荷重については、磁歪法とひずみゲージ法から求められた応力を考察すると、一部の鋼材においては、降伏現象が起きていることが推定される。これは、求められたひずみゲージの値に弾性係数をかけることによって実際には存在し得ない高いレベルの応力(500MPa 以上)が算出

されていることから推測できる。また、そのような現象が起きていない限り、磁歪法に基づく計測結果がひずみゲージのものと比べて妥当なものとなっていることも確認できたと考える。

磁歪法での計測で、トンネル内空側の初期残留応力で 300 から 400MPa の引張り応力が存在することが確認できた。これは、地山側のフランジ凸面には同程度の圧縮残留応力が作用していることを示唆するものである。支保工建て込み後に圧縮力が増大する過程で、内空側では引張り応力が次第に 0 に近づき、さらに荷重が増えると圧縮応力状態に入る。これは、鋼材の耐力に余裕を持たせるものである。反対に、地山側においては、初めから圧縮応力状態にあるため、建て込み後に圧縮応力が増大すると、予想より早い段階で局部的に降伏現象が発生することも考えられる。このような局部的な塑性化が本断層付近で認められた特異な現象に関連している可能性もあるため、今後も検討を重ねる必要がある。

6. おわりに

NATM トンネルの建設途中の安全性を確認する作業は従来変位計測を主体とした状況判断に基づくことが多かった。鋼アーチ支保工に作用する荷重も計測されることは行われているが、これは基本的に曲げ加工を行った後でひずみゲージを貼り付け、以後の増分を計測する方法である。この方法は、応力増分により技術的判断を行う範囲内では高精度の情報源を提供できるが、支保構造物に生じている絶対値としての作用応力を知ることが必要な場合においては不都合となる。今回、採用したような応力の絶対値を計測できるような方法はその長所、短所を十分に理解したうえで適用することで、これまでには分析が困難であった現場における複雑な現象を解明するための一助となることが確認できたと考える。

謝辞

計測、およびデータ分析において多大なご助言を頂いた（株）中電技術コンサルタンツの松岡敬氏に感謝いたします。

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, 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.