

磁歪法によるPSアンカーの軸力推定法の提案と大規模地下空洞における適用例

芥川真一^{1*}・中森絵美²・森本紘太郎³・馬場修二⁴・森聡⁵・櫻井春輔⁶

¹神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

³神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

⁴関西電力株式会社（〒553-0003 大阪市福島区福島5-1-7）

⁵株式会社ニュージェック（〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19）

⁶（財）建設工学研究所（〒657-0011 神戸市灘区鶴甲1丁目3番10号）

*cadax@kobe-u.ac.jp

地下発電所空洞における長期安定性の評価法および維持管理手法の確立は近年重要な検討項目として位置づけられている。本報では、非破壊応力測定法として知られる磁歪法を用いてPSアンカーヘッド部の六角ナットに発生する応力に注目して、室内実験を行い、軸力とナット表面応力の関係を得た。それをもとに実際の地下発電所空洞において施工後約10年を経過しているPSアンカーの軸力を推定し、一部をリフトオフ試験によって検証した。その結果、PSアンカーの軸力を誤差40kN(3tf)程度の精度で推定できることが分かり、今後の大規模地下空洞全体の健全性評価を合理的に実施できる可能性を確認することが出来た。

Key Words PS-anchor, nut, non-destructive stress measurement, magnetic anisotropy sensor

1. はじめに

現在日本には、地下空洞を利用した発電施設が多く存在するが、古いものでは建設後 40 年以上を経過しているものもある。これらの地下構造物に対しての定期的な健全性評価、あるいはメンテナンスが必要となりつつある。地下構造物は岩盤、コンクリート、鋼製部材、その他材料を複合的に使用して一般的に施工がされるが、最終的な仕上がり面はコンクリートになることが多い。コンクリートなどの材料は一般的に切断などの作業を伴わない限り現状の応力状態を知ることができない。したがって、維持管理における「現状の応力状態把握」が難しい。一方で、鉄などの強磁性体に対しては磁歪法¹⁾という非破壊応力測定法が存在するため、それが表面に露出していれば「現状の応力把握」が可能になる。ここでは、岩盤空洞を施工し、表面に露出している鋼材の一例としてナット式の PS アンカーを取り上げ、その軸力推定の可能性を探るために行った基礎実験の結果を報告し、空洞全体のメンテナンスへの意義について言及する。

2. 磁歪法の概要¹⁾

鉄などの強磁性体には応力を受けたときに、受けた応

力の方向において透磁率が変化するという性質がある¹⁾。磁歪測定器（プローブ）では、この性質（磁気異方性）を利用して、鋼材を励磁し、その磁位差に起因する電磁誘導により発生する電圧を検出することで、受けている応力の向きと大きさを測定することができる。これまでに橋梁¹⁾、トンネル²⁾などで適用され、良好な成果を得ている。

3. アンカー軸力とナット表面の出力電圧の関係を求める実験

ここまでの研究において、軸力が作用した場合のナット表面では、場所ごとに異なるレベルの応力・ひずみが発生していること、磁歪センサで出力電圧値を求めるのはナット側面の中央が適切であることが分かっている³⁾。これらの知見を踏まえて以下にアンカー軸力と磁歪センサによるナット側面における出力電圧値の関係を求めるための実験について述べる。

(1) 実験の概要

ナット側面は Fig.1 に示すようにした。磁歪センサでナット中央の出力電圧を測定し、その左右に 2 箇所、6

面すべてに（ $6 \times 2 = 12$ 個）歪みゲージを貼り付け、最大荷重を 588kN(60tf)とした载荷・除荷を行った。磁歪センサを側面中央に当てる際に測定者による誤差を少なくするためにプラスチック製のガイド（Photo1 参照）を作成し、センサがいつも同じ場所に当たるようにした。

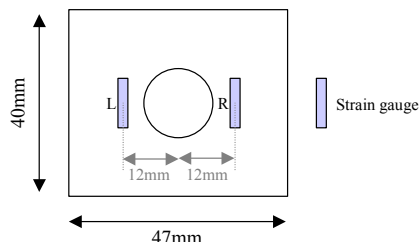


Fig.1 Position of measurement.

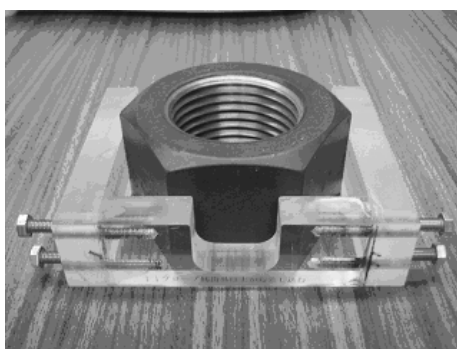


Photo1 Plastic guide to stabilize sensor position during measurement.

载荷方法（最大荷重は 588kN(60tf)）と磁歪センサによる測定パターンは Method1 と Method2 の 2 通りとした。Method1 は荷重増分 49kN(5tf)ごとに荷重をホールドし、6 面全ての中央で磁歪センサによって出力電圧を測定する。Method1 については载荷・除荷を 1~3 回繰り返した。Method2 は磁歪センサを特定の側面に固定したまま载荷・除荷を行なうものとした。1 面から 6 面まで計測するため、1 つのナットにつき载荷・除荷サイクルを 6 回繰り返すことになる。なお、ナットは A, B, C 及び D の 4 つを用意し、A については Method1 のみを、B については Method2 のみを、C, D については Method1, Method2 の両方の実験を行った。

(2) 実験の結果

Fig.2 に Method1 ナット A および Method2 ナット B での载荷・除荷についてナット全 6 面のものを平均した荷重-歪み関係を示す。縦軸は载荷・除荷における荷重、横軸は歪み値である。载荷ラインが直線的であるのに対し、除荷では歪みの戻りが遅く、曲線を描いて戻ってくるという傾向がみられた。

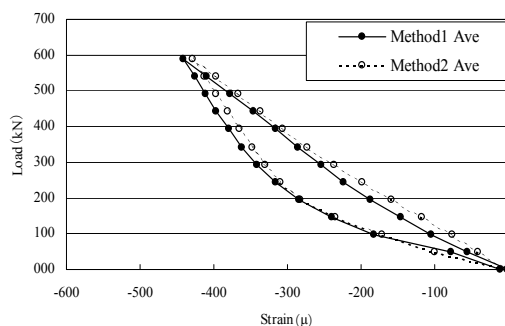


Fig.2 Averaged axial force vs strain relationship for Methods 1 and 2.

歪み値には Method1 と Method2 でわずかのずれがあるが、これは Method1 と Method2 で測定方法が異なったこと、使用したナットが異なるために試験の設置条件が完全に一致していないこと、ナットによる感度が異なることなどが原因であると推測される。また、Method2 では载荷サイクルを繰り返すため、荷重を 0 に戻した時にアンカーやナットの微妙な位置がずれる可能性があることも指摘される。しかしながら、载荷・除荷に対する歪みの傾向はことなるナットにおいても同様のものとなった。

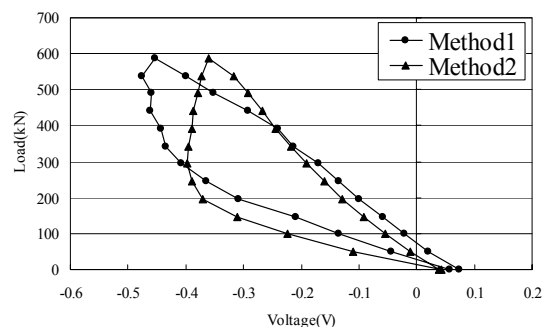


Fig.3 Averaged axial force vs voltage relationship for Methods 1 and 2 using nuts A and B.

次に Method1, Method2 での载荷・除荷について荷重-出力電圧関係を Fig.3 に示す。磁歪センサによる計測は 2 名が同様の計測を繰り返して実施した。図にはナット全 6 面を平均した電圧値を表示してある。縦軸は载荷・除荷における荷重、横軸は磁歪法で得られる出力電圧値である。

Method1 では荷重 49kN(5tf)ごとに人の手で磁歪センサを測定面に当てて測定しているため、リフトオフ（センサコイルとナット表面の厳密な距離）が一定でないことなどが出力電圧値のばらつきに影響していると考えられる。Method2 では磁歪センサを固定していることでリフトオフが一定値を保っているため、出力電圧のラインはなめらかである。測定パターンに関わらず、载荷時と除荷時でラインが異なるという傾向が見られた。

ここで見られるような特長について複数のナットによ

る試験で確認する必要があるので、ナット C, D に対して同様の実験を行った。それぞれの実験において得られた結果を平均し、Fig4 に示す。

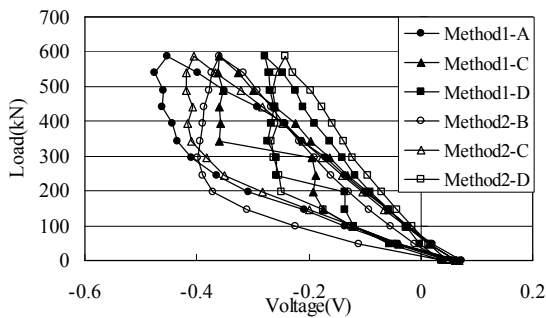


Fig.4 Averaged axial force vs voltage relationship for Methods 1 and 2 using nuts A, B, C and D.

出力電圧、歪みともに載荷時は直線的、除荷時にはカーブを描いて最初のポイントに戻るといった傾向がみられた。こヒステリシスの原因についての検討は、5 章で述べる。

(3) アンカー軸力と出力電圧の関係式の決定

空洞建設時にアンカーに引張り力を導入する際は、リフトオフ試験で用いたようなジャッキを使用し、所定の引張り力を与えた段階でナットを締め付ける。その後、ジャッキの油圧を落としてアンカー端部を開放し、プレート、ナットに初めて導入軸力に対応する応力が発生する。その意味で、建設時にはアンカーに 1 回だけ載荷した状態になる。その後、岩盤に何らかの要因で変状が生じた場合、アンカー軸力は増加する場合と減少する場合が考えられる。岩盤のクリープ現象、空洞周辺の発電機の回転による振動などが外的要因の場合、軸力変動が減少の方向になることは可能性が少ないと考えられる。実験、およびリフトオフ試験の両方でナットにかかる力が増加する際と減少する際には軸力・出力電圧関係のパスが異なることが分かっている。このヒステリシスの原因については別途検討することとし、ここでは軸力を推定するための関係式としてナットに作用する力が増加する際のデータを総合的に整理することとした。

最終的に Method 1（荷重を 5tf ごとにホールドしてすべての面の出力電圧を測定）でデータを得たのはナット A, C, D の 3 個、Method 2（センサを面に固定して 6 回の載荷サイクルを実施）でデータを得たのはナット B, C, D の 3 個である。これらのデータから複数の軸力・電圧関係式を準備することとした。

Method1-A は測定パターン Method1 で行ったナット A のみの結果から作成した軸力・出力電圧関係式である。同様に Method1-ACD は測定パターン Method1 で行ったナット A, C 及び D の結果から作成したものである。Method2-BCD は測定パターン Method2 で行ったナット B,

C 及び D の結果から作成したものである。Method1&2 は全ての実験結果から作成したものである。これらを Table 1 に示す。

Table 1 Naming for axial force vs voltage relationship.

Method	Nut	Naming for axial force vs voltage relationship
1	A	Method1-A
	C	Method1-ACD
	D	
2	B	Method2-BCD
	C	
	D	

ここで準備した軸力・出力電圧の関係式は実際の現場における検証試験の結果を勘案し、最も小さな誤差でアンカー軸力を推定できるものを最終的な関係式とすることにする。

4. A 発電所における現場計測

A 発電所は、兵庫県内にある関西電力所有の揚水発電所であり、平成 6 年 12 月より増設工事が着工された。今回、現場測定を行ったのは増設された大規模地下空洞で、土被りは約 250m で、完成後約 8 年が経過している。この空洞では Photo 2 に示すように、プレートとナット式のアンカーが露出した状態になっている。



Photo 2 PS anchors in A powerhouse.

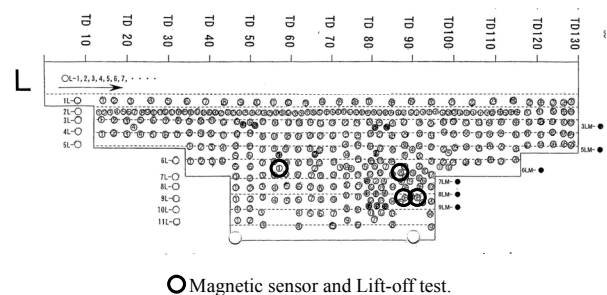


Fig.5 Location of measurement and lift-off experiments on the penstock side.

(2) 現場計測の方針と概要

発電所空洞に打設されている PS アンカーのうち、足場を組む必要がなく、比較的アクセスが簡易であるものを選んで、磁歪センサによる計測を実施することとした。**Fig.5** に水圧管路側 (Penstock side) において実施した測定箇所を示す。

現場ではまず、**Fig.5** に示す 4 箇所 (アンカー No.6, No.9, No.14 及び No.15) において磁歪センサによるナット表面の出力電圧を計測し、この結果より、室内試験にて得た荷重-電圧曲線を用いて推定軸力を求めた。その後、リフトオフ試験により、実際の軸力を測定し、両者の相違を確認した。

(3) リフトオフ試験の方法

リフトオフ試験とは、既設されたアンカーを引張り、定着具が支圧板から離れはじめたときの荷重 (リフトオフ荷重) を測定することにより現在アンカーに作用している軸力を求める試験である。

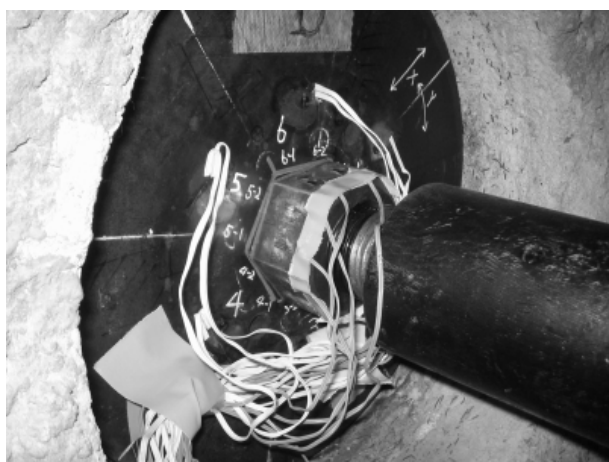


Photo 3 Lift off test.

Photo 3 に示すように、ジャッキのねじ式シャフトを PS アンカー端部に取り付け、特別に用意したフレームを介してプレート反力板にし、引張り力を与える。このフレームはリフトオフ試験中にも磁歪センサでナット表面の電圧を測定できるようにするためのものである。その時にジャッキの端部における変形を計測し、荷重-変位関係が変曲点を迎えた時にリフトオフ荷重 (その直前までにアンカーに作用していた軸力) に到達したと判断した。

(4) リフトオフ試験の結果

ここで、4 本のアンカーのリフトオフ荷重を **Table 2** にまとめる。空洞掘削完成時にはすべて 588kN の軸力を導入していたことから、この結果によれば多少の変動が生じていることが分かる。

Table 2 Lift-off axial forces measured for 4 anchors.

Anchor Number	6	9	14	15
Load at lift-off (kN)	568	666	515	536

(5) 原位置のアンカー4本の軸力推定

リフトオフ試験を行った 4 箇所のアンカーについて最初に計測したナット表面の電圧値から、実験室で求めた軸力・出力電圧関係式を用いて磁歪法に基づく軸力推定値を算出した。その推定値をリフトオフ試験結果と比較し、精度を検証する。異なる関係式を用いて求めた複数の推定結果を **Fig.6** に示す。また、**Table 3** に各軸力・電圧関係式での軸力推定値及び誤差を示す。これらの結果から、リフトオフ荷重との誤差が最も小さい推定結果は、Method1-ACD を使用した場合で、26kN 程度の誤差 (標準偏差) で軸力推定が可能であることがわかった。

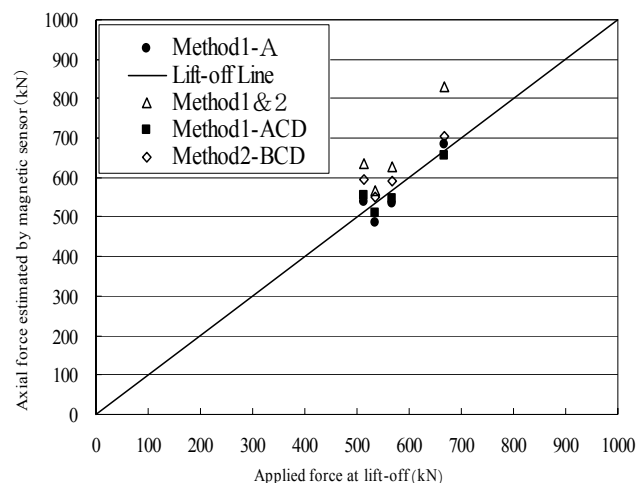


Fig.6 Axial forces estimated from the voltage data measured by the magnetic sensor.

Table 3 Axial forces and standard deviation of error levels estimated from the voltage data measured by the magnetic sensor. Unit : kN

		Anchor number				Standard deviation
		6	9	14	15	
Calibration curve used	Method 1 A	532	684	540	487	34
	Method 1 ACD	548	655	554	511	26
	Method 2 BCD	590	705	596	550	47
	Method 1 & 2	625	828	635	567	106
Applied force at lift-off		568	666	515	536	

今回対象とした A 発電所 (増設部) における PS アンカーの空洞掘削完成時における導入軸力は 588kN である

ことから、磁歪法を用いた PS アンカー軸力推定法は誤差 5%程度で軸力を推定できることが分かる。本研究では軸力・出力電圧関係式として推定誤差が最も小さい Method1-ACD を最終的な換算式に決定した。これにより、現場のアンカー頭部のナットを磁歪センサにより計測して、6 面の出力電圧平均値を求めれば工学的に十分な精度でその軸力を推定できることになる。

5. ヒステリシスの原因についての検討

3 で述べたように、588kN 載荷時において、ナット表面は弾性変形の範囲であるのにも関わらず、載荷ラインと除荷ラインに大きな開きが生じる。本章では、このヒステリシスの原因解明を目的として行った実験について述べる。ヒステリシスの原因として考慮に入れた項目は以下の二点である。

- ① ナット内壁のネジの構造による影響。
- ② ナット下面の境界条件による影響。

(1) 実験概要

上記の二点を検証するため、現場で用いられている同様のナットのネジを切り取ったもの (Fig.7) を利用して 3 で行ったものと同様の載荷実験を行い、溝なしナットにかかる応力に着目し、ヒステリシスがどの程度改善されるかを調べた。測定は、下側のナットの中央で行った。

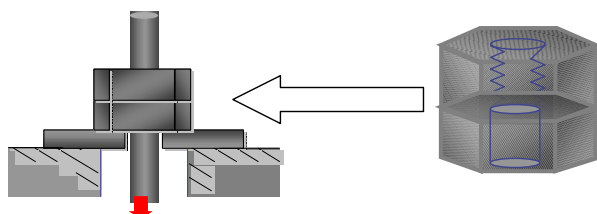


Fig.7 A set up of a new experiment in which a nut without screw is inserted under a normal nut.

実験では②を検討するために、以下の 3 種類の境界条件を設けた (Fig.8 参照)。

- (a) 通常のアンカープレート(外径 360mm,厚さ 36mm,孔径 65mm)を用いる。
- (b) 孔の小さなプレート(幅 250mm,長さ 400mm,厚さ 20mm,孔径 57mm)を 4 枚用いる。
- (c) 孔の小さなプレートを 2 枚用いる。

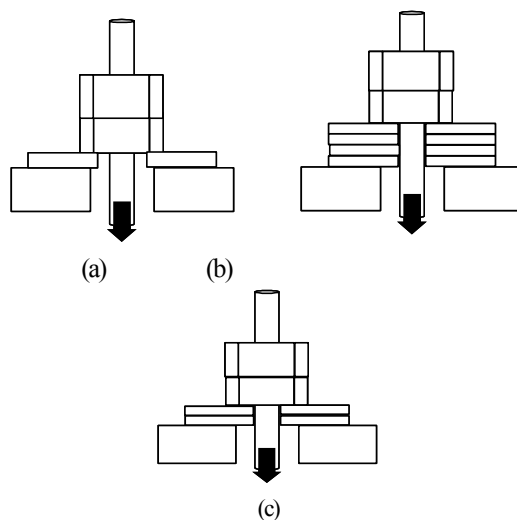


Fig.8 Three different set up of boundary conditions.

(2) 実験結果

代表的な結果として、実験(a)についてのナット 6 面の荷重-電圧関係を Fig.9 に示す。

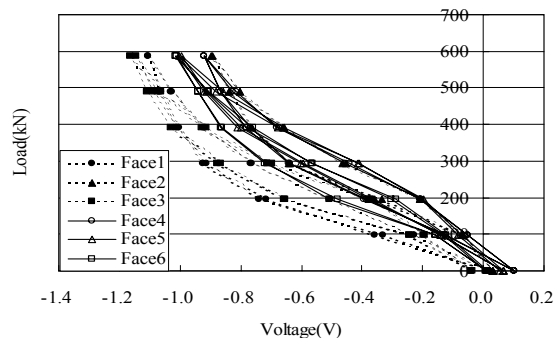


Fig.9 Axial force vs voltage for case (a).

Fig.3 の荷重-電圧関係と比べると、載荷ラインと除荷ラインの開きがかなり減少している。このことから、①のネジの存在はヒステリシスの発生に大きく影響していることがわかる。また、3 つの境界条件による比較 (6 面平均) を Fig.10 に示す。

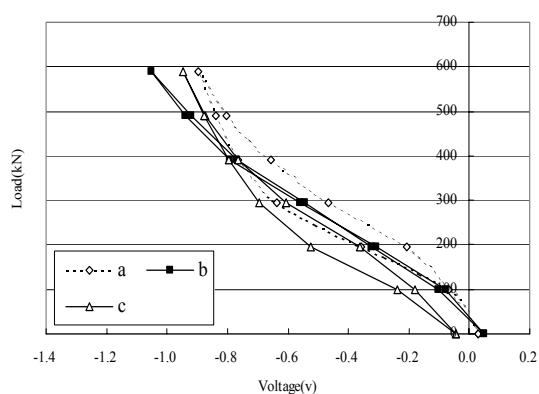


Fig.10 Averaged axial force vs voltage relationship for experiments with different boundary conditions.

3つの境界条件によるグラフの開きは、(a)>(c)>(b)となり、孔の小さな鋼板を4枚用いた(b)については、ほぼ完全にヒステリシスのないものとなった。このことより、ナットを支える構造の剛性や境界条件もヒステリシスの大きさに多大に影響していることがわかる。

以上の結果より、磁歪法を用いて、より正確にPSアンカーの軸力を測定するためには、ナットにネジのない部分を設け、その部分において計測を行うこと、また、ナット下面に接する部材（通常はアンカープレート）の剛性を高くすることが有効であると考えられる。この結果を踏まえ、ネジのある部分とない部分が一体になったナットを作成し、同様の実験を行ったが、上記と同様の結果となった⁹⁾。

6. まとめ

Fig.3に示されているように、ここで検討したアンカーについてはそのヘッド部の構造、剛性などの影響で載荷・除荷のヒステリシスが現れることが分かる。したがって、原位置において初めて引張り力を導入した後に、軸力が載荷ラインにそって変動しているか、あるいは除荷ラインにそって変動しているかを見極めることは今後の課題である。しかしながら、PSアンカーの軸力と磁歪センサで検出できるナットの応力に明瞭な関係があることが判明したことは意義が大きい。

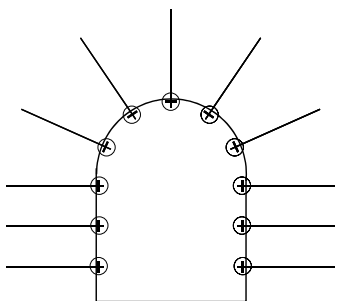


Fig.11 Sources of important pieces of information.

この基本的関係を利用することで、Fig.11に示すような地下空洞のPSアンカーの軸力を把握し、空洞全体の安定性を議論することが可能になる。地下構造物の最終仕上がり表面に鋼製部材を露出させることはさまざまな面でメリットがあると考えられるため、今後の検討が必要である。

謝辞：本研究で実施した実験及び現場計測のデータ処理結果を頂いた NTT 西日本の有村有紀氏、および室内実験に際して多大な協力を頂いた神戸大学工学部小林技術専門員、口池技術員に謝意を表します。

参考文献

- 1) 安福精一，村井亮介，藤井堅，池田誠，末宗仁吉，黒瀬義幸，境禎明：磁気を用いた鋼構造物の応力測定，橋梁と基礎，pp.33-39, 2001.
- 2) 芥川真一，太田道宏，安原幸二，大井健史，志村常彰，松岡敬磁歪法を用いたトンネル鋼製支保工の応力状態の計測土木学会論文集，No.805号/IV-67, 117-130, 2005.
- 3) 有村有紀：磁歪法を用いた PS アンカーの軸力推定法の構築，修士論文，神戸大学大学院自然科学研究科，2007.3.
- 4) 芥川真一，有村有紀，中森絵美，櫻井春輔，馬場修二，森聡：磁歪法を用いた PS アンカー軸力推定手法の提案と大規模地下空洞における検証例，土木学会論文集（投稿中）
- 5) 芥川真一，有村有紀，中森絵美，森本紘太郎：磁歪法によるナット式 PS アンカーの軸力推定精度向上に関する検討，2007 年度土木学会年次学術講演会．CD-ROM 3-073, 2007.

ESTIMATION OF AXIAL FORCE OF PS ANCHORS AND ITS APPLICATION TO A LARGE UNDERGROUND CAVERN

Shinichi AKUTAGAWA, Emi NAKAMORI, Kotaro MORIMOTO, Shuji BABA,
Satoshi MORI and Shunsuke SAKURAI

A magnetic anisotropy sensor is used for nondestructive measurement of stress on surfaces of a ferromagnetic material, such as steel. It can be used for nondestructive measurement of stresses of a nut which is part of the head part of a PS-anchor. Since the stresses in the nut reflect the level of axial force in the anchor, the results of the stress measurement can be used indirectly to estimate the current axial forces of PS-anchors. By knowing distribution or changes in PS-anchor forces, one can establish a fundamental safety assessment routine for large-scale underground caverns.