

磁歪法を用いたPSアンカーの軸力推定法と 大規模地下空洞における計測例

芥川真一¹・中森絵美²・森本紘太郎³・馬場修二⁴・森聡⁵

Shinnichi Akutagawa, Emi Nakamori, Kotaro Morimoto, Shuji Baba
and Shatoshi Mori

¹正会員 Ph.D. 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)

E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

²学生会員 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学生会員 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正会員 関西電力株式会社 (〒553-0003 大阪市福島区福島5-1-7)

E-mail: baba.shuji@d5.kepco.co.jp

⁵正会員 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

E-mail: morist@newjec.co.jp

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.

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

1. はじめに

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^{1), 2), 3)}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、軸力を推定し、空洞全体の健全性評価を可能にするための基礎資料を得るために行った検討⁴⁾の成果を報告する。

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

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 60tf とした載荷・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.

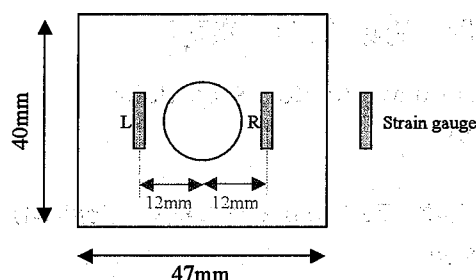


Fig.1 Position of measurement.

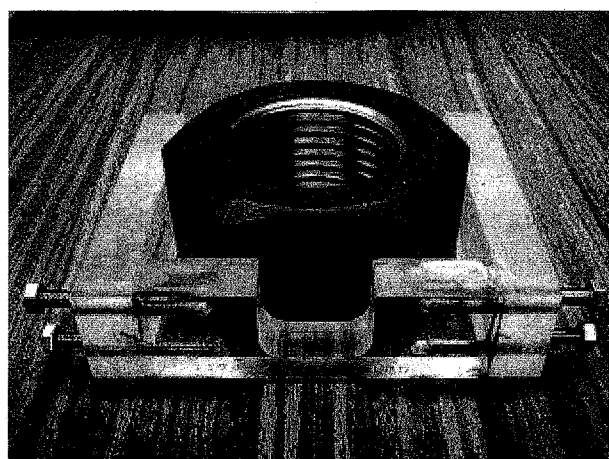


Photo1 Plastic guide to stabilize sensor position during measurement.

載荷方法 (最大荷重は 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 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 については載荷・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載荷・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 つのナットにつき載荷・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

での載荷・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. 縦軸は載荷・除荷における荷重, 横軸は歪み値である. 載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.

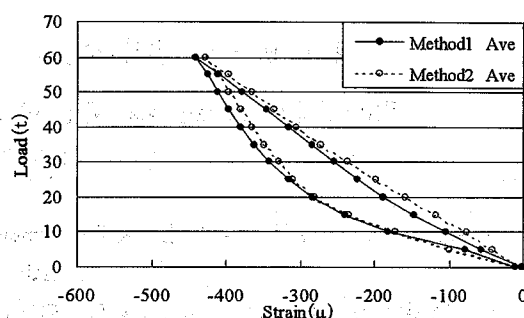


Fig.2 Averaged axial force vs strain relationship for Methods 1 and 2.

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 では載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, 載荷・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.

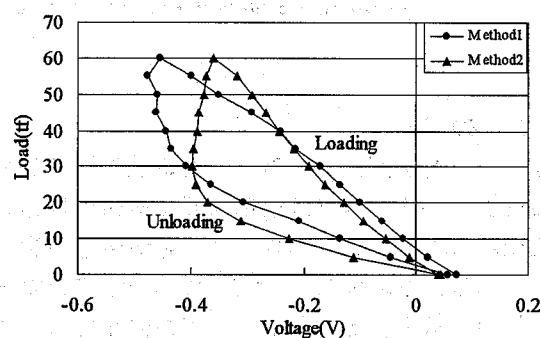


Fig.3 Averaged axial force vs voltage relationship for Methods 1 and 2 using nuts A and B.

次に Method1, Method2 での載荷・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. 縦軸は載荷・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、載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ため、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、Fig.4に示す。

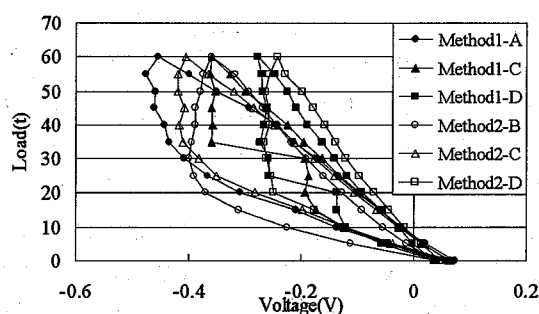


Fig.4 Averaged axial force vs voltage relationship for Methods 1 and 2 using nuts A, B, C and D.

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。この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相当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Table1に示す。

Table1 Naming for axial force vs voltage relationship.

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

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

(1) 現場の概要

計測を実施した発電所は、関西電力保有の地下発電所であり、運転開始後約9年が経過している。この空洞は土被り約250mで、コンクリート吹付け、ロックボルト及びPSアンカーで支保されており、Photo 2に示すようにPSアンカー頭部のプレートとナットが露出した状態になっている。

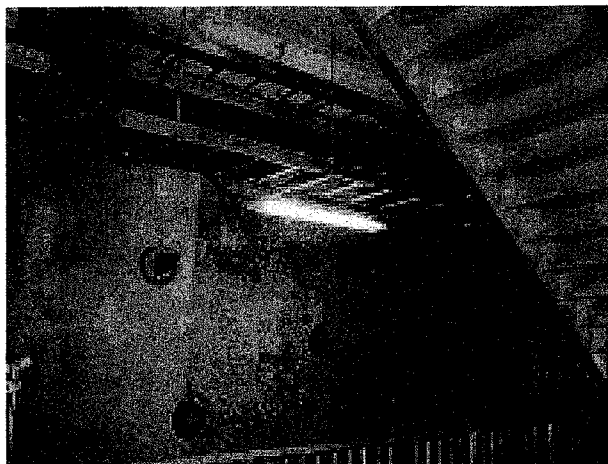


Photo 2 PS anchors in A powerhouse.

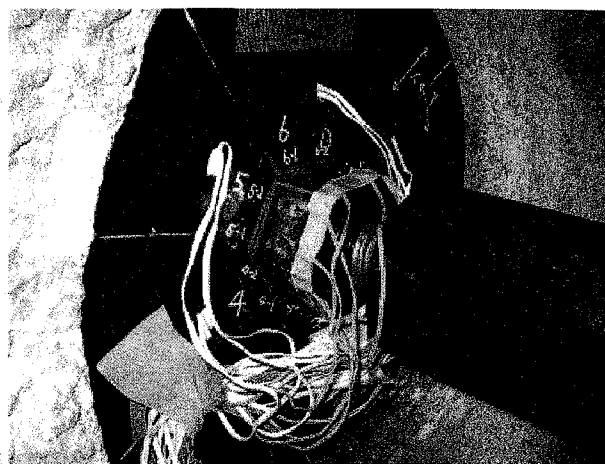


Photo 3 Lift off test.

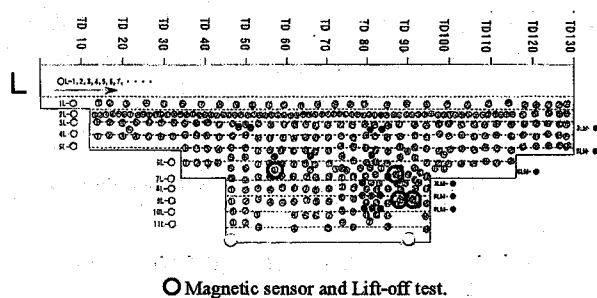


Fig.5 Location of measurement by magnetic sensor and lift-off experiments on the penstock side.

(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 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を反力板にし、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 60tf 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。

Table2 Lift-off axial forces measured for 4 anchors.

Anchor Number	6	9	14	15
Load at lift-off (tf)	58	68	52.5	54.7

(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、2.7tf 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。

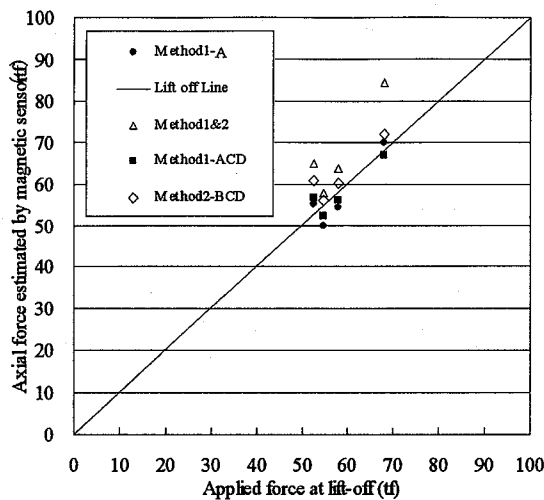


Fig.6 Axial forces estimated from the voltage data measured by the magnetic sensor.

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

		Anchor number				Standard
		6	9	14	15	deviation
Calibration curve used	Method 1 A	54.3	69.8	55.1	49.7	3.5
	Method 1 ACD	55.9	66.9	56.5	52.1	2.7
	Method 2 BCD	60.2	71.9	60.9	56.1	4.8
	Method 1 & 2	63.8	84.5	64.9	57.8	8.4
Applied force at lift-off		58	68	52.5	54.7	

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 60tf 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、60t 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。

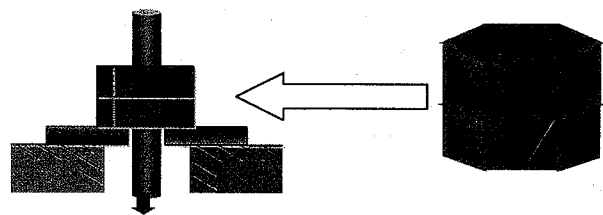


Fig.7 A set up of a new experiment in which a nut without screw is inserted under a normal nut.

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。

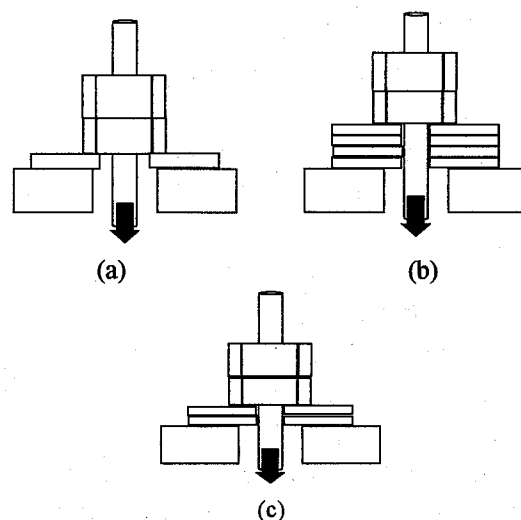


Fig.8 Three different set up of boundary conditions.

(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。

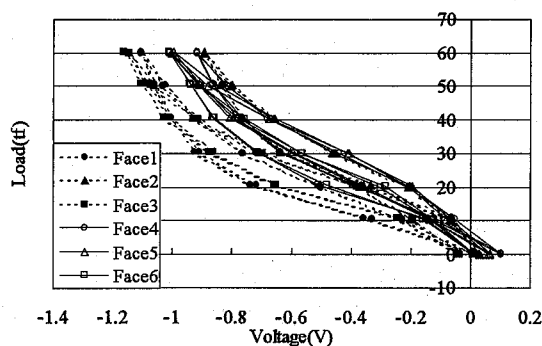


Fig.9 Axial force vs voltage for case (a).

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。

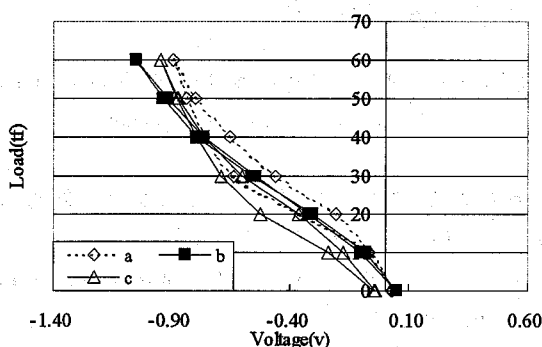


Fig.10 Averaged axial force vs voltage relationship for experiments with different boundary conditions.

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⁵⁾。

6. まとめ

PS アンカーの軸力変化を調べるために、ヘッド部のナットに注目し、室内における基礎実験を通して、荷重-電圧関係を求めた。この関係は現場計測において、非常に妥当性の高いものであるということが実証できた。また、校正曲線に現れるヒステリシスの原因について、ねじ部およびナット下部の剛性が重要な要因であることが特定できた。

本研究で提案した、磁歪法を用いた PS アンカー軸力推定法は実施にかかる費用 (装置そのものの価格を除けば、現地測定において余分な消耗品などはほとんど不要)、作業時間 (アンカー 1 本あたりの実質の計測時間は 5~10 分程度) とともに他の方法に比較して優位であるといえる。何よりも、PS アンカーのナット部の電圧情報さえあれば、その軸力変化を誤差 5% 程度の精度で捉えることが出来ることが検証できたことは意義が大きい。ただ、これは現在のところ校正曲線の載荷部分を用いた場合に 限られており、実際にアンカーの軸力が減少している場合の正確な軸力推定については今後も検討が必要である。

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、プロジェクト全体に対するアドバイスを頂いた (財) 建設工学研究所理事長櫻井春輔氏、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.