

磁歪法を用いたPSアンカー軸力推定法による 地下空洞の安定性評価

芥川真一^{1*}・有村有紀²・中森絵美²・櫻井春輔³・馬場修二⁴・森聡⁵

¹神戸大学工学部（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²神戸大学工学部（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

³(財)建設工学研究所（〒657-0011 神戸市灘区鶴甲1-3-10）

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）

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

安全かつ長期的な大規模地下空洞の維持管理には施設全体の安定性評価が必要とされる．ここでは、空洞周辺岩盤の安定性評価のための一指標として、PSアンカーの軸力を計測することによって、安全性評価の手法を構築することを目的とした基礎実験を行った．本研究室で用いている磁歪式応力測定法を利用して、PSアンカーヘッド部のナットに発生する応力を測定したところ、ナットとPSアンカーの軸力には良い相関が得られることがわかった．今回は、ナットの残留応力分布を確認すると共に、より現場に近い条件でPSアンカーの引張実験を行い、ナット各面での応力状態を把握し、後に実施する磁歪計測の適用性への検証を行った．

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．このような地下発電空洞では、建設後の管理は電気系の技術者により行われてきたため、土木技術者による空洞全体の体系的な点検・管理が実施されていないのが現状である．今後も安全かつ長期的に地下発電空洞を利用していくためには、定期的に施設全体の安定評価及び、有効なメンテナンスが行われなければならない．

一般的に、地下発電空洞に対しては覆工・吹付けコンクリートのクラック等から空洞の安全性を評価するための概観調査が実施されてきたが、概観調査のみでは、変状発生箇所の発見とそれに焦点を絞った局所的な評価にとどまり、空洞全体の安定性を支配する岩盤内部の挙動までは把握することが容易ではない．今後、長期的に安定性評価を行おうとする場合、周辺岩盤内部の挙動を把握し、空洞全体の安定性に着目した評価手法を適用することが必要となる¹⁾．

本研究では、空洞周辺岩盤の安定性を表すものとして、PS アンカーの軸力変化に着目した．本研究室で用いている磁歪式応力測定装置（以下、磁歪

法）により PS アンカーヘッド部のナットに発生する応力を測定したところ、既往の研究¹⁾からナット部の応力と PS アンカーの軸力には良い相関が得られることがわかった．そこで今回は、さらに詳細なナットの情報を得るため、残留応力分布を確認すると共に、より現場に近い条件で PS アンカーの引張実験を行い、ナット各面での応力状態を把握し、磁歪計測の適用性への検証を行った．最後に、PS アンカー軸力推定法を用いた空洞の長期安定性評価手法の構築を試みた．

2. 磁歪法の概要²⁾

磁歪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．



写真-1 磁気異方性検出センサ

この磁気プローブは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，検出用コイルが巻かれている．測定方法は，磁気プローブを被測定物に当て，励磁用コイルから電流を流す．すると被測定物に引張力が生じている場合，引張方向に被測定物の透磁率(磁束の通りやすさ)がわずかに大きくなっており，その磁束量の変化から被測定物には電圧が誘起される(電磁誘導)．この電圧を検出用コイルで得る．

透磁率の異方性は主応力差に比例するので，得られた電圧と主応力差の関係式より被測定物の主応力差を求めることが出来る．なお，磁歪法で求まる応力は，被測定物の表面から約0.23mm下での平均応力である．

3. ナットの残留応力測定

(1) 実験 1 ・ナット側面の細部の残留応力状態

室内実験において，ナット（外周の6面はどれも幅47mm，高さ45mm，材質はSS400）の残留応力を磁歪法によって測定した．歪みゲージなどは被測定物の変化量を見るが，磁歪法では被測定物の現在の応力状態を測定することが出来るため，残留応力の大きさは以後の測定に大きく関係してくる．まず，ナットA・ナットBの2個について，図-1のように1面に対して $5 \times 7 = 35$ ポイントを6面すべて磁歪法により測定し，ナット側面の細部の残留応力状態を調べた．

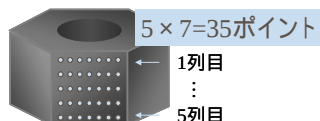


図-1 実験 1 の測定箇所

(2) 実験 1 の測定結果

ナットA・ナットBの1面についての測定結果を図-2，図-3に示す．横軸は測定の箇所を，縦軸は磁歪法によって得られた出力電圧である．なお，磁歪法における出力電圧は主応力差に比例している．

図-2，図-3より，A，B共に2から4列目までがほぼ同値で，5列目は電圧値が低くなるという傾向が

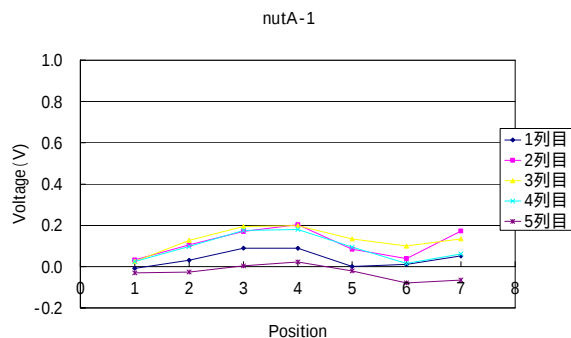


図-2 ナット A の 1 面での計測結果

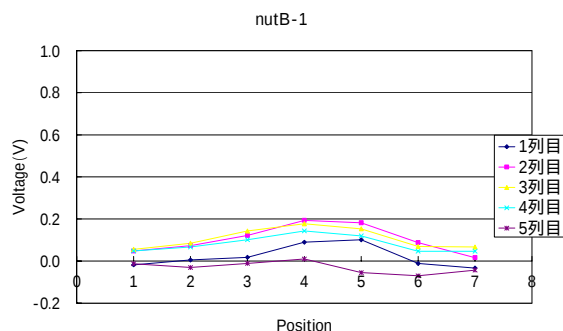


図-3 ナット B の 1 面での計測結果

見られる．また，電圧値が最大でも0.2V付近であることから，わずかに残留応力が発生していることがわかる．なお，概算ではあるが0.2Vの電圧は20MPa程度の応力に相当する．

(3) 実験 2 ・ナット中央の残留応力状態

次に，製品ごとのばらつきの確認と残留応力の平均値を求めるためにナット17個に対し，各6面について，その中央を磁歪法により測定した．

4章で述べるアンカー引張試験において，ナット中央に磁気プローブを当て，測定する予定であるため，今回はナット中央に限定して測定を行った．

(4) 実験 2 の測定結果

各ナット中央における6面の電圧値を平均し，全17個の結果を図-4に示す．横軸はナット番号，縦軸は磁歪法による出力電圧である．

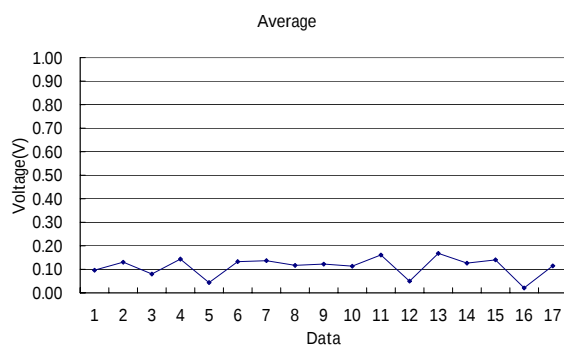


図-4 ナット 17 個における中央の電圧値

図-4より，ナット中央の電圧値は0.16V以下であり，製品ごとのばらつきは小さい．ナット番号5・12・16において値が小さく出ているのは，圧縮の残留応力が出ている面があるためであり，磁歪法では圧縮応力においては負の電圧値が検出される．そのため負の電圧値を単純に平均したため値が小さくなったからである．また，全17個のナット中央部における6面の電圧値の平均は0.11Vとなった．標準偏差は $\pm 0.041V$ であり，この値を残留応力での電圧値とする．磁歪法における主応力差と電圧値の関係から見るとこの値は無視できるほど小さくはないが，各ナットによる電圧のばらつきは非常に小さく，残

留応力はほぼ一定の範囲内に収まっている．以上のことからナットは製品ごとのばらつきが少なく，測定対象として適しているといえる．

4. アンカー引張試験

(1) 実験3・歪みゲージのみによる測定

現場に近い条件でのPSアンカー軸力とナットの応力状態を把握するため，実験室にてPSアンカー引張試験を行った．まず歪みゲージのみでナット側面の応力状態を測定した．ナットの同一面内でも計測箇所によって応力の差が出ることが予想されるので，その比率など法則性の有無を求める．

図-5のようにナット各面に5箇所，6面すべてに（ $6 \times 5 = 30$ 個）歪みゲージを貼り付けた．現場でのPSアンカー設置の際の軸力が50tfであることから，今回は55tfまで引張力を5tfごとに加え，各箇所の歪みの値を測定した．また，55tfまでの載荷-除荷を5回繰り返した．

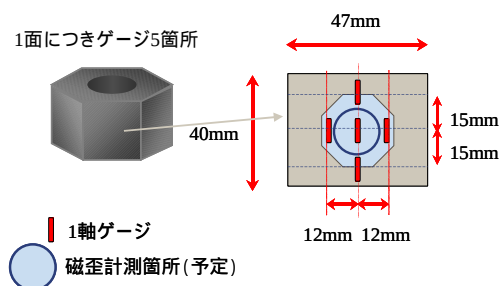


図-5 歪みゲージ貼り付け位置

(2) 実験3の測定結果

図-6は5回目の載荷-除荷における荷重を縦軸に，ナット上部(Top)・ナット中央(Center)・ナット下部(Bottom)における歪みの値を横軸にとったものである．

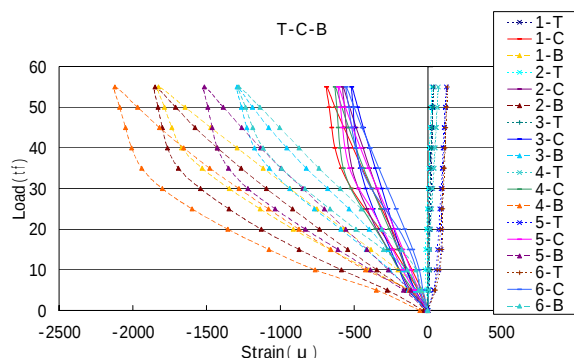


図-6 上部・中央・下部の歪み値

図-6より，上部については歪みの変化が非常に小さく，またその変化は引張方向である．下部については，歪み値の面における変化の度合いが大きい．またその値も非常に大きく，塑性変形していると思

われる面もある．中央での歪みは最大で550μ程度であり，面における変化もそれほど大きくないことがわかる．以上より，ナットの応力を測定する場合，中央が最も適しているといえる．

図-7の縦軸は，図-6と同じ5回目の載荷-除荷における荷重，横軸はナット中央の左部(Left)・中央(Center)・右部(Right)における歪みの値である．

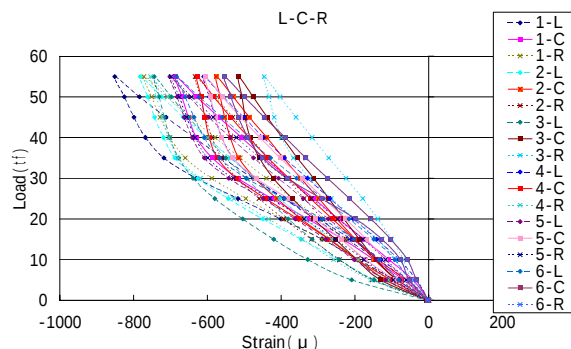


図-7 左部・中央・右部の歪み値

図-7では，左右と中央で歪み値に違いがあること，そして面によっても値が違っていることが確認できる．面ごとにばらつきが見られるのは，アンカーとナット内部がねじ構造になっており，アンカー軸力がナットに対して複雑に作用しているためと考えられる．

そこで，50tf時ナットの中央の左部(Left)・中央(Center)・右部(Right)における6面の歪み値を平均し，その値を示したのが図-8である．縦軸は歪み値，横軸はゲージの位置であり，0を中央として-100が左部，100が右部である．

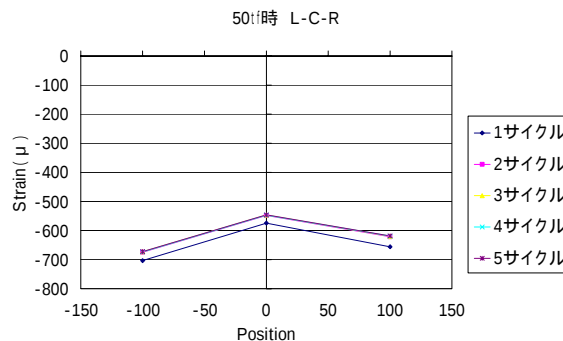


図-8 50tf時の左部・中央・右部の歪み値

合計5サイクルの載荷-除荷を行ったので5本のラインが得られたが，1サイクル目を除き，2～5サイクルではほぼ同値といってよい値が得られた．また1サイクル目と2～5サイクルでは，値は異なるがその変化は平行であるため，中央と左右の比率は等しいと考えられる．

5. 磁歪法を用いたアンカー引張試験

(1) 実験4・磁歪法と歪みゲージによる測定

実験3と同様にPSアンカー引張試験を行った．今回は磁歪法でナット中央を測定し，その左右に2箇所，6面すべてに（ $6 \times 2 = 12$ 個）に歪みゲージを貼り付けた．60tfまで引張力を5tfごとに加え，60tfまでの載荷-除荷を3回繰り返した．

(2) 実験4の測定結果

3回の載荷-除荷における荷重と電圧，荷重と歪みの関係を図-9，図-10に示す．ここで，電圧値，歪み値は共に6面での平均である．また，歪み値は，4章で述べた実験3によって求めた左右と中央の比を利用して，中央での歪み値に換算したものである．

実験3と同様に電圧，歪みともに載荷時は直線的，除荷時にはカーブを描くという傾向がみられた．

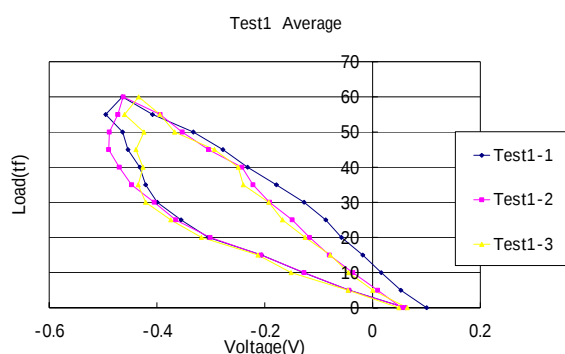


図-9 荷重とナット6面での平均電圧

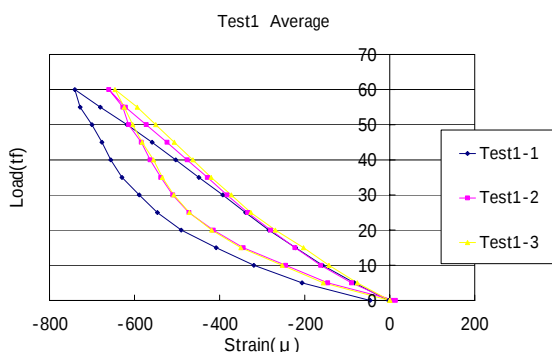


図-10 荷重とナット6面での平均歪み値

(3) アンカー軸力推定法

3回の上げ下ろしで得られた図-9の3本のラインを平均したものを図-11に示す．この軸力（荷重）-電

圧の関係を用いて，本研究の目的である軸力推定法を構築する．

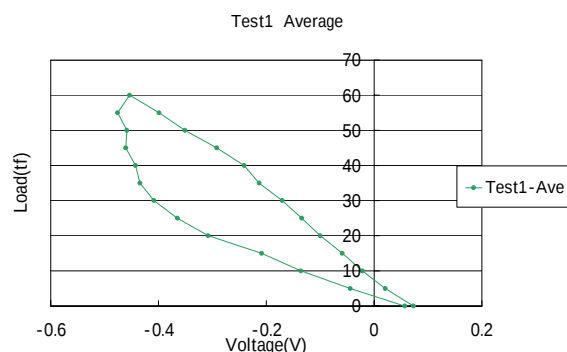


図-11 荷重と電圧の関係式

6. まとめと今後の課題

PSアンカーの軸力変化を調べるために，PSアンカーヘッド部のナットに注目し，磁歪法によるナットの残留応力測定を行ったところ，測定対象としての適性を確認することが出来た．さらにナットの中央における応力変化に焦点をあて，PSアンカー引張試験を行い，磁歪法を用いて荷重-電圧関係を求めることが出来た．この基本的関係を利用してPSアンカーの軸力を把握することで，地下空洞の状態を評価するための貴重な情報が得られることになる．

謝辞：本研究で実施した実験に際して多大な協力をして下さっ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) 中森絵美：磁歪法を用いた PS アンカーの軸力推定に関する基礎研究，卒業論文，神戸大学工学部，2005.
- 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, 2005.12.

STABILITY EVALUATION OF UNDERGROUND CAVERNS BY MEASURING FORCE IN PS-ANCHORS BY USE OF MAGNETIC ANISOTROPY SENSOR

Shinichi AKUTAGAWA, Yuki ARIMURA, Emi NAKAMORI,
Shunsuke SAKURAI, Shuuji BABA and Satoshi MORI

Magnetic anisotropy sensor is used for nondestructive measurement of stresses of a nut which is part of the head part of a PS anchor usually used for stabilizing rock mass in large scale underground caverns. 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.