

東濃鉱山における原位置長期岩盤挙動計測

Long-term in-situ measurement of rock mass behavior at the Tono Mine

富永 英治*・中間 茂雄**・高橋 昌弘*・里 優***

Eiji TOMINAGA, Shigeo NAKAMA, Masahiro TAKAHASHI, Masaru SATO

In this study long-term measurement of rock mass behavior was carried out using five types of measuring instruments at the Tono Mine, Gifu Prefecture, central Japan. The measurement results indicate that all the installed instruments have been working satisfactorily for two and a half years and are capable of continuing further measurement. A long-term strain change is less than $(2\sim3)\times 10^{-6}/\text{year}$ when the following influence factors are removed from the data for the entire measurement period: redistribution of stress and stabilization of the environmental condition around the instruments, and zero-point drift. A mid-term change reflects fluctuation of tides and atmospheric loading, and underground work. Additionally, dynamic deformation during an earthquake is identified in a short-term change.

Key Words: long-term measurement, rock mass behavior, long-term change, mid-term change, short-term change

1. はじめに

地下発電所や道路トンネル、ダムなど、長期にわたり安定が期待される構造物では、構造物自体やその周辺岩盤の変形挙動を長期にわたりモニタリングし、安定性を確認することが望ましい。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分場では、操業中や閉鎖後における岩盤や地下水の挙動を精密にモニタリングし、性能評価や安全評価に資することが求められている。

他方、土木工学の分野にて使用されてきたモニタリング技術、例えば光学式測量機器、埋め込み式の変位計等は、構造物建設中の変形挙動計測に重点が置かれているため、長期の耐久性は期待できないと考えるのが一般的である。また、その精度においても、掘削などによる大きな応力変化に伴う変形を対象としているため、応力変化が無い状態での長期モニタリングには不十分である。

このような背景から、本研究では高精度で、かつ耐久性があると考えられる計測器機を調査あるいは開発するとともに幾つかの計測機器を用い、同一の環境条件で長期にわたる精密計測を行い、それぞれの性能を比較した。

2. 地質概要

表一 1 土岐夾炭累層の平均的な物性値¹⁾

本計測は、岐阜県土岐市の東濃鉱山北延 NATM 坑道（深度約 135m）で実施した。坑道は、新第三紀中新世の瑞浪層群土岐夾炭累層内に展開している。土岐夾炭累層は砂岩・泥岩の互層および礫岩から構成され、亜炭などを含む不均質な層である。表一 1 に土岐夾炭累層の平均的な物性値¹⁾を示す。

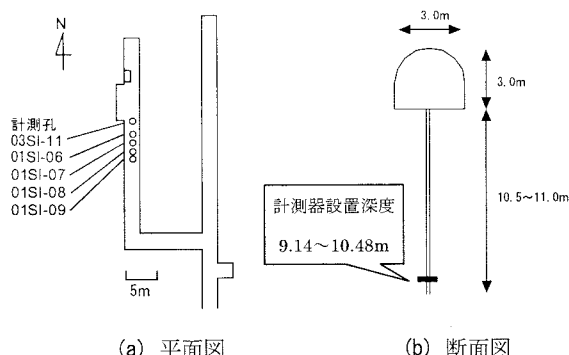
単位体積重量	18.1kN/m ³
有効空隙率	47%
一軸圧縮強度	6MPa
弾性係数	2.7GPa

* (株) 地層科学研究所 ** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

***正会員 (株) 地層科学研究所

3. 計測概要

計測は、坑道の底盤から鉛直下向きに掘削したボーリング孔を利用して行われた。その平面図および断面図を図－1に示す。坑道の延長方向は南北方向であり、ボーリング孔は北から順に03SI-11、01SI-06、01SI-07、01SI-08、01SI-09孔となっている。03SI-11孔と01SI-06孔の距離は2m、それ以外のボーリング孔間の距離は1mである。孔径は、66～116mmである。



図－1 計測坑道および計測ボーリング孔

使用した計測器の概要を表－2に示す。計測は、ひずみ、傾斜、間隙水圧の3項目とし、それぞれ長期計測に適していると考えられる計測器を選定して設置した。ひずみの計測には石井式ひずみ計（㈩テクノ管谷製）、光ファイバー埋設型ひずみ計（ROCTEST社製）および埋め込み型ひずみ計（㈩東京測器研究所製）を、傾斜の計測には気泡センサー型傾斜計（Pinnacle社製）を、間隙水圧の計測にはパッカー式間隙水圧計（㈩地層科学研究所製）を用いた。

石井式ひずみ計は、口径変化を測定するものであるが、テコの原理を適用したメカニカルな拡大装置を取り付けることにより40倍近く変位拡大した後、マグネセンサーにより電気的な出力に変換するものである²⁾。これにより、 10^{-9} といった非常に微小なひずみの測定が可能になっている。地殻変動の観測等に用いられており、耐久性にも優れている。センサーはa, b, cの3成分あり、いずれも水平方向でa成分はE-W方向、b成分はS30°W、c成分はN30°Wとなるように設置した。後述するように、石井式ひずみ計に関しては2003年12月に追加設置しており、最初に設置したものを石井式ひずみ計A、追加設置したものを石井式ひずみ計Bと記している。

光ファイバー埋設型ひずみ計は、ファブリペロー干渉計の原理を利用して設計されており、両端にフランジがついたステンレスチューブとチューブ内に固定されたファブリペロー型ひずみ変換器から構成されている。広帯域波長の光源から入射した光が、ファブリペロー間隙を構成している1対の半反射鏡内において繰り返し反射することにより生じる干渉波を利用して、間隙幅の変化を測定する。このひずみ計を岩盤内に埋設することにより、岩盤内のひずみを精度よくかつ長期間にわたって測定できるようになっている。センサーは、a, bの2成分で、いずれも鉛直方向である。

表－2 計測器の概要一覧

計測装置	石井式 ひずみ計 A	石井式 ひずみ計 B	光ファイバー 埋設型ひずみ計	埋め込み型 ひずみ計	パッカー式 間隙水圧計	気泡センサー型 傾斜計
型名	NBS62-3C	PNBS62-3H	EFO	KM-30S1, S2	G-SP	5500 シリーズ
製作社名	(有) テクノ管谷	(有) テクノ管谷	ROCTEST 社	㈩東京測器研究 所	㈩地層科学研 究 所	Pinnacle 社
センサ 方向	水平 3 成分 a 成分 E-W b 成分 S30° W c 成分 N30° W	水平 3 成分 a 成分 E-W b 成分 S30° W c 成分 N30° E	鉛直 2 成分 a 成分, b 成分	S1:鉛直 1 成分 S2:水平 1 成分 E-W	—	水平 2 成分 X 成分 E-W Y 成分 N-S
測定容量	a 成分 $\pm 400 \times 10^{-6}$ b 成分 $\pm 200 \times 10^{-6}$ c 成分 $\pm 800 \times 10^{-6}$	全成分 $\pm 315 \times 10^{-6}$	$\pm 5000 \times 10^{-6}$	$\pm 5000 \times 10^{-6}$	水圧 2 MPa	$\pm 10^\circ$
孔 名	01SI-07	03SI-11	01SI-06	01SI-06	01SI-08	01SI-09
設置深度	10.25m	10.25m	10.25m	10.25m	10.48m	9.14m

埋め込み型ひずみ計 KM-30S1 および KM-30S2 は、コンクリート内部のひずみを測定する目的で開発されたひずみ計 KM-30 を改良して、防水性および耐圧性を向上させたものである。S2 では、リード線取出口を $\phi 2.0\text{mm}$ ステンレスパイプで補強し、入出力ケーブルとのジョイント部に樹脂充填を施している。S1 では、それに加えて、センサー部のフランジ間を被覆材（ベローズ）で補強している。センサー方向については、S1 は鉛直方向、S2 は水平 E-W 方向である。

パッカー式間隙水圧計は、パッカーによって測定区間を止水し、配管を介して水を測定区間に注入し、水圧を周囲の地下水圧以上に上昇させた状態で管路を閉め、管路内の水圧と地下水圧が一致した状態で測定するものである。測定区間や配管径を小さくさせることで測定区間内に入れる水量を少なくし、測定区間内の剛性を高め、周囲の水圧変化の応答性を高めた構造となっている。

気泡センサー型傾斜計は、センサー内にある電解質溶液中の気泡が重力場に応じて移動することにより、電極間の電位が変位する。この電位の変化を直交する 2 方向について測定することによって、x、y 方向の傾斜を同時に計測する。分解能は 1～100 ナノラジアンまで変更でき、測定対象に応じた分解能が設定できる。また、測定可能傾斜範囲は $\pm 10^\circ$ で測定傾斜範囲も広いことも特徴の一つである。本計測では、x 方向は E-W 方向に、y 方向は N-S 方向に対応している。

3 種類のひずみ計は、所定の深度にセットした後、充填材で充填し固定した。パッカー式間隙水圧計は、窒素ガスを用いてパッカー圧を作用させることにより、所定の深度に固定した。傾斜計は、塩ビ管を孔内に挿入し、その外周空隙部分に充填材を打設し固定した後、塩ビ管内に設置した。石井式ひずみ計は、最初に石井式ひずみ計 A を設置した際には、充填用ポンプの輸送能力がやや不足していたため、ひずみ計周辺の充填が不完全な状態になっていることが懸念された。そこで、より輸送能力の高いポンプを用いて、2003 年 12 月に石井式ひずみ計 B を追加設置した。

サンプリング周波数は、石井式ひずみ計、光ファイバー埋設型ひずみ計、埋め込み型ひずみ計および間隙水圧計では、静的な挙動から動的な挙動まで計測できるように 10Hz に設定した。また、気泡センサー型傾斜計は、1Hz とした。得られたデータは、15 分間の平均化処理を行った。なお、地震動等の動的な変化を検討する際には、得られた生データをそのまま検討用データとしている。

計測は、2001 年 10 月 1 日から現在まで行っているが、ここでは、2001 年 10 月 1 日～2004 年 3 月 31 日までの計測データについて検討を行った。光ファイバー埋設型ひずみ計については、2001 年 7 月の計器設置直後に手動により計測を行い、その後 2003 年 12 月 10 日～2004 年 1 月 15 日まで連続自動計測を行っているが、ここでは、連続計測の内容を検討した。

4. 結果および考察

長期的な岩盤の変形および間隙水圧を計測するために設置した計器は、2004 年 3 月 31 日時点においても全て順調に作動しており、さらに計測を続けることが可能な状態にある。

ここでは、計測結果について、計測全期間を対象とした長期的な変動、1 週間あるいは 1 ヶ月間といった中期的な変動および地震等の短期的な変動に分けて検討を行った。

4. 1 長期における変動

計測全期間における各計測器による計測結果を図-2 に示す。ひずみの計測では、圧縮を正、引張を負としている。各計測において、データが連続していない部分は、坑内作業等に伴うデータ欠損部である。傾斜計のデータは、x 成分は正が東で負が西、y 成分は正が北で負が南であり、欠測後計測再開時にセンサーの自動レベリン

グを行っているので、各欠測前後のデータには連続性はない。

石井式ひずみ計 A のひずみ変化量は、3 成分とも 10×10^{-6} 以内であり、年平均 3.5×10^{-6} 以下である。ひずみの変化は計器設置直後が最も大きく、時間の経過とともに徐々に小さくなっている。計器設置後 1 年以上経過してからのひずみの変化は非常に小さく、3 成分とも 2×10^{-6} /年以下である。3 成分中、a 成分（東西方向）は引張、b 成分（S30° W 方向）と c 成分（N30° W 方向）は圧縮方向のひずみ変化を示している。

石井式ひずみ計 B も、石井式ひずみ計 A と同様に、ひずみの変化は計器設置直後が最も大きく、時間の経過とともに徐々に小さくなっている。そして、石井式ひずみ計 B を設置した直後のひずみ変化量は、同じ時期における石井式ひずみ計 A によるひずみ変化量よりもはるかに大きくなっている。したがって、計器設置直後のひずみ変化は、ひずみ計設置作業に関連して生じたものであり、具体的には、ひずみ計周辺の応力再配分や間隙水圧、温度等の環境条件の安定化に伴うひずみの変化であると考えられる。それらの影響は、計器設置後 1 年以上といった長期間に及ぶと考えられる。したがって、実際の岩盤のひずみ変化は、それらの影響がなくなった後の石井式ひずみ計 A の計測結果によれば、 2×10^{-6} /年以下であると考えられる。

埋め込み型ひずみ計によるひずみ変化量は、鉛直成分、水平成分ともに引張方向に約 60×10^{-6} であり、石井式ひずみ計によるそれと比較すると大きい。特にひずみ計設置直後のひずみ変化が著しく大きくなっており、その大部分はゼロ点のドリフトによると考えられる。1 年以上経過してからのひずみ変化量は $(3.0 \sim 3.4) \times 10^{-6}$ /年程度であり、石井式ひずみ計によるそれとの差はあまり大きくはない。

埋め込み型ひずみ計の水平成分は、石井式ひずみ計 A の a 成分と同じ東西方向であり、どちらのひずみも引張方向の変化を示している。

パッカー式間隙水圧計では、計測期間中における間隙水圧の値は 0.142MPa～0.155MPa であり、0.002MPa 程度以下の小さな変化しか示さない時期と、0.007MPa 程度の顕著な変化を示す時期とがみられる。地下水はほぼ孔口まで満たされており、間隙水圧計の設置深度は約 10.48m であることから、測定された間隙水圧の値は、静水圧分布を仮定した場合の値よりも大きい。

気泡センサー型傾斜計は、計測全期間中を通じて、全体的に、Y 成分（南北成分）は変化が少なく、X 成分（東西成分）は西傾斜していることが認められる。

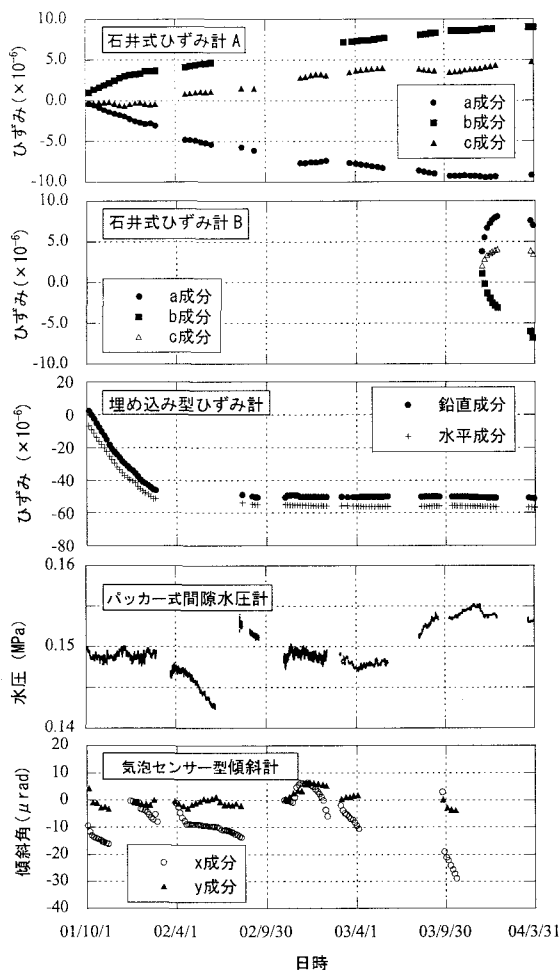


図-2 各計器の測定結果 (2001 年 10 月 1 日
～2004 年 3 月 31 日)

4. 2 中期における変動

中期における変動では、気圧変動、潮位変化、坑内作業の影響を受けていることがわかった。ここでは、気圧変動、潮位変化の影響について検討を行う。

(1) 気圧変動の影響

石井式ひずみ計 A、光ファイバー埋設型ひずみ計、埋め込み型ひずみ計、パッカー式間隙水圧計について検討する。図-3は、2003年12月12日から2004年1月16日までのそれらの計測器における経時変化と気圧変動を比較したものを示す。

石井式ひずみ計 A の気圧変動に対応したひずみ変化は、全成分でわずかに認められ、負の相関関係を示す。光ファイバー埋設型ひずみ計の気圧変動に対応したひずみ変化は、2成分とも明瞭に認められ、正の相関関係を示す。埋め込み型ひずみ計の気圧変動に対応したひずみ変化は、不明瞭である。パッカー式間隙水圧計は、気圧変動に対応した水圧変動が認められ、正の相関関係を示す。その変動の大きさは、気圧変動の約12%である。

(2) 潮位変化の影響

石井式ひずみ計 A の b 成分、光ファイバー埋設型ひずみ計の a 成分、埋め込み型ひずみ計の鉛直成分について検討する。図-4は、2004年1月1日～2004年1月7日までのそれらの計測器の経時変化と潮位変化の比較をしたものである。図に示す潮位データは、国土地理院の愛知県常滑市港町の験潮場データを使用している。石井式ひずみ計 A の b 成分での潮位変化に対応したひずみ変化は、わずかに認められ、正の相関関係を示す。光ファイバー埋設型ひずみ計の潮位変化に対応したひずみ変化は、全成分とも明瞭に認められ、正の相関関係を示す。埋め込み型ひずみ計では、潮位変化に対応したひずみ変化がわずかに認められるが、ノイズの大きさに比べ変化量は小さい。

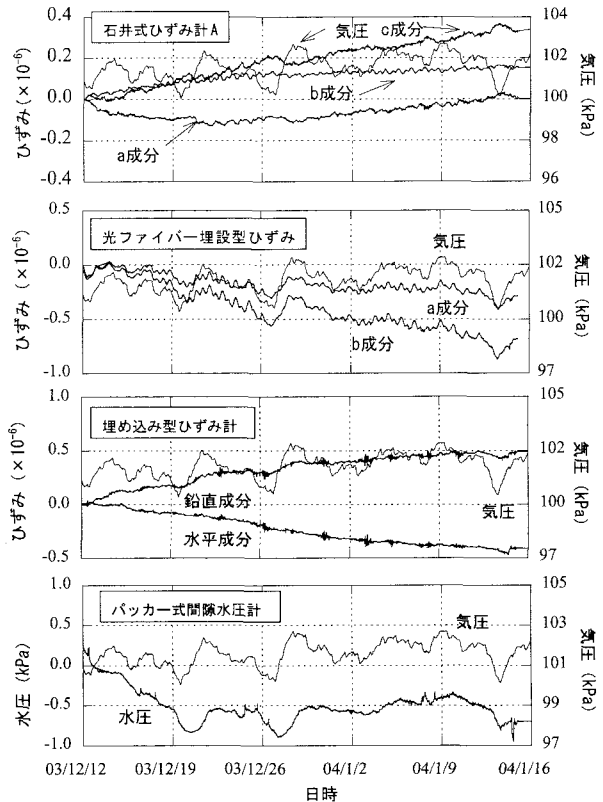


図-3 各計器の測定結果と気圧との比較

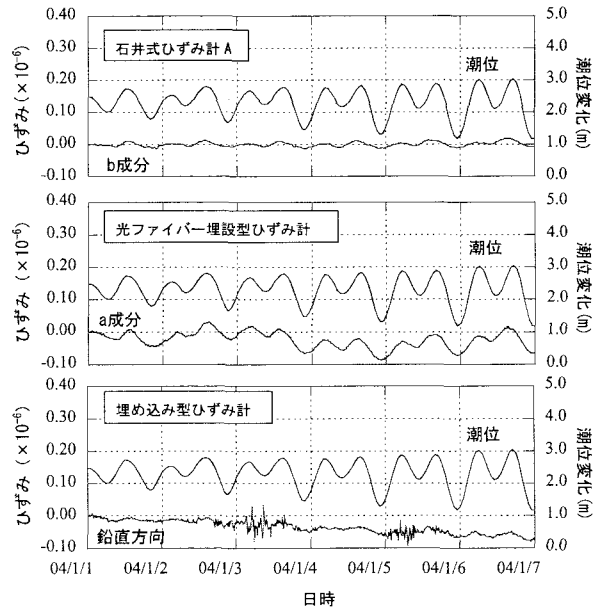


図-4 各計器の測定結果と潮位変化との比較

4. 3 短期における変動

短期における変動では、地震動による影響を受けていることがわかった。石井式ひずみ計 A および光ファイバー埋設型ひずみ計でその影響が認められた。

気象庁による震度データベースによると計測期間中、土岐市の震度 1 以上の地震は計 15 回であった。そのうち、地震時に対応したひずみの変化が認められたものは 4 回であった。そのうち、最もひずみの変化が認められたものについて示す。

図-5 は、石井式ひずみ計 A の c 成分および光ファイバー埋設型ひずみ計鉛直 b 成分における地震時のひずみ変化を示す。地震が発生した時刻は、2004 年 1 月 6 日 14 時 50 分 52 秒、震央は熊野灘、震源の深さは 37km、マグニチュード

3.7 で土岐市では震度 2 を記録している。光ファイバー埋設型ひずみ計の鉛直 b 成分および石井式ひずみ計 A の c 成分とも地震発生とほぼ同時に、ひずみが変化していることが認められる。その後、光ファイバー埋設型ひずみ計のひずみの変化はごく短期間であるのに対して、石井式ひずみ計のひずみの変化は、地震発生後 1 分間程度、続いていることが認められる。この地震動によるひずみ変化量は、光ファイバー埋設型ひずみ計では 0.6×10^{-6} 程度、石井式ひずみ計では 0.05×10^{-6} 程度である。

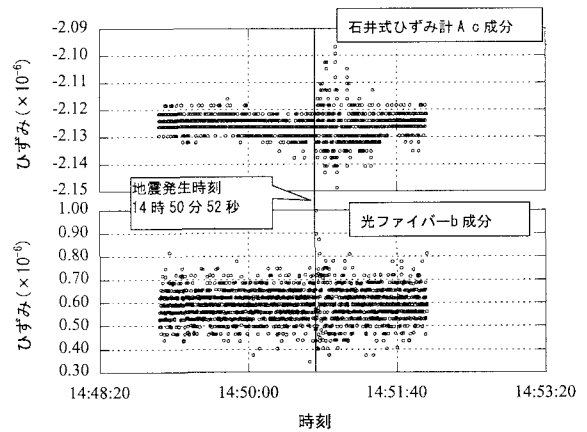


図-5 各計器の地震時の挙動

5. まとめ

高精度で、かつ耐久性があると考えられるひずみ計、傾斜計および間隙水圧計を選定し、同一条件で長期にわたる計測を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 長期的な岩盤の変形および間隙水圧を計測するために設置した計器は全て順調に作動しており、さらに計測を続けることが可能な状態にある。
- (2) 岩盤のひずみ変化の計測値に対しては、計器設置後 1 年以上にわたって、計器設置の影響（計器周辺の応力再配分と環境条件の安定化の影響）や、ゼロ点のドリフトの影響が顕著に見られる。これらの影響を除いた実際の岩盤の長期的なひずみの変化量は $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$ / 年以下であると考えられる。
- (3) 中期的な岩盤の挙動は、気圧変動、潮位変化および坑内作業の影響を受けている。これらの影響によるひずみの変化量は、測定方向だけではなく、計測器によっても異なる。
- (4) 石井式ひずみ計および光ファイバー埋設型ひずみ計では、少数ではあるが、地震時における動的なひずみの変化が計測された。

参考文献

- 1) 山本卓也, 菊地 正, 佐藤稔紀, 杉原弘造: 工法の違いによる掘削影響の現場測定, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 345-350, 1998.
- 2) 石井 紘: 地震予知のためのボアホール地殻活動総合観測装置と岩盤工学への応用, 第 19 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp. 3-10, 1998.