

光ファイバひずみセンサを用いた トンネル変状計測

澤田 昌孝¹・岡田 哲実¹・中田 英二¹・市原 義久²・田畑 和文³・検見崎 千浩⁴

¹正会員 財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:sawada@criepi.denken.or.jp

²釧路コールマイン株式会社 採鉱グループ (〒085-0811 北海道釧路市興津五丁目2-23)

³日鐵溶接工業株式会社 プラズマ・オプト事業部 (〒275-0001 千葉県習志野市東習志野七丁目6-1)

⁴第一高周波株式会社 技術部 (〒210-0821 神奈川県川崎市川崎区殿町二丁目17-8)

地下重要構造物の建設が検討される中で、掘削時の応力解放やその後のクリープ変形により堆積岩トンネルが長期的に破壊に至ることが懸念されている。鉱山においては、未使用となったトンネルをメンテナンスせずに放置することが多く、それらのトンネルはやがて大変形・崩壊に至る。

著者らは炭鉱内のトンネル変形を長期間にわたって連続計測することで、その崩壊メカニズムの検討を行っている。炭鉱内では電子機器の連続的な使用が制限されるため、光ファイバを用いた変形計測を適用した。計測中に湿度増加に伴うトンネル壁面の強度低下が原因と考えられる剥離現象がみとめられ、その変状が光ファイバによる計測で捉えられた。

Key Words : fiber optic sensing, sedimentary rock, tunnel, slaking, coal mine

1. はじめに

地下重要構造物の建設が検討される中で、掘削時の応力解放やその後のクリープ変形により堆積岩トンネルが長期的に破壊に至ることが懸念されている。鉱山においては、未使用となったトンネルをメンテナンスせずに放置することが多く、それらのトンネルは大変形・崩落に至る。著者らは炭鉱内のトンネル変形を長期間にわたって連続計測することにより、その崩壊メカニズムの検討を行っている。

坑内での電子機器の連続的な使用が制限されることが多い鉱山への適用性と長期的な耐久性の観点から、分布型光ファイバひずみ計測 (BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) に着目し、トンネル監視の連続計測に適用した。本稿では、現場に適用した光ファイバ計測システムについて紹介し、これまでに捉えられたトンネルの変状について報告するとともに、変状の発生メカニズムについて考察を示す。

2. 現場概要

計測は、釧路コールマイン (株) 炭鉱内のトンネルで実施された。海底下約225m (水深15m)、海岸近くの坑

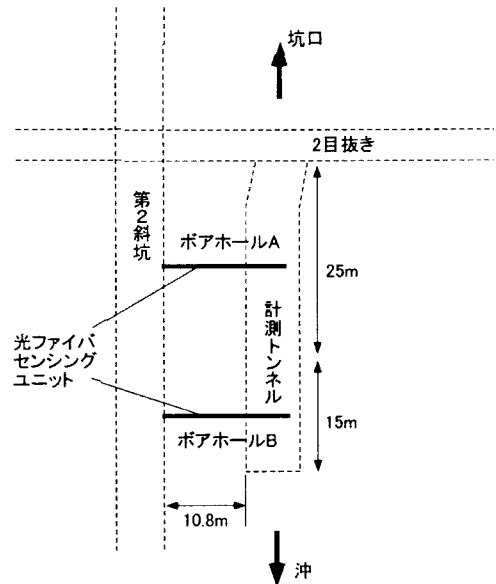


図-1 計測トンネルと第2斜坑

口より1.7km沖合いに位置する2目抜き坑道から新たに約40m掘削したものである。トンネル断面は幅5.9m、高さ3.3m、掘削断面積16m²の半円形状である。長さ40mのうち奥の15mでは、支保を撤去し、変形を加速させる試験

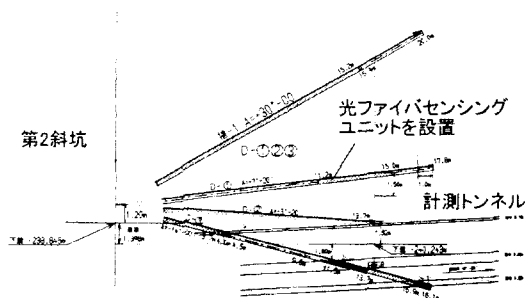


図-2 トンネル・ボーリングの断面配置 (ボアホールB)

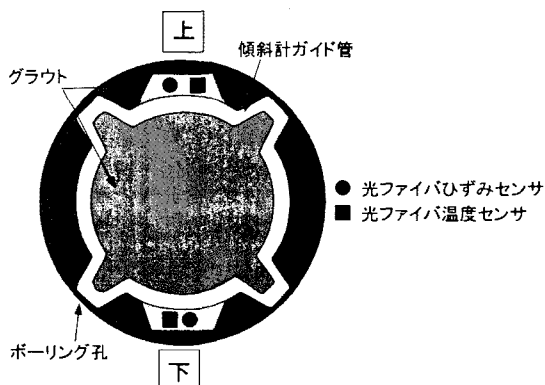


図-3 光ファイバセンシングユニットの断面図

を実施する予定がある。周辺岩盤は粗粒砂岩・細粒砂岩を主体とし、一部、砂質泥岩、薄い石炭層などが混在する。粗粒砂岩の一軸圧縮強度は38MPaであった。計測トンネル周辺には第2斜坑と呼ばれる傾斜 $4^{\circ}40'$ の斜坑がほぼ同じ向きに存在する。計測トンネルと第2斜坑の水平距離は約10.8mである。この第2斜坑より事前ボーリング・計器埋設が実施された。そのうち、後述する光ファイバセンシングユニットが設置されたボーリング孔が2本あり、ボアホールA、ボアホールBと呼ぶこととする。(図-1、図-2)。ボアホールA、Bの位置は、それぞれ支保を撤去しない区間と撤去する区間の中間点となるように決められた。

3. 光ファイバひずみ計測システム

光ファイバを用いたひずみ計測は2種類実施した。1つはボーリング孔を利用したハイブリッド光ファイバセンシングユニットであり、もう1つは、トンネル軸に沿って壁面に設置するものである。

(1) ハイブリッド光ファイバセンシングユニット

ハイブリッド光ファイバセンシングユニットは黒田らによって提案された方法で、図-3のように挿入式傾斜計

のガイド管に金属管入りカシメ構造型の光ファイバひずみセンサ(カシメとは、金属管に生じるひずみを金属管内部の光ファイバ素線に正確に伝えるため、一定間隔で金属管を外側から圧縮素線を挟むことにより、金属管と素線の間にずれが生じないようにした部分のことである)と金属管入りの光ファイバ温度センサを管軸方向に設置したものである¹⁾。温度センサは温度変化によるひずみ増減を補正するために用いる。ひずみセンサおよび温度センサは断面内で上下2箇所(1往復)に配置され、ひずみセンサはプリテンションをかけて1mごとに固定されている。ひずみセンサにおける金属管のカシメ間隔は1mとした。光ファイバセンシングユニットを設置後、ボーリング孔内をグラウトで充填した。光ファイバセンシングユニットを挿入するボーリング孔は水平からやや上向きであり(ボアホールA: $+2^{\circ}30'$ 、ボアホールB: $+7^{\circ}20'$)、計測トンネルの天端で1.5m上部に位置する。上下の光ファイバひずみセンサのひずみからユニットの曲げ変形などを評価できる。ボアホールA、B内の光ファイバひずみセンサは通信用光ファイバと接続され、それぞれ別系統で地上の計測室と連絡するようにした。すなわち、ボアホールA、B設置の光ファイバひずみセンサはそれぞれ独立に地表とループを形成している。ボアホールA設置のものをライン1、ボアホールB設置のものをライン2と呼ぶこととする。それに対して、ボアホールA、Bの光ファイバ温度センサは同一ループで地上の計測室と連絡するものとした。

(2) 試験トンネル内の光ファイバひずみセンサ

計測トンネルの壁面の押し出しを計測するために、トンネル内壁にも光ファイバひずみセンサを設置した。(1)の光ファイバセンシングユニットにおいて、ガイド管に設置したものと同様の金属管入りカシメ構造型光ファイバひずみセンサ(外径2.0mm、カシメ間隔1.0m)を、トンネル軸線に沿って壁面に打ち込んだアンカーの頭部に固定した。

計測トンネルに用いられた支保は、鋼枠および矢木である。計測トンネルの奥側15mはトンネルの変形を加速させるために、将来的に鋼枠を撤去する予定である。そのため、光ファイバは鋼枠の裏側に設置する必要がある。光ファイバひずみセンサをトンネル内壁に設置した手順を以下に示す(図-4、図-5)。

- 天端と両肩部の矢木を取り外し、鋼枠と矢木の間に空間を創る。
- 壁面の凹凸を観察し、壁面に触れることなく光ファイバが張れるように固定位置を考え、アンカー(18cmのネジ棒)を打つ。根入れ深さは

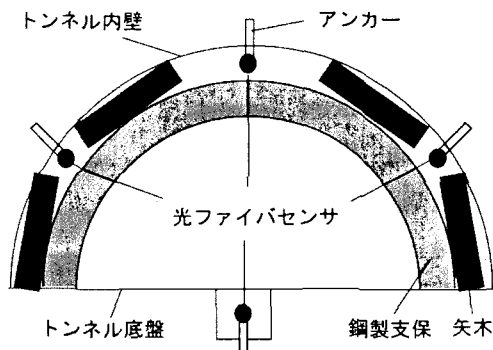


図-4 計測トンネル内での光ファイバセンサの配置 (横断面図)

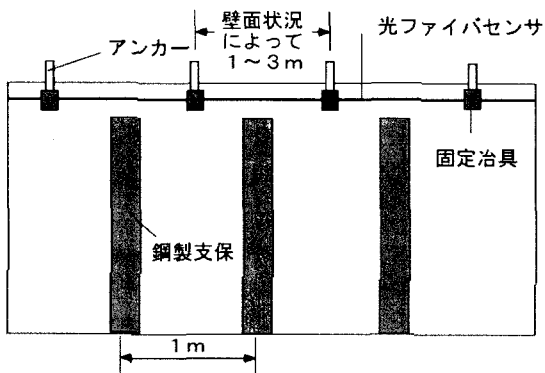


図-5 計測トンネル内での光ファイバセンサの配置 (天端、縦断面図)

11cmである。壁面の状況により、アンカーはトンネル軸方向に1~3m間隔で設置される。

- アンカーの端部に光ファイバを機械的に固定するための治具を取り付ける。アンカー根元から光ファイバセンサまでの距離は約9cmとなる。
- プリテンションをかけながら光ファイバひずみセンサを治具に固定する。

また、トンネル底盤にも光ファイバひずみセンサを設置した。底盤に溝を掘り、アンカー・固定治具を溝内に取り付け、プリテンションをかけながら光ファイバひずみセンサを設置した後、セメントで溝を埋めた。

図-6のように、2目抜きから見て奥側の支保撤去区間と手前側の保存区間でトンネル延長を分割し、それぞれの天端、両肩部に光ファイバひずみセンサを設置した。底盤設置の光ファイバひずみセンサとあわせて、光ファイバひずみセンサは7本である。これらのセンサを表-1のようにセンサ①~⑦と名付ける。奥側のセンサ①~③を通信光ファイバで連絡し、手前側のセンサ④~⑥および底盤のセンサ⑦を通信光ファイバで連絡した。それぞれをライン3およびライン4と名付ける。両者はそれ

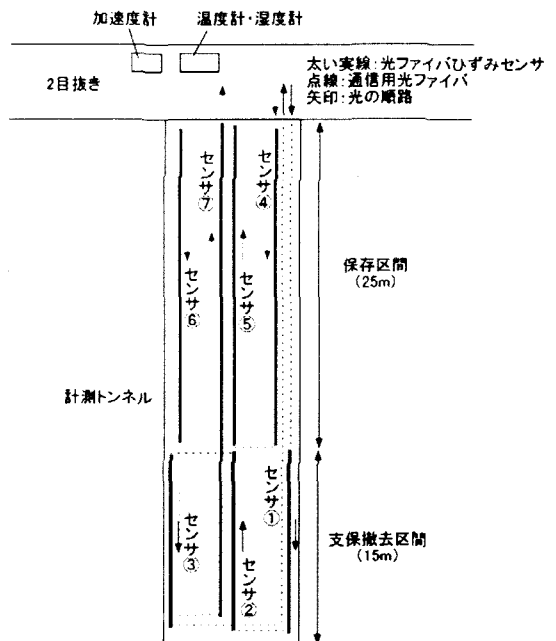


図-6 計測トンネル内での光ファイバひずみセンサの配置 (平面配置概略図)

表-1 計測トンネル内の光ファイバセンサの配置

ライン3	位置	ライン4	位置
センサ①	左奥	センサ④	左手前
センサ②	天端奥	センサ⑤	天端手前
センサ③	右奥	センサ⑥	右手前
		センサ⑦	底盤

※ 位置は2目抜きとの交差部から見た場合

ぞれ独立に地表の計測室とループを形成している。

計測トンネルの入口付近で温度・湿度を計測するため、光ファイバ温度センサは設置しなかった。

(3) 計測システム

計測は地表の計測室で実施している。ひずみ測定器としては、高精度光ファイバひずみアナライザ (横河電気製, AQ8603), 温度測定器としては、高精度光ファイバ温度分布計測システム (FOTM) で適用されている高精度光ファイバ温度計測装置 (SENSA製, DTS800-SR) を用いる。ひずみの計測は1時間に1回実施することとし、1回計測が終わる毎に光チャンネルセクタ (横河電気製, AQ8201-43) によって、ライン1~4を順に切り替える。したがって、各ラインの計測間隔は4時間となる。なお、温度については連続計測は実施せず、不定期に計測している。

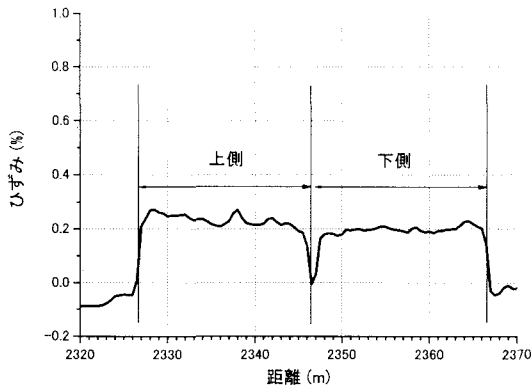


図-7 ひずみ分布の初期状態 (ボアホールB, ライン2)

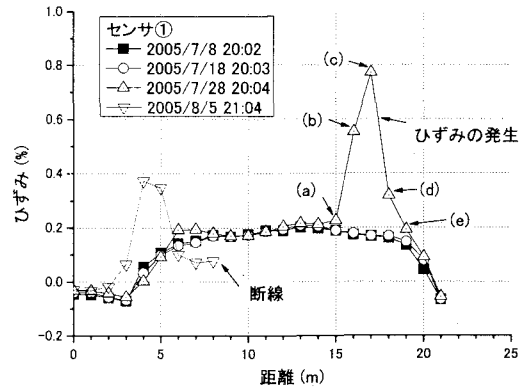


図-9 ひずみ分布の変化 (センサ①)

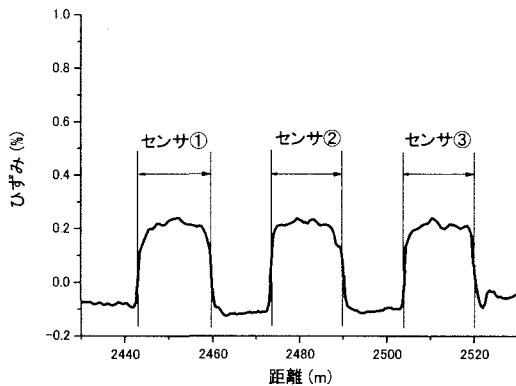


図-8 ひずみ分布の初期状態 (ライン3)

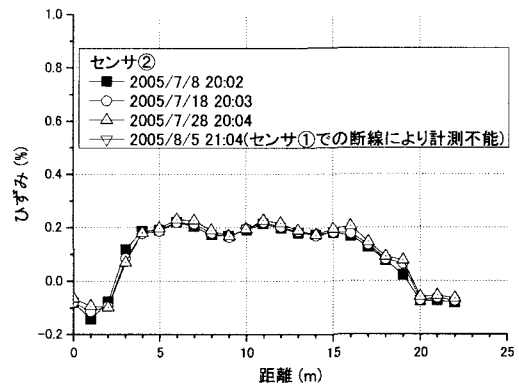


図-10 ひずみ分布の変化 (センサ②)

4. 計測結果

(1) ひずみ分布の初期値

図-7、図-8にそれぞれボアホールBとライン3の初期のひずみ分布を示す。横軸は地表のひずみ測定器からの距離を表す。光ファイバひずみセンサには所定のプリテンションをかけているため、センサに対応する部分には約0.2%のひずみが作用している。図-7において、上側と下側の境界でひずみが0%なのは、折り返しているためにテンションが作用しないからである。トンネルの変形に伴い、光ファイバセンサに作用するひずみは、初期状態からのひずみの増減で表現される。

(2) トンネル変状の計測

2005年7月～8月にトンネル内壁に設置した光ファイバひずみセンサが複数個所で断線した。その周辺時期のライン3での計測結果を示す。図-9～図-11はそれぞれライン3におけるセンサ①～③のひずみ分布の変化を4つの日時での分布を取り出すことで示している。横軸の距離は

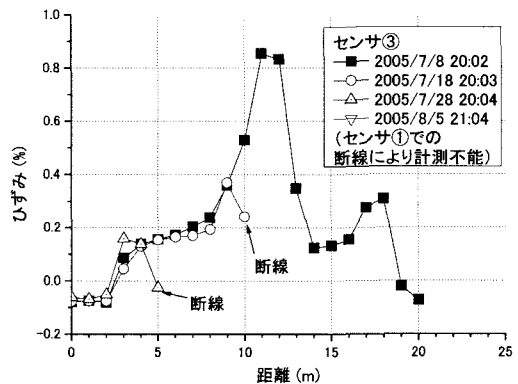


図-11 ひずみ分布の変化 (センサ③)

0m点を各センサのすぐ手前に取り直している。センサ①では、7月18日の段階では、特にひずみの変化はなかったが、7月28日になると、16m～18m区間でひずみの大幅な上昇が見られた。8月5日では、8m点で断線が発生しており、その点以降の計測が不能となっている (セン

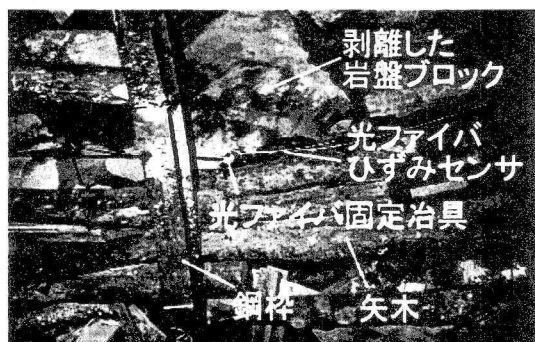


図-12 剥離の発生したトンネル壁面の様子（センサ③の12m付近）

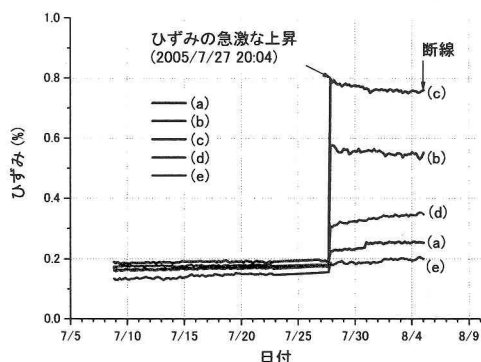


図-13 ひずみの経時変化（センサ①）

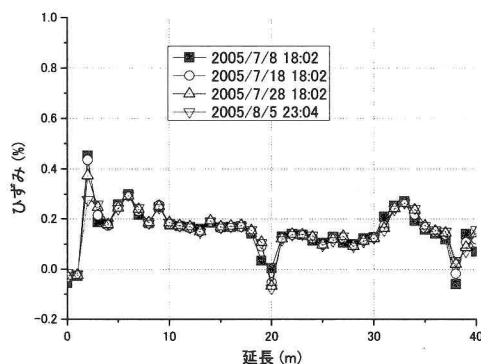


図-14 ひずみ分布の変化（ボアホールB）

サ②③も含む）。センサ②では、ひずみの増加はほとんど見られていない。センサ③では、7月8日の段階で既に9m～13mの区間でひずみの増加がみとめられ、7月18日では10m点で断線、さらに7月28日では5m点で断線が発生している。

図-12は7月8日の段階で0.8%以上のひずみが発生していたセンサ③の12m点付近の岩盤壁面の様子である。トンネルの側壁において、アンカーが打ち込まれている岩

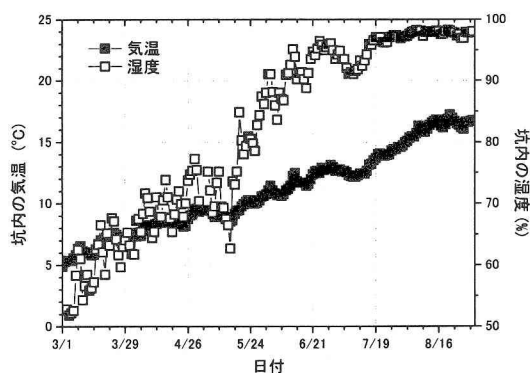


図-15 温度・湿度の経時変化（計測トンネル入口）

盤がブロック化し、剥離している。このため、光ファイバが固定治具ごと押し出され、光ファイバひずみセンサに岩盤ブロックが接触している。

トンネル掘削から8ヶ月近くが経過した7月8日の段階では、このようなひずみの増大はセンサ③の2箇所のみであったが、その後1ヶ月で、次々と岩盤ブロックの剥離が発生し、ひずみの増加、光ファイバひずみセンサの断線が複数箇所が発生した。同様の現象は、ライン4においても発生している。図-13はセンサ①におけるひずみの経時変化を表している。図-13中の(a)～(e)は図-9中の(a)～(e)と対応している。7月26日以前はほとんど変動はないが、7月27日に急激なひずみの上昇がみとめられる。これにより、トンネル壁面の変状が発生した時間が7月27日16時～20時、断線の発生した時間が8月5日1時～5時と特定できる。計測時間間隔をさらに小さくすれば、より詳細な分析が可能であろう。

同じ時期のボアホールBの光ファイバひずみセンシングユニットでの計測結果を図-14に示す。ほとんどひずみの変化は見られない理由は、ボーリング孔に近い天端の変状が起こっていないためと考えられる。また、計測トンネル内で発生した変状は地山全体の挙動というよりは、壁面近傍での局所的な現象であると考えられる。

5. トンネル変状メカニズムの考察

釧路炭鉱内の計測トンネルは、掘削後8ヶ月間は安定していたが、その後の1ヶ月間で急激に壁面が不安定化した。その要因について考察する。

著者らは、7月4日と8月18日に計測トンネルに入坑した。入坑時の計測トンネルの様子の違いとして以下のことが挙げられる。

- 8月18日はトンネル内に湿気が多いと感じられ、壁面も濡れていた。7月4日は特にそのような点には気づかなかった。

表-2 試験トンネル内岩石の自然含水率の変化（粗粒砂岩）

日付	間隙率 (%)	飽和度 (%)
7月4日	11.63	70
8月18日	9.37	100

- 8月18日には、剥離した岩片が多く落ちていた。それらは湿っており、踏むことで容易に崩れるほど軟質化していた。
- 7月4日では、入口付近の光ファイバ固定治具にわずかに錆が浮いていたのみであったが、8月18日になるとほぼすべての固定治具において表面全体が錆びていた。

図-15に2005年3月～8月の試験トンネル入口付近での温度および湿度の変化を示す。3月には50%程度あった湿度が徐々に増加し、7月以降は95%以上となっている。

従来から、炭鉱の坑壁岩石（夾炭層岩石、乾燥時の一軸圧縮強度：30～100MPa）は水分状態の違いにより劣化の進行度合いが異なることが指摘されていた²⁾。釧路炭鉱の岩石においても、中田らが、自然含水状態（飽和度は坑壁で20～50%、ボーリング直後で85%である）から1週間蒸留水に浸水飽和させた供試体では、自然含水状態のままの供試体よりも大幅に一軸圧縮強度・圧裂引張強度が低下することを確認している³⁾。また、乾燥した岩片を相対湿度が90%のデジケータ内で重量が増加しなくなるまで、養生したところ、ほとんどの試料の飽和度は5日程度で概ね自然飽和度まで上昇することから、坑壁周辺の岩盤の飽和度は坑内湿度に応じて変化しやすいと考えられる³⁾。

表-2は、7月4日および8月18日に試験トンネル内に落ちていた粗粒砂岩の岩石ブロックの飽和度を計測したものである。この期間中に飽和度が上昇したことが分かる。なお、7月4日の坑内湿度は手持ちの湿度計（T&D CORP. 製、TR-72S）では80%であった。この値は試験トンネル入口での計測値よりも小さい。図-15に示したように、

試験トンネル入口での湿度は7月4日段階で既に90%を超えており、それ以降の変化は小さい。換気設備の配置等で、トンネル内の場所により湿度が異なると考えられ、試験トンネル内部の湿度が80%であったとしても不合理ではない。一方、8月18日は、壁面の状況からトンネル全体が入口付近と同じく100%近い湿度であったと考えられる。

以上のことから、2005年7月以降の試験トンネル壁面での剥離現象の増加は、坑内湿度の上昇により、壁面岩石の飽和度が上昇し、岩石の強度が低下したためと考えられる。

6. まとめ

炭鉱内のトンネルの変形計測に光ファイバひずみ計測を適用した。計測期間中に、トンネル壁面の剥離が複数箇所で発生したが、壁面に沿って設置した光ファイバのひずみ増加として、その現象を捉えることができた。剥離の原因は、計測トンネル内の湿度増加に伴い、岩石強度が低下したためと考えられる。

今後は計測トンネル内で一部の支保を撤去し、トンネルの変形を加速させ、その変形計測を実施するとともに、水理、地化学特性の変化の計測を実施する予定である。支保撤去後の計測トンネル内の計測においては、壁面の剥離で光ファイバが断線することがないように工夫する必要がある。

参考文献

- 1) 黒田清一郎ほか：光ファイバによるハイブリッドセンシングユニットの開発と現場適用性確認試験，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.111-116，2005。
- 2) 一ノ瀬政友ほか：含水による夾炭層岩石の強度の変化，日本鉱業会誌，第104巻，pp.561-566，1988。
- 3) 中田英二ほか：海底下堆積岩の浸水崩壊特性と水質が強度・透水特性に与える影響，応用地質，第45巻，第2号，pp.71-82，2004。

MEASUREMENT OF TUNNEL DEFORMATION USING FIBER OPTIC SENSING

Masataka SAWADA, Tetsuji OKADA, Eiji NAKATA, Yoshihisa ICHIHARA,
Kazufumi TABATA, and Chihiro KEMMIZAKI

It is possible that tunnels in the sedimentary rock are seriously damaged during excavation and by creep behavior after excavation, while there are various plans to construct significant underground facilities. In mines, tunnels are left without any maintainances, and they will seriously deform and collapse.

Authors are investigating the mechanism of collapse of tunnels by measuring the long-term deformation of a tunnel in the coal mine. Fiber optic sensing is applied because the usage of electric devices in the coal mine is limited. Fiber optic sensing could catch the deformation of the tunnel that was caused by slaking of tunnel wall.