

## 光ひずみセンサのV字型敷設による岩盤斜面のモニタリング手法

著者	楠見 晴重, 成田 一真, 前田 稔, 川端 祐子, 小熊 一郎
雑誌名	第11回岩の力学国内シンポジウム論文集、CD-ROM出版
発行年	2002-01-25
その他のタイトル	THE MONITORING SYSTEM OF THE ROCK SLOPE BY LAYING OPTICAL STRAIN SENSOR IN THE PRINT OF V
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10112/5736">http://hdl.handle.net/10112/5736</a>

# 光ひずみセンサのV字型敷設による岩盤斜面の モニタリング手法

楠見 晴重<sup>1</sup>・成田 一真<sup>2</sup>・前田 稔<sup>3</sup>・川端 祐子<sup>4</sup>・小熊 一郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

E-mail:kusumi@ipcku.kansai-u.ac.jp

<sup>2</sup>関西大学大学院 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>3</sup>関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

<sup>4</sup>関電興業株式会社 土木部 (〒661-0974 尼崎市若王寺3-11-20)

<sup>5</sup>住友電気工業株式会社 (〒554-0024 大阪市此花区島屋1-1-3)

## THE MONITORING SYSTEM OF THE ROCK SLOPE BY LAYING OPTICAL STRAIN SENSOR IN THE PRINT OF V

Harushige KUSUMI, Kazuma NARITA, Minoru MAEDA, Yuko KAWABATA  
and Ichirou OGUMA

The optics fiber is usually used to the basic main lines of informatics transmission. In recently, it has been attracted special interest that the optics fiber can be used to the strain sensor lines applicable on the some characterizations of this fiber.

In this study the focus was on the strain measurement technology of optical fibers. It was conducted fundamental research for applying optical fibers to rock slope strain measurement. On the basis of the result, the optical strain sensor was laid in the print of V in natural fracture rock slope. And the movement of a natural slope was measured by laid fibers on the slope.

### 1. まえがき

光ファイバは、現在の光通信技術の主要な部分を成しているが、光ファイバの持つ諸特性を応用したセンサ線としても最近注目されている。光ファイバがひずみセンサの機能を有することが確認され、ひずみ計測技術が確立されてからはその応用技術が検討されている。<sup>1), 2)</sup>

また岩盤斜面においては、岩盤斜面の計測監視技術の確立が大きな問題となっている現状から、特に急峻な岩盤斜面において長期にわたって、多くの測点を計測する必要がある。

ここで光ひずみセンサは、微小の変位に対しても高精度で検知できることが確認されており、現場に電源が不要で、低損失であるため数 km に渡る遠隔監視が可能であることから、岩盤斜面の動態観測手法として十分利用できると思われる。<sup>3), 4)</sup>しかし、岩盤斜面の適用に際しては、その張り方に対する岩盤の挙動とセンサの計測データとの関連性、施工法、保護手法等に関して、未解決な部分が多く残されているのが現状である。

本研究は、光ひずみセンサによって自然もしくは人工的な岩盤斜面の動態観測法として、実際の現場

計測に適応するために引張、圧縮ひずみを捉えるための固定方法を検討し、その固定方法における種々の確認試験を実施した。その結果を基に、実際の亀裂性岩盤斜面において光ひずみセンサを V 字型に敷設した。そして、岩盤斜面内に静的破砕剤を注入することにより、人工的に岩盤を変位させ、そのときの光ひずみセンサの出力特性を検討した。さらに、人工的に変位させた箇所については、光ひずみセンサと平行に変位計を取り付けることにより計測を行い比較検討した。

### 2. 光ひずみセンサ(BOTDR)の測定原理

ひずみ測定器である BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) の測定原理<sup>5)</sup>を以下に示す。光パルスをファイバに注入すると、ファイバの至る所から後方散乱光が帰ってくる。図.1 は、散乱光の周波数分布であり、最大のレーリー光の両サイドに散乱光のピークが 2 つ現れる。1 つがラマン散乱光であり、これは温度に依存して発光パワーが変わるという特徴を有している。もう 1 つのピークがブリルアン散乱光であり、ファイバの歪によって発生周波数がシフトする特性を有している。

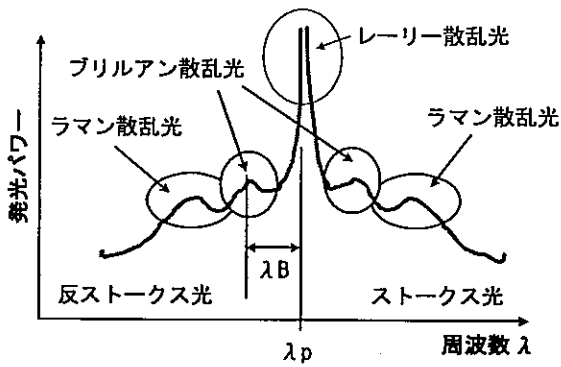


図.1 散乱光の周波数分布

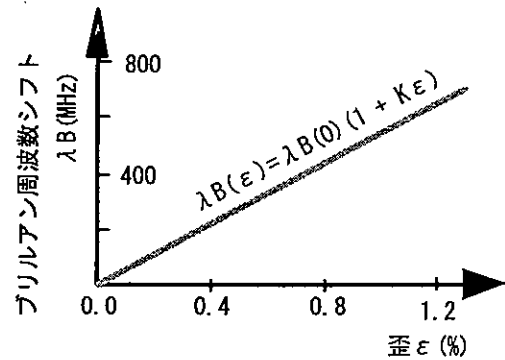


図.2 ブリルアン周波数シフトのひずみ依存特性例

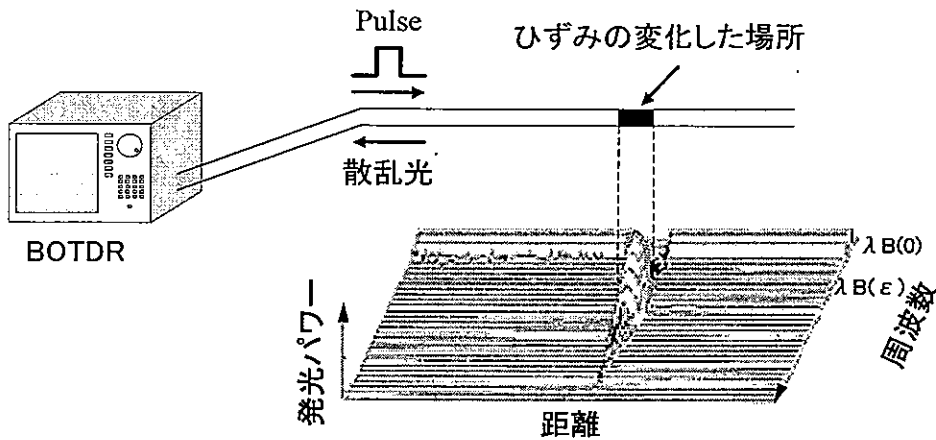


図.3 計測原理

図.2 は、ブリルアン周波数シフトのひずみ依存特性であり、光ファイバに生じたひずみに比例して変化することがわかる。その関係は次式で表される。

$$\lambda B(\epsilon) = \lambda B(0) \times (1 + K \cdot \epsilon) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda B(\epsilon)$  : 実測のブリルアンスペクトルの最大レベル周波数、 $\lambda B(0)$  : 光ファイバの固有ブリルアン周波数シフト (ゼロひずみの周波数)、 $K$  : ひずみ係数 ( $K=4.78$ )、 $\epsilon$  : ひずみ量 (%)

図.3 は、発光パルスの周波数を一定間隔で変化させることにより連続的に距離とブリルアン散乱光の発光パワーを表したものである。これにより、計測器からの距離とひずみの関係が得られる。

### 3. 固定方法

光ファイバは、ひずみセンサとして用いるためにはある程度の張力を作用させて敷設する必要がある。また、屋外でファイバを敷設するためには、様々な外的要因から保護することも不可欠である。そのような観点から、岩盤斜面の動態観測には、ドロップファイバが適当であると考えられる。ここで、ドロップファイバとはファイバ芯線の両端に鋼線を配置し、防食層で一体化させたものである。

過去の研究において、固定治具に関して種々の検討がなされたが、今回は、図.4 に示すようなしずく

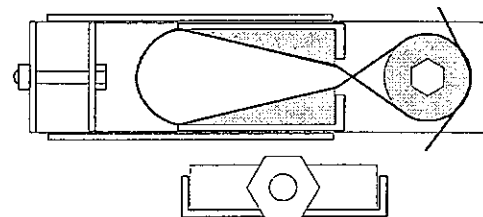


図.4 しずく型クリート

型クリートを使用した。本固定治具は計量であり、この治具に1回巻き付けることにより固定することが可能である。利点としては、作業性がよく、敷設段階で容易に張力をかけることができる。

### 4. 光ファイバ

図.5 は、モニタリングシステムのセンサ部であるドロップファイバの構造について示す。ドロップファイバとは、図.6 に示されるファイバ芯線の両端に鋼線を配置し、防食層で一体化させたものである。光ファイバとは、本来脆弱なものであるが、ひずみセンサとして用いるためにはある程度の張力をかけて敷設する必要がある。また、屋外でファイバを敷設するためには、様々な外的要因から保護することも不可欠である。そのような観点から、岩盤斜面の動態観測には、ドロップファイバが適当であると考

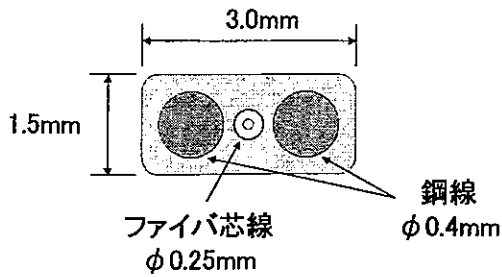


図.5 ドロップファイバ断面図

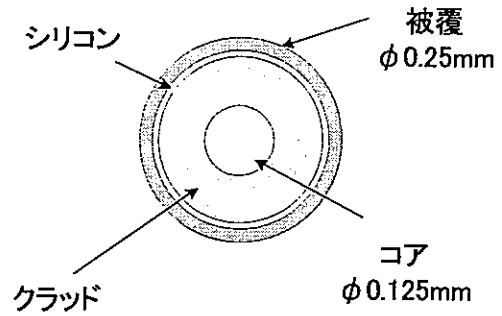


図.6 ファイバ芯線断面図

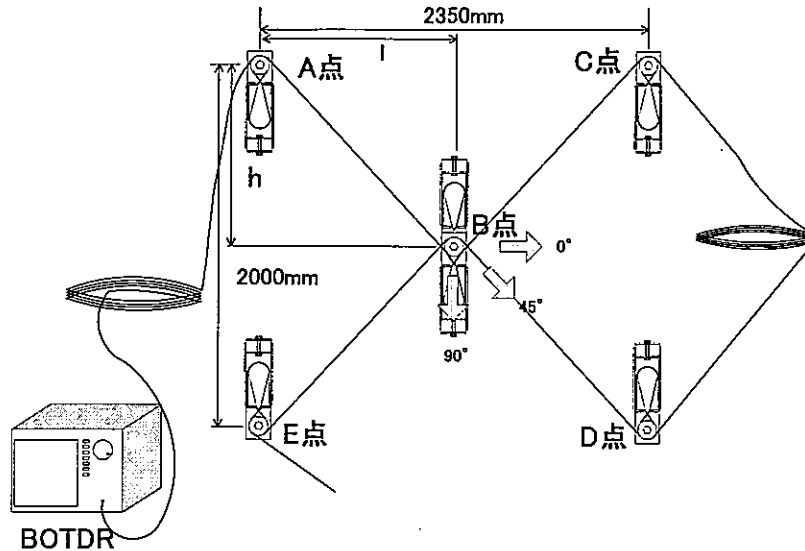


図.7 実験装置図

えられる。また、現地の敷設状況を考慮し、 $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $50^{\circ}\text{C}$ まで気温が変化すると仮定した場合のドロップファイバの熱ひずみ量は、最大で 0.0726%である。このことから、敷設の際に各温度条件下で 0.1%以上のひずみを与えるためには、プリテンションを 0.2%程度与えておけば良い。

## 5. 室内試験

### (1) V字型配置による確認試験

図.7 は、V字型配置による確認試験の試験装置を示したものである。ここで、A,C,D,E 点に直接アンカーボルトを打ち込むことで A,C,D,E 点を固定している。また、中心に B 点を変位させるために、変位装置を取り付ける。このとき、同一となるように調整する。移動間隔としては、2mm までは 0.5mm 間隔で、6mm までは 1mm 間隔で 10mm までは 2mm 間隔で変位させ往復させた。その移動量に対する理論値と計測データの比較を行なった。また、伸縮の繰り返しによる変化に対して、計測データの妥当性を検証するために、任意の移動量についても検討した。移動方向に対しては、上下左右対称であるので  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  の 3 方向について行った。ここで、初期ひずみとしては、引張ひずみを受けると想定さ

れる区間については 0.1%程度、圧縮ひずみを受けると想定される区間については 0.6%程度作用させることで、引張・圧縮に対しても測定できるようにした。ここで、正方向は引張側、負方向は圧縮側の変位を示す。

図.8 は、 $90^{\circ}$  方向に移動させた場合の測定結果について示している。この方向は、AB 間、BC 間がほぼ同等の引張ひずみを、BD 間、BE 間は圧縮をひずみを受けると想定される方向である。AB 間、BC 間については往路、復路ともに誤差は、 $\pm 0.02\%$ と良く一致しており 2 回目に至っても誤差はほとんど見られなかった。また、圧縮方向である BD 間、BE 間については 1 回目に移動量 10mm 地点で、理論値と離れた結果になった。その後、元の位置まで戻してもひずみが戻ることはなかった。しかしながら、1 回目の復路の結果については、ほぼ理論値と同じ傾きでひずみが推移していることから、固定部分のしずく型クリートとファイバとが、一体化していなかったことに起因していると思われる。また、変位を戻した後、変位を与えると 1 回目の復路と 2 回目の往路とは一致したことから、ファイバを敷設した段階で 0.5%程度の引張ひずみを与えることによって、光ファイバと固定治具とを一体化させることにより高精度のひずみ計測が可能となることが

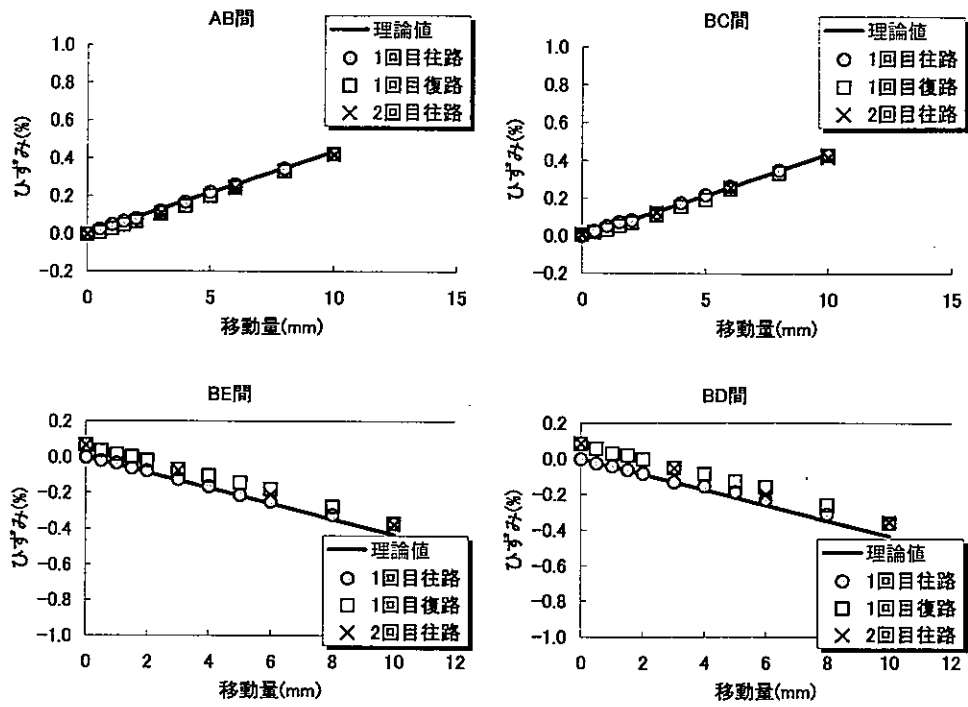


図.8 90° 方向における各点の計測結果

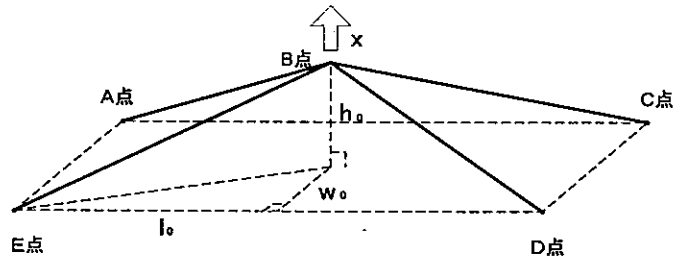


図.9 V字型配置による3次元確認試験装置図

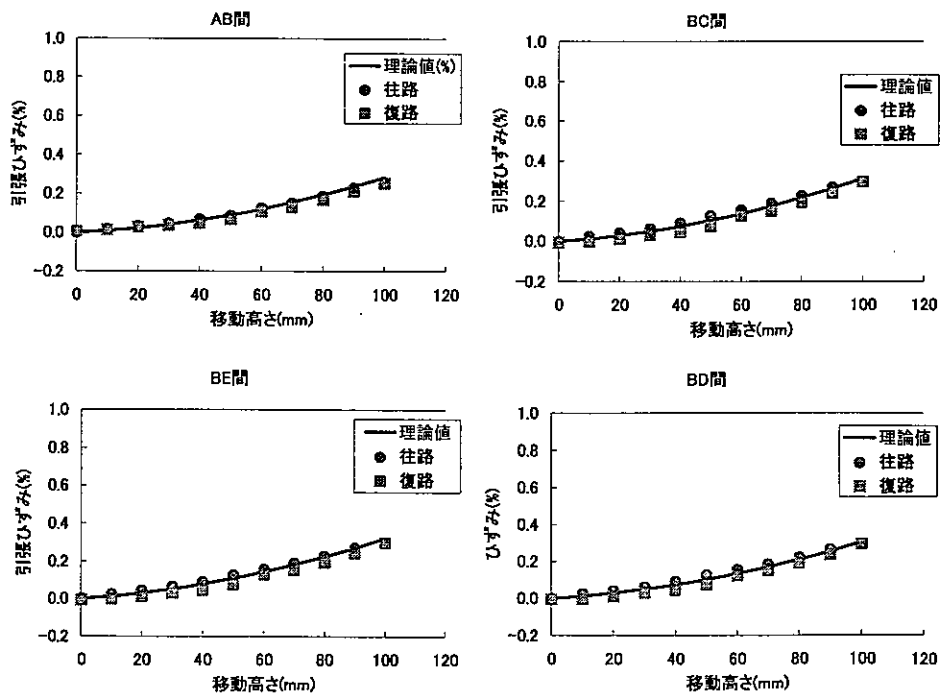


図.10 V字型配置における3次元確認試験結果

- 固定治具(しずく型クリート)
- 変位計
- 光ひずみセンサ
- ▼ 静的破碎剤注入箇所

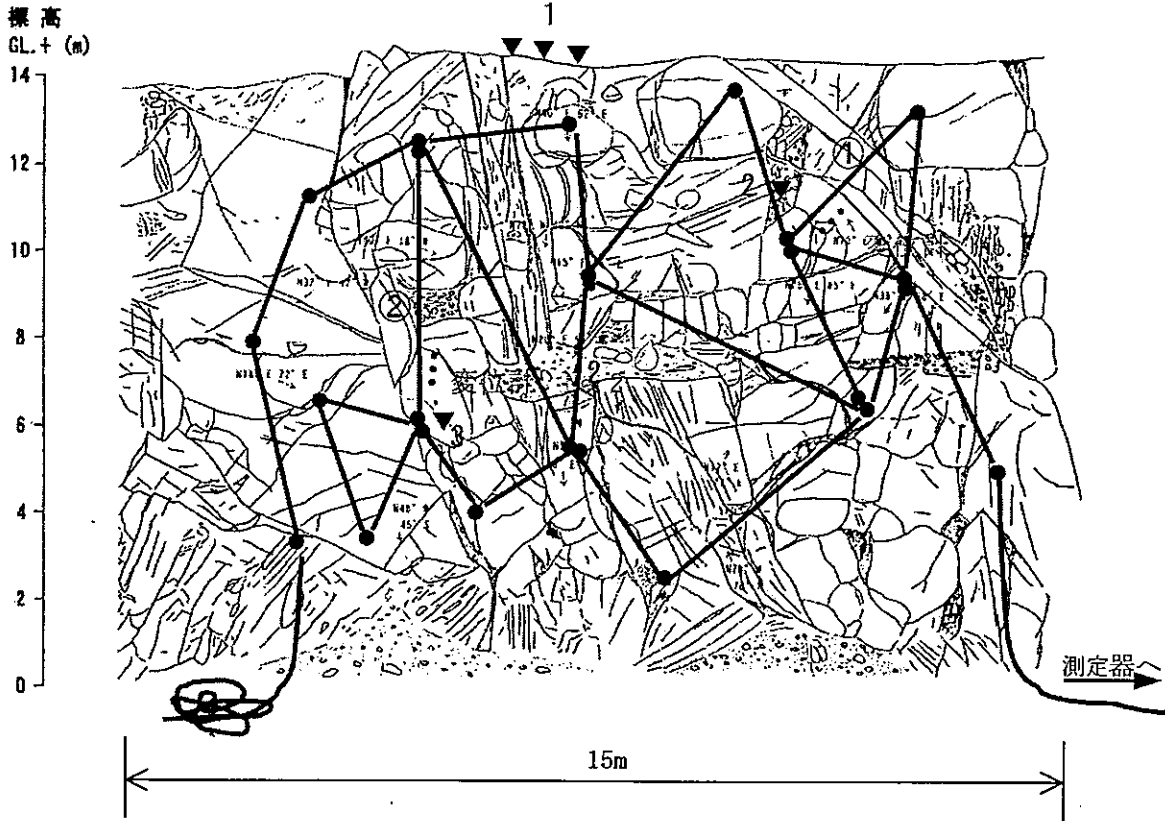


図.11 計測斜面状況図

められた。

(2) V字型配置による3次元確認試験

図.9はV字型配置による3次元確認試験装置を示したものである。アンカーで固定したジャッキの上にB点を固定し、各点をB点の高さに合わせた。このとき、光ファイバが折れ曲がる可能性があるため、A,C,D,E点には角度をつけた板を敷いた。その後、B点を10mm間隔で100mmまでジャッキによって上昇させ、理論値と計測データとの比較を行った。また、100mmから同様に10mm間隔で下降させたときについても検討をおこなった。

図.10はV字型配置における各区間における3次元確認試験結果を示している。すべての区間において、往路・復路とも理論値とほぼ一致した結果をえることができた。このことから、光ファイバが折れ曲がらないように敷設することで、3次元的な変位に対しても計測可能であると考えられる。

6. 現地試験

(1)地質地形概要

観測地は大阪府北部に位置し、地形的には比較的起伏の小さい小山群からなり、標高は約130mである。周辺には急崖の路頭がいくつか見られる。観測

地域の地質は、広域的には堆積岩類からなる超丹波帯に属している。調査した露頭(幅約25m、高さ約15m)では、主に暗灰色の頁岩が見られるが一部はホルフェルス化している。また、全体に亀裂が発達しているが岩盤自体は比較的硬質である。亀裂や節理の走向は、ほぼ南北と東西方向に規制され、傾斜は70°以上の急傾斜を呈しているものが多い。それにより、ブロック状やシート状に剥離する傾向が見られ、部分的に開口亀裂も認められる。また、観測地の中には幅約1m弱の破碎帯も見られ、粘土化する部分もある。路頭の下部には、節理の発達した灰白色の流紋岩が貫入している。

(2)動態観測手法

幅約15m、高さ約14m間の岩盤斜面において、総延長90mの光ひずみセンサを図.11に示すようにV字を組み合わせて敷設した。固定点にはしずく型クリートを用い、保護材としてセンサ部である光ファイバに合成樹脂製可とう電線管を被せた。人工的に岩盤変位を生じさせるため、静的破碎剤を図.11の1~3(1,2はボーリング孔、3は発破孔)に注入した。変位計については岩盤変位が予想される位置、光ひずみセンサ①②とほぼ平行になるように変位計No.1,2を設置した。

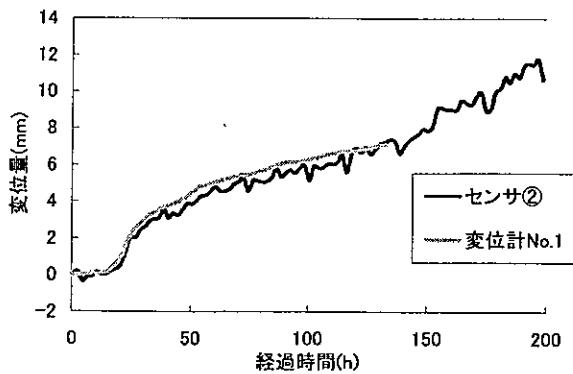


図.12 センサ①と変位計 No. 1 との計測結果比較

### (3)計測結果及び考察

光ひずみセンサ①と変位計 No.1 で得られた計測結果の比較を図.12 に、光ひずみセンサ②と変位計 No.2 で得られた計測結果の比較を図.13 に示す。ここで、正方向は引張側、負方向は圧縮側の変位を示す。

図.12 から、光ひずみセンサ①は静的破砕剤によって引張側に変位が生じたことがわかる。そして、このセンサの計測結果は経時変化、変化量ともに変位計の結果と良く一致していた。また、図.13 から光ひずみセンサ②は、静的破砕剤によって圧縮側の変位が生じたことがわかる。この場合、経時変化は同様な傾向を呈しているが、変位量に多少の誤差が見られた。誤差の原因として、変位計をセンサと平行に配置したが、目視であったため多少角度にずれがあったと考えられる。また、変位計では点としての変位しかとらえられないので、面として変位をとらえることができるセンサとは、変位量が一致しなかったのではないかと推測される。

## 7. まとめ

本研究では、室内試験においてV字型配置により引張および圧縮を同時に測定を行った。引張方向に関しては、常に高精度で測定することが可能であることが認められた。圧縮方向については、固定治具とファイバをあらかじめ一体化させることで、引張時とほぼ同等の精度で測定できることが確認できた。このことにより、3次元方向の変位に関しても測定できる可能性が認められた。

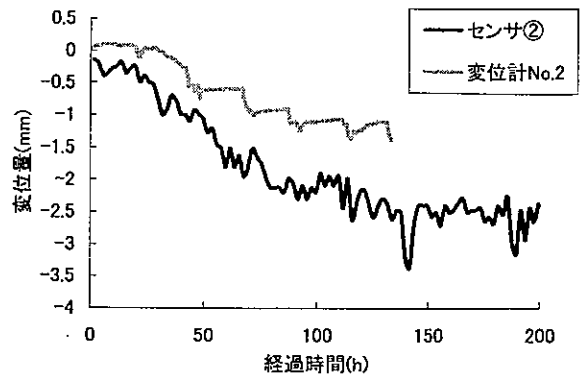


図.13 センサ②と変位計 No. 2 との計測結果比較

また、その結果を基に実際の岩盤斜面においてV字型配置を組み合わせて敷設することにより、引張、圧縮ともに岩盤の挙動の経時変化を捕らえることができた。また、引張側では変位量についても精度が高い計測ができた。

したがって、光ファイバセンサの全区間における計測結果の引張、圧縮ひずみを見れば、岩盤斜面を面的な動きで捕らえることができ、センサを敷設して岩盤斜面全体の動きが把握できることを確認した。

## 参考文献

- 1) 鈴木英世, Maria Q. FENG : 構造物の計測のための光ファイバを用いたセンサの開発について, 土木学会論文集, No.528/VI-29, pp.7-15, 1995.
- 2) 海野修司, 佐藤智典, 三木博史, 藤井厚企, 野口典孝 : 河川管理用光ファイバセンサーの開発, 第34回地盤工学研究発表会論文集, pp.175-176, 1999.
- 3) 楠見晴重, 藤枝敬史, 佐藤浩二, 成田一真, 西田一彦 : 光ひずみセンサによる岩盤斜面の動態観測に関する基礎的研究, 第35回地盤工学研究発表会論文集, pp.2493-2494, 2000.
- 4) H.Kusumi, K.Fujieda, H.Saito & K.Narita: Monitoring system of tension strain on rock slope by optical strain sensor, Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, pp.125-130, 2001.6.
- 5) 倉嶋利雄, 田中郁昭, 薄 知規 : 光ファイバを用いた歪分布計測, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.378-382, 1997.