

# 光ファイバ振動センサの高感度化と軟岩供試体破壊時のAE測定

森孝之<sup>1\*</sup>・岩野圭太<sup>1</sup>・中嶋誠門<sup>1</sup>・田仲正弘<sup>2</sup>・菊山清児<sup>2</sup>・藤井宏和<sup>2</sup>

<sup>1</sup>鹿島建設株式会社 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

<sup>2</sup>株式会社レーザック (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

\*E-mail: moritakayuki@kajima.com

光ファイバ振動センサ(FODセンサ)はレーザードップラ変調を利用した振動センサで、防爆性や電磁気ノイズの影響を受けないこと、さらに、長距離伝送が可能であるなどの特徴を有している。このFODセンサを岩盤構造物の健全性モニタリングへの適用を検討している。しかし軟岩のようなAE信号の距離減衰が著しい岩盤では、従来のファイバ長が2m巻きのFODセンサでは微小なAE信号を確実に捉えるには限界がある。そこで、AEセンサの高感度化を目的として、40m巻きのFODセンサを試作した。この高感度型FODセンサとPZT型センサの両者を用い、田下石供試体を用いて一軸圧縮載荷試験時のAEを計測した。FODセンサで捉えたAEデータに基づき軟岩の破壊時のAE特性の特徴について報告する。

**Key Words :** fiber-optic, doppler effect, acoustic-emission, compression test, soft rock

## 1. はじめに

これまで岩盤の微小破壊音である AE の計測には圧電素子型セラミック振動子(PZT 型センサ)が広く利用されてきた<sup>1)2)3)4)</sup>。しかし、今後岩盤地下空洞の大深度化や高度利用化においては、長期信頼性、防爆性、長距離伝送などを備えたセンサが要求される。

一方で、光ファイバを利用して固体内部を伝播する振動を測定する FOD(Fiber Optical Doppler)センサ<sup>5)</sup>は、小型軽量でフレキシブルである。光ファイバケーブル内の光信号は減衰が少ないことから信号の長距離伝送が可能である。電気を使用しないため防爆性を備えている。測定ノイズ源となる電磁気の影響を受けない。摂氏 200 度程度までの高温下での測定が可能である。測定周波数帯が広域である。光ファイバケーブル自体は耐久性および耐腐食性に優れている、などの特徴を有している。

PZT 型センサは圧電素子を用い受感した振動の圧力によって圧電素子に生じる電荷を電圧に変換して測定する速度型センサである。これに対して、FOD センサは振動で伸縮する光ファイバケーブルの長さ変化に起因するレーザ光のドップラ効果による周波数変調を電圧変化に変換する速度型センサである。

この FOD センサの持つ優れた特徴や特性を生かし、従来の PZT 型センサと同様に岩盤工学分野で適用する

ことができれば、計測条件として要求性能の厳しい建設プロジェクトに対して極めて有効なモニタリング手段となることが期待される。

FOD センサの岩盤工学分野への適用性については、花崗岩などの硬岩においては室内試験でその有効性を確認している<sup>6)</sup>。各種の岩盤のなかでも軟岩系は振動波形の距離減衰が著しいことが特徴で、従来から軟岩の AE 計測は容易でない。本論文では FOD センサの適用性拡大を目的として、軟岩に対しての有効性の検討を試みた。すなわち、FOD センサの感度化を図り、軟岩供試体の一軸圧縮載荷時に FOD センサと PZT 型センサとの両者で AE 特性の比較を行った。その結果、軟岩 AE 計測に対する FOD センサの有効性を見出したので以下に報告する。

## 2. FODセンサの原理

### (1) 原理の概要

光ファイバ線は、コアとクラッドの二層構造になっており、光波はその境界で全反射を繰り返しながら伝播する。センサ部は図-1に示すような構造を有しており、被計測物が振動するとセンサ部もその振動に併せて伸縮する。そして、一端から周波数  $f_0$  の光波を入力すると、入力端から出力端までの経路内に存在するある瞬間のレ



## (2)高感度型センサ

FODセンサはセンサ部が長くなると感度が向上するため、写真-1に示すようにファイバを積層したセンサを試作した。ファイバ長は40mで、高さ2mm、直径は30mmである。一方、ファイバ長2mのFODセンサの形状は、高さ1mm以下で直径は21mmである。

この両者のセンサ感度を比較するために、図-6に示すように長さ30cm、幅30cm、奥行き15cmのアルミ試験体を媒体として、片面に2m巻と40m巻のセンサを試験片の中央部に接着剤で貼り、もう片面から共振周波数150kHzのPZT型の発振器から60Vのパルス波(矩形波)を発振して、この両者のセンサで振動波形を測定した。得られた計測波形を図-7に示す。パルス発生から波形初動立ち上がりまでの時間差はアルミ媒体内での伝達に要した時間である。2m巻のFODセンサでは、波形の最大振幅値は0.2V程度である。一方、40m巻のFODセンサでは、最大振幅値が2.5V程度となっている。両者の最大振幅値での感度を比較すると、40m巻の方が2m巻より10倍以上感度が良いことがわかる。

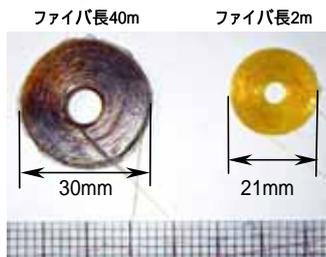


写真-1 FODセンサ

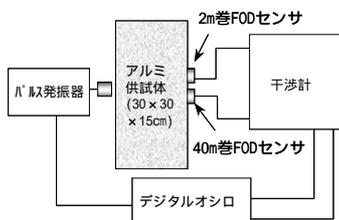


図-6 感度出力試験の概要

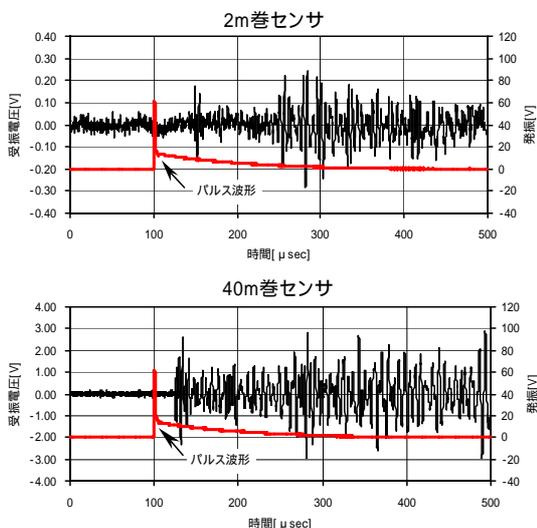


図-7 センサ部の長さによる出力感度

## 4 . FOD型とPZT型センサの比較試験

### (1) 試験方法

試験に用いた供試体は高さ 200mm×幅 100mm×奥行き 100mm の田下石である。田下石は栃木県宇都宮市田下町産の凝灰岩であり、一軸圧縮強度は 13MPa、弾性係数 2.8GPa、ポアソン比 0.28 である(図-8)。载荷には最大荷重 100 kN の油圧サーボ式試験機を使用し、変位速度を 0.5mm/min 一定に制御して载荷を行った。システムは PZT 型センサの測定システムと FOD センサヘレーザ光を入力し測定する光システムに分かれている。PZT 型センサの測定システムはプリアンプ、AE 波形記憶装置および解析装置で構成される。FOD センサは光源(Light Souce)、周波数検知器(Detector)および周波数 - 電圧変換器(F/V)で構成されるが、電圧に変換された後は PZT 型センサで測定された AE と同様に、AE 波形記憶装置に接続される。PZT 型センサは軟岩を考慮して 30kHz 共振型を用い、図-9 に示すように供試体の両側面の中央部にそれぞれ 1 個貼り付ける。FOD センサはファイバ長 40m のセンサを円筒形のステンレスの容器に固定したものを PZT 型センサの隣りに同様にそれぞれ 1 個ずつ貼り付けた。

測定の設定条件として、PZT 型センサの利得は通常行われているように 40dB とした。しきい値はノイズレベルより若干高い値に設定した。これにより、FOD センサと PZT 型センサのいずれについても、しきい値を超えた波形だけが AE 波形記憶装置に自動的に送られる。また、波形と別に AE パラメーターとして発生時刻、リングダウン計数、波形の最大振幅値などもリアルタイムで AE 波形記憶装置に収録される。なお、波形のサンプリング間隔は 0.5 $\mu$ 秒、収録長 2,048words、プレトリガー512words とした。

測定終了後に解析装置を用いて、収録したAE波形データから周波数解析(高速フーリエ解析FFT)、1イベント毎の波形到着順序やその時間差およびAEパラメーターの解析を行った。

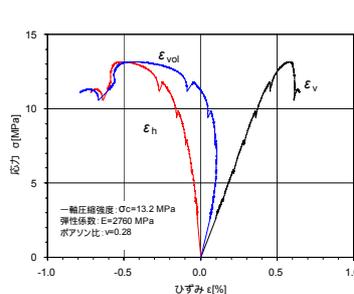


図-8 田下石の一軸圧縮強度

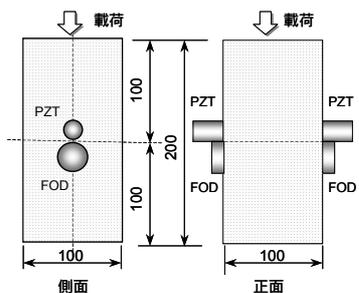


図-9 供試体とセンサ配置

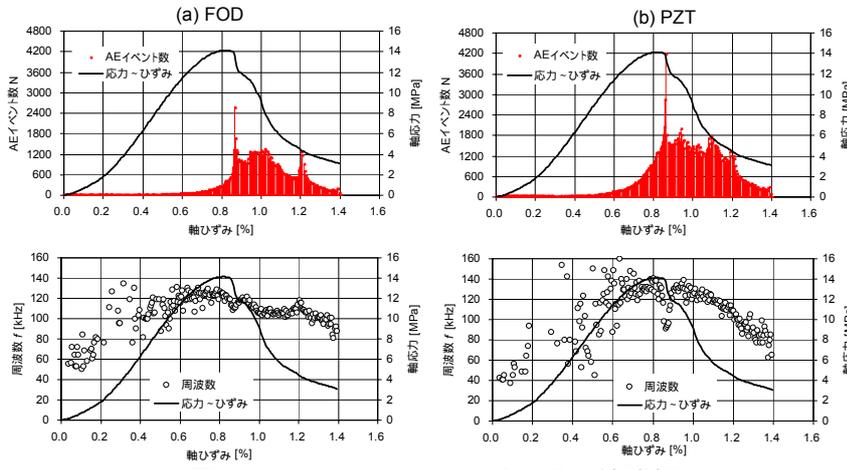


図-10 FODセンサとPZTセンサによるAE計測結果

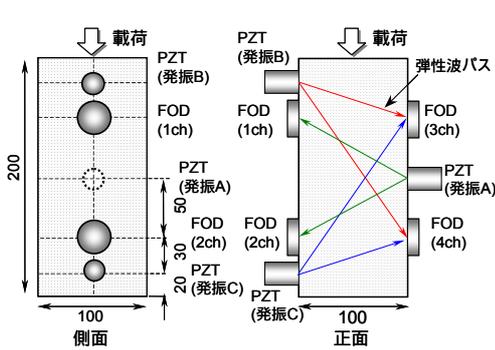


図-11 センサによる配置図

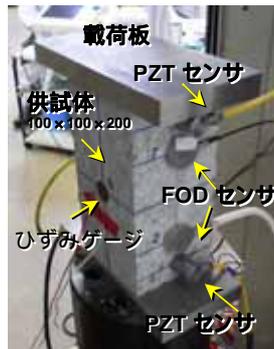


写真-2 田下石供試体

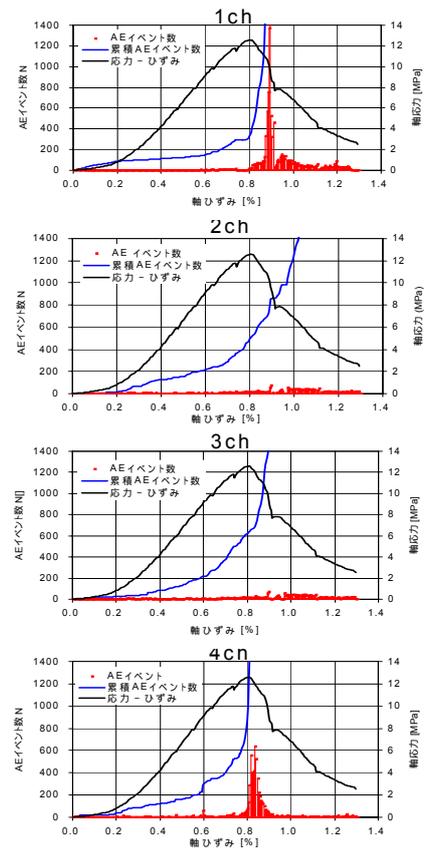


図-12 田下石一軸試験におけるAE発生状況

## (2) 試験結果

田下石供試体の破壊に伴うAE計測結果 (FODセンサとPZTセンサ) を図-10に示す。なお、AEイベント数は軸ひずみ0.05%あたりのカウント数である。

同図の2段目のAEの周波数は測定された波形を用いてFFT解析を行い、横軸周波数、縦軸パワーの図上にプロットされたスペクトル図から図の重心を求め、その値を用いている。

供試体の破壊は载荷開始からひずみで0.86%付近、破壊応力は約14MPaである。

二種類のセンサによる計測結果をみると、両者ともAEはひずみで0.6%(12MPa)付近から発生しはじめ、0.7%(13MPa)付近から急増する。イベント数は0.86%破壊直後に最大2,500~4,200個程度のAEが測定されている。そして、周波数をみると、载荷に伴い周波数は増大し破壊付近から低下する傾向が認められる。

以上より、両者で測定された田下石供試体の破壊に伴うAE特性はほぼ同様な傾向を示しており、FODセンサはこの種のAE測定に対してPZT型センサと同程度の性能を有しているといえる。

## 5. 多チャンネル配置によるAEと弾性波測定

FODセンサの軟岩への適用性を確認するために、ファイバ長40m巻の高感度FODセンサを用いて田下石供試体の一軸圧縮破壊に伴うAEおよび弾性波速度の変化を測定した。

FODセンサの配置は図-11、写真-2に示すように4個(1ch~4ch)のセンサをAE発生位置が標定できるように設置した。そして、载荷過程で岩石の弾性波速度の変化の測定を目的として、発振センサ(A,B,C)を3箇所設置した。発振センサには30kHz共振型のPZT型センサを用いた。この発振センサよりパルス波を発生させ、AE計測用に設置したFODセンサで受振した。したがって、弾性波を測定する際には、AE計測を一旦止めてAEと弾性波が混在しないようにした。

そして、得られた測定結果からAE発生状況、弾性波速度の変化、震源標定に注目して岩石の破壊状況の評価を行った。

### (1) AE発生状況および周波数変化

図-12に個々のセンサ(1ch~4ch)で測定された破壊に伴うAE発生状況を示す。なお、AEイベント数はひずみ0.05%あたりのカウント数である。また、同図では概略

のAE発生震源を判定できるよう、同一のAEイベントを複数のセンサで捉えた場合は、最初に受振したセンサのみをカウントしている。

この供試体の破壊はひずみ0.8%時で、最大応力は13MPa程度である。AEは荷重開始から全測点で数個程度発生しているが、ひずみが0.8%付近からは4ch付近でAEが急増して、発生数は最大で約600(個/0.05%)である。その後、0.9%付近で今度は4chの対角に位置する1ch付近で急激に発生して、その発生数は約1400(個/0.05%)以上と最も多く発生している。

一方、2chや3ch付近ではAEの発生は極めて少ない。以上の結果、破壊は供試体右下(4ch)から始まり右上(1ch)に進化したものと推察される。

図-13は破壊に伴う周波数の変化である。同図の結果は4個のセンサで測定された発生数と波形の卓越周波数の平均値である。周波数帯域は概ね80kHz~160kHzの範囲である。特筆すべきは、荷重途中段階では周波数は上昇する傾向を示し、供試体が破壊する前の0.6%付近から周波数は低下している。

以上より、田下石の破壊に伴うAE挙動の特徴は、破壊直前の段階でAE発生数が急増し、破壊直後で発生数はピークを示す。そして、AE信号の周波数については破壊前には上昇し破壊後には低下する傾向が認められる。

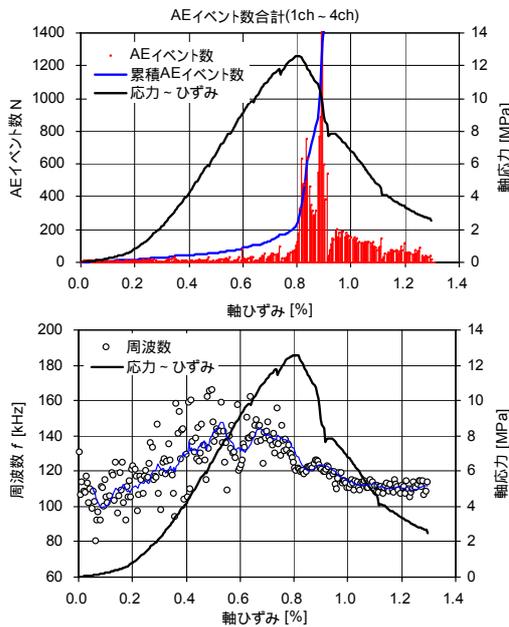


図-13 AE発生状況とAE周波数の変化

## (2) 震源標定

3つ以上のセンサで受振したAEイベントを対象として、各chの到達時間差からAE震源の標定を行った。図-14に震源標定結果を示す。震源を標定する上で便宜上、荷重開始から試験終了までを4つの期間に分割した。分割は期がひずみで0~0.75%、期が0.75~0.875%、期が0.875~1%、期が1~1.3%である。また、試験終了後

に撮影した供試体状況の写真を震源標定と比較できるように載せている。

まず荷重初期の期をみると、震源が標定できたものは1chと2ch付近に数点である。破壊前の期では、4ch付近に集中的に標定されているが、1ch付近にも数点標定されている。次に、破壊後の期では、期とは逆に1ch付近で集中的にAEが発生し、4ch付近ではほとんど発生していない。続いて、残留時の期でも1ch付近に集中的に発生していることがわかる。一方、破壊後の供試体の写真やスケッチ図(図-15)をみると、左上部(1ch)から右下部(4ch)に向かって斜め方向に亀裂が発生している。

以上より、震源標定結果と亀裂の発生状況はよく一致している。また、図-12のAEの発生状況の結果とも整合性があるものと思われる。

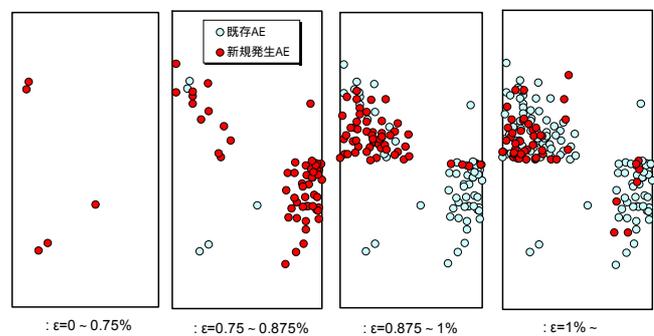


図-14 AE発生震源標定

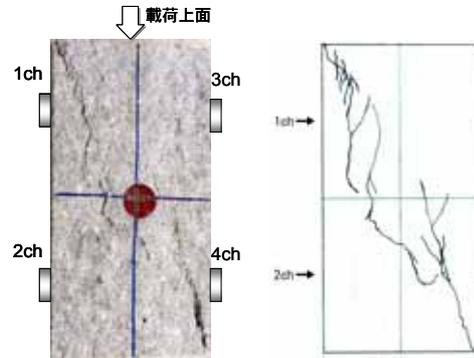


図-15 破壊後の供試体

## (3) 弾性波速度変化

図-16に破壊に伴う弾性速度変化と弾性波の振幅値の変化を示す。図-11に示したように発振センサAで発振し、これをFODセンサ1chで受振した弾性波のデータである。振幅値は弾性波の波形の初動の部分を採用した。また、同図には弾性波速度、振幅値ともに荷重応力がゼロの時の測定値で除して正規化して示している。

まず、弾性波速度変化をみると、ひずみ0.3%付近から破壊前の0.7%付近に至る段階で、速度は最大10%程度上昇している。そして、破壊付近以降は徐々に速度は低下するが、試験全体を通して速度変化の割合は僅かである。この現象は、軟岩では破断面が形成されても密着しているため、速度は落ちにくかったものと考えられる。

次に初動振幅値の変化をみると、ひずみ0.3%付近から振幅値が大きくなりはじめ、ひずみ0.55%付近で最大で初期値より60%程度大きくなり、その後、振幅値は著しく低下し健全な状態の20%程度となる。

以上より、田下石供試体の载荷から破壊に伴う弾性波速度の変化は小さいが、波形の振幅値(初動振幅)は载荷に伴い著しく大きくなり、最大で60%程度増大した。そして、破壊前の早い段階から大きく低下する傾向が認められる。この振幅値が低下する時期は、AE波形の周波数が低下する時期と一致していることが特徴である。すなわち、弾性波受振波形の振幅変化は、岩石内部の破壊を敏感に捉えるのに適した指標である。

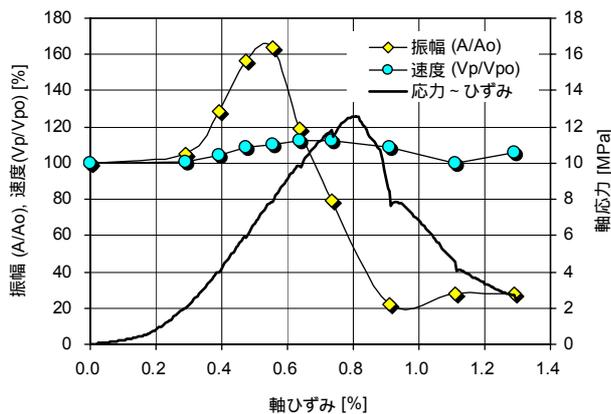


図-16 弾性波速度と振幅値の変化

## 6. まとめ

岩盤AE計測を目的として光ファイバ振動センサ(FODセンサ)について高感度化したセンサを試作し、種々の岩質への適用性拡大を図るため、距離減衰の著しい軟岩(田下石)を対象とした適用性試験を実施した。

(1)受感部を40m巻としたセンサを製作し感度試験を行った結果、従来のFODセンサ(センサ部2m巻)に比べ、感

度が10倍となることが確認できた。

(2)FODセンサと30kHz共振のPZT型センサの両者で田下石の一軸圧縮载荷に伴うAEを計測した結果、AE発生状況や周波数変化は同様な傾向であった。さらに、FODセンサだけで同様な試験を行った結果、供試体表面の亀裂位置とAEから求めたAEから求めた評定位置はよく一致していた。以上から、FODセンサはPZT型センサと同等な能力を有するものと考えられる。

(3)AE波形から震源決定を行ったところ、標定された震源位置と供試体の亀裂発生位置はよく対応しており、FODセンサの信頼性が確認できた。

(4)载荷から破壊過程において弾性波を測定したところ弾性波速度の変化は小さいが、初動振幅値は著しく変化し、振幅値は敏感な指標である。

## 参考文献

- 1) Mori, T., Tanaka, M., Aoki, K., Kanagawa, T.: Application of AE and borehole seismic monitoring technique in the rock cavern., ISRM 2003 10th International Congress for Rockmechanics, pp.845-848
- 2) 田仲正弘, 金川忠, 小山俊博, 森 孝之: 空洞掘削時のAE自動計測による岩盤安定性監視技術, 第22回西日本岩盤工学シンポジウム2000講演論文集, pp.47-52, 2000.
- 3) 田仲正弘, 金川忠, 森 孝之, 福田真, 杉村亮二, 丹野剛男: 岩盤斜面安全監視のためのAE自動化システムと岩盤破壊判定法, 日本地すべり学会誌, Vol.39, No.149, pp.70-76, 2002.
- 4) 石田 毅, 西川直志, 北村晴夫, 田仲正弘, 古屋憲二: 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における変位と AE 測定による不安定岩塊の挙動監視, 土木学会論文集, 第 722 号/ -61, pp.345-355, 2002.
- 5) Kageyama, K., Murayama, H., Ohsawa, I., Kanai, M., Motegi, T., Nagata, K., Machijima, Y., Matsumura, F.: Development of a new fiber-optic acoustic/vibration sensor, Proc. of International Workshop on Structural Health Monitoring 2003, pp. 1150-1157, 2003.
- 6) 森 孝之, 岩野圭太, 中島誠門, 田仲正弘, 菊山清児, 竹原真希: 光ファイバ振動センサを用いた岩石三軸圧縮試験時のAE測定, 第35岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.47-52, 2006.

## HIGH SENSITIVITY FIBER-OPTICAL DOPPLER SENSOR AND AE MEASUREMENT AT COMPRESSION TEST USING SOFT ROCK SPECIMEN.

Takayuki MORI, Keita IWANO, Makoto NAKAJIMA, Masahiro TANAKA, Seiji KIKUYAMA and Hirokazu FUJII

The Fiber-Optical Doppler sensor (FOD sensor) has following features; explosion-proof, immunity to electromagnetic interference, anti-corrosiveness, and signal transmission for long distance. From these advantages, the sensor has much possibility to apply to health monitoring for future underground structures. In such soft rock as has relatively large distance attenuation, a conventional FOD sensor with 2m-long is not enough to detect AE signals. The authors fabricate a high-sensitivity FOD sensor with 40m-long in a multi-layered coil. In order to compare the applicability of the new FOD sensors with conventional PZT sensors, AE measurement in uniaxial compression test with Tage tuff is implemented.