

光ファイバ振動センサによる堆積軟岩の A E 計測

江原 昌彦¹・五月女 敦¹・松本 匡司²・松井 裕哉³

¹正会員 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)
E-mail:masahiko_ebara@jpower.co.jp

²正会員 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所 (〒160-0004 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

³正会員 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (〒098-3207 北海道天塩郡幌延町宮園町1-8)

岩盤及び構造物の力学的健全性モニタリングを行うためのツールとして開発を進めている光ファイバ振動センサを用い、堆積軟岩(新第三紀珪質岩)を対象とした一軸圧縮試験及び一軸クリープ試験に伴う A E 計測を行った。その結果、花崗岩等の硬岩に比べて、観測された A E イベント数は少ないものの、破壊に至るプロセスでの A E 発生状況や波形周波数の変化等について、硬岩と類似した特徴が確認された。この状況は同時に実施した P Z T 型 A E センサ(150kHz共振型)による計測結果とも概ね一致し、これにより軟岩 A E 計測分野における光ファイバ振動センサの有用性を確認することができた。さらに、P Z T 発振器を用いて当該軟岩供試体における高周波弾性波伝播試験を行い、その距離減衰特性を求めた。

Key Words : *fiber-optic vibration sensor, acoustic emission, structural health monitoring, sedimentary rock*

1. はじめに

近年、重要コンクリート構造物、岩盤斜面等の力学的健全性のモニタリング技術として光ファイバを利用した計測技術が注目されている。これは、光ファイバセンサが、遠隔で広範囲・多点の計測が可能、計測箇所付近に電源が不要、ケーブルが細く測定対象への影響が少ない、長期耐久性、落雷・迷走電流の影響を受けないなど、従来型の電氣的なセンサに比較して、様々なメリットを有しており、効率的かつ経済的な長期モニタリングシステムの構築が可能と考えられることによる。

著者らは、東京大学工学部教授影山和郎グループが新しく開発した光ファイバ振動センサ¹⁾(以下 F V センサと呼ぶ)に着目し、地下深部岩盤のトンネル掘削・維持管理のモニタリング等への同センサの適用性について検討を進めている^{2),3)}。

本研究は、堆積軟岩でのトンネル掘削・維持管理のモニタリングに関し、F V センサの適用性を評価する上での基礎情報を得ることを目的として実施したものである。具体的には、F V センサ及び圧電素子型センサ(以下 P Z T 型センサと呼ぶ)を用い、堆積軟岩の一軸圧縮試験及び一軸クリープ試験に伴う A E の発生状況、波形周波

数等を評価するとともに、両センサの対比を行ったものである。また、P Z T 型センサを用いて高周波弾性波伝播試験を行い、堆積軟岩における減衰特性を求めた。

F V センサの周波数帯域は地震動レベルからアコースティック・エミッション(AE)のレベルに及び、かつその周波数特性が比較的フラットであるという優れた特性を有している²⁾。今回用いた F V センサ(写真-1)は50巻きで、外径21mm、厚さ1mm弱の小型で軽量のものであり、センサ径に対して振動の波長が十分に長い場合には、巻数と感度は比例関係にあることが分かっている。

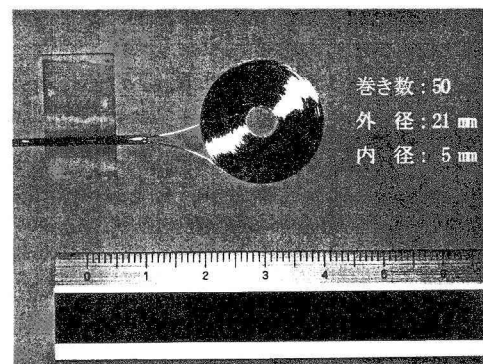


写真-1 光ファイバ振動センサ (F V センサ)

2. F Vセンサの測定原理

岩盤や構造物等の測定対象に何らかの振動が生じている場合、測定位置における歪速度に応じて、設置したF Vセンサを構成する光ファイバ長が変化する。この場合、ドップラ効果によってF Vセンサ内を伝播する光の周波数が変化することが分かっており、この光ファイバ長の変化率と光の周波数変化量の関係は式(1)により与えられる。さらに、センサが円形かつそのセンサ寸法との対比において歪速度場が一様と考えられる場合にあっては、式(1)は式(2)のように表され、光の周波数変化は主歪速度和に比例することが分かる。F Vセンサを用いた計測システムにおいては、このような光の周波数変化を光ヘテロダイン干渉計により検出し、歪速度を電圧変化として定量化するものである。

$$\Delta f = -\frac{f_0 \cdot n}{c_0} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

$$\Delta f = -\frac{\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot N}{c_0} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} \cdot \frac{d}{dt} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (2)$$

ここに、

Δf : 光の周波数変化量

f_0 : 光の周波数

c_0 : 真空中の光の伝播速度

n : 導波路媒体 (光ファイバコア) の屈折率

L : センサを構成する光ファイバの延長

t : 時間

N : センサの巻き数

r_1, r_2 : センサの内半径及び外半径

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 主歪

3. 堆積軟岩の物理・力学特性

試験に用いた試料は、日本原子力研究開発機構が北海道幌延町で実施したボーリング調査 (掘削深度1000m) で取得した岩石コアである。コアの採取深度は、260m、500m及び740m付近の3箇所であり、深度260m付近は珪藻質泥岩 (声間層)、深度740m付近は硬質頁岩 (稚内層)、深度500m付近はそれらの遷移部であると考えられている。両岩石とも、新第三紀鮮新世～中新世の堆積岩で総称して新第三紀珪質岩と呼んでいる。

今回用いた珪藻質泥岩、遷移部及び硬質頁岩の物理試験結果を表-1に示す。自然密度は、珪藻質泥岩で15.2kN/m³、遷移部で17.7kN/m³、硬質頁岩で19.4kN/m³で

あり、有効間隙率はそれぞれ61.5%、39.8%、35.0%であった。これらの岩石は花崗岩等の硬岩に比べて密度は小さく、空隙率が大きい材料であり、珪藻質泥岩はその特徴が顕著である。なお、遷移部は、硬質頁岩に近い物理特性が得られていることから、以下硬質頁岩として扱うこととする。

一軸圧縮強度は珪藻質泥岩で5.61MPa、硬質頁岩で13.4MPa～36.2MPa、一軸圧縮試験の接線弾性係数は珪藻質泥岩で985MPa、硬質頁岩で3,313MPa～4,571MPa、ポアソン比は珪藻質泥岩で0.14、硬質頁岩で0.13～0.24である。工学的には、軟岩～中硬岩に分類される岩石である。

表-1 物理試験結果

岩石名	自然密度 (kN/m ³)	湿潤密度 (kN/m ³)	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)
珪藻質泥岩	15.2	15.3	67.6	61.5
遷移部	17.7	17.8	28.7	39.8
硬質頁岩	19.4	19.5	21.9	35.0

4. 一軸圧縮試験及び一軸クリープ試験におけるA E計測

(1) 試験方法

一軸圧縮試験及び一軸クリープ試験に用いる供試体は直径86mmのボーリングコアを、珪藻質泥岩はトリミング法で、その他はコアリング法で直径45mm、高さ90mmに成形した。なお、岩石の層界面は、供試体の中心線とほぼ直交している。載荷は、高剛性圧縮試験装置を使用し、軸ひずみ速度0.1%/minの変位制御で行った。

一軸圧縮試験及び一軸クリープ試験時のA E計測の試験条件を表-2に示す。供試体A、B、Hは珪藻質泥岩及び硬質頁岩のF Vセンサの試験条件を設定する目的でP Z T型センサのみで計測し、供試体C～GについてはF Vセンサを2点、P Z T型センサを2点または4点配置し、計測を実施した。各センサの設置状況を写真-2に示す。

一軸クリープ試験は2供試体行い、主としてクリープ変形時のA E発生状況を観測した。一軸クリープ試験時の載荷荷重と時間の関係は図-1に示すとおりである。

表-2 A E計測の試験条件

試験の種類	岩種	供試体名	P Z T型センサ		F Vセンサ		しきい値 (mV)
			数量 (個)	ゲイン (dB)	数量 (個)	ゲイン (dB)	
一軸圧縮試験	珪藻質泥岩	A	2				200
		B	2				200
		C	2		2	15	100-250
	硬質頁岩	D	2	80	2	15	100-250
		E	2		2	15	100-250
		F	2		2	15	100-250
一軸クリープ試験	珪藻質泥岩	G	4	90	2	40	5-250
	硬質頁岩	H	4	80	2	40	200

* HPF100は100kHz、HPF5は5kHzのハイパスフィルターを使用。

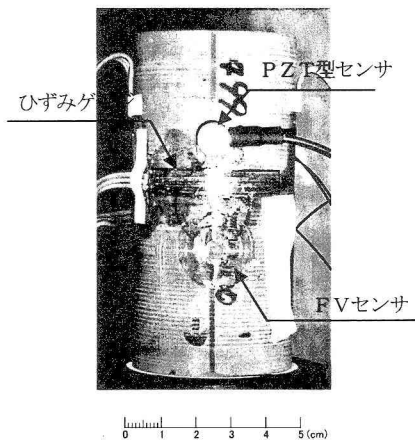
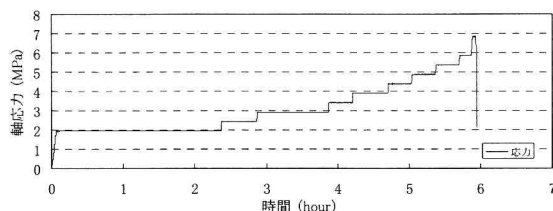
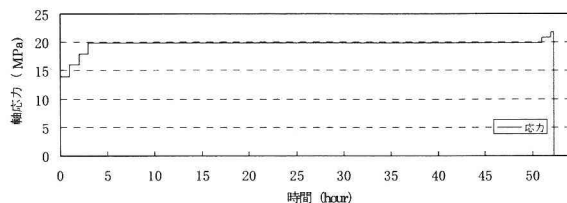


写真2 センサの設置状況



(a) 供試体G (珪質質泥岩)



(b) 供試体H (硬質頁岩)

図1 一軸クリープ試験の荷重荷重

AE計測システムの概要を図-2に示す。AEデータの収録については、AEイベントカウントとAE波形をそれぞれ個別の収録装置で記録した。なお、バックグラウンドノイズを除去してAE波のみを収録するように、ノイズの振幅レベルよりある程度大きな振幅にしきい値を設定し、しきい値を超えるデータのみを収録した。一軸圧縮試験においては、センサで感知したAEをデータ収録する際のゲインはPZT型センサを80dBとし、FVセンサのゲインはPZT型センサでの収録データのノイズレベルと等しくなる値として15dBに設定した。

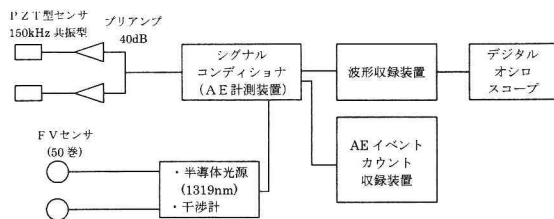
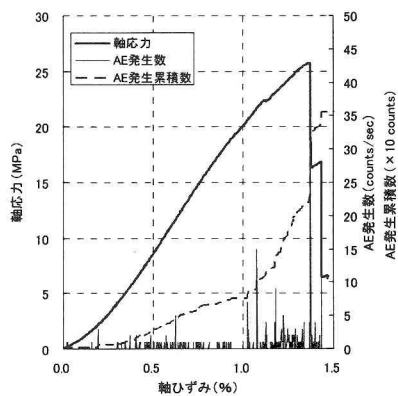
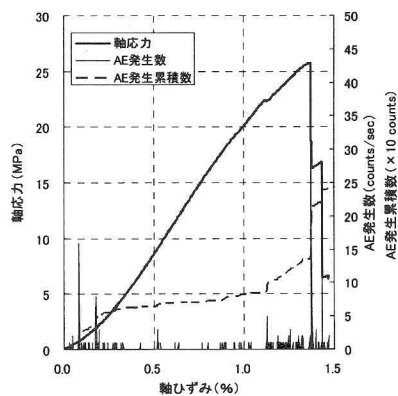


図2 AE計測システムの概要



(a) FVセンサ



(b) PZT型センサ

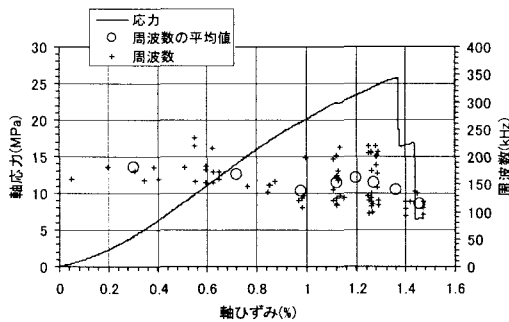
図3 一軸圧縮時の応力～ひずみ・AEの発生頻度 (硬質頁岩, 供試体D)

(2) 一軸圧縮試験時のAE計測

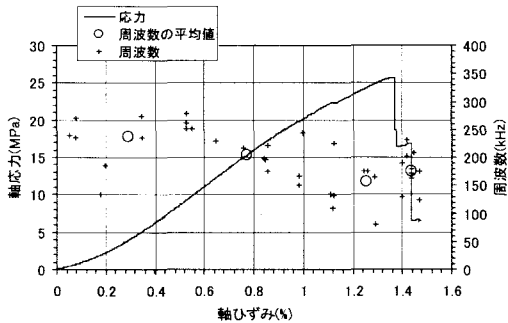
FVセンサで計測した硬質頁岩の応力～ひずみ・AE発生頻度の関係の一例として供試体Dの結果を図-3(a)に示す。発生したAEの大半が、破壊時に生じており、硬質頁岩である供試体C, E, Fも同様な結果が得られている。また、発生数は破壊直後に最大約40個/秒程度であり、花崗岩供試体²⁾に比べて少ないことが特徴的である。図-3(b)にPZT型センサで計測した供試体Dの応力～ひずみとAE発生頻度の関係を示す。AE発生数や発

生状況は、図-3(a)のFVセンサによる計測結果と比較して差異がほとんどなく、FVセンサはPZT型センサと同等の特性を有していることが確認された。

図-4に供試体Dで得られたFVセンサとPZT型センサで計測されたAEの周波数を示す。これらの図で○印は、10波形ごとの平均周波数を示す。花崗岩供試体²⁾ほど明瞭ではないが両センサの計測結果も破壊に近づくに伴い周波数が低下する傾向が認められる。



(a) FVセンサ



(b) PZT型センサ

図-4 AE波形の周波数 (硬質頁岩, 供試体D)

図-5は供試体Bの一軸圧縮試験における応力～ひずみ・AE発生頻度の関係を示したものである。破壊時に多くAEが発生しているのは供試体D (図-3) と変わらないが、ひずみレベルが低い段階でも多くのAEが発生しているのが特徴であり、珪藻質泥岩であるA供試体も同様な結果が得られている。具体的には、強度の1/2程度の応力レベル、すなわち応力～ひずみ曲線が線形から非線形に変わり、接線弾性係数が低下し始める時点で、AEが発生している。

このAEが発生し始める時点のひずみレベルでの載荷応力は、コアを採取した深度の土被り圧とほぼ等しいことから、この現象はいわゆるカイザー効果を捉えている

可能性があるが、現時点で因果関係は明確ではない。なお、この部分のAE波のエネルギーは、全般的に破壊時のAEに比べて小さいことが特徴的である。

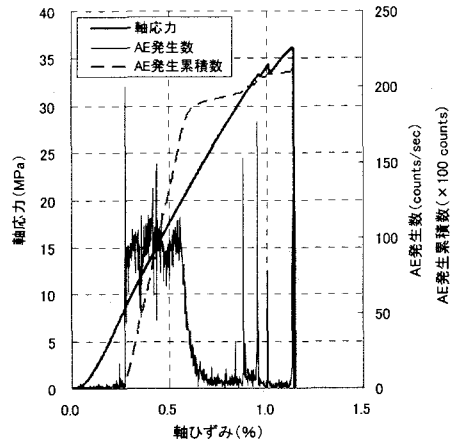
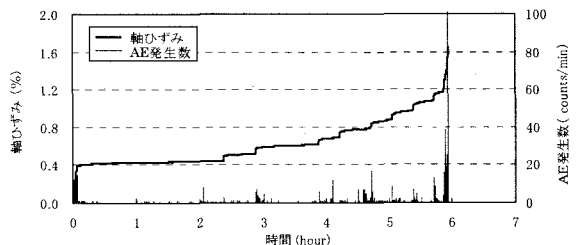


図-5 一軸圧縮試験時の応力～ひずみ・AEの発生頻度 (硬質頁岩, 供試体B)

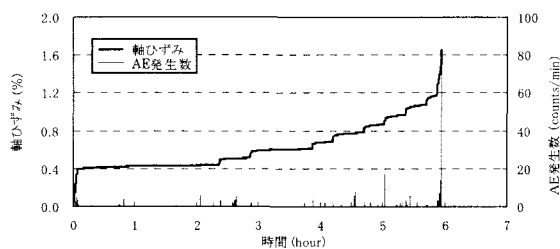
(3) 一軸クリープ試験時のAE計測

一軸クリープ試験時にFVセンサで計測した珪藻質泥岩のひずみ～時間・AE発生頻度の関係を図-6(a)に示す。AEが多数発生するのは荷重を増加した時点であるが、クリープ変形時にも少ないながらAEが発生していることが分かる。また、AE発生数やAE発生状況は、図-6(b)に示すPZT型センサで計測した結果と比較して差異がないことから、一軸圧縮試験結果と同様にFVセンサはPZT型センサと同等の特性を有していることが確認された。

硬質頁岩のひずみ～時間・AE発生頻度の関係を図-7に、AE発生頻度～時間・ひずみ速度の関係を図-8に示す。AEの発生状況は珪藻質泥岩と同様であり、ひずみ速度が大きい場合にAEが多く発生している傾向が認められる。



(a) FVセンサ



(b) P Z T型センサ

図-6 一軸クリープ試験時のひずみ～時間・AE発生頻度の関係 (珪藻質泥岩, 供試体G)

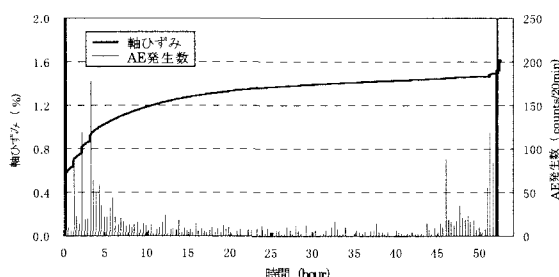


図-7 一軸クリープ試験時のひずみ～時間・AE発生頻度の関係 (硬質頁岩, 供試体H)

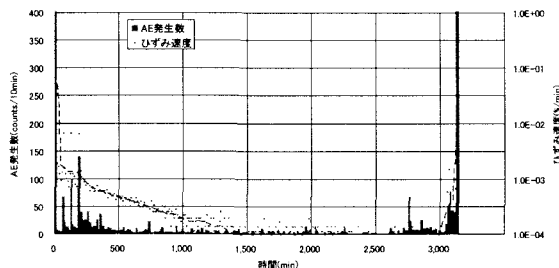


図-8 一軸クリープ試験時のAE発生頻度～時間・ひずみ速度の関係 (硬質頁岩, 供試体H)

5. 高周波弾性波伝播試験

(1) 試験方法

珪質岩におけるAE波等の高周波弾性波の距離減衰特性を評価するため、長さの異なる供試体を用いて弾性波の初動振幅の測定を行った。高周波弾性波伝播試験システムの概要を図-9に示す。供試体の両端面に150kHz共振

型のP Z T型センサを接着剤で設置し、片側面から振幅5 Vの矩形波を発振し、対面で受振した波形の初動振幅、初動到達時間を読み取った。供試体は、直径86mm、長さ33cmの硬質頁岩のボーリングコアを用い、測定終了ごとに一端を切断し、長さを33cm→22cm→11cm→9.5cmと変化させ計測を繰り返した。岩石の層理面は、ボーリングコアの中心線にほぼ直交している。また、試験時の供試体含水比は21.1%であった。

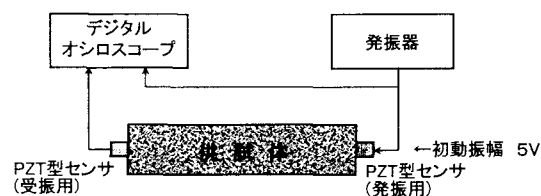


図-9 高周波弾性波伝播試験システムの概要

(2) 試験結果

図-10に初動到達時間と供試体長さの関係を示す。図の勾配が供試体のP波速度となるが、データのバラツキは非常に小さく、供試体が均質な材料であることが分かる。

図-11に初動振幅と供試体長さの関係を示す。初動振幅V(mV)の対数値と供試体長L(cm)の関係は非常に良好な相関を有していることが分かる。この結果は当該硬質頁岩における伝播距離10cmにつき、振幅は1/10程度となることを示しており、AEのような高周波弾性波が非常に減衰しやすい材料であることが分かる。

また、距離減衰式の勾配が実際の岩盤においても適用できると仮定した場合の振幅と伝播距離の関係を図-11の破線に示す。この図は、今回の一軸圧縮試験で計測された平均振幅2 VのAE波 (ゲイン80dB) は13cm離れた地点まで計測できることを示すが、原位置での測定を考えた場合は、一つのAEセンサの計測範囲は非常に狭く、トンネルの全体範囲をカバーするためには非常に多数のセンサを配置する必要があることを意味している。

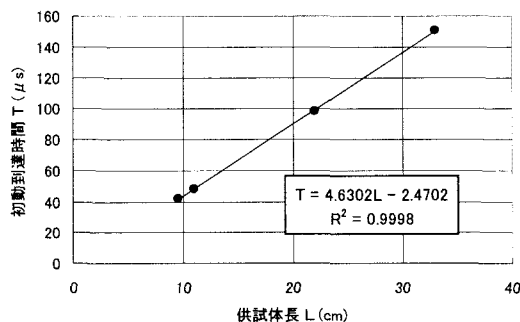


図-10 初動到達時間と供試体長さの関係

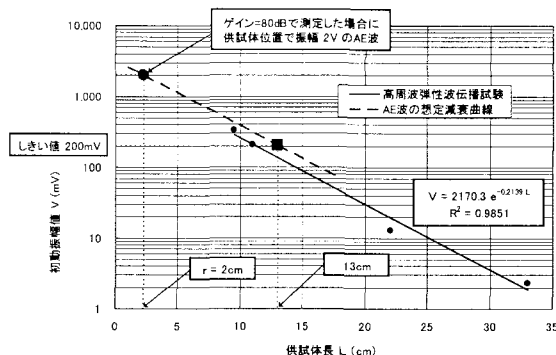


図-11 初動振幅と供試体長さの関係

6. まとめ

新第三紀珪質岩を対象にFVセンサを用いた一軸圧縮試験、一軸クリープ試験等を行うと共に、距離減衰特性を求めるための高周波弾性波伝播試験を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 一軸圧縮試験時に観測されたAEイベント数は花崗岩等の硬岩に比べて少ないものの、硬岩同様、岩石の破壊段階では集中的に発生する。また、破壊に近づくに従いAE波形の周波数が低下する等、花崗岩などの硬岩と類似した特徴が確認された。さらに、応力～ひずみ曲線上において、非線形性が現れる時点でエネルギーレベルの低いAE波が発生する様子が伺える。

- (2) FVセンサでのAE計測結果は、PZT型センサとほぼ同等であり、新第三紀珪質岩に関するAE計測にFVセンサが十分適用可能であることが分かった。
- (3) 一軸クリープ試験では、クリープ変形時にもAEの発生が確認された。また、ひずみ速度が大きい場合にAEが多く発生する傾向が認められた。
- (4) 高周波弾性波伝播試験では、初動振幅値の対数値と伝播距離との間に高い相関が得られ、測定対象の供試体は非常に均質性の高い岩石と考えられる。また、AEのような高周波弾性波は、伝播距離10cmで振幅は1/10程度まで減衰し、硬質頁岩は距離減衰の大きな材料であることが分かった。

上記のように今回用いた新第三紀珪質岩に関しては、AE波のような高周波弾性波は減衰が著しく、今回用いたシステムの仕様では、原位置でのAE計測は困難であると思われる。今後は、FVセンサの高感度化や低ノイズ計測システムの採用等によって、全体的なシステムの感度向上を図り、さらに、原位置でのAEモニタリングの可能性を検討して行く予定である。

参考文献

- 1) K.Kageyama, et al, Proc. JSME Mechanical Engineering Congress, 2002 Japan (MECJ-02), No.02-1, Vol. IV, pp.205-206.
- 2) 江原昌彦, 町島祐一, 田中正弘, 石田毅: 光ファイバ振動センサの開発, 資源と素材, Vol.121, pp.77-79, 2005.
- 3) 池田典之, 棚瀬大爾, 影山和朗, 田中正弘, 本間誠: 岩盤構造物を対象としたレーザドップラ光ファイバセンサの適用性について, 土木学会第58回年次学術講演会(Ⅲ部門), pp.307-308, 2003.

ACOUSTIC EMISSION MEASUREMENTS OF SEDIMENTARY ROCKS BY FIBER-OPTIC VIBRATION SENSORS

Masahiko EBARA, Atsushi SAOTOME, Tadashi MATSUMOTO
and Hiroya MATSUI

In this study, the acoustic emission (AE) during laboratory mechanical tests for sedimentary rocks was measured by fiber-optic vibration sensors (FVS) on trial to investigate applicability of FVS for the structural health monitoring of underground structures. As a result, AE were well caught by FVS similar to conventional PZT sensors in point of numbers of observed AE events and frequency characteristics of AE waves. Furthermore attenuation characteristics of high frequency elastic waves such as AE in this sedimentary rock were evaluated experimentally to estimate the reach of AE waves in rock mass.