

光ファイバドップラセンサの岩盤工学分野 への適用性に関する基礎的検討

田中 正弘¹・菊山 清児¹・町島 祐一¹・石田 毅²

¹正会員 株式会社レーザック (〒113-1153 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail:tanaka@lazoc.jp, kikuyama@lazoc.jp, machijima@lazoc.jp

²正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学Cクラスタ)
E-mail: ishida@kumst.kyoto-u.ac.jp

光ファイバドップラセンサ (以下 FOD センサと呼ぶ) はレーザドップラ変調を利用して振動を測定する新しい原理のセンサである。このセンサは薄型軽量で可撓性に富んでおり、測定周波数帯域が広く、電磁気ノイズの影響を受けないなどの特徴を有している。さらに腐食に対する抵抗力や耐久性に富み、信号の長距離伝送も可能である。そこでこのセンサの岩盤工学分野への適用性を検討するため、アルミ製試験片に FOD センサを貼付け、低周波の繰り返し荷重を載荷してセンサの測定原理の確認を行った。また PZT 型 AE センサを共振に用いて、高周波領域における感度および周波数特性を調べた。さらに花崗岩の一軸圧縮試験で発生する AE を両者のセンサで測定して比較したので、これらの結果について報告する。

Key Words : fiber-optic sensor, Doppler effect, acoustic emission, fracture, rock mechanics

1. 緒言

地下発電所空洞やトンネル、岩盤斜面などにおいては、建設時および建設後の安全監視のために、変位やひずみ、応力などの測定が実施されている場合が多い。また、ダムなどの重要なコンクリート構造物においてもこれらの測定が行われている。筆者らは、これまで変位などの測定に併せ、圧電素子型セラミック振動子 (以下 PZT 型センサと呼ぶ) を用いて岩盤の破壊音 (アコースティック・エミッション、以下 AE と呼ぶ) を直接測定する岩盤の安定性監視法を提案し、地下発電所空洞や岩盤斜面の掘削工事などに役立ててきている^{1)・4)}。しかし、現在進められている高レベル廃棄物の地層処分では、地下 500m 以深の大深度化に対応した長期の信頼性を備えたセンサが要求されている。さらに LPG 岩盤タンクの安全性監視においては、防爆性なども必要とされている。

一方で、光ファイバを利用した変位や温度などの計測技術も急速に発展している。最近、この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センサが材料分野で開発された^{5)・8)}。光ファイバは石英ガラスで構成されているため、電気ケーブルと比べ劣化が少なく耐久性や耐食性に優れており⁹⁾、またセンサ部は電気をを用いないため絶縁不良などによる故障が少ないことなど

から、電気式のセンサと比べて、長期的な安定性が高い。さらに、光ファイバは信号に光を用い電気を通さないため本質的な防爆性を備えている。したがって、従来の PZT 型センサでは解決が困難であった AE 測定の諸課題を解決できる可能性がある。

ここでは、このセンサの名称を「光ファイバドップラセンサ」とし、略称として FOD (Fiber Optical Doppler) センサと呼ぶことにする。この FOD センサは、従来から用いられている PZT 型センサと同様に、固体内部で発生する微小な破壊音(AE)を捉えることができる。しかし、両者の測定原理はまったく異なっている。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。

FOD センサが有する特徴は以下のとおりである。

- 1)直径が 20~30mm、厚さが 1mm 程度で小型軽量でフレキシブルである。
- 2)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。
- 3)測定のノイズ源となる電磁気の影響を受けない。
- 4)光ファイバ自体は石英ガラスでできているため、ファ

- イバ自体は摂氏 1000 度程度までの耐熱性を有している。
- 5)測定周波数帯が広域である。
- 6)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。
- 7)光ファイバケーブル自体が安価であることから経済的にも有利である。

このFODセンサの持つ特徴を生かし、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、将来必要とされる建設プロジェクトに対して極めて有効な測定ツールとなることが期待される。そこで、測定周波数帯が広域である特性を利用して、FODセンサの測定原理の検証を数Hz～50Hzの低周波領域で行うとともに、FODセンサとPZT型センサの両者で岩石破壊時に発生する100kHz以上の周波数成分のAEを測定し、感度・周波数特性比較を行うなど、基礎的な検討を行った。その結果、FODセンサがPZT型センサに代わる新たなセンサとしての見通しを得たので以下に報告する。

2. 測定原理

(1) 原理の概要

光ファイバ線は、コアとクラッドの2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。測定に際しては、図-1に示すようにこの光ファイバ線の一部を被計測物に固着する。この固着部がセンサ部になり、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、固着部の一端から周波数 f_0 の光波を入力している場合、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ーザ光の波数は一定であることから、経路長が伸縮すれば波長が伸縮する、すなわち、伝播速度は一定であるから周波数が f_a だけ変化する。これをレーザドップラ効果と呼び、他端から出力される光波の周波数は $f_0 - f_a$ となる。この周波数変調量 f_a は光ファイバの伸縮、すなわち被計測物の変位量の変位（ひずみ）速度に比例する。したがって、この周波数変調量を検知することができれば、速度計として被計測物の振

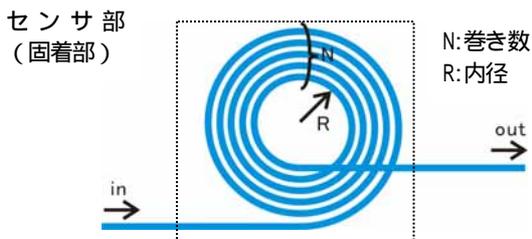


図-1 光ファイバのセンサ部

動を捉えることができるセンサとなる。

(2) 光ファイバのドップラ効果

光ファイバが伸縮する際に、ファイバ内のドップラ効果により生じる周波数変調は式(1)で示される。 f_a はセンサ部で生じる周波数変調、 λ は光波の波長、 dL/dt は光ファイバの変位速度である。ここで負号は、変位速度の増大により光の周波数が低下することを意味している。

$$f_a = -\frac{1}{\lambda} \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

上式に示すように、周波数変調 f_a と変位速度 dL/dt は比例関係となる。この周波数変調 f_a は光ヘテロダイン方式を用いて検出され、周波数/電圧変換器（FV変換器）によって電圧 V に変換される。ここで変換された電圧 V と変位速度 dL/dt の関係を、 K を比例定数として示すと式(2)のようになる。したがって、FODセンサは検出した変位速度を電圧で出力するセンサであり、変位速度が大きくなると電圧出力が大きくなるという特性を持つことがわかる。

$$V = kf_a = -\frac{k}{\lambda} \frac{dL}{dt} = K \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} K = -\frac{k}{\lambda}$$

(3) 周波数変調の検出法

周波数変調を検知するためのレーザドップラ振動計システム（（株）レーザック製）を図-2に示す。システムはセンサ回路と計測回路から構成されている。計測回路がヘテロダイン干渉法を用いて周波数変調量を検出する回路である。同図より、光源（Light source）から入射された周波数 f_0 のレーザ光は、センサ回路と計測回路に分波される。センサ回路では、計測対象物の振動によってファイバ部が微小伸縮すると、それに伴いファイバの光路長が時間的に変動する。その結果、レーザ光には光路長の時間的変化である dL/dt に比例した周波数変調 f_a が生じ、センサから出力されるレーザ光は $f_0 - f_a$ となる。一方、計測回路ではAOM（周波数変調器）により周波数 f_M (80MHz) の基準光を加え $f_0 + f_M$ に変調される。そして、センサ回路からのレーザ光と計測回路からのレーザ光の周波数の差 $f_M + f_a$ が導かれ、検知器（Detector）で f_a が検出され、周波数/電圧変換器（FV）で電圧値に変換される。

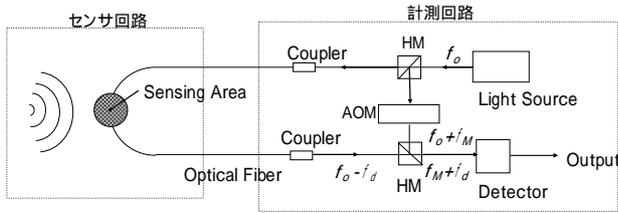


図-2 レーザドップラ振動計システム

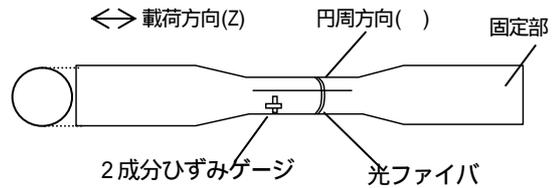


図-3 試験片とセンサ配置

3. 繰り返し載荷試験による測定原理の確認

FODセンサの特性を把握し、その測定原理を実験的に確認するため、3つの検証試験を行った。試験は、まず、FODセンサとひずみゲージの出力値比較、次に、センサ長と出力値の関係、そして真円型にした場合のセンサ長と感度の関係である。試験にはセンサをアルミ製試験片に貼付し、疲労試験機による繰り返し載荷試験を行って、両者の出力を比較した。FODセンサは測定周波数帯域が数Hz～1MHzと広いが、この試験に用いた疲労試験機で与え得る振動荷重の周波数は最大で50Hzである、従って、この試験は低周波帯域でのセンサの特性の把握と測定原理の確認を目的とした。

(1) 実験方法

a) ひずみゲージ出力値との比較

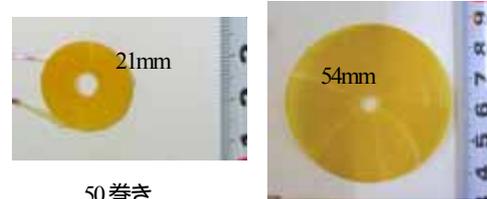
まず、FODセンサの出力値をひずみゲージの出力値と比較するため、図-3に示す長さ100mm、中央部の径8mmのドックボーン型のアルミ製試験片の中央部に、光ファイバとひずみゲージを、それぞれシアノアクリレート系の瞬間接着剤(型式CN 東京測器研究所(株))で載荷方向と円周方向に固着し、疲労試験機で繰り返し載荷を行った。

光ファイバは、同図に示すように試験片中央部の円周(θ)方向に2巻き、載荷軸(Z)方向には長さ50.2mmになるように貼り付けた。この長さは円周方向に巻きつけたファイバ長(2巻き×8mm×円周率)と同じ長さである。そして、2成分のひずみゲージ(ゲージ長1mmのクロスゲージ, FCA-1-23, 東京測器研究所(株)製)を光ファイバと同様に円周方向と載荷軸方向に貼り付けた。

繰り返し荷重の載荷は荷重制御で行い、まず試験片に一定の荷重を与え、その状態をゼロ点とした後、正弦波の振動荷重を載荷した。繰り返し周波数は5, 10, 20, 30Hzとしたが、いずれの周波数でも変位の振幅値が一定となるように荷重を制御した。

b) センサ長と周波数の変化に伴う出力値の変化

次に、センサ長 L と振動荷重の周波数 f の変化に伴う出力値の変化を調べた。試験は、前項で示した図-3の



50巻き

160巻き

写真-1 真円型センサ

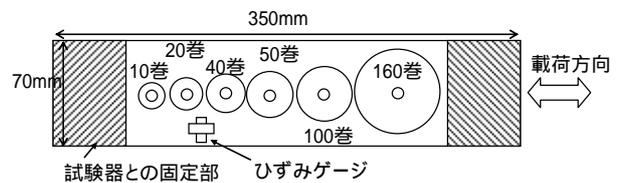


図-4 真円型センサの感度試験

表-1 巻数 n とセンサ長 L の関係

巻数 n	10	20	40	50	100	160
センサ長 L (m)	0.212	0.528	1.433	2.042	6.472	14.876

ドックボーン型の試験片の中央部に光ファイバを5, 10, 20および40周巻きつけることによりセンサ長 L を変化させて繰り返し載荷試験を行い、それぞれの出力波形の振幅を比較した。センサ長 L は巻数に比例して125mm, 251mm, 502mm, 1005mmとなる。

また、出力値と周波数 f の関係については繰り返し周波数を10Hz～50Hzの範囲で10Hzずつ変化させ、同様に出力波形の振幅を比較した。

c) 真円型センサの巻数の変化に伴う出力値の変化

後に述べるように、上記の2つの試験で、センサの測定原理にかかわる基本的な特性を明らかにすることができたため、次にすでに実用的に被計測物に固着して用いている真円型センサの巻数と出力感度の関係を調べるために試験を行った。写真-1に50巻きと160巻きのFODセンサを示す。前者は直径21mm、後者は54mmの大きさで、渦巻き状の真円型(ループ型)にして、被計測物へ固着して用いている。試験は、図-4に示すように幅70mm、長さ350mm、厚さ2mmのアルミ金属板に、10, 20, 40, 50, 100および160巻の真円型センサと2成分のひずみゲージ(FCA-3-23 東京測器研究所)を瞬間接着剤で貼り付け、疲労試験機で繰り返し載荷を行い、巻数の

表-2 载荷方向と円周方向の振幅値の比

周波数(Hz)	5	10	20	30
FODセンサ	0.37	0.39	0.37	0.32
ひずみゲージ	0.37	0.38	0.37	0.31

5Hzの時と同様に4分の1周期だけ位相がずれることを確認した。

载荷方向と円周方向の振幅値をみると、ひずみゲージ、FODセンサともに、円周方向の振幅値は载荷方向の振幅値の1/3程度であり、これはアルミ製試験片のポアソン比0.35にほぼ対応する。また、FODセンサの载荷方向と円周方向の出力値の比は表-2に示すようにいずれの周波数においてもアルミのポアソン比に近い値となっていた。このことは、適切な校正係数を見出すことができれば、ひずみゲージが使用できない高温などの環境下で、FODセンサをひずみゲージの代わりに使用できる可能性を示している。

また、図-5(a),(b)をみてわかるようにFODセンサで捉えた振動波形とひずみゲージの振動波形を比較すると、FODセンサの振動波形はゆがんでいることが認められる。このゆがみは、FODセンサが変位(ひずみ)速度を検知していることで説明できる。すなわち、FODセンサで捉えた振動は、変化量を時間 t で微分しているため、変化量が急激に変化した場合、その変化はより強調されることになり、測定波形にゆがみが生じると考えられる。

b) センサ長と周波数の変化に伴う出力値の変化

図-6(a)は周波数20Hzで振動荷重を载荷した場合に、ファイバ巻数5巻(125mm)と40巻(1005mm)で測定した波形を同一グラフ上にプロットして比較したものである。計測器が1ch用であったため、試験はそれぞれ別に行った。それぞれの試験で与えたひずみの振幅値が同一であることを確認するため、周方向のひずみゲージの測定波形を図-6(b)に示した。この図をみると2つの波形は重なっており、与えたひずみの振幅値はいずれの試験でも200 (± 100) μ 程度で同じであることがわかる。

もう一度図-6(a)に戻ると、ファイバ長が5巻の時の振幅は $\pm 0.12V$ であるのに対して、40巻での感度は5巻の時の約8倍の $\pm 0.9V$ となっており、ファイバ長が長いと振幅が大きくなっていることがわかる。

図-7は、ファイバ長が一定の5巻で、周波数が10Hzと50Hzの時の測定波形である。この試験もそれぞれ別に行ったが、それぞれの試験で与えたひずみ量がいずれも $\pm 100\mu$ 程度で同一であったことを確認している。同図をみると、繰り返し周波数 f が10Hz(周期100ms)の時の振幅は $\pm 0.05V$ 程度であるが、50Hz(周期20ms)では10Hz時の約5倍の $\pm 0.25V$ 程度となっており、周波数 f が大きくなると

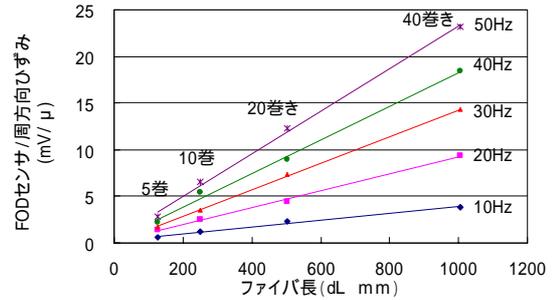


図-8 ファイバ長と振幅値の関係

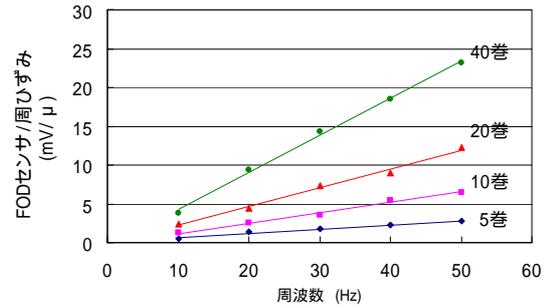


図-9 周波数と振幅値の関係

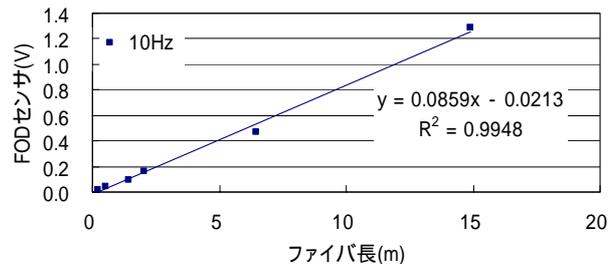


図-10 真円型センサの長さとの関係

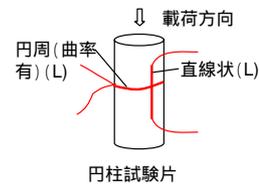


図-11 FODセンサの配置

振幅が大きくなっていることがわかる。

この試験では上述した条件の他に、ファイバ長が10, 20, 40巻で、それぞれの巻数に対して周波数が10, 20, 30, 40, 50Hzの载荷試験を行った。これらの試験におけるファイバ長と測定波形の振幅値の関係を図-8に示した。同図の横軸は巻数と試験片の直径から計算したファイバ長(mm)である。縦軸については、それぞれの試験で測定されたFODセンサの振幅値をその時に与えたひずみの振幅値で除し、1 μ 当りの測定値に換算して示した。図中の直線は、それぞれの周波数の試験値に対して最小二乗法で求めた原点を通る直線である。この図から、いずれの周波数においてもファイバ長が長くなるにつれてひずみ1 μ 当りの測定値が大きくなり、その関係はほぼ比例関

係にあることがわかる。

図-9は、ひずみ 1μ 当りの測定値と周波数の関係を見るために、図-8と同じ測定結果を、横軸に周波数をとって示したものである。この図から、ファイバ長の場合と同様、周波数とひずみ 1μ 当りの測定値は比例関係にあることがわかる。

c) 真円型センサの巻数と出力値の関係

図-10に異なる巻数の真円型（ループ型）センサに関する実験結果を示す。同図は周波数が10Hz時の結果で、横軸は表-1に示したファイバ長(mm)、縦軸は測定波形の振幅値(V)である。同図より実験結果はほぼ直線で近似されおり、ファイバ長と振幅値は、最小二乗法から求めた相関係数が“0.9948”とほぼ“1”に近いことから、比例的な関係となっているといえる。

(3) 測定原理確認試験結果の考察

a) 理論的な検討

ここでは、図-11に示すような円柱供試体にFODセンサを載荷軸方向と円周方向に貼り付け、圧縮あるいは引張荷重を載荷した状態を基準状態（ひずみ0の状態）と考え、この基準状態にさらに正弦振動荷重を加えた時に発生する変位量あるいはひずみ量を計算する。そして、その結果から変位速度あるいはひずみ速度を求め、FODセンサの出力電圧値との関係を考える。また、FODセンサの固着部の形状が曲率を有する場合に直線状の場合と相違があるか否かも併せて検討する。

まず、載荷軸方向にFODセンサを直線状に貼り付けた場合について考える。円柱試験片に周波数 f の正弦振動する荷重を与え、FODセンサが試験片とともに伸縮する場合、FODセンサの振動前の長さを L_{z0} とすると、時刻 t におけるFODセンサの長さ L_z は式(6)のように示される。ここに ω は振動荷重の角振動数である。

$$L_z = L_{z0} + L_{z0} a \sin \omega t \quad (6)$$

式(6)を時間 t で微分すると、式(7)となる。

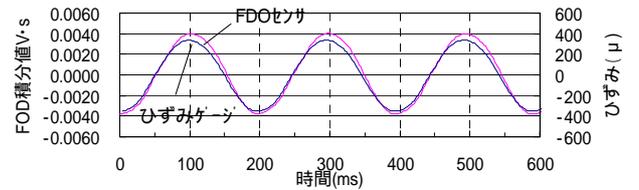
$$\frac{dL_z}{dt} = \omega L_{z0} a \cos \omega t \quad (7)$$

角振動数 ω は周波数 f を用いて $2\pi f$ と表すことができるから、式(7)は式(8)のように書くことができる。

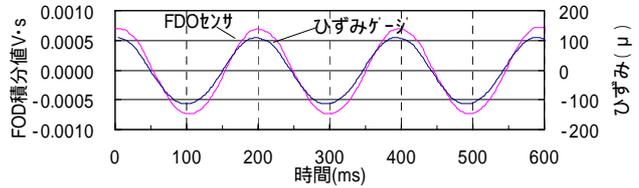
$$\frac{dL_z}{dt} = 2\pi f L_{z0} a \cos(2\pi f t) \quad (8)$$

次に、円柱試験片の円周方向にFODセンサを巻きつけ、試験片を軸方向に圧縮した場合を考える。軸方向の長さ変化が式(6)で表される場合、振動荷重により生じる軸方向のひずみ ε_z は次式のようになる。

$$\varepsilon_z = \frac{L_{z0} a \sin \omega t}{L_{z0}} = a \sin \omega t \quad (9)$$



(a) 載荷軸方向



(b) 周方向

図-12 FODセンサの測定波形の積分値とひずみゲージの測定波形の比較

円柱試験片の半径方向のひずみ ε_r は、ポアソン比を ν とすると、次式で表せる。

$$\varepsilon_r = -\nu \varepsilon_z = -\nu a \sin \omega t \quad (10)$$

このとき円柱の半径 r は、振動前の半径を r_0 とすると $r = r_0(1 + \varepsilon_r)$ であるから、円柱の側面に n 回巻きつけたFODセンサの長さ L_θ は、振動前のセンサ長を $L_{\theta 0}$ として、

$$L_\theta = L_{\theta 0}(1 + \varepsilon_r) = L_{\theta 0}(1 - \nu a \sin \omega t) \quad (11)$$

となる。ここに、 $L_{\theta 0} = 2\pi n r_0$ である。上式を時間 t で微分すると式(12)となる。

$$\frac{dL_\theta}{dt} = -L_{\theta 0} \omega \nu a \cos \omega t = -2\pi f \nu a L_{\theta 0} \cos(2\pi f t) \quad (12)$$

式(8)と式(12)は、FODセンサが直線状の場合も、巻きつけて曲率を有している場合も、 dL_z/dt 、 dL_θ/dt はファイバを固着したセンサ部の長さ L_{z0} 、 $L_{\theta 0}$ にそれぞれ比例することを示している。また、周波数 f が大きくなるとこれらの値が大きくなることも明らかである。これらのことは、図-8、図-9に示したファイバ長と振幅値の関係、周波数と振幅値の関係を、合理的に説明している。したがって、図-8、図-9に示された結果は、FODセンサが式(1)、式(2)に従って変位速度に比例した出力を示す速度型センサであることが実験的に検証されたことを意味している。

b) ひずみゲージ出力値との比較結果の検討

ドックボーン型のアルミ製試験片の載荷軸方向と円周方向にFODセンサとひずみゲージを貼付け、繰り返し

載荷を行い、両者の出力波形を比較した結果、両者の波形位相は4分の1ずれていた。このFODセンサの出力値がひずみ速度であるならば、時間積分することによって両者の波形の位相は一致するはずである。そこで、FODセンサで測定された出力波形を時間積分した。その結果を図-12に示した。図-12(a)が載荷軸方向、図-12(b)が円周方向で、円周方向の場合にはセンサは曲率を有している。これらの図をみてわかるように、両者とも、ひずみゲージの出力波形の位相は一致した。したがって、このことからFODセンサは変位速度（ひずみ速度）に比例した出力値を示していることがわかる。また、FODセンサの波形を積分したことで、波形のゆがみがみられなくなっていることから、先に述べたようにゆがみの原因はFODセンサが変位速度（ひずみ速度）を検知しているためであることがわかる。

c) 真円型センサの巻数と出力値の関係の検討

真円型センサの巻数と出力値の関係に関する図-10の実験結果を検討するため、アルミ板上に光ファイバが半径 r_0 の円形に貼り付けられ、アルミ板が x 方向に一軸的に引張載荷された場合を考える。このとき円形の光ファイバは楕円形に変形し、 x 方向とこれに直交する y 方向はそれぞれ楕円の主軸方向となり、主軸の長さ $2r_x, 2r_y$ は次式で表わされる。ここに、 ε_x は x 方向のひずみ、 ν はアルミのポアソン比である。

$$\left. \begin{aligned} r_x &= (1 + \varepsilon_x)r_0 \\ r_y &= (1 - \nu\varepsilon_x)r_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

主軸 $2r_x, 2r_y$ の楕円の周長 C は、次式で表わすことができる¹⁰⁾。

$$C = 2\pi r_x \left(1 - \frac{1}{4}k^2 - \frac{3}{64}k^4 - \frac{5}{256}k^6 - \dots \right) \quad (14)$$

ここに、 k は離心率で、

$$k = \sqrt{1 - \frac{r_y^2}{r_x^2}} \quad (15)$$

k は1に比べて十分小さく $k \cong 0$ であるから、第3項以降を無視し、式(15)、式(13)を順に代入すると、

$$\begin{aligned} C &= 2\pi r_x \left(1 - \frac{1}{4}k^2 \right) = 2\pi r_x \left(\frac{3r_x^2 + r_y^2}{4r_x^2} \right) \\ &= \pi r_0 \frac{3 + 6\varepsilon_x + 3\varepsilon_x^2 + 1 - 2\nu\varepsilon_x + \nu^2\varepsilon_x^2}{2(1 + \varepsilon_x)} \end{aligned}$$

ここで、 $\varepsilon_x \cong 0$ だから、分母においては $1 + \varepsilon_x \cong 1$ 、分子においては $\varepsilon_x^2 \cong 0$ とおけば、上式は次式で表せる。

$$C = \pi r_0 \{ 2 + (3 - \nu)\varepsilon_x \} \quad (16)$$

光ファイバが内径 $2R_i$ 、外径 $2R_o$ 、巻数 n の真円型センサの場合には、内径 $2R_i$ 、外径 $2R_o$ の円に対応する楕円の周長は式(16)の r_0 にそれぞれ R_i, R_o を代入した値となるから、式(3)と同様に考えて、センサ長 L は次式となる。

$$L = n\pi \frac{R_i + R_o}{2} \{ 2 + (3 - \nu)\varepsilon_x \} \quad (17)$$

載荷前の真円型センサのセンサ長 L_0 を用いれば、上式は

$$L = \frac{L_0}{2} \{ 2 + (3 - \nu)\varepsilon_x \} \quad (18)$$

ここに、

$$L_0 = n\pi(R_i + R_o) \quad (19)$$

振動荷重が載荷され、 $\varepsilon_x = a \sin \omega t$ となる場合には、式(18)は次式のようになる。

$$L = L_0 \{ 2 + (3 - \nu)a \sin \omega t \} \quad (20)$$

これを微分すれば

$$\frac{dL}{dt} = L_0 a \omega (3 - \nu) \cos \omega t = 2\pi f a L_0 (3 - \nu) \cos 2\pi f t \quad (21)$$

となる。この式は、式(2)を参照すれば電圧出力の振幅値がセンサ長に比例することを示しており、図-10に示された関係が成立することを合理的に説明している。したがって、真円型センサの場合、巻数を増やしてセンサ

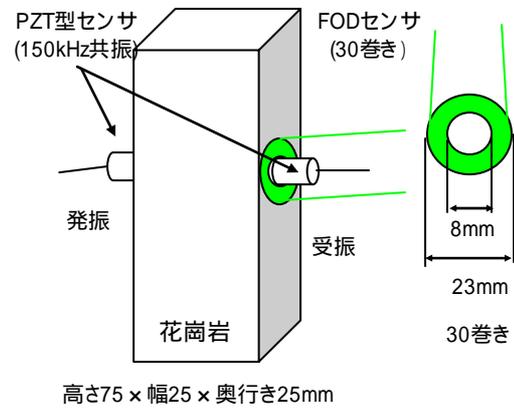


図-13 感度試験方法



写真-2 感度試験方法

長を長くすれば感度の高いセンサを作ることができる
ことがわかる。

4. PZT 型センサとの比較試験

著者らがこの FOD センサを実際に適用する場合を考えると、岩盤地下空洞の安全監視などの現場計測では数 kHz ~ 200 kHz, 岩石を対象した室内試験で 100kHz ~ 1MHz の周波数範囲が対象となる。しかし、数 10kHz 以上の周波数に対する特性を疲労試験機などを用いて定量的に調べることは、試験機の性能などを考慮すると不可能である。そこで、数 10kHz 以上の周波数における FOD センサの特性を調べるため、電気的に発振させた発振子の振動を用いて、従来より使用されている PZT 型の AE センサと測定波形を比較して、FOD センサの特性を検討した。具体的には、ここでは感度試験と周波数特性試験の 2 種類の試験を行った。

(1) 試験方法

a) 感度試験

感度試験では、高さ 75mm×幅 25mm×奥行き 25mm の花崗岩の岩石片を振動伝播の媒体とし、パルスジェネレータから矩形波（パルス波）を入力して PZT 型センサを発振し、FOD センサと PZT 型センサの両者でこの振動を受振して波形の最大振幅を比較した。図-13 および写真-2 に示すように、発振用の PZT 型センサを岩石片側面の中央部に瞬間接着剤で貼付し、受振用の FOD センサと PZT 型センサをその対面の中央部にそれぞれ同じ方法で貼付した。PZT 型センサは発振・受振ともに広帯域型より感度が良好な 150 kHz の共振型センサ、FOD センサは 30 巻きの真円型センサを用いた。

発振用の PZT 型センサに入力する矩形波形の電圧は最大振幅 15V とした。また、受振した AE 波形は、両センサとも増幅はせずに 100kHz のハイパスフィルタを介してデジタルオシロのハードディスクに収録した。

b) 周波数特性試験

岩石などの破壊過程を AE の波形解析から検討するためには、測定に用いるセンサの周波数特性を把握することが重要である。ここでの周波数特性の検討範囲は、通常の現地計測で筆者ら^{1), 2)}が測定対象としている 50kHz ~ 200kHz の範囲とした。

検討方法としては、一般的に用いられている相対校正法、音圧法および接触法などがあるが¹¹⁾、その中から最も簡便な方法である接触法を採用した。

接触法とは、2 個の同じ仕様のセンサの受感面同士を貼り付け、発振側のセンサに同一振幅の正弦波電圧を入

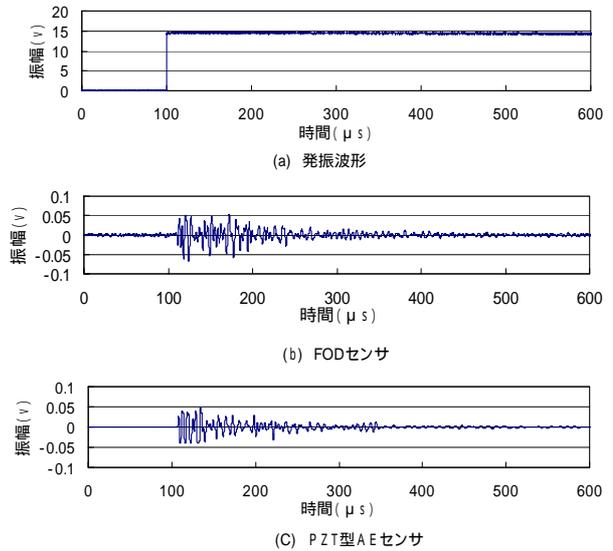


図-14 感度試験結果

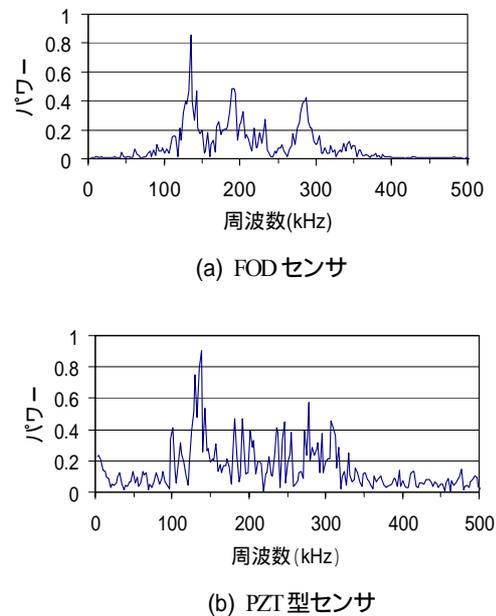


図-15 FOD 型センサと PZT 型センサの測定波形の FFT 解析結果

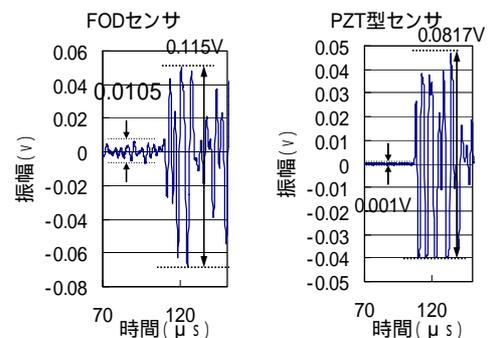


図-16 S/N 比の比較

力して振動させながら入力電圧の周波数を変化させ、もう一方のセンサで受振した各周波数に対する振幅値（感度）を求める方法である。しかし、FOD センサの場合には電圧を入力しても PZT センサのように振動しないため、FOD センサ同士では接触法が適用できない。そこで発振側のセンサには、100kHz～1MHz の範囲で比較的周波数特性が平坦な広帯域型の PZT 型センサを用いた。受振側には発振側と同型の PZT 型センサと 30 巻きの FOD センサを用いた。

なお、PZT 型センサに対する試験においては、接触面にシリコングリスを塗ってセンサ同士を直接貼り付けた。一方、FOD センサに対する試験では、PZT 型センサとの接触を良好にするために 1 辺 40mm、厚さ 0.5mm のアルミ板を挟んで発振側センサと受振側センサを設置した。

(2) 試験結果

a) 感度試験

図-14 に試験結果を示す。同図の(a)は発振波形、(b)は FOD センサの受振波形、(c)が PZT 型センサの受振波形である。図の横軸は時間(μ 秒)、縦軸は振幅値(V)である。同図の(b)と(c)から両者の感度を比較すると、両者とも最大振幅は ±0.05V であり、ほぼ同程度の感度であることがわかる。また、受振波形の継続時間も同程度である。

図-15 には、両者の受振波形の FFT 結果を示した。同図(a)の FOD センサの結果をみると、140kHz、190kHz および 280kHz 程度に明瞭なピークを持つことがわかる。図(b)の PZT 型センサは 140kHz に明確なピークを持つほか 100kHz～300kHz の範囲で感度が高く、両者の周波数特性は類似している。FOD センサの受振波形が PZT 型センサのそれと同様な周波数特性を示しているのは、発振された振動そのものに、共振周波数 150kHz の発振センサの周波数特性が影響を与えているためではないかと思われる。

次に、図-16 で S/N 比を比較する。同図はバックグラウンドノイズ (N) と受振信号レベル (S) を比較できるように図-14 の受振波形の初動付近を拡大したものである。S/N 比を受振信号の振幅値に対するバックグラウンドノイズの振幅値と定義すると、同図より、S/N 比は、FOD センサが 10 倍程度であるのに対して、PZT 型センサは 80 倍程度であり、PZT 型センサの方が 8 倍程度 S/N 比が良いことがわかる。この FOD センサの S/N 比が PZT 型センサと比べ劣る原因については、計測回路の Detector 部（干渉部）に起因していることがわかっており、現在 Detector 部の改良を進めている。

b) 周波数特性

図-17 に試験結果を示す。同図には、両者の 50kHz～200kHz 範囲の周波数と振幅値(感度)の関係を示しており、

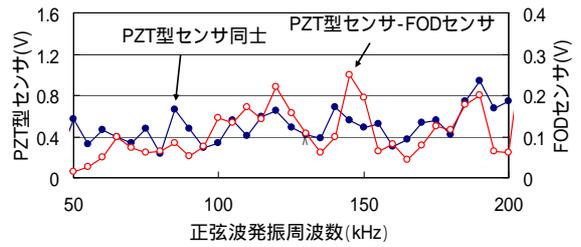


図-17 周波数変化に伴う FOD センサと PZT 型センサの受振振幅値(感度)の比較（発振に PZT 広帯域型センサを用いた場合）

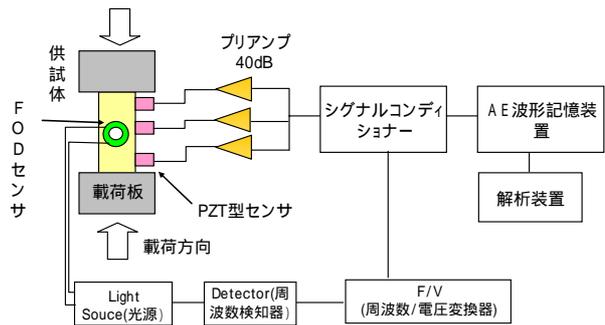


図-18 一軸圧縮試験の測定システム



写真-3 一軸圧縮試験（花崗岩）

青丸が PZT 型センサ、赤丸が FOD センサの結果である。同図より、FOD センサの感度はおおそ 70kHz 以下は低下しており、これらの付近では PZT 型センサの方が FOD センサより感度が高い傾向が伺える。一方、70kHz 以上では両者はほぼ同程度の感度であると言える。

以上より、FOD センサの 70kHz～200kHz 範囲の周波数特性は、広帯域の PZT 型センサと同様の特性を有していると判断される。

5. 一軸圧縮試験時の AE 測定

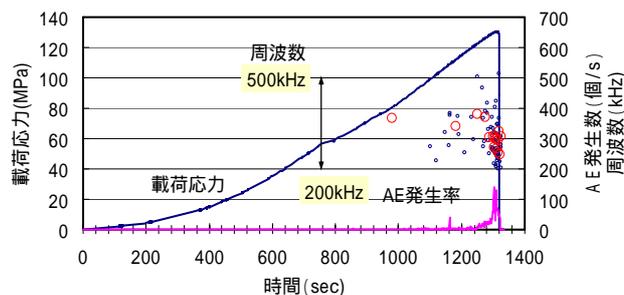
前述の PZT 型センサとの比較試験により、FOD センサの高周波数領域における特性をある程度明らかにすることができた。そこで実際の AE に対する FOD センサの測定性能を確認するため、花崗岩の一軸圧縮試験において破壊に伴って発生する AE を FOD センサと PZT 型センサの両方で測定して比較を行った。

(1) 試験方法

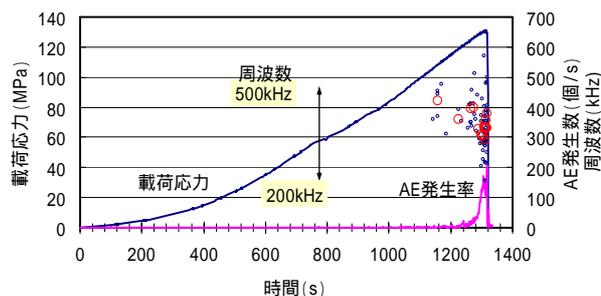
試験に用いた供試体は、高さ 75mm×幅 25mm×奥行き 25mm の花崗岩である。载荷には最大荷重 100 kN の油圧サーボ式疲労試験機を使用し、変位速度を 0.5mm/min 一定に制御して载荷を行った。測定システムの概要を図-18 に示す。システムは PZT 型センサの測定システムと FOD センサへレーザ光を入力し測定する光システムに分かれている。PZT 型センサの測定システムはプリアンプ、シグナルコンディショナ、AE 波形記憶装置および解析装置で構成される。FOD センサは光源 (Light Source)、周波数検知器 (Detector) および周波数-電圧変換器 (F/V) 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、シグナルコンディショナに接続される。PZT 型センサは波形の周波数解析を行うことを考慮して広帯域型 (100kHz~1MHz) を用い、図-18 および写真-3 に示すように供試体側面の上、中、下にそれぞれ 1 個貼り付ける。FOD センサは PZT 型センサの隣りの側面中央部に 1 個貼り付ける。ただし、AE 測定結果についての比較は、中央に貼り付けた PZT 型センサと FOD センサで行うことにした。

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 80dB (プリアンプ 40dB + メインアンプ 40dB) とした¹⁾。FOD センサはノイズレベルが大きいためメインアンプで 20dB の増幅に留めた。シグナルコンディショナで振幅のしきい値をノイズレベルより若干高い値に設定した。それにより、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た。また、しきい値を超えた場合には、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た。なお、波形のサンプリング間隔は 0.2μ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



(a) FOD センサ



(b) PZT 型センサ

図-19 一軸試験結果

ーターの解析を行った。

(2) 試験結果

図-19 に花崗岩供試体の破壊に伴う AE 発生率(個/秒)と周波数(kHz)を示す。同図(a)が FOD センサ、(b)が PZT センサで測定された結果である。周波数は測定された波形から 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 FFT 解析結果の図から図の重心を求め、その値を卓越周波数と考えた。図-19 に AE 周波数として小さな丸印で示した値は、この卓越周波数を発生時刻順に 10 個ずつ平均した値である。まず図-19(a)の FOD センサの場合をみると、供試体の破壊は载荷開始から 1300 秒経過後に 130MPa 付近で破壊している。AE は破壊応力の 96% (125MPa) で急激に発生し始め、1300 秒で最大 200 個/秒の AE が測定されている。AE 波形の周波数をみると、概ね 200~500kHz の範囲である。また大きな丸印は、小さな丸印を 5 個ずつ順次平均して求めた 50 波形の平均周波数であるが、これをみると破壊が近づくに伴い周波数が低下する傾向が認められる。一方、図-19(b)の PZT 型センサの場合をみると、AE 発生頻度の変化は FOD センサと同様な傾向であるが、最大発生数は 130 個/秒程度である。周波数帯域は FOD センサと同様に概ね 200~500kHz の範囲であり、小さな丸印を FOD センサの場合の 2 倍の 10 個ずつ順次平均して求めた 100 波形の平均周波数も破壊が近づくに伴い低下する傾向がみ

られる。

以上より、両者で測定された花崗岩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。

6. 結論と今後の展望

(1) 結論

レーザドップラ効果による周波数変調を利用した FOD センサの岩盤工学分野への適用性を検討するために、まずドックボーン型のアルミ製試験片に低周波の繰り返し荷重を載荷してセンサの測定原理の確認を行った。次に、高周波領域の特性を調べるため、従来の PZT 型 AE センサを発振センサに用いて接触法により感度および周波数特性を調べた。最後に花崗岩の一軸圧縮試験の破壊時に発生する AE 特性について、FOD センサと PZT 型センサの測定結果を比較した。これらの結果を整理すると、以下のとおりである。

1) FOD センサとひずみゲージをドックボーン型のアルミ製試験片に貼付し、試験片に疲労試験機で正弦的な繰り返し荷重を載荷して、両者の出力を比較したところ、FOD センサとひずみゲージの出力波形は4分の1周期だけ位相にずれが生じることがわかった。

2) この FOD センサの出力波形を時間積分したところ、ひずみの出力波形と位相が完全に一致した。このことは、センサ長を L 、時間を t としたとき、出力が dL/dt に比例するとする FOD センサの測定理論で合理的に説明でき、ひずみゲージの出力波形に対して、FOD センサの出力波形は変位（ひずみ）速度波形であることが確認された。

3) またドックボーン型のアルミ製試験片の長軸方向と円周方向で測定した FOD センサの出力値の比は、アルミのポアソン比 0.35 にほぼ等しい値であった。FOD センサを高温下で金属材料の供試体に接着した場合、接着剤と供試体の線膨張率の相違が原因でセンサが供試体からはがれるため現状では 600 が限界であるが、ファイバを構成する石英ガラスの耐熱が 1000 であるので、原理的に高温下での測定に適していることは間違いない。従って、適切な校正係数を見出すことができれば、高温などひずみゲージを使用できない環境下で、FOD センサをひずみゲージの代わりに使用できる可能性を示しているといえる。

4) ドックボーン型のアルミ製試験片の中央部に巻きつける FOD センサの巻数を変えて振動荷重を加え、セン

サ長の変化に伴う出力値の変化を検討した。その結果、センサ長 L が大きくなるほど、出力が大きくなることがわかった。またこの試験で、5Hz~50Hz の範囲で振動荷重の周波数を変化させたところ、周波数が大きくなるほど出力が大きくなることがわかった。このことは、センサ長を L 、時間を t としたとき、出力が dL/dt に比例するとする FOD センサの測定理論で合理的に説明でき、測定理論の妥当性が確認された。

5) FOD センサはこれまで渦巻き状の真円型にして被測定物に固着して用いているが、巻数の異なる真円型センサをアルミ金属板に固着して振動荷重を載荷し、巻数（センサ長）と出力の振幅値の関係を調べた。その結果、この場合もセンサ長と出力振幅値は比例的な関係となることが確認できた。したがって、真円型センサの場合、巻数を増やしてセンサ長を長くすれば感度の高いセンサを作ることができることがわかった。

6) 10kHz 以上の高周波領域における FOD センサの感度を調べるため、花崗岩の岩石試験片側面の中央部に PZT 型センサを貼付けて、パルスジェネレータで矩形波電圧を入力して振動させ、この振動を対面の中央部に設置した FOD センサと PZT 型センサで受振して受振波形の最大振幅を比較した。その結果、FOD センサは PZT 型センサとほぼ同等な感度を有していることがわかった。一方、SN 比は FOD センサに比べて PZT 型センサの方が 8 倍程度良かった。この FOD センサの SN 比が PZT 型センサと比べ劣る原因については、計測回路の Detector 部（干渉部）に起因していることがわかっており現在 Detector 部の改良を進めている。

7) 周波数特性が比較的平坦な広帯域型の PZT 型センサを厚さ 0.5mm のアルミ板の片面に貼り、同一振幅の正弦波電圧を入力して振動させながら周波数を変化させ、対面に貼った FOD センサで受振した波形の振幅変化を調べた。この結果を、同じ PZT センサ 2 個の受感面同士を直接貼り付けて調べた振幅値変化と比較したところ、FOD センサは広帯域型の PZT 型センサとほぼ同様の周波数特性を有していることがわかった。

8) 実際の AE に対する FOD センサの適用性を確認するため、花崗岩の一軸圧縮試験において発生する AE を FOD センサと PZT 型センサの両方で測定して比較を行った。その結果、岩石の破壊に伴う AE の発生頻度や発生状況に両者の違いはなく、測定された波形の卓越周波数もいずれも概ね 200kHz~500kHz の範囲にあり、破壊に伴って徐々に低下する傾向が共通して認められた。したがって、FOD センサは広域型の PZT 型センサと同等の測定性能を有しており、AE センサとしての有用性が確認された。

以上より、FOD センサはひずみゲージレベルから PZT 型センサの持つ数 100kHz の周波数帯において、ほぼ同等の能力を有していることが確認された。したがって、FOD センサが有する特性や能力を活かすことで、PZT 型センサが適用できなかった過酷な環境下で、FOD センサは PZT 型センサの代わりのセンサとして適用できる見通しを得た。

(2) 今後の展望

FOD センサは薄型軽量で測定原理も PZT 型センサと異なっており、特異な共振点を持たない可能性がある。このことは、AE 波形から破壊メカニズムを解析する原波形解析に有利なセンサであることを意味しており、今後は広範囲の周波数特性を詳細に検討する予定である。また、さらに指向性などについても実験的な検討を進めて、FOD センサの有効性・信頼性を高め、建設分野の適所での活用を図っていきたいと考えている。

謝辞：実験の実施に際しては、当時山口大学工学部社会建設工学科 4 年生に在学した田村晋吾君（現在、同大学院理工学研究科）の協力を得た。また、日特建設株式会社 技術本部 技師長 金川忠氏、藤井真希主任をはじめ地質部のかたがたには貴重な助言を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 田中正弘, 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.
- 2) 田中正弘, 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, VOL39, No.149 (特集: 崩

落・落石), pp.70-76, 2002.

- 3) 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 測定による不安壊判定法, 日本地すべり学会誌, Vol.39, No.149 (特集: 岩盤崩定岩塊の挙動監視,
- 4) 石田 毅, 田仲正弘, 西川直志, 北村晴夫, 塩谷智基, 古屋憲二: 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における地表面及び孔内 AE 測定について, 日本地すべり学会誌, Vol. 39, No.149 (特集: 岩盤崩落・落石), pp.77-86, 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) 影山和郎, 金原 勲, 鈴木敏夫, 大澤 勇, 村山英晶, 犬養泰彦: レーザドップラ光ファイバセンサによる AE 波検出の試み, 日本機会学会第 75 期通常総合講演論文集(II), pp.94-95, 1998.
- 7) 池田典之, 棚瀬大爾, 影山和郎, 田仲正弘, 本間 誠: 岩盤分野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 回年次学術講演会講演論文集(III 部門), pp.307-308, 2003.
- 8) Huang, Q. and Nissen, G.L.: Structural health monitoring of DC-XA LH2 tank using acoustic emission, Structural Health Monitoring Technomic Publishing Company Inc., pp. 301-309, 1997.
- 9) 村山英晶, 影山和郎, 成瀬央, 島田明佳, 鶴沢潔: 光ファイバセンサによる大型複合材料構造のヘルスマニタリング, 日本複合材料学会, Vol.28, No.5, pp.6-20, 2002.
- 10) 国立天文台編, 理科年表(机上版), 丸善, 1995.
- 11) 日本非破壊検査協会: 相互校正法によるアコースティック・エミッション変換子の絶対感度校正方法(H16年改正版), 日本非破壊検査協会, 2004.

(2005.11.29 受付)

FUNDAMENTAL INVESTIGATION FOR APPLICATION OF A NEW FIBER-OPTIC DOPPLER SENSOR TO ROCK MECHANICS

Masahiro TANAKA, Seiji KIKUYAMA, Yuichi MACHIJIMA
and Tsuyoshi ISHIDA

A FOD (Fiber Optic Doppler) sensor that can measure AE (Acoustic Emission) has been invented and developed. The measuring principle is completely different from that of the conventional PZT type AE sensor. The FOD sensor is made by looping an optical fiber and it is glued on object to measure vibration. It measures the vibration as the frequency changes of laser light due to the Doppler effect. The FOD sensor has the following advantages; (1) small diameter and small weight, (2) immunity from the electromagnetic noises, (3) durability and corrosive resistance, (4) usability under high temperature, (5) long-range transmission, and (6) low cost. In order to examine applicability of the FOD sensor to monitoring of rock structures, the authors compared the sensitivity and the frequency response of the FOD sensor to those of the conventional PZT type sensor in laboratory experiments. The results indicated that the FOD sensor has strong possibility to be used for real rock structures.