

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

森 孝之¹・岩野 圭太¹・中嶌 誠門¹・田仲 正弘²・菊山 清児²・竹原 真希³

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

E-mail: moritakayuki@kajima.com, iwanokeita@kajima.com, nakajmak@kajima.com

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

E-mail: tanaka@lazoc.jp, kikuyama@lazoc.jp

³正会員 日特建設株式会社 (〒104-0044 東京都中央区明石町13-18)

E-mail: maki.takehara@nittoc.co.jp

光ファイバドップラセンサ (以下 FOD センサと呼ぶ) はレーザードップラ変調を利用して測定する新しい原理の振動センサである。このセンサは薄型軽量で可撓性に富んでおり、防爆性や電磁気のノイズを受けないなどの特徴を有している。そこで、この FOD センサの岩盤構造物への適用性を把握するために、FOD センサと従来から使用されている PZT 型センサの両者を用い、岩石三軸圧縮試験時の AE を計測した。同試験では FOD センサの形状と可撓性を利用して直接岩石供試体に貼付けて行った。そして両者で捉えた AE から岩石破壊時の AE 特性の比較を行った。また、1 辺 300mm の花崗岩ブロックを二軸載荷状態にして水圧破碎試験を行い、三軸圧縮試験時よりも測定周波数帯が低い破碎時の AE 計測も試みた。

Key Words : fiber-optic, Doppler effect, acoustic-emission, triaxial compressive test, hydraulic fracturing test

1. はじめに

地下発電所空洞や長大トンネルなどにおいては、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。また、ダムや原子力発電所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で実施している^{1), 2)}。しかし、現在計画が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耐水圧性や長期の信頼性などを備えたセンサが要求されている。さらに LPG 岩盤地下備蓄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^{3) 4)}。光ファイバの持つ有用な特性を利用すれば、長期間にわたる安定した測定や防爆性の確保など、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、次の特徴を有する。

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測定ノイズ源となる電磁気の影響を受けない。④測定周波数帯が広域である。⑤光ファイバケーブル自体は耐熱性、耐久性および耐腐食性に優れている。⑥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 型センサと同様に建設分野で適用することができれば、将来の建設プロジェクトにおける様々な適用上の課題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、この FOD センサと PZT 型センサの両者を用いて花崗岩供試体の三軸圧縮試験時に発生する 100 kHz 以上の周波数帯の AE を測定し、感度・周波数特性比較を行う共に、一辺 300mm の花崗岩ブロックを用いた水圧破碎試

験時の100kHz付近のAE測定を行った。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有効であるとの結論を得たので以下に報告する。

2. 測定原理

2.1 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 の光波を入力した場合、伸縮するセンサ部を通過する光波はファイバ内で生じるドップラ効果によって周波数変調 f_d を生じ、他端から出力される光波の周波数はこの変調分を加えて $f_0 + f_d$ となる。この周波数変調量 f_d 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動を捉えることができるセンサとなる。

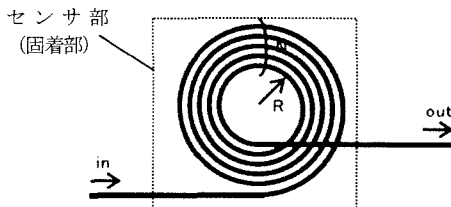


図-1 光ファイバのセンサ部

2.2 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_d 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、引張変位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。

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

上式に示すように、周波数変調 f_d と変位速度 dL/dt は比例関係となる。この周波数変調 f_d 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、変位速度が速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。

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

ここで、 $K = -\frac{k}{\lambda}$

2.2 検知システム

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（株式会社レーザーテック製）を図-2に示す。システムはセンサ部と計測部から構成されている。計測部がヘテロダイン干渉法を用いて周波数変調量の検出部分である。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、センサ部と計測部に分波される。センサ部では、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、レーザ光は光路長の時間的な変化、 dL/dt に比例した周波数変調 f_d が生じ、センサから出力されるレーザ光は $f_0 + f_d$ となる。一方、計測部では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、センサ部からのレーザ光と計測部からのレーザ光の周波数の差 $f_M + f_d$ が導かれ、検知器（Detector）で f_d が検出され、光/電圧変換器（FV）で電圧値に変換される。

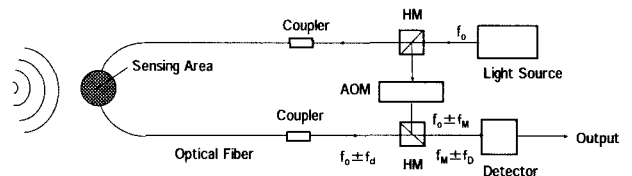


図-2 レーザドップラ振動計システム

3. FODセンサの適用性の検討

3.1 三軸圧縮試験時のAE特性比較

岩石を用いた三軸圧縮試験時の破壊に伴って発生する100kHz以上の周波数帯を対象としたAEを計測し、その岩石の破壊状況とAE特性の関係を指標として、実際の岩盤構造物建設時の安全監視¹⁾に役立てている。そこで、従来から用いているPZT型センサとFODセンサの両者で三軸圧縮破壊時のAEを測定して、両者の比較を行いFODセンサの有効性を検討する。

FODセンサの三軸圧縮試験への適用方法については、

すでに、著者らは手法の検討⁵⁾を行い、薄型で可撓性を有しているFODセンサをひずみゲージのように岩石供試体に直接貼り付けて、信号線を図-3に示すように下端の載荷盤から外に出せるように試験機の改良を行っている。また、本試験でFODセンサの有効性が確認できれば、従来のように載荷盤を介しての測定でなく直接供試体内から生じるAEを測定することが可能になり、データの信頼性がより向上するだけでなく、試験機も特殊な試験器具の必要性が少なくなるなどの利点があるものと考えている。

3.1.1 試験方法

試験は図-3に示すように、直径 ϕ 10mm、高さ30mmのPZT型センサは圧力がかからないように供試体上端の載荷盤の中にセンサを設置する。供試体には茨城産の稲田花崗岩を用い、FODセンサはその供試体に ϕ 20mm厚さ0.3mmの50巻きのFODセンサをシアノアクリレート系の接着剤で貼付け、信号線を通す ϕ 5mmの孔を設けた下端の載荷盤を経由して外部に出す。FODセンサの信号線は光ファイバ線が2本あり、それらの信号線の外径は被覆を含めてそれぞれ0.8mm程度である。なお、PZT型センサは100kHz～1MHzの広帯域型のセンサである。

そして、供試体と上下の載荷板をゴムスリーブで覆い、油圧セルをかぶせ、三軸圧縮試験を実施する。

試験装置は2000kN載荷可能な剛性圧縮試験機を用いて、載荷方法はひずみ制御で、その載荷速度は0.05%/minとし、側圧は6MPaとする。

3.1.2 試験システム

システムは図-4に示すようにFODセンサは光源、干渉計およびシグナルコンディショナで、PZT型センサはプリアンプとシグナルコンディショナでそれぞれ構成されている。FODセンサで受振された信号は干渉計で周波数変調を検出した後に電圧に変換する。そして、フィルタで波形を整形した後に、シグナルコンディショナへ転送され、20dB増幅する。一方、PZT型センサで受振された信号は、まずプリアンプで40dB増幅後、FODセンサの信号と同期をとるために同一のシグナルコンディショナに転送され、メインアンプでさらに20dB増幅して、フィルタで整形する。そして、両者の信号はシグナルコンディショナ内でサンプリング0.2 μ s、記録長1024点でAD変換を行い、AE発生数や最大振幅値などの波形パラメータ解析をそれぞれ行い、それらの結果はパーソナルコンピュータで収録され、波形データは別途の波形記憶装置に転送される。なお、両者の信号のしきい値はなるべく多くのAEが測定できるようにノイズレベルより若干高めに設定する。

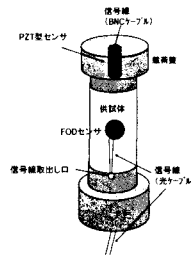


図-3 三軸圧縮試験における各センサの設置方法

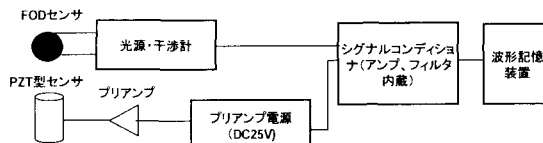


図-4 システム図

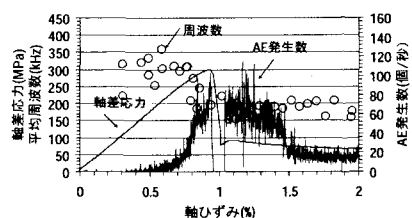


図-5(a) 結果図 (FOD センサ)

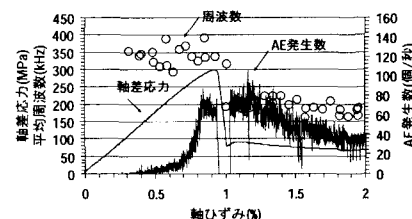


図-5(b) 結果図 (PZT 型センサ)

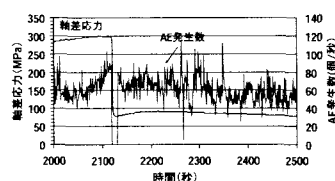


図-6 破壊直後の AE 発生状況

3.1.3 試験結果

(1) 破壊とAE発生状況

試験結果を図-5(a), (b)に示した。同図(a)はFODセンサで捉えた破壊に伴うAE特性、(b)はPZT型センサでの結果である。これらの応力-ひずみ曲線にAE発生数と周波数変化を示したもので、縦軸の載荷応力は側圧6MPaを差し引いた軸差応力である。AEは1秒当りの発生数、周波数はFFT図の重心周波数で発生時刻順に10波形ずつの平均値である。

まず、これらの図から岩石の破壊状況をみると、ひずみが0.94%で応力が300MPa程度の時に岩石は急激に破壊し、ひずみが0.94～1.0%の間に応力は82MPaまで低下

する。そして、残留状態になりひずみが2%時には66MPa程度まで低下している。次に、AE特性をみる。最初に(a)のFODセンサの結果をみると、AEはひずみが0.3%程度（応力110MPa）から発生し始め、0.7%付近（応力250MPa）からAEの発生は急増する。そして、破壊時（300MPa）には最大で103個/秒のAEが発生する。しかし、载荷応力が大きく低下した破壊時にはAEの発生がみられなかった。図-6に破壊時の応力の経時変化を示す。同図は横軸を時間に直している。この図をみてわかるように、岩石の破壊が瞬時のうちに生じていることがわかる。AEはその区間だけ測定されていない。この現象の要因については今後分析を進めていきたい。

次に、図-5(b)のPZT型センサをみると、FODセンサの結果と同様な傾向であることがわかる。また、PZT型センサでも载荷応力が大きく低下する時にはAEの発生はみられない。

(2) 周波数変化

続いて、周波数変化をみてみる。まず、図-5(a)のFODセンサの結果をみると、破壊前はひずみで0.8%までは250kHz～400kHzの範囲に収まっているが、0.8%から破壊前は200kHz程度に低下する。そして、残留に入ると、周波数は破壊前の半分程度の200kHz前後で推移している。

次に、図-5(b)のPZT型センサみると、破壊前は破壊直前まで300kHz～400kHzの範囲であり、FODセンサのように破壊前の周波数の低下はみられない。残留ではFODと同様に破壊前の半分程度の200kHz程度で推移する。

(3) 測定波形の比較

図-7(a)、(b)および図-8(a)、(b)にFODセンサとPZT型センサの両者で測定された波形例と波形のFFT解析結果を示す。これらの図の(a)は波形、(b)はFFT結果図である。また、図-7は破壊前でひずみで0.8%、応力で270MPa、図-8は残留時で1.5%、70MPaの時にそれぞれ測定された例である。

図-7(a)の破壊前の波形をみると、波形の到達順位はFODセンサの方がPZT型センサより早いのがわかり、AEが供試体内部から発生していることがわかる。また、振幅もFODセンサが最大で3V、PZT型が0.7V程度である。波形の長さは前者が20 μ s、後者が50 μ sで前者の方が短い。図-7(b)の周波数を見てみると、前者が200kHzと450kHz付近にピークを持っている。後者は300kHz付近に大きなピークを持っている。

図-8(a)の残留時の波形をみると、波形の到達、振幅、長さともに図-7(a)と同様な傾向がみれる。図-7(b)の周波数については、両者のセンサとも100kHz付近にピークを持っている。

これらの両者のセンサで捉えた周波数成分を比較する

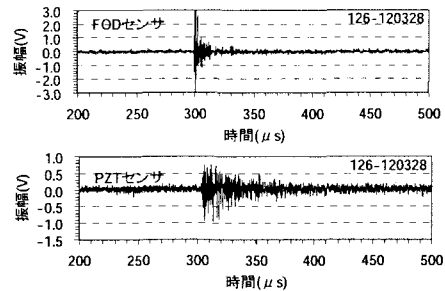


図-7(a) 波形例（破壊前）

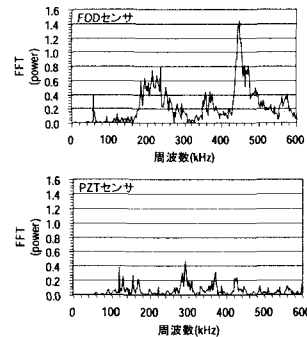


図-7(b) FFT（破壊前）

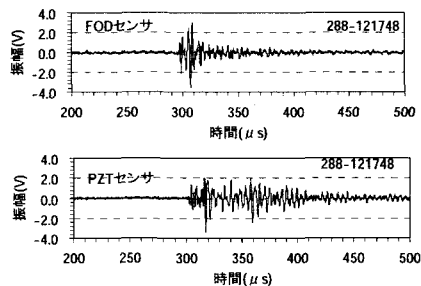


図-8(a) 波形例（残留時）

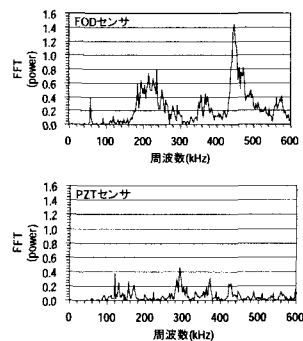


図-8(b) FFT（残留時）

と、破壊前および残留時ともにFODセンサの方がPZT型より高い周波数成分を測定している。これは供試体内部で発生したAEの発生箇所とセンサまでの到達距離が、FODセンサよりPZT型センサの方が遠いことによる距離減衰の影響と考えている。したがって、供試体に直接

センサを貼ることで有効な測定になると思われる。

3.2 水圧破碎試験時のAE特性比較

三軸圧縮試験に用いる供試体より大きな1辺300mmの花崗岩ブロックを用い、水圧破碎時のAEをFODセンサとPZT型センサの両者で測定して、両者の比較を行いFODセンサの有効性を検討する。測定周波数帯は三軸圧縮試験時のAE周波数帯より低い周波数帯を対象とした。

3.2.1 試験方法

図-9に示すように一辺300mmの花崗岩ブロックの中央部に $\phi 46\text{mm}$ の注水孔をあけ、その孔を囲むように4角にセンサ埋設孔を設ける。水圧破碎区間は注水孔口から10cm $\sim$ 20cm区間としてセンサを注水区間の深度に合わせる。センサの配置はPZT型センサとFODセンサの比較用に北東孔に70kHz共振型のPZT型センサと50巻きのFODセンサを設置し、南東孔に50巻きと80巻きのFODセンサ、南西孔に10MPaの耐水圧型FODセンサ（50巻き）、北西孔に50巻きFODセンサをそれぞれ設置して、石膏で埋設した。

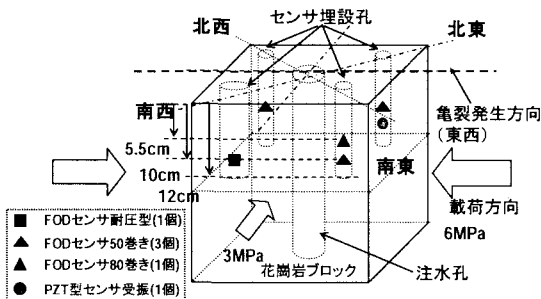


図-9 センサ配置図

試験はフラットジャッキを用いて花崗岩ブロックに側圧を与え、ブロック中央部に開けた注水孔から流量一定で注水して、岩石ブロックを割り、その際に生じたAEを各センサで測定する。側圧は東西方向が6MPa、南北方向3MPaで流量は100ml/minとする。AE測定の場合はPZT型センサはプリアンプで40dB増幅するが、FODセンサは増幅は行わない。しきい値はPZT、FOD同一とし、ノイズレベルより若干高めの値とする。フィルタは両者ともローパス250kHzでサンプリングは0.5 μs 、収録長は1024wordsとする。また測定システムは三軸圧縮試験時と同様のものを用いる。

3.2.2 試験結果

試験結果は、FODセンサとPZT型センサの比較を目的にしているため、北東孔に設置した両センサの結果について以下に示す。両者のセンサが捉えた花崗岩ブロックの水圧破碎に伴うAE発生数（個/0.2秒）と周波数変化を

図-10に示す。図の横軸が経過時間である。この結果は再開口時のもので、注水開始から772秒経過後に注水圧が2.5MPa付近に達して後に、注水圧は低下する。この減少は再開口した亀裂から水がリークしている様子を示している。

AEは注水により亀裂が進展し始めて水がリークするまでの期間に発生した。北東孔のPZT型とFODを比較すると、AE発生数はPZT型が最大80個程度、FODは110個程度とややFODの方が多い。測定波形の周波数帯はPZT型が120 $\sim$ 180kHz、FODが140kHz $\sim$ 210kHz帯でPZT型が若干低い傾向である。これはPZT型が70kHz共振であることためと思われる。しかしながら両者で捉えたAE特性の傾向は良く似ている。図-11にリーク直前に測定された波形例とFFT結果を示した。上段がPZT型、下段がFODである。両者のFFT結果をみると、PZT型は100kHz付近に顕著なピークを持っているが、FODは100kHz $\sim$ 160kHzの範囲であることがわかる。これは周波数帯により感度特性が異なるPZT型センサと比べ、FODセンサは極めて広範囲の周波数をカバーできる特性によるものと考えられる。

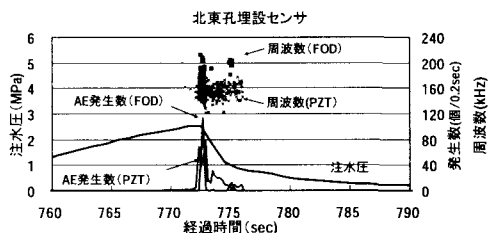


図-10 水圧破碎に伴うAE発生状況

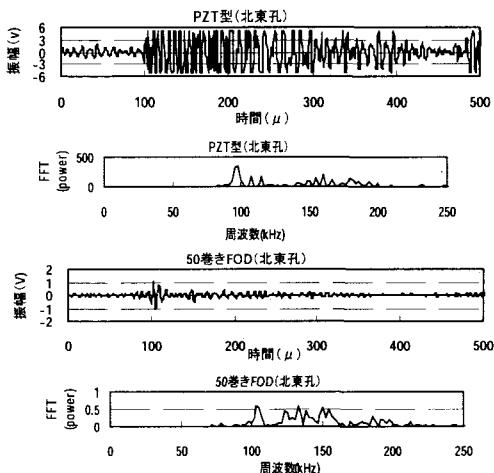


図-11 PZT型とFODセンサ収録波形（北東孔）

4. まとめ

薄型軽量で可撓性に富んでおり、防爆性や電磁気のノイズを受けないなどの特徴を有している FOD センサ

の岩盤構造物への適用性を把握するために、花崗岩供試体を用いた三軸圧縮試験時に PZT 型センサと FOD センサの両者を用いて、破壊に伴って発生する AE 特性を測定して比較を行った。また、ややスケールの大きい一辺 300mm の花崗岩ブロックを用いて、水圧破碎試験を行い、やはり両者のセンサで破壊時の AE を測定した。その結果を以下にまとめた。

(1) 三軸圧縮試験の結果、花崗岩供試体は軸差応力で 300MPa 程度、ひずみは 0.9% 付近で急激に破壊した。AE はひずみで 0.3% 付近から発生しだし、0.7% 付近から急増した。AE 発生状況は FOD センサおよび PZT 型センサともに同様な傾向であった。両者の発生数を比較すると、FOD は最大 100 個/秒程度、PZT 型は 80 個/秒程度であり、供試体に直接貼った FOD センサの方が発生数が多い結果となった。したがって、FOD センサは PZT 型センサと同等またはそれ以上の性能を有することが確認できた。

(2) 周波数変化は、FOD センサが破壊前で、ひずみが 0.8% 付近を境にして、400kHz から 200kHz 程度に低下するのに対して、PZT 型センサは破壊前では低下する傾向がみられなかった。残留状態では両センサとも 200kHz 程度であり、概ね破壊前で最も高かった周波数の半分程度であった。また、試験時の測定波形の FFT 解析結果から、載荷板を介して測定している PZT 型センサより直接供試体に貼った FOD センサの方が高い周波数帯を測定しており、供試体の破壊状況をより正確に測定されていると思われる。

(3) 一辺 300mm の花崗岩ブロックを用いて、水圧破碎時の AE を両センサで測定した。測定周波数帯は三軸圧縮試験時では 100kHz 以上であったのに対して、100kHz 付近を対象とした。その結果、両者で捉えて AE の発生状況の傾向は同様であったが、周波数数帯に関して PZT 型センサが 100kHz 付近で共振しているのに対して、FOD

センサは 100kHz~160kHz の範囲を測定しており、FOD センサが極めて広範囲の周波数帯をカバーできる特性を有している。また、FOD センサを用いればセンサの周波数特性の影響が少ない波形を測定できると考えている。(4)以上より、FOD センサは 100kHz 以上の周波数帯において、従来より用いている PZT 型センサと比較すると、性能面でほぼ同等の能力を有することがわかった。また、今までは、対象とする供試体の大きさによって測定周波数帯が異なるため、その都度周波数帯に対応した PZT 型センサを選定して行っていたが、FOD センサであればひとつのセンサで対応できることがわかった。これはこの FOD センサの測定周波数帯が広域であることを示しているものと考えている。今後は、さらに実績を重ね岩盤構造物へ適用性を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 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;西日本岩盤工学会シンポジウム講演論文集, 2000.7
- 2) 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.1, 149 「特集: 岩盤崩落・落石」, 2002.6, pp.70-76
- 3) K. Kageyama, H. Murayama, I. Iosawa, M. Kanai, T. Motegi, K. Nagata, Y. Machiji, M. F. Matsumura; Development of a New Fiber-Optic Acoustic Vibration sensor; International Workshop on Structural Health Monitoring 2003, 15-17, 2003, pp.1150-1157
- 4) 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;日本機学会 第 75 期通常総合講演論文集, 1998.3.31 pp.94-95
- 5) 森孝之,岩野圭太,中嶋誠門,田仲正弘,本間誠,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;土木学会 第 60 回 1/3 年次講演会, 2005.9

APPLICATION OF THE FIBER OPTICAL OSCILLATION SENSOR FOR AE MEASUREMENT AT THE ROCK TRI-AXIAL COMPRESSIVE TEST

Takayuki MORI, Keita IWANO, Makoto NAKAJIMA, Masahiro TANAKA, Seiji KIKUYAMA and Maki TAKEHARA

The fiber optical doppler sensor (FOD sensor) is rich in curve-flexibility and being lightweight and thin and has the advantage, that does not receive an electromagnetic noise, and is explosion-proof.

In order to estimate the applicability of this FOD sensor to monitoring for the rock cavern, authors carried out acoustic emission (AE) measurement using conventional PZT type sensor and the FOD sensor for triaxial compressive test applied to rock specimen. In this laboratory test, authors installed the FOD sensor on direct rock specimen taking advantage at the curve-flexibility, and compared the AE characteristics during failure of rock those obtained by two kinds of sensors. Further, authors tried AE measurement at the hydraulic fracture test in the state of bi-axial loading using the 300mm cubic granite block.