

新しい光ファイバ振動センサの岩盤工学分野への 適用性に関する基礎的検討

Fundamental Investigation for Application of a New Fiber-Optic Vibration sensor to Rock Mechanics

田仲正弘*・金川 忠*・本間 誠**

菊山清児**・石田 毅***

Masahiro TANAKA, Tadashi KANAGAWA, Makoto HONMA,
Seiji KIKUYAMA and Tsuyoshi ISHIDA

A FV(fiber-optic vibration) sensor that can measure AE(Acoustic Emission) has been developed. The principle of the measurement is completely different from that of the conventional PZT type AE sensor. The FV sensor is made by looping a 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 FV sensor has the following advantages, (1) small diameter and small weight, (2) immunity from the electro-magnetic noises, (3) durability and corrosive resistance, (4) long-range transmission, and (5) low cost.

In order to examine applicability of the FV sensor to monitoring of rock structures, the author compared the sensitivity and the frequency response of the FV sensor to those of the conventional PZT type sensor in laboratory experiments. The results are reported in this paper.

Key Words: fiber-optic vibration sensor, doppler effect, acoustic emission

1. はじめに

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として、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そ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), 2)}。

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金属分野で開発された^{3), 4)}。しかし、このセンサは開発されてから間もないことから建設分野での実績はほとんどない。そこで、光ファイバの持つ有用な特性を最大限利用して、建設分野への適用性を検討することにした。

ここでは、センサの名称を「光ファイバ振動センサ」とし、略称として FV センサと呼ぶことにする。この FV 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

* 正会員 日特建設㈱ 技術本部 我孫子研究室

** 正会員 ㈱レーザック

*** 正会員 山口大学工学部

(AE)を捉えることができる。しかし、両者のセンサ構造はまったく異なっており、PZT型センサが圧電素子を用いて伝播してくる振動を電圧に変換して測定するのに対して、FVセンサは1本の光ファイバケーブルの一部を小さなループ状にして固体に貼付することにより、そこに伝播してくる振動を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。

FVセンサは、①直径が20～30mm、厚さが1mm程度の小型で軽量なものである。その上、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。また、⑤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FVセンサの持つ有利性を生かし、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、適所に利用することにより有効な測定手段となる。そこで、FVセンサの適用性を把握するために、基礎的な検討としてFVセンサとPZT型センサの両者について、感度・周波数特性および岩石の破壊時に発生するAE波形の振動特性について比較を行ったので報告する。

2. 光ファイバ振動センサ (FV センサ) の原理

光ファイバ内のレーザ光は、コアとクラッドの境界で全反射を繰り返しながら伝播する。湾曲させた光ファイバを被測定物などに固着させ、その一端からレーザ光を照射すると、固着部分が微小伸縮することにより湾曲部の変位速度に比例してレーザ光の周波数が変化する。この現象が光ファイバ内で生じるドップラ効果である。

すなわち、図-1 (a) に示すように光ファイバが湾曲している場合、内側と外側で反射角が異なる ($\alpha_a \neq \alpha_b$) ため、ドップラ効果 ($f_{D,a} + f_{D,b} \neq 0$) が生じる。レーザ光はファイバ内で何回も反射しながら進むため、出力端では湾曲された全経路で生じた周波数の変化が出力される。

一方、図-1 (b) に示すように光ファイバが直線の場合は、a点とb点での反射角 ($\alpha_a = \alpha_b$) は同じとなるため、光ファイバが振動してもドップラ効果は生じない ($f_{D,a} + f_{D,b} = 0$)。

以下に、光ファイバ内でレーザ光の経路が曲がることによって生じるドップラ効果の理論式を示す。まず、レーザ光は光ファイバ内をビーム状に伝播する。ここで、図-2 に示すように湾曲した微小経路 ds における光の方向変化を $d\theta$ とする。この微小経路において生じる光の周波数変化 df_D はドップラ効果の原理により式 (1) で表現される。ここに、 V は変位速度のベクトル量、 n は法線ベクトル、 λ はファイバ内を通るレーザ光の波長である。

式 (1) を周回経路で積分すると、式 (2) となり、湾曲部の伸縮速度と周波数変化が対応づけられる。ここでの k は曲率である。

$$df_D = -\frac{V \cdot n}{\lambda} d\theta \quad (\text{ただし、} V = \frac{dL}{dt}) \quad \text{式 (1)}$$

$$f_D = -\frac{1}{\lambda} \oint kV \cdot n ds \quad \text{式 (2)}$$

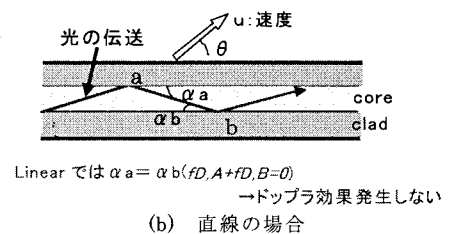
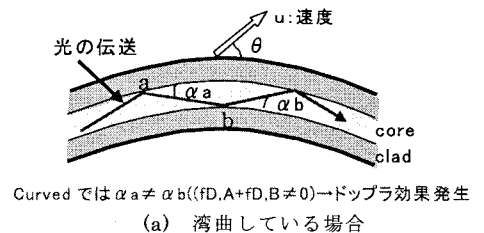


図-1 光ファイバ内のドップラ効果

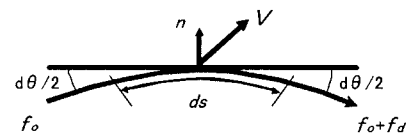


図-2 周波数変化 (湾曲したファイバ)

3. 光測定システム

周波数変化を検知するためのレーザドップラ振動計 (LDV) システムを図-3 に示す。このシステムはセンサ部と計測部から構成されており、センサ部は湾曲させた (円形) ファイバ部分、計測部が光ヘテロダイン干渉法を用いた周波数変化の検出部分である。同図より、ヘリウム-ネオンレーザ光源 (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、測定対象物の振動によってファイバが微小伸縮すると、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変化 dL/dt に比例した周波数変化 f_D が生じ、湾曲部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 $f_M + f_D$ が導びかれ、検知器 (detector) で f_D が検出される。

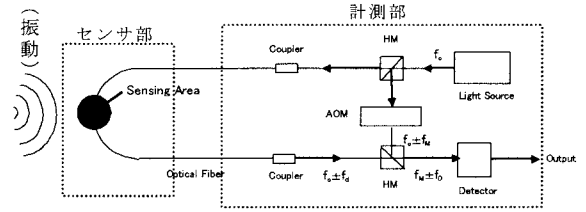


図-3 LDV システム

4. 特性試験

4.1 試験方法

(1) 感度試験

感度試験は、高さ 75mm×幅 25mm×奥行き 25mm の花崗岩の岩石片を媒体とし、パルスジェネレータから PZT 型センサを介して矩形波 (パルス波) を発振させ、FV センサと PZT 型センサの両方で受振した波形の最大振幅を比較する。発振用の PZT 型センサは、図-4 (写真 1 参照) に示すように岩石片側面の中心部に瞬間接着剤で貼付し、受振用の FV センサと PZT 型センサをその対面にそれぞれ同様に貼付する。PZT 型センサは発振・受振ともに 150 kHz の共振型を用いている。

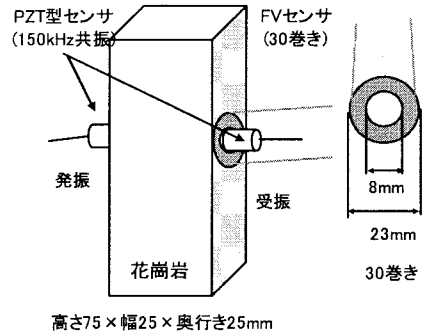


図-4 感度試験方法

発振する矩形波は、最大振幅 15V とする。また、受振する A E 波形は、両センサとも増幅はさせずに 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する。

(2) 周波数特性試験

岩石などの破壊過程を A E 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証範囲は、通常の現地計測で筆者らが実施^{1), 2), 5)}している 50kHz~200kHz の範囲とする。

検証方法としては、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、その中から最も簡便な方法である接触法を採用する。

接触法とは、2 個の同じ仕様のセンサ同士を貼り付け、発振側のセンサで周波数を変えながら同一振幅の正弦波を送り、もう一方の受振側のセンサで各周波数に対する振幅値 (感度) を求める方法である。しかしながら、FV センサは自ら発振することができないため、FV センサ同士では接触法が適用できない。そこで、100kHz~1MHz の広帯域型の PZT 型センサを発振側として用い、もう 1 個の PZT 型センサと FV センサをそれぞれ受振側のセンサとして接触法により周波数と感度の関係を調べる。

なお、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貼り付ける。ただし、FV センサによる接触法試験では、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行う。

4.2 試験結果

(1) 感度試験

図-5 に試験結果を示す。同図の (a) は発振波形、(b) は FV 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 $-0.05\text{V} \sim +0.05$ であり、ほぼ同程度の感度であることがわかる。また、波形の持続時間も同程度である。

つぎに、図-6 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-5 の受振波形の初動付近を拡大したものである。同図より、S/N 比は、FV センサが 10 程度であるのに対して、PZT 型センサは 80 程度であり、PZT 型センサの方が 8 倍程度良好である。今後、FV センサの S/N 比の改善を進めていく必要がある。

(2) 周波数特性

図-7 に試験結果を示す。同図には、両者の $50\text{kHz} \sim 200\text{kHz}$ 範囲の周波数と感度の関係を示しており、黒丸が PZT 型センサ、白抜きの丸が FV センサの結果である。同図より、PZT 型センサと FV センサの周波数特性は、ほぼ同傾向であると言える。

以上より、FV センサの $50\text{kHz} \sim 200\text{kHz}$ 範囲の周波数特性は、広帯域の PZT 型センサと同等の特性を有していると判断される。

5. 一軸圧縮試験時の A E 測定

5.1 試験方法

試験に用いた供試体は、高さ $75\text{mm} \times$ 幅 $25\text{mm} \times$ 奥行き 25mm の花崗岩である。载荷には最大荷重 100kN の油圧サーボ式疲労試験機を使用し、载荷方法は変位制御で、その速度は 0.5mm/min である。

測定システムの概要を図-8 に示す。システムは PZT 型センサの測定システムと FV センサへ照射する光測定システムに分かれている。PZT 型センサはプリアンプ、シグナルコンディショナー、A E 波形記憶装置および解析装置で構成される。FV センサは光源、周波数検知器 (干渉計) および周波数—電圧変換器 (F-V 変換器) 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 A E と同様に、シグナルコンディショナーに接続される。

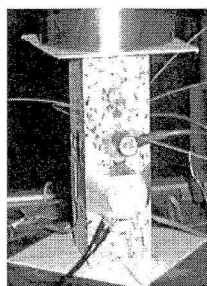


写真-1 感度試験方法

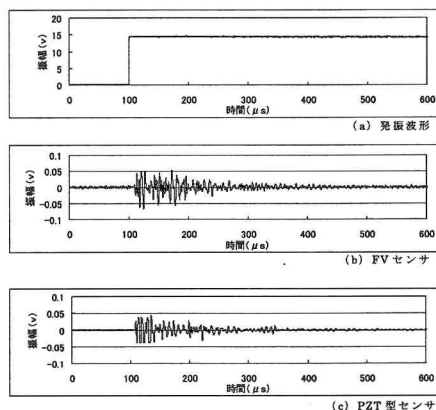


図-5 感度試験結果

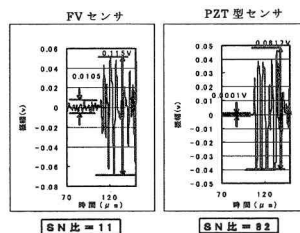
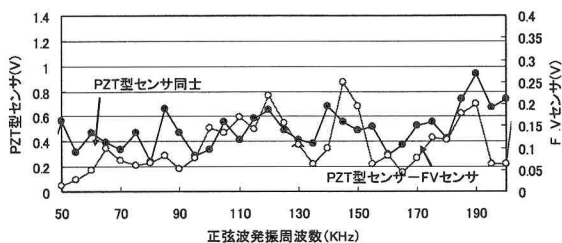


図-6 S/N 比の比較



発振センサ $100\text{kHz} \sim 1\text{MHz}$ 広帯域型

図-7 周波数特性

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-8 および写真-2 に示すように供試体側面の上、中、下に 3 個貼り付ける。FV センサは PZT 型センサの隣の側面中央部に貼り付ける。ただし、A E 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 FV センサで行っている。

各センサの設定条件として、PZT 型センサの利得は通常行われている^{1), 2)}80dB(プリアンプ 40dB + メインアンプ 40dB) とする。FV センサはノイズレベルが大きいいためメインアンプで 20dB に留める。振幅のしきい値はノイズレベルより若干高い値に設定する。それにより、しきい値を超えた波形だけが A E 波形記憶装置に自動的に送られる。また、波形と別に、A E 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 A E 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 0.2 μ 秒、収録長 2,048words、プレトリガー 512words としている。

測定終了後に解析装置を用いて、収録した A E 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位やその時間差および A E パラメーターの解析を行う。

5.2 試験結果

図-9 に試験結果を示す。(a) が FV センサで測定された結果で、花崗岩供試体の破壊に伴う A E 発生率 (個/秒) と周波数 (kHz) を示している。(b) が PZT 型センサの結果である。まず、(a) 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。A E 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 A E が測定されている。A E 波形の周波数帯域をみると、200~500kHz の範囲である。また、5 波形ずつを順次平均して求めた周波数(平均周波数)は、破壊が近づくに伴い低下する傾向が認められる。

一方、(b) の PZT 型センサをみると、A E 発生状況は FV 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

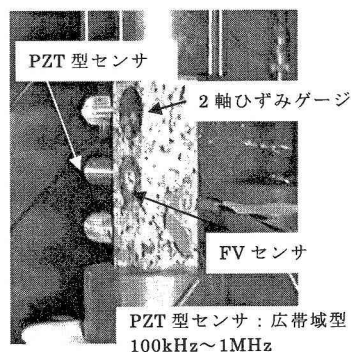


写真-2 一軸圧縮試験（花崗岩）

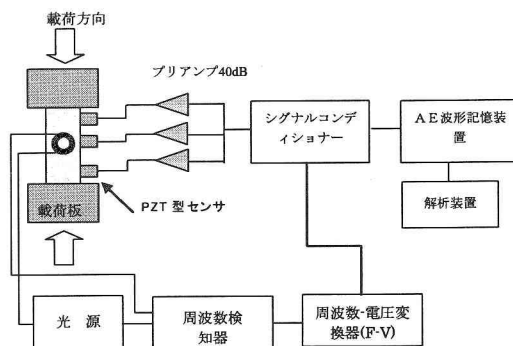
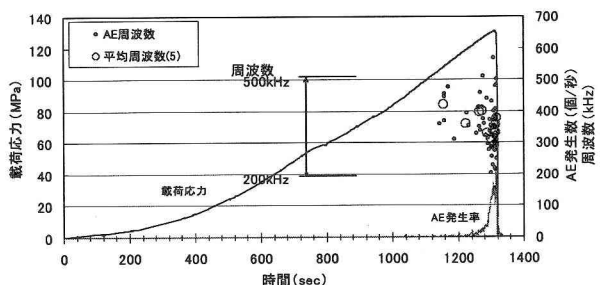
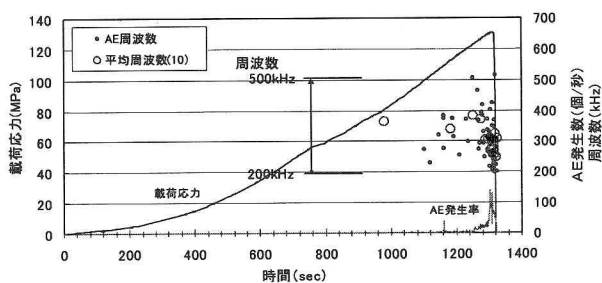


図-8 測定システム



(a) FV センサ



(b) PZT 型センサ

図-9 一軸試験結果

数帯域は FV センサと同様に 200～500kHz の範囲であり、10 波形ずつを順次平均して求めた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、両者で測定された破壊に伴う A E 特性はほぼ同様な傾向を示しており、FV センサは PZT 型センサと同程度の性能を有しているものと判断される。

6. まとめ

FV 型センサの建設分野への適用性を把握するために、従来の PZT 型センサを用いて感度・周波数特性および岩石の破壊時に発生する A E 波形の振動特性について比較した。

その結果、

- ① 感度は、PZT 型センサとほぼ同等である。ただし、S/N 比については PZT 型センサの方が 8 倍程度良好であり、今後の改善措置が必要である。
- ② 周波数特性については、50kHz～200kHz の範囲において広帯域型の PZT 型センサと同等の特性を有している。
- ③ 岩石破壊時の A E 波形を比較すると、波形振幅および波形持続時間ともに同程度である。岩石の破壊に伴う A E の発生頻度および周波数変化も同傾向であり、FV センサの有効性が確認された。

なお、FV センサは薄型軽量で構造的に 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とから、今後は広範囲の周波数特性を検討する予定である。また、さらに指向性などの検証試験を重ねて FV 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。

最後に、本実験の一部は電源開発株式会社殿の平成 15 年度委託業務の中で行ったものである。

<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; 西日本岩盤工学博士論文講演文集, 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
- 3) K.kageyama, H.murayama, I.ohsawa, M.kanai, T.motegi, Knagata, Y.machijima, F.matsumura; Development of a New Fiber-Optic Acoustic/Vibration sensor. International Workshop on Structural Health Monitoring 2003, 15-17, 2003, pp1150-1157
- 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 A E 波検出の試み; 日本機化学会 第 75 期通常総合講演論文集(II), 1998.3.31 pp94-95
- 5) 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(III 部門), 2003.9