

光ファイバーを利用した原位置 AEセンサの開発

畑 浩二^{1*}・宮崎 裕光²・田仲正弘³・布谷勝彦³・斉藤義弘³・藤井宏和³

¹株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸四丁目640）

²株式会社大林組 波方ブタンJV（〒799-2104 愛媛県今治市波方町宮崎甲147）

³株式会社レーザック（〒113-0033 東京都文京区本郷3-40-9）

光ファイバーには、長寿命、長距離伝送、高絶縁性、耐腐食性、可撓性などの優れた点が多い。近年、光のドップラー効果を応用することで、固体材料の微小破壊を検知できる可能性が示唆されている。

本研究では、これらの特性を応用し構造物の非破壊モニタリングに活用できる新しい光式AEセンサを開発した。開発したAEセンサの特徴を以下に示す。1) 従来型ピエゾ式AEセンサより広範囲な周波数帯域をカバー（ピーク周波数20~90kHz）できる。2) センサ形状を任意に変えることで周波数特性を簡単に変更することができる。3) センサへの電源供給が必要無いため、特別な対策を施すことなく長寿命かつ防爆構造ができる。4) 上記特性から、エネルギー備蓄、放射性廃棄物地層処分などのモニタリングツールとして期待できる。

Key Words : optical-fiber, acoustic emission, long-term monitorin, fiber optical doppler sensor

1. はじめに

固体の微小破壊現象を計測する方法としてアコースティック・エミッション（Acoustic Emission, 以下AEと略す）技術が注目され、さまざまな分野に利用されてきた。例えば、金属分野や複合材料分野¹⁾では、航空機、潜水艦、電車などの材料疲労破壊の評価や予測がある。建設分野では、トンネル、斜面、ダム基礎などで活用されている。畑らは、岩盤地下空洞に対し、設計で重要なパラメータとなる初期地圧測定²⁾やゆるみ域評価^{3,4)}に利用している。通常、これらの計測ではピエゾ（圧電素子）式AEセンサを利用している。この場合、センサへの入力波動を微小電流に変換し、プリアンプで増幅することから、電気式センサというカテゴリーに分類される。そのため、現場での計測環境によってはセンサ本体のみならず、接続ケーブル、プリアンプの防水性や防爆性に注意を払う必要がある。

最近、光ファイバーセンシング技術を応用した上記ピエゾ式とは全く異なるカテゴリーのAEセンサが開発された。これはFOD（光ファイバードップラー）センサと称され、センサに入力した微小振動によりセンサ自体が伸縮することでファイバーを通過する光に周波数変調が生じる現象を利用したものである。本センサは開発の途に着いたばかりで、利用範囲は室内実験レベルの域を出ていない。

そこで、本研究では、地盤や岩盤を対象にして現場で使用できる光ファイバードップラーセンサ（以下、光式AEセンサと称す）の開発を目的とした。

2. 光AEセンサの原理

光式AEセンサは、影山ら⁵⁾により発見された「導波路を伝播する光のドップラー効果」という新しい原理に基づいた振動・音響センサである。

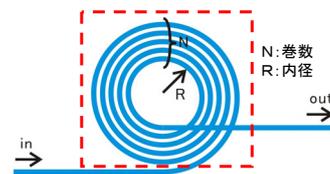


図-1 光式AEセンサ部（赤点線枠内）

光式AEセンサでは、対象物から発せられる振動エネルギーの検出を行う。計測対象物が振動すると図-1に示す固着したセンサ部（図中、赤点線枠内）もその振動に併せて伸縮する。その時、固着部の一端から周波数 f_0 の波を入力していると、経路長が伸縮すれば波長が変化することになる。すなわち、光の伝播速度は一定であるから周波数が f_0 だけ変化することになり、他端から出力される光波の周波数は $f_0 - f_d$ となる。この周波数変調量

f_d は光ファイバーの伸縮，すなわち被計測物の変位の変位（ひずみ）速度に比例することから， f_d を検知することができれば，被対象物の振動を捉えることができることになる。

光ファイバーが伸縮する際に，ファイバー内のドップラー効果により生じる周波数変調は(1)式で示される。

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

ここで， 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 は光ファイバーの変位速度である．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．(1)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 は光ヘテロダイン干渉法を用いて検出され，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，光ヘテロダイン干渉法とは，周波数がわずかに異なる2つの波を重ね合わせ，その周波数の差に等しい「うなり」「ビート」から必要な情報を取り出す技術である．

変換された電圧 V と変位速度 dL/dt の関係を， K （ $=kA$ ）を比例定数として示すと(2)式のようになる．したがって，光式AEセンサは検知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．

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

周波数変調 f_d を検知するためのレーザードップラー振動計システムを図-2に示す．このシステムは，センサ回路と計測回路から構成されており，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ことになる．

図中，光源から入射された周波数 f_0 のレーザー光は，分岐部でセンサ回路と計測回路に分岐される．センサ回路では，計測対象物の振動によってファイバー部が微小伸縮すると，それに伴いファイバーの光路長が時間的に変動する．その結果，レーザー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_d が生じ，センサから出力されるレーザー光は $f_0 - f_d$ となる．一方，計測回路では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．そのため，センサ回路からのレーザー光と計測回路からのレーザー光の周波数の差 $f_M + f_d$ が導かれ，検知器により周波数変調 f_d が検出され，周波数/電圧変換器で電圧値に変換されることになる．

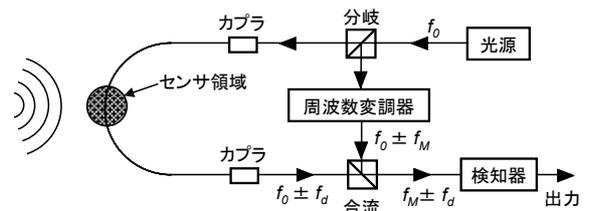


図-2 レーザードップラー振動計システム

3. センサ形状の検討

上述した原理に基づき，当初開発された光式AEセンサは，図-3に示すように2mの光ファイバーを円形状に50回巻き付けエポキシ樹脂で固めた形状である．外径21mm，内径5mm，厚さ1mmの膜状構造をしているため，可撓性に優れ湾曲した対象面への設置も容易である．その後，藤井ら⁹⁾は，感度向上を目指し円筒積層型に改良し室内岩石試験に適用した．しかし，これらのセンサでは150kHz程度の高周波数帯域対応のため，これをそのまま原位置に利用することは監視領域が広くとれず不都合である．そこで，著者らは，地下空洞を対象にAE計測してきた実績を勘案し，測定対象周波数を20～90kHz（ピーク周波数を30kHz）程度となるようなセンサ形状を検討することとした．

(2)式に示すように，光式AEセンサはセンサ部の長さ dL が長くなればなるほど出力電圧 V が高くなる特性がある．出力電圧が高くなるということは，感度が高くなることを表している．そこで，上述した円筒積層型を基に，センサ形状の最適化を検討した．検討に際してはFEMによる周波数応答解析を利用し，基本形状を選定することとした．解析および評価の手順を以下に示す．

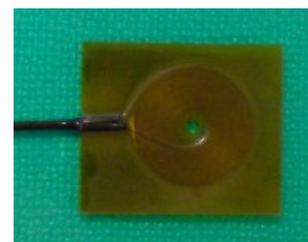


図-3 初期型光AEセンサ

(1) FEMモデルの作成

光式AEセンサを光ファイバーとエポキシ樹脂からなる積層部材として扱う．本センサは何らかの金属管体内に内蔵し原位置で使用することを勘案し，受波面を金属管体に固定することでモデル化する．図-4にモデル化

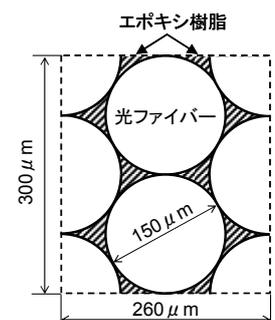


図-4 モデル化の構造

ル化の構造を示す。石英の弾性係数約 70GPa, エポキシ樹脂の弾性係数約 3GPa, ファイバーの体積比率, ファイバー構造 (コア, クラッド, 被覆) 等を勘案し, 解析入力物性を決定した。

(2) 固有値解析

センサ形状による固有振動を確認するため, 固有値解析を行う。本開発では, 30kHz 周辺の周波数特性に着目しているため, 具体的には 0~100kHz の範囲において固有値を算定する。ただし, 振動方向は考慮していないため, 実際の入力波動に対して共振点となるか否かは後述の感度試験で検証することになる。

(3) 周波数応答解析

上述の固有値解析で得られた各固有値において, 単位励起振動 (正弦波) に対するモデルの挙動を算定する。光式 AE センサの実使用を勘案し, 完全拘束 (接着を模擬) した受波面を加振点とする。モデルの挙動はひずみ速度で評価する。なお, 周波数応答解析では, センサ形状による振動特性を評価することは可能であるが, 全検討モデルで統一的に出力感度を評価することはできないため後述する感度試験で確認することになる。

上述した手順に基づき, 図-5 に示す円筒形, 円錐形および楕円形で最適形状の検討を行った。なお, 受波面は上面, 下面を基本とするが, 円筒形および楕円形はそれらに直交する断面 (図中矢印) も検討対象とした。

各種形状における周波数応答解析結果の一例を図-6 に示す。円筒形および円錐台形を黒線で, 楕円形横置きを青線で, 円筒形および楕円形縦置きを赤線で示す。それぞれの形状の内, 円筒形と円錐台形はいずれも比較的高い周波数領域でピークが来るため, 原位置での使用には適さないと考えられる。楕円形を横置きにした場合, 10kHz 近傍でピークが得られることから低周波数領域への展開には希望が持てる。一方, 円筒形および楕円形の縦置きでは, 同様に 10kHz でピークが来ると同時に, それより高い周波数領域の複数箇所でもピークが来る特異な周波数応答特性を得た。この複数あるピークに関しては, 変形モードを解析した結果から, 不必要な変形モードを低減するような拘束具を取り付ける工夫を施すことでピーク周波数の制御が可能であることが明らかになった。原位置 AE 計測の測定対象周波数を 20~90kHz (ピーク周波数を 30kHz) となることを開発のコンセプトにしていることから, ピークが複数存在する周波数特性はむしろ有効であると考えられ, この円筒形および楕円形の縦置きタイプが最も有力であると判断した。

以上, 解析による最適形状の検討を行い, 図-7 に示す原位置専用の光式 AE センサ (楕円形の縦置きタイプ) を試作した。センサ下部 (受波面) にはピーク周波数を制御するエポキシ樹脂製の拘束具を取り付けている。

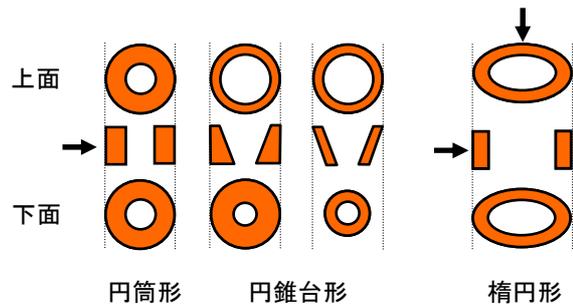


図-5 最適形状検討モデル

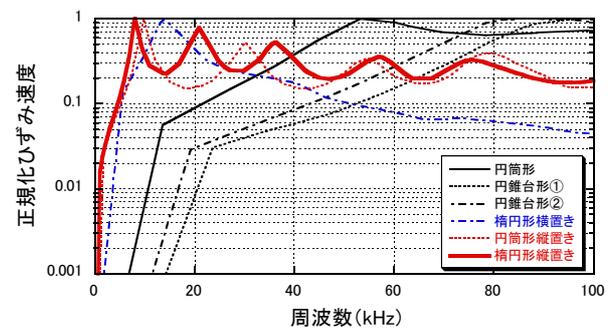


図-6 周波数応答解析結果の一例

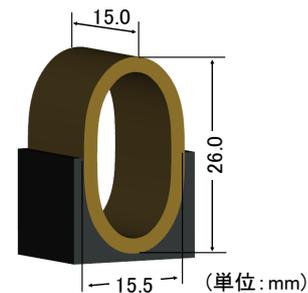


図-7 原位置計測用光式 AE センサ

4. 性能確認試験

試作した光式 AE センサの仕様は, ファイバー長さ 65m, 長径 26.0mm, 短径 15.5mm, 厚さ 15.0mm である。上述した数値解析では, 低周波数帯域でピーク周波数を有する形状になったが, その適否を検討するため下記に示す感度試験とコンクリート供試体を利用した室内試験による検証を行った。

(1) 感度試験

試作センサの実質周波数特性を face to face 試験法 (接触法) で確かめた。計測装置のブロックダイアグラムを図-8 に示す。図に示すように, 発振センサと受振センサを直接接触させ, 入力に対する試作光式 AE センサの出力感度を調べるものである。発振センサは, 原位置 AE 計測で実績のある 30kHz 共振型 piezoelectric AE センサを用い, 振幅一定正弦波の周波数をファンクションジェネレータで種々変え発振した。また, 比較のため, 30kHz 共振型 piezoelectric AE センサも感度試験に供した。

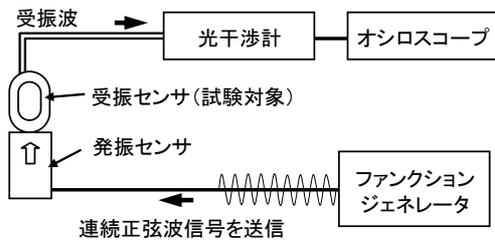


図-8 face to face 試験法のブロックダイアグラム

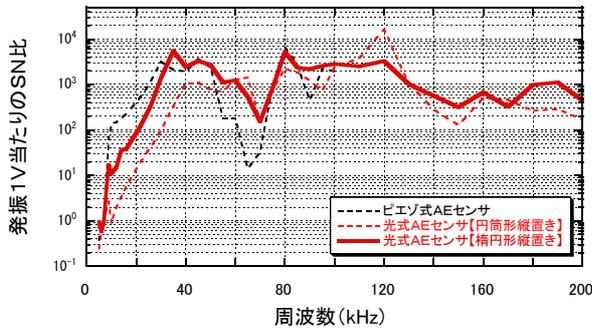


図-9 face to face 試験法による感度試験結果

測定結果を図-9 に示す。図中、赤線で円筒形および楕円形の光式 AE センサを、黒点線で利用実績のある 30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサの感度特性結果をそれぞれ示す。その結果、楕円形の方が円筒形より 50kHz 以下の感度特性に優れること、30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサと比較しても楕円形光 AE センサは感度特性に遜色無く、50~80kHz の周波数帯域においてはむしろ感度が高い特性が明らかになった。

以上の結果から、楕円形光式 AE センサは従来のピエゾ式 AE センサと比べ同等以上の性能を発揮するものと評価でき、優れた計測ツールが開発できたと考えられる。

(2) コンクリート供試体による性能試験

上述の face to face 試験では、人工的に作った信号波による感度試験であり、実材料による低周波成分波の検知ではない。厳密に言えば、実材料から発生する AE 信号の内、低周波成分が検知されていることを検証しておくことが重要である。そこで、コンクリート材料を利用し、低周波成分検知の性能試験を実施した。

コンクリート角柱供試体 (10×10×53cm) を用いて、破壊に至る単調的な一軸圧縮荷重および繰返し荷重条件下で AE を計測する。試作した光式 AE センサを供試体側面に 4 か所設置した。その内、3 か所については 30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサを併設し、両者の感度特性を比較することで性能評価することとした。図-10 にセンサレイアウトを、図-11 に試験装置のブロックダイアグラムを示す。

破壊に至る単調的な一軸圧縮荷重条件下での試験結果を図-12 に示す。図は、同じ箇所に設置した光式 AE セン

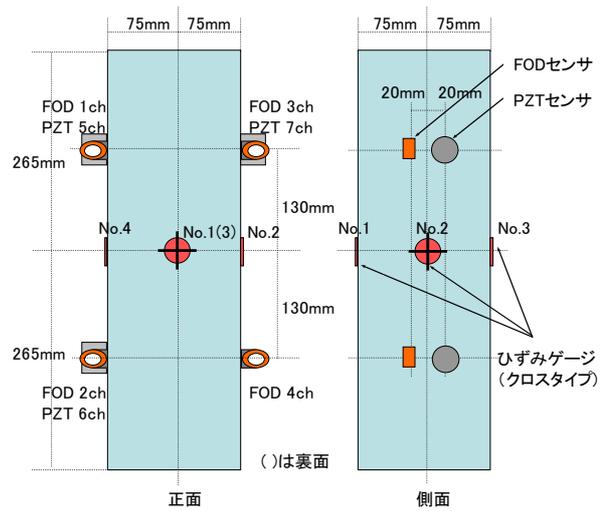


図-10 センサレイアウト

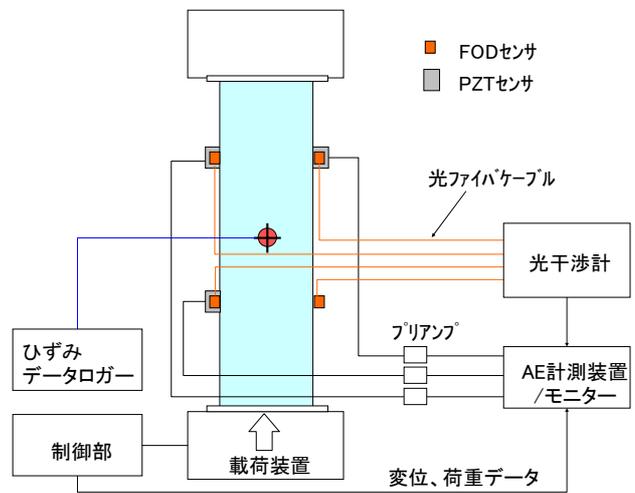
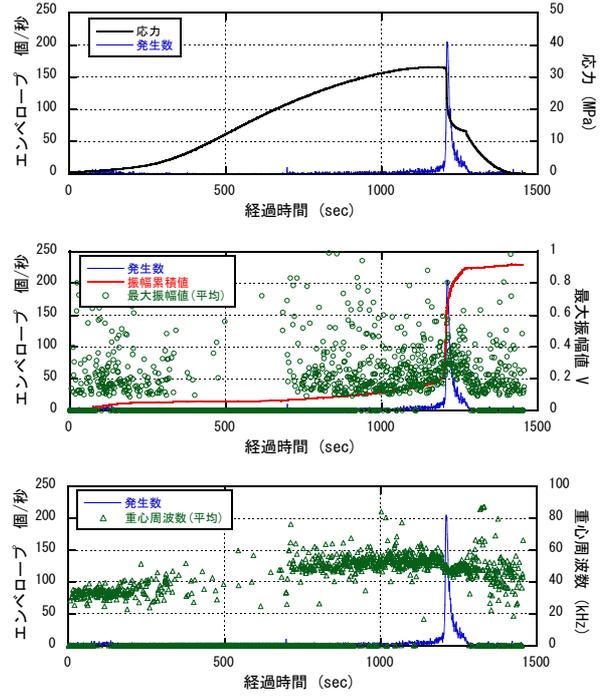
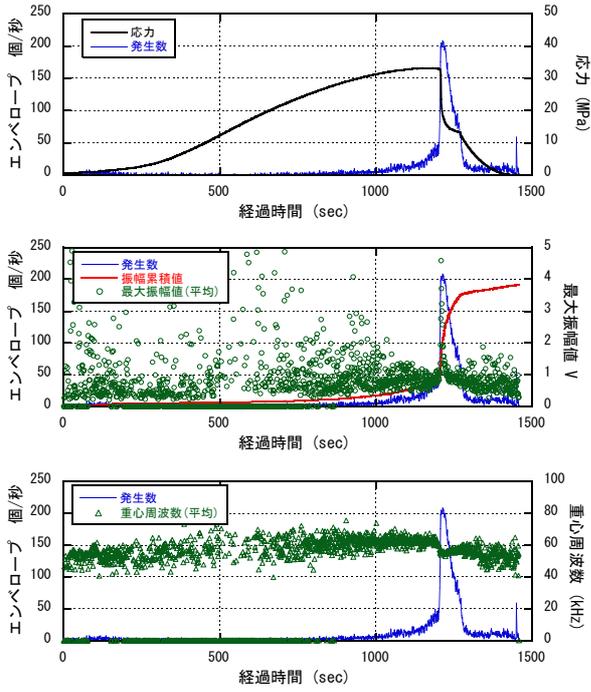


図-11 試験装置のブロックダイアグラム

サ (図中は FOD と表記) 1ch と 30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサ (図中は PZT と表記) 5ch の計測結果である。図は上段から、FOD (左図) と PZT (右図) における応力-荷重時間-AE 発生数の関係、最大振幅値-荷重時間-AE 発生数の関係、重心周波数-荷重時間-AE 発生数の関係をそれぞれ示す。

応力-荷重時間-AE 発生数の関係 (上段) において、荷重から数分間は数個~10 個/秒程度の AE が発生し、この状態が 30MPa 程度まで続く。30MPa を境に、発生する AE は急激に増加し、約 34MPa の破壊時には約 200 個/秒の AE を観測した。対応する PZT 5ch については、同様に 30MPa を境に観測される AE が急増した。FOD と PZT で感度が異なるため、AE 発生数を直接比較することに意味は無いが、概ね AE 発生数や発生傾向は同等になった。

次に振幅値 (中段) について評価する。振幅値は感度の影響を強く受けるため、AE 発生数同様絶対値の比較はできないため振幅値の変化の傾向で確認する。FOD



FOD：光式AEセンサ

PZT：30kHz共振型ピエゾ式AEセンサ

図-12 単調一軸圧縮载荷条件下でのAE試験結果

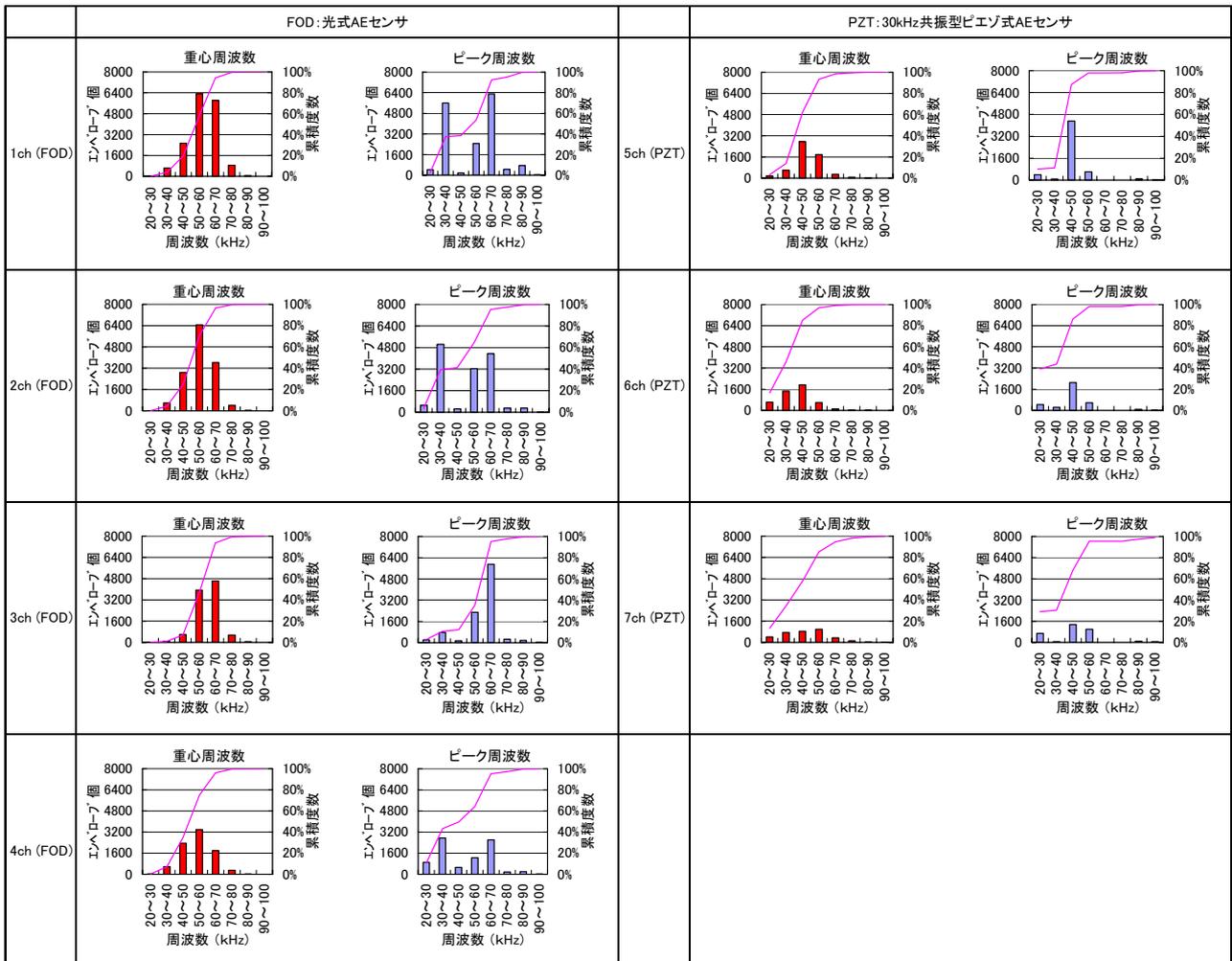


図-13 単調一軸圧縮载荷条件下での周波数解析結果

および PZT のいずれも破壊前の AE の増加に伴い振幅値と振幅累積値は同様な上昇傾向を示していることが明らかになった。

最後に周波数（下段）について評価する。振幅値と同様に FOD, PZT のいずれも AE の発生数の変化に応じた周波数の変化を示しており、破壊直前にやや周波数が上がり、破壊時に低下する特徴が見られる。周波数帯域にはやや違いが見られ、FOD は 40～70kHz, PZT は 30～60kHz の範囲であり FOD の方がやや高い周波数帯となっているものの、大局的には低周波数帯域での AE 信号波受振に成功していることがわかった。

周波数に関して、さらに詳細な検討を行った。図-12 に示した周波数は重心周波数であり、センサの周波数特性にあまり依存しない形で周波数特性を評価できる利点がある反面、個々の受振波の周波数特性はわかりにくくなる。そこで、全センサで重心周波数とピーク周波数の比較を示したものが、図-13 である。ここで、ピーク周波数は受振波の直接的な周波数解析結果であり、センサ周波数特性を明瞭に表している。得られた結果から、ピーク周波数に関して FOD は 20～90kHz の広い範囲に分布しているが、PZT は 20～60kHz と狭い範囲に限られており、60kHz 以上の周波数帯の感度が低い結果となっている。したがって、相対的に光式 AE センサの方が 30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサより高感度に仕上がっていると評価できる。また、開発のコンセプトである測定対象周波数を 20～90kHz（ピーク周波数を 30kHz）を十分満足する特性を得たものと考えられる。

5. まとめ

周波数応答解析によるセンサ形状の最適化検討を基に、光式 AE センサを試作した。次いで、face to face 感度試験とコンクリート供試体による性能試験を通して 20～

90kHz を測定対象にすることが可能であることを明らかにした。さらに、原位置で使用実績のある 30kHz 共振型ピエゾ式 AE センサより高い周波数帯域にも優れた感度特性を有していることが明らかになり、原位置で実用に供することが可能な光式 AE センサが開発できたものと判断した。

光式 AE センサには、長距離伝送、電源供給不要、電磁ノイズ影響小、高絶縁性、耐腐食性、長寿命、軽量などの優れた点が多い。特に、電源供給を必要としないことから湿度の高い環境条件下で長寿命計測が可能になることや、揮発性の爆発ガスが内在したり不測に噴出したる環境条件下でも特別な処置を施すことなく計測が可能になる利点は大きい。今後、原位置での適用を通じて超長期モニタリング方法の確立を目指す。

参考文献

- 1) 最新 AE 技法, 応用技術出版, pp.222～223, 1980.
- 2) 畑 浩二, 道廣一利, 吉岡尚也, 杉原弘造: AE 法を利用した初期地圧測定とその適用例, 材料, 特集岩石力学, 第 44 巻, 第 502 号, pp.885～890, 1995.
- 3) 畑 浩二, 松井裕哉, 木山英郎, 木梨秀雄: AE 法を利用した地下空洞掘削影響領域評価に関する研究, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.251～262, 2002.
- 4) 畑 浩二, 宮崎裕光, 小笠原光雅, 前島俊雄, 青木謙治: AE 法を用いた波方 LPG 岩盤貯槽掘削におけるゆるみ域評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.139～144, 2010.
- 5) 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, 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演論文集 (II), No.98-1, pp.94～95, 1998.
- 6) 藤井宏和, 森 孝之, 斉藤義弘, 田中正弘, 町島祐一: 光ファイバ式 AE センサ (FOD) による硬岩と軟岩の破壊時の AE 特性, 第 17 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス, pp.99～102, 2009.

DEVELOPMENT OF IN-SITU AE SENSOR TO APPLY OPTICAL FIBER

Koji HATA, Hiromitsu MIYAZAKI, Masahiro TANAKA, Katsuhiko NUNOTANI,
Yoshihiro SAITO and Hirokazu FUJII

In the optical fiber, there are a lot of advantages with long life, long-distance transmission, high nonconductivity, resistance to corrosion and flexibility, etc. Recently, it was clarified to be able to measure AE by using the Doppler effect of light.

In this research, a new AE optical sensor that was able to monitor the rock mass failure around underground structure was developed. The feature of the developed new AE sensor is shown below.

- 1) It is possible to cover the low frequency band (20-90kHz).
- 2) The frequency response can be easily changed by arbitrarily changing the sensor shape.
- 3) Long life and the explosion-proof construction are possible without doing a special device.
- 4) It is possible to expect it as a monitor tools of the energy storage and radioactive waste, etc.