

岩石の静的破碎実験におけるAE波形特性

Characteristics of AE signals in a test of rock material

開発土木研究所 構造研究室 正員 池田憲二 中井健司
 地質研究室 正員 日下部祐基
 (株)フジタ 技術センター ○正員 秩父顕美 吉野広司

1. はじめに

全国各地に点在する大規模な岩盤斜面はひとたび崩壊すると重大な災害を引き起こすため、その安全点検、変状の計測、災害除去対策が大きな問題となっている。なかでも変状の計測については、構造物の崩壊に至るまでの変形が小さく予期せぬときに突然崩壊することも少なくないことから早急な対応が要求され、光ファイバーを利用した方法などの研究開発が各方面で進められている^{1)、2)}。

岩盤内で発生した弾性波動を計測するAE法も計測手法の一つとして有望視され、実際の構造物を対象にAE計測を実施しその適用性が検討されている。特に、AEは変状の早期に現れる微小なキレツや変形に伴って発生するため、他の計測方法よりも早期検知において優位であるとして注目されている。しかし、この方法では、原位置計測における雨滴や電氣的要因などによる外部ノイズの除去方法、計測されたAEによる構造物内部での物理現象の推定方法など未解決の課題も多く残されているため、変状に伴ってAEの発生が認められることからその有用性については言及されているが、信頼性のある計測方法と結論づけるには至っていないのが現状である。

AE法が計測方法として実用化されるためにはAEの発生要因を特定することが不可欠であるが、果たしてこのような情報がAE信号の中に含まれているかどうかは重要な問題である。この点を解明するために、筆者の一人はAE信号を可聴音帯域の音響に変換し、人間の聴覚を利用してAE信号から構造物内における物理現象の推定を試みてきた。その結果、可聴音帯域の音として変換されたAE信号には構造物の変状に関する様々な情報が含まれており、また変状とは無関係なノイズは明瞭に区別できることが判明した。この方法では結果の判断が定性的になること、長期観測におけるリアルタイムな判定が難しいなどの問題点があるが、人間の聴覚による情報の判断と同様な信号処理方法が確立されれば、AE法の実用化は十分可能であると考えられる。これには、従来からのAEパラメータを中心とした計測ではなく、AE信号の波形情報をも有効に活用できるような計測装置とそれに付随したデータの評価方法を用い

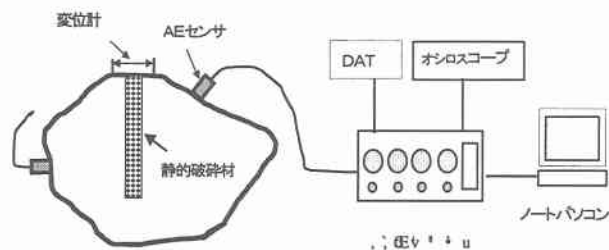
る必要がある。

筆者らは、計測されたAE信号に含まれる波形情報を用いて岩盤斜面の挙動計測方法を確立することを目的とし、約2年前から道内の岩盤斜面においてAE計測を実施している。この計測では、原位置計測において回避することのできない作業や雨滴などによる外部ノイズも含めたAE信号を収集し、統計的な手法を用いてAE発生要因を定量的に推定するための波形処理方法を検討する予定である。本報告では、実際の斜面で計測されたAE信号を評価するに際して基礎的なデータを得ることを目的とし、計測中の岩盤斜面付近で採取した岩石を用いた静的破碎実験を行い、AE信号の波形情報を定量的に取り扱うために多変量解析手法の一つである主成分分析を用いて検討した結果を報告する。

2. 実験方法

実験に用いた供試体は現在AE計測中の岩盤斜面付近において採取した、径1m程度の大きさの岩石材料である。表-1に岩石材料の強度特性とその観察結果を示す。実験は図-1に示すように中央付近に設置した径40mm程度の削孔穴を中心にして変位計を3個、AEセンサを変位計の近くと側面の2ヶ所に接着剤で取りつけ、静的破碎材を注入して行った。なお、No.2とNo.3の供試体では最初の注入では破壊するまでに至らなかったため、破碎材を除去清掃後再度注入して岩石を破碎した。

実験に用いたAE計測装置は現地で用いているのと同じ形式のもので、AEパラメータの計測と同時にスピーカから音響変換したAE信号の出力が可能である。実験中はオシロスコープで波形を観察すると同時に、キレツ音を耳で聞いてその特徴を記録した。計測された信号は計測装置を介してテープレコーダに記録し、波形解析データとして用いた。なお、以下の検討では、変位計、AEともに最も顕著な変化を示したデータを用いた。



AEセンサ: 3~8000Hz 平坦、25kHz共振

図-1 実験方法

表-1 実験に用いた岩石材料

供試体 No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
弾性波速度(km/s)	4.1	3.5	3.6	3.8	試験体 成形不可
圧縮強度(kN)	45.3	58.2	30.4	27.95	
備考	供試体大 キレツ面 で破壊	供試体大 キレツ少 再注入	供試体中 キレツ少 再注入	供試体小 キレツ少	供試体小 キレツ多

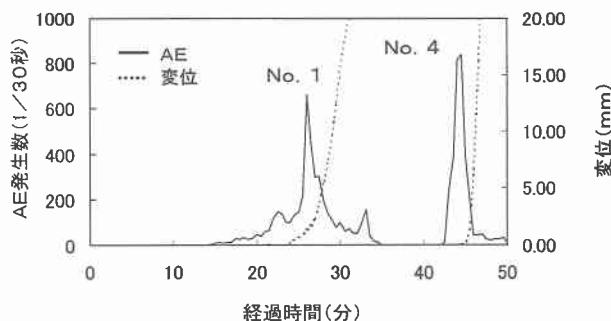


図-2 岩石の変形とAE発生数の関係

3. 岩石の変形とAE発生特性

図-2は破碎実験における岩石の変形とAE発生数の変化を示したものである。ここでは、代表例としてNo. 1とNo. 4の供試体での結果を示している。図より、供試体の強度やキレツの状態などによって変位の発生状況に差があるが、いずれの場合も顕著な変形が計測し始める以前から、AEの発生が検知されている。また、No. 4の供試体では、AEの発生がピークを経過した直後から、岩石の変形が急激に増加し始めていることがわかる。

このような結果は、従来から言われているように岩石内の微小なキレツや変形に伴ってAEが発生しているためであり、本実験で用いたような小規模な供試体においてもAEによる変位の早期検知は可能であると言える。

4. 主成分分析によるAE信号の分類

AE信号の波形特性が岩石材料の破壊の過程やその強度特性などの影響を受けてどのように変化するかを定量的に把握するために、多変量解析手法の一つである主成分分析を用いて検討した。

4.1 AE波形特性と特徴変数

図-3はNo. 2 供試体において、実験の初期段階（変位無し）、中期（変位 0.01mm～0.1mm/30秒）、破壊時（変位 0.1mm/30秒以上）にそれぞれ計測されたAE信号とそのパワースペクトルの例を示したものである。40kHzでサンプリングされた約200msec.長の信号についてみると、初期段階ではこの間に単発のAEが発生しているのに対して、中期ではその発生数が増加している。しかし、個々のAE信号についてみると振幅値を除いてAE信号の形状には顕著な差が見られない。一方、破壊時に計測された信号では約200msec.長の間に、大小様々な振幅や形状を持つ多数のAE信号が重なり合った形で計測されている。これは形態の異なるキレツが短時間のうちに多数発生するためである。

次に周波数特性についてみると、初期段階に計測された信号は狭帯域の周波数成分を持っているのに対して、中期から破壊時に進むにつれてその周波数成分は広帯域に分布していることがわかる。発生するキレツの形態が一樣でないために、個々のAE信号もそれに対応して異なる周波数成分を有しているものと考えられる。

一般に、AE波形解析では個々のAE信号について周波数解析を行っている。しかし、破壊時のように多くのAE信号が重

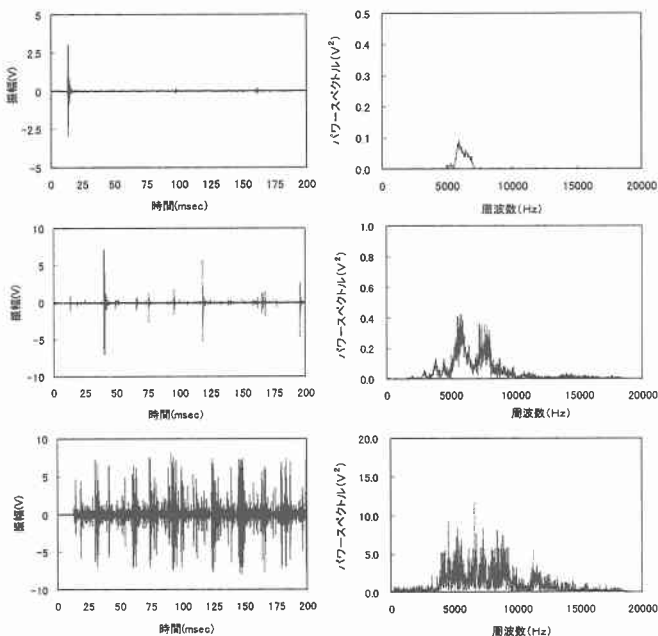


図-3 代表的なAE信号とそのパワースペクトル
(No. 2供試体、上段より、初期、中期、破壊時)

表-2 分析に用いたデータ数

破壊過程	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
初期	10	64	3	0	0
中期	40	10	21	37	29
破壊時	21	43	31	6	11

なり合っている場合、個々のAE信号に分離するとかえってその特徴を失う可能性があるため、本研究では図に示すような約200msec.長の信号を一つの波形データとして取り扱った。特徴変数は16kHzまでの周波数を有効成分とし、この区間を40等分して各区間の累積パワーを正規化して求めた。

4.2 分析に用いた波形データ

周波数解析は各実験ケース毎に録音された信号を、上記の変位量を基準として初期、中間、破壊時の3段階に分け、それぞれのグループから代表的な信号を選び、専用の周波数解析装置を用いて演算した。この装置では、40kHzでサンプリングした8192点のデータに対して、FFT法による周波数解析が可能である。表-2に各実験ケースにおいて採取した波形データ数を示す。

4.3 主成分分析

主成分分析法は互いに関係を持つ多数の変量を、関係のない少数の変量（主成分）に要約する多変量解析手法である。解析方法についての詳細は多くの文献³⁾に紹介されているので、ここではその概要を説明する。

今、各信号の正規化パワースペクトルから求めた特徴変数を s_i とすると、その第 i 主成分 Z_i は次式に示す線形和で求めることができる。

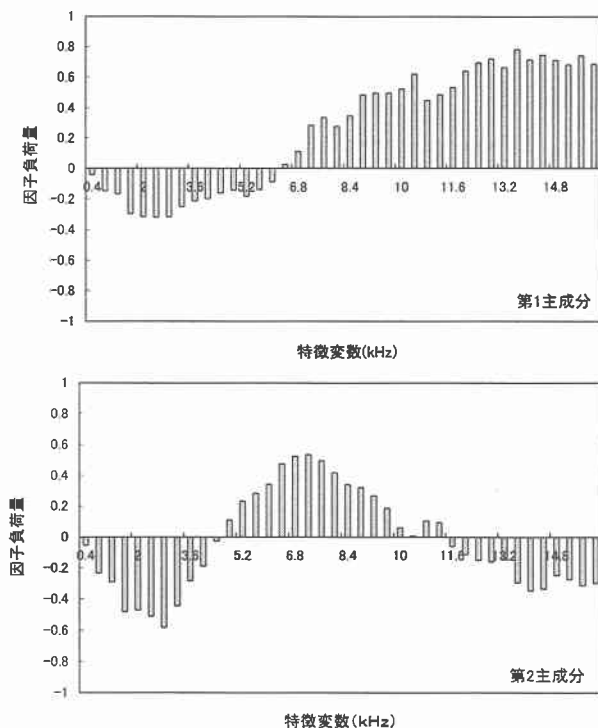


図-4 第1主成分と第2主成分の因子負荷量

$$Z_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \cdots + a_{ip}s_p \quad (1)$$

$$i=1,2,\cdots,p$$

ここで、 $(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{pj})$ は m 個の特徴変数の組 s_j ($j=1, 2, \cdots, m; i=1, 2, \cdots, p$) から算定した相関行列を用い、固有値解析によって求めた固有ベクトルである。各主成分への情報集約の程度を表す寄与率は固有値 $(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_p)$ を用いて次のように表すことができる。

$$v_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_p} \quad (2)$$

また、各変量が主成分の値にどの程度寄与しているかは、 $\sqrt{\lambda_i} \times a_{ip}$ で求められる負荷量を用いて論ずることができる。

5. 分析結果とその考察

5.1 因子負荷量と寄与率

図-4は第1主成分と第2主成分それぞれに対する、各変量の因子負荷量を示したものである。図より、第1主成分では6.4 kHz付近を境に符号が反転し、この周波数より高い成分を持つ信号ほど第1主成分の値が大きくなることが分かる。これより、第1主成分は検出されたAE信号が高周波成分を多く含む信号か、あるいは低周波成分が多い信号かを判別する特性値であると言える。図-3に示した例では、岩石の破壊に近づくほど高周波成分が多くなる傾向があり、第1主成分の値は大きくなると推定できる。

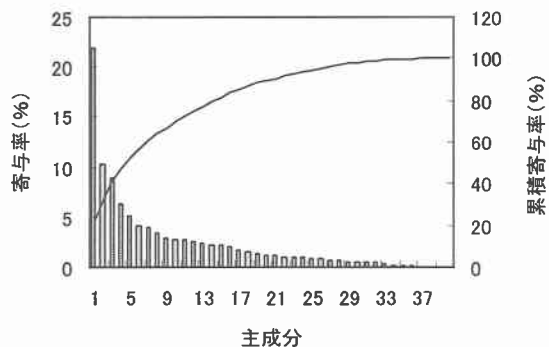


図-5 各主成分の寄与率と累積寄与率

次に第2主成分についてみると、第1主成分とは符号の反転する位置が異なり、第1主成分の境界付近の周波数をピークとし、その前後(4.8 kHzと11.2 kHz付近)で符号が反転している。第1主成分では広帯域に周波数成分を有すると相殺されて値が小さくなる場合があるが、境界付近にのみ成分を持つ信号の場合にも値が小さくなりその区別が困難になる。第2主成分ではこのような情報の損失を補填するために、第1主成分の境界付近の周波数成分が多くなると値が大きくなり、その他の周波数成分が多いと値が小さくなるように、固有ベクトルの値が決定されている。

(2)式で求められる寄与率について見てみると、図-5に示すように第1主成分と第2主成分の累積寄与率は32%程度にとどまり、80%以上の累積寄与率を得るためには第15主成分まで利用する必要がある。

5.2 主成分空間におけるAE信号の分類

図-6は波形データごとに(1)式で演算した主成分のうち、情報の集約の大きい第1主成分と第2主成分を2次元平面にプロットしたものである。No.1~No.3供試体については破壊の初期、中期、破壊時の3段階、No.4とNo.5供試体では中期と破壊時にそれぞれ分けて表示している。図より、岩石のキレツに伴うAE信号は主成分平面において主に第1象限、第3象限、第4象限に分布し、その分布特性は供試体ごとに異なることが分かる。図-4に示した因子負荷量から、各象限にプロットされる信号の周波数特性をまとめると表-3のようになる。これより各供試体における破壊現象を推定すると次のようになる。

No.1供試体では破壊の初期に4.8 kHz以下の低周波数成分の卓越したAEが発生するが、中期、破壊時と進むにつれて徐々に高周波成分を持つ信号が多く発生する傾向にある。初期段階では既存のキレツ周辺にある脆弱部で微小な変形が生じ、破壊が進行するに伴ってキレツの無い健全な部分で新たなキレツが発生するようになるが、岩石の内部に大きなキレツ面が存在していたため、新たなキレツが卓越して発生する前に破壊が完了したと推定できる。

No.2供試体の場合も同様に破壊の進行に伴って高周波のAEが多くなる傾向を示しているが、No.1とは異なり初期段階において第3象限にプロットされるような低周波AEの発生は少なく、やや高周波のAEが大部分である。また破壊時には

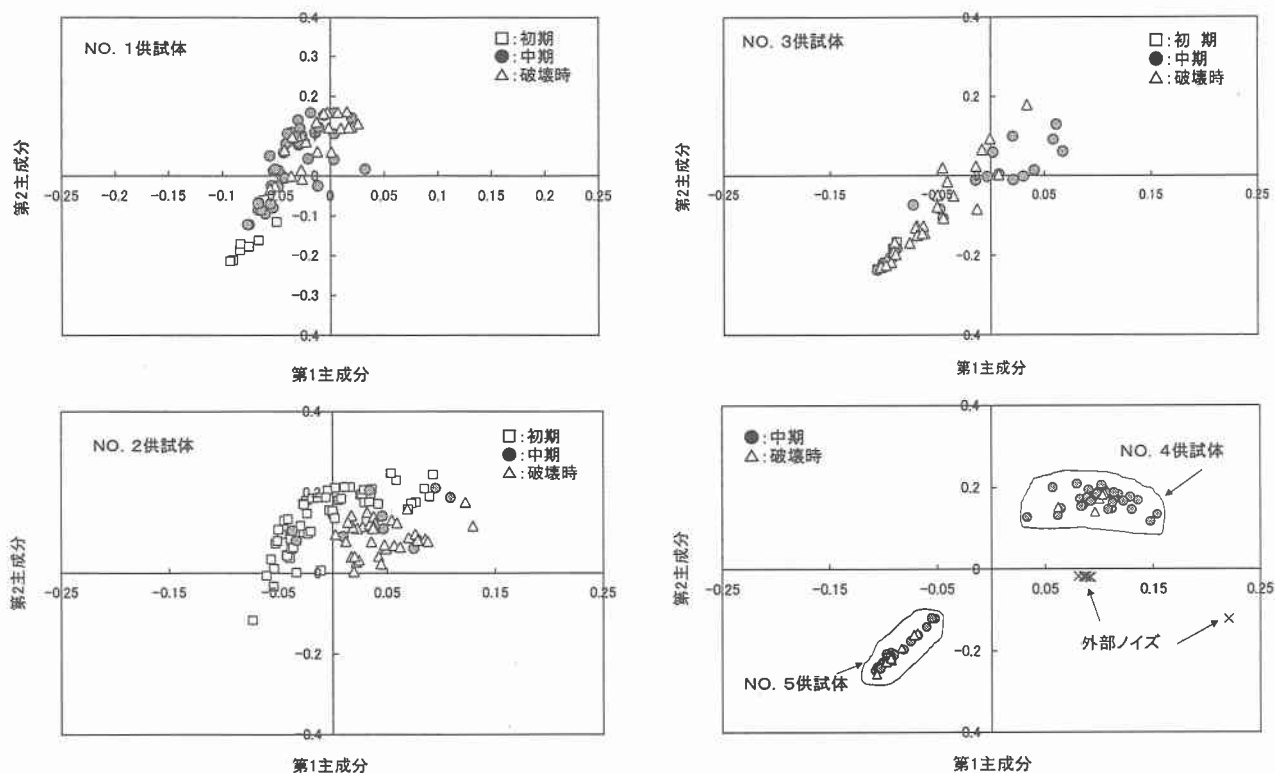


図-6 主成分平面におけるAE信号の分類

6.4 kHz～11.2 kHzの高周波成分の卓越するAEが多数発生している。この供試体は実験に用いた岩石の中で圧縮強度が最も高く既存のキレツも少ないことから、初期段階から健全な部分において新たなキレツが発生し、破壊に近づくにつれて強度の高い部分で規模の大きいキレツが卓越して生じたものと考えられる。

No. 3～No. 5の供試体で計測されたAE信号は上記2つの供試体とは異なり、必ずしも破壊の進行に伴っての周波数が高くなるという傾向は見られない。No. 3供試体では中期と破壊時ともに低周波と高周波のAEが混在して発生している。この供試体では内部に微小なキレツが存在するが、破壊面に成長するほどの規模ではないため破壊の最終段階まで脆弱部と堅全部の両方でキレツが発生したと考えられる。一方、No. 4の供試体では6.4 kHz～11.2 kHzの高周波成分が卓越するAEのみが発生している。図-2に示したAE発生数からわかるようにこの供試体ではAEの発生開始から短時間のうちに破壊が終了している。比較的強度は高いが供試体の規模は小さい岩石に対して、相対的に大きな破砕エネルギーを加えたため、瞬時に大きなキレツが生じて破壊したものと考えられる。No. 5の場合はNo. 4とは逆に4.8 kHz以下の低周波AEのみが計測されている。この供試体はテストピースが採取できない程度に既存のキレツが多いため、脆弱部でのキレツのみが短時間のうちに発生して破壊したものと同定できる。

参考に、原位置で計測した岩盤のハツリ作業や地電流などによる岩盤の変状とは無関係なノイズ信号に対して(1)式より主成分値を算定し、同じ座標上にプロットすると図(No. 4とNo. 5)のようになる。これらのノイズは岩石のキレツによるAEとは異なり第2象限に多くプロットされ、計測信号からノイズ除去できる可能性があることを示唆している。

表-3 各象限にプロットされた信号の周波数特性

象限	卓越周波数
第1	6.4 kHz～11.2 kHz
第2	11.2 kHz以上
第3	4.8 kHz以下
第4	4.8 kHz～6.4 kHz

6. まとめ

以上の検討の結果、AE信号のパワースペクトルを特徴変数とし、主成分分析により算定される主成分値を用いて岩石の破壊状況ある程度推定できることが判明した。また、主成分値を用いて原位置で計測されるノイズ信号を区別できる可能性があることも判明した。このような結果から、今回用いた方法によってAE信号の波形特性を定量的に取り扱ことが可能であると推察される。今後、原位置でのAE信号を用いて波形特性のデータベース化が進めば、ノイズの除去やAEの発生要因の推定も可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 共放鳴、日向洋一、藤井信二他：光ファイバによる土木構造物の診断—FGBによる歪み計測に関する研究—、第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.163-170、1999。
- 2) 倉嶋利雄、佐藤昌志：光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測、土木学会誌、pp.18～20、1997.5。
- 3) 奥野忠一：工業における多変量データの解析、日科技連出版社、pp.292～315、1986。など