AE による岩盤破壊予知のための基礎的考察†

道 廣 一 利* 畑 浩 二**
藤 原 紀 夫*** 吉 岡 尚 也**

Prediction of Failure in Rock Masses by Acoustic Emission

by

Kazutoshi MICHIIHRO*, Koji HATA**, Toshio FUJIWARA***
and Hisaya YOSHIOKA**

When constructing large caverns such as the one used for an underground powerhouse, it is of extreme importance to assure the stability of the cavern. As one of the techniques for stability monitoring, uniaxial compression tests were performed in various rocks and AE activity was measured. From the examinations of AE activity and the maximum amplitude of a single event, two types of AE occurrence patterns and three types of m -value variations were found. When predicting failure modes by means of AE, it is thought that the total AE counts and the m -value can be useful for non-homogeneous rocks. On rocks of schistose or very homogeneous structures, the total AE counts provide useful information on failure prediction but the m -value does not. Furthermore, from the results of spectral analysis of AE signal waves measured, it is found that the dominant frequency increases with increasing load.

Key words: Acoustic emission, AE, m -value, Frequency analysis, Prediction of failure, Stability of cavern, Rock masses

1 緒 言

トンネルや地下発電所のような地下空洞を施工する場合、その空洞の性能評価、すなわち力学的に安定であるかどうかを評価することは極めて重要なことである。しかしながら、特に山はねのような突発的破壊現象を事前に予知することや岩盤の不安定領域を評価することは非常に難しい問題である。ところで、採鉱現場やトンネル現場では、古くから「山鳴り」という可聴音の現象によって空洞崩壊の危険性を予知していた。岩石が変形したり破壊したりする時には、内部に蓄えられたエネルギーが解放される。「山鳴り」は、この解放されたエネルギーの一部が可聴域の破壊音となり伝ばしたものである。このように、解放されたエネルギーの一部が弾性波動となり伝ばする現象を AE (Acoustic Emission) と言う。近年、土木工学の分野でも AE を利用した研究が急増してきており、斜面崩壊の予知¹⁾やコンクリート構造物の健全性診断²⁾への適用はその一例である。

岩石を利用して AE を測定した先駆的なものに、Mogi の研究がある。この研究では、ぜい性岩石に破壊に至る曲げ荷重を作用させることにより発生する AE を調べ、自然地震の発生メカニズム解明を試みている。Boyce らは種々な岩石を用い、一軸圧縮試験に

おける AE 発生パターンを調べ、Mogi の示した AE 発生パターンとの比較も行っている。また、著者らは⁵⁾8 種類の岩石について AE 発生数をはじめとする AE 特性を調べ、岩種によって AE 発生パターンの異なることを示した。

本報告は、岩石の破壊予知に AE 法を適用する際、指標となる AE 特性を把握することにより、数ある AE 特性の内いかなるパラメータが岩石の破壊予知に関して有益かを考察している。そこで、破壊に至る一軸圧縮過程での岩石供試体から発生する AE を計測し、特に AE 発生数、振幅分布および卓越周波数に注目し、岩石の破壊予知を検討した。

2 実験装置と実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に、そのブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。このシステムにより計測される諸量は、一軸圧縮載荷時における軸力、軸ひずみ、AE 発生数、AE 信号波尖頭値および AE 信号波形である。測定項目の内、軸力は圧縮試験機に内蔵している荷重計で、軸ひずみは供試体表面に貼付した抵抗線ひずみゲージで計測した。AE の計測には共振型と、非共振型(広帯域型)の 2 種類のトランスデューサを使用した。両型とも、チタン酸ジルコン酸鉛磁器 (PZT) の圧電型振動子であり、それぞれ相互校正法

† 原稿受理 平成元年 8 月 14 日 Received Aug. 14, 1989

* 正 会 員 摂南大学工学部 寝屋川市池田中町, Faculty of Engineering, Setsunan University, Ikeda-nakamachi, Neyagawa

** 正 会 員 ㈱大林組技術研究所 清瀬市下清戸, Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation, Shimokiyoto, Kiyose

*** ㈱大林組技術研究所 清瀬市下清戸, Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation, Shimokiyoto, Kiyose

Fig. 1. AE measuring system.

Fig. 2. AE measuring block diagram.

を用いて求めた周波数応答特性を Fig. 3 に示す。AE 信号波を周波数解析する場合、トランスデューサの周波数応答特性には十分注意しなければならない。トランスデューサの影響を取り除くためには、理論上は周波数応答特性をもとに補正すれば良いと⁶⁾されているが、その方法は非常に複雑となる。そこで、今回の AE 信号波形を計測した実験には、トランスデューサの影響ができるだけ小さくなるように、Fig. 3 (b) に示す

Fig. 3. Spectral responses.

Table I. Identification, mean uniaxial compressive strength (σ_c), mean unit weight (γ) and number of samples.

Identification	Location	Mean values		Number of samples
		γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	
Granite	Inada	25.8	131.7	30
Granite-porphry	Akikawa	26.3	82.9	12
Rhyolite	Minakami	26.4	119.1	8
Sand-stone	Aiki	25.9	210.3	25
Tuff	Dojo	24.3	83.6	15
Clay-slate	Uji	26.9	94.6	9
Crystal-schist	Fujioka	28.9	71.2	11
Marble	Italy	26.5	74.0	12
Mudstone	Machida	18.3	4.1	7

100 kHz ~ 1 MHz の間はほぼ平坦な周波数応答特性を有した広帯域型トランスデューサを使用した。AE 信号波形計測のサンプリング間隔は 0.5 μ sec (Nyquist 周波数は 1 MHz) とした。

AE 計測において、雑音を除去することは極めて重要なことである。載荷板と供試体の接触面から発生する雑音は、独立気泡を有した厚さ約 7 mm のスポンジパッドを用いることにより除去した。実験に使用した岩石は火成岩、堆積岩そして変成岩共に 3 種類ずつである。試料の物性および本数を Table I に示す。実験は、直径 30 mm、細長比 1:2 以上に整形した円柱供試体に約 250 kPa/sec の載荷速度で一軸圧縮載荷を行い、破壊に至る過程で発生する AE を計測した。

3 実験結果と考察

3・1 AE 発生数と振幅分布

一般に、岩石の破壊は微小破壊が累積され、その後主要な破壊に至る。この微小破壊から主要破壊に至る過程において、AE 発生頻度は激増する。このことから、AE により岩石の破壊過程を把握するうえで、AE 発生数および振幅分布 (AE 信号波尖頭値と発生頻度を組み合わせたパラメータ) を計測することは非常に有益であると考えられる。

地震学の方野で、石本・飯田⁷⁾は、地震研究所地下室に設置した水平成分微動計を用いて 1935 年 11 月から 1938 年 10 月までの 3 年間自然地震の観測を行った。有感・無感に関わらず、水平成分微動計に感じたすべての自然地震についてまとめた結果、自然地震の規模別頻度分布を統計的に表現し、

$$NA^m = k \quad (1)$$

を導いた。ここに、 A は最大振幅値、 N は A から $A + dA$ までの地震発生総数、 m および k は定数である。なお、定数 m は地震総数と最大振幅値との関係

を両対数上に表わし、直線近似した勾配であり、地震の集団の性質を表わすパラメータである。日本では通常1.5~2.0の範囲にあるとされているが、火山性地震では2.0を越えることもある。一方、Gutenberg・Richter⁸⁾らは、自然地震の発生頻度がマグニチュードとともに指数関数的に減少することを示し、

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

を提案した。ここに、 N は地震総数、 M はマグニチュード、 a および b は定数である。式(1)は振幅、式(2)はマグニチュードで整理されたという相違はあるが、ほぼ同じ内容のものである。

ここで、式(1)や(2)を小片の岩石供試体を使用した実験に適用するためには、自然に発生する地震や鉱山内で生じる微小破壊との機構上の相似則を示しておく必要がある。これらについては、波動エネルギーと卓越周期との関係を調べた飯尾の研究や、AE発生様式から岩石の破壊過程の解明を試みた楠瀬らの研究により相似則が確認されている。そこで、著者らは上述した式(1)を岩石におけるAEに適用し、式(1)に従いデータ整理した。各種岩石において、 m 値と軸ひずみ（泥岩の場合は軸変位）およびAE累積数との関係をFig. 4~Fig. 8、Fig. 10~Fig. 13に示す。なお、これらの図でAE累積数、 m 値および軸ひずみは、それぞれの最大値で除し無次元化しており、最大応力時のひずみを破壊ひずみと定義している。

Fig. 4, 5, 6は花崗岩、花崗斑岩および流紋岩の測定結果の代表例である。図において、AE累積数に着目すると、いずれの岩種でも破壊ひずみの70~80%程度を境にしてAEは急激に増加している。このことは、微小クラックの発生が急激に増加したためか、あるいは微小クラックが発達しクラックどうしが連結したためであると考えられる。また、 m 値についてはAE累積数の急変点近傍で変曲点を有し、AEの急激な増加とともに小さくなる傾向を示している。すなわち、AE累積数の急変点を境にして大きな振幅波の発生する頻度が高まったことを意味している。これら

Fig. 4. Relationships of axial strain versus m -value and AE activity in a granite specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 5. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a granite-porphry specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 6. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a rhyolite specimen subjected to uniaxial compressive stress.

の岩石を成因的にみれば、主に石英、カリ長石および有色鉱物からなり、それぞれ強度特性が大きく異なっており、かなり不均質である。このような不均質ぜい性媒質では、破壊近傍になると粒界部での微小クラック発生や発達により顕著となり、大振幅のAE波が卓越するものと推察される。応力の増加に伴ってAEが頻発する現象は、Mogiの研究によっても明らかにされており、不均質ぜい性媒質の特性であると説明している。

Fig. 7, 8は砂岩、凝灰岩の測定結果の代表例である。図より、AE累積数に関しては低応力時において

Fig. 7. Relationships of axial strain versus m -value and AE activity in a sand-stone specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 8. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a tuff specimen subjected to uniaxial compressive stress.

も変曲点を有し、複数の変曲点が存在する。特に砂岩の場合、Bieniawski¹¹⁾の示したぜい性岩石の破壊過程と比較すると、AE 累積数のそれぞれの変曲点で区分される領域は、“Closing of crack”, “Linear elastic deformation”, “Stable fracture propagation”, “Unstable fracture propagation” によく対応しており、Fig. 9 にその比較を示す。一方、 m 値についてみれば、AE 累積数の変曲点と m 値の変曲点とは必ずしも一致せず、むしろ m 値は最終破壊のごく近傍（破壊ひずみの約 97 % 程度）で急激に小さくなる特徴を示している。この種の岩石は、石基の中に石英や有色鉱物などが比較的粗く分布しており、花崗岩などと比較すれば一般的には均質な材料（岩種）と言える。このように

Fig. 9. Comparison with Bieniawski's result.

比較的均質な媒質では、破壊のごく近傍において粒界部での微小クラック発生や進展が顕著になり、大振幅の AE 波が急激に卓越するものと推察される。

Fig. 10, 11, 12, 13 は粘板岩、結晶片岩、大理石、泥岩の測定結果の代表例である。図より AE 累積数に注目すれば、破壊ひずみの約 80 % 程度において変曲点が存在しており、花崗岩などのように不均質ぜい性媒質の場合とはほぼ同様な傾向を示している。しかしながら、 m 値については破壊近傍になっても小さくならず、傾向を異にしている。このことは、粘板岩と結晶片岩は、片状構造をなしていたため、粒界部での

Fig. 10. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a clay-slate specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 11. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a crystal-schist specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 12. Relationships of axial strain versus m -value and AE activity in a marble specimen subjected to uniaxial compressive stress.

Fig. 13. Relationships of axial stress versus m -value and AE activity in a mudstone specimen subjected to uniaxial compressive stress.

破壊よりはむしろ片状部分でのすべり破壊が支配的になり、大振幅のAE波がほとんど発生しないまま破壊に至っており、また、大理石と泥岩は非常に均質な材料であるため、大振幅のAE波の発生は生じにくくなっていると推察される。以上示した結果は、表面にマクロなクラックの存在する一部の供試体を除いて同様な傾向であった。表面にマクロなクラックの存在する試料（各試料とも1～2本程度あった）については、載荷と同時に非常に多くのAEが検出されたため、発生パターンを明確にすることはできなかった。

9種類の岩石の測定結果より、岩石を構成する成因や不均質な度合いによってAE発生頻度やAE振幅分布は大きく異なっており、岩種によって若干の傾向の違いが見受けられるが、AE発生頻度では2つのパターン、また m 値では3つのパターンに分類できることが明らかとなった（Fig. 14 参照）。

以上、AEの発生頻度や振幅値を計測することにより、微小クラックの発生状況の把握や主要破壊を予知することはある程度可能であるといえる。しかしながら、これらの結果は9種類と少なく、また室内実験（小片の供試体を用いた実験）と地山との間には多く

Fig. 14. Classification of behaviors of AE activity and m -value.

の点で相違点があると思われるか、いずれにしても上述したような傾向が存在することは、今後このような研究を現場に応用していく上で有益な結果と考えられる。

3・2 AE信号波形の周波数解析

AE信号波形自体には多くの情報が含まれており、たとえば前章で述べたAE発生頻度や尖頭値などは数多い情報の中の一つである。Chughらは¹²⁾、3種類の岩石について一軸引張試験を行った際に発生するAE信号波の周波数解析を行っている。その結果、卓越周波数は負荷とともに変化することをみだしている。一方、Boyceらは⁴⁾岩石の一軸圧縮試験において同様の試みを行っており、Chughらと同様に負荷とともに卓越周波数は変化することを明らかにしている。著者らは、これらの実験から判明した負荷レベルによって卓越周波数が変化するという傾向を利用することにより、岩石の破壊予知が行えるのではないかと考えた。さらに、前章で述べたAE累積数と振幅分布を利用した破壊予知方法に周波数解析を加えることにより、一層精度の高い予知が期待できるものと思われる。

本章では岩石の組織構造の相違によって卓越周波数の変化特性がどのように異なるのかを明らかにするために、AE信号波形を記録し、周波数解析を行った。実験には不均質でない性質の代表として花崗岩を、比較的均質な性質の媒質として砂岩の2種類を選んだ。

Fig. 15, 16に花崗岩、砂岩の測定結果を例示する。(a)図は、観測されたAE信号波形の一例を示したものである。一般にAE信号波形は突発型と連続型の2つに大別できる。突発型は微小き裂の発生や進展時に多く発生し、連続型は主に塑性変形時に多く発生する。今回の観測では、両岩石ともAE信号波形の立ち上がりは非常に急激であり、立ち上がりから消失までの継続時間は約0.3 m・sec程度であったが、破壊のごく近傍では1.0 m・secを越えるものも観測された。低中応力時でのAEは主として突発型であり、高応力時では突発型AEの重複や連続型AEの発生する頻度の高くなることが確認された。しかし、AE信号波形の形状だけから見ると、花崗岩と砂岩ではあまり大きな差異は認められず、媒質の不均質さ度合いによるAE特性の相違を見出すことはできなかった。(b)図は、観測されたAE信号波形それぞれの周波数解析結果を示しており、そのなかでピーク値は卓越周波数を表わしている。両岩石ともほとんどの試料において、低応力時でのピーク部分は非常に明りょうであり、載荷レベルが高まるに伴いピーク部分は不明りょうになる傾向が確認された。次いで、卓越周波数に着目し、負荷レベルによる変化を表わしたのが(c)図であ

(a) Waveform.

(b) Fourier spectrum.

(c) Relationship between pre-dominant frequency and axial stress.

Fig. 15. AE waveform in granite specimen.

(a) Waveform.

(b) Fourier spectrum.

(c) Relationship between pre-dominant frequency and axial stress.

Fig. 16. AE waveform in sand-stone specimen.

る。データにばらつきはあるが、卓越周波数は変化しており、載荷に伴って高周波成分の高まる傾向がみられた。一方、砂岩の場合では破壊応力の20~30%を境にして卓越周波数の変化がみられた。このように、卓越周波数の変化する傾向は岩種によって相当違い、

岩石の破壊予知を行う上で有力な手段の一つになるものと考えられる。

以上、2種類の岩石(花崗岩, 砂岩)における簡単な周波数解析を行い、特に卓越周波数に着目して考察した。ここでは、扱った岩種が少なく定性的な判断は

下せないが、このパラメータ一つにしても岩種の違い（成因の違い）により傾向が大きく異なることが理解できる。今回行っていないが、今後周波数解析を行う際にはトランジェンサの周波数応答特性を考慮した解析を行っていくつもりである。

4 結 論

破壊に至る一軸圧縮載荷中に発生する AE を計測し、AE 累積数 $\sim m$ 値 $\sim$ 軸ひずみの関係については9種類の試料、卓越周波数 $\sim$ 軸応力の関係については2種類の岩石試料を用いて実験を行った。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 花崗岩、花崗斑岩、流紋岩のように、結晶粒子が比較的大きく、かなり不均質な岩石では、岩石の破壊過程において AE 累積数と m 値には急変点が存在し、その急変点は破壊応力の約 80 % であった。

(2) 砂岩、凝灰岩のように比較的均質な岩石では、AE 累積数には複数の変曲点が存在しているが、 m 値に着目すると急激に減少する点は破壊の直前 (97 %) であることが明らかとなった。

(3) 粘板岩や結晶片岩のように片状構造を成したもののや、大理石や泥岩のように非常に均質な岩石では、 m 値は負荷とともに大きくなり続ける傾向にある。一方、AE 累積数は負荷とともに徐々に増加するが、破壊応力の約 80 % で急変点を生じる。この傾向を花崗岩などの結果と比較すると、 m 値についてはその傾向を異にしていることが確認できた。

以上の結果より、岩石を構成する粒子構造の相違や不均質な度合いによって AE 発生特性は大きく異なることが明らかとなった。ここで、岩石の破壊を予知する場合、不均質な岩石や比較的均質な岩石では AE 累積数特性や m 値特性が利用できると考えられる。一方、片状構造を成している岩石や非常に均質な岩石では AE 累積数特性は利用できるが m 値を利用した破壊予知は難しいと言える。また、今回一部の岩種について、観測した AE 信号波の周波数解析を行った。その結果、データ数が少なく一義的には言えないが、

試料の破壊過程における卓越周波数が大きく異なっていることは明らかであり、岩石の破壊予知を行う上で効果的な方法の一つであると考えられる。

以上の結論はあくまでも室内試験の結果であり、原位置の傾向とは定量的に一致しないかもしれないが、上述したような傾向が存在することは間違いのない事項であり、岩石の破壊予知に AE を応用できるものと考えられる。今後より多くの岩種についての実験や原位置での結果との対比を行っていき、この方法の確立を目指すつもりである。

(昭和63年2月17日 第20回岩盤力学に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 秩父顕美, 城 和裕, 中村正博, 鎌田正孝, 橋本良忠, 第3回地下の AE 国内コンファレンス論文集, p. 92 (1988).
- 2) 大津政康, 坂田康徳, 第6回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, p. 54 (1987).
- 3) K. Mogi, Bull. of the Earthquake Res. Inst. (Tokyo University), **40**, 125 (1962).
- 4) G. M. Boyce, W. M. McCabe and R. M. Koerner, ASTM STP 750, 142 (1981).
- 5) 道廣一利, 畑 浩二, 藤原紀夫, 吉岡尚也, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 71 (1988).
- 6) 大津政康, 丹羽義次, “アコースティック・エミッションの特性と理論—構造物の稼動時の非破壊検査法—” (1988) 森北出版株式会社
- 7) 石本巳四雄, 飯田汲事, 震研彙報, **17**, 443 (1938).
- 8) B. Gutenberg and C. F. Richter, Princeton University Press (1949).
- 9) 飯尾能久, 地震, 第2輯, **35**, 183 (1982).
- 10) 楠瀬勤一郎, 西沢 修, 伊藤久男, 石戸経士, 長谷川功, 地震, 第2輯, **34**, 241 (1981).
- 11) Z. T. Bieniawski, Eng. and Geo., **2**, No. 3, 149 (1967).
- 12) Y. P. Chugh, H. Reginald Hardy, Jr. and R. Stefanko, Proc. of the Tenth Sympo. on Rock Mech., p. 73 (1968).