AE 計測に基づく岩石の微視的強度分布評価に関する研究*

高 橋 亨^{*1}, 佐 藤 一 志^{*2}
橋 田 俊 之^{*3}, 高 橋 秀 明^{*4}Evaluation of Microscopic Strength Distribution in Rock
Using Acoustic Emission MeasurementsToru TAKAHASHI, Kazushi SATO,
Toshiyuki HASHIDA and Hideaki TAKAHASHI

A method for determining microscopic strength distribution in rocks using an acoustic emission (AE) technique is proposed. The principle of the method is based on a statistical model for fracture analysis of quasi-brittle materials which has been developed by McClintock et al. [*Int. J. Fract.*, **15**-2 (1979), 107-118]. The statistical model assumes an inhomogeneous strength distribution of the material which is dictated by the fracture probability with Weibull distribution. Firstly, the principle of the statistical method is verified by performing numerical simulations using a network model. Secondly, the method is applied to experimental results of uniaxial tension tests and AE measurements conducted on granite and marble. It is demonstrated that the numerical and experimental results support the validity of the proposed method for determining the microscopic strength distribution in rocks.

Key Words: Fracture, Rock, Microscopic Strength Distribution, Acoustic Emission, Weibull Distribution

1. 緒 言

次世代型深部地殻エネルギー抽出システムにおいては、水圧破砕により作成した人工地下き裂を利用した人工地下熱交換面の設計技術の開発が鍵となっている。このため、岩石を対象とした破壊力学的研究が活発に進められてきている⁽¹⁾。準脆性材料である岩石は巨視的破壊に先立って微視き裂が発生し、この微視き裂の形成が巨視破壊挙動を支配する重要な役割を演じることが知られている^{(2)~(4)}。このため、岩石の破壊挙動を評価するためには微視破壊挙動を定量的に取扱う必要がある。岩石の微視破壊挙動は岩石組織の不均質性に大きな影響を受けるため⁽⁵⁾、微視破壊挙動を解析するためには微視的不均質性の評価が必要不可欠である。しかしながら、岩石の微視的不均質性は数 mm 程度の結晶粒オーダの問題であり、直接的に評価することは極めて困難である。

McClintock ら⁽⁶⁾は、脆性材料の微視的不均質性の

中でも特に微視的強度のばらつきに注目した統計モデルを構成し、さらにこの統計モデルに立脚して、一軸引張試験にアコースティックエミッション(AE)法を併用することにより微視的強度分布の評価を可能とする方法についても言及している。しかしながら、評価手法の妥当性や現実の材料への適用性については今後の検討課題となっている。

そこで本研究では、McClintock らの評価手法を適用し、岩石の微視的強度分布の評価に関する研究を行う。まず、数値計算を用いて McClintock らの手法の有効性を検討し、次に岩石の一軸引張試験を行い AE 計測を実施する。この測定結果を基に岩石の微視的不均質性の評価方法について検討する。

2. 微視的強度分布の評価方法

2.1 AE 法による微視的強度分布評価法

McClintock ら⁽⁶⁾は準脆性材料を微視的強度が空間的に分布するモデルにより表現し、不均質性の破壊挙動に及ぼす影響を考慮している。このモデルで想定されている一軸の引張負荷のもとでの破壊プロセスは、材料ははじめ負荷の増加に伴い空間的強度分布に起因して試験片全体に分散型の微視き裂が発生し、発生した微視き裂のうち最大のき裂が進展を開始する点が最大

* 原稿受付 1996 年 4 月 1 日。

^{*1} 東北大学大学院 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 正員、宮城工業高等専門学校 (〒981-12 名取市愛島塩手字野田山 48)。^{*3} 正員、東北大学工学部。^{*4} (故)正員、東北大学工学部。

荷重となり、以後荷重は低下していく。すなわち、最大荷重以前は分散型の微視き裂の発生が材料の変形・破壊挙動を支配し、最大荷重以降は単一のき裂進展が破壊挙動を支配する。

最大荷重以前の微視き裂の発生は、次式の Weibull 関数⁽⁷⁾で表される発生確率 p に従う。

$$p = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m は形状母数 (Weibull 係数)、 σ_0 は尺度母数である。一方、材料中に存在する割れの潜在的サイトの総数を N_t とし、負荷応力を σ まで増加したときに割れたサイトの数を N とすれば、 p は、

$$p = \frac{N}{N_t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される。式 (2) を式 (1) に代入してテイラー展開し、高次の微小項を無視すると、

$$\frac{N}{N_t} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。さらに両辺の対数をとると、次式が得られる。

$$\ln N = m \ln \sigma + C \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 C は材料および試験片寸法で決定される定数であり、

$$C = \ln N_t - m \ln \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

と書くことができる。式 (4) において N は割れたサイトの数であり、破壊により生じた AE 事象数に対応するものと考えることができる。したがって、実験的に AE 事象数と負荷応力の関係を計測し、式 (4) を用いることにより m を決定できる。本研究ではこの手法を岩石の一軸引張試験結果に適用し、微視的強度の

分布の Weibull 係数 m を評価することを試みる。

2.2 数値計算による評価手法の検討

McClintock らによる評価手法の有効性を、ネットワークモデルを用いた数値計算により検討する。ネットワークモデルは材料の微視的構成要素を棒状の要素で代表させ、この棒要素をネットワーク状に組み合わせ材料を模擬するものであり、準脆性材料の微視的破壊過程に関する研究^{(8)~(12)}によって多用されている。特に、樋村ら⁽¹²⁾はネットワークモデルを用いた微視的不均質性を考慮した準脆性材料の一軸引張破壊挙動の数値シミュレーションを行い、AE 放出挙動に関する実験結果と数値解析結果とを比較することによりネットワークモデルの有用性を示している。本研究では、このネットワークモデルを用いて数値計算を行った。図 1 に示すような棒要素を三角形に連結したネットワークモデルを用いて、上端の節点を固定し、下端の節点に強制変位を与えて各要素に加わる荷重を求める。図 1 ではメッシュサイズ 4×4 のモデルを示した。各要素となる棒は荷重に対してはじめ弾性変形するが、応力が破断応力 $\sigma_{\max}$ に達すると脆性破壊し、弾性率が零になるものとする。計算では、棒要素の破断応力 $\sigma_{\max}$ に Weibull 分布に従う強度分布を与えた。要素が破断した場合は剛性マトリックスを再構成して計算を繰返し、破断する要素のない場合には変位を増加させて再計算を行う。以上の手順により破断する要素と荷重を求めた。メッシュサイズは 40×40 とし、 $m=3, 5, 10, 20, 50$ の 5 種類の m を与え、それぞれ 10 回計算を行った。弾性率はすべての棒要素で一定とした。このネットワークモデルを用いた計算結果に McClintock らの解析モデルを適用し、評価手法の有効性を検討する。

Fig.1 Schematic of network model

3. 一軸引張実験方法

実験は、供試材として福島県飯館村前田産の花こう岩 (岩石 A) と、東北大理石 (岩石 T) を用いた。平均結晶粒径は、岩石 A で約 1.5 mm、岩石 T で約 1.6 mm である。それぞれの岩石を図 2 に示すように直径 40 mm、高さ約 100 mm の円筒形状に加工し、両端が平行を保つように研削を行った。また、側面の一部には AE センサを取付けるために平面加工を施した。試験片は 24 時間以上の真空乾燥の後、実験に供した。

負荷方法の概略図を図 3 に示す。実験はインストロン万能試験機を用いて実施した。まず、試験機のクロスヘッドおよびロードセルに金属製プレートを設置する。次に下部のプレート中央の凹部に試験片の一端をエポキシ樹脂により固定する。次に上部のプレート中

中央の凹部にエポキシ樹脂を塗り、クロスヘッドを上昇し、試験片の他端を接近させて同様に固定する。この手順により偏心のない正確な一軸引張試験を実施することができる。エポキシ樹脂で固定された端部からの割れは本実験で認められず、端部効果は無視できると判断される。クロスヘッドスピードは0.02 mm/minとした。実験は室温、大気中で行い、荷重、変位、ひずみを連続して計測した。変位は図3に示すように差動トランス(Linear-Variable Differential Transformer, LVDT)を用いて計測した。また、試験片側面の4箇所にひずみゲージを貼付してひずみを計測した。実験中、微視き裂の発生を調べるためにAE計測を実施した。AE信号の計測および記録には、AE解析装置 LOCAN 320(日本フィジカルアコースティクス社製)を用いた。使用したAEセンサは直径16 mmの広帯域形センサ(UT 1000)を用い、図3のように2箇所にシリコングリースを介して固定し、試験時に発生するAE信号の測定を行った。センサで検出された

Fig. 2 Specimen geometry

Fig. 3 Schematic of uniaxial tension test assembly

AE信号は100 kHzのハイパスフィルタをもつプリアンプ(1 220 A)により60 dB増幅された後、AE解析装置 LOCAN 320に入力され、さらに20 dB増幅された後、到達時間、振幅が記録される。微視破壊プロセスの定性的傾向をみるため、AE信号を上下2 chで測定することによりその到達時間差から近似的な一次元位置評定を行った。AE発生位置の算出に用いた音速は超音波法により測定した測定値を用いた。岩石Aで約4 000 m/s、岩石Tで約2 190 m/sであった。

岩石Aについては、巨視的強度のWeibull係数を求めるために断面10 mm×10 mm、長さ100 mmの試験片を作成し、20本の試験片を用いて三点曲げ試験を実施した。

4. 結果および考察

4・1 数値計算による検討 はじめに、数値計算による微視的強度分布評価法の有効性に関する検討結果を記述する。計算結果では、微視破壊挙動はまず微視き裂がメッシュ全体に拡がって発生し、ピーク応力以後は単一の主き裂が進展する破壊プロセスが観察されている。この微視破壊挙動はMcClintockらの解析モデルと対応しており、ピーク応力以前の微視き裂の発生に対してMcClintockの微視的強度分布評価法が適用できるものと考えられる。そこで、一軸引張シミュレーション結果から得られた破断した要素数 N と負荷応力の関係を、 $m=3, 5, 10, 20$ の場合について両対数グラフで図4に示す。負荷応力は、メッシュ下端の節点力とメッシュ寸法から算出した公称応力 σ_{net} を、式(1)で示されるWeibull関数の尺度母数 σ_0 で規格化して示した。また、最大荷重までのデータを検討対象とした。 $m=50$ の場合についてはピーク応力までにき裂が発生しないためデータ点は得られなかつ

Fig. 4 Relation between applied stress and cumulative number of AE using network model

た。図4からわかるように、 $m=20$ 以下の場合にはデータ点は直線で近似することができ、式(4)を適用することが可能である。最小二乗法により直線の傾きから m を決定し、計算においてあらかじめ設定された m と比較する。 m の設定値と式(4)により決定された m の関係を図5に示す。おのこの m については10回の計算が行われているため、10回の平均値と標準偏差の幅を示した。図5によれば、 $m=20$ の場合には決定された m に大きなばらつきが観察されるが、 $m=10$ 以下の場合には決定された m はほぼ設定値に近い値を与えており、式(4)により微視的強度分布の Weibull 係数を決定できることがわかる。 $m=20$ の場合においてばらつきが大きくなったのは、シミュレーションでは最大荷重までに発生するき裂数が極めて少なく、図4に示した最小二乗近似における誤差が大きくなるためである。この検討結果を踏まえ、次に岩石の一軸引張試験結果を用いて岩石の微視的強度分布の Weibull 係数を調べる。

4・2 一軸引張試験結果 図6に、岩石 T について得られた実験結果を示す。図6(a)は応力の時間変化と AE 放出挙動を示し、図6(b)はLVDTで測定した変位とひずみの測定結果、図6(c)は AE の近似的な発生位置の変化を示す。

まず、図6(a)により、応力の時間変化とそれに伴う AE 放出挙動の変化について調べる。時間経過に従い応力が増加し、AE の発生数が増加する。負荷応力は最大応力に近づくにつれて非線形的な挙動を示し、こう配が緩やかになってゆく。最大荷重に達した後は応力は低下する。図6(b)をみると、最大荷重以後、変位は単調に増加しているが、ひずみは strain 2 を除き低下している。これは、ほぼ最大荷重で損傷が局所

化し、最大荷重以後は損傷の局所化した領域により、試験片全体の変形、破壊挙動が支配されるためであると推察される。strain 2 に観察されるひずみの急増は、この位置で損傷が局所化し、ひずみゲージが破断したためである。

図6(c)は、両端の0 mm 並びに 72 mm の位置が AE トランスデューサの中心間距離に対応している。負荷の初期段階においては試験片全体に発生源が分布しており、微視き裂が試験片内部で分散して発生している。この観察結果から、本岩石では微視的な強度が

(a) Time vs load

(b) Strain and Displacement

 Fig. 5 Evaluation of m

(c) AE source location

Fig. 6 Results of uniaxial tension test for Rock T

空間的にばらついているものと判断される。

その後、ほぼ最大荷重に達すると破断位置の近傍で大振幅の AE 信号が集中して発生していることが観測され、他の部分では AE 信号は発生していないことがわかる。図 6(c) 中には最終破壊位置を矢印で示している。実際に観察された最終破壊位置は AE 信号が局所化した位置とほぼ対応しているものとみることができ、本 AE 信号の近似的な位置評価結果に基づく考察は有効であるものと考えてよい。また、同様の結果が岩石 A についても得られている。

4.3 微視的強度分布と微視破壊挙動 2 章で述べた AE 法を用いた微視的強度分布評価法を、本実験結果に適用する。

一軸引張試験で測定された負荷応力と累積 AE 事象数 $\sum N_{AE}$ の関係を、岩石 A と岩石 T について図 7 に示す。図 7 では最大応力までを示した。図 7 からわかるように、負荷応力 σ と AE 事象数は両対数プロットでほぼ直線となった。この直線性は本研究におけるすべての実験結果について観察された。負荷応力と AE 事象数が直線性を示すことは、2 章で述べたように岩石内部の微視的強度が Weibull 分布により特徴づけられることを示している。これより、式(4)で示され

る直線の傾きから、Weibull 係数 m を求めることができる。ピーク応力近傍において AE 事象数が急増し、AE 事象数と負荷応力の関係は直線からずれることが観察される。これは実験的にはピーク応力直前で破壊の局所化が生じたためと推察される。McClintock の理論においては微視き裂の相互作用は考慮していないため、したがって式(4)の適用範囲は図 7 の AE 事象数の急増点以前と判断される。これより、急増点以前の直線の傾きから m を決定した。各試験片における m を計算した結果を表 1 に示す。表 1 では、各試験片について二つの AE センサから得られた結果を平均して示した。 m についてみるといずれの岩石においてもばらつきはあるものの、ほぼ一定の値になっているものと見ることができる。平均すると岩石 T で $m=1.42$ 、岩石 A で $m=3.05$ となる。

本研究で用いた岩石 A の曲げ強度における Weibull 係数は約 $m=18$ であった。さらに、花こう岩および大理石の巨視的強度の Weibull 係数は一般に 10~30 であることが報告されている⁽¹³⁾。本研究で決定した微視的強度に関する Weibull 係数は、巨視的強度に関する値と比較して 1 オーダ小さな値となっている。

岩石の破壊挙動評価のためには、破壊を特徴づける破壊プロセスゾーンの評価が必要不可欠である。これまでの研究により、佐藤ら⁽¹⁴⁾は、CT 試験片の破壊挙動を AE 法、超音波法を用いて検討することにより、岩石 T では微視き裂分散形のプロセスゾーンが、岩石 A では局所形プロセスゾーンが形成されることを示している。また、佐藤ら⁽¹⁵⁾はネットワークモデルを用いた数値計算に基づき、 m 値の大小によりプロセスゾーンの形態を分類し、微視的強度分布と破壊プロセスゾーンの幅の間に強い相関があることを示している。本実験結果の m 値は、佐藤らによる破壊プロセスゾーンの観察および数値モデルによる予測とよく対応することが示されている。以上の結果も踏まえれば、AE 法が岩石の微視的強度分布測定に有効であるといえる。

5. 結 言

本研究は岩石の微視的強度分布の評価を行うことを目的とし、McClintock らにより提案された AE 法による微視的強度分布評価法について検討した。はじめに、数値計算結果を用いて評価法の妥当性を検討し、次に花こう岩と大理石の一軸引張試験結果に適用した。その結果以下の知見が得られた。

(1) 数値計算結果を用いた検討により、

Table 1 Weibull modulus, m

Rock	Specimen No.	m
Tohoku marble (Rock T)	T-2	1.49
	T-4	1.24
	T-5	1.38
	T-6	1.56
average.		1.42
Iidate granite (Rock A)	A-2	3.08
	A-3	3.35
	A-4	2.33
	A-5	3.02
	A-6	3.45
average.		3.05

Fig. 7 Relation between applied stress and cumulative number of AE in uniaxial tension test

McClintock らによる微視的強度分布評価法の妥当性が示された。

(2) AE計測結果より、岩石の微視的強度は Weibull 分布に従うことが示された。

(3) AE法を用いた微視的強度分布評価法を実験結果に適用することにより、岩石の微視的強度分布の Weibull 係数 m を決定することができた。岩石 T で $m=1.42$ 、岩石 A で $m=3.05$ であった。

本研究は文部省科学研究費補助金、重点領域研究(課題番号 05232102)によるものであることを付記し謝意を表す。

文 献

- (1) Takahashi, H. and Abé, H. (Atkinson, B. K. 編), *Fract. Mech. of Rock*, (1987), 241, Academic Press, London.
- (2) Labuz, J. F., ほか 2 名, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **24** 4(1987), 235-246.
- (3) Bazant, Z. P., *J. Eng. Mech.*, **110**(1984), 518-535, Am. Soc. Civ. Eng.
- (4) Rühle, M., ほか 3 名, *Acta Met.*, **35**-11(1987), 2701-2710.
- (5) Mogi, K., *Bulletin of Earthquake Research Institute*, **40** (1962), 125-173.
- (6) McClintock, F. A. and Zaverl, F. Jr., *Int. J. Fract.*, **15**-2(1979), 107-118.
- (7) Weibull, W., *J. Appl. Mech.*, **18**(1951), 293-297.
- (8) Takayasu, H., *Prog. Theor. Phys.*, **74** 6(1985), 1343-1345, Progress Letters.
- (9) Herrmann, H. J. and Roux, S. (Herrmann, H. J. and Roux, S. 編), *Statistical Models for the Fracture of Disordered Media*, (1990), 159-188, Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland.
- (10) Curtin, W. A. and Scher, H., *J. Mater. Res.*, **5** 3(1990), 535-553.
- (11) Curtin, W. A. and Scher, H., *J. Mater. Res.*, **5** 3(1990), 554-562.
- (12) 樋村直人・ほか 3 名, *機論*, **60**-573, A(1994), 1170-1175.
- (13) 山口梅太郎・ほか 1 名, *岩石力学入門*, (1967), 95, 東京大学出版会.
- (14) 佐藤一志・ほか 3 名, *機論*, **62** 598, A(1996), 1333-1339.
- (15) 佐藤一志・ほか 3 名, *機論*, **62** 603, A(1996), 2547-2552.