岩石のき裂進展挙動と AE 放出挙動のフラクタル性に関する研究*

佐藤 一 志^{*1}, 樋村 直 人^{*2}
橋田 俊 之^{*3}, 高橋 秀 明^{*4}Study on Fractal Characteristics of Acoustic Emission
and Crack Propagation in RocksKazushi SATO, Naoto HIMURA,
Toshiyuki HASHIDA and Hideaki TAKAHASHI

In this paper, the fractal nature of crack propagation in rocks is demonstrated by means of acoustic emission (AE) method. AE behavior is monitored during fracture toughness tests conducted on compact tension specimens of three types of rocks. It is shown that the microcrack fracture process zone proceeds the macroscopic crack extension, resulting in nonlinear fracture behavior. Iidate granite, Tohoku marble and Akiyoshi limestone were used. In Iidate granite, the fracture process zone grows in narrow region. Tohoku marble shows that the fracture process zone consists of distributed microcracks surrounding the macroscopic crack. In Akiyoshi limestone which is pre heat treated, extensive crack branching is observed. The AE behavior is characterized by a fractal dimension b which is the slope of the $\log - \log$ frequency and AE energy distribution. The trend in variation of b value is shown to correspond to the crack propagation behavior. In addition, it is found that the fluctuation of b -value can also be characterized by fractal. This observation implies that the self similarity lies in the rock fracture process.

Key Words: Fracture, Crack Propagation, Acoustic Emission, Fractal, Self similarity, Rock

1. 緒 言

次世代形地熱エネルギー開発においては、水圧破碎により形成される地下き裂の進展挙動を予測することが必要となるため、破壊力学的研究が進められている⁽¹⁾。岩石のき裂進展挙動においては、巨視的き裂進展に先立って複数の微視き裂が発生し、マルチクラックよりなる破壊プロセスゾーンの形成が重要な役割を演じることが知られている^{(2)~(6)}。岩石のき裂進展挙動を評価するためには、この破壊プロセスゾーンの形成を十分に把握しなければならない。さらに、アコースティックエミッション(AE)の計測により、水圧破碎により誘起される貯留槽は、マルチクラックからなっていることが指摘されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがって高効率な熱交換面の設計のためには岩石破壊におけるマルチクラックの発生を定量的に評価する必要がある。ところが、現状では岩石の微視破壊挙動を定量的に取り扱うための方法論が不足し、マルチクラックを伴う破

壊挙動は十分に解明されているとは言えない。

一方、自然界の複雑な統計的現象の多くがフラクタルで整理されることが報告され⁽⁹⁾、岩石のマルチクラックを伴う破壊現象においてもフラクタル性が見い出されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。その中でも、破壊時に放出されるAEの振幅分布がフラクタル性を有することが注目されている⁽¹²⁾。樋村ら⁽¹³⁾は、岩石の不均質性を考慮した数値シミュレーション法を開発し、これを用いて準脆性材料の微視破壊挙動を検討することにより、AEのフラクタル性と微視破壊挙動の基本的な関係を調べており、AEのフラクタル性はマルチクラックのフラクタル性に対応すると見ることができることから、AEのフラクタル性の岩石の破壊挙動評価への適用が期待できることを述べている。

本研究は、岩石のマルチクラックを伴う破壊挙動の解明を目指し、AE信号の振幅分布のフラクタル次元である b 値に基づく破壊挙動評価について検討する。具体的には、種々の岩石を用いて破壊靱性試験を行い、AE信号を計測して b 値の整理を行う。同時に、目視による観察、超音波測定、AE発生位置測定によりき裂進展挙動を観察することにより b 値の変化挙動とき裂進展挙動の関係を調べる。

* 原稿受付 1995年7月20日。

^{*1} 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)。^{*2} 東北大学大学院[現:三菱電機(株)]。^{*3} 正員、東北大学工学部(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*4} (故)正員、東北大学工学部。

2. 実験方法

2・1 供試材および破壊靱性試験方法 本実験の供試材は、福島県飯館村前田産の花崗岩、東北大理石、秋吉台石灰岩の3種の岩石である(以下、岩石A、岩石T、岩石Sと略記する)。平均結晶粒径は、岩石Aは約2.5 mm、岩石Tは約1.6 mm、岩石Sは、約0.06 mmである。試験片は図1に示すCT試験片である。本実験に用いた試験片寸法を表1に示す。岩石Aについては2 TCT および4 TCT、岩石T、Sについては4 TCTの寸法を用いた。いずれの岩石についてもき裂進展方向がデバイダー形となるように試験片を作成した。き裂の観察を容易にするために試験片の片面にシリコンカーバイドを用いて#3000まで研磨を施した。初期き裂は厚さ0.15 mmのカーボンブレードを用いて導入した。

予備実験により石灰岩では熱処理を行うことで、その破壊挙動がより多くのマルチクラックを伴うことが観察されたため、岩石Sには200°Cで3時間の熱処理を施した。熱処理の結果、多くの既存き裂の発生が観察された。

Table 1 Dimensions of CT specimen

Specimen No.	unit, mm			Location of AE Sensor
	a_0	W	B	
A4	51.1	100.6	51.4	a
A5	101.6	201.1	50.4	b
T1	113.2	223.8	50.1	b
T2	113.5	226.6	50.2	b
T3	136.9	225.2	50.5	b
S1	109.5	218.7	50.7	b
S2*	113.2	220.5	50.3	b
S3*	133.7	221.1	50.6	b

*: Heat treated at 200°C

Fig. 1 CT specimen geometry

破壊靱性試験はインストロン万能試験機を用いて室温、大気中にて行い、荷重 P 、荷重線変位 δ_L を連続して測定した。 δ_L の測定にはクリップゲージを使用した。実験は、変位制御でクロスヘッドスピードを0.02 mm/minとして行った。形成されたき裂を観察するために、最大荷重の10%まで荷重が低下した時点で除荷し、試験を終了した。

2・2 超音波測定方法 破壊靱性試験によるき裂進展に伴う破壊プロセスゾーンの形状、寸法を把握するために試験前および試験後の試験片について超音波を用いた音速測定を行った。図2に示すように試験片の初期き裂先端よりき裂進展方向において、き裂進展方向およびその垂直方向に10 mm間隔に格子を設け、各格子点において2探触子透過法により板厚方向の音速を測定した。使用した超音波探傷器はUSIP 11(日本クラウトクレマ社製)であり、探触子は周波数500 kHz、直径40 mmの縦波用探触子(Model K 0.5 S)である。測定は破壊靱性試験前と試験後に行い、同じ測定点における音速の変化を評価した。

2・3 AE測定方法 岩石の破壊靱性試験時におけるAE放出挙動を調べるためにAE計測を行った。AEセンサは一つの試験片に2箇所配置し、二つのセンサから得られる信号の時間差により2個のセンサ間におけるAEの発生位置を測定した。AEセンサの配置は岩石Aの2 TCT試験片では図1のa方向に取付け、岩石Aの4 TCT、岩石T、岩石Sの試験片については図1のb方向に取付けた。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ックス社製)を用いた。使用したセンサは直径16 mmの広帯域形センサ(UT 1000)である。センサで検出された信号は100 kHzのハイパスフィルタをもつプリアンプ(1220 A)を介してAE解析装置LOCAN 320に入力され信号処理の後、データは磁気ディスクに記録される。AE計測の総合利得は80 dBで実験した。

Fig. 2 Schematic of UT test

3. 実験結果および考察

3・1 各岩石のき裂進展形態 各岩石の破壊靱性試験におけるき裂発生およびそれに伴う破壊プロセスゾーンの形成挙動について検討する。目視による観察においては、岩石 A、岩石 T では巨視的には 1 本のき裂が見られるのみであった。岩石 S の破壊靱性試験後における初期き裂前方を染色した状態を図 3 に示す。岩石 S では、主き裂に複雑な枝別れが発生している様子が観察される。岩石 S は材料内に熱処理による既存き裂を多数含んでおり、破壊靱性試験による主き裂がこれらの既存き裂と連結することによりこのような枝別れが発生したと考えられる。

Fig. 3 Crack extension in rock S

(a) Rock A

(b) Rock T

Fig. 4 Distribution of ultrasonic velocity degradation

超音波による音速測定結果を図 4 に示す。図 4(a) は試験片 A 5、図 4(b) は試験片 T 2 の測定結果である。グラフの水平面における位置は、図 2 に示した試験片上の位置に対応しており、位置座標 A-0 が初期き裂先端である。垂直軸は音速の低下した割合を百分率で示している。岩石 T では、初期き裂前方の幅約 30 mm の領域において音速の低下が観察される。超音波の伝ば速度は媒質のヤング率の $1/2$ 乗に比例することから、この領域は、巨視的に見てヤング率が低下しているものと見ることができ、破壊プロセスゾーン形成に伴う微視き裂による損傷領域を検出しているものと判断される。すなわち、岩石 T においては幅が 30 mm 以上の破壊プロセスゾーンが形成されていると推定される。一方、岩石 A においては音速の低下する領域がほとんど観察されず、岩石 A では岩石 T に比較して破壊プロセスゾーンの幅が非常に狭いと考えられる。

3・2 AE 放出挙動のフラクタル性の検討 各岩石の破壊靱性試験において発生した AE 振幅分布のフラクタル性について検討を行う。各岩石の AE 振幅分布のヒストグラムを図 5 に示す。図 5(a) は岩石 A、図 5(b) は岩石 T の測定結果の一例である。N は AE

(a) Rock A

(b) Rock T

Fig. 5 Distribution of AE amplitude

信号の個数である。AE 振幅は dB 表示することにより対数値としており、グラフは両対数となっている。これらのヒストグラムは負荷開始から負荷終了までに発生したすべての AE 信号を用いて作成した。42 dB 以下は実験時に非常に多くのノイズが観測されたため、ヒストグラムは 43 dB 以上の範囲を考察の対象とした。各岩石ともに N と AE 振幅分布の関係はほぼ直線で近似でき、破壊靱性試験において発生する AE 振幅分布がフラクタル性をもつことを示している。AE 振幅分布のヒストグラムを最小二乗法により近似した直線の負の傾きを、AE 振幅分布のフラクタル次元 b

値として、以下の検討を進める。

3.3 破壊プロセスゾーン形成と b 値の巨視的变化挙動 破壊靱性試験の各負荷段階における b 値を求め、 b 値の変化挙動を検討する。各岩石の AE 振幅分布のフラクタル次元 b 値の変化挙動、荷重 P 荷重線変位 δ_L 曲線および AE 発生位置の変化を図 6~8 に示す。図 6 は試験片 A4、図 7 は試験片 T2、図 8 は試験片 S2 の測定結果である。各図において図 (a) は P - δ_L 曲線を示し、図 (b) は実線が b 値、破線が b 値の計算に用いた AE 信号の個数を示す。図 (c) は AE 発生位置の δ_L に対する変化を示し、プロット点の大

Fig. 6 Results of fracture toughness test for rock A

Fig. 7 Results of fracture toughness test for rock T

きさは AE 振幅の大きさに対応する。各々における AE 測定位置を模式図にて示した。図 7, 8(c)では、破線により試験片中央を示している。ここで、各負荷段階における b 値は、負荷終了時の荷重線変位の $1/30$ に対応する変位量 $\Delta\delta_L$ を用いて、荷重線変位 δ_L $\Delta\delta_L$ から δ_L の範囲内に発生した AE 信号から求め、これを δ_L における b 値とした。なお、 $\Delta\delta_L$ を種々変化させた予備的な計算の結果、巨視的な b 値の変化挙動に大きな差は観察されなかったため、ここでは $\Delta\delta_L$ を $1/30$ とした。

図 6(c)の花崗岩試験片 A 4 の AE 発生位置はき裂

Fig. 8 Results of fracture toughness test for rock S

進展方向における AE 発生位置を試験片背面からの距離により示しており、図中に破線で示した 49.5 mm の位置が初期き裂先端に対応する。

図 6(c)では、負荷の初期には初期き裂先端近傍で小さな AE が多く発生し、負荷が進むに従って微小 AE の発生領域が前進するとともに初期き裂先端近傍で発生する AE が次第に大きくなることが観察される。これは、微小き裂による破壊プロセスゾーンが成長するとともに、初期き裂先端近傍では次第に破壊が局所化し主き裂が形成される挙動に対応すると考えられる。このとき、図 6(b)では平均的な b 値の挙動は負荷が進むに従って減少しており、破壊プロセスゾーンの成長に伴って b 値が減少することがわかる。荷重線変位約 150 mm 以降の負荷段階では、AE 発生領域は試験片背面に達し成長が飽和し、初期き裂先端近傍では大きな AE が連続して発生するようになる。これは破壊プロセスゾーン成長が飽和し主き裂が成長する段階に対応すると考えられる。このとき b 値は平均的には一定値を示しており、定常的なき裂進展段階においては b 値は一定となると言える。

次に、図 7 の岩石 T の結果では、 b 値は初期には高い値で一定に推移した後、岩石 A に比較して緩やかに減少している。岩石 T の破壊プロセスゾーン形成挙動は超音波測定結果に示されるように、岩石 A に比べ微視き裂よりなる損傷領域の拡がりが大きく、このため破壊の局所化が岩石 A に比べて遅くなり、 b 値の減少傾向が緩やかになっているものと見ることができ

Fig. 9 Schematics of correspondence between b value change and fracture process in rock

最後に、図 8 に示した岩石 S についてみると、 b 値は負荷終了時までの間、大きな変動を繰返している。図 3 に示したように岩石 S では、主き裂が既存き裂との連結を繰返して成長しており、進展するき裂が既存のき裂と連結すると、連結した既存き裂先端を新たなき裂先端として破壊プロセスゾーンの形成が再び開始されると考えられる。このとき、 b 値はき裂が既存き裂に連結するまで岩石 A、T と同様に減少するが、き裂の連結の後、再び破壊プロセスゾーンの形成、成長を繰返すために b 値は再び高い値を示すと考えられることができる。この過程が繰返されることにより図 8 に見られるような大きな変動を示すと判断される。以上の検討結果から、 b 値の変化挙動とき裂先端の微視破壊挙動の対応関係を模式的に図 9 のようにまとめることができる。

3・4 b 値の変動特性と自己相似性 岩石 S に見られる顕著な b 値の変動現象は、変動の大きさに違いはあるものの、岩石 A、T においても観察される。3・4 節では図 6 から図 8 に示される b 値の微細な変動特性について検討を加える。変動の特徴を調べるために b 値に対して周波数解析を行った。図 10 に代表的な周波数分布を示す。図 10 は試験片 A5 について荷重線変位 $10\mu\text{m}$ ごとに求められた b 値のデータ系列に対してフーリエ変換を行ったものである。周波数は破壊靱性試験の負荷開始より負荷終了までの間における波数を示している。図 10 から明らかなように b 値の周波数分布は両対数グラフ上でほぼ直線に近似することができ、岩石の破壊靱性試験における b 値の変動特性がフラクタル性をもつと言える。同様の結果が岩石の種類によらず得られており、直線の傾きは $0.9\sim 1.3$ であった。 b 値は AE 信号の振幅分布のフラクタル性に基づくパラメータであり、そのフラクタルパラメータである b 値の変動特性にもフラクタル性が観察されることは注目すべき特徴といえる。

3・3 節で議論したように、 b 値の変動は破壊過程の変化に対応すると考えることができる。このことから、 b 値の変動がフラクタル性を示すことは、破壊過程の自己相似性を示唆するものとみることができよう。例えば、図 3 に示したようなき裂パターンが微視的にも相似形に観察されるように、巨視的な破壊過程と相似な破壊過程が微視的なスケールまでの種々のスケールにおいて生じるものと考えられることができる。すなわち、従来、岩石材料で観察されてきた、構成鉱物の破壊靱性に比して大きな破壊靱性を岩石が示すこと⁽¹⁴⁾は、3・3 節までに検討した破壊プロセスゾーン形成で説明されるが、この破壊プロセスゾーンの形成機構の中に

Fig. 10 Typical power spectrum of b value fluctuation

ミクロからマクロに至る自己相似な機構が含まれていることが予想される。

4. 結 言

種々の岩石を用いて破壊靱性試験を行い、AE 測定結果とき裂進展挙動とを比較した結果、以下の知見を得た。

(1) き裂進展に伴い発生する AE の振幅分布はフラクタル的である。

(2) AE のフラクタル次元 b 値の変化挙動とき裂進展挙動の対応関係を明らかにした。すなわち、負荷の初期における破壊プロセスゾーンの形成段階においては b 値は高い値を示し、破壊プロセスゾーン内において破壊が局所化する過程においては b 値は単調減少する。破壊プロセスゾーンの成長が飽和した後の定常き裂進展段階においては b 値は平均的に一定値をとる。また、進展するき裂が既存き裂に連結すると既存き裂先端より新たな破壊プロセスゾーンの形成が開始され b 値は高い値を示す。

(3) b 値の変動特性もフラクタル的であることを見出した。このことは、破壊過程がフラクタルな相関性をもって進行していくことを示唆するものである。

本研究は、平成 6 年度文部省科学研究費、重点領域研究(1)(課題番号 05232102)ならびに国際学術研究(課題番号 05044197)によるものであることを付記し謝意を表す。また、本論文をまとめるに当たり、ロンドン大学 P. G. Meredith 教授ならびに東北大学・高安秀樹教授にご教示をいただいたことを記し感謝の意を表す。

文 献

- (1) Takahashi, H. and Abé, H., (Atkinson, B.K. 編), *Fracture Mechanics 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) Abé, H., ほか 3 名, *Appl. Mech. Rev.*, **45** 8 (1992), 367-376.
- (6) 佐藤 一志・ほか 3 名, *機論*, **56** 526, A (1990), 1400-1405.
- (7) Pine, R. J. and Batchelor A. S., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **21** (1984), 249-263.
- (8) Pine, R. J., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **26** (1989), 309-315.
- (9) Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature.*, (1983), Freeman, New York.
- (10) Brown, S. R. and Scholz, C. H., *J. Geophys. Res.*, **90** B14 (1985), 12575-12582.
- (11) Lee, Y. H., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **27** 6 (1990), 453-464.
- (12) Meredith, P. G., ほか 2 名, *Tectonophysics*, **175** (1990), 249-268.
- (13) 樋村直人・ほか 2 名, *機論*, **60** 573, A (1994), 1170-1175.
- (14) Atkinson, B. K. and Meredith, P. G., (Atkinson, B. K. 編), *Fracture Mechanics of Rock*, (1987), 477, Academic Press, London.