

## (52) AE による岩石のピーク強度予測の検討

### ESTIMATION OF PEAK STRENGTH OF ROCKS USING AE EVENTS

\* 田野久貴 ・ \*\* 吉澤大造 ・ \*\*\* 渡辺英彦

Hisataka TANO, Hidehiko WATANABE and Daizo YOSHIZAWA

This paper discusses on an estimation of peak strength(time) for rocks using the AE total counts. In order to determine their microscopic mechanical behaviors quantitatively Weibull functions with two parameters were applied to the stress-strain and AE-strain relations for Ohya tuff specimens under triaxial compression. The function applied well to these relations and these Weibull parameters( $m_s, \xi_s, m_A, \xi_A$ ) were determined respectively. The Weibull function  $F_A$  of AE total counts corresponded to peak strength can be shown by these four parameters. The parameters ( $m_s, \xi_s$ ) are given by the stress-strain curve and the other ( $m_A, \xi_A$ ) may be determined by iterative calculation during the AE measurement.

#### 1. まえがき

本報告は、AEのトータルカウントの挙動から岩石のピーク強度の予測の可能性について検討を加えたものである。イベントカウントはAE情報のなかで最も基本的なものであるが、計測システムや設定条件の相違が得られる結果に影響を及ぼし、また、これらの条件を一定とし同種の岩石に同レベルのひずみ(応力)を与えても、試験片によってそのトータルカウント数が異なるのが普通である。したがって、AEイベントの結果のみから破壊や塑性変形を議論するためには、まず応力やひずみ等をパラメーターとしてAE特性の定量化が必要である。このような観点から、1) 逐次損傷確率過程による試験片の応力変化を、ひずみをパラメーターとして定量化<sup>1), 3)</sup>する、2) AE発生確率過程をイベントカウントでとらえひずみをパラメーターとして定量化する<sup>2), 4) - 6)</sup>などを試みてきたが、本報告ではこれらの結果を踏まえ、リアルタイムのもとでトータルカウントの経時変化からピーク強度の予測の可能性について検討した結果を述べる。

#### 2. 基本的仮定

##### 2・1 応力の増加にともなう内部損傷確率の増大

一般に、材料内部にはクラックで代表されるような欠陥が先在し、応力の増加によってこれらの規模や数は増大し巨視的なクラックや破壊面となる。多くの材料では比較的低応力(ひずみ)レベルでは弾性的挙動を示し、やがて非線形性が増加することが知られている。そこで材料の構成組織はある応力レベルまで弾性であるとし、これを越えると耐荷力を失うと仮定する。このとき、全ての構成要素が同一の強度を有しているとする材料は突

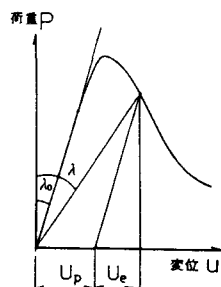


図1 内部損傷によるコンプライアンスの変化

\* 正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 応用地質(株)

\*\*\* 正会員 工修 日本大学講師 工学部土木工学科

然破壊する。すなわち脆性破壊となる。岩石の多くは脆性的ではあるが、ピーク強度以前においても応力-ひずみに非線形性が認められ、ピーク強度以後も剛性の高い試験機を用いれば応力は直ちにゼロにはならない（残留強度が存在する）。また、内部損傷の観察手段であるAEの発生状況からみても、破壊発生とピーク強度、あるいは耐荷力ゼロに至る間には時間（ひずみ）の差があることが知られている。このことは、構成材料の破壊強度は同一ではなくそれぞれ差異があることを示している。この差異は材料固有のバラツキであり、これは確率分布をもつと解釈される。この場合、先に述べた内部の在先欠陥（損傷）は材料の確率分布に含まれる。この確率分布 $F(x)$ を具体化するものとして図1に示すようなコンプライアンスの変化に注目し次式を定義した。

$$F(x) = 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda(x)} \quad (1)^{1)}$$

ここに、 $x$ はひずみ、 $\lambda_0$ は初期の、 $\lambda(x)$ はひずみ $x$ のときのそれぞれコンプライアンスである。

この確率分布関数は全ひずみ $x$ に対する塑性ひずみの占める割合を示すとも解釈される。力の釣合に式(1)を考慮するとピーク強度の条件として次式<sup>1)</sup>が得られる。

$$\frac{1}{x} = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (2)^{1)}$$

ここに、 $f(x)$ は $F(x)$ の確率密度関数である。

一般に、式(2)を満足する $x$ は解析的には得られないが、 $F(x)$ として次のWeibull確率分布関数<sup>7)</sup>を用いると

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\xi)^m] \quad (3)$$

ピーク強度時のひずみ $x_{pk}$ は次式で与えられる。

$$x_{pk} = N\xi \quad (4)$$

$$N = (1/m)^{1/m} \quad (5)$$

ここに、 $m$ および $\xi$ はWeibull定数であり、それぞれ形状および尺度のパラメーターと呼ばれる。Nと $m$ の関係を図2に示す。 $m < 1$ においてNは急増するので、バラツキが大きいとピークに到達するひずみ $x_{pk}$ は大きくなることがわかる。ピーク強度時の損傷確率 $F(x) = F(x_{pk})$ は次式で示され、バラツキを示す $m$

$$F(x_{pk}) = 1 - e^{-1/m} \quad (6)$$

のみの関数で与えられる。すなわち、ピーク時の損傷確率はその分布の形のみによることを意味している。

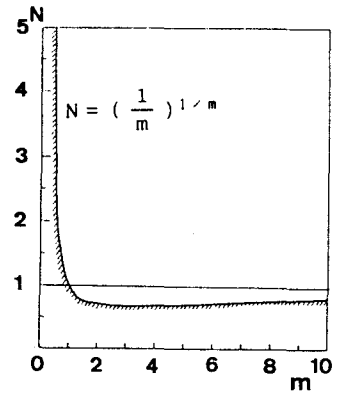


図2 Nとmの関係

表1 AE測定条件

|            |           |
|------------|-----------|
| センサー共振周波数  | 140 kHz   |
| 増幅度 プリアンプ  | 40 dB     |
| メインアンプ     | 20 dB     |
| ディスクリレベル   | 100 mV    |
| フィルター ハイパス | 100 kHz   |
| ローパス       | 500 kHz   |
| ひずみ速度      | 0.1 %/min |

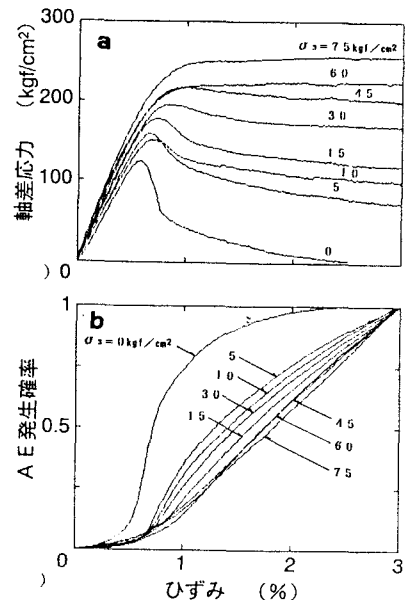


図3 軸差応力-ひずみ関係とAE発生確率（実験結果）

## 2.2 AEのトータルカウントの規準(確率)化

AE現象が内部の微視的破壊の結果であることと、前述のようにひずみをパラメーターとして内部損傷による応力の変化をWeibull確率分布で近似し得るという二つのことは、AE-ひずみ関係にもWeibull分布の適用が可能であることを示唆している。そこで、AEの発生確率分布を次式のように定義<sup>2)</sup>する。

$$F_A(x) = \frac{Q(x)}{Q(x_i)} \quad (7)$$

ここに、 $Q(x)$ 、 $Q(x_i)$ はそれぞれひずみ $x$ および最終破壊( $x_i$ )におけるトータルカウントである。応力-ひずみ関係におけると同様にAE-ひずみ関係においても次のようなWeibull分布を用いる。

$$F_A(x) = 1 - \exp [-(x / \xi_A)^{m_A}] \quad (8)$$

ここに、 $F_A(x)$ はAEトータルカウント発生確率、 $\xi_A$ および $m_A$ はそれぞれAE発生確率分布におけるWeibullの尺度とバラツキのパラメーターである。

## 3. 実験によるWeibullパラメーターの結果

実験には大谷石( $\phi 5 \times 10$  cm)を用いて、一軸および三軸圧縮試験を実施した。AEは上下加圧盤内にそれぞれ4成分の計8成分を用いて測定しその平均値を使用した。測定条件を表1に示す。図3は軸差応力-ひずみ関係とこのときのAEトータルカウントをもとに式(7)を用いて得られたAE発生確率分布である。なお、拘束圧下では便宜的にひずみ3%を最終トータルカウント $Q_i$ とした。また、図4~7にひずみをパラメーターとした内部損傷(応力)およびAE発生の各確率分布を求めた結果をWeibull確率紙上に比較して示す。バラツキのパラメーター $m$ は適用された直線の勾配、尺度のパラメーター $\xi$ はその直線と $Y=0$ 軸との交点の $x$ 座標値(ひずみ)から得られる。これらから、ここで定義された $F(x)$ および $F_A(x)$ は一軸および三軸圧縮下それぞれにおいてWeibull分布で近似し得ることがわかる。それぞれ2ないし3本の直線で近似される複合分布をなしているが、グラフ上で低ひずみレベルより順に第1、第2および第3関数と称することとし、それぞれのパラメーターに数字の添字を付けることとする。

図8にパラメーター $m$ および $\xi$ と拘束圧 $\sigma_3$ の関係を示す。同様に図9にAEにおけるパラメーター $m_A$ および $\xi_A$ と $\sigma_3$ の関係を示す。損傷およびAE発生確率パラメーターのうち二つの $\xi$ ( $\xi_s$ 、 $\xi_A$ )はともに拘束圧の増加につれて増大する。一方、 $m$ は逆に減少するもの( $m_{s1}$ 、 $m_{A1}$ 、 $m_{A2}$ )とやや増加してほぼ一

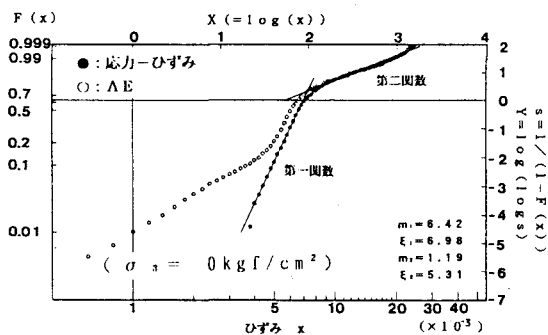


図4 損傷及びAE発生確率(Weibull表示)

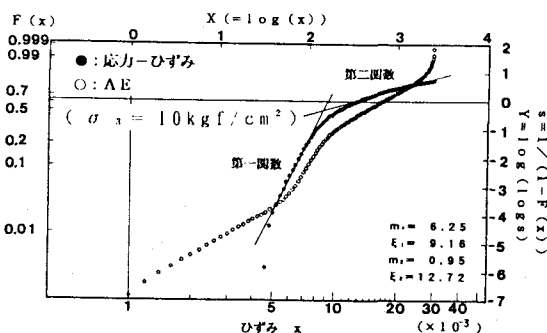


図5 損傷及びAE発生確率(Weibull表示)

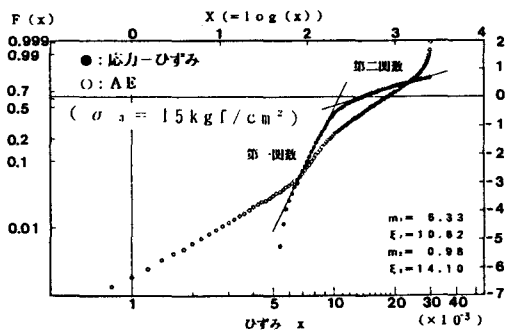


図6 損傷及びAE発生確率(Weibull表示)

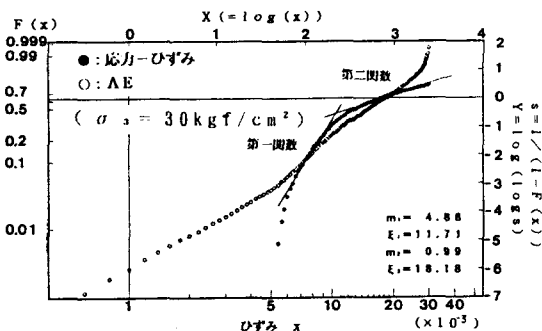


図7 損傷及びAE発生確率(Weibull表示)

定となるもの ( $m_{A3}$ ) に分類される。特にAEにおいて、第2関数の  $m_{A2}$  と第3関数の  $m_{A3}$  は拘束圧の増加に伴って互に接近し  $\sigma_3 = 7.5$  kgf/cm<sup>2</sup> 付近ではば一致している。これは、分布関数が3本で構成された複合分布が2本となることと対応している。

#### 4. AEのトータルカウントによるピーク強度の検討

室内試験では、例えば一軸圧縮破壊においてピーク強度の50%程度の応力レベルからAE頻発することが知られているが、AEトータルカウントの傾向のみからピーク強度を予測することは一般に困難である。このことは、例えば式(7)を図化した図4の結果からも明かである。すなわち、ピーク強度点は  $F_A(x)$  のグラフ上の特徴ある点とは一致していない。損傷に関する  $F(x)$  についても同様であるが、この場合は式(4)および(5)に示すように、パラツキのパラメーター  $m(m_s)$  によってピーク時の破壊確率  $F_s(x)$  は与えられるので、これに対応するピーク対応ひずみが求められる。

さて、AEの計測のみから材料のピーク強度を予測するためには、式(8)のひずみ  $x$  も他の既知の量と置き換える必要がある。そこで、式(4)よりピーク対応ひずみ  $x_{pk}$  は材料定数  $m_s$  と  $\xi_s$  の関数として得られるから、これを式(8)に代入すると式(9)が得られる。

$$\begin{aligned} F_{AE}(x_{pk}) &= 1 - \exp [-(x_{pk} / \xi_A)^{m_A}] \\ &= 1 - \exp [-(N_s \xi_s / \xi_A)^{m_A}] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)はピーク強度を示す時のAEトータル発生確率である。したがって、損傷およびAE発生確率パラメーターが与えられればピーク時のAE発生確率  $F_A$  が求められる。しかし、損傷確率パラメーター  $m_s$ 、 $\xi_s$  はあらかじめ実験等で得られているとしても、AEの計測を開始して直ちにそのパラメーター ( $m_A$ 、 $\xi_A$ ) を正確に知ることは困難である。そこで次のようにすれば良いと考えられる。すなわち、

- 1) 対象とする岩盤(岩石)の応力-ひずみ関係におけるパラメーター ( $m_s$ 、 $\xi_s$ ) を求めておく。
- 2) AEを計測してある一定時間経過後、AE-経過時間関係にWeibull分布を適用してそのパラメーター

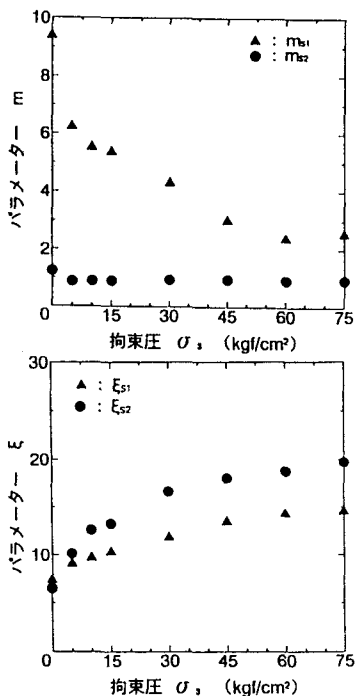


図8 拘束圧によるパラメーター ( $m_s$ 、 $\xi_s$ ) の変化 (応力-ひずみ関係による)

( $m_A$ ,  $\xi_A$ ) を求める。

3) これらを式(9)に用いてピーク強度に対応するAE発生確率を算出し、これに到達する経過時間 $t_{pk}$ を予測する。

4) 次にさらに計測(経過)時間を長く取り、同様なことを行い予測精度を高めるという手順を繰り返す。

パーソナルコンピューター等を用いてリアルタイムで行うことになるが、当然ピーク強度直前になるほど精度の高くなることが予想されるが、直前にならないと予測できないとも考えられる。しかし、計算されるパラメーター( $m_A$ ,  $\xi_A$ )は当初はその変動が大きくても、AEの発生増大に伴ってこれは次第に小さくなる。したがって、その変動の収束状況からこれらが真の値にほぼ到達しているか否かを知ることができる。この時点で得られる $m_A$ と $\xi_A$ を用いて求められる $F_A$ がピーク時のAE発生確率であり、これを与える時間 $t_{pk}$ がピーク強度到達時間となる。

## 5. まとめ

1) 材料が不均質微視構造より構成されているという考えのもとに、応力-ひずみ関係とAEトータルカウント-ひずみ関係にWeibull確率分布を適用して大谷石で実験を行った。

2) 両方の関係においてともにWeibull分布で近似可能であり、これらの挙動はWeibullの二つの確率パラメーター( $m_s$ ,  $\xi_s$ )/( $m_A$ ,  $\xi_A$ )で定量化可能である。

3) ピーク強度時のひずみ( $x_{pk}$ )は内部損傷過程(応力-ひずみ関係)の定数パラメーター( $m_s$ ,  $\xi_s$ )で示される。

4) 上記3)の結果をAE発生確率関数 $F_A(x)$ に用いると $F_A$ は上記4個の定数パラメーターで表され、ピーク時のAE発生確率が決定される。

5) パラメーター( $m_s$ ,  $\xi_s$ )は事前に、AEのそれ( $m_A$ ,  $\xi_A$ )はリアルタイムで計測し逐次修正することによりピーク強度の予測が可能である。

ピーク強度の明瞭でない拘束圧レベルでは別途に検討が必要である。

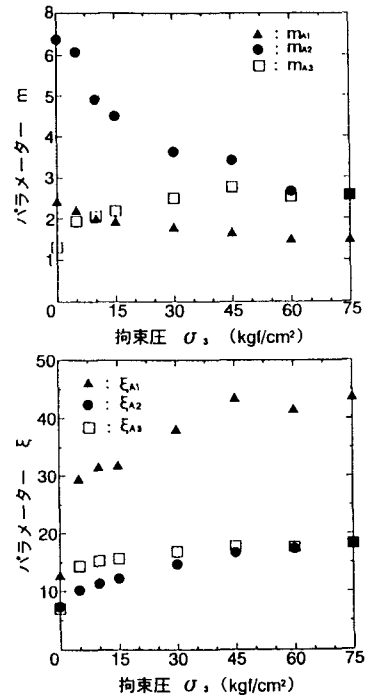


図9 拘束圧によるパラメーター( $m_A$ ,  $\xi_A$ )の変化(AE-ひずみ関係による)

## 参考文献

- 1) 田野久貴・佐武正雄：損傷確率関数による岩石の強度と変形の解析，土木学会論文集， NO.418/Ⅲ-13， pp.211-220， 1990.
- 2) 田野久貴：AEによる損傷確率に関する実験と考察，土木学会東北支部技術研究発表会概要集， pp.350-351， 1991.
- 3) 中村覚：ワイブル関数の三軸圧縮下への適用に関する基礎的研究，日本大学修士学位論文， 1993.
- 4) 吉澤大造：AEを用いた三軸下の内部損傷の定量化に関する研究，日本大学修士学位論文， 1995.
- 5) 田野・吉澤：三軸下における岩石のAE発生特性の定量化に関する実験と考察，土木学会第50回年次学1術講演会講演概要集，Ⅲ-A， pp.617-618， 1995.
- 6) 田野・吉澤・渡辺：AEによる三軸圧縮損傷の定量化に関する実験的研究，日本大学工学部紀要，Vol.37，印刷中.
- 7) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability, J. of appl. Mech., Vol.18, pp.293-297, 1951.