

岩石三軸試験時の AE 測定と PFC 解析による破壊シミュレーション

鹿島建設(株) 正会員 森 孝之 正会員 ○犬塚隆明
マレーシア理科大学 アシュラフ・イスマル
(株)レーザック 正会員 藤井宏和, 趙 越

1. はじめに

岩石の破壊に伴う微小破壊音(AE: Acoustic Emission)は岩石破壊のメカニズムに加えて地震や山はね現象を理解するうえで基礎的な要因の一つである。筆者らは岩石の破壊に伴う AE 挙動に注目し、その進展過程を把握することを目的として、岩石の三軸試験時に AE 計測を実施した。また、数値解析(粒状体個別要素法)により岩石の破壊に伴う AE 発生過程をシミュレートした。本論文では三軸試験による岩石の破壊過程に伴う AE 発生挙動の特徴について、試験と解析結果を報告する。

2. 岩石三軸試験時の AE 測定

三軸試験に使用した岩石は表-1 に示すとおり比較的硬質な花崗岩である。供試体の寸法は $\phi 50 \times 100, 60 \times 120$, 側圧は 0.5, 10, 20, 30, 40MPa の条件で UU 試験を実施した。岩石の三軸試験に伴う AE 信号としてイベント数, 周波数, 振幅値, b 値を図-1 に示すが, 破壊に伴う AE 挙動の特徴は以下のとおりである。

まず, AE イベント数は破壊直前から急増し, その後沈静化する。AE 波形の周波数は破壊に伴い低下する。振幅値は破壊時に著しく大きくなり, その後も比較的大きな振幅値も散発的に発生する。また, 地震研究分野におけるパラメータである b 値は破壊時に低下し, その後破壊前のレベルに戻る。これらの測定結果は岩石供試体の差応力の増大に伴う微小破壊の発生や破壊過程を捉えたものであると考えられる。従って, これら AE パラメータの変化を段階的にゾーン分けすることで, 岩石の健全度や破壊の進展度の評価が可能である。

表-1 岩石の基本物性値

岩石名		花崗岩
単位体積重量 γ		2.65 (g/cm ³)
超音波速度 V_p		5.15 (km/sec)
せん断強度特性	粘着力 C	40.4 (MPa)
	内部摩擦角 ϕ	54 (°)
一軸圧縮強度 σ_c		248 (MPa)

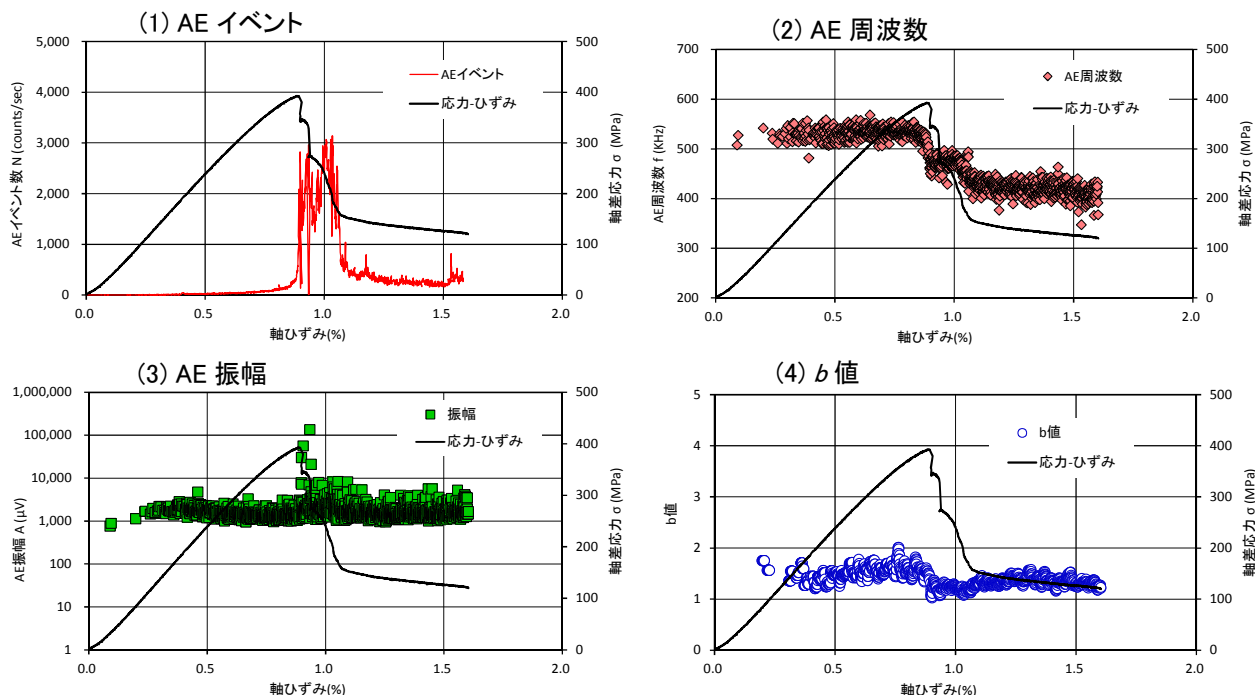


図-1 岩石三軸試験に伴う AE 挙動(側圧 $\sigma_3=10\text{MPa}$)

キーワード 岩石, 三軸試験, 破壊, AE, 粒状体個別要素法, 数値解析

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) TEL 042-485-1111

3. 数値解析による三軸圧縮シミュレーション

粒状体個別要素法を用いて三軸圧縮試験のシミュレートを行い、応力経路に沿って実測値の AE パラメータと比較した。個別要素法は、岩石や岩盤を微粒子の集合体と仮定し、粒状間の結合の破断によって破壊を表現する(図-2)。

シミュレーションでは、実際の試験結果とほぼ同一の応力-ひずみ曲線が得られるように粒子間パラメータを設定することでモデルの構築を行った(図-3)。解析の実施内容については、図-1の試験ケースを例にとり、説明する。

個別要素法では、AE パラメータを直接評価できないため、青木ら¹⁾が提案したクラック発生数、空隙率に加えて、筆者らが新しく提案する新規亀裂開口量を用いて、岩石破壊と AE パラメータの関連性を検討した。

(1) AE 発生数のシミュレーション(図-4)

AE 発生数は粒子間のボンド切れ(クラック数)と比較した。AE 発生数とクラック発生数は、ともに降伏応力後に増加し始め、ピーク応力で最大となり、その後残留応力まで減少している。このように両パラメータが良く対応していることが確認できた。

(2) AE 周波数のシミュレーション (図-5)

AE 周波数は一般に岩盤の緻密さに影響を受けると考えられているため、解析上では空隙率の逆数と比較した。一般に、破壊の進行にともない岩石の緻密さは失われ、AE の高周波成分が減衰し、低周波成分が卓越すると考えられており、解析結果はこの物理現象を裏付けている。

(3) b 値のシミュレーション (図-6)

b 値は AE の最大振幅とその頻度から破壊規模の大きさを評価する指標であり、破壊時のひずみエネルギーが大きくなると、振幅の大きい AE が発生し、 b 値が低下すると考えられる。解析では破壊時のひずみエネルギーの大きさに関係する亀裂開口量に着目し、亀裂開口量の大きさの頻度分布の傾き(亀裂開口量に関する係数)を求めた。両パラメータは良く対応しており、これらのパラメータの関連性は、上記の解釈と整合的であることを確認できた。

4. まとめ

数値解析により三軸試験時の岩石の破壊現象と AE 挙動をシミュレートでき、破壊現象を AE によって評価するための基礎的な知見を得ることができた。今後は、この知見をもとに三次元モデル解析による検証を実施する予定である。

参考文献

1) 青木ほか；岩石の破壊過程の解析に対する粒状体個別要素法の適用，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp219-224, 2006

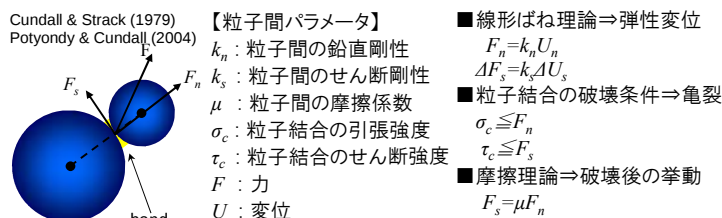


図-2 粒状体個別要素法の概要

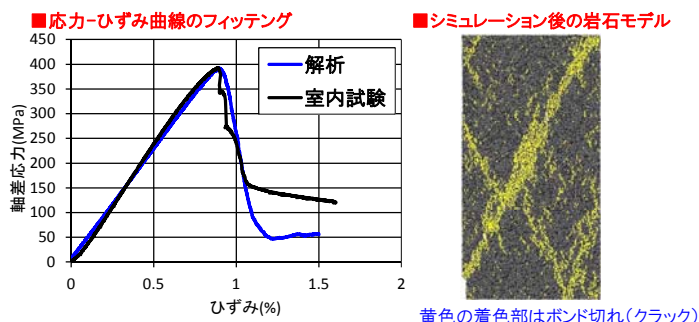


図-3 応力-ひずみ曲線のフィッティング

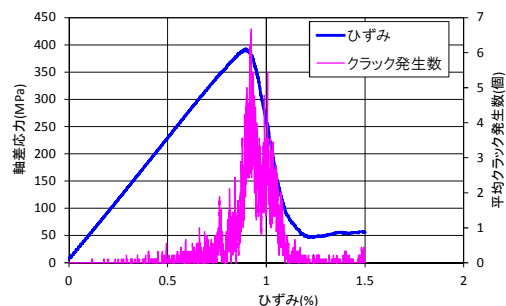


図-4 AE イベント数(クラック数)

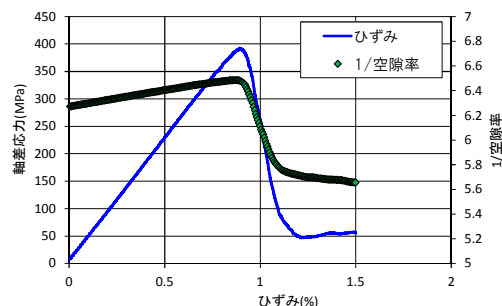


図-5 AE 周波数(1/空隙率)

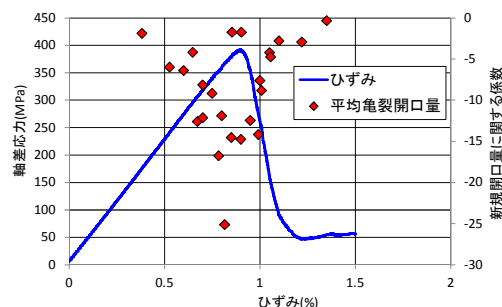


図-6 b 値(亀裂開口量)