

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

青木謙治¹ 水戸義忠² 南 将行³ 森 孝之⁴ 岡村 武⁵ 黒川 進⁵

¹正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 東京電力株式会社 (〒100-0011 東京都千代田区幸町1-1-3)

⁴正会員 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁵京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

地下空洞掘削時に形成される掘削影響領域(EDZ)の分布および特性を精度良く評価するための実用的な方法として、岩盤内の応力変化や亀裂の発生・進展を鋭敏に検知できるAE計測に基づく計測管理システムを挙げることができる。本研究では、まず明確な条件下でAE震源の特定や亀裂の観測を行うことができる室内試験(一軸圧縮試験)を実施し、供試体の破壊モードとAE発生モードから、AE震源と亀裂の発生・進展過程の関連性について把握した。次に、粒状体個別要素法を用いてこの試験の数値シミュレーションを行い、解析結果と岩石供試体の亀裂発生状況やAE震源分布を比較検討することで、岩石の破壊過程の予測解析手法としての粒状体個別剛体要素法の性能を検証した。

Key Words : rock failure, distinct element method (DEM), bonded particles model (BPM), acoustic emission (AE)

1 結 言

地下空洞掘削時に周辺岩盤において形成される掘削影響領域(EDZ)の分布および特性を精度良く予測および評価することは、高レベル放射性廃棄物地層処分の安全性評価におけるモデルの構築および処分施設の設計・計測管理上きわめて重要な課題の1つとなっている。

このような予測・評価のための実用的な方法として、岩盤内応力の変化や亀裂の発生・進展を鋭敏に検知することができるAE(Acoustic Emission)計測に基づくEDZの予測・評価システムを挙げることができる。

このAE計測に基づくEDZの予測・評価システムとは、まず予測解析によってEDZの分布・特性を予測し、実際の掘削時に計測されたAEの挙動から解析による予測結果の妥当性を確認し、必要に応じて解析に修正を加えていくといったシステムである。よって、このようなシステムの構築にあたっては、AE、EDZならびに応力変化の関連性を把握すること、およびそれらの関連性を表現できる予測解析手法の構築が必要となる。これらの課題については、これまでに地下発電所を対象として検討がなされてきた¹⁾。しかしながら、このシステ

ムを高レベル放射性廃棄物地層処分場に適用するためには、空洞の安定性だけでなく、貯蔵物質に対する遮蔽性の確保のために、掘削に伴い生じる亀裂の発生位置まで正確に把握する必要がある。AEは、固体が塑性変形あるいは破壊する際にそれまで貯えられていたひずみエネルギーが解放されて弾性波の生じる現象であり²⁾、AEの発生機構としては、微細な割れ、結晶粒界における摩擦、塑性領域における転位などが挙げられる。このため、掘削影響領域における岩盤内応力変化だけでなく、亀裂の発生・進展も直接的に評価できるものと考えられる。

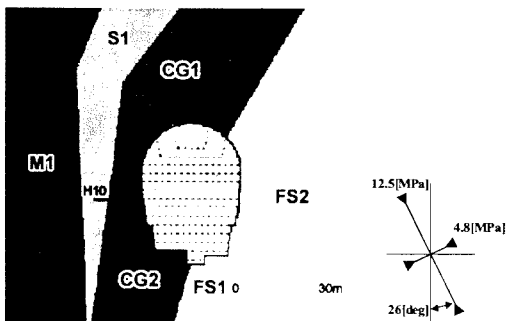
一方、予測解析についても、空洞掘削前に数値解析によって掘削後の岩盤内の応力分布はもとより亀裂の空間分布についても高精度に予測できる解析手法の確立が必要になるが、このような要求機能に対して有効と考えられる解析手法としては、結合粒状体モデル(Bonded Particles Model)を用いた個別要素法(Distinct Element Method)が挙げられる。

そこで、本研究では、まず明確な条件下でAE震源の特定や亀裂の観測を行うことができる室内試験(一軸圧縮試験)を実施し、供試体の破壊モードとAE発生モードから、AE震源と亀裂の発生・進展過程の関連性について把握した。次に、粒状

体個別要素法を用いてこの試験の数値シミュレーションを行い、解析結果と実際の岩石供試体の亀裂発生状況やAE震源分布を比較検討することで、岩石の破壊過程の予測解析手法としての粒状体個別要素法の性能を検証した。

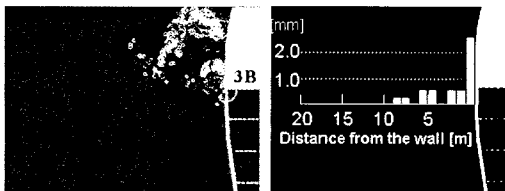
2. 現場における粒状体DEMの解析例

著者らは、過去に粒状体個別剛体要素法を用いて東京電力㈱神流川地下発電所（図-1(a)に地質断面図を示す）の本体空洞の逐次掘削シミュレーションを行い、ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を予測するとともに、計測結果との比較を行った。

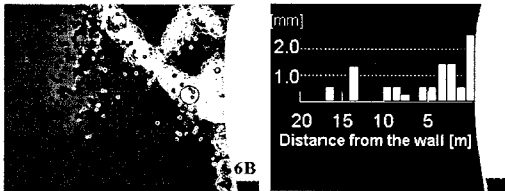


(a)空洞周辺地質図

M1:mudstone, S1:sandstone, CG1:conglomerate, CG2 :coarse sandstone, FS1:sandstone, FS1:sandstone.



(b) 3ベンチ掘削後の解析結果と計測結果の比較



(c) 6ベンチ掘削後の解析結果と計測結果の比較

白点：発生した引張亀裂、黒点：発生したせん断亀裂、灰点：前段階掘削までに発生した亀裂（DEM：左）

図-1 DEM 解析における発生亀裂(左)と現場で実測された亀裂開口量(右)の比較

図-1(b)(c)は、DEM解析における発生亀裂の分布と、4ベンチ付近に設定された計測線上においてボアホールテレビにより観測された亀裂開口量の分布を、3ベンチおよび6ベンチ掘削時にそれぞれ比較したものである。計測結果を見ると、3ベンチ掘削時の亀裂発生は壁面近傍のみであり、6ベンチ掘削段階になると亀裂発生が岩盤深部に及ぶとともに、壁面近傍の亀裂がさらに開口しているが、この計測結果と解析結果が非常に良く一致していることがわかる。そこで、本研究においては、このようなDEM解析結果の妥当性をさらに検証するために、明確な条件下でAE震源の特定や亀裂の観測を行うことができる室内試験を通した一連の検討を行った。

3 AE震源特定のための室内試験

(1) 試験の方法

室内試験にあたって、東京電力㈱神流川地下発電所調査時の同一層準のボーリングコアから、中生代粗粒砂岩の供試体を2個作成した。この試験では、問題を単純化し、2次元的な検討ができるように、供試体の形状を、縦125mm×横50mm×奥行き15mmの板状とした。図-2に示した写真とスケッチからわかるように、両供試体には方解石脈が顕著に分布し、一部に開口が認められる。

室内試験としては、AE震源の特定のためのセンサーの設置が容易で、破壊状況を直接観測できる一軸圧縮試験を行った。供試体の載荷は、変位が0.01mm/minの速度で生じるように制御（変位制御）して行った。また、供試体中央部前面、背面、両側面にひずみゲージを貼付し、荷重が供試体に均等に作用していることを確認しながら試験を実施した。測定は、載荷軸方向の変位、荷重の2点とした。

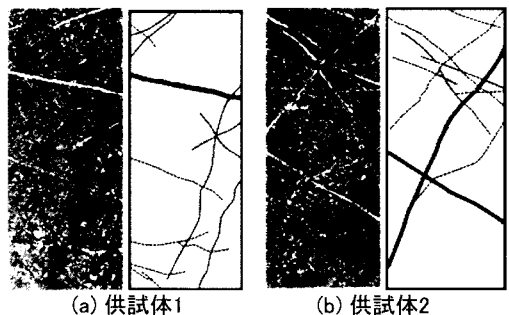


図-2 供試体の写真とカルサイト脈のスケッチ
(太線は一部が開口しているもの)

試験に使用するAEセンサー（直径12mm、高さ40mm）については、波形解析を考慮してセンサーの特性が比較的表れにくい広帯域型（100kHz～1MHz間で受信感度が比較的平坦）を用いた。また電気ノイズを省くために100kHz～1MHzのバンドパスフィルターを使用した。AEセンサーは図-3に示すように供試体の表面に6つ設置した。

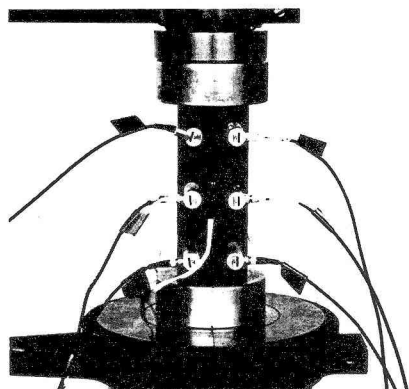


図-3 AEセンサーの配置

(2) AE震源特定方法

AE震源位置の特定にあたっては、センサー間のAE信号の伝播時間差を利用して、以下の手順で求めた³⁾。

a) 観測波形から初動時間の読み取り

AE波形の初動立ち上がり時間を目視で読み取り、第一到着チャンネルとの時間差（ ΔT_i ）で整理する。

b) 座標軸および格子点の設定

供試体をほぼ網羅する幅50mm、高さ120mm内で座標を設定する。供試体の中央を原点とし、縦方向をy軸、横方向をx軸とする。格子点は1mm間隔に設ける。

c) 伝播時間差によるAE震源特定

今回震源を特定するにあたっては、3つ以上のAEセンサーで受信したAE波のみを対象とした。

3. AE震源と岩石の破壊過程との関連性

(1) 試験結果

図-4に両供試体の応力-ひずみ曲線と各ひずみレベルでのAE発生数を示す。いずれの供試体においても、AE挙動は次のような期間（ひずみレベル）で特徴付けることができる。

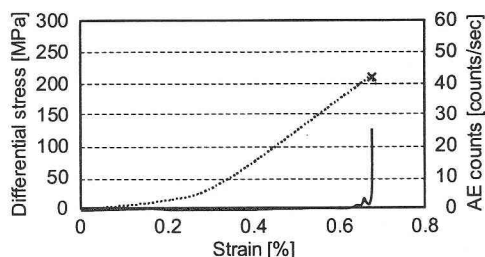
I期：AEの発生が少なく、発生間隔も不規則な期間

II期：AEが一定の割合で発生するようになる期間

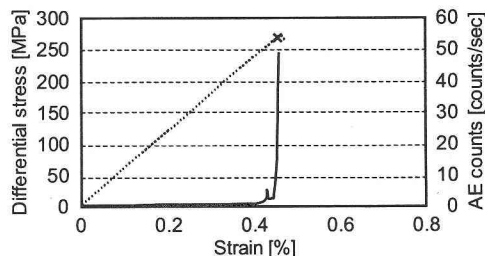
III期：AEの増加が顕著な期間

IV期：AEが急激に増加し、破壊に至る期間

図-5に両供試体の試験前・試験後のスケッチ図およびAE震源特定結果を示す。なお、AE震源分布の推移を把握するため、上記の4つの期間毎に結果を示した。

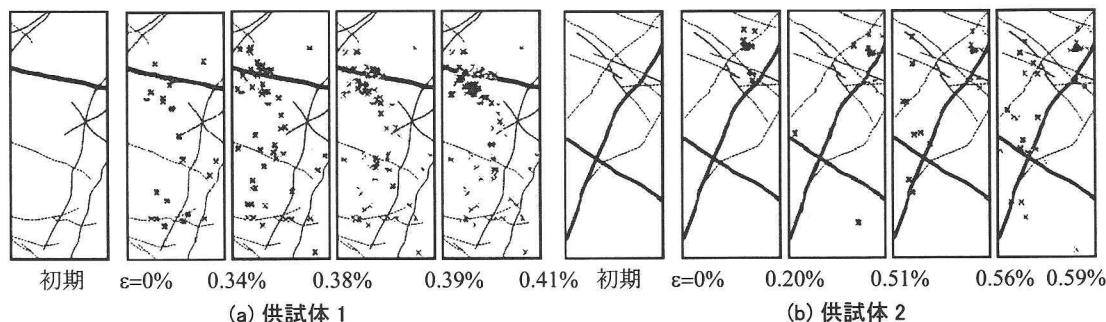


(a) 供試体1



(b) 供試体2

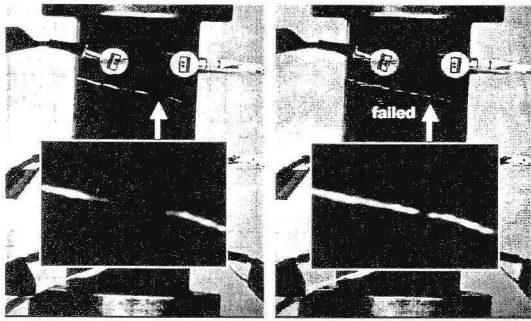
図-4 応力-ひずみ曲線(点線)とAEカウント(実線)



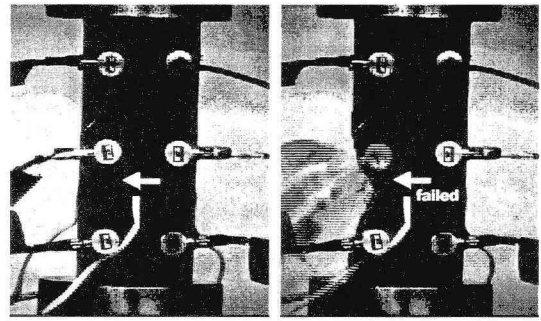
(a) 供試体 1

(b) 供試体 2

図-5 AE 震源の空間分布(下方の数字はひずみレベルを表す。黒色の×は発生したAEの震源、灰色の×は前のひずみレベルまでに発生したAEの震源を示す。)



(a) 供試体 1



(b) 供試体 2

図-6 破壊直前の供試体の状況

ここで、両供試体について、AE震源特定結果および実際の亀裂発生状況からAE震源と岩石の破壊状況の関連性について検討すると次の通りである。

a) 供試体1

図-2からわかるように、供試体1には上半部に緩傾斜の明瞭な潜在亀裂が存在しており、試験後の供試体の観察から、この潜在亀裂を中心とする不連続面の周辺に最終的な破壊面が形成されたことがわかった。AE震源分布を見ると、まず全期間を通して、最終的に形成された破壊面の周辺にAE震源が集中していることがわかる。また、各期間においては、Ⅰ期・Ⅱ期では、供試体の全体に不規則に分布しているが、Ⅲ期・Ⅳ期になると、特に潜在亀裂の周辺に集中して分布しており、明瞭な潜在亀裂に沿って破壊面が形成されていることが推測される。破壊直前の状況写真（図-6(a)）は、この潜在亀裂に沿って破壊面が進展し、最終的な破壊に至る様子を示している。このことから、AE震源が亀裂の発生・進展をよく捉えていることがわかる。

b) 供試体2

図-2からわかるように、供試体2には、縦方向に連続性の高い潜在亀裂が存在しており、試験後の供試体の観察から、この縦方向の不連続面に沿って最終的な破壊面が形成されたことがわかった。AE震源分布を見ると、まず全期間を通して、供試体1の場合と同様に最終的に形成された破壊面の周辺にAE震源が集中していることがわかる。また、各期間においては、Ⅰ期・Ⅱ期では、特に縦方向に連続性の高い潜在亀裂の上部にAE震源が集中しており、この部分に微小破壊が集中的に生じているものと思われる。Ⅲ期・Ⅳ期になるとこの潜在亀裂面の下部および他の破壊面の周辺にも集中して分布するようになる。破壊直前の状況写真（図-6(b)）は、この潜在亀裂によって形成されたブロックが破壊し、最終的な破壊に至る様子を示している。このことから、供試体2についてもAE震源が亀裂の発生・進展をよく捉えていることがわかる。

以上の検討により、岩石の破壊が進行すると、

最終的に形成される特定の破壊面の周辺にAE震源が集中することになるが、このような岩石の構造に起因する特定の破壊モードにおける主要な破壊面の形成過程をAE震源がよく捉えていることが判明した。

4. 粒状体個別要素法による岩石破壊過程の数値解析

ここでは、粒状体個別要素法⁴⁾⁵⁾により一軸圧縮試験のシミュレーションを行い、岩石供試体内部の微小亀裂の発生・進展の過程と実際の破壊状況およびAE震源分布と比較することで、岩石破壊過程の予測解析手法としての粒状体個別要素法の性能を検証する。

粒状体個別要素法は、岩石や岩盤を微小な粒状物質の集合体として仮定し、粒状要素間の結合の破断によって破壊を表現するため、岩盤亀裂の発生・進展を直接的かつ客観的に表現することができる。また、要素の大きさも非常に細かく設定できるため、岩石・岩盤内に分布する不連続面の幾何学的構造を現実に近い形でモデル化することができるという特長も有する。しかしながら、これまでに現実の問題に対する解析例が少ないため、実務にはほとんど用いられていないのが現状である。

(1) 結合粒状体モデルによる供試体のモデル化

供試体の結合粒状体モデルを作成するにあたっては、粒子間の①垂直／せん断剛性、②垂直／せん断結合強度、③摩擦といった微視的パラメータ（micro-parameters）を適切に設定することによって、岩石材料の応力－ひずみ曲線に代表される巨視的挙動（macroscopic behavior）を表現する必要がある。基本的には、実際の応力－ひずみ曲線に適合するように、微視的パラメータの値を逐次変化させて一軸圧縮試験のシミュレーションを実行し、十分に曲線に適合した時点でモデル化が終了する。

ここで、実験に用いた岩石供試体には、方解石脈が多数分布しており、それらの一部には開口が認められる。モデル化にあたっては、これら方解石脈の箇所に位置する粒子間結合強度を一定の割合で低下させることでモデルに表現した。具体的には、過去の同種の岩石で実施したパラメータスタディ結果を基に、方解石脈に相当する部分については粒子間の結合強度を一般部の1/2に、一部開口が認められる部分については1/3に設定した。

(2) 破壊過程の予測結果

作成した結合粒状体モデルを用いて一軸圧縮試験のシミュレーションを行い、解析結果と実際の破壊状況ならびにAE震源分布とを比較する。図-7に両供試体のモデル図・試験後のスケッチ図および解析で求められた亀裂の発生状況を示す。なお、亀裂発生分布の推移を把握するため、図-5と同様に4つの期間毎に結果を示した。

両供試体について、解析によって予測した亀裂の発生・進展状況と実際の亀裂発生状況、AE震源分布との関連について検討すると次の通りである。

a) 供試体1

解析によって予測した亀裂の発生・進展状況と実際の亀裂発生状況を比較すると、よく一致していることがわかる。各期間における亀裂分布についてみると、ひずみが増加するに伴って、最終的に形成される巨視的な破壊面の周辺に亀裂が集中していくという破壊面の形成過程がわかる。特に緩傾斜の潜在亀裂の周辺に亀裂が多数分布しているが、これはAE震源の分布状況（図-5）や破壊直前の亀裂進展状況（図-6）からわかる実際の破壊面の形成過程とよく一致した結果であり、解析結果が亀裂の発生・進展過程をよく表現していると思われる。

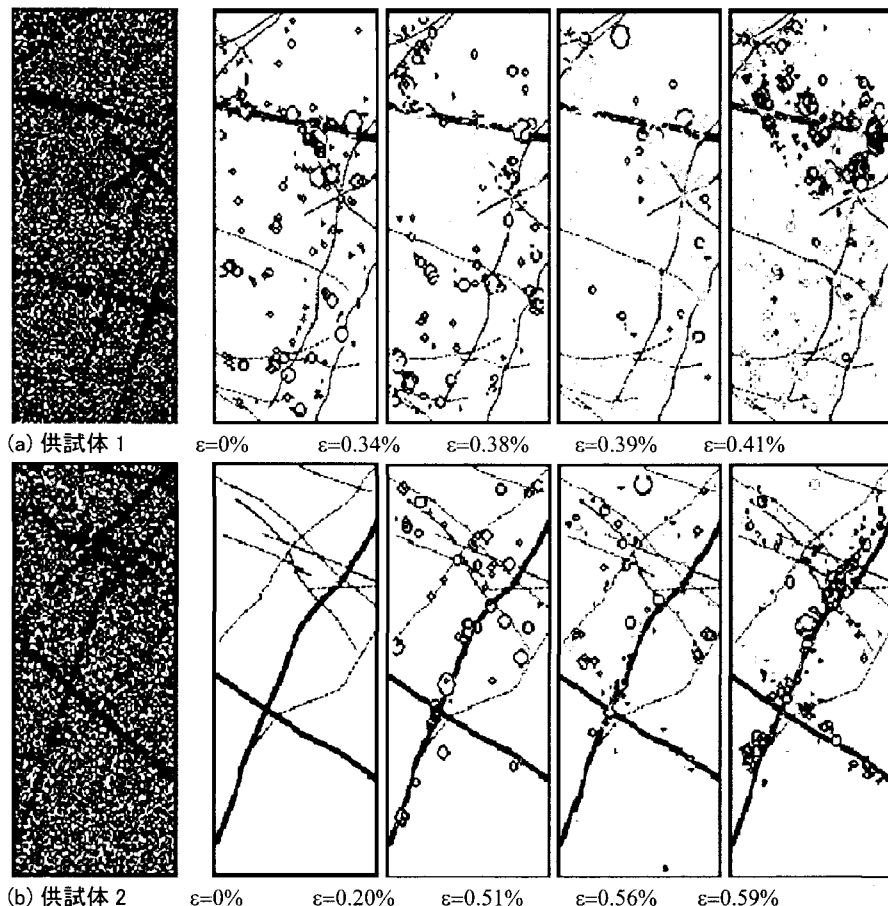


図-7 粒状体 DEM 解析において発生した亀裂の空間分布(下方の数字はひずみレベルを表す。黒色の○は発生した亀裂の位置、灰色の○は前のひずみレベルまでに発生した亀裂の位置、○の大きさは破壊時のひずみエネルギーを表す。)

さらに、図-8に示すように、供試体を縦方向に3等分し、上部・中部・下部のAE発生数と亀裂発生数を比較した。本図を見ると、両者ともに主要な破壊面である潜在亀裂が存在する上部が最も多くなっており、あまり破壊面が形成されなかった下部は少なくなっている。このようにAE震源と亀裂の分布状況はよく一致している。なお、粒子の配列を変えたモデルについてもほぼ同一の結果が得られたことから、解析によって表現された亀裂がランダムなものではなく、岩石の構造の影響を受け決定論的に形成されたものであることを付記する。

b) 供試体2

供試体2についても解析によって予測した亀裂の発生・進展状況と実際の亀裂発生状況を比較すると、よく一致していることがわかる。各期間における亀裂分布についてみると、これも供試体1の場合と同様に、ひずみが増加するに伴って、最終的に形成される巨視的な破壊面の周辺に亀裂が集中していくという破壊面の形成過程がわかる。特に縦方向の潜在亀裂の周辺に亀裂が多数分布し、破壊直前で下方に存在する緩傾斜の方解石脈周辺にも亀裂発生が集中するが、これはAE震源の分布状況（図-5）や破壊直前の亀裂進展状況（図-6）からわかる実際の破壊面の形成過程とよく一致した結果であり、解析結果が亀裂の発生・進展過程をよく表現していると思われる。

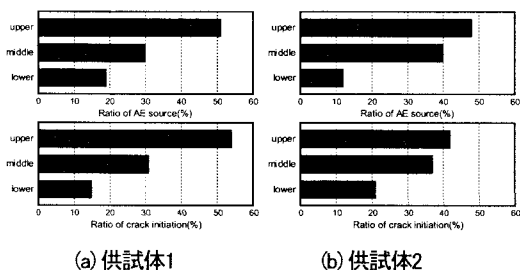


図-8 AE震源(上)と亀裂(下)の空間分布の比較

5. 結 言

本研究では、明確な条件下でAE震源の特定や亀裂の観測を行うことができる室内試験（一軸圧縮試験）を実施し、供試体の破壊モードとAE発生モードから、AE震源と亀裂の発生・進展過程の関連性について把握した上で、粒状体個別要素法を用いてこの試験の数値シミュレーションを行った。

シミュレーションの結果と実際の岩石供試体の亀裂発生状況を合わせて検討したところ、岩石の構造に起因して生じた実際の破壊状況（亀裂の空間分布）がよく再現されていることがわかった。このことから、本手法を用いて岩石の亀裂の発生・進展過程を高精度に予測できることが示され、岩石（岩盤）の破壊過程の予測解析手法として粒状体個別要素法が高い適用性を有することを明らかにした。また、AE震源分布の推移ともよく対応することから、AE計測に基づく高地圧下の地下空洞の情報化設計・施工システムにおける予測解析のツールとして有用な方法となる可能性が判明した。

参考文献

- 1) K. Aoki, K. Toida, and K. Koshizuka: The stability monitoring of rock caverns by acoustic emission measurement, Journal of the Mining and Materials processing Institute of Japan, Vol.107, No.7, pp.489-494, 1991
- 2) M. Onogami, K. Yamaguchi, H. Nakasa, K. Sano, E. Isono and T. Watanabe: Acoustic emission - bases and applications, 125p. Japan Corona Pub. Co., 1979
- 3) T. Ishida: An introduction to acoustic emission of rock, 213p. Kinmiraiasha, 1999
- 4) D.O. Potyondy and P.A. Cundall: A bonded-particle model for rock, Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.41, No.8, pp.1329-1364, 2004
- 5) Itasca Consulting Group, Inc.: Particle Flow Code in 2 Dimensions Theory and Background, 111p. Itasca, 1999

APPLICATION OF BONDED PARTICLES MODEL TO THE ANALYSIS OF ROCK FAILURE PROCESS

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Masayuki MINAMI, Takayuki MORI,
Takeshi OKAMURA and Susumu KUROKAWA

To predict the fracturing process around the underground cavern in highly stressed rock is important for the effective design of HLW repository. In this study, the uniaxial test is carried out, which let us observe cracks of the rock specimen and determine AE sources on ideal condition. As a result it is clarified that there is a close relationship between the distribution of AE sources and fracturing processes of the rock specimen. Then the fracturing processes in the uniaxial test are simulated by DEM using bonded particles model. The results of the simulation show good agreement not only with the fracturing behavior but also with the spatial distribution of AE sources. Thus, it is clarified that DEM simulation provides high performance to predict the rock fracturing process, and AE measurement is effective to monitor it.