

岩石の破壊過程における微小破壊音の挙動に関する研究

Acoustic Emission and its behavior throughout the process of rock failure

青木謙治*・水戸義忠**・森孝之**・前島俊雄***・山本健太****

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Takayuki MORI, Toshio MAESHIMA, Kenta YAMAMOTO

Geological disposal of high-level radioactive waste is one of the underground excavation that is required in the near future. This facility is planned to be constructed at great depth where the stress state is very high. To construct such facilities, a cavern design and a measurement system that is paid attention to the stress state instead of the displacement of the abutment is needed. In this study, tri-axial compression tests on rock samples and its simulations using distinct element method (DEM)¹⁾ are performed, in order to clarify the relationship between rock failure mechanism and acoustic emission (AE) which is available to grasp the stress change.

Key Words: rock failure, tri-axial compression test, acoustic emission (AE), distinct element method (DEM)

1. 研究の目的

将来建設予定の岩盤空洞として、高レベル放射性廃棄物地層処分場が挙げられるが、この施設は大深度・高地圧下の岩盤内に建設が予定されているため、応力とその変化に着目した空洞の計測管理が必要となる。また、わが国における地下発電所のケースヒストリーから、岩盤微小破壊音(Acoustic Emission : AE)が応力変化を鋭敏に検知することが徐々に明らかになっている²⁾。本研究では、高剛性三軸圧縮試験を実施し、AE パラメータを分析するとともに粒状体個別剛体要素法によるシミュレーションを行うことで破壊現象と応力・AE の関連性を検討する。

2. 高剛性三軸圧縮試験

2.1 応力-ひずみ曲線と AE パラメータの関連性の検討

破壊強度点以降の完全な応力-ひずみ曲線を得ることができる高剛性三軸圧縮試験を実施し、载荷の各段階において発生する AE を計測・分析することで、岩石の破壊に伴う応力変化と AE パラメータの挙動の関連性を把握するとともに、拘束圧が AE パラメータの挙動に与える影響について分析した。今回行われた室内岩石三軸圧縮試験の供試体は東京電力㈱神流川地下発電所掘削時のボーリングコアより採取されたものである。まず、拘束応力一定条件下(10MPa)で高剛性三軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線と AE パラメータの関連性を検討した。そこで、比較的均質でやや延性的な破壊挙動を示す岩種と、潜在亀裂などの弱面を有し極めて脆性的な破壊挙動を示す岩種に分類し、応力経路による AE パラメータの挙動の差異を調べた。図-1 に(a)比較的均質な供試体(case-1)と、(b)弱面を有する供試体(case-2)の三軸圧縮試験によって得られた応力-ひずみ曲線と AE パラメータ(発生数・卓越周波数・m 値)の推移を示す。

*工学博士 京都大学大学院 工学研究科

**工学博士 鹿島建設 (株)

***工学博士 東京電力 (株)

****修士 京都大学大学院 工学研究科

(1) AE 発生数

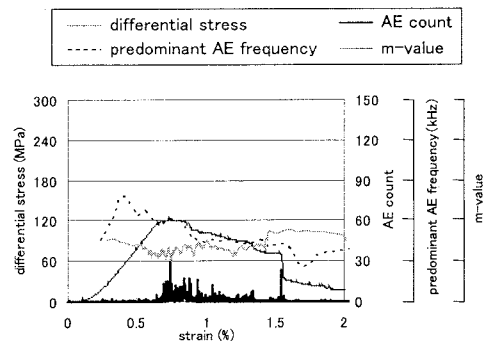
極めて脆性的な破壊挙動を示す岩種においては、ピーク強度付近で AE が顕著に発生した後、急激に発生数が減少する。一方、やや延性的な破壊挙動を示す岩種においては、ピーク強度付近で顕著に発生した後も、AE の発生は続き、その後緩やかに減少している。

(2) AE 周波数

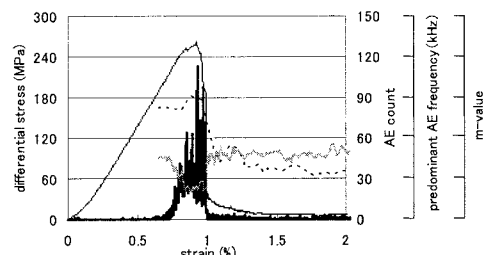
ピーク強度付近では高周波の AE が卓越するが、その後低周波の AE が卓越し始める。極めて脆性的な破壊挙動を示す岩種においては、急激に低周波の AE が卓越し、やや延性的な破壊挙動を示す岩種においては低周波の AE が徐々に卓越する。

(3) m 値

降伏強度付近から m 値の低下が始まり、残留強度において破壊前のレベルに戻る反転現象が認められる。このことから、m 値の挙動をみることで、応力経路における降伏強度点や残留強度点を把握することが可能と考えられる。



(a) 比較的な均質な供試体 (case-1)



(b) 弱面を有する供試体 (case-2)

図-1 三軸圧縮試験結果と AE 計測結果
(岩石材料の構造の差異による比較)

2.2 拘束圧が AE パラメータに与える影響の検討

次に、拘束圧の違いによる AE パラメータの挙動の差異を検討するために、中粒砂岩供試体を用いて、拘束圧を 3 種類 (0.5MPa・6MPa・15MPa) とえて試験を行った。図-2 は異なる拘束圧を作用させた三軸圧縮試験によって得られた応力-ひずみ曲線と AE パラメータ (発生数・卓越周波数・m 値) の推移を示したものである。まず、各供試体の応力-ひずみ曲線に着目すると、拘束圧が大きくなるほど、ピーク応力及び残留応力が大きくなる傾向にある。また、拘束圧が小さい場合にはピーク応力に達した後、急激に応力が低下する極めて脆性的な破壊過程を示すのに対し、拘束圧の増加とともに、ピーク応力後に緩やかに応力が低下するやや延性的な破壊過程を示すことがわかる。

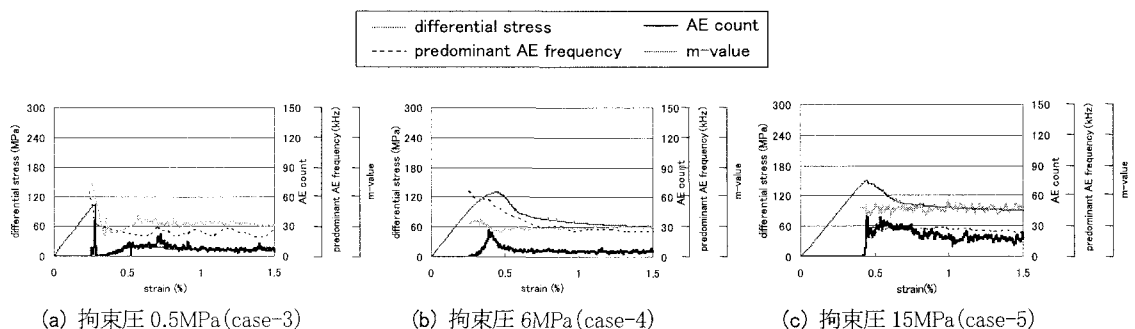


図-2 三軸圧縮試験と AE 計測結果 (拘束圧の差異による比較)

また、各供試体の AE パラメータ (発生数・卓越周波数・m 値) の挙動を比較、検討することによって以下の知見が得られた。

(1) AE 発生数

拘束圧が低い場合は、ピーク応力付近で AE が多数発生し、応力低下後、急激に減少する。一方で、拘束圧が高い場合は、ピーク応力付近で AE が多数発生し、ピーク応力後の広範囲のひずみ区間にわたって継続的に発生し、徐々に減少する。

(2) 卓越周波数

拘束圧が低い場合は、ピーク応力後急激に低下し、全体の変化量が大きい。一方で、拘束圧が高い場合は、ピーク応力後徐々に低下し、全体の変化量が小さい。

(3) m 値

拘束圧が低い場合は、降伏応力後急激に減少し、応力低下後に反転する。一方で、拘束圧が高い場合は、降伏応力後緩やかに減少し、応力低下後の反転現象はあまり明瞭で無く変化量が小さい。

3. 粒状体個別剛体要素法による破壊現象のシミュレーション

岩石の破壊に至るまでの応力経路と岩石の破壊現象の関連性を把握することを目的として、高剛性三軸圧縮試験の結果得られた応力-ひずみ曲線を粒状体個別要素法解析によってカーブフィッティングし、破壊に至るまでの応力経路において観測される岩石の破壊現象(亀裂発生状況・岩石の緻密さ・破壊の規模)についての詳しい検討を行った。

3.1 亀裂発生過程

破壊面の形成過程を亀裂の発生位置や亀裂の規模を表す破壊時亀裂開口量増分に着目して検討する。図-3、図-4 は、破壊過程において各供試体モデルに発生した亀裂の発生位置、またその開口量増分を、降伏応力やピーク応力といった応力が特徴的な点およびピーク応力以降のひずみ 0.2%毎の点で囲まれた区間にわけて表したものである。いずれの供試体においても、軸差応力が降伏応力を超えたあたりから亀裂の発生数が増加し、特にピーク応力直後に開口量の大きな亀裂が多数発生していることがわかる。また、ピーク応力以降の亀裂の発生過程には供試体の岩石材料の構造の差異や拘束圧条件の差異によって顕著な違いが見られた。

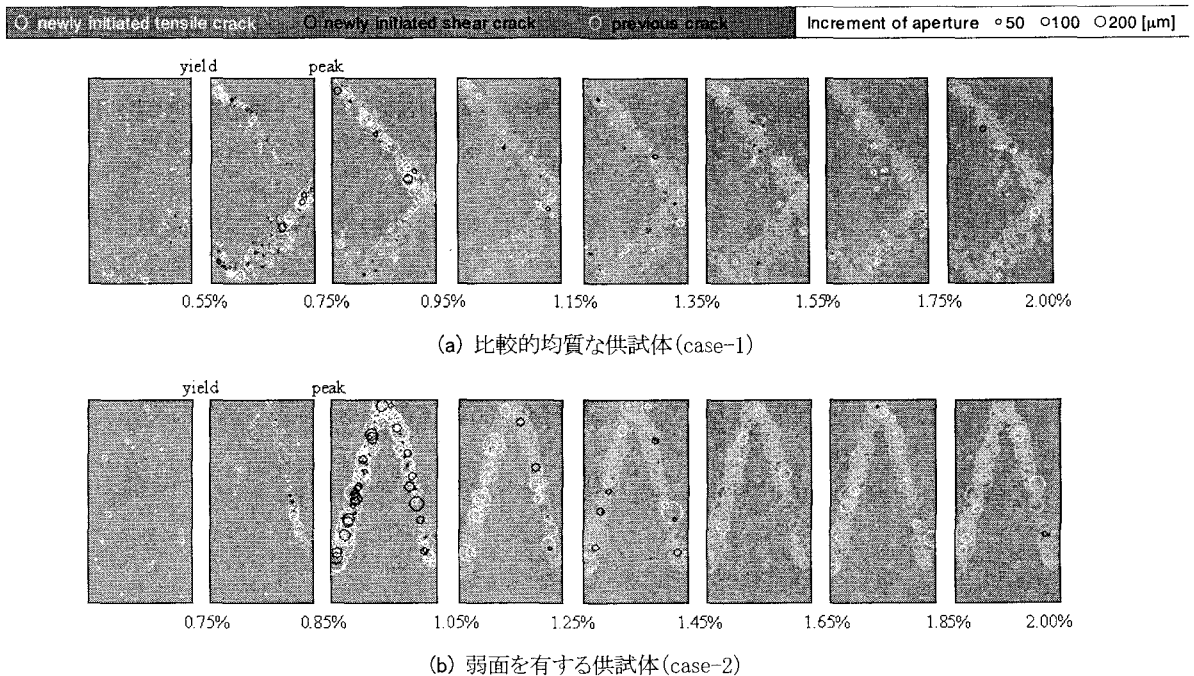


図-3 亀裂発生過程(岩石材料の差異による比較)

まず、岩石材料の構造の違い(図-3 参照)に着目すると、弱面を有する case-2 供試体においてはピーク強度直後の破壊面付近での亀裂の発生・規模がとりわけ顕著なものに対し、比較的な均質な供試体である case-1 においては、破壊面以外の場所においても亀裂が多く発生し、破壊面が形成された後も亀裂の発生が継続しているのが特徴的である。

次に、拘束圧の違いに着目する(図-4 参照)。拘束圧 0.5MPa の結果を見ると、ピーク応力に達した直後に開口量の大きな亀裂が多数発生することによって、供試体中央部に高角度の破壊面が形成されていることがわかる。そしてその後はその破壊面周辺においてのみ亀裂が発生しており、ひずみがあまり増大しない早い段階において破壊が収束している。拘束圧 6MPa の結果を見ると、ピーク応力直後に供試体上部に破壊面が一つ形成され、その後新たに供試体中央部に破壊面が形成されている。その後はその破壊面周辺において破壊が継続している。拘束圧 15MPa と非常に大きい場合には、ピーク応力後の一連の破壊が一旦収まって、ひずみがかなり増大した段階において、さらに供試体中央部に新たな破壊面が形成されている。このように、拘束圧が大きくなるに従って破壊面が継続的に形成されるようになり、破壊が延性的になっていく様子が確認できた。

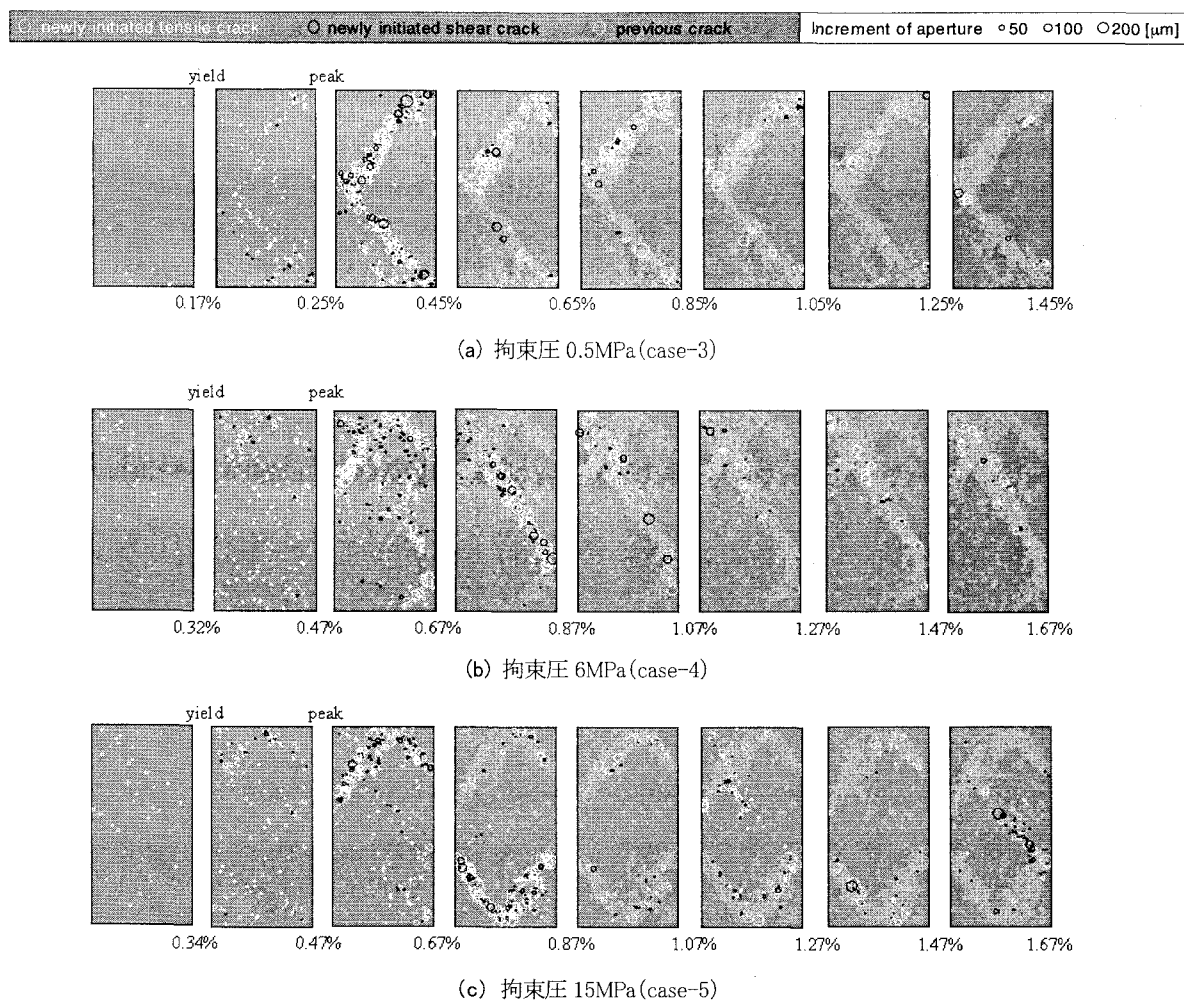


図-4 亀裂発生過程(拘束圧の差異による比較)

3.2 AE パラメータと岩石の破壊現象の関連性の検討

各 AE パラメータ(発生数・卓越周波数・ m 値)と粒状体個別剛体要素法によるシミュレーションを通じて得られた破壊過程に

おける物理現象を表現するパラメータ(亀裂発生状況・空隙率・破壊時亀裂開口量増分)と比較することで AE パラメータと破壊現象の関連性について検討を行う。

– Stress-strain curve – AE parameter / Crack initiation parameter

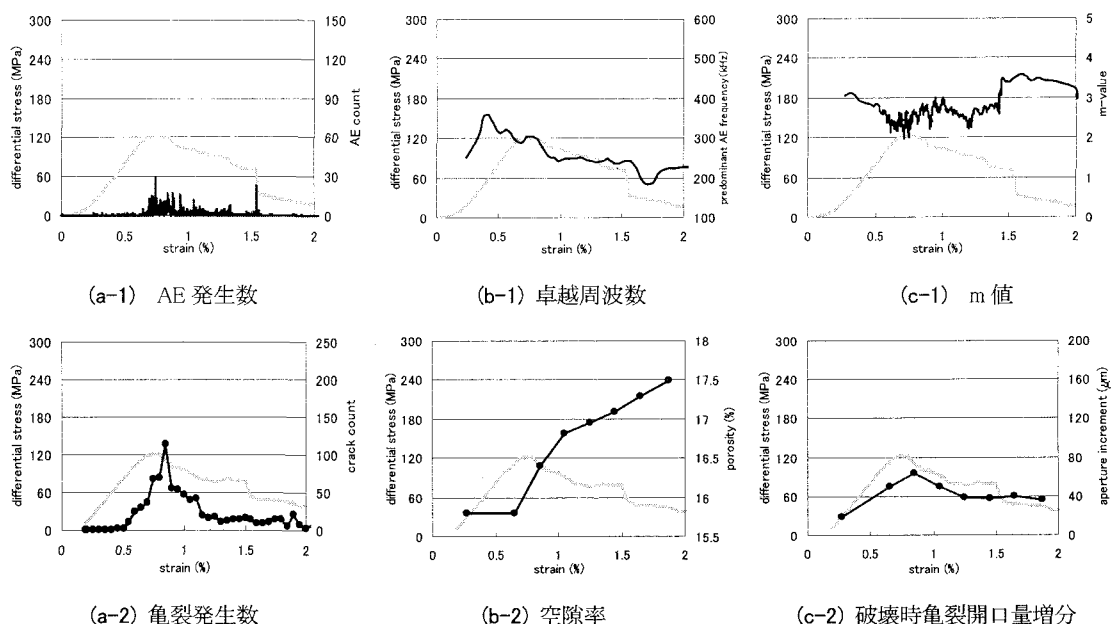


図-5 AE パラメータ(試験)と破壊現象を示すパラメータ(解析)との比較

(1) AE 発生数と亀裂発生数

まず、微小亀裂の発生状況を反映していると考えられる AE 発生数(試験結果)と亀裂発生数(解析結果)の関連性を検討する。図-5(a-1), (a-2)に case-1 の供試体の応力経路に沿った AE 発生数と亀裂発生数の推移を示す。AE 発生数と亀裂発生数共に降伏応力付近から顕著に増加し始め、ピーク応力直後に最大となり、その後残留応力に達するまでに減少している。このように、AE 発生数と亀裂発生数が良く対応していることが確認できる。

(2) 卓越周波数と空隙率

卓越周波数(試験結果)は、岩石の緻密さに影響を受けると考えられるので、空隙率(解析結果)と比較した。図-5(b-1), (b-2)に case-1 の供試体の応力経路に沿った卓越周波数と空隙率の推移を示す。軸差応力が降伏応力付近に達するまでは高周波の AE が卓越し、空隙率は低い値を維持しているが、大規模な破壊が起こるピーク応力付近に達すると、低周波の AE が卓越し始め、またこの段階において空隙率は急激に上昇している。このことから、AE の卓越周波数の変化は空隙率の変化を反映しているものと推察される。一般に、破壊の進行により岩石の緻密さが失われると、高周波の AE が遮断されるため低周波の AE が卓越すると考えられるが、この物理的解釈によって上記の関連性を説明することができる。

(3) m 値と破壊時亀裂開口量増分

m 値(試験結果)は AE の最大振幅の大きさとその頻度、つまり破壊の規模を評価する指標であるので、破壊時のひずみエネルギーの大きさに関係する破壊時亀裂開口量増分(解析結果)と比較した。図-5(c-1), (c-2)に case-1 の供試体の応力経路に沿った m 値と破壊時亀裂開口量増分の推移を示す。軸差応力が降伏応力付近に達すると m 値は低下し始め、その段階において破壊時亀裂開口量増分は増加する。軸差応力がピーク応力付近に達すると m 値の低下が止まり、破壊時亀裂開口量がその段階では非常に大きくなる。そしてピーク応力から残留応力に達するまでに再び m 値が増加に転じ、破壊時亀

裂開口量増分は減少する。このことから、AE の m 値の変化は破壊時亀裂開口量増分(破壊時ひずみエネルギー)の変化を反映しているものと推察される。一般に、破壊時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、 m 値が低下すると考えられるが、この物理的解釈によって上記の関連性を説明することができる。

3.3 破壊過程に与える拘束圧の影響

図-6 は異なる拘束圧を作用させた case-3(拘束圧:0.5MPa), case-4(拘束圧:6MPa), case-5(拘束圧:15MPa) の供試体の破壊現象を示すパラメータ(解析)の比較をしたものである。2.2 より、各 AE パラメータ(AE 発生数・卓越周波数・ m 値)においてピーク応力前後に見られる特徴的な変化は、拘束圧が低いほど急激で大きくなる傾向にあることがわかるが、DEM 解析によって得られた破壊現象を示すパラメータ(亀裂発生数・空隙率・破壊時亀裂開口量増分)においても同様の傾向が見られる。このことから、AE パラメータが拘束圧の差異による破壊過程の違いを良く捉えていることが確認できた。

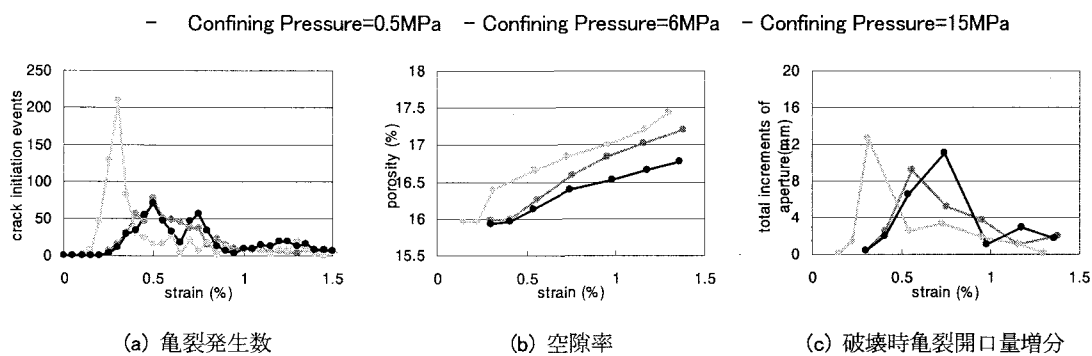


図-6 拘束圧の差異によって比較した破壊現象を示すパラメータ

4. まとめ

本研究ではまず、高剛性三軸圧縮試験によって得られた AE パラメータの分析を行うことで、各 AE パラメータにおいてピーク応力前後において見られる特徴的な挙動、それらに対して岩石材料の構造や拘束圧が与える影響を明らかにした。次に、粒状体個別剛体要素法によって岩石の亀裂発生過程のシミュレートすることで、岩石材料の構造や拘束圧による破壊過程の違いを確認することができた。さらに、AE パラメータ(発生数・卓越周波数・ m 値)と個別剛体要素法による解析で得られた破壊現象を示すパラメータ(亀裂発生数・空隙率・破壊時亀裂開口量増分)をそれぞれ比較することにより、AE パラメータの物理的な意味を明確にすることができた。

以上のことから、AE パラメータによって、岩石破壊時の特徴的な現象(亀裂発生状況・岩石の緻密さ・破壊の規模)を評価し得ることが明らかとなった。このことは、岩盤空洞掘削時に応力状態が大きく変化する周辺岩盤において、その応力状態や破壊現象を AE によって評価するための必要な基礎的な知見となるものと考えられる。

参考文献

- 1) Itasca Consulting Group, Inc. 2002. *PFC2D – Particle Flow Code in 2 Dimensions, Ver. 3.0*. Minneapolis: Itasca.
- 2) 例えば, Mori, T., Aoki, K., Morioka, H., Iwano, K., Tanaka, M. & Kana-gawa, T., 2003. Application of borehole seismic and AE monitoring technique in the rock cavern, 10th ISRM Con-gress, pp.845-848 など