



岩盤で発生する AE(Acoustic Emission) の 数値シミュレーション手法 *

石 田 毅¹ 清 水 浩 之² 阿 部 信 太 郎³

Various Numerical Simulation Methods for Acoustic Emission in Rock

by Tsuyoshi ISHIDA^a, Hiroyuki SHIMIZU^b and Shintaro ABE^c

- a. Dept. of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, C-Cluster, Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540 JAPAN (Corresponding author: E-mail ishida.tsuyoshi.2a@kyoto-u.ac.jp)
- b. Institute of Fluid Science, Tohoku University
- c. Association for the Development of Earthquake Prediction

AE (Acoustic Emission) or MS (Microseismicity) is a very useful method to understand fracture mechanism and to predict serious rock fracture like rockburst. This method can be applied to monitor reservoirs where water and gas are injected, for example, in underground sequestration of carbon dioxide and in EOR (Enhanced Oil Recovery) of petroleum industry. If a numerical simulation helps to interpret AE monitoring results, AE monitoring would become much more powerful tool for the rock engineering. Thus, in this paper, the authors review various methods that can simulate occurrence of AE events incorporating inhomogeneity of rock.

A code of Finite Element Method (FEM) developed by Tang et al., those of Boundary Element Method (BEM) by Napier's and Stephansson's groups and those of Distinct Element Method (DEM) by Shimizu et. al, Fakhimi et al. and Cai et al. are briefly introduced as simulation methods of brittle fracture like rockburst. For simulation of AE events induced by water or gas injection, DEM incorporating Fluid Flow Algorithm by Shimizu et al. are introduced, with showing their simulation results of hydraulic fracturing.

KEY WORDS: Rock, Acoustic Emission, Induced Seismicity, Inhomogeneity, Numerical Methods, Distinct Element Method

1. は じ め に

AE (Acoustic Emission) は、材料の微小な破壊に伴って発生する弾性波動と定義され、規模の大きい岩盤の AE は微小地震 (Microseismicity) と同じ意味で用いられることが多い。岩盤から発生する AE を測定して、地圧による岩盤の激しい破壊で坑内災害を引き起こす山はねやその前駆現象である山鳴りの予知に利用しようとする試みは、1930 年代後半にアメリカとカナダで始められ¹⁾、金属鉱山や炭鉱を中心に数多くの研究がなされてきた。現在、南アフリカ・ヨハネスブルグの金鉱山 Mponeng Mine ではすでに 2009 年に地表下 3,777m に到達し²⁾、同じく TauTona 鉱山では 2012 年に 3,902m に到達するが³⁾、このような深部鉱山では実用的に AE を測定し、山はねを予測、制御しながら採掘を行っている。金属鉱山や炭鉱における山はねや山鳴りの測定と利用は、1982 年以降 2009 年までに 7 回の国際会議が開催されてきた Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines の講演論文集⁴⁾にさまざまな事例が紹介されている。わが国では 1963 年に四国

の別子鉱山の地表下 1,500m の坑道で山鳴りが経験され、その後山鳴りの頻度が増大し山はねの発生が心配されたため、わが国最初の本格的な観測が 1965 ~ 1972 年まで行われた⁵⁾。また炭鉱においても、例えば北海道幌内炭鉱のような深部採炭では山はねが問題となり、地表下 1055 ~ 1125m の採炭に伴う AE 観測がなされた⁶⁾。土木分野においても、1976 年に大清水トンネルの掘削に際し、山はねの予知を目的とした試験的な測定が行われ⁷⁾、最近では関越トンネルで山はねの予測と対策を目的とした本格的な測定が行われ⁸⁾、地下発電所の安定性監視手法⁹⁻¹¹⁾としても利用が進められている。

原子力発電のバックエンド対策として現在重要な課題となっている高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下深部に多数の空洞が掘削されるため、AE を測定して亀裂の進展や山はねの発生を予測し、岩盤の遮蔽性に悪影響を与えるこれらの現象を避ける必要がある。また建設が計画されている中央新幹線では、標高の高い南アルプスの山々を貫くため、わが国でかつて経験の無い深部トンネルを掘削する必要があり、山はねをはじめとする岩盤の激しい破壊に遭遇する可能性がある。従って、AE 測定による亀裂の進展や山鳴り、山はねの監視は、わが国にとっても今後の重要な課題と思われる。

一方最近、石油や天然ガスあるいは oil sand の生産に関連して、AE (Acoustic Emission) の観測が試みられる事例が増えてきている。石油の生産では、自墳による生産が衰えると水や天然ガ

*2011 年 4 月 6 日受付 2011 年 8 月 18 日受理

1. 正会員 工博 京都大学大学院 教授 工学研究科社会基盤工学専攻

2. 正会員 博士 (工学) 東北大学 助教 流体科学研究所

3. 博士 (理学) (財) 地震予知総合研究振興会 主任研究員

[著者連絡先] FAX: 075-383-3213

E-mail: ishida.tsuyoshi.2a@kyoto-u.ac.jp

キーワード: 岩盤, AE, 誘発地震, 不均質性, 数値解析法, 個別要素法

ス、二酸化炭素などの流体を地下に圧入する増進回収法 (EOR : Enhanced Oil Recovery) が適用されるが、石油資源の枯渇に伴いこの増進回収法の効率増大が重要となり、その管理法として AE 測定が注目されているためである¹²⁾。目的は異なるものの地球環境問題への対応として現在世界各国で計画されている二酸化炭素の地下貯留についても、石油や天然ガスの貯留層が対象とされる場合には同様と思われる。また、従来型の典型的な石油・天然ガス田と異なり、岩盤内の亀裂に石油・天然ガスをはい胎している Fractured Reservoir に対しては、貯留層に水を圧入し、その際に発生する AE を観測して亀裂の位置を検出することも試みられている¹³⁾。一方、oil sand から原油を回収する際に、地下に高温の蒸気を圧入し、砂に固着した Bitumen を温めて流動性を高め回収する方法がとられるが、oil sand 層から蒸気が漏洩するのを防止するための監視法として、AE の観測が試みられている¹⁴⁾。さらに、米国 Denver 近郊で化学廃液を地下深部に注入したところ、その周辺の地震活動が活発になった事例があり^{15,16)}、気体、液体を問わず地下への流体の注入、圧入作業を実施する際の安全性モニタリング手法として AE 観測は有用と思われる。

このような AE 測定結果を岩盤あるいは貯留層の安定性評価に有効に用いるためには、AE の発生過程を数値解析でシミュレートし、現象を理論的に考察することが望ましい。岩盤の数値解析手法全般のレビューについては著者の一人が共著に加わった過去の総説があり¹⁷⁾、そこでも若干述べているが、AE の発生は岩盤が本質的に有する不均質性と密接に関連しているため、AE の発生を数値解析でシミュレーションするには、不均質性を表現するやや特殊な工夫が必要である。このことは例えば、岩石供試体の一軸圧縮試験における AE の発生や Shear Band のシミュレーションを考えれば理解しやすい。通常の有限要素法で岩石の一軸圧縮試験をシミュレートすると、供試体中に応力が一様に分布するから、载荷圧力の増大に伴い全要素の応力値がある時点で同時に破壊基準を満たすため、岩石供試体全体が同時に一斉に破壊することになり、AE の発生や Shear Band の出現といった岩石で一般的に観察される破壊現象をシミュレーションすることができない。これは、Shear Band の形成は AE の発生を伴う微小亀裂の逐次的な進展と蓄積の結果であり、微小亀裂の進展は岩石物性、特に強度の不均質性に基いているからである。

このような岩盤の不均質性に依存した破壊現象、すなわち AE の発生については、Tang らが有限要素法を基礎とした解析手法を、Sellers and Napier や Stephansson らのグループが境界要素法を基礎とした解析手法を開発している。また最近では、粒状体個別要素法を用いた解析手法により、このような破壊現象をシミュレートして、現象の解明を試みる研究が進められるとともに、地下空洞の掘削安定性評価に実際に適用した事例も報告されている。一方、流体の注入に伴う AE 発生への解析についても粒状体個別要素法の適用が試みられ、その有用性が明らかになりつつあるので以下に紹介する。

2. 有限要素法を基礎とした Tang らの RFPA コード

Tang らは、有限要素法の各要素に不均質な強度とヤング率を与え、一軸圧縮試験のような一様な応力の作用下において AE の発生や Shear Band の形成をシミュレートできる数値解析コード RFPA (Rock Failure Process Analysis) を開発している¹⁸⁾。

Fig. 1 は、横方向に载荷された一軸圧縮試験のシミュレーションで得られた破壊の進展過程を示している。この解析では、一軸圧縮試験は変位制御で行われるものとし、変位量を 50 ステップに分割しており、各図の右上にステップ数を示している。供試体

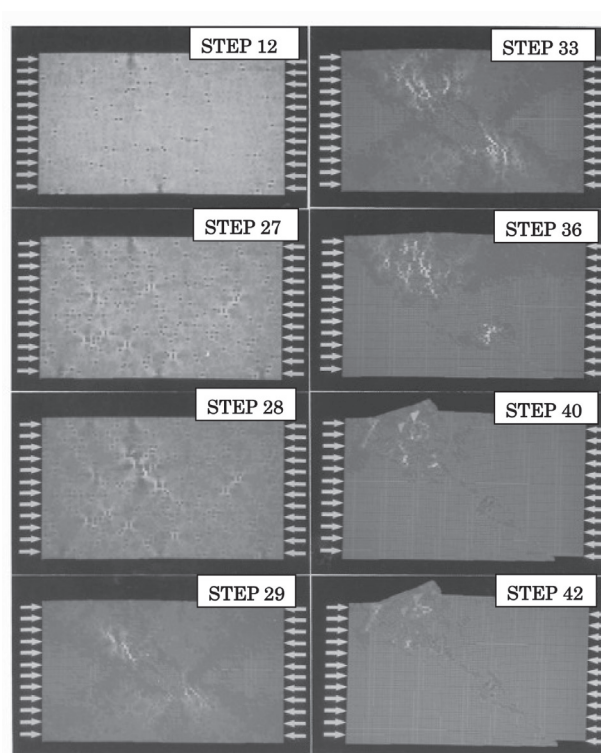


Fig.1 Numerical simulation with RFPA code, which was developed by Tang, for progressive failure process in a uniaxial compressive rock. The brightness of the gray shading in the plots indicates the stress level (high = white, low = black) in proximity to failure¹⁸⁾.

の形状は直方体で、载荷軸に沿った横方向に 100 分割、縦方向に 60 分割した合計 6000 個の要素に、強度とヤング率を Weibull 分布に従うものとしてランダムに分布させている。この図で、要素の濃淡は破壊基準に対する応力状態の接近度を表しており、黒から白に近づくほど破壊に近い応力状態にあることを示している。

Fig. 2 は、上から順にこのシミュレーションで得られた応力-ひずみ曲線、AE 発生数とひずみの関係、AE の発生頻度と AE のマグニチュード (エネルギーの大きさ) の関係を示している。この図で、AE の発生数は破壊基準に到達した要素の数に対応し、また AE のマグニチュードは破壊した要素の強度に比例するものとしている。

Fig. 1 と Fig. 2 をみると、次のような破壊の進展の様子がわかる。

- 1) 载荷の初期の段階では、微小破壊を生じた要素はまばらで、2～3 箇所に破壊の局所化 (Localization) が見られるにすぎない (Fig. 1 の Step12, Step27 参照)。この段階では、応力-ひずみ挙動は、ほとんど弾性的である (Fig. 2 (a) 参照)。
- 2) 微小破壊が蓄積するにつれて、微小破壊がいくつか連結し始め、連結した破壊がさらに連結して相互干渉し始め、破壊の核の形成が始まる (Fig. 1 の Step28 参照)。この時期には、小さな応力降下を伴いながら、応力-ひずみ曲線がひずみ軟化挙動を示し始める (Fig. 2 (a) 参照)。
- 3) 供試体中央部で破壊した要素の数が劇的に増大し、ついに数多くの微小破壊からなる巨視的な破壊面が形成される (Fig. 1 の Step29 参照)。巨視的な破壊面の形成による応力解放のため、破壊面の周辺領域で弾性反発的な解放変位が観察される (Fig. 1 の Step33 参照) とともに、応力-ひずみ曲線には大きな応力降下が現れる (Fig. 2 (a) 参照)。
- 4) 破壊面周辺の応力集中が、破壊面先端及びその周辺の破壊を生じ、破壊面のさらなる進展をもたらす (Fig. 1 の Step36 参照)。

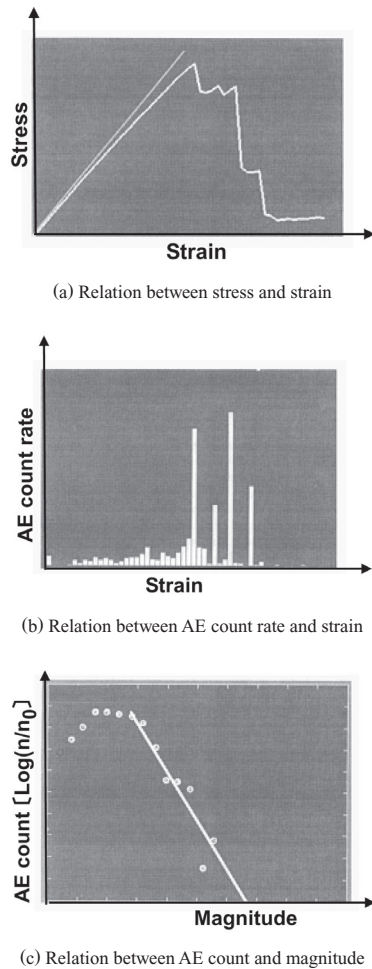
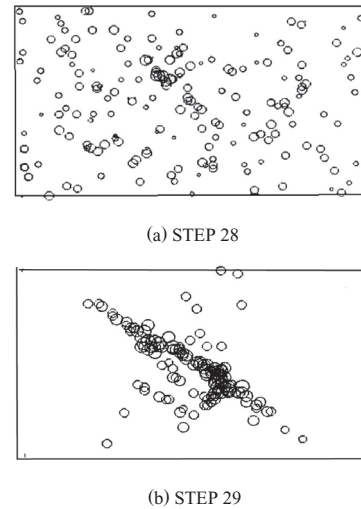
Fig.2 Some relations obtained in the simulation¹⁸⁾.

Fig. 2 (b) を見ると、AE 発生数の急増は、通常実験で見られるように、Fig. 2 (a) の応力の急激な低下時期に対応していることがわかる。また Fig. 2 (c) の最大値より右側の直線関係は、このシミュレーションにおける AE の発生頻度とマグニチュードの関係が、地震の発生頻度とマグニチュードの関係を表す経験式として有名な Gutenberg-Richter の式に一致することを示しており、このことはこの数値解析結果の妥当性を示していると思われる。

Fig. 3 は、破壊規準に到達した要素の位置に AE の発生位置を丸印で示した AE の震源分布図である。丸印の大きさは、マグニチュードに対応させて描いている。Fig. 3 の上の図は 50 分割した変位 Step の 28-Step、下の図は 29-Step の図で、それぞれ Fig. 1 の左側の上から 3 番目と 4 番目の図に対応する。上の図は、まさに巨視的破壊が始まる直前の段階であり、AE の震源が分散していることがわかる。しかし、巨視的破壊が進展する際には、AE の震源は狭い範囲に集中し、破壊の核が形成されていることがわかる。このような破壊の核の形成は Lockner et al.¹⁹⁾ や Yanagidani et al.²⁰⁾ の実験結果とよい一致を示している。

Tang らは、この数値解析コード RFPA を用いて、礫などの inclusion を含んだ岩石の一軸圧縮応力下での破壊²¹⁾ や、山はねの発生機構を考察するため性質の異なる岩石、すなわち花崗岩と大理石を載荷軸方向に直列に並べて載荷した実験のシミュレーション²²⁾、空洞間に残された柱状の岩盤の破壊と AE の発生の関係¹⁸⁾ の研究を行っている。さらにこれらの研究を発展させ、岩石内の微小破壊の集積と巨視的なせん断破壊への進展過程に関

Fig.3 AE source distributions obtained in the simulation¹⁸⁾.

する考察²³⁾ や、鉤柱の剛性と鉤柱をはさむ上下盤の剛性の大小関係がどのように鉤柱の耐荷力や破壊様式に及ぼすかの検討²⁴⁾ も行っている。

3. 境界要素法による解析手法

3・1 Napier らが開発した DIGS コード

Napier らは岩石をランダムな三角形に分割し、三角形の各辺を境界要素法の DDM 要素（変位不連続要素）²⁵⁾ で表現し、不均質性に依存する岩石の破壊現象を解析する数値解析コード DIGS (Discontinuity Interaction and Growth Simulation) を開発している²⁶⁾。Fig. 4 は、岩石の一軸及び三軸圧縮試験のシミュレーションの例を示している。

Fig. 4 (a) は要素分割の例である。この解析では、まず高さ 20mm、幅 10mm の一軸圧縮試験の小さな供試体モデルをランダムな約 1000 個の多角形に分割し、この多角形の頂点と多角形の重心とを線分で結び、これらの線分と多角形の各辺を境界要素法の DDM 要素で表現している。図中の太い線分は、あとで説明する強度の小さい欠陥 (Flaw) 要素を示している。この解析の目的は、石英を鉤物粒子として同じように含んでいても、石英の粒子境界が硬く溶結された珪岩は、粘土質のマトリックスに石英粒子が取り込まれた粒子境界が脆弱な岩石よりも強度が大きく脆性的であることを、数値解析で示すことにある。解析モデルでは多角形を石英粒子と考え、多角形の辺を粒子境界、多角形の頂点と多角形の重心を結んだ線分を粒子内に発達する亀裂に対応させている。そして、Table 1 に示すように、粒子内 (Intragrain) 要素には大きな粘着力 (Cohesion) を、粒子境界 (Intergrain) 要素と欠陥 (Flaw) 要素には、それぞれ小さな粘着力を与えている。ここに太い線分で示された欠陥要素とは強度的な欠陥をモデル化するため、全要素に対し一定の割合でランダムに分布させた強度を低下させた要素であり、この割合の小さなモデルを強度の大きな珪岩、この割合の大きなモデルを粒子境界が脆弱な岩石に対応させて考えている。また、粒子内 (Intragrain) 要素は脆性的な破壊をモデル化するため残留強度を 0 に、一方粒子境界 (Intergrain) 要素と欠陥 (Flaw) 要素には、延性的な破壊を表現するため、残留強度に一定の値を与えている。

Fig. 4 (b) は、全要素のうち 20% を欠陥要素で表現した一軸圧縮試験のシミュレーション結果であり、Fig. 4 (b) から (c) では、太い線分が破壊規準に到達した DDM 要素を示している。なお、

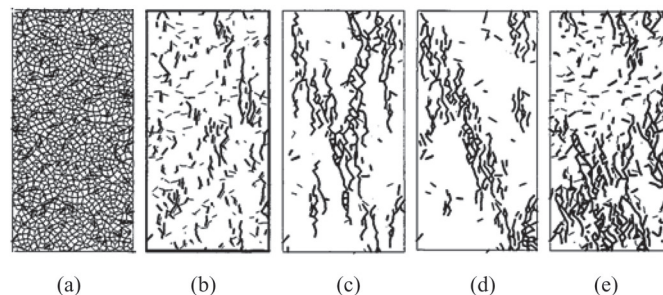


Fig.4 Typical fracture patterns obtained in the simulation with DIGS code, which was developed by Sellers and Napier²⁶⁾. Bold lines indicate flaw elements in (a), while they indicate fractured elements from (b) through (e). (a) DDM elements of the numerical model. (b) Simulation result of a uniaxial compressive test having 20 % flaw elements in the model. (c) Simulation result of a uniaxial compressive test having 4 % flaw elements in the model. (d) Simulation result of a tri-axial compressive test having 4 % flaw elements in the model. Confining pressure is 10 MPa. (e) Simulation result of a tri-axial compressive test having 20 % flaw elements in the model. Confining pressure is 50 MPa.

Table 1 Strength parameters of the three DDM elements in the simulation with DIGS code²⁶⁾.

Site Type	Cohesion C_o (MPa)	Residual Cohesion C_m (MPa)	Friction angle ϕ	Residual friction ϕ_m/ψ_m	Dilation	Tension cutoff MPa
Intragrain	100	0	45°	30°	0	10
Intergrain	40	40	45°	30°	10°	10
Flaw	5	1	45°	30°	10°	1

破壊規準としては、引張強度で cutoff した Mohr-Coulomb の規準を用いている。Fig. 4 (c) は、欠陥要素の割合を 4% に低下させた場合の一軸圧縮試験のシミュレーション結果である。これらの図では、破壊規準に抵触した要素は、図の縦方向、すなわち荷重方向に並ぶ傾向があり、一軸圧縮試験でよく見られる縦割れ破壊の傾向を示している。

Fig. 4 (d) は拘束圧として 10MPa を加えた欠陥要素 4% の供試体、Fig. 4 (e) は拘束圧として 50MPa を加えた欠陥要素 20% の供試体の三軸試験のシミュレーション結果である。縦方向の荷重は、先に示した Tang らの解析と同様、変位量をステップ毎に増大させる形で荷重しており、これは Fig. 4 (b) や (c) に示した一軸圧縮試験の場合でも同様である。Fig. 4 (d) の結果では、echelon 型の破壊が三軸試験でよく見られる荷重軸に斜交する形で発達している、すなわち Shear Band の形成が見られる。Fig. 4 (e) では echelon 型の破壊がさらに広範囲に広がっていることがわかる。

さらに Napier ら²⁷⁾ は、DDM 要素に粘性を導入し、また、DDM 要素のすべり量を AE 波としてのエネルギー解放量に対応づけることにより、この解析手法を南アフリカの深部鉱山の空洞掘削に伴う応力再配分と山鳴り (AE) の解析に用いている。すなわち、深い金鉱山の切羽の進展ステップをシミュレートし、実際に観測された山鳴りの活動度と数値解析で空洞周辺のランダム・メッシュに発達した亀裂の長さの間に良好な一致を見ることを示している。また、解析結果から得られる空洞上下盤の閉塞速度と、現場で測定された閉塞速度がよく一致することも示している。この手法を利用すれば、岩盤の不均質性に依存した亀裂の進展、すなわち、地下空間の側壁などが掘削後一定時間経過した後突然崩壊する現象や、掘削速度が空洞の安定性にどのような影響を与えるかも、解析することが可能と思われる。

3・2 Stephansson らが開発した FRACOD コード

Stephansson らの研究グループも Napier らと同様、境界要素法の DDM 要素を用いた FRACOD と呼ばれる亀裂進展の解析コードを開発している^{28,29)}。彼らの解析コードの特徴は、亀裂進展に関する新たな破壊規準を導入したことにある。すなわち、引張

破壊の場合には引張応力が一軸引張強度を超えたときに作用している引張応力と直交する方向に亀裂を進展させ、せん断破壊の場合には応力状態が粘着力 c と内部摩擦角 ϕ で定義される Coulomb の破壊規準に到達したときに $\theta = (\phi + \pi)/2$ で示される 2 つの共役方向に 2 つの亀裂を同時に進展させる。さらに、引張とせん断の混合モードにおいては、次式で定義される引張とせん断モードのひずみエネルギー速度 $G_I(\theta)$ 、 $G_{II}(\theta)$ をそれぞれの限界値 G_{IC} 、 G_{IIC} で正規化して重ね合わせた次式の関数 $F(\theta)$ を考え、この $F(\theta)$ の値が 1 を超えたときに $F(\theta)$ の値を最大とする θ の方向に亀裂が進展すると仮定している^{30,31)}。

$$F(\theta) = \frac{G_I(\theta)}{G_{IC}} + \frac{G_{II}(\theta)}{G_{IIC}} \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 5 は、この手法を用いた高さ 120mm、幅 60mm の供試体の一軸圧縮試験の解析結果である³²⁾。解析では破壊に至るまで 5MPa ずつ荷重を増大させているが、図 (b) に見られるように、60MPa で初期亀裂の発生し、図 (c)、(d) に見られるように荷重の増大とともに亀裂が増大する。図 (e) ~ (h) はいずれも荷重応力は 120MPa で一定であるが、この荷重で亀裂が進展し、供試体が破壊に至ったことがわかる。この供試体の破壊応力値 120MPa は、解析対象とした日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所立坑のボーリングコアの強度 122MPa にほぼ一致している。

彼らはこの結果をもとに、深度 500m と 945m 地点の立坑周辺岩盤における亀裂進展の予測解析を行った³²⁾。この解析では、地質調査の結果明らかになっている卓越亀裂の方向のうち急傾斜の 2 つの方向の亀裂をモデルに取り入れ、現地で予想される地圧を荷重した。Fig. 6 はその結果である。深度 500m では、立坑直近の亀裂が合体して北東-南西方向に進展し、亀裂の進展は既存亀裂の分布に強い影響を受けていることがわかる。深度 945m は当地点の主要断層である月吉断層と立坑が交差する安定性の懸念される深度である。図には明示されていないが、北北西-南南東方向に引張亀裂が、東北東-西南西方向にせん断亀裂が進展しており、結果的に北北西-南南東方向に長軸を有する楕円形の崩壊

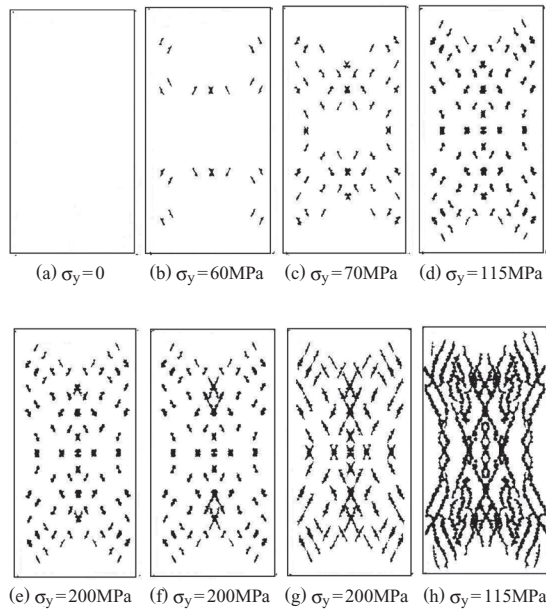


Fig.5 Simulation result of a uniaxial compressive test by FRACOD code, which was developed by Stephansson and others³²⁾. The process of fracture initiation, propagation and final failure of a rock sample is clearly and consistently reproduced by the simulation.

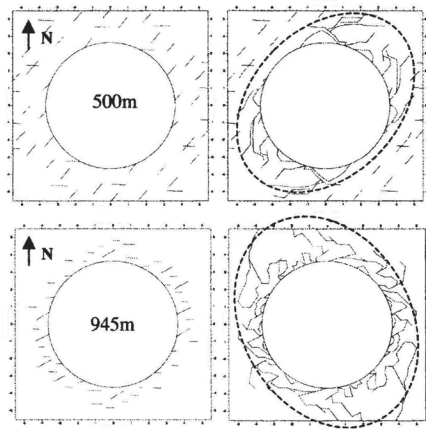


Fig.6 Simulation results by FRACOD code of the shaft walls at the depths of 500 m and 945 m of Mizunami Underground Research Laboratory in Japan³²⁾. The left figures show fractures before the failure, while the right figures show fracture extensions after the failure.

領域が形成されている。現地の測定では、AE 波の初動の押引分布から個々の AE が引張破壊で生じたかせん断で生じたかを判定することができる。従って、今後計画されている立坑の掘削に際して AE 測定を行い、解析結果の個々の亀裂を AE 震源と見做して比較すれば、破壊進展の予測やメカニズムに関して有用な知見が得られる可能性がある。

彼らは同様の解析を、ボアホールブレイク・アウト³³⁾や圧裂試験³⁴⁾にも適用して、これらの破壊機構の研究を行っている。

4. 粒状体個別別要素法を用いた解析手法

4・1 概要

有限要素法や境界要素法は岩盤を連続体と仮定して定式化するが、Cundall により 1978 年に提唱された個別要素法 (Distinct Element Method: DEM)^{35,36)} は、岩石を粒子の集合体としてモデル化する。このとき、粒子を不規則に配置することにより岩石内

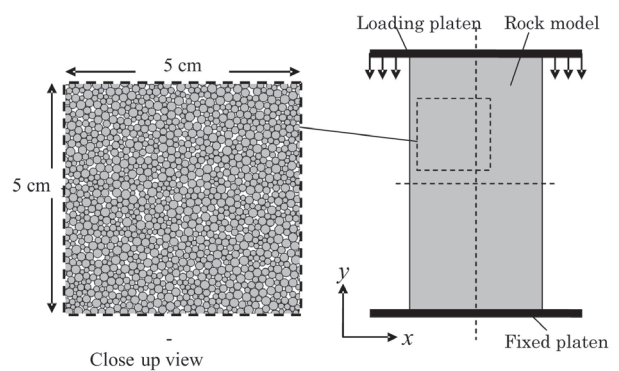


Fig.7 DEM model and loading condition for the simulation of a uniaxial compression test⁴⁰⁾.

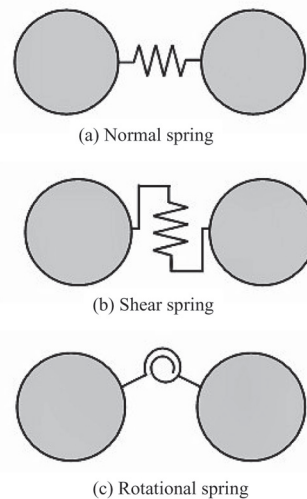


Fig.8 Three kinds of springs between two bonded particles⁴⁰⁾.

部に生じる応力の不均質性を比較的容易に、かつ適切に表現できる特徴がある。このため、岩盤の不均質性に基づく微小亀裂の発生や Shear Band の形成をシミュレートする数値解析手法として適している。

個別要素法ではさまざまな形状の要素を取り扱うことができるが、形状を円形とした粒状体個別別要素法を例にとりて示せば、Fig. 7 に示すように、岩石を粒状体の剛体ブロックの要素の集合として表現する³⁷⁻⁴⁰⁾。そして、要素と要素を Fig. 8 に示すように直方向とせん断方向のばねで結合し、場合によっては回転方向についてもばねを挿入して回転を抑制する。ただし、このようなばねによる結合では要素間に振動が発生し、それにより計算が発散してしまう可能性がある。そこで、数値計算上の安定性を得るために、法線方向と接線方向それぞれに散逸力を導入する。これらの散逸力は法線方向、接線方向それぞれの要素間相対速度に比例するものとして与える。本来は要素間の法線、せん断方向の相互作用を考慮することにより、要素の並進と回転の運動を追跡する不連続体解析のための手法であるが、要素間に引張力 (粘着力) を導入することにより、不連続体・連続体の両方に適用することが可能となる。このような個別要素法の連続体解析への拡張はすでに様々な研究で行われており、その有効性が示されている。

粒状体個別別要素法では、要素間の引張応力があらかじめ定める直応力ばねの引張強度を超える場合、あるいは要素間のせん断応力があらかじめ定めるせん断強度を超える場合に要素間の接続

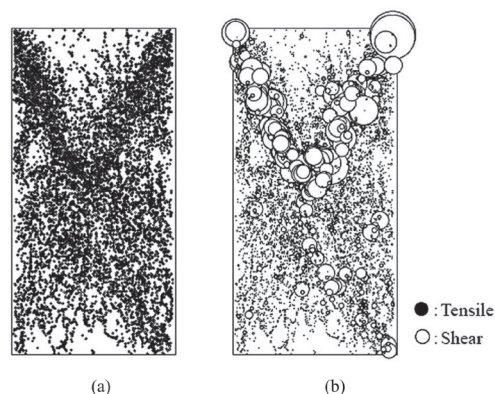


Fig.9 Spatial distribution of all the cracks obtained during this simulation⁴⁰⁾. A tensile crack is expressed with a closed circle, while a shear crack is expressed with an open circle. (a) The diameters of all the circles are the same. (b) The diameters of the circles correspond to their respective magnitudes of energy.

を切断させることにより、岩石内の微小亀裂の発生、すなわち AE の発生を表現する。さらに、この微小亀裂の発生時に直応力ばねとせん断ばねに蓄えられていた弾性エネルギーを、その微小亀裂に伴って発生した AE のエネルギーの大きさと考えることにより、AE のエネルギーの大きさの評価も可能となる^{37,38)}。

4・2 岩石の一軸圧縮試験のシミュレーション

清水らはすでに示した Fig. 7 の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、微小亀裂の発生を実験で観測される AE の発生と対比させて、岩石の破壊過程を検討している^{39,40)}。Fig. 9 は、このシミュレーションにおけるすべての AE の震源分布を示したものであり、黒丸が引張破壊による AE を、白丸がせん断破壊による AE を示す。Fig. 9 (a) は震源を同じ大きさの丸で示しているが、Fig. 9 (b) は丸の直径を AE の大きさ（エネルギー）に比例して示している。エネルギーの大きさは、上述の微小亀裂の発生時に要素間に蓄えられていた弾性エネルギーで評価している。(a) (b) 両図を比較すると、黒丸の数は多いが直径の大きなものが極めて少ないこと、これに比べて白丸は数が少ないが直径の大きなものが多く、(b) 図の上部に見られるように最終破断面の一部となる共役な 2 つのせん断面に沿って並んでいることがわかる。

従来の研究では、AE の発生頻度とダイレイタンス量との間に比例関係があること、岩石の引張強度が圧縮強度に比べて明らかに小さいことから AE は引張亀裂に起因して発生すると考えられ⁴¹⁾、また一軸圧縮応力を受けた岩石試料の顕微鏡観察でも引張亀裂が多くせん断亀裂はあまり見られないことが報告されている⁴²⁾。一方、楠瀬らが行った AE 測定実験では、AE 初動の押引分布から引張亀裂に起因すると考えることが困難な AE が観測され、せん断亀裂が少なくとも一部の AE を発生させていることが示された^{43,44)}。また、Lei らの行った実験では、観測された AE の多くがせん断亀裂の発生に起因するものであることが明らかとなった⁴⁵⁾。このように、従来の岩石破壊に対する理解や顕微鏡観察から導かれる破壊様式と AE 初動の押引分布から明らかにされた破壊様式の間には若干の矛盾が残されている。

このシミュレーション結果は、引張亀裂は従来から考えられている通り発生数は多いが、発生する AE のエネルギーがせん断破壊に伴って発生する AE よりも小さいため、AE 測定実験では引張型の AE が観測されにくく、せん断型 AE が卓越するように見えることを示唆している。このことは、岩石の引張強度が圧縮強度に比べて小さいことから理解しやすく、従来の岩石破壊に対

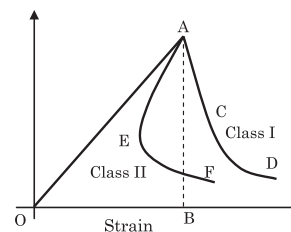


Fig.10 Representative figures for stress-strain curves of Class I and Class II behaviors of rock failure under uniaxial compression⁴⁶⁾.

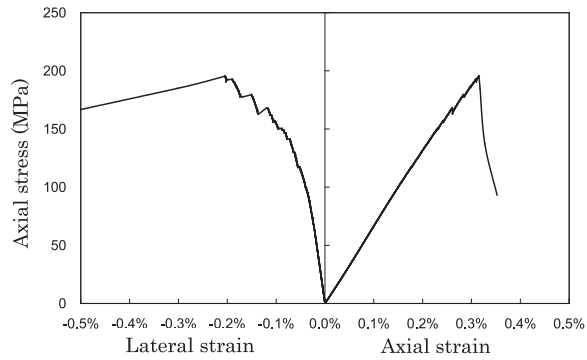
する考え方と AE 測定実験の矛盾を説明できる新たな知見を与えていると思われる。

4・3 Class II 岩石の破壊挙動のシミュレーション

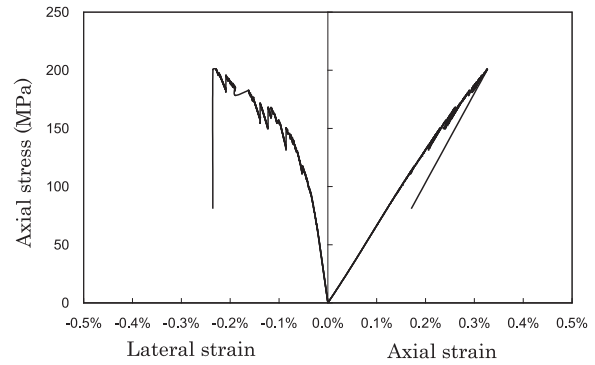
清水らは、山はねなど、地下深部の空洞掘削時に激しい破壊をもたらす原因となる岩石の Class II 挙動の再現も粒状体個別要素法で試みている^{46,47)}。応力-ひずみ曲線から岩石の破壊挙動は Class I、Class II の二つに分類される。Fig. 10 に示すように、Class I の場合には強度破壊点を超えても軸ひずみが安定して増加し続け、応力-ひずみ曲線は OACD のように破線より右に伸びて負の勾配を示す。これに対し Class II の場合には、強度破壊点を超えた後の応力-ひずみ曲線は破線より左側に表れる特性を示し、Fig. 10 における曲線 OAEF のようになる。このような特性を有する岩石では、応力が強度破壊点に到達した時点で、図の三角形 OAB の面積で表される内部に蓄えられた弾性ひずみエネルギーが破壊に必要なエネルギーを上回るため、破壊が急激に進行し制御不能に陥る。曲線 OAEF のような Class II の完全な応力-ひずみ曲線を得るためには、供試体の急激な破壊を制御するため、通常の荷重軸方向のひずみの制御ではなく荷重軸に直交する供試体の横ひずみの制御を行って実験を行う必要がある。このような横ひずみの制御⁴⁸⁾や AE 発生率の制御⁴⁹⁾、さらにはひずみと応力を線形結合した値を制御する⁵⁰⁾ ことによって、Class II の完全な応力-ひずみ曲線を得る実験的研究が進められている。しかしそれでもなお破壊の制御が容易でないため、Class II 岩石の最大強度点以降の post-failure 領域での挙動に関する知見は依然として少なく、激しい破壊のメカニズムや破壊プロセスは十分に解明されているとは言えない。

そこで彼らは、横ひずみ制御の一軸圧縮試験を解析できるよう粒状体個別要素法のコードを改良し、Class II の完全な応力-ひずみ曲線を得るシミュレーションを行った。Fig. 11 は、この改良したコードによる軸ひずみ制御と横ひずみ制御のシミュレーション結果である。これらの結果は実験により得られた応力ひずみ曲線とよく一致し、粒状体個別要素法による解析で岩石の Class II 挙動を良好に再現できることがわかる。

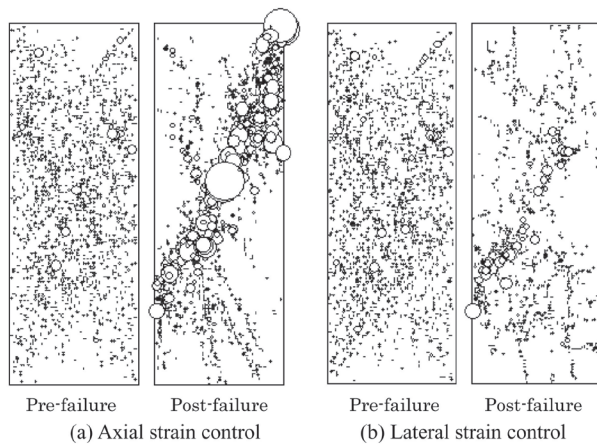
Fig. 12 は、軸ひずみ制御と側方ひずみ制御のシミュレーションにおける AE の震源分布を示す。いずれの制御方法であっても、Pre-failure 領域における AE の発生傾向はほぼ同一である。しかし、Post-failure 領域における AE の発生傾向には大きな違いが見られる。軸ひずみ制御の場合には強度破壊点を越えたところで急激に亀裂の連結が進み、Fig. 12 (a) 右図が示すように、岩石モデルの破壊時に明瞭な Shear band が形成された。通常、一軸圧縮試験では縦割れとなる場合が多いが、本シミュレーションではモデルと載荷板の間に摩擦力が作用しているためにこのような結果になったと思われる。一方、横ひずみ制御の場合には Fig. 12 (b) 右図に示すように大きなエネルギーを放出する AE が少なく、モデル中央付近に Shear band らしきものは確認できるが、Fig. 12 (a) 右図



(a) Axial strain control



(b) Lateral strain control

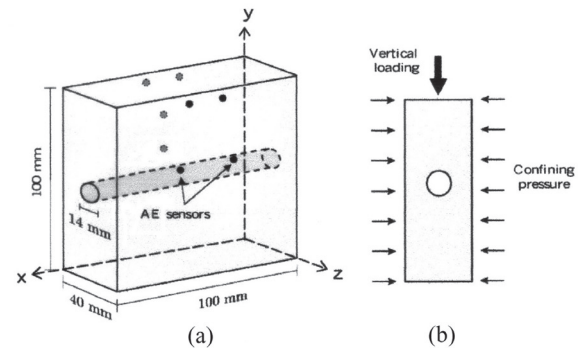
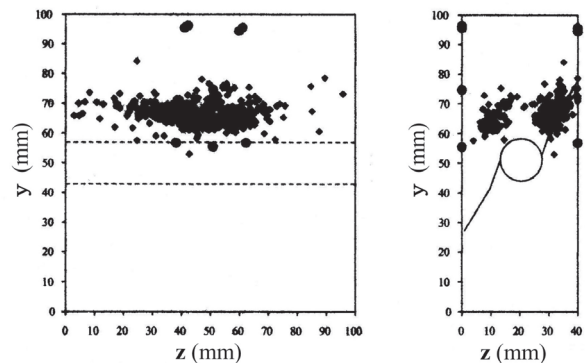
 Fig.11 Complete stress-strain curves obtained from the simulation with different controlling methods⁴⁶⁾.

 Fig.12 Spatial distribution of the cracks induced before (left) and after (right) peak stresses⁴⁶⁾. Tensile and shear cracks are expressed as closed and open circles, respectively. The diameters of each circle correspond to their respective magnitudes of energy.

ほど明瞭な Shear band は見られない。

軸ひずみ制御の一軸圧縮試験の場合には、Fig. 11 (a) に示すように強度破壊点を越えたところで横ひずみが急激に増加していく。一方、横ひずみ制御の場合には岩石モデル破壊時の横ひずみの増加を制御するために除荷が行なわれ、岩石モデル内に蓄積されているひずみエネルギーが小さくなる。その結果大きなエネルギーを放出する亀裂が少なくなり、Shear band の形成が途中で止まったと考えられる。このように、横ひずみ制御の一軸圧縮試験では明瞭な Shear band が形成されないため、岩石内のほとんどの領域が弾性を保持したままとなり、その結果、Class II の挙動を示したと考察している。

4・4 円孔を穿った直方体供試体の平面ひずみ三軸試験のシミュレーション

Fakhimi et al.⁵¹⁾ は、メッシュの影響なく破壊の局所化やひずみ軟化を表現できる点、またメッシュを切り直すことなく大変形の解析ができる点を、個別要素法の有用性として指摘している。彼らは、Fig. 13 に示すようなトンネルを模擬した円孔を穿った直方体供試体を用いて平面ひずみ三軸試験を行い、その結果を Cundall を中心とする ITASCA グループが開発した粒状体個別別要素法の商用コードである PFC で解析している。Fig. 13 に示した AE センサーの配置からわかるように、供試体上半分だけを AE 測定の対象としており、実験では Fig. 14 に示すように、円


 Fig.13 Test setup⁵¹⁾: (a) Specimen geometry and positions of AE sensors; (b) Loading configuration.

 Fig.14 AE locations with error smaller than 1mm⁵¹⁾. All 497 AE events are indicated by the closed circles. The eight AE sensors are positioned in the upper half of the specimen.

孔上部の右側と左側の両方に AE の震源が集中した後、円孔から右上と左下へ巨視的亀裂が生じた。一方 PFC のシミュレーション結果で破壊した、すなわち、接続が切れた 2 つ粒子の中心を結ぶ線分を考え、この線分に直交する方向に 2 つの粒子の粒径の平均長さの線分を描いて微小亀裂の発生を示すと、Fig. 15 のようになる。この図に見られる微小亀裂パターンとその発生領域は、実験で観察されたものによく似ている。また、この解析結果を詳細に検討すると、円孔上部の右側と左側の両方に微小亀裂の集積がみられた後、実験と同じように共役な 2 方向のうち一方向に選択的に亀裂が生じる様子が見られる。

Fig. 16 は、実験で得られた個々の AE の P 波初動の振幅値から、

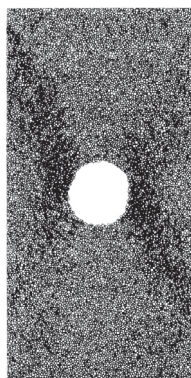


Fig.15 Synthetic specimen with the microcracks at the end of the numerical simulation⁵¹⁾. A microcrack induced in the numerical simulation is a line perpendicular to the centerline of the two particles with the broken bond that has a length equal to the average radii of two particles involved.

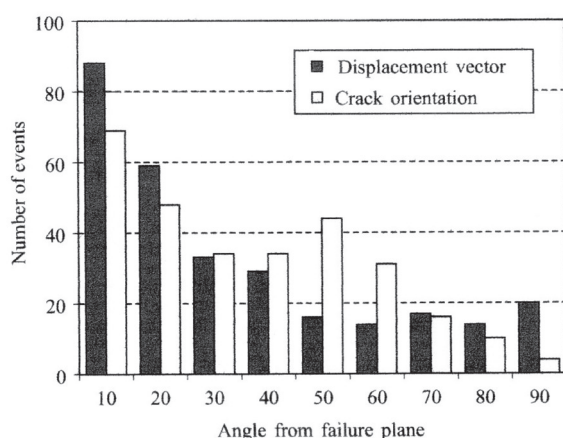


Fig.16 Statistics of the angles between the crack planes and displacement vectors with respect to the macroscopic failure plane⁵¹⁾

その AE を発生させた亀裂の方向と亀裂の変位方向を独立に求め、横軸にこれらの方向が巨視的亀裂の方向となす角度を、縦軸にその頻度をとって示したものである。この亀裂の方向と変位の方向が一致すればせん断破壊、直交すれば引張破壊であるが、一般には両者の角度は $0 \sim 90^\circ$ の間の様々な角度を有する。岩盤や岩石の AE の P 波初動の振幅値から破壊様式、すなわち、せん断破壊と引張破壊の違いに着目して議論を行っている論文も多いが(例えば, Shah and Labuz⁵²⁾, 大津⁵³⁾), この論文では個々の AE の破壊様式には着目せず、亀裂の方向と変位の方向がそれぞれの程度巨視的亀裂の方向に一致しているかを議論している。巨視的亀裂にほぼ平行なせん断破壊で AE が発生しているのであれば、亀裂の方向も変位の方向も巨視的亀裂と成す角は 0° に近いはずである。Fig. 16 は、どちらも 0° 付近が最も頻度が高いものの、 $0 \sim 90^\circ$ の間に広く分布することを示している。一方 PFC のシミュレーション結果から、微小亀裂を実線で、粒子の変位方向を灰色の矢印すと Fig. 17 のようになる、図の領域 B が大部分の微小亀裂を含む将来の巨視的亀裂の発生帯であり、その両側の領域 A 及び C の粒子は剛体運動に近い変位を示していることがわかる。この解析結果は、微小亀裂の方向もその変位の方向も必ずしも巨視的亀裂に平行な方向に生じていないことを示しており、Fig. 14 に示された実験の AE 測定結果とよい一致を示している。

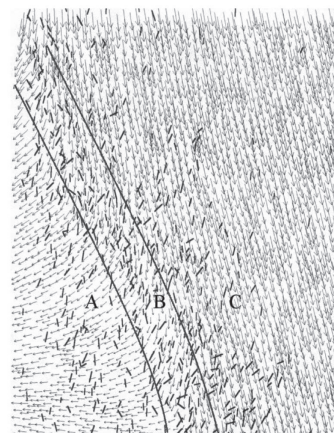


Fig.17 Close-up view of a portion of the failure plane together with the microcracks and displacement field⁵¹⁾.

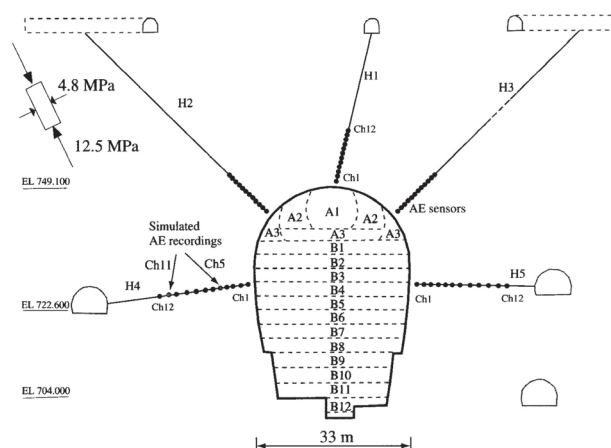


Fig.18 AE sensor layout in H section at the Kannagawa site⁵⁴⁾. Sensors are numbered sequentially from shallowest to deepest locations for the chamber.

一方、破壊面の幅に対応すると思われる領域 B の幅は 2.5mm で、モデルの平均粒子直径 0.4mm の約 6 倍である。一方実験で得られた供試体の破壊面の厚さは約 3mm だったので、この解析結果は巨視的破壊面の幅に関しても実験結果とよい一致をしているといえる。

4・5 実際の大規模地下発電所空洞への適用

Cai et al.⁵⁴⁾ は、大規模な地下発電所空洞の掘削に伴う AE 測定結果を、上述の PFC と FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) の連成解析結果と比較している。FLAC は有限差分法の一つで PFC と同様、ITASCA 社が開発し販売している商用コードである。

彼らが解析対象としたのは、東京電力(株)神流川地下発電所の掘削に伴う AE 測定の結果である。この AE 測定では、地下発電所空洞中央部の掘削断面の大きな 2 箇所の代表的断面で、周辺坑道から地下発電所に向けてそれぞれ 5 本のボーリング孔を掘削し、ボーリング孔ごとに 12 個、計 60 個、2 断面で合計 120 個の AE センサーを埋設し、それぞれの AE センサー毎に AE 発生数を整理した。Fig. 18 は、このような AE 測定を行った 2 つの計測断面のひとつを示している。

彼らは、測線 H4 の No.5 センサー(以下では、H4-5 と呼ぶ)で観測された AE 発生数に着目した。この地点では、高周波の AE センサーを用いた測定が行われたため、それぞれのセンサー

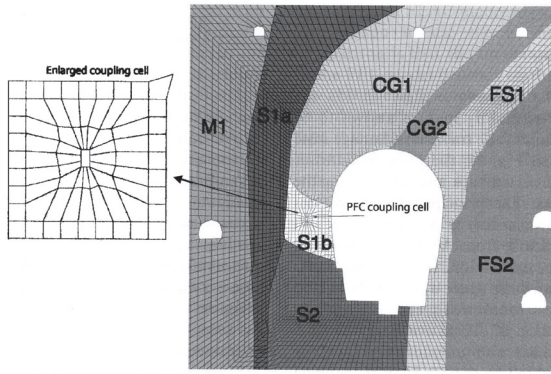


Fig.19 FLAC model for H4-5 sensor coupling analysis⁵⁴⁾.

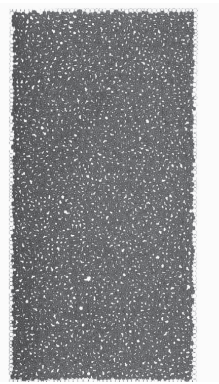
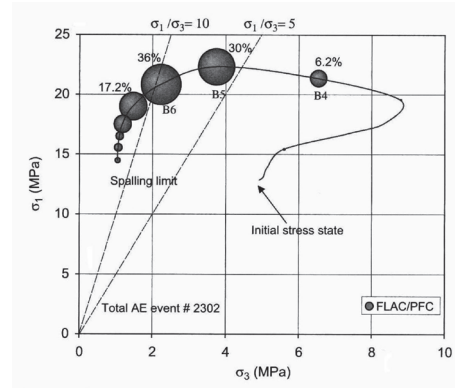


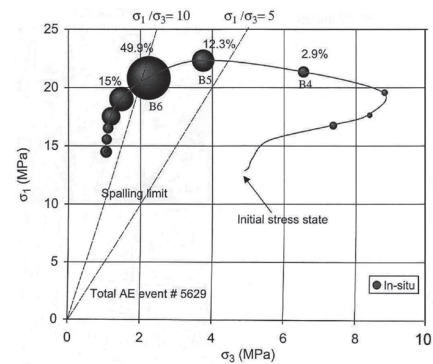
Fig.20 PFC model for the FLAC/PFC coupling analysis⁵⁴⁾. The model width is 0.5m and the height is 1.0 m.

は設置位置から 0.5 ～ 0.75m 程度の範囲で発生した AE しか受振しない。そこで、H4-5 センサーが測定対象としていられる幅 0.5m、高さ 1m の領域を粒状体個別要素法の PFC で、その周辺の幅 640m、高さ 610m の領域を FLAC でモデル化した。FLAC は不均質な岩盤や掘削ステップのモデル化が可能であるため、Fig. 19 に示すように地質調査結果に基づき領域内を 8 種類の岩盤に区分し、ひずみ軟化モデルを用いて、15 段階（最初の 3 段階はアーチ部、残りの 12 段階は本体のベンチ掘削）の掘削ステップ毎に応力と変位を解析した。S1b 岩盤モデル内に位置する PFC モデル周辺の FLAC のメッシュを、Fig. 19 の左側に拡大して示した。また、0.5×1m の PFC 領域は、Fig. 20 に示すように、4721 個の円盤で構成されている。生成された PFC モデルにはまず現地で測定された初期地圧を載荷し、掘削ステップ毎に得られた FLAC モデルの解析結果から PFC モデルに変位または変位速度が、逆に PFC モデルの解析結果から FLAC モデルに荷重が伝達される。各掘削ステップで、二つのモデルは変位または変位速度と荷重を互いに受け渡し、PFC モデル内での粒子間の接続ばねの破壊が AE の発生に対応するものと考えた。

Fig. 21 (a) は、PFC モデルとの連成なしの FLAC モデルの解析で得られた、空洞掘削の進展による PFC 領域の応力変化（応力経路）の上に、PFC モデルと連成して得た AE の発生数をプロットした図である。解析結果の AE 発生数は PFC モデルの粒子数が多ければ多くなるため、AE 発生数は全発生数に対する比で表示されている。解析結果は Fig. 21 (b) に示した実測された掘削に伴う AE 発生数の相対的な増減に、最大荷重以降の挙動を含めて極めてよい一致を示していることがわかる。



(a) FLAC-PFC coupled simulation



(b) Field measurement

Fig.21 AE numbers at H4-5 sensor from the FLAC-PFC coupled simulation and from the field measurement⁵⁴⁾.

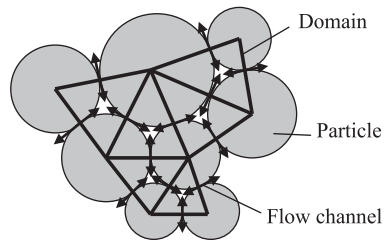
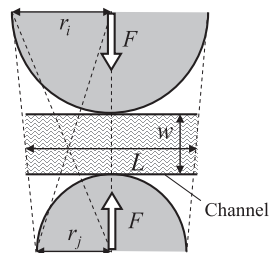
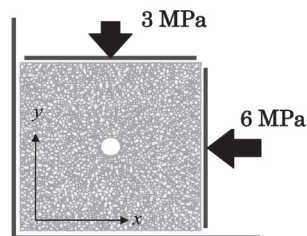
この論文では、AE 発生数に関する解析結果と実測結果の比較が他のセンサーの測定結果に対してもなされ、このような数値解析を用いることにより、AE 測定が地下発電所空洞のような大空洞の掘削時安定性の評価に有効に利用できることが示されている。

5. 流体の注入に伴う AE 発生の数値解析手法

石油の増進回収や二酸化炭素の地中貯留などで流体を圧入した場合に岩盤中で発生する AE をシミュレートするためには、流体の浸透現象や間隙水圧の変化を解析手法に取り入れる必要がある。個別要素法の幅広い利用とその発展を背景に、このような現象を、個別要素法に組み込む努力がなされてきた。

まず Thallak et al.⁵⁵⁾ が、1991 年に粘着力を有しない材料を対象に間隙水圧の作用を考慮できる flow-coupled DEM を開発し、水圧破碎の解析を試みた。Bruno⁵⁶⁾ は応力に依存した透水性の変化を考慮できるよう、1994 年にこのモデルを改良した。Thallak et al. と Bruno のモデルでは、流体の粘性の違いを考慮できない問題点があったが、Cundall は自ら開発した Itasca Consulting Group の商用コード PFC を改良し、流体の粘性を考慮できる Fluid Flow Algorithm を 2000 年に導入したが、この改良は論文としては公表されず、バージョンアップされたプログラムの取り扱い説明書に記されているに過ぎないようである⁵⁷⁾。Al-Busaidi⁵⁸⁾ は、この Fluid Flow Algorithm が導入された商用コード PFC を用いて、水圧破碎亀裂の発生と進展を解析し、実験結果と比較を試みている。

なおこれらの研究とは別に、わが国では砂地盤の液化化や圧密現象に個別要素法を用いる研究が行われてきており、独自の定式化で透水性や間隙水圧の導入が試みられている^{59,60)}。

Fig.22 Illustration of a model used for fluid flow algorithm⁶¹⁾.Fig.23 Channel width and length in the model⁶¹⁾.Fig.24 Rock specimen model for the simulation of hydraulic fracturing⁶¹⁾.

さて上述の Fluid Flow Algorithm を、清水らは自作の個別要素法プログラムに導入し、水圧破碎のシミュレーションを行っている^{61,62)}。以下では彼らの定式化に従って、このアルゴリズムを説明する。まず、Fluid Flow Algorithm を導入するには Fig. 22 のようにある程度接近した粒子の中心間を結び、多数の閉鎖された領域を作成する。これらの領域は流体で満たされており、隣接する領域に水圧差がある場合、粒子の接触点を流路として水圧差に応じて流体を移動させる。

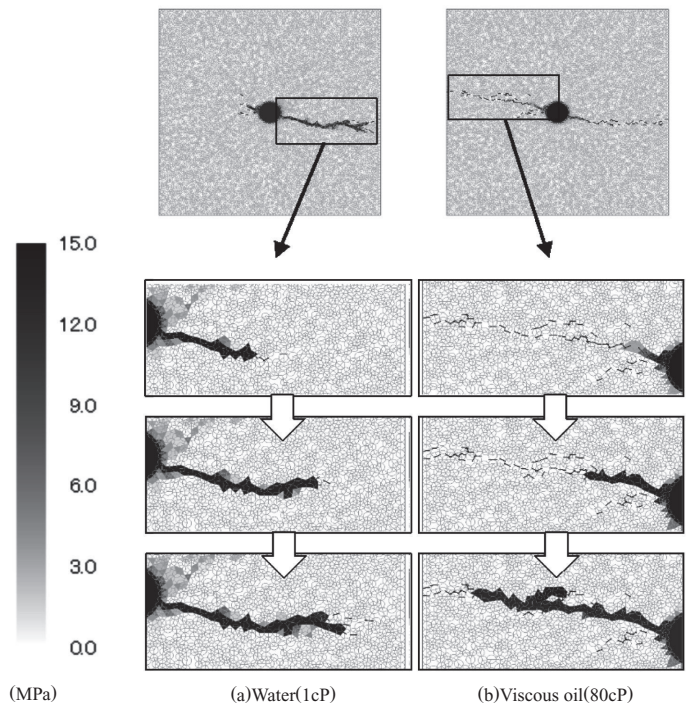
流路内の流体流動は、平行平板流れ、さらに層流を仮定することにより二次元 Poiseuille flow とみなすことができる。このとき、粒子間の間隙を流れる流量 Q は式 (2) で与えられる。

$$Q = \frac{w^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

このとき、Fig. 23 に示すように、 w は粒子間の間隙幅、 L は流路の長さを表している。流路長 L は 2 要素の半径 r_i , r_j の調和平均から式 (3) のように与えられると仮定する。また、 ΔP は隣接する領域の流体圧差、 μ は流体の粘性を表している。なお、平行平板の紙面に直交方向の奥行きは 1 としている。

$$L = 2 \cdot \frac{2r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (3)$$

式 (2) によると粒子同士が接触しているとき、つまり間隙幅 $w = 0$ となると、まったく流体の流動が起こらないことになる。これを避けるため、間隙幅 w を、Fig. 23 に示すような粒子間に

Fig.25 Difference of fracture propagation and fluid infiltration behavior depending on fluid viscosity⁶¹⁾. The solid lines indicate the crack generations and the shade of each domain indicates the fluid pressure.

作用する圧縮力 F に応じて式 (4) で与えることにする。ここで、 w_0 は基準となる間隙幅を表しており、 F_0 は $w = w_0/2$ となるときの圧縮力を表している。 w_0 に任意の値を与えることによりモデルの透水性を変化させることができる。

$$w = \frac{w_0 F_0}{F + F_0} \quad (4)$$

式 (2) における流量 Q は一つの流路を流れる流量であり、岩石モデル全体の透水性は、複雑に連結された多数の流路の集合体として示される。このように Fluid Flow Algorithm では、(2) 式で流体の粘性を、(4) 式で応力に依存した浸透性の変化を表現することができる。

清水らは、このような Fluid Flow Algorithm を導入した個別要素法を用いて、Fig. 24 に示すようなモデルに対して水圧破碎のシミュレーションを行っている^{61,62)}。すなわち、円孔を有する正方形の岩石モデルを作製し、モデルの下端と左端の壁を固定しておき、上端と右端の壁に荷重を作用させることでモデルに拘束圧をかけた。さらに、モデル中央の円孔に破碎流体を流量一定で圧入することによって水圧破碎を再現した。シミュレーションは、粘性の異なる水 (1cP)、油 (80cP) の 2 種類の破碎流体について行い、それぞれの結果を比較検討した。

Fig. 25 は、シミュレーション結果について、モデル上の四角で囲った領域を拡大して表示したもので、亀裂の進展にともなう流体流動の様子を表している。短い線分は発生した亀裂を、黒い濃淡は間隙水圧の大きさを示している。Fig. 25 (a) の粘性の小さい水の場合には亀裂の進展にともなって瞬時に亀裂内に流体が浸入しているが、Fig. 25 (b) の粘性の大きな油の場合には、まず亀裂が先行し、流体はその後ゆっくりと亀裂内に浸入している。

Fig. 26 は、亀裂の発生時に粒子間に蓄えられていたひずみエネルギーの大きさを示している。粘性の小さい流体を用いた場合、

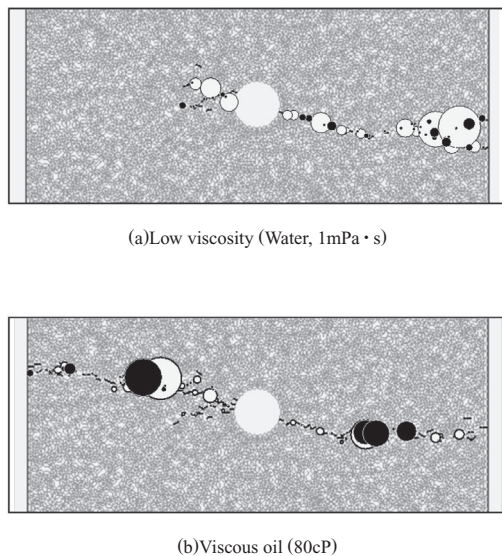


Fig.26 Distribution of AE sources induced in the simulation of hydraulic fracturing⁶¹⁾. Closed circles indicate tensile fracture, while open circles indicate shear fracture. The diameter of the circle corresponds to the magnitude of crack energy.

Fig. 26 (a) に示すように引張亀裂はほとんどすべて小さなエネルギーしか放出していない。一方、粘性の大きな流体を用いた場合 Fig. 26 (b) に示すようにところどころで大きなエネルギーを放出する引張亀裂が発生している。亀裂の発生時刻と位置から、このようなエネルギーの大きい亀裂は粘性の大きい流体が亀裂内部に浸入する際に発生していることがわかった。

破碎流体の粘性が小さければ亀裂の開口が小さく、亀裂発生時に放出されるエネルギーが小さい。一方、粘性の大きい流体であれば流体が亀裂内部に浸入する際、大きな体積変化を伴う亀裂の開口が起こり、それによって大きなエネルギーが放出されることになる。すでに述べたように引張亀裂による AE のエネルギーがせん断亀裂による AE のエネルギーよりも小さいこと、さらに現実の AE 測定実験ではエネルギーの小さい AE が観測されにくいことを考慮すると、粘性が小さい場合には引張亀裂のエネルギーが小さいため観測されず、せん断亀裂が卓越しているように見えると考えられる。一方、粘性の大きい流体を用いた場合には比較的能量の大きい引張型 AE が発生するため、せん断型 AE とともに引張型 AE も観測されることが考えられる。この Fluid Flow Algorithm を導入した粒状体個別要素法によるシミュレーションの結果は、粘性の異なる水 (1cP)、油 (80cP) の 2 種類の破碎流体を用いて Ishida et al.^{63,64)} が行った水圧破碎実験の亀裂の進展過程や進展速度の傾向とよく一致している。

また水圧破碎は理論的には引張破壊で生じるとされているが⁶⁵⁻⁶⁷⁾ 通常の水を用いた現地の水圧破碎ではせん断破壊を示す AE が卓越する⁶⁸⁻⁷⁰⁾ ことが知られており矛盾が指摘されていたが、シミュレーションで亀裂の発生エネルギーに着目することによりこの矛盾を説明することがわかった。すなわち、粘性の大きい流体を用いた場合には比較的能量の大きい引張亀裂が発生するが、水のように粘性が小さい流体による破碎の際には引張亀裂のエネルギーが小さい。このため、通常の水を用いた現地の水圧破碎の AE 測定では、エネルギーの小さい AE はノイズ等に埋もれて観測されにくく、エネルギーの大きなせん断型 AE が相対的に発生数の少ないにもかかわらず卓越しているように見え

ると思われる。

このような Fluid Flow Algorithm を導入した粒状体個別要素法を用いれば、石油の増進回収や二酸化炭素の地中貯留などで流体を圧入した場合に、岩盤の不均質性に起因して不規則に発生する AE をシミュレートすることができ、観測された AE を理論的に検討することが可能である。

6. 結 言

AE 測定結果を有効に用いるためには、AE の発生過程を数値解析でシミュレートし、現象を理論的に考察することが望ましい。しかし、AE の発生は岩盤が本質的に有する不均質性と密接に関連しているため、その数値解析には不均質性を表現するやや特殊な工夫が必要である。本総説では、このような AE の発生をシミュレートするための数値解析手法について、研究や開発の推移を総括し解説した。その結果を整理すると次の通りである。

(1) 有限要素法を基礎とした手法としては、乱数を用いて各要素に不均質強度とヤング率を与えて岩盤の不均質性を表現する Tang らの RFPA コードが AE 発生シミュレーション手法として適用可能である。彼らは、岩石の一軸圧縮試験のシミュレーションを行い、震源が分散していた AE が狭い範囲に集中して破壊の核が形成され、その後巨視的破壊に至るプロセスを数値解析で再現している。また彼らは、この数値解析コードを用いて、さまざまなモデル解析を行い、山はねの発生機構を考察している。

(2) 境界要素法を基礎とした手法としては、DDM 要素を用いた Napier らの DIGS コードと Stephansson らの FRACOD コードが、AE 発生シミュレーション手法として適用可能である。Stephansson らは、FRACOD コードを用いて、日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所立坑周辺の亀裂進展の予測解析を行っており、この解析結果は将来の AE 測定結果との対比に有用と思われる。

(3) 最近の進歩が著しい粒状体個別要素法は、岩盤を粒子の集合体としてモデル化する手法であるため、岩盤内部に生じる応力を比較的容易にかつ適切に表現できる特徴があり、AE 発生シミュレーション手法として有用である。清水らは、この手法を用いたシミュレーションにより、引張破壊の卓越が予想される岩石の一軸圧縮試験でせん断破壊を示す AE が卓越して観測される理由や、ClassII 岩石の激しい破壊は岩石内のほとんどの領域が弾性を保持したまま破壊に至ることが一因であることなど、岩石の破壊機構に関し新たな知見を明らかにしている。

(4) Fakhimi et al. は、メッシュの影響なく破壊の局所化やひずみ軟化を表現できる点、またメッシュを切り直すことなく大変形の解析ができる点を、個別要素法の有用性として指摘している。彼らは円孔を穿った直方体供試体の平面ひずみ三軸試験の AE 測定結果を粒状体個別要素法でシミュレートし、実験結果に一致する良好な解析結果を得ている。

(5) Cai et al. は、粒状体個別要素法の商用コードである PFC と有限差分法の一つである FLAC の連成解析により、大規模な地下発電所空洞の掘削に伴う岩盤挙動の解析を行い、AE 測定の実測結果と比較している。彼らはその結果から、このような数値解析を AE 測定と併用することにより、AE 測定が空洞の安定性評価に有効に利用できることを示している。

(6) 石油の増進回収や二酸化炭素の地中貯留などで流体を圧入した場合に岩盤中で発生する AE をシミュレートするためには、流体の浸透現象や間隙水圧の変化を取り入れる必要がある。個別要素法では、Fluid Flow Algorithm と呼ばれる考え方を導入することにより、このような現象を解析する努力がなされてきた。最近で

は、清水らが岩石の水圧破砕の解析を行っている。彼らは破砕流体の粘性が大きくなると水圧破砕の卓越破壊モードがせん断破壊から引張破壊に変化することを解析的に示し、実験で観測されたAEのメカニズム解析結果の傾向を合理的に説明できることを示した。

現在わが国で計画されている高レベル放射性廃棄物の地層処分や中央新幹線の建設では、地下深部に空洞が掘削されるため、AE観測による亀裂の進展や山鳴り、山はねの監視が有用である。また二酸化炭素の地中貯留や石油の増進回収における貯留層のモニタリング手法としても、AE観測は有用と思われる。本総説で述べた解析手法のさらなる発達とその適切な利用は、このようなさまざまなプロジェクトに対するAE測定の実用性と有用性を高めるものと期待される。

付記 文献18から引用したFig. 1-3, 文献46から引用したFig. 10-12, 文献51から引用したFig. 13-17, 文献54から引用したFig. 18-21についてはElsevier社より、文献26から引用したFig. 4及びTable 1についてはSpringer-Verlag社より、文献40から引用したFig. 7-9については当該雑誌EditorのKanji Ono教授より、文献32から引用したFig. 5-6についてはTaylor & Francis社から、文献61より引用したFig. 22-26については資源・素材学会より、それぞれ一部有償で図表の使用の許可を得た。

References

- R. M. Koerner, W. M. McCabe and A. E. Lord, Jr.: *Rock Mechanics*, **14** (1981), 27-35.
- <http://www.miningweekly.com/article/worlds-new-deepest-mine-safe-cheap-anglogold-2009-02-09>
- <http://allafrica.com/stories/200704110802.html>
- C. A. Tang (Edit), *Proc. of the 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, (Riston Press, New York/ New Jersey, 2009).
- Y. Hiramatsu, J. Maebashi, Y. Oka, K. Sakai, S. Ogasawara, K. Ishihara, Y. Mizuta and N. Ichisugi, *Journal of MMIJ*, **91** (1975), 513-519.
- Fujii, Y., Ishijima, Y. and Deguchi, G.: *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, **34** (1997), 85-96.
- Y. Niwa, S. Kobayashi, T. Fukui, T. Yanagidani and M. Ohtsu: *Proc. of the 10th Symposium of Rock Mechanics* (Japan Society of Civil Engineers, 1976), pp.46-49.
- A. Hirata, Y. Kameoka and T. Hirano: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **40** (2007), 563-576.
- T. Ishida, T. Kanagawa, Y. Uchita and M. Urayama: *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, **529/III-33** (1995), 19-28.
- T. Shiotani, K. Kumagai, K., Matsumoto, K. Kobayashi and H. Chikahisa: *Proc. of the 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, (Millpress, Rotterdam, 2004), pp. 573-578.
- M. Cai, H. Morioka, P. K. Kaiser, Y. Tasaka, H. Kurose, M. Minami and T. Maejima: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44** (2007), 538-549.
- A. Jupe, R. Jones, S. Wilson and J. Cowles, J.: *Proc. of 2000 Society of Petroleum Engineers (Society of Petroleum Engineers, 2000)*, Paper No. SPE63131.
- K. Tezuka and T. Tamagawa: *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, **69** (2004), 635-646.
- P. McGillivray: *Recorder*, **30** (2005), 5-9.
- J. H. Healy, W. W. Rubey, D. T. Griggs and C. B. Raleigh: *Science*, **161** (1968), 1301-1310.
- P. A. Hsieh, and J. D. Bredehoeft: *Journal of Geophysical Research*, **86** (1981), 903-920.
- H. Uno, T. Ishida and Y. Mizuta: *Journal of MMIJ*, **118** (2002), 150-156.
- Tang, C. A.: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34** (1997), 249-261.
- D. A. Lockner, D. E. Moore and Z. E. Reches: *Rock Mechanics* (Edited by Tillerson and Wawersike), (Balkema, Rotterdam, 1992), pp.807-815.
- T. Yanagidani, S. Ehara, O. Nishizawa, K. Kusunose and M. Terada: *Journal of Geophysical Research*, **90** (1985), 6,840-6,858.
- C. A. Tang, Y. F. Fu, S. Q. Kou and P. A. Lindqvist: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **35** (1998), 1001-1007.
- Z. H. Chen, C. A. Tang and R. Q. Huang: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34** (1997), 991-1000.
- C. A. Tang and P. K. Kaiser: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **35** (1998), 113-121.
- P. K. Kaiser and C. A. Tang: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **35** (1998), 123-134.
- S. L. Crouch and A. M. Starfield: *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, (Unwin Hyman, London, 1983), pp.79-109.
- S. Sellers and J. Napier: *Computational Mechanics*, **20** (1997), 164-169.
- J. Napier and D. Malan: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34** (1997), 1075-1089.
- FRACOM Ltd, FRACOD^{2D}-Two-dimensional fracture propagation code (Version 2.2) - user's manual: (FRACOM Ltd., Helsinki, 2006).
- B. Shen: *Mechanics of fractures and intervening bridges in hard rocks*, PhD thesis, (Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 1993).
- B. Shen and O. Stephansson, *Engineering Fracture Mechanics*, **47** (1994), 177-189.
- B. Shen and O. Stephansson, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **30** (1993), 861-867.
- O. Stephansson, B. Shen, M. Rinne, T. Backers, K. Koide, S. Nakama, T. Ishida, Y. Moro and K. Amemiya: *Proc. of the 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment*, (Balkema, Lisse, 2003), pp. 37-46.
- F. Lanaro, T. Sato and O. Stephansson, O.: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **46** (2009), 450-461.
- B. Shen, O. Stephansson and M. Rinne, *Oil & Gas Science and Technology*, **57** (2002), 579-590.
- P. A. Cundall and O. D. L. Strack: *Geotechnique*, **29** (1979), 47-65.
- D. O. Potyondy and P. A. Cundall: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **41** (2004), 1329-1364.
- H. Shimizu: *Distinct element modeling for fundamental rock fracturing and application to hydraulic*, PhD thesis, (Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 2010).
- H. Shimizu, S. Murata and T. Ishida: *Journal of MMIJ*, **124** (2008), 777-784.
- H. Shimizu, S. Murata and T. Ishida: *Journal of MMIJ*, **125** (2009), 91-97.
- H. Shimizu, S. Murata and T. Ishida: *Journal of Acoustic Emission*, **27** (2009), 194-211.
- K. Kusunose, K. Yamamoto, T. Hirasawa: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **32** (1979), 11-24.
- R. L. Kranz: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **16** (1979), 23-35.
- K. Kusunose, O. Nishizawa, H. Ito, T. Ishido and I. Hasegawa: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **34** (1981), 131-140.
- O. Idehara, T. Satoh, O. Nishizawa and K. Kusunose: *Journal of the Seismological Society of Japan*, **39** (1986), 351-360.
- X.-L. Lei, O. Nishizawa, K. Kusunose and T. Satoh: *J. Phys. Earth*, **40** (1992), 617-634.
- H. Shimizu, T. Koyama, T. Ishida, M. Chijimatsu, T. Fujita and S. Nakama: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **47** (2010), 323-333.
- H. Shimizu, T. Koyama, T. Ishida, M. Chijimatsu and T. Fujita: *Journal of MMIJ*, **126** (2010), 1-9.
- J. A. Hudson, E. T. Brown and C. Fairhurst: *Rock Mechanics*, **3** (1971), 217-224.
- M. Terada, T. Yanagidani and S. Ehara: *Proc. of the 3rd Conf. on Acoustic Emission/ Microseismic activity in Geologic structures and materials*. (Trans Tech, 1984), 159-171.
- S. Okubo and Y. Nishimatsu: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **22** (1985), 323-330.
- A. Fakhimi, F. Carvalho, T. Ishida and J. F. Labuz: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **39** (2002), 507-515.
- K. R. Shah and J. F. Labuz: *Journal of Geophysical Research*, **100** (1995), 15527-15539.
- M. Ohtsu: *Journal of Geophysical Research*, **96** (1991), 6211-6221.
- M. Cai, P. K. Kaiser, H. Morioka, M. Minami, T. Maejima, Y., Tasaka and H. Kurose: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44** (2007), 550-564.
- S. Thallak, L. Rothenburg and M. Dusseault: *Proc 32nd U.S. Symp. on Rock Mechanics*, (Balkema, Rotterdam, 1991), pp. 271-280.
- M. S. Bruno: *Mechanics of Materials*, **18** (1994), 31-48.
- P. A. Cundall, unpublished technical note, 2000.
- A. Al-Busaidi, J. F. Hazzard and R. P. Young, R. P.: *Journal of Geophysical Research*, **110** (2005): Paper No. B06302.
- Y. Tarumi and M. Hakuno: *Natural Disaster Science*, **10** (1988), 45-59.
- H. Kiyama, T. Nishimura and H. Fujimura: *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, **499/III-28** (1994), 31-39.
- H. Shimizu, S. Murata and T. Ishida: *Journal of MMIJ*, **126** (2010), 124-130.
- H. Shimizu, S. Murata and T. Ishida: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **48** (2011), 712-727.
- T. Ishida, Q. Chen and Y. Mizuta: *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, **547/III-36** (1996), 183-198.
- T. Ishida, Q. Chen, Y. Mizuta and J.-C. Roegiers: *Journal of Energy Resource Technology (Transactions of the ASME)*, **126** (2004), 190-200.
- M. K. Hubbert and D. G. Willis: *Petroleum Transactions American Society of Mining Engineers*, **210** (1957), 153-168.
- B. C. Haimson: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **15** (1978), 167-178.
- Y. Mizuta, O. Sano, S. Ogino and H. Katoh: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **24** (1987), 15-29.
- R. Baria and A. S. P. Green: *Progress in Acoustic Emission III*, (The Japanese Society of NDI, Tokyo, 1986), pp. 407-429.
- Sasaki, S.: *A Study on Characteristics and Source Mechanism of Acoustic Emission Induced by Hydraulic Fracturing*, PhD thesis, (Faculty of Science, Tohoku University, Sendai, 1995).
- S. Talebi and F. H. Cornet: *Geophysical Research Letter*, **14** (1987), 227-230.