接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の推定に関する基礎実験*

藤井 義明¹ 大高 憲道²
中川 嘉文³ 児玉 淳一⁴

A Study on Estimation of Rock Stress based on Variation of Tangent Modulus

by Yoshiaki FUJII^a*, Norimichi OHTAKA^b, Yoshifumi NAKAGAWA^c and Jun-ichi KODAMA^a

- a. Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan (*Corresponding author: E-mail fujii@rock.eng.hokudai.ac.jp / FAX 011-706-6299)
b. Komatsu, 2-3-6, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8414, Japan
c. Chuo Sekkei Engineering, Hirooka, Kanazawa, 920-0031, Japan

Tangent modulus method was investigated as one of core-based methods for rock stress measurement and was compared to DRA method. It was clarified that the preloaded stress level was accurately estimated as the stress level at the bending point on the stress-tangent modulus curve by the tangent modulus method. Relationship between duration of load application and maximum delay time for stress memory was investigated by carrying out the both methods. The bending point gradually became vague as the delay time increased in the both methods. The accuracy of estimated stress level of the preloading was almost the same for the both methods. It was shown that the preloaded stress level was accurately estimated from the rock specimen which had been preloaded for approximately one week and had been left for approximately six weeks.

KEY WORDS: Rock Stress, Tangent Modulus Method, DRA Method

1. 結 言

岩盤応力を測定するために種々の方法が考案されている¹⁾。それらの方法は、原位置で行われる方法、定方位コアを用いる方法(以下コア法と呼ぶ)、その他の方法に大別することができる。

コア法とは、コアボーリングにより採取された方位のわかっている岩石コアについて種々の物理量を計測し、その結果からコアに作用していた岩盤応力を推定しようとする方法であり、AE法、DRA法、DSCA法、ASR法等、様々な手法が提案されている。

これらの手法は、原位置試験に比べればコストが安く、労力が少ないとみなされているようであるが、たとえば通常の一軸圧縮試験と較べると、いずれも必ずしも一般的ではない実験機器を必要とし、程度の差こそあれ試験手順が煩雑であり、ときには、データ解析に多大な労力を要する。

そこで、ここでは、通常の一軸圧縮試験に用いる機器だけで実施でき、従来のコア法より簡便でデータ解析の労も少ない手法として、接線ヤング率法^{2,3)}に関する基礎実験を行う。接線ヤング率法では、円柱形岩石供試体を2サイクル繰り返し一軸圧縮し、応力-接線ヤング率線図の屈曲点の応力値を先行応力値とみな

す。実験自体は、荷重とブラテン変位あるいは軸ひずみを記録しながら2サイクルの繰り返し繰り返し載荷するだけなので、用いる機材は通常の一軸圧縮試験と同じで、特別な機材を必要としない。また、DRA法における reduced strain の計測、AE法におけるAE測定、DSCA法における静水圧載荷に伴う多方向ひずみの精密測定、ASR法における多方向の非弾性ひずみ回復量の精密測定等の労もない。データ解析は接線ヤング率を求め、応力-接線ヤング率線図を描き、その屈曲点を読み取ることだけである。

ここでは、まず、定荷重で一軸先行載荷を受けた岩石供試体をすぐに再載荷した場合に、接線ヤング率法により先行載荷応力値を推定できることを示す。

実際の岩盤は三軸圧縮応力下にある場合が多い。また、岩盤応力測定において岩石試料採取・試料整形の際に供試体は、程度の差こそあれ応力集中や温度・乾燥条件の変化を蒙り、試料採取から試験開始までにはある程度の時間が経過する。したがって、接線ヤング率法の実用化にあたっては、上記諸要因の影響を検討する必要がある。

本研究では、接線ヤング率法の実用化への次のステップとして、上記諸要因のうち、原位置から採取した岩石がどのくらいの期間岩盤応力の記憶を保持しているのか検討する。

実験室において先行載荷し、ある時間静置した岩石供試体について、AE法で先行載荷応力値を推定し、推定値の経時変化を示した研究は数多い。しかしながら、たとえば、Lavrov⁴⁾のレビューによると、数時間で先行応力値の記憶が失われるとした研究から先行応力値の記憶が300日以上保持されたとした研究まで結果は様々であり、統一した見解は得られていないようである。

*2006年2月27日受付 9月21日受理

1. 普通会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科環境循環システム専攻

2. 工修 コマツ購買本部

3. 工修 中央設計技術研究所 総合技術部 技師

4. 普通会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科環境循環システム専攻

[著者連絡先] FAX: 011-706-6299

E-mail: fujii@rock.eng.hokudai.ac.jp

キーワード: 岩盤応力, 接線ヤング率法, DRA法

Table 1 P-wave velocity of sandstone block.

Direction	P-wave velocity (km/s)
X	2.48
Y	2.65
Z	2.66

Table 2 Results of uniaxial compression tests. Values are represented as "average value $\pm$ standard deviation (number of specimens)"

Uniaxial compressive strength (MPa)	52.8 $\pm$ 0.4 (3)
Young's modulus (GPa)	9.3 $\pm$ 0.4 (3)
Poisson's ratio	0.36 $\pm$ 0.03 (3)

一方、DRA 法において先行応力が正しく推定できた最大の静置時間（記憶保持時間と呼ぶ）に関する検討例は多くないが、たとえば、小島ら⁵⁾は、2回、100回の繰り返し载荷、24時間の定荷重载荷をうけた稲田花崗岩供試体について、DRA 法による先行载荷応力値の推定を実施し、時間の経過とともに推定される応力値が小さくなることを報告している。

本研究では、0～10000分の定荷重先行载荷を施し、除荷後ある時間静置した円柱形岩石供試体に対して先行载荷応力値の推定を試みる。

DRA 法は、原位置において作用していた供試体軸方向の直応力値を境に岩石の変形率が変化するという仮定に基づいている。すなわち、屈曲点検出に用いる物理的現象は接線ヤング率法と同じである。また、本研究で用いる岩石試料は、比較的大きな塑性ひずみを示すので、ひずみ差は大きく、2回の繰り返し载荷を3回以上に増やし、ひずみ差関数の解析を加えるだけで、オリジナルとは手法が多少異なるものの DRA 法における先行定荷重载荷時間と記憶保持時間との関係についても検討できるようになる。そこで、これについても実施した。

2. 実験方法

2・1 供試体

和歌山県西牟婁郡白浜町産の白浜砂岩を試験に用いた。一辺 30 cm の立方体型岩石供試体の互いに直交する 3 組の面に垂直なそれぞれの方向に X, Y, Z 軸を設定し、各軸方向の P 波速度を、共振周波数 140 kHz の受振子・発振子を用いて測定したところ Table 1 のようになった。堆積面と思われる一番 P 波速度の遅い方向にボーリングし、直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱供試体を作製した。恒温槽において 80°C で 2 日間乾燥させた後、7 日間以上常温大気中に静置し自然乾燥状態とした。

ブラテンの変位速度 0.036 mm/min の一軸圧縮試験を実施して求めた一軸圧縮強度、50% 接線ヤング率、最大荷重点を 100% の応力レベルとした場合の 50% 応力レベルにおける周ひずみー応力線図の傾きの絶対値で 50% 接線ヤング率を除いて求めたポアソン比は Table 2 に示すようであった。

なお、実験時の岩石供試体は採取より 3 年以上経過している上、円柱形供試体は水を用いた整形過程を経ている。AE 法における岩盤応力の記憶が水分飽和度の変化に大きく影響される⁴⁾ことも考慮し、接線ヤング率法や DRA 法においても、原位置にお

Fig.1 Loading pattern.

る岩盤応力の記憶はもはや検出されないはずであると仮定して試験に供した。

2・2 実験の手順

円柱形岩石供試体の上下に直径 30 mm、長さ 30 mm のステンレス製のエンドピース、軸方向のひずみを測定するためのクリップゲージ (Instron 社製、定格 ± 1 mm) を取り付け、材料試験機 (Instron 社製 5586、機械式、容量 300 kN) を用いて Fig. 1 に示すパターンで球座を介して载荷した。すなわち、まず、一軸圧縮強度の 30% レベルの 15.8 MPa で t_L (min) の定荷重载荷を行った後除荷した。筆者らには、過去に AE 法による先行応力の推定を試みた経験がある。このとき、先行応力载荷後に除荷して再载荷すると先行応力が正確に推定された。しかしながら、実験手順を、実際の岩盤応力推定の手順に多少なりとも近づけるために、除荷した際にエンドピース・球座・AE センサー等を一旦取り外し、再度取り付けて再载荷してみると先行応力値の推定精度が悪くなった。これを参考にして、本研究でも、除荷した際にはエンドピース・クリップゲージ・球座を一旦取り外した。 t_R (min) 静置後、再び、エンドピース・クリップゲージ・球座を取り付け、一軸圧縮強度の 50% レベルの 26.4 MPa まで 5 サイクルの繰り返し载荷を行った。繰り返し载荷の n サイクル目を (2) - n と呼ぶことにする。なお、载荷と除荷はいずれもブラテンの速度を 0.36 mm/min として行った。繰り返し载荷時の荷重・ブラテン変位・クリップゲージによる軸方向の変形を記録した。

DRA 法におけるひずみ差関数の計算は以下のように行った。

- (1) 応力ーひずみのデータを各繰り返しサイクル毎に、応力レベルで 0 以上 1 MPa 未満、1 MPa 以上 2 MPa 未満というように 1 MPa 毎の区間に分類する。
 - (2) 各応力レベル区間内でひずみと応力の平均値をそれぞれ求める。
 - (3) ちょうど 1 MPa 毎のひずみ値をひずみと応力の平均値から線型補間により求める。
 - (4) (2) - j 回目の载荷におけるひずみから (2) - i 回目の载荷におけるひずみを減じひずみ差関数 $\Delta \epsilon_{j,i}$ を求める。
- 求めたひずみ差関数を観察したところ、(2) - 1 のデータを用いないひずみ差関数には明瞭な屈曲点が認められなかったので本文 3. では、 $\Delta \epsilon_{2,1}$ 、 $\Delta \epsilon_{3,1}$ 、 $\Delta \epsilon_{4,1}$ を示す。

3. 実験結果

Fig. 2 に、先行载荷を受けていない供試体を破壊するまで一軸圧縮した場合の接線ヤング率ー応力線図を示す。一軸圧縮時の接線ヤング率は上に凸な略半円状になっている。Fig. 3 に、15.4 MPa で 1 分間先行载荷した供試体を、静置時間無しで再载荷した場合の (2) - 1, (2) - 2 における接線ヤング率ー応力線図を、Fig. 2 の先行载荷がない場合の供試体の接線ヤング率ー応力線図とともに示す。(2) - 1 では接線ヤング率が先行载荷がない場合よりも

Fig.2 Tangent modulus diagram in uniaxial compression up to failure.

Fig.3 Tangent modulus diagram for specimens with and without preloading.

(a) $t_R = 0$ (min)

(b) $t_R = 60$ (min)

(c) $t_R = 120$ (min)

(d) $t_R = 180$ (min)

(e) $t_R = 360$ (min)

(f) $t_R = 480$ (min)

Fig.4 Tangent modulus diagram based on the displacement of the platen.

(a) $t_R = 0$ (min)

(b) $t_R = 60$ (min)

(c) $t_R = 120$ (min)

(d) $t_R = 180$ (min)

(e) $t_R = 360$ (min)

(f) $t_R = 480$ (min)

Fig.5 Tangent modulus diagram based on the clip gauge.

Fig.6 Strain difference diagram based on the displacement of the platen. The symbols $\circ$, Δ and $\square$ denote $\Delta\epsilon_{2,1}$, $\Delta\epsilon_{3,1}$ and $\Delta\epsilon_{4,1}$ respectively.

Fig.7 Strain difference diagram based on the clip gauge. The symbols $\circ$, Δ and $\square$ denote $\Delta\epsilon_{2,1}$, $\Delta\epsilon_{3,1}$ and $\Delta\epsilon_{4,1}$, respectively.

大きくなっている。先行载荷応力値 (15.4 MPa) 以上では、先行载荷がない場合の接線ヤング率との差が減少し、軸応力 26.4 MPa では先行载荷のない供試体の一軸圧縮時の値とほぼ等しくなっている。(2) -2 の接線ヤング率は、(2) -1 における 26.4 MPa までの载荷により、15.4 MPa を超えても先行载荷がない供試体の一軸圧縮時の接線ヤング率との差はほぼ一定である。以上のように、先行応力値は (2) -1 における接線ヤング率-応力線図の屈曲点の応力値として推定できる。

Figs. 4, 5 に $t_L = 1$ (min) の場合の接線ヤング率-応力線図を示

す。プラテンの変位 (クロスヘッドや材料試験機の変形を含む) を供試体長さで除して求めた軸ひずみに基づいた接線ヤング率 (Fig. 4) にも、クリップゲージで測定した軸方向の縮み量から計算した軸ひずみに基づいた接線ヤング率 (Fig. 5) にも、静置時間が小さい場合、(2) -1 には明瞭な屈曲点が認められる。クリップゲージにより得た応力-接線ヤング率線図の屈曲点は、プラテンの変位から計算して得たものよりもさらに明瞭である。応力の増加に伴う接線ヤング率の減少として明らかに認められる屈曲点を Type 1 の屈曲点と呼ぶことにする。(2) -2 では、50% レベルの応

Table 3 Effects of duration of load application (t_L) and delay time (t_R) on estimation of preloaded stress value (◎:Type 1, ○:Type2, ×: no bending point or stress value is less than 0.8 or more than 1.2).

t_R (min)	t_L (min)	t_L (min)					
		0	1	10	100	1000	10000
0	0	×	◎				
60	60	×	◎	◎			
120	120		◎	○			
180	180		○	◎			
360	360		○	◎	○		
480	480		×	○	◎		
600	600			×	○	◎	
1440	1440						
3000	3000				○	○	
6000	6000				×	×	○
30000	30000						○
60000	60000						○

力を新たな先行応力値として記憶したために屈曲点は消滅している。屈曲点は静置時間が大きくなるにつれ不明瞭となり、 $t_R = 480$ (min) では屈曲点の応力が先行応力値より小さくなっている。応力の増加とともにヤング率が低下せず、ヤング率の増加割合が減少するだけの屈曲点を Type2 の屈曲点と呼ぶことにする。Type 1 の屈曲点は (2) -1 だけから検出可能であるのに対し Type 2 の屈曲点は (2) -2 と比較しなければ検出が困難である。

$t_L = 1$ (min) の場合の応力-ひずみ差関数を Figs. 6, 7 に示す。ブラテンの変位から計算した応力-ひずみ差線図 (Fig. 6) とクリップゲージにより得たもの (Fig. 7) には大差ない。屈曲点は静置時間が小さい場合に明瞭であるが、静置時間が大きくなるにつれ不明瞭となり、 $t_R = 480$ (min) では目視による屈曲点の検出はかなり困難になった。

同様の試験を、 $t_R = 0 \sim 10000$ (min) まで行い、接線ヤング率法の結果を先行応力値が $\pm 20\%$ 以下の誤差で推定できた場合に Type1 を◎, Type2 を○, 先行応力値の誤差が大きい屈曲点が認められなかった場合を×として Table 3 にまとめて示した。DRA 法の場合にも Type の別はないが同様の結果が得られた。先行載荷時間と記憶保持時間との関係は両方法ともに Fig. 8 のようになった (先行載荷時間 10000 分の場合には、確認できた最大の静置時間をプロットした)。先行載荷時間と記憶保持時間との間には正の相関関係が認められる。

4. 接線ヤング率法や DRA 法における 応力の記憶と忘却のメカニズム

大きな塑性変形を示す岩石の繰り返し載荷時の応力-ひずみ線図を模式的に Fig. 9 のように描くことができる。Fig. 9 の OA が先行載荷、BD が (2) -1, EF が (2) -2 に対応する。これほど塑性ひずみが大きければ応力-ひずみ線図の屈曲点 C を目視で判断し、同点における応力値を先行載荷応力値と推定できる。しかしながら、実際の応力-ひずみ線図では Fig. 9 ほど塑性ひずみが大きくない場合が多いため、C における応力-ひずみ線図の屈曲を

Fig.8 Maximum delay time for stress memory with duration of load application.

検出するために、接線ヤング率法では接線ヤング率を、DRA 法ではひずみ差を BD と EF について求める。BC と CD を較べれば、先行載荷応力値を境に接線ヤング率が変わることは明らかである。また、BD と EF を較べれば、先行載荷応力値でひずみ差関数に屈曲点が現れることは明らかである。したがって、本研究における先行載荷応力の記憶の主な原因は岩石の塑性変形であるとして説明することができる。

一軸応力状態における気乾状態の岩石の塑性変形の原因としては、さまざまな理由による岩石の粘性変形、空隙の閉鎖、載荷軸と大きな角度をなす亀裂の閉鎖、載荷軸と小さな角度をなす傾斜亀裂のすべりと二次亀裂の成長などが挙げられる。たとえば、Matsuki and Kojima⁶⁾ は、傾斜亀裂のすべりと二次亀裂の開口に基づくコア法における応力記憶のメカニズムを提案した。しかしながら、この説には以下のような欠点がある。すなわち、傾斜亀裂のすべりと二次亀裂の開口はダイラタンシーの原因の一つと考えられる。AE 法であれば、局所的な現象として済ませることができると思われるが、DRA 法ではひずみゲージで計測したひずみに現れる程度の密度でこのような現象が生じることが要求され、ダイラタンシーが生じない程度の低応力レベルにおける応力記憶の主要なメカニズムとしてはふさわしくないのではないかとと思われる。次に、先行載荷時と岩盤応力推定時の封圧が異なる場合を考える。軸方向と α の傾斜を有する亀裂の滑り条件がクーロンの条件に従うものと仮定すれば、封圧 P_C と傾斜亀裂の滑りが生じる軸応力値 σ_C との間には以下の式が成り立つ。

$$\sigma_C = \frac{2C}{\sin 2\alpha + (\cos 2\alpha - 1) \tan \phi} + \frac{\sin 2\alpha + (\cos 2\alpha + 1) \tan \phi}{\sin 2\alpha + (\cos 2\alpha - 1) \tan \phi} P_C \quad (1)$$

ここで、 C は粘着力、 ϕ は摩擦角である。亀裂面間に粘着力が作用するかは議論があるが、それには関わらず、封圧値の変化 ΔP_C と傾斜亀裂の滑りが生じる軸応力値の変化 $\Delta \sigma_C$ との間には以下の式が成り立つ。

$$\Delta \sigma_C = \frac{\sin 2\alpha + (\cos 2\alpha + 1) \tan \phi}{\sin 2\alpha + (\cos 2\alpha - 1) \tan \phi} \Delta P_C \quad (2)$$

Fig. 10 に、摩擦角 $20 \sim 40^\circ$ に対応する $\Delta \sigma_C / \Delta P_C$ を示す。 $\Delta \sigma_C / \Delta P_C$ は

$$\alpha = \frac{\pi/2 - \phi}{2}$$

で最小値

Fig.9 Schematic stress-strain curve for a rock under cyclic loading showing large plastic deformation.

$$\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta P_C} = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} = 2.0 \sim 4.6 \dots\dots\dots (3)$$

を示している。つまり、亀裂の滑り開始が屈曲点として検出されると仮定すれば、たとえば、摩擦角 $20 \sim 40^\circ$ に対応する屈曲点の応力値の変化量は、封圧変化量の $2.0 \sim 4.6$ 倍以上になると見積もられる。一方、小島ら⁵⁾のDRA法や中川ら²⁾の接線ヤング率法において、先行载荷時と応力推定時における封圧変化量と屈曲点の応力値の変化量とはほぼ同じ程度であり、これは上述の見積もりと大きく異なる。

以上を考慮して、本研究における、気中での最長 10000 分程度のダイラテンシーが生じない程度の低応力レベル下での载荷における岩石の塑性変形の主な原因を、最大主応力と大きな角度をなす亀裂群が応力レベルに応じて徐々に不可逆的に閉鎖することによると仮定して検討を進めることとした。「不可逆」といわず「不可逆的」としたのは、閉鎖は回復しないわけではなく、時間依存的にゆっくり回復すると仮定したいためである。

岩石中に存在する多数の先在亀裂が閉鎖する応力は様々である。先行载荷応力時 (OA) には、ある程度以上閉鎖しやすい亀裂が閉鎖する。(2)-1 でも、先行载荷応力レベルまで (BC) は新たな閉鎖があまり生じないので接線ヤング率は大きい。ところが、応力レベルが先行载荷応力レベルを超えると、新たな閉鎖が生じるため接線ヤング率は小さくなる (CD)。(2)-2 で (2)-1 と同じ応力レベルまで载荷しても (EF) 新たな閉鎖はあまり生じないので接線ヤング率は大きいままとなる。

閉鎖しやすいは、均質な岩石内の亀裂であれば、主にその寸法と角度によるであろう。寸法が大きければ閉鎖しやすく、小さければ閉鎖しにくい。また、最大主応力との角度が大きければ (垂直に近ければ) 閉鎖しやすく、小さければ (平行に近ければ) 閉鎖しにくい。不均質な岩石であれば周辺鉱物の変形特性等にも大きく依存するものと考えられる。

屈曲点が時間とともに不明瞭になる主な原因は、先ほどの塑性ひずみが時間とともに減少すること、すなわち、いわゆる非弾性ひずみ回復と思われる。AE 法については Michihiro⁷⁾も同様な記述をしている。低応力レベルにおいて生じた非弾性ひずみ回復のメカニズムの一つとして閉鎖した亀裂の再開口を考えることができる。再開口の割合が亀裂ごとに違えば特に屈曲点が不明瞭になるとも考えられるが、低応力レベルにおいて生じた非弾性ひずみ回復のメカニズムはいまだ明らかになっていないようである。筆者らもいまだ屈曲点の明瞭さと非弾性ひずみ回復量との間に直接

Fig.10 $\Delta\sigma_C / \Delta P_C$ with inclination of crack based on Coulomb's criterion.

的な関係を見出せていない。屈曲点が時間とともに不明瞭になる原因についてはさらに検討が必要である。

5. 結 言

新しい岩盤応力測定法として、コア法の一種である接線ヤング率法について基礎実験を実施した。具体的には、 $0 \sim 10000$ 分の先行定荷重载荷を施した白浜砂岩の円柱形岩石供試体に対して接線ヤング率法と DRA 法による先行载荷応力値の推定を試み、先行定荷重载荷時間と岩盤応力の記憶保持時間との関係について検討した。得られた主な知見は以下のようである。

接線ヤング率法により接線ヤング率-応力線図の屈曲点の応力値として一軸先行载荷応力値を推定できることを示した。先行载荷後の静置時間が大きくなると屈曲点是不明瞭になり、屈曲点の応力値も先行载荷応力値より小さくなった。本研究で実施した DRA 法でも同様な傾向が見られ、両方法の精度に優劣は認められなかった。両方法ともに、約 1 週間の先行载荷に対して最長で約 6 週間静置した供試体から正確に先行载荷応力が推定されることを実験的に示した。

接線ヤング率法には、DRA 法に較べて、ひずみの計測方法が簡単である、繰り返し载荷サイクル数が 2 サイクルで済む、データ処理が簡単であるという利点がある。

本研究では、先行载荷時間と岩石が岩盤応力の記憶を保持できる時間との関係を従来よりも明らかにすることができ、また、岩石が岩盤応力の記憶を保持するメカニズムについても従来よりは具体的に説明できたと考えている。

実際の岩盤は多くの場合三軸圧縮応力下にあるのに対し、本研究の先行载荷は一軸応力状態のみであった。また、岩盤応力測定において岩石試料採取・試料整形の際に供試体は、程度の差こそあれ応力集中や温度・乾燥条件の変化を蒙る。本方法の実用化にあたっては、これらの影響についても検討する必要がある。

References

- 1) K. Sugawara: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **114**(1998), 834-844.
- 2) Y. Nakagawa, N. Ohtaka, Y. Fujii and Y. Ishijima: Proc. MMIJ Fall Meeting (2004), Vol. AB, pp. 51-54.
- 3) N. Ohtaka and Y. Fujii: Proc. MMIJ Fall Meeting (2005), Vol. AB, pp. 59-60.
- 4) A. Lavrov: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **40**(2003), 151-171.
- 5) T. Kojima, T. Nishiyama and K. Matsuki: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **110**(1994), 143-148.
- 6) K. Matsuki and T. Kojima: Proc. ISRM Int. Congress Rock Mech. (1995), Tokyo, pp. 149-152.
- 7) K. Michihiro, K. Hata, H. Yoshioka and T. Fujiwara: J. Acoust. Emission, **10**(1991/1992) (1-2): S63-76.