

一面せん断透水試験による透水挙動の 評価に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE ESTIMATION OF PERMEABILITY OF A ROCK JOINT THROUGH THE DIRECT SHEAR - PERMEABILITY TEST

岸田 潔*・山本 章貴**・中島 伸一郎***・細田 尚*
Kiyoshi KISHIDA, Takaaki YAMAMOTO, Shinichiro NAKASHIMA, Takashi HOSODA

In this paper, we have carried out the permeability tests for rock joints under the shear process and discussed the influence of joint surface roughness and material properties to the permeable character of rock joints. Based on the experimental results, it is found that the permeability of rock joints is strongly affected by both aperture and joint surface roughness. In particular, it is considered that the flow path on the rock joint is determined by the contact condition of joint surface roughness.

Based on the shear behavior model of rock joints developed by us, we have carried out the simulation of permeability on rock joints. The channeling flow can be expressed in consideration of various joints surface roughness.

Key Words: rock joint, joint surface roughness, material property, direct shear test, permeability test

1. はじめに

岩盤構造物の安定性と性能を評価するには、岩盤の力学的および水理学的挙動を把握する必要がある。特に、高レベル放射性廃棄物処分問題や温室効果ガス地下貯留問題などでは、地下貯留流体の挙動予測がこれらの問題解決の鍵であり、水理学的挙動の把握は非常に重要な課題である。岩盤の力学的および水理学的挙動は、不連続面によって支配されており、不連続面の力学・水理学的挙動を解明することが重要な課題である。本研究では、不連続面の幾何学的形状を考慮に入れたせん断時の岩盤不連続面の透水特性を把握するため、岩石一面せん断透水試験を実施した。さらに、一面せん断挙動モデル¹⁾を用いて不連続面内透水挙動の数値解析²⁾を行い、実験結果との比較・検討および不連続面内の透水経路の推定を行った。

2. 岩盤不連続面における開口幅分布からの水の流れのモデル化

一面せん断透水試験の前後において、不連続面供試体のラフネスの計測を行っている³⁾。これにより、ラフネスの標高の離散データが、所定の間隔で得られる。岩盤単一不連続面一面せん断挙動モデル¹⁾では、ラフネス標高分布をもとにせん断過程をシミュレートし、せん断挙動に伴う応力の変化やダイレーションの変化を表現すると共に、ラフネス標高分布の変化を表現することができる。したがって、ラフネス計測と岩盤単一不連続面一面せん断挙動モデルによりせん断過程下のラフネスの状態を把握すること可能である。

本研究では、不連続面供試体を N 個の要素に分割し、図-1 に示す通り個々の要素間は平行平板であると仮定し、次式に示す 3 乗則⁴⁾に基づいて透水量係数を決定する。図-1 に示す要素 e_{ij} を構成する 4 点は、ラフネス計測がなされた標高計測点で、その開口幅は計測やせん断挙動モデルによって算出される。

$$T_{ij} = \frac{g \bar{b}_{ij}^3}{12\nu} \quad (1)$$

ここで、 g は重量加速度、 ν は動粘性係数、 $\bar{b}_{ij}$ は要素 e_{ij} の開口幅で、構成する 4 点の開口幅の平均値とする。透水量係数 T_{ij} と透水係数 k_{ij} の関係は、透水層厚さを用いて次式で表される。ただしここでは、透水層厚さを $\bar{b}_{ij}$

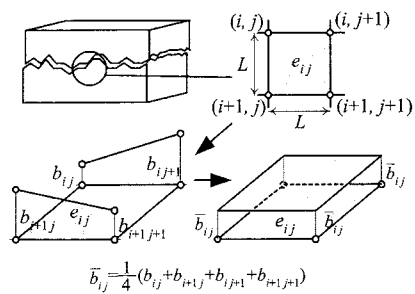


図-1 不連続面の要素分割と開口幅 $\bar{b}_{ij}$

* 正会員 工学博士 京都大学工学研究科都市社会工学専攻
** 京都大学工学部地球工学科
*** 正会員 工学博士 独立行政法人 土木研究所

$$T_{ij} = k_{ij} \cdot \bar{b}_{ij} \quad (2)$$

式(1)よりラフネス計測データやせん断挙動モデルを用いることで、不連続面の開口幅分布を把握することが可能となり、さらに、透水量係数分布の把握が可能となる。図-2(a)に示すような透水量係数分布をもつ不連続面に対し、不連続面の右側に水頭差 h を与え透水試験を行ったと想定する。実験では、図の上下方向はシールしているため非排水とし、透水方向は図中の右から左とする。図-2(b)に示すように面全体を各要素中心どうしを結ぶ流路網に置き換える。要素 e_{ij} 内では透水量係数 T_{ij} により透水が支配され、水頭を h_{ij} とする。

図-2(c)は、要素 e_{ij} の流路網を抽出したものである。不連続面内の流れを飽和定常流とすると要素 e_{ij} における質量保存則から、

$$Q_{i-1,j}^2 + Q_{i,j-1}^1 = Q_{ij}^1 + Q_{ij}^2 \quad (3)$$

が得られる。ダルシー則と式(2)より、

$$Q_{ij}^1 = T_{ij} L \frac{h_{ij} - h_{ij+1}}{0.5L} = T_{ij} L \frac{h_{ij} - h_{ij+1}}{0.5L} \quad (4)$$

が得られる。ここで、 h_{ij}^* は要素境界上での水頭、 L は要素サイズである。

式(4)から h_{ij}^* , L を消去すると、次式が得られる。

$$Q_{ij}^1 = \frac{h_{ij} - h_{ij+1}}{0.5(1/T_{ij} + 1/T_{ij+1})} \quad (5)$$

他の Q_{ij}^2 , Q_{ij-1}^1 , $Q_{i-1,j}^2$ についても同様に $h_{i-1,j}$, h_{ij-1} , h_{ij} , h_{ij+1} を用いて表すことができる。したがって、式(3)は

$$a_1 \cdot h_{i-1,j} + a_2 \cdot h_{ij-1} + a_3 \cdot h_{ij} + a_4 \cdot h_{i+1,j} + a_5 \cdot h_{ij+1} = 0 \quad (6)$$

となる。ここで、 a_m ($m = 1 \sim 5$) は、透水量係数と要素サイズで表される定数である。この式(7)を全要素について求め、 N 個の要素について N 個の式(6)が成立し未知数 h_{mn} が N 個となる。 N 元連立 1 次方程式を解くことにより、各要素の水頭を算出し、その水頭分布を用いて流量を算定する。

3. 岩盤不連続面一面せん断透水試験

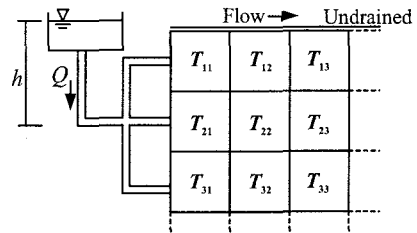
(1) 実験概要

実験装置は、従来の一面せん断試験機³⁾のせん断箱に透水装置⁵⁾を組み込んだものを用いた。図-3に示すように、長方形供試体(長さ 80 mm, 幅 120 mm, 高さ 120 mm)を用い、最終せん断変位量は 3.0 mm とした。ここでは、供試体に作用させる水頭差を 1.0 m, 垂直拘束圧を 1.0 MPa に固定し、せん断・垂直変位, せん断・垂直応力, 透水量, 供試体上下流間の差圧の 6 項目の計測を行った。供試体は、自然の不連続面を有する試料をモルタルによって複製したものを用いる。不連続面の形状は 3 種類, 3 パターンの配合比で供試体を作成することで 3 種類の材料強度として試験を行った。供試体の条件を表-1 に示す。透水試験は、所定のせん断変位でせん断を停止させて実施した。これにより、せん断に伴う透水性の変化を評価した。また、実験を行う前に不連続面の形状をラフネスプロファイラー³⁾によって 0.25 mm 間隔の格子状に計測し、実験の評価や解析の一面せん断挙動モデルに用いた。

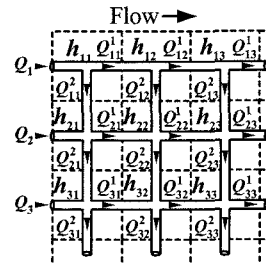
表-1 実験パターンと供試体名

		Joint surface roughness		
		JRC = 7.43	JRC = 10.68	JRC = 12.21
Material parameter	37.33 MPa, 37.3°	D-K02	B-K02	C-K02
	21.78 MPa, 34.9°	D-L02	B-L02	C-L02
σ_c, ϕ	13.48 MPa, 34.4°	D-M02	B-M02	C-M02

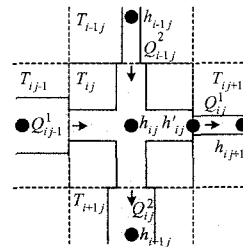
JRC はプロファイルデータを用いて Z_2 法により算出。



(a) 不連続面内透水量係数分布と境界条件



(b) 流量および水頭分布



(c) 要素 e_{ij} の流路網

図-2 不連続面のメッシュ分割と流路網への置き換え

(2) 実験結果

図-4, 5 に実験結果を示す。いずれのケースも、せん断変位の増加に伴いダイレーションが増加し、透水量係数が増加しており、せん断に伴い透水性が高くなっていることが確認できる。同じせん断変位で比較すると、材料強度と拘束条件が同じであれば、ラフネスが粗いほどダイレーションが大きく発現し、開口幅が広くなり、結果として透水量係数が大きくなり透水性が高い結果を示している。一方、ラフネスと拘束条件が同じであれば、強度が大きいほどダイレーションが大きく発現し、同様に開口幅が広くなり、結果として透水量係数が大きくなり透水性が高い結果を示している。これらの結果ら、当然のことであるが不連続面の透水性は開口幅に支配されており、開口幅の状態は、ラフネス、材料強度、拘束条件に支配されていることになる。せん断試験中に計測するダイレーションは、あくまでも実験開始前の上部供試体の位置に対する相対的な鉛直変位であり、開口幅を表しているものではない。そこで、本研究では、開口幅は実験開始前の初期状態の開口幅に計測されたダイレーションを加えた値と考える。したがって、初期開口幅の算定が重要になってくる。

初期開口幅の設定を行うため、せん断試験を行う前に垂直応力を 0.25 MPa から 4.0 MPa の間で载荷・除荷を 3 回繰り返す剛性試験を行った。この剛性試験から得られる垂直変位を開口幅の変位とみなし、Bandis et al.⁶⁾ が提案した双曲線関数を用いて実験結果を近似し、開口幅の最大可能閉塞量と所定の拘束圧での開口幅の閉塞量を算出し、それらの差を初期開口幅とする。

開口幅の変化と透水量係数の関係を図-6 に示す。同じラフネスであれば、材料強度が異なっても透水量係数は開口幅と相関性がある。しかしながら、ラフネス形状が異なれば、同じ開口幅でも透水量係数が異なるケースが見られる。ラフネスの存在により不連続面内には、接触のいい部分（開口幅が小さい部分）や接触の悪い部分（開口幅の大きい部分）が不均質に存在する。したがって、不連続面内の水の流れは、一様でないと考えられる。開口幅の大小で不連続面内の流れは左右され、チャンネリング現象が生じている。チャンネリングを生じる流れ

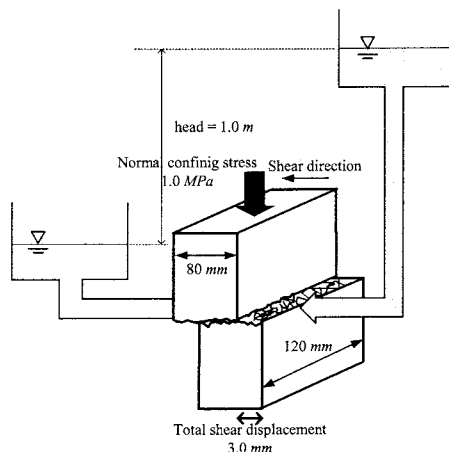
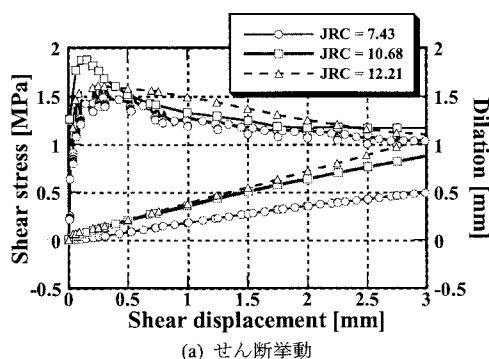
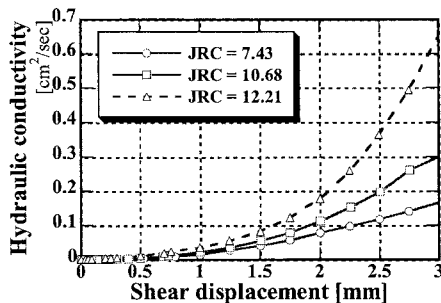


図-3 岩盤不連続面一面せん断透水試験概要

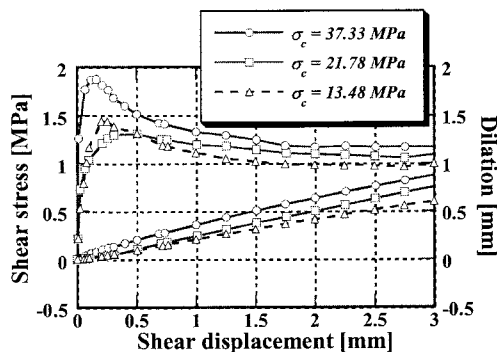


(a) せん断挙動

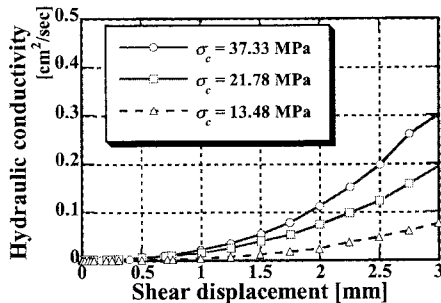


(b) せん断変位-透水量関係

図-4 ラフネスの差異による実験結果の一例
($\sigma_c = 37.33 \text{ MPa}$, $\phi_0 = 37.3^\circ$)

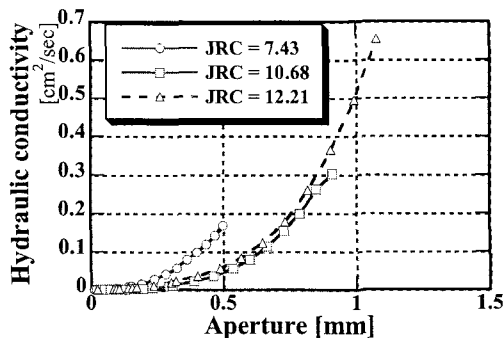


(a) せん断挙動

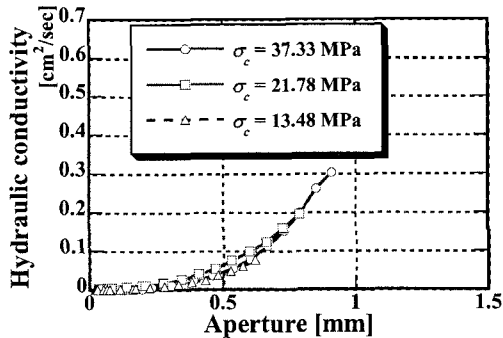


(b) せん断変位-透水量関係

図-5 材料強度の差異による実験結果の一例
($JRC = 10.68$)

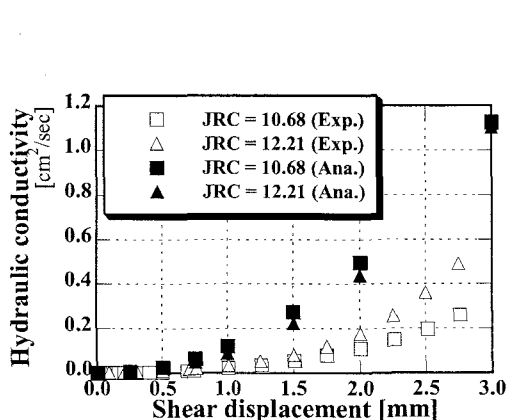


(a) ラフネス形状の影響

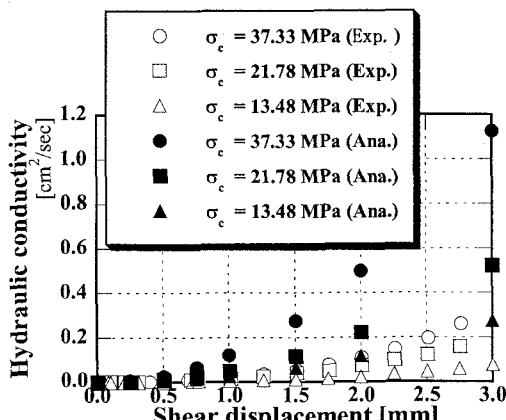


(b) 材料強度の影響

図-6 開口幅と透水量係数の関係



(a) ラフネス形状の影響



(b) 材料強度の影響

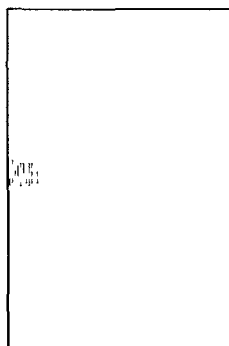
図-7 せん断変位-透水量係数における実験結果と解析結果の比較

では、同じサイズの供試体でも凹凸形状に違いにより透水経路が異なることになる。したがって、JRCの違いにより経路が異なることになり、実際上の動水勾配は変化することになる。不連続面のラフネスに起因する透水経路の差異により透水性は変化し、供試体の平均的な開口幅の開口だけでは説明ができないことを示している。

4. 解析と実験結果の比較

本研究では、せん断過程を岩盤単一不連続面一面せん断挙動モデル（岸田・津野，2001）でシミュレートし、所定のせん断変位でのラフネス形状を求め、それを基に透水試験のシミュレーションを行った。実験結果と解析結果の比較を図-7に示す。いずれのケースにおいても、透水量係数は実験結果の方が2倍から10倍ほど大きく出ているのがわかる。さらに、各ラフネスにおけるせん断変位-透水量係数関係から、解析結果ではラフネスによる影響はあまり見られない。一方、材料強度による影響は、解析結果に明瞭に出ており、強度（B-L02）の大きい材料ほどダイレーションが大きく発現しやすいため、透水量係数が大きくなる。

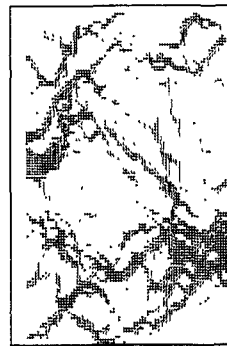
図-8, 9は、透水シミュレーションから各要素間の流量分布を示したものである。図-8, 9に示すものは、供試体B-K02, C-K02である。なお、各要素間の流量をすべて表示せず、大きい流量を持つ上位25%のみを表示している。せん断試験が進行するに従い、流れやすくなっていることが確認できる。せん断に伴いアスペリティーが削られ、開口幅が増加し、水の流れる経路が大きくなっていると考えられる。また、不連続面内を水は直線的に流れず、チャネリング現象が表現されている。このことから、不連続面内の水の流れでは、透水経路と供試体の長さが一致しない。実際には、不連続面のラフネスとその接触状況により、透水経路は供試体長さ沿った直線とはならず、透水方向に一樣な流れとはならないと考える。この解析手法では、不連続面の透水の不均質性や透水経路の違い、チャネリング現象を表現しており、実験結果との差異は存在するもののより現実的な流れを表現していると考えられる。



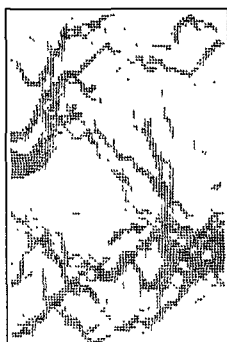
(a) せん断変位 0.0 mm



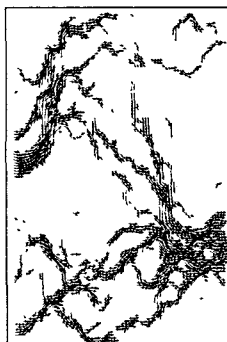
(b) せん断変位 0.25 mm



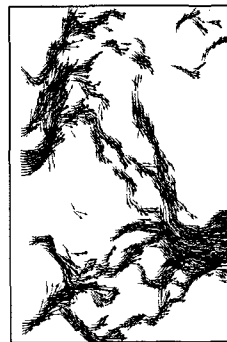
(c) せん断変位 0.5 mm



(d) せん断変位 1.0 mm

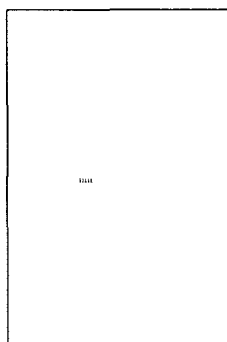


(e) せん断変位 2.0 mm

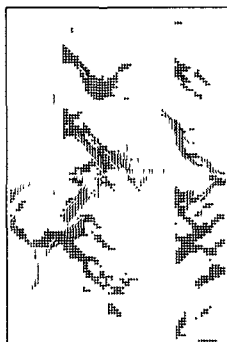


(f) せん断変位 3.0 mm

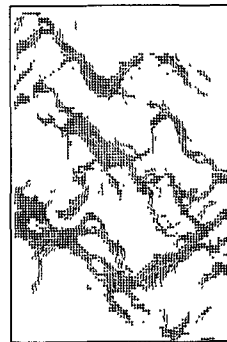
図-8 流量分布 (供試体 B-K02)



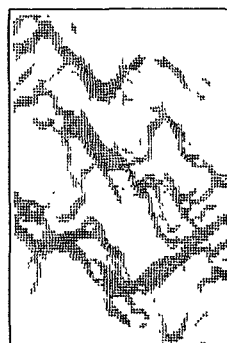
(a) せん断変位 0.0 mm



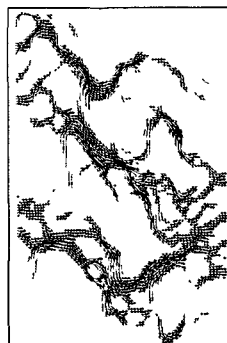
(b) せん断変位 0.25 mm



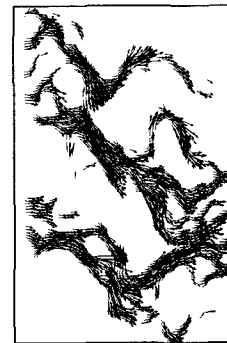
(c) せん断変位 0.5 mm



(d) せん断変位 1.0 mm



(e) せん断変位 2.0 mm



(f) せん断変位 3.0 mm

図-9 流量分布 (供試体 C-K02)

5. まとめ

本研究では、岩盤不連続面の一面せん断同時透水試験を行い、不連続面の透水挙動に関する考察を行った。岩盤不連続面の透水性は、せん断に伴うダイレーションの発現、すなわち、開口幅の増加に伴い大きくなり、また、不連続面の形状により、同一強度および同一拘束状態でも透水性が異なることが確認された。さらに、岩盤単一不連続面一面せん断挙動モデルを基に透水モデルを構築し、せん断過程下における岩盤不連続面の水の流れのシミュレーションを行った。解析結果より、不連続面内の水の流れは、不連続面のラフネスやその接触状況において不均質な流れになっていることが確認できた。ただし、実験結果との比較では、解析結果の透水量係数は十分な相関性が得られなかった。ガウジの影響や3乗則の適応性などの問題が、実験結果との隔たりであると考えられる。

参考文献

- 1) 岸田 潔, 津野 究: 摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 245 – 261, 2001.
- 2) 岸田 潔, 中島 伸一郎, 小倉 一仁, 櫻井 陽平: 岩盤不連続面のラフネスデータを用いた一面せん断時の透水挙動解析, 第38回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1233 – 1234, 2003.
- 3) 大西 有三, 矢野 隆夫, 岩本 宏, 西川 直人: 岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその変遷, 土木学会論文集, No. 645/III-50, pp. 307 – 320, 2000.
- 4) Snow, D. T.: *A parallel plate model of fractured permeable media*, Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1965.
- 5) 大西 有三, 大津 宏康, 西山 哲, 矢野 隆夫, 高木 克実: 不連続面一面せん断時の透水特性に関する研究, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, pp. 917 – 918, 2002.
- 6) Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R.: Fundamental of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249 – 268, 1983.