

# 岩盤の比抵抗計測による水分量拡散特性の推定

## INFERENCE OF WATER CONTENT DIFFUSION CHARACTERISTICS OF ROCKS UTILIZING ELECTRICAL RESISTIVITY TECHNIQUE

大洞 光央\*、大洞 勝彦\*\*、加納 和幸\*\*\*、アイダ・オメル\*\*\*\*

Mitsuo DAIDO、Katsuhiko DAIDO、Kazuyuki KANO、Ömer AYDAN

It is well known that water content strongly influences the mechanical characteristics of rocks. It is also known that electrical resistivity of rocks depends upon water content. Aydan (2003) proposed a new theoretical model and associated experimental procedure to determine the water content diffusion characteristics of rocks. Based on this idea, the authors have been performing electrical resistivity experiments on various rocks in relation to its water content migration. Real-time electrical resistivity measurements were carried out by the authors on Oya tuff, Derinkuyu tuff, Egypt limestone, Alps limestone, fractured Inada granite and non-fractured Inada granite in laboratory while water content variations were monitored during drying process. This article describes the details of the electrical resistivity monitoring system and the experimental results. Furthermore water content diffusion characteristics of various rocks are estimated.

**Key Words: water content migration, electrical resistivity, real-time monitoring, rock**

### 1. はじめに

岩石の力学特性は含水比(水分量)に大きく依存している。岩石に含まれる水は、粘土鉱物などに吸着される水と自由水との 2 つに分類される。特に粘土鉱物を含有するような軟岩では吸着水によって膨潤や収縮による体積ひずみが発生し破壊に至る可能性がある。また、岩石の物理特性の 1 つである比抵抗の値も含水比に大きく依存する。硬岩のように基本的に密な岩石でも、断層の近傍では多くの亀裂が存在することから水分の含有量が高くなり、地盤の比抵抗調査などで特異な値として検出される。さらに、地下発電所やトンネル、また地下遺跡など岩盤構造物の維持・管理・保全のためには比抵抗調査のような非破壊調査法が重要であり、様々な岩石に対する比抵抗と含水比の関係を明らかにする必要性が高い。

通常、岩石の含水比は 110℃の乾燥炉に一定時間入れ、その前後の質量を比較して決定される。しかし、この方法では 1 つのデータしか得られない上、水分量の拡散特性も得ることが出来ない。著者らはこれまでに堆積軟岩に対して比抵抗計測による水分量の拡散試験を開発した。この考えに基づき硬岩から軟岩までの数種類の岩石に対して同様の試験を行った。本論文では自動計測による比抵抗と質量の実験方法と結果を紹介し、水分量拡散係数を推定する。

### 2. 実験概要

図-1 に示したように、飽和した岩石サンプル乾燥させ質量と比抵抗の変化を自動的に計測する実験を行った。また、室

---

\* 学生会員 博士課程後期 東海大学 大学院 海洋学研究科

\*\* 非会員 日本高周波学会

\*\*\* 正会員 基礎地盤コンサルタンツ㈱

\*\*\*\* 正会員 工学博士 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科

内の温度と湿度も同時に計測した。実験に使用した質量計は 3000(g)まで計測することが可能であり、0.01(g)の精度を持つ。比抵抗の計測には電流電源と電位計を使用した。直流・交流定電流電源は  $1(\mu A)$ から 105(mA)の定電流を設定することが可能で、最大負荷電圧は 210(V)であるが、今回の実験では作業上の安全のため 21(V)を最大値とした。交流の場合の周波数は  $1 \cdot 10 \cdot 100(\text{Hz})$ に簡単に設定することが可能である。電位計は直流・交流の電位を計測可能で最大計測電圧は 300(V)である。温度・湿度計は  $-10 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \sim 95\%$ の計測範囲を持ち、それぞれ小数点以下 1 桁の精度を持つ。

実験の手順として、岩石サンプルを軟岩・硬岩と中間の強度を持つ岩(以下中岩)に分け、軟岩・中岩は 3 日以上、硬岩は 1 週間以上水道水に浸けて飽和させた。この後、岩石の表面に付いた水分をふき取って実験を開始した。電極の外側には絶縁体を設置し、供試体と電極の接地面積を安定させるため上から 100(g)の死荷重を与えた。電流電源の負荷電圧が 21(V)を超えたところで実験を終了した。実験終了後の岩石サンプルは、 $60^{\circ}\text{C}$ の恒温装置に十分な乾燥剤を入れ、5 日以上乾燥させたのち乾燥質量を計測した。

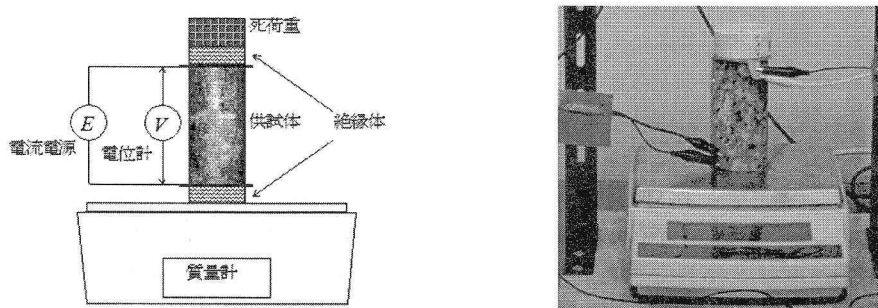


図-1 実験装置接続状況と実験の様子

### 3. 実験材料

実験に使用した岩石は軟岩では大谷石とトルコの Cappadocia のデリンクユ地下都市で採取した凝灰岩である。大谷石の採石場では 1989 年 2 月に大きな陥没事故が発生しており、現在、充てんなどの対策を取ることが検討され始めている。古い時期に採掘された場所などでは記録なども残っていないこともあり、非常に広範囲かつ点の集まりではない地質調査が必要となり、地盤の比抵抗探査などの重要性が増すものと考えられる。また、近年、世界遺産などに代表される観光資源として遺跡の維持・管理・保全が注目されていることから、非破壊調査法としての比抵抗探査の重要性が増すものと考えられる。中岩からも上記の観点からエジプトのアメンホテップ3世の墓で採取した石灰岩とアルプスの石灰岩を使用した。硬岩として稲田花崗岩を選んだ。断層や断層破砕帯近傍では亀裂を含んだ岩が多く水分の含有量が多くなる可能性が高いため、地盤の比抵抗探査などで重要な意味を持つものと考えられることから、稲田花崗岩については強度試験を行い破壊した供試体と破壊していない供試体を使用した。以下に、使用した岩石材料の密度・空隙率・長軸方向の弾性波速度および飽和状態の比抵抗と乾燥状態の比抵抗の比  $\rho_s / \rho_d$  を表-1 として示す。表中の稲田花崗岩の弾性波速度は破壊されたものが大きく出ているが、直径方向で測ると非破壊のほうが 1.5 倍ほど大きな値となった。

表-1 使用した岩石の材料特性

|                               | 硬岩    |      | 中岩          |             | 軟岩         |       |
|-------------------------------|-------|------|-------------|-------------|------------|-------|
|                               | 稲田花崗岩 |      | アルプス<br>石灰岩 | エジプト<br>石灰岩 | トルコ<br>凝灰岩 | 大谷石   |
|                               | 非破壊   | 破壊   |             |             |            |       |
| 密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  | 2.61  | 2.62 | 2.70        | 1.90        | 1.52       | 1.51  |
| 空隙率(%)                        | 0.15  | 0.86 | 4.10        | 22.89       | 45.84      | 44.59 |
| 弾性波速度( $\text{km}/\text{s}$ ) | 4.01  | 4.39 | 4.18        | 2.98        | 1.91       | 1.98  |
| $\rho_s / \rho_d$             | 0.37  | 0.22 | 0.080       | 0.30        | 0.10       | 0.028 |

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) 軟岩

図-2 には実験中に計測された大谷石の実験結果を示す。左の図は時間に対する温度と湿度の変化を示し、中央の図は時間に対する含水比と比抵抗の最大値で正規化した比抵抗の変化を示し、右の図は横軸に含水比の変化をとり縦軸に正規化した比抵抗の変化を取ったグラフを示す。温度と湿度の変化を示すグラフを見て分かるように、実験は室内で行ったものであるが、ブラインドを閉じ部屋を締め切ることによって温度環境と湿度環境はほぼ一定に保つことが出来た。図-2 の中央のグラフより含水比がほぼ一定の傾きで下がっていく様子が確認される。これは軟岩に見られる特徴でこれまでの結果と一致する。一方、比抵抗の変化を見ると実験の初期に急激な変化があり、矢印で示した変曲点を経て、緩やかな変化が始まる。実験の初期に現れる比抵抗値の急激な変化は供試体表面付近の自由水が乾燥することによって引き起こされ、その後の緩やかな変化は供試体内部の水の乾燥によるものと考えられる。このような現象は、これまでに行った実験で直流の定電流電源を使用した場合には観察されなかった。

続いて、トルコにあるカッパドキアの地下都市から採取した凝灰岩に対する実験結果を図-3 に示す。大谷石の実験で見られたように温度と湿度の変化は少なかったことから、これ以降は温度と湿度の平均値を図中に示すのみに留めることとする。この実験でも線形に近い含水比の変化が観察される。また、表面付近の水の乾燥による比抵抗値の急激な変化が見られ、その後、安定した変化に移行する。さらに後に変曲点が見られるが、その後一定の値に近づく様相を見せる。室内試験の結果は初めに表面の影響が大きく現れることから、どの値を飽和度 100%とするかの問題がある。現場での適用を鑑みると初期の変曲点が明確に現れる場合には、変曲点以降が示す曲線を逆にたどった延長線上に飽和度 100%の場合の値があるものと推測される。

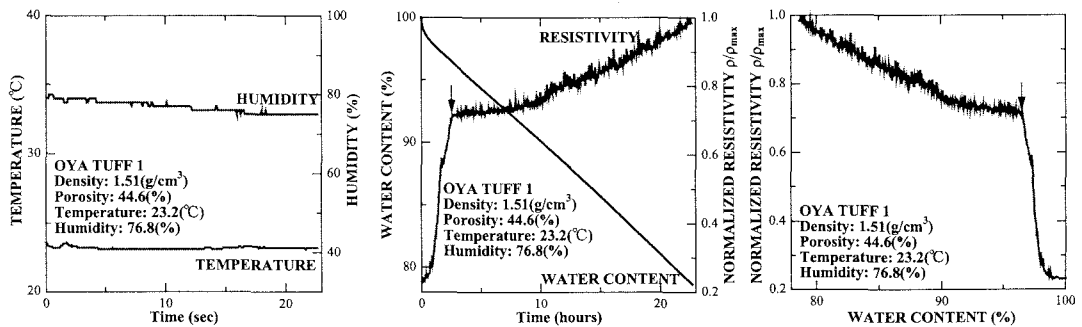


図-2 大谷石の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

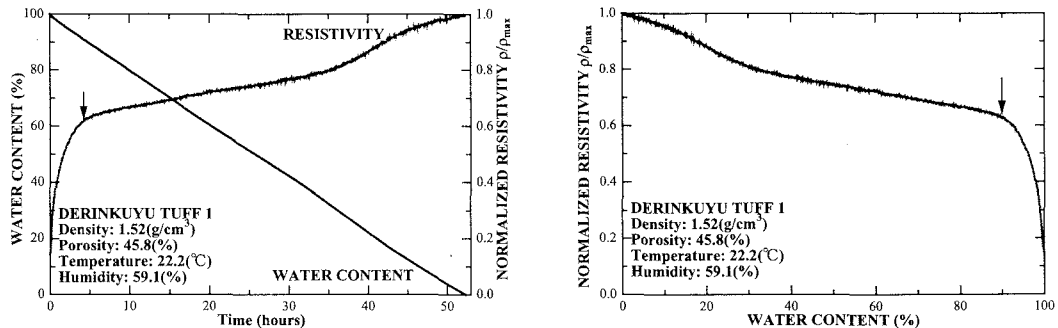


図-3 カッパドキア地下都市の凝灰岩の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

##### (2) 中岩

図-4 にエジプトのアメンホテップ3世の墓で採取した石灰岩に対する実験結果を示す。軟岩での結果と同様に含水比は

ほぼ一定で変化する。比抵抗の値は表面の影響が収まった後、しばらく一定の値を保ち、急激な変化を見せる。粘土を使用して比抵抗を測定する場合に塑性領域では比抵抗の値がほぼ一定になるが、使用した石灰岩は 3 千年前の遺跡から採取したものであり風化の影響を大きく受けたためか、広範囲の含水比で比抵抗の値がほぼ一定という現象が観察された。

アルプスの石灰岩を見ると、これまでに見られた含水比の一定変化はこの岩石から確認されない。比抵抗値は実験初期から大きく変化し 4 時間ほどで電流電源の負荷電圧を超えている。含水比と比抵抗のグラフを見ると、結果としてエジプトの石灰岩と似た曲線を描く様子が見受けられる。含水比が広い範囲で比抵抗の値がほぼ一定の値をとることは石灰岩の特徴であるとも考えられ、風化によりその特徴が際立つものと推測される。

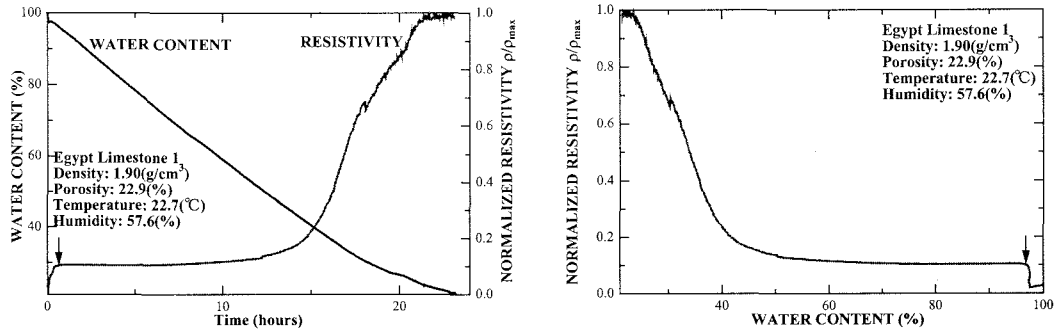


図-4 エジプト遺跡の石灰岩の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

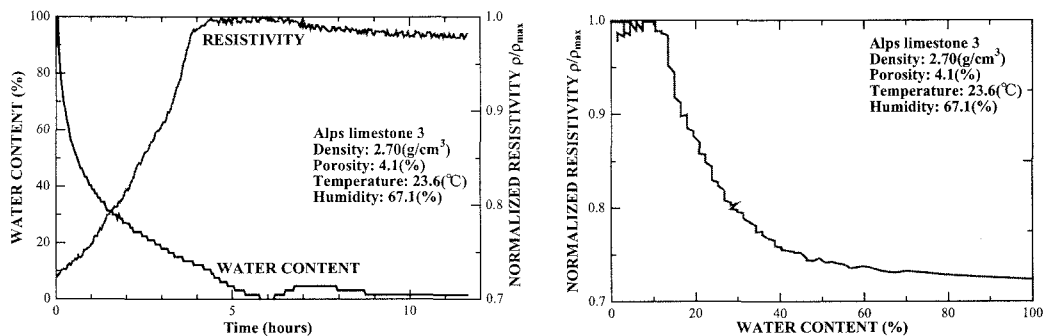


図-5 アルプス石灰岩の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

### (3) 硬岩

図-6 と 7 に稲田花崗岩の結果を示す。時間に対する含水比と比抵抗の図を比較すると、破壊した供試体を使用した場合には、破壊した多くの亀裂を含む供試体では表面に当たる面積が大きいいため含水比と比抵抗値の変化は緩やかであることが観察される。破壊していない供試体では表面の影響はすぐに収まる様子が観察される。

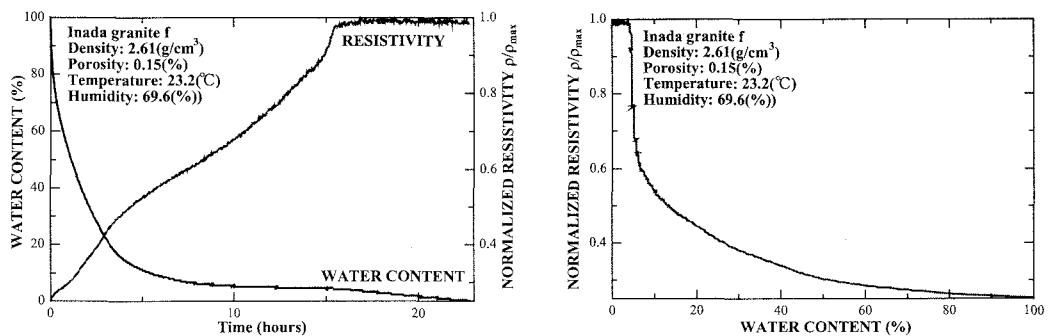


図-6 破壊した稲田花崗岩の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

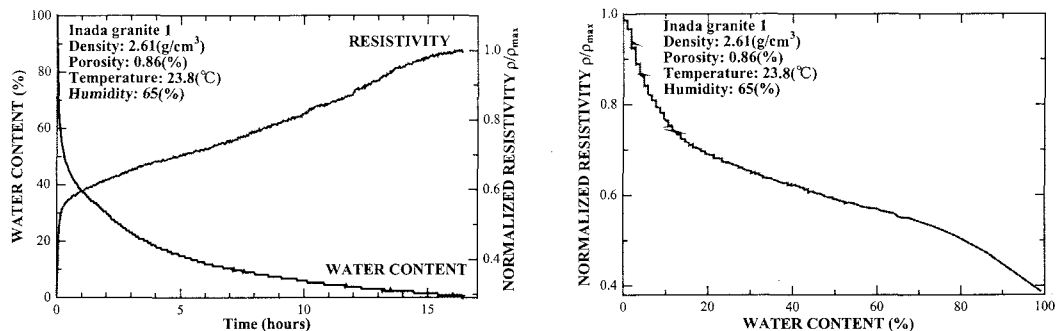


図-7 破壊していない稲田花崗岩の温度・湿度・含水比・比抵抗値の変化

## 5. 水分量拡散特性の推定

### (1) 含水比と比抵抗の関係

アイダンら(2003)によって提案された経験的な比抵抗と含水比の関係式を以下に示す。

$$\rho_e = \rho_d - (\rho_d - \rho_s) \frac{\theta}{\theta + \phi(100 - \theta)} \quad \dots(1)$$

ここに、 $\rho_e$ :計測された比抵抗、 $\rho_d$ :乾燥状態の比抵抗、 $\rho_s$ :飽和状態の比抵抗、 $\theta$ :含水比、 $\phi$ :実験により決まる定数である。 $\phi$ は実験を行って推測しなくてはならないものの、以下に示す図-8に見られるように適正な値を与えると非常に見事な相関を示す。

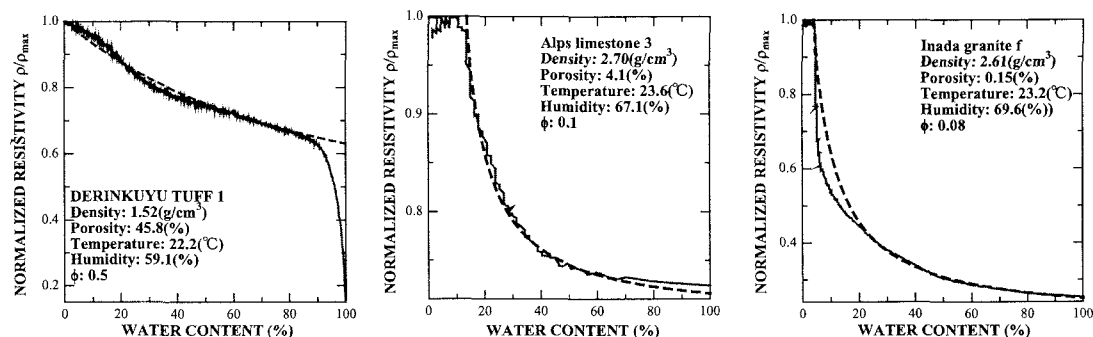


図-8 含水比と比抵抗値に対する経験式の適用

### (3) 水分量拡散特性

堆積軟岩における水分量の変化は拡散現象として考えられ、Aydan(2003)が提案しているモデルで水分量の変化は次式で与えられる。

$$\theta_w = \theta_a + (\theta_{w0} - \theta_a) e^{-\alpha t} \quad \dots(2)$$

ここに、 $\theta_w$ :ある時刻における水分量、 $\theta_a$ :周辺の湿度環境における供試体の最少水分量、 $\theta_{w0}$ :乾燥開始時刻の初期水分量、 $\alpha$ :定数である。図-9に実験データと(2)式の結果の比較を示す。さらに、定数 $\alpha$ は供試体の幾何学形状と水分量拡散係数 $k$ に関係し、拡散係数との間に次のような関係式が導かれている(Aydan、2003)。

$$k = \alpha \left( \frac{V_s}{A_s} \right)^2 \quad \dots(3)$$

ここに、 $A_s$  : 供試体の乾燥環境に接する表面積、 $V_s$  : 供試体の体積である。この式により求めた水分量拡散係数  $k$  を表-2 に示す。

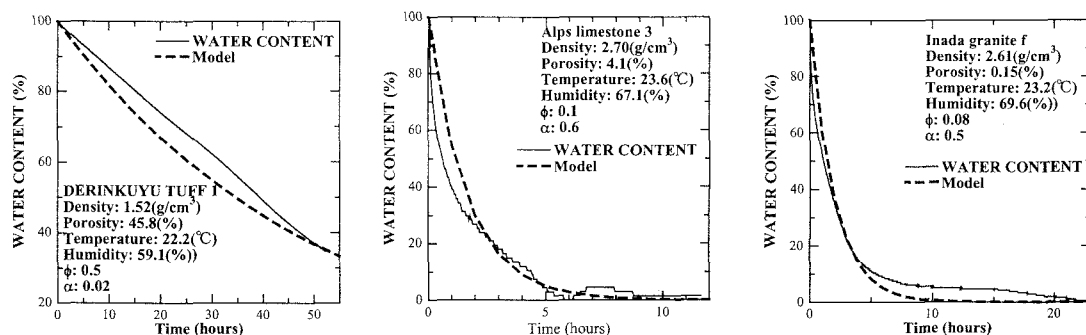


図-9 含水比と比抵抗値に対する経験式の適用

表-2 各岩石に対する定数  $\alpha$  と水分量拡散係数  $k$

|                 | 軟岩       |          |          | 中岩       | 稲田花崗岩    |          |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 | 大谷石      | カッパドキア   | エジプト     | アルプス     | 非破壊      | 破壊       |
| $\alpha$ (1/hr) | 0.1      | 0.0024   | 0.09     | 0.6      | 0.33     | 0.5      |
| $k$ (m²/hr)     | 1.25E-03 | 3.21E-05 | 6.40E-04 | 4.46E-03 | 4.12E-03 | 6.24E-03 |

## 6. まとめ

これまでの研究で直流電源を用いて水分量拡散の全体の傾向を捕らえることが出来ていたが、交流電源でも全体の傾向を観察することが出来た。また、電流電源を直流から交流に変えたことで実験初期の水分量の変化とその変曲点を捉えることが出来た。また、軟岩から硬岩までの幅広い供試体を使用して含水比と比抵抗の関係を示すことが出来た。特に稲田花崗岩の破壊・非破壊の比較は同様の岩石を使用しても内部に含まれる亀裂の量によって反応が異なるといった、興味深い結果が得られた。

## 《参考文献》

- Aydan, Ö. (2003): The moisture migration characteristics of clay-bearing geo-materials and the variations of their physical and mechanical properties with water content. 2<sup>nd</sup> Asian Conference on Saturated Soils (UNSAT-ASIA 2003), 383-388.
- Aydan, Ö, and R. Ulusay (2003): Geotechnical and Geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. Engineering Geology, Vol. 69, 245-272.
- Aydan, Ö, Geniş, M., Akagi, T. and Kawamoto, T. (2001). Assessment of susceptibility of rock bursting in tunneling in hard rocks. Int. Symp. on Modern Tunneling Science and Technology, IS-KYOTO 2001, Vol.1, 391-396.
- Kano, K., T. Doi, M. Daido, O., Aydan (2004): The development of electrical resistivity technique for real-time monitoring and measuring water-migration and its characteristics of soft rocks. 3<sup>rd</sup> Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS2004), in print.