

## (6)花崗岩盤における巨視的透水係数の評価

|              |       |
|--------------|-------|
| 動力炉・核燃料開発事業団 | 福田 和寛 |
| 日鉄鉱業㈱        | 野口 義文 |
| 清水建設㈱        | 穂刈 利之 |

### Evaluation of the Macro Hydraulic Conductivities in the Granitic Rock Mass

Kazuhiro Fukuda, Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation

Yoshifumi Noguchi, Nittetsu Mining Co., Ltd.

Toshiyuki Hokari, Shimizu Corporation

#### Abstract

As the utilization of the underground is aimed at larger and deeper parts of the subterranean, it becomes more important to evaluate larger-scale hydraulic properties of the intact rock. This research focuses on the evaluation of the macro hydraulic properties in the fractured rock. Accordingly, a large scale hydraulic conductivity test was performed at a 50m long drift in the in-situ test site of Kamaishi Mine. This paper reports the method and result of the large scale conductivity test and discusses the evaluation of the macro conductivities of the fractured rocks.

#### 1 はじめに

近年土木・地熱・廃棄物処分等の分野において地下構造物の大深度・大規模化が進んでおり、それに伴って岩盤の水理特性評価の重要性が高まっている。特に放射性廃棄物処分における地下水移行シナリオにおいては、地下水流動評価が決定的な役割を果たすことになるため、対象とする岩盤に応じた評価をしなければならない。現在亀裂性岩盤の水理特性は、割れ目内流動に着目した微視的方法と多孔質媒体として扱う巨視的方法で評価されているが、後者は既存の手法が使用できるため大変便利である。そこで、本研究では亀裂性である花崗岩盤の水理特性を後者の方法により評価することを目的とする。現場透水試験として実施されてきた方法はルヂオン試験・JFT試験等ボーリング孔を利用したものであったが、より大規模な対象の透水性評価を行なうため、本研究では長さ約50mの坑道を使用した排水試験を実施したので、その結果を報告する。

#### 2 試験手法

坑道規模の排水試験は釜石鉱山原位置試験場の新規掘削坑道において実施された。試験場周辺の概要を図-1に示す。

排水試験は、亀裂性岩盤を多孔質媒体に近似した場合の坑道規模における等価透水性を求める試験であり、その試験原理はダルシーの定常放射状浸透流の理論に基づくものである。透水性評価には試験坑道周辺の動水勾配および湧水量が必要であるため、放射状にボーリング孔を配置し各孔あたり6点（総計54点）の間隙水圧の測定を実施した。湧水量計測は、7.5m長の試験区間5区間を堰で仕切り、湧水を導水することによって実施した。図-2に排水試験坑道周辺のボーリング配置を示す。

### 3 試験結果

間隙水圧の経時変化の一例を図-3、圧力分布の一例を図-4に示す。各試験区間毎の湧水量分布と参考のため割れ目密度を合わせて表-1に示す。間隙水圧挙動は計測開始より概ね30日で一定の値を取り始めており、約60日後の計測値は定常状態に達していると判断できる。また、間隙水圧値は0.3~1.5kgf/cm<sup>2</sup>の間で分布している。また、湧水量としては、間隙水圧挙動が定常状態に達し始めたと判断できる30日以降の平均値を示してある。

排水試験用坑道KD-90周辺の地下水場が定常放射状である場合、湧水量、圧力分布、透水係数の関係は次式で表わされる。

$$k = Q/2\pi hi$$

ここで  $i = (p_e - p_w)/\ln(r_e/r_w)$ 、 $k$ は透水係数、 $Q$ は湧水量、 $h$ は試験区間長、 $p$ は間隙水圧、 $r$ は坑道中心からの距離、 $w_e$ は坑道壁面および影響半径を表わす。各孔の圧力分布より求めた $i$ の値および実際の計測値のばらつきを考慮して直線 $i$ の傾きの最大・最小値も合わせて表-2に示す。

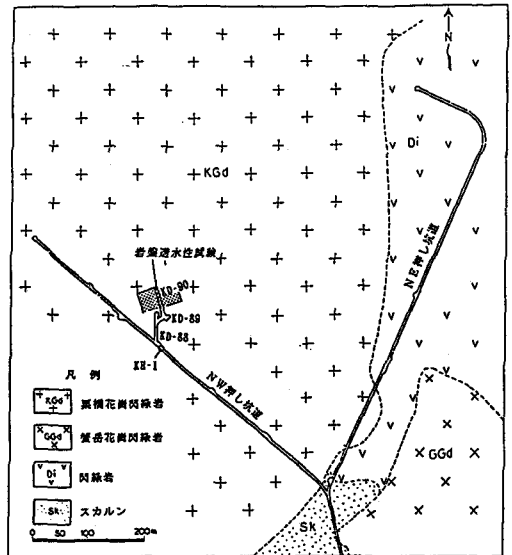


図-1 原位置試験場概要

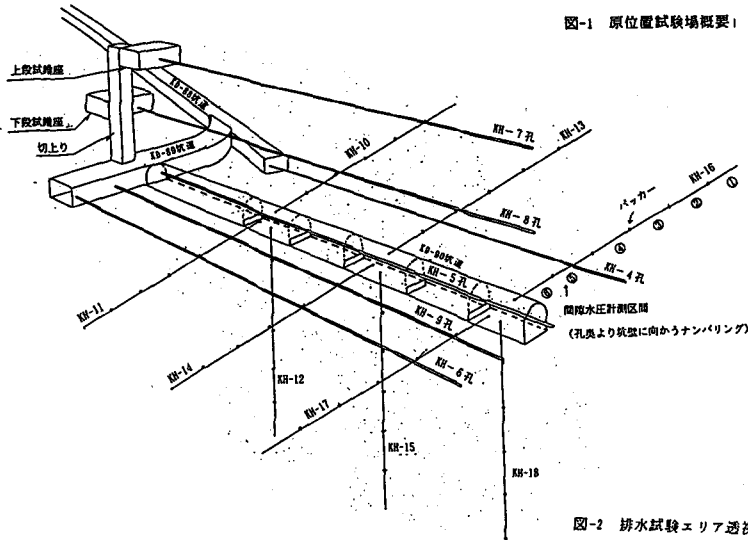


図-2 排水試験エリア透視図

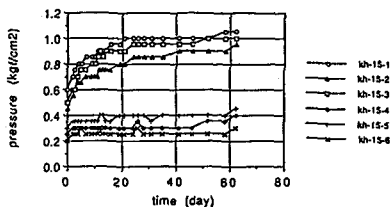


図-3 間隙水圧の経時変化例  
(孔奥から孔口に向かうナンバリング)

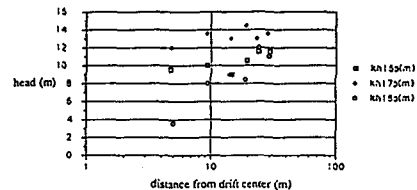


図-4 水頭分布例

表1 各試験区間の湧水量

| 試験区間 | 湧水量(cc/min) | 割れ目密度(本/m) |
|------|-------------|------------|
| No.1 | 623         | 2.53       |
| No.2 | 548         | 1.87       |
| No.3 | 26.8        | 1.73       |
| No.4 | 29.4        | 2.53       |
| No.5 | 401         | 1.73       |
| 合計   | 1628.2      |            |

(KD-90坑道奥より坑口に向かってナンバリングした)

表2 各孔のi値

| 孔 番   | i (最小・最大)           |
|-------|---------------------|
| KH-10 | 3.36 (2.34 ~ 5.37)  |
| KH-11 | 5.51 (3.64 ~ 9.21)  |
| KH-12 | 4.26 (2.01 ~ 10.79) |
| KH-13 | 4.80 (2.91 ~ 9.78)  |
| KH-14 | 6.14 (3.78 ~ 12.27) |
| KH-15 | 3.40 (1.93 ~ 4.26)  |
| KH-16 | 5.23 (4.13 ~ 10.0)  |
| KH-17 | 6.73 (4.92 ~ 12.44) |
| KH-18 | 4.22 (3.56 ~ 4.92)  |
| 平均値   | 4.85 (3.25 ~ 8.78)  |

透水性評価には、全湧水量1628cc/minから坑道先端の球状流的流入分13%を差し引いた湧水量1417cc/minを使用する。したがって、KD-90の坑道規模の平均的等価透水性は、試験区間37.5mへの湧水量1417cc/minと全計測孔におけるiの平均値4.85および最大値8.78最小値3.25より  $2.1 \times 10^{-8} \pm 1.0 \times 10^{-6}$  cm/secと算定された。

#### 4 考察

試験坑道には複数の試験区間を設けているため、各区間における透水性評価が可能である。図-5にスケール毎の透水性値を図-6にスケールと相対誤差との関係を示す。ここで言う相対誤差REとは次量である。

$$RE = |K - k| / K$$

ここで、Kは全試験区間における透水係数、kはあるスケールにおける透水係数である。また、小田らの提案する割れ目解析手法によるKD-88、90坑道の透水テンソルを表-3、表-4およびサンプル規模と相対誤差との関係を図-7、図-8に示す。相対誤差REは以下のように定めた。

$$RE = \sqrt{\langle |K - k|^2 \rangle} / \sqrt{\langle |K|^2 \rangle}$$

ここで、Kは全区間における透水テンソル、kはある区間長における透水テンソル、 $\langle |X|^2 \rangle$ はテンソルXのノルムである。

図-6に示されたように、試験坑道の透水性は試験対象規模によってその特性が変動しており、当該花崗岩盤の透水性においてスケール効果が存在することが確認された。また、対象規模が大きくなるに従い、透水係数はある値に収束していく様子が示されている。REV決定にあたっては相対誤差が小さい程望ましいが、ここでは許容誤差レベルとして相対誤差0.3として、当該岩盤におけるREVを20数メートルだと判断した。

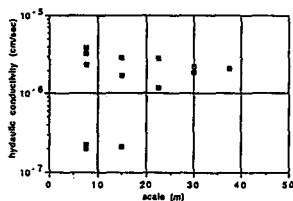


図-5 排水試験区間による透水係数分布

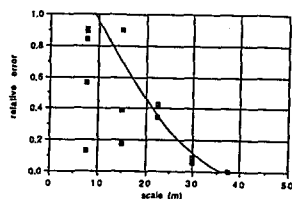


図-6 排水試験坑道の透水性におけるスケール効果

表-3 KD-88坑道全体の透水テンソル

|                | 透水係数<br>(cm/sec)      | 主 方 向 |     |
|----------------|-----------------------|-------|-----|
|                |                       | 方位角   | 傾斜  |
| K <sub>1</sub> | $6.28 \times 10^{-7}$ | 253°  | 71° |
| K <sub>2</sub> | $5.35 \times 10^{-7}$ | 41°   | 16° |
| K <sub>3</sub> | $2.23 \times 10^{-7}$ | 134°  | 9°  |

表-4 KD-90坑道全体の透水テンソル

|                | 透水係数<br>(cm/sec)      | 主 方 向 |     |
|----------------|-----------------------|-------|-----|
|                |                       | 方位角   | 傾斜  |
| K <sub>1</sub> | $6.03 \times 10^{-7}$ | 41°   | 28° |
| K <sub>2</sub> | $5.13 \times 10^{-7}$ | 279°  | 46° |
| K <sub>3</sub> | $2.70 \times 10^{-7}$ | 150°  | 51° |

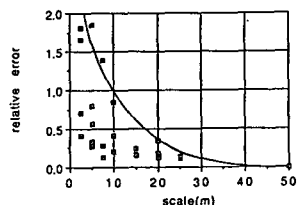


図-7 KD-88坑道の割れ目解析による透水性におけるスケール効果

なお、排水試験坑道KD-90の周囲では様々な透水試験が実施されてきたため、その結果および今回実施した割れ目解析結果を加えたものを図-9に透水テンソルの主軸を図-10に示す。

青山等(1989)が提案した低圧透水試験は15区間にわたって実施され、その透水性のばらつき( $10^{-8} \sim 10^{-5}$  cm/sec)を考慮すると、亀裂性岩盤を代表するような箇所値であると判断できる。そのため、透水性の平均値( $1.1 \times 10^{-6}$  cm/sec)は、孔規模の試験としては、当該岩盤の平均的等価透水性をかなり忠実に表わしているものと考えられる。

孔間透水試験は連結性の良い箇所で選択的に実施されたため、解析の際に卓越方向の値が過大評価される傾向がある。そのため、孔間透水試験結果は岩盤の平均的透水性と言うよりは局所的な水路の透水性に近い値となっている可能性が高く、他の値よりも1オーダー透水性が高くなっているものと考えられる。

割れ目解析は、KD-88坑道・KD-90坑道の割れ目データを用いて実施された。図-10よりわかるように、透水テンソルの主方向に関しては孔間透水試験結果と良い相関を見せている。一方、主値が異なっている原因は、先にも述べたような理由で孔間透水試験では卓越方向の値が過大評価される傾向にあったためだと考えられる。そのため、孔間透水試験結果は、岩盤というよりも局所的な水路の透水テンソルに相当し、割れ目解析結果の方がより広い地域の透水テンソルを表現しているものと考えられる。

排水試験結果は、試験規模の違いにもかかわらず、低圧透水試験結果とひじょうに良い相関を示している。排水試験は、37.5mの坑道規模の透水性を一度に計測する試験であり、低圧透水試験の場合結果的には37.5mの領域を2.5m×15回の試験によって評価したと考えられる。従来の単孔式試験によっても坑道規模の透水性評価の可能性が示されたと言えるだろう。

## 5 おわりに

花崗岩における等価透水性評価から得られる結論を以下にまとめる。

①釜石鉱山の花崗岩盤を対象に排水試験を実施し、坑道規模の透水係数をスケール効果およびREVと共に評価した。その結果、坑道規模の透水係数は $2 \times 10^{-6}$  cm/sec、REVは20メートルと求まった。

②排水試験から求めた透水係数値を別途実施した低圧透水

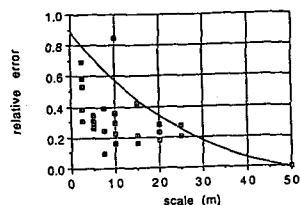


図-8 KD-90坑道の割れ目解析による透水性におけるスケール効果

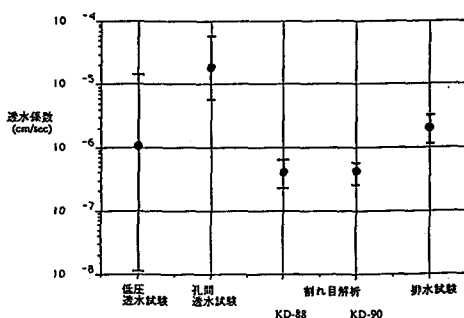
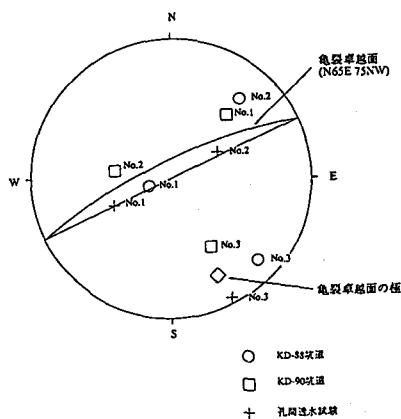


図-9 試験方法による透水係数の違い係数の違い (平均値と最大・小値で表示)



No.1,2,3の順に最大、中間、最小透水係数の方向を示す。

図-10 透水係数の主軸方向 (ステレオネット表示)

試験結果と比較した。その結果、排水試験から求めた値は低圧透水試験結果の対数平均値とよい相関を示した。このことは試験対象長が同等な場合、孔規模における透水性で坑道規模における透水性を評価できる可能性を示している。

③KD-88およびKD-90坑道の割れ目データから透水テンソルによる割れ目解析を実施し、岩盤の透水テンソルをスケール効果およびREVを考慮して評価した。その結果、別途実施された孔間透水試験結果と比較すると、透水テンソルの主軸方向においてはよい相関を示すことがまた主透水係数値はほぼ2オーダーの差があることがわかった。このことは、透水テンソルによる割れ目解析が岩盤透水係数の主軸を適切に評価できるが、一方で開口幅等の精度に課題を残しており、定量的評価には決定的役割を果たしえないものと判断できる。

またスケール効果による透水テンソルの挙動は20数メートル以上では変動が小さくなり排水試験結果とも調和的となる。このことは、割れ目解析が亀裂性岩盤のREV評価において適用性を有するものと判断できる。

本研究に用いたデータは、動力炉・核燃料開発事業団が釜石鉱山で実施している花崗岩における原位置試験の成果の一部である。

#### 参考文献

Oda, M., Hatsuyama, Y., and Ohnishi, Y., Numerical Experiments on Permeability Tensor and Its Application to Jointed Granite at Stripa Mine, Sweden, J. Geophys. Res., 92(8), 8037-8048, 1987

奥野哲夫, クロスホール試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価に関する検討, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 848~849, 1990.

青山、他、深部岩盤の透水性評価手法とその適用性、地下空間利用シンポジウム1989, pp149~154、土木学会、1989