

(40) 神岡岩盤試験場でのクロスホール透水試験による水理特性の検討

A Study on Hydraulic Properties of Rock Mass by Cross-hole Permeability Test in Kamioka Underground Laboratory

須藤 賢*、丹生屋純夫*、藤原紀夫*、土原久哉*

Ken Sudo, Sumio Nyuunoya, Tosio Hujiwara and Hisaya Tutihara

We have studied Cross-hole Permeability Test, using numbers of boreholes, in order to evaluate anisotropic hydraulic conductivities of the jointed rock mass in the underground rock laboratory. This paper shows the hydraulic properties of the jointed rock mass obtained from cross-hole permeability tests. As a result, three-dimensional anisotropic hydraulic conductivities could be evaluated in the cross-hole test site. In modeling the jointed rock as a porous medium with the hydraulic conductivity, the cross-hole permeability test was simulated. We estimated the difference between the measurement value and the analytical value of water pressure.

1. はじめに

亀裂性岩盤の透水性の評価、水理モデル化の検討を目的に神岡鉱山内に開設された当社の岩盤試験場において研究を進めている¹⁾²⁾³⁾。

この報告は、この試験場で実施した亀裂調査、BTV観察、間隙水圧測定、単孔式透水試験、クロスホール透水試験の試験結果およびHsiehら⁴⁾の提案した方法でクロスホール透水試験による水理的異方性の検討結果等について述べている。その結果、対象岩盤を巨視的に均質異方性媒体と仮定してHsiehらの提案した方法でクロスホール透水試験結果から3次元透水係数を求めることができた。また、その得られた透水性の卓越方向は、BTV観察結果で得られた卓越する亀裂群の内の一つの亀裂群に支配されていることを確認した。さらに、Barkarら⁵⁾の提案する流れの次元についての検討および得られた3次元透水係数を使用したクロスホール透水試験のシミュレーション解析により試験結果について検討した。

2. 調査・試験方法

調査・試験地点は当社が岐阜県神岡鉱山柄洞坑道内に保有する地下岩盤試験場で、標高約850m、土被り約175mの場所であり、図-1に示す位置に3本の試験孔を設置した。試験位置の岩種は、花崗岩質岩・片麻岩を中心として主に伊西岩・空地鉱が現れている。調査・試験手順は図-2に示す。試験位置・

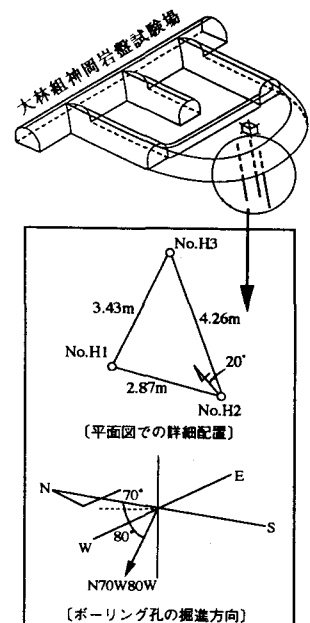


図-1 調査・試験位置

* (株)大林組

試験孔の位置は、最初に実施した孔道底版表面の亀裂調査結果をもとにクラックテンソルで評価²⁾して図-1に示す位置に設定した。試験孔は径76mm・深度約13mで、各試験孔では、ボーリングコアおよびボアホールテレビ(BTV)により亀裂を観察した。単孔式透水試験は、試験孔の亀裂調査結果から試験深度を設定し、ダブルバッカー方式で1mの試験区間に区切って行い、順次、試験深度での定圧注水透水試験を実施した。その際、他の試験孔での圧力応答を同時に測定し、クロスホール透水試験の注水孔区間と観測孔の間隙水圧測定区間の選定資料とした。クロスホール透水試験は、1孔を注水孔、他の2孔を観測孔とし、注水孔ではダブルバッカーで注水区間を1mで区切り、観測孔では、多段式バッカーで3区間の観測区間(1m)を設けている。試験方法は、注水孔内の注水区間に定流量送水し、観測孔内に設置した圧力センサーによって各観測区間の圧力の経時変化を測定した。図-3は単孔式透水試験とクロスホール透水試験で使用した透水試験装置の概念図を示す。試験結果の解析は、試験領域を巨視的に異方性を有する均質媒体と仮定して、6方向以上の測定結果を使用し、図-4に示す3次元な透水特性を楕円球状の分布とするHsiehらが提案した図-5に示す方法で行った。図-4に示すように、3次元透水係数の主軸は楕円体の3つの軸と一致し、その3つの軸の大、中、小の各々の2乗が主透水係数の最大値、中間値、最小値となる。

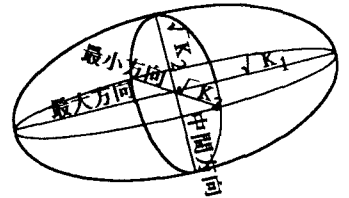


図-4 方向別透水係数で表現される楕円体

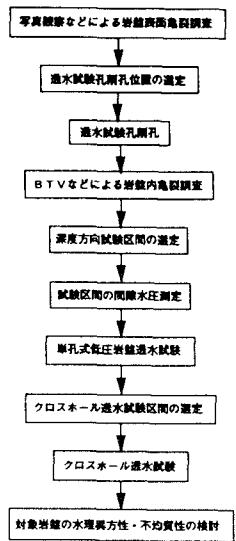


図-2 調査・試験手順

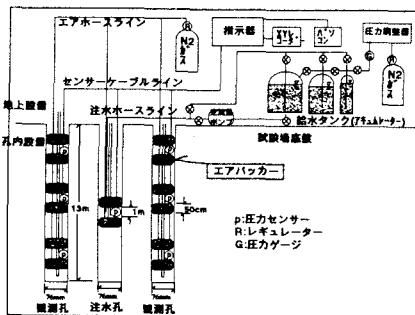


図-3 透水試験装置の概念図

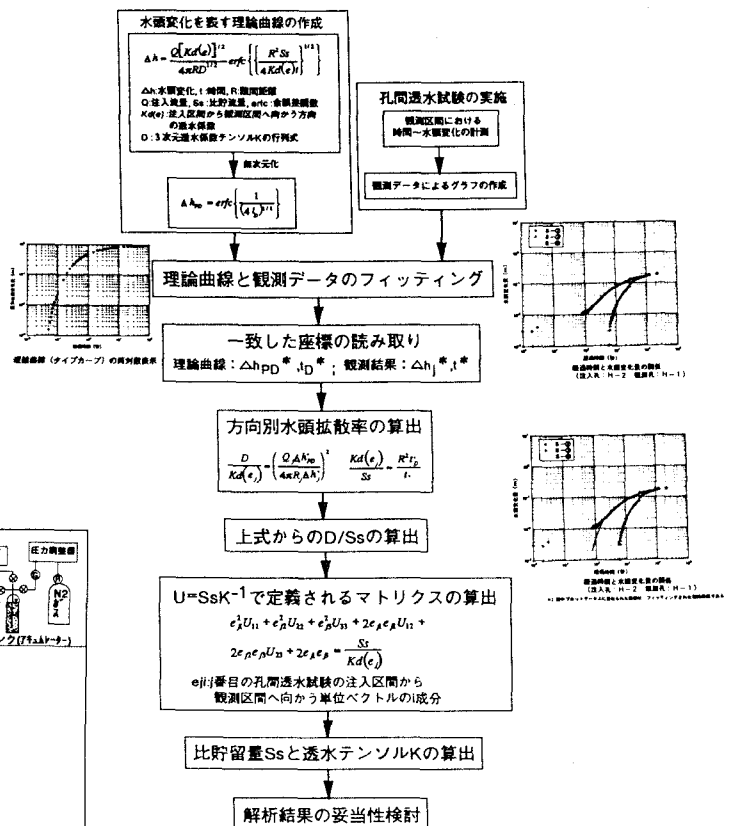


図-5 クロスホール透水試験結果の解析フロー

3. 試験結果および考察

3.1 単孔式透水試験結果

単孔式透水試験結果を図-6に示す。透水係数の算定は図中に示す式を使用した。なお、自然水圧は、坑道底盤からほぼ静水圧分布を示していた。図-6中、コア観察結果を併記したが、試験区間の亀裂数と透水性は必ずしも比例していない。透水係数は 10^{-9} 以下～ $9.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ の範囲で、 10^4

オーダーの開きがあり、比較的、浅部の透水性が良い結果である。また、単孔式透水試験時の観測孔圧力の応答は28の観測区間で認められ、その結果をもとにクロスホール透水試験の注入区間、観測区間を設定した。

3.2 クロスホール透水試験結果

クロスホール透水試験は、注入区間を各々H1孔②、H2孔②、H3孔②として合計5回の試験を実施した。

クロスホール透水試験で得られた圧力応答結果は各々3断面で6方向以上の合計26の圧力経時変化の測定結果を得た。このうち、往復の同じパスによるものを除いた単独のパスは合計18である。それらの結果から、点注入一点観測の理論曲線を使用して、図-5に示した方法で解析して得られた透水テンソルの主透水係数とその主軸方向を表-1に示す。表-1に示す主透水係数の相乗平均は約 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ で、単孔式透水試験結果と比較すると注入区間とした位置での透水係数の最大値 $9.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ に近い値が得られた。ところで、点注入一点観測の理論曲線の適用条件として、注入区間のパラメータ $\alpha 1 = (2R/L) \{Kd(ef)/K(e)\}^{1/2}$ と観測区間のパラメータ $\beta 1 = (2R/B) \{Kd(eb)/Kd(e)\}^{1/2}$ が、 $\alpha 1 \geq 5$ 、 $\beta 1 \geq 5$ を満足する必要がある。しかし、これらの $\alpha 1$ と $\beta 1$ は、求める透水テンソル ($Kd(ef)$: 注入孔軸方向の透水係数、 $Kd(eb)$: 観測孔軸方向の透水係数、 $Kd(e)$: 注入区間中心から観測区間中心方向の透水係数) と原位置試験での注入・観測区間の配置に関する定数 (注入区間長: L 、観測区間長: B 、両区間中心の離間距離: R) をパラメーターとしているため、 $\alpha 1$ 、 $\beta 1$ の算出には、最終的に求める透水テンソル(Kd)が必要となる。そこで、今回求めた透水テンソルから、試験条件とした注入区間(1m)と観測区間(1m)を考慮して、 $\alpha 1 \geq 5$ 、 $\beta 1 \geq 5$ の条件を満足する孔間離間距離を求めると約1.4m以上となり、実際の最小孔間離間距離2.87mはそれ以上となることから、理論曲線の

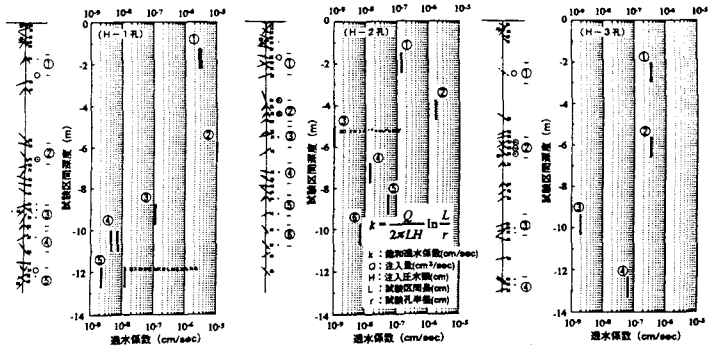


図-6 単孔式透水試験結果

表-1 主透水係数と主軸方向

主透水係数 (cm/sec)	主 軸 方 向
$Kw1=4.232 \times 10^{-5}$	N29.2° W64.6° W
$Kw2=9.204 \times 10^{-6}$	N63.1° E 1.1° E
$Kw3=3.163 \times 10^{-6}$	S26.3° E 25.4° E

比貯留係数: 7.276×10^{-5} (1/m)

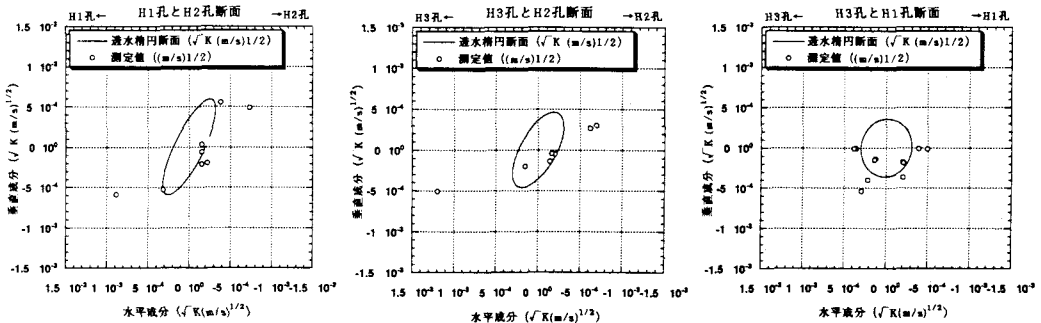


図-7 各測定断面における透水楕円と測定値

適用条件を満足していることを確認した。

図-7には、透水テンソルを用いて測定断面ごとの透水楕円と測定値を示す。透水楕円から離れた測定値が見られるが、巨視的に近似した楕円が得られている。

図-8には、観察結果から得られた卓越亀裂群の内の1つ亀裂群の走向傾斜N81E30Nの亀裂面と表-1に示す透水テンソルの主軸方向を示すが、ほぼ一致した結果が得られている。これより、得られた3次元透水係数は東西走向の中～高角度北傾斜の亀裂に支配されているものと考えられる。このように、3次元透水係数の主軸方向は亀裂性岩盤の透水特性として評価しているものと考えられる。

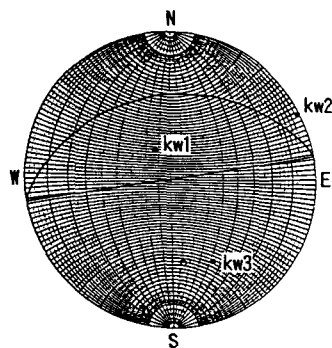


図-8 3次元透水係数の主軸方向と卓越した亀裂面の関係

つぎに、得られた圧力応答曲線とBarkerらの提案する流れの次元を考慮した理論曲線とのフィッティングを行い、各圧力応答曲線の流れの次元解析結果を表-2に示す。表-2より、流れの次元が2以上になる応答は26個の内9個であり、この内6個は各孔で単孔式透水試験結果から透水性が高い区間の②区間を結ぶパスである。一方、流れの次元が1に近い区間は透水性が低く、初期の圧力応答が遅い区間である。また、往復の応答が得られている試験区間では、必ずしも全てではないが、往復の流れの次元はおおよそ近い次元となっている。流れの次元解析結果からは、26個の応答曲線の内約2/3が1本のパイプ流れのような1次元の流れを示し、3次元均質異方性媒体のモデル化において、解析結果に与える誤差が大きくなることが予想される。

表-2 応答曲線についての流れの次元解析結果

試験No.	注入孔			観測孔		
	孔名	区間	孔番地	区間名	孔番地	区間名
1	H 2孔	②	H 1孔	② ③ ⑤	H 3孔	② ③ ④
			流れの次元	2.2 2.6 -	流れの次元	2.2 1.0 -
2	H 1孔	②	H 2孔	② ④ ⑥	H 3孔	② ③ ④
			流れの次元	2.8 1.2 1.2	流れの次元	1.2 1.0 3.0
3	H 1孔	②	H 2孔	① ③ ⑤	H 3孔	② ③ ④
			流れの次元	1.0 1.0 1.0	流れの次元	1.0 1.0 1.0
4	H 3孔	②	H 1孔	② ③ ⑤	H 2孔	② ④ ⑥
			流れの次元	1.0 1.0 1.0	流れの次元	3.0 1.0 -
5	H 3孔	②	H 1孔	② ③ ⑤	H 2孔	② ④ ⑥
			流れの次元	3.0 2.6 -	流れの次元	3.0 1.0 1.0

Barkerらの実数次元の理論式

$$\Delta h(r,t) = \frac{Qr^2}{4\pi^2 K_r \rho} \Gamma(-v, u) \quad v = 1 - \frac{n}{2} \quad u = \frac{5r^2}{4K_r t}$$

ここで、 K_r : 割れ目の透水係数、 S_{sf} : 割れ目系の比貯留係数
 r : 注入点からの距離、 Q : 一定注入量、 Γ : ガンマ関数

4. クロスホール透水試験シミュレーション解析結果

表-1に示す3次元の主透水係数と比貯留係数を水理定数としてシミュレーション解析を実施した。解析モデルの模式図を図-9に示す。境界条件としては、解析領域の外周に流入境界条件、注入孔の試験区間(1m)を流出条件とし、モデルの上下面は不透水条件とした。

解析は、解析コードSIGNASを使用して、3次元飽和非定常浸透流解析を実施した。解析ケースとして、注入孔H2②(1m区間)に試験で注入した流量(25.2cc/min)を一定として与えた場合と注入孔(全水頭17.9m)の注入水頭を一定に与えた場合の非定常解析を行った。

4.1 定流量注水解析結果

図-10には、注入孔H2②(1m区間)に一定流量25.2cc/minを与えたときの注入孔水頭変化量の測定値と解析結果の経時変化を示す。注入孔の水頭上昇は測定値(○印)の方が大きく、解析値(□印)の約14倍である。観測孔H1孔②、③区間と観測孔H3孔②、③区間においても水頭上昇測定値は解析値の約8~20倍(経過時間20000sec)であった。

4.2 定圧注水解析結果

定流量解析では、解析値が測定値に比べて小さいため、注入孔で観測された注水水頭を一定(17.9m)として解析を実施した。解析で得

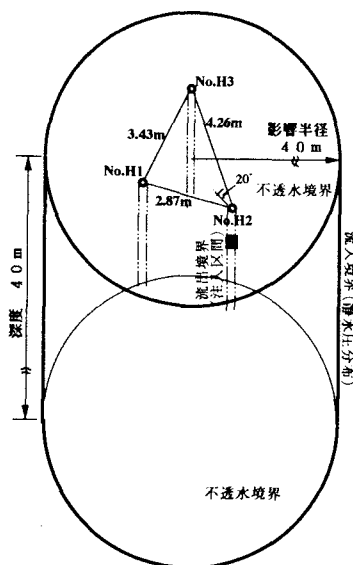


図-9 解析モデルの模式図

られた注水量は343cc/minで測定値の約14倍（経過時間20000sec）と大きい結果である。これは、異方性領域における位置関係が異なるが、楕円体で近似された3次元透水係数が高透水性の亀裂の影響によって大きめに評価されたものと思われる。しかし、 10^4 オーダー違う透水係数の場において、流量は、 10^1 オーダーの違いで求められた。

次に、観測孔H3孔の測定値と解析値の水頭経時変化を図-11に、また、H3孔とH2孔の断面全水頭分布を図-12に示す。図-11のH3孔の水頭変化より、H3③においては測定値（□印）と解析値（◇印）とも比較的近い水頭経時曲線が得られているが、H3②では測定値（○印）と解析値（△印）が離れている。とくにH3②では、図-7に示す透水楕円と大きく離れている点であり、解析値との誤差は大きくなると予想される。また、図-12に示す断面全水頭分布からは異方性の様子が分かり、その分布形状は3次元透水係数を求めたH3-H2断面の透水楕円に近似している。

5. おわりに

神岡岩盤試験場において実施した原位置調査試験結果およびHsiehらの提案した方法でクロスホール透水試験による水利的異方性を検討し、さらに、H2孔のクロスホール透水試験のシミュレーション解析結果について検討した。その検討結果を以下に示す。

- ① クロスホール透水試験により、Hsiehらの方法で3次元透水係数を求めた。また、3次元透水係数の卓越方向は、BTV観察結果から、東西走向の中～高角度の亀裂群とはほぼ整合性を示すことを確認した。
- ② Barkerらの提案する流れの次元解析結果から、得られた26の応答パスの内約2/3が1本のパイプ流れのような1次元の流れを示し、3次元均質異方性媒体とした場合のモデル化において、解析結果に与える誤差が大きくなることが予想された。
- ③ 注水孔H2のクロスホール透水試験シミュレーション解析から、楕円体近似した3次元透水係数による流量誤差としては 10^1 オーダーであった。

なお、他の注水孔のシミュレーション解析によりさらに検討していくつもりである。最後に、調査・試験に協力してくれた(株)ダイヤコンサルタントの小俣明氏、二口克人氏、山下正氏、他関係者に感謝します。

【参考文献】

- 1) 須藤はか：低透水性岩盤の亀裂特性と原位置透水試験・透気試験結果について、第49回年次学術講演会、PP142～143、1994
- 2) 鈴木ほか：地下岩盤試験場の水利特性に関する検討（その1）岩盤亀裂調査による等価透水テンソルの推定、第50回年次学術講演会、1995
- 3) 須藤はか：地下岩盤試験場の水利特性に関する検討（その2）原位置岩盤のクロスホール透水試験結果について、第50回年次学術講演会、1995
- 4) P.A.Hsieh et al.: Field Determination of the Three Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media 2.Methodology and Application to Fractured Rocks, Water Resources Research, Vol.21, No.11, pp.1667-1676, 1985
- 5) J.A.Barker: A Generalized Radial Flow Model for Hydraulic Tests in Fractured Rock, Water Res. Res. pp1976-1804, 1988

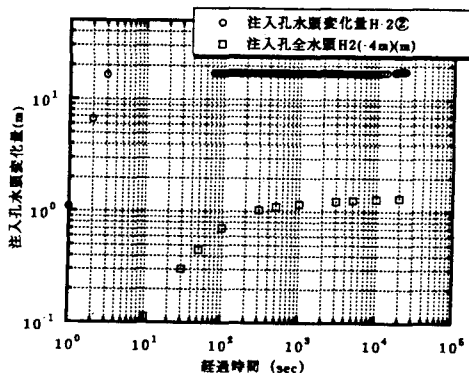


図-10 注入孔の水頭変化量経時変化(定流量解析)

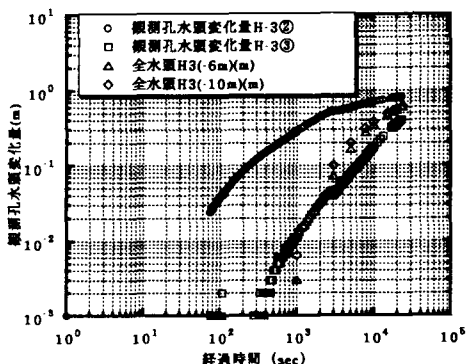


図-11 観測孔H3の水頭変化量経時変化(定圧解析)

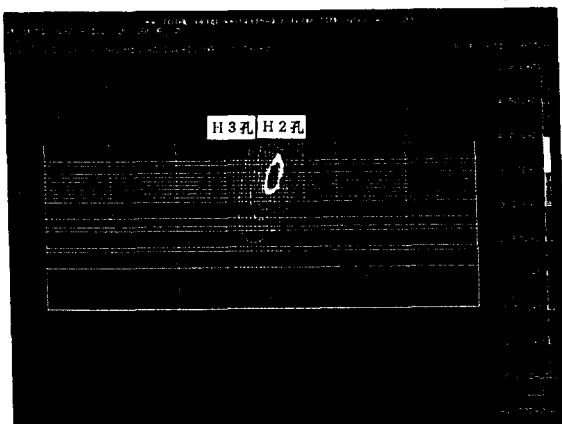


図-12 H3-H2鉛直断面全水頭分布解析結果(15000sec)