

# 神岡岩盤試験場におけるクロスホール透水試験による 3次元岩盤水理特性について

須藤 賢 鈴木 健一郎 丹生屋 純 夫  
丸山 誠 藤原 紀夫 平間 邦 興

## Hydraulic Properties of Rock Mass by Cross-hole Permeability Tests in the Kamioka Underground Laboratory, Japan

Ken Sudo Kenichirou Suzuki Sumio Niunoya  
Makoto Maruyama Toshio Fujiwara Kunioki Hirama

### Abstract

In planning, construction and safety evaluation of large-scale caverns in rock masses, such as geological isolation facilities for high-level radioactive waste, it is important to evaluate the hydraulic properties of the rock mass and to develop an adequate hydraulic modeling method. This paper describes the results of joint investigations, borehole investigations using a television camera, porewater pressure measurements, single-hole permeability tests and cross-hole permeability tests performed at our Kamioka underground rock laboratory. Furthermore, the cross-hole permeability tests were simulated by modeling the jointed rock mass as a porous medium with three-dimensional anisotropic hydraulic conductivity.

As a result, we were able to show the correlation between the three-dimensional anisotropic hydraulic conductivities obtained from the cross-hole permeability tests and the joint directions obtained from the borehole investigation with the television camera. In addition, we were able to estimate the influence of high permeability joints on the three-dimensional anisotropic hydraulic conductivities from the difference between water pressures measured in the cross-hole permeability test and those obtained from the simulation.

### 概要

高レベル放射性廃棄物処分施設等の岩盤中の大規模地下空洞の設計・施工や安全評価を行う上で、岩盤の水理特性の評価・水理モデル化に関する研究開発はきわめて重要である。そこで、それらを検討する目的で、神岡鉱山内に開設された当社の地下岩盤試験場で研究を進めている。この報告は、き裂調査、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について検討したものである。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、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。その3次元透水係数の卓越透水方向は、BTV観察で得られた内の一つのき裂群のき裂面方向とほぼ整合性を示すことを確認した。また、クロスホール透水試験のシミュレーション解析から、水頭変化量は測定値より小さく、今回の3次元透水係数は試験区間とした高透水性の透水き裂に影響されていることが分かった。

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分施設等の岩盤中の大規模地下空洞の設計・施工や安全評価を行う上で、岩盤の水理特性の評価・水理モデル化に関する研究開発はきわめて重要である。そこで、き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<sup>1)~4)</sup>。

岩盤中の地下水は、特に結晶質岩系の岩盤の場合、き裂内を主に流動するため、その岩盤水理特性を評価するにはき裂調査と透水試験の両者が不可欠となる。また、岩盤内の地下水の連続性や異方性を把握するには、単孔式の透水試験では不十分で、注水孔のほかに観測孔をも

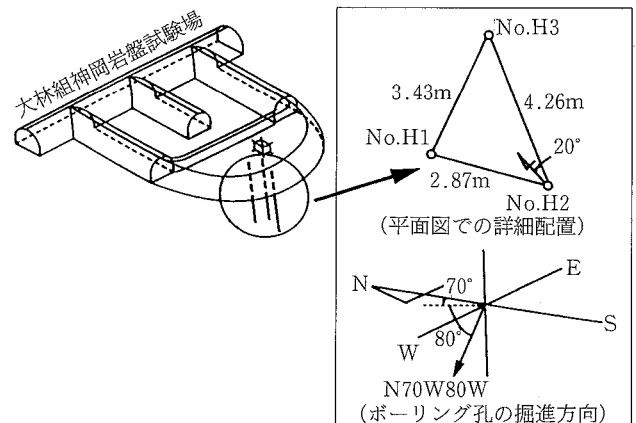


図-1 調査・試験位置

つ多孔式透水試験法であるクロスホール透水試験等で評価する必要がある。

そこで、今回、この試験場においてき裂調査、BTV(ボアホールテレビ) 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を実施し、その試験結果をもとに Hsieh らが提案する方法<sup>5)</sup>で3次元の岩盤水理特性について検討した。さらに、Barkar ら<sup>6)</sup>の提案する流れの次元についての検討および今回得られた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。以下に、その調査・試験方法および試験結果の検討について述べる。

## 2. 調査・試験方法

調査・試験地点は当社が岐阜県神岡鉱山栃洞坑道内に保有する地下岩盤試験場で、標高約 850 m、土被り約 175 m の場所である。その神岡岩盤試験場内において、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・片麻岩からなる伊西岩・埴地鉱が現れている。

調査・試験は図-2 に示す手順で行った。試験位置は試験場坑道のき裂調査により選定し、試験孔の設置位置は、選定した試験位置で詳細に実施した坑道底盤表面のき裂調査結果をもとにクラックテンソルで評価<sup>2)</sup>し、図-1 に示す位置に設定した。試験孔は径 76 mm・深度約 13 m で、各試験孔では、ボーリングコアおよび BTV によりき裂を観察した。

単孔式透水試験とクロスホール透水試験で使用した透

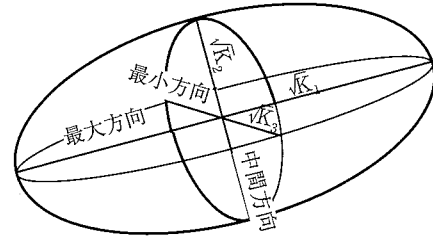


図-4 方向別透水係数で表現される楕円体

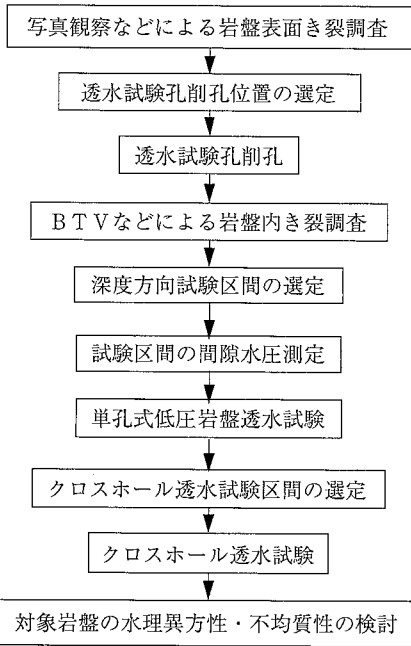


図-2 調査・試験手順

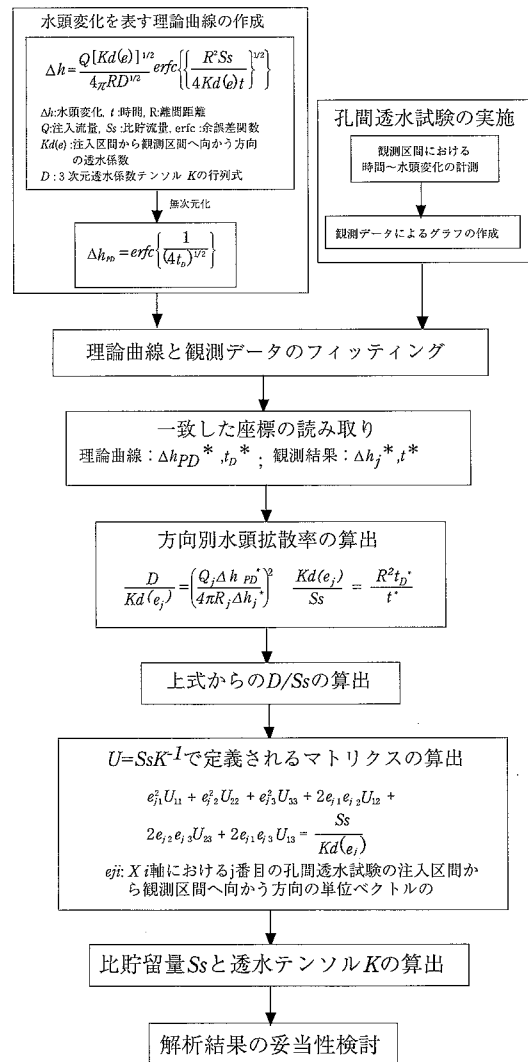


図-5 クロスホール透水試験結果の解析フロー

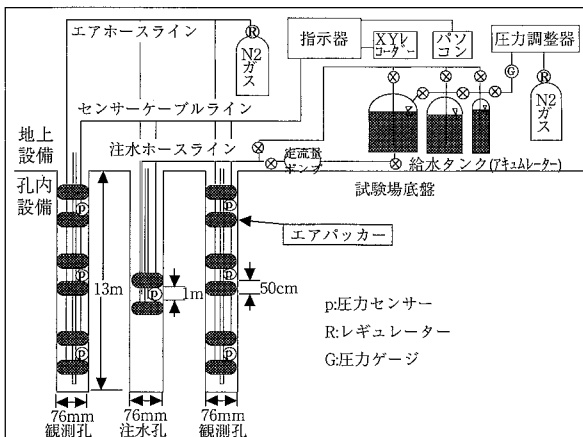


図-3 透水試験装置の概要

水試験装置の概要を図-3に示す。

単孔式透水試験は、試験孔のき裂調査結果から試験深度を設定し、ダブルパッカー方式で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、注水孔ではダブルパッカーで注入区間を1mで区切り、観測孔では多段式パッカーで3区間の観測区間(1m)を設けている。試験方法は、注水孔内の注入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。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次元透水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。

### 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。単孔式透水試験は、各試験孔の深度方向にBTV観察から得られた開口き裂位置と想定される区間で行い、H1孔で5区間、H2孔で6区間、H3孔で4区間の合計15区間で実施した。図-6中、コア観察結果を併記したが、試験区間のき裂数と透水性は必ずしも比例していない。透水係数は約 $1 \times 10^{-9}$  ~  $9.7 \times 10^{-6}$  cm/sの範囲で、 $10^4$  オーダーの開きがある

が、これは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、注入区間を各試験孔の中で透水性が良く圧力応答が多く認められた各々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図-7に示すが、各々3断面で6方向以上の合計26の圧力経

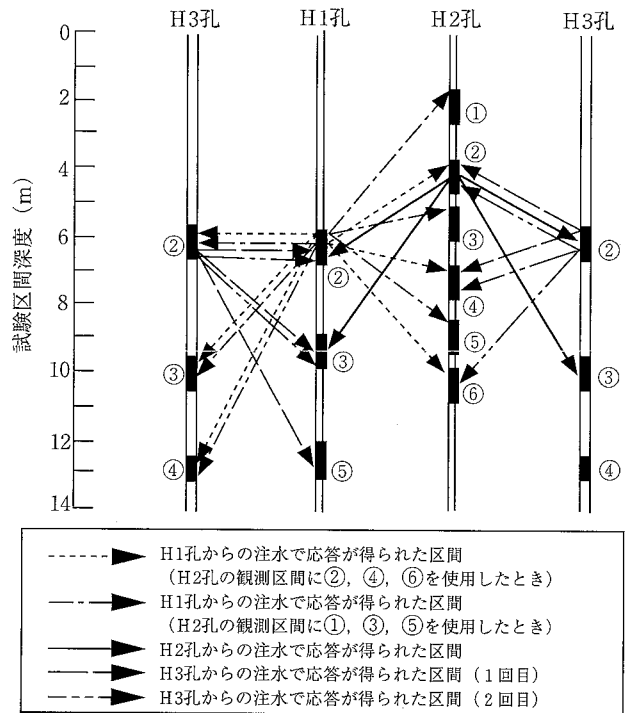


図-7 各観測孔における圧力応答結果

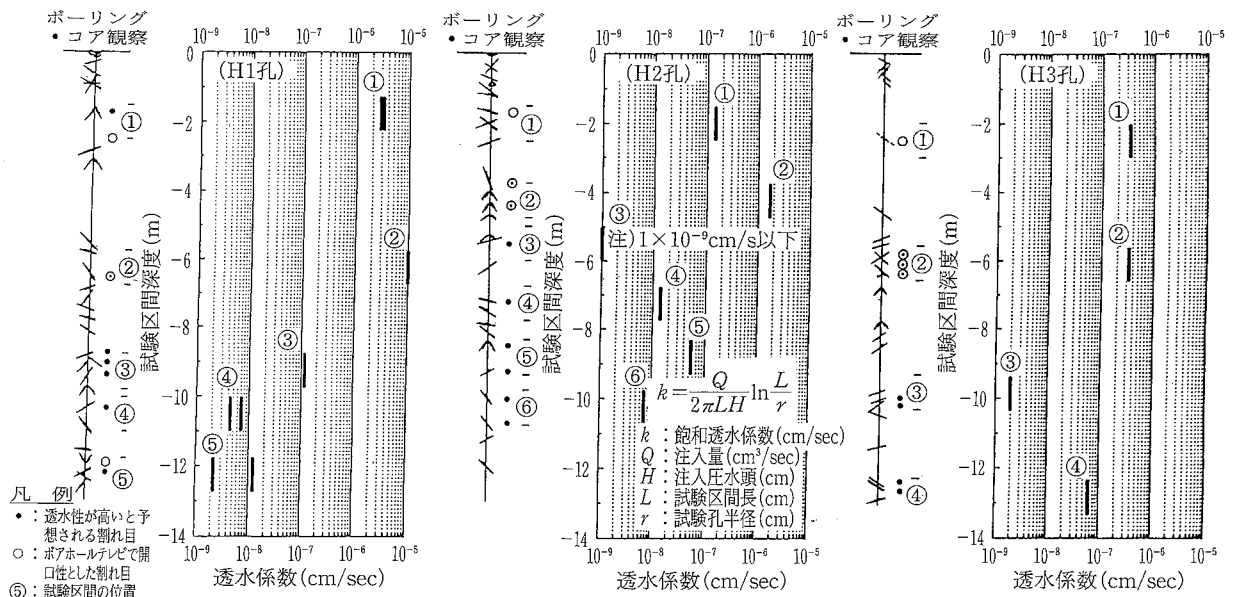


図-6 単孔式透水試験結果

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・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対数平均は約 $1 \times 10^{-5}$  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 $9.7 \times 10^{-6}$  cm/sに近い値が得られた。

ところで、今回使用した点注入・点観測の理論曲線は適用条件として、注入区間のパラメータ $\alpha_1 = (2R/L) \{Kd(e)/K(e)\}^{1/2}$ 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(e))：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(1 m)と観測区間(1 m)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1.4 m以上となる。実際の最小孔間離間距離2.87 mはそれ以上となることから、理論曲線の適用条件を満足していることを確認できる。

図-8には、各試験孔間の測定断面ごとの測定結果から算定した方向別透水係数と、その方向別透水係数から最小二乗法で得られた透水楕円を示す。図中、透水楕円から離れた測定値も見られるが、巨視的に近似した楕円が得られている。

表-1 主透水係数と主軸方向

主透水係数 (cm/sec)	主軸方向
$Kw_1 = 4.232 \times 10^{-5}$	N 29.2° W 64.6° W
$Kw_2 = 9.204 \times 10^{-6}$	N 63.1° E 1.1° E
$Kw_3 = 3.163 \times 10^{-6}$	S 26.3° E 25.4° E

比貯留係数： $7.276 \times 10^{-5}$  (1/m)

図-9には、BTV 観察結果から得られた卓越き裂群の中の1つのき裂群の走向傾斜 N81E30Nのき裂面と、表-1に示す透水テンソルの主軸方向を示す。岩盤の3次元透水係数は、卓越するき裂方向に規制されるとすると、透水性が高くかつ優勢なき裂面状に3次元透水係数の主軸の内最大、中間の $Kw_1, Kw_2$ が位置し、そのき裂面の法線方向に最小の $Kw_3$ が位置することが想定される。図中で上記の分布形態に近い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～高角度北傾斜のき裂に支配されているものと考えられる。このように、3次元透水係数の卓越方向はき裂観察で得られたき裂の方向性とほぼ整合性を示すことから、き裂性岩盤の透水特性として評価し得るものと考えられる。

次に、各観測孔の圧力応答での流れ形態を把握する目的で、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個は各孔での単孔式透水試験結果の透水性が高い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

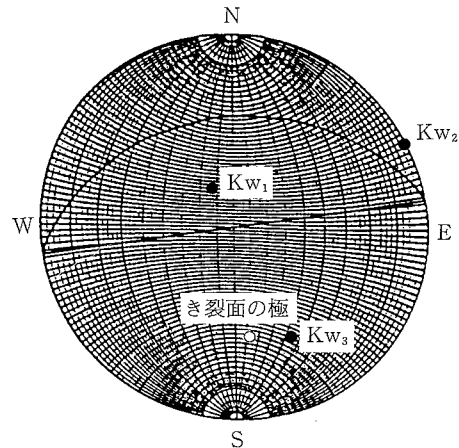


図-9 3次元透水係数の主軸方向と卓越したき裂面の関係 (ウルフネット下半球投影)

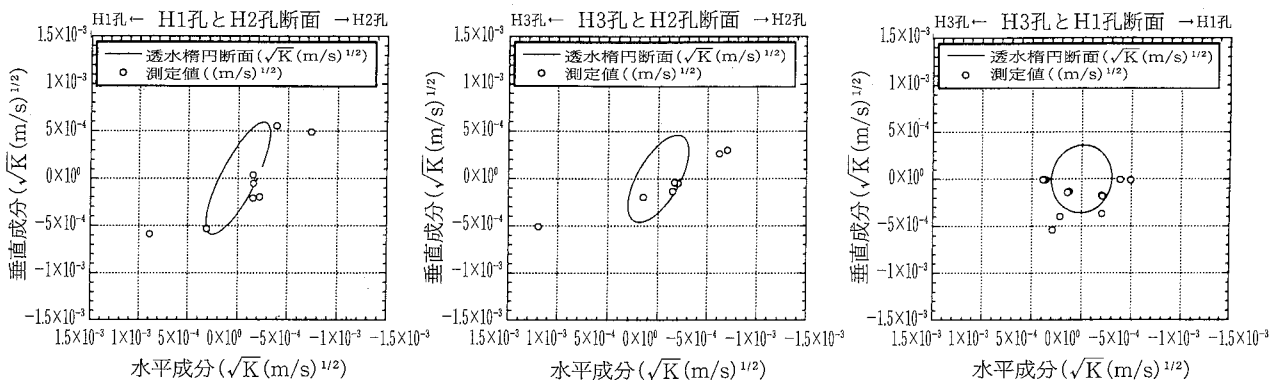


図-8 各測定断面における透水楕円と測定値

表-2 各応答曲線についての流れの次元解析結果

試験No	注水孔		観測孔							
	孔名	区間	孔番地		区間名	孔番地		区間名		
1	H2孔	②	H1孔	②	③	⑤	H3孔	②	③	④
			流れの次元	2.2	2.6	—	流れの次元	2.2	1.0	—
2	H1孔	②	H2孔	②	④	⑥	H3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	H1孔	②	H2孔	①	③	⑤	H3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	H3孔	②	H1孔	②	③	⑤	H2孔	②	③	⑥
			流れの次元	1.0	1.0	1.0	流れの次元	3.0	1.0	—
5	H3孔	②	H1孔	②	③	⑤	H2孔	②	③	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

$$\Delta h(r,t) = \frac{Qr^{2v}}{4\pi^{1-v}K_b b^{3-n}} \Gamma(-v,u) \quad v = 1 - \frac{n}{2} \quad u = \frac{S_s r^2}{4K_b t}$$

$K_b$ : 割れ目の透水係数,  $S_s$ : 割れ目系の比貯留係数,  $n$ : 次元

$r$ : 注入点からの距離,  $Q$ : 一定注入量,  $\Gamma$ : ガンマ関数,  $t$ : 時間

区間では、必ずしもすべてではないが、往復の流れの次元はほぼ等しい。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。

#### 4. クロスホール透水試験のシミュレーション解析

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。解析モデルの概要を図-10に示す。境界条件としては、解析領域の外周に流出境界条件、注水孔の注入区間(1m)を流入条件とし、モデルの上下面は不透水条件とした。

シミュレーション解析は、解析コード SIGNAS を使用して、3次元飽和浸透流非常数解析を実施した。解析ケースは試験 No. 1~No. 5 の5ケースで、各注水孔の注入区間に注入流量(試験 No. 1: H2 ② 25.2 cc/min, No. 2: H1 ② 71.3 cc/min, No. 3: H1 ② 60.8 cc/min, No. 4: H3 ② 7.4 cc/min, No. 5: H3 ② 6.9 cc/min)を一定として与えた場合の3次元非常数解析を行った。

##### 4.1 注水孔水頭変化量解析結果

図-11には、各注水孔の水頭変化量についての測定値と解析値の関係を示す。各解析値は、測定値に比べて小さい。その傾向は、注水孔 H3 ②区間とした試験 No. 4 と試験 No. 5, 次に注水孔 H2 ②区間の試験 No. 1 が著しいが、注水孔 H1 ②区間での試験 No. 2, No. 3 の解析値は測定値に近い結果である。これは、H1 ②区間の単孔式透水試験の透水係数が今回の3次元透水係数の対数平均に近いため、試験区間 H1 ②を注水孔とした解析値は測定値に近い値が得られたものと考えられる。また、H1 ②区間は全孔の単孔式の透水係数の最大値を示し、水頭変化量の解析値は測定値より小さいことから、今回の楕円近似して求めた3次元透水係数は、試験区間とした高透水性の透水き裂に大きく影響されているものと考えられる。

##### 4.2 観測孔水頭変化量解析結果

解析結果の一例として、図-12に試験 No. 2 の注水孔

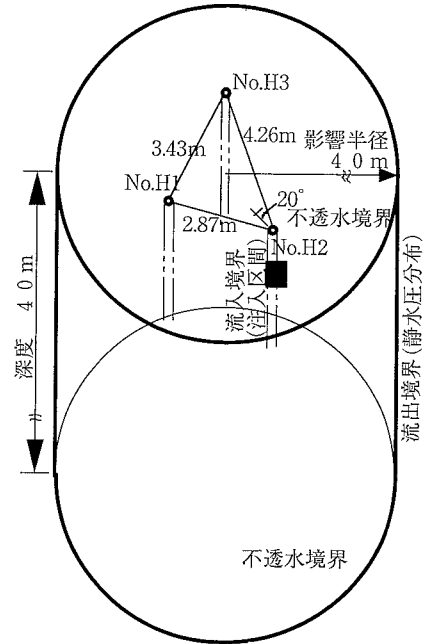


図-10 解析モデルの概要 (注入区間 H2②の場合)

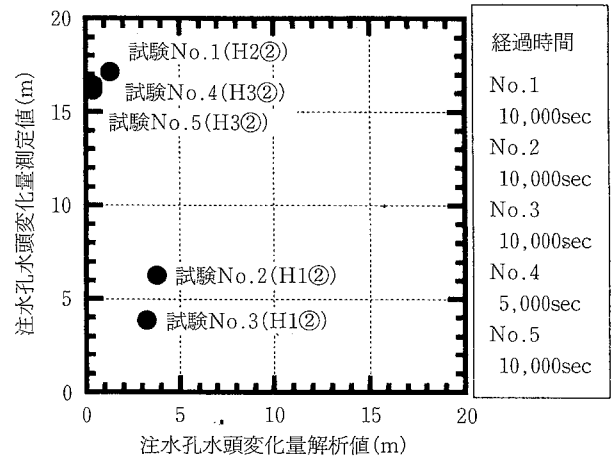


図-11 各注水孔の水頭変化量測定値と解析値の比較

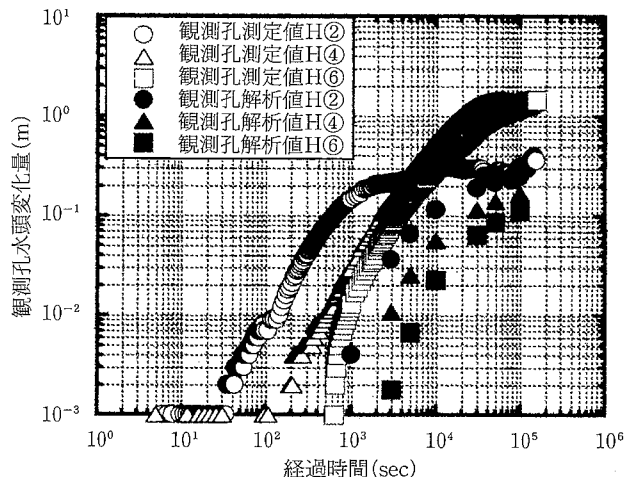


図-12 観測孔 H2 の水頭変化量経時変化



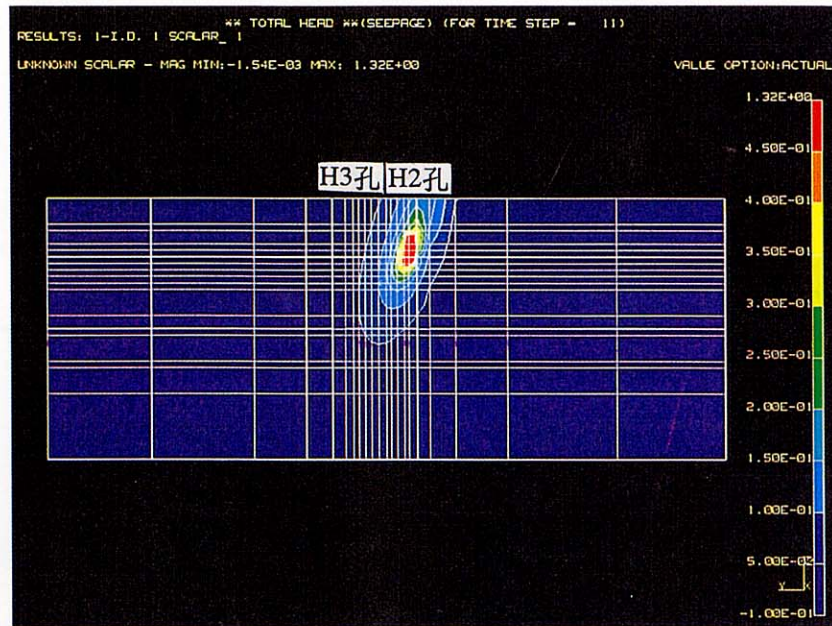


図-13 H3-H2断面全水頭分布解析結果 (20,000 sec)

H1 ②とした場合の観測孔 H2 の②, ④, ⑥区間の測定値と解析値の水頭経時変化を示す。H2 孔の各区間の応答順序は解析値と測定値とも同じであるが、水頭経時曲線の立ち上がり時間と H2 ④, ⑥区間の最終の水頭増加量は一致しない結果である。これは、今回の楕円近似した3次元透水係数では、図-8の透水楕円と測定値の関係でバラツキが見られること等から、すべての応答曲線を調和よく表現することは難しい。

また、図-13には、一例として試験 No. 1 の解析結果である H3-H2 断面の全水頭分布を示すが、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、異方性の方向を表現していることが分かる。

### 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理的異方性を検討し、さらに、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～高角度のき裂群と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 クロスホール透水試験シミュレーション解析から、水頭変化量は測定値より小さく、今回求めた3次元透水係数は試験区間とした高透水性の透水き裂に大きく影響

されていることが分かった。

今回、クロスホール透水試験により岩盤の水理特性・水理モデル化の検討を進めてきたが、トレーサー試験についても現在進めており、それらの結果も踏まえて、今後、さらに岩盤水理について検討していく予定である。

最後に、神岡岩盤試験場での調査・試験の実際的な作業は、著者らとともに、本社 土木技術本部技術第二部の三上哲司、田中達也、天野 悟、永久和正、玉野 達、土原久哉のメンバーによって行われたことを付記する。

### 参考文献

- 1) 須藤, 他: 低透水性岩盤のき裂特性と原位置透水試験・透気試験結果について, 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集, p. 142~143, (1994)
- 2) 鈴木, 他: 地下岩盤試験場の水理特性に関する検討 (その1) 岩盤き裂調査による等価透水テンソルの推定, 第50回土木学会年次学術講演会講演概要集, p. 122~123, (1995)
- 3) 須藤, 他: 地下岩盤試験場の水理特性に関する検討 (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回土木学会年次学術講演会講演概要集, p.120~121, (1995)
- 4) 須藤, 他: 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, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム, p. 191~195, (1996)
- 5) 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, p. 1667~1676, (1985)
- 6) J.A. Barker: A Generalized Radial Flow Model for Hydraulic Tests in Fractured Rock, Water Res. Res., p. 1976~1804, (1988)