

電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と 水理特性の評価

Evaluation of the water-conducting features and their hydraulic parameters using fluid electric conductivity logging

竹内真司*・下茂道人**・城まゆみ** Chin-Fu Tsang***

Shinji TAKEUCHI, Michito SHIMO, Mayumi JHO and Chin-Fu TSANG

Fluid electric conductivity logging was performed in 500m borehole, named DH-2, located at adjacent to the MIU (Mizunami Underground Research Laboratory) Site in Gifu Prefecture, central Japan. The purpose of this study is to identify water-conducting features (WCFs) of fractured rock in the deep borehole and to evaluate hydraulic properties such as transmissivity, hydraulic head and electric conductivity (salinity). 19 WCFs were identified by the logging with changing pumping rate three times and evaluated hydraulic properties with numerical simulation based on the one dimensional advection-diffusion equation. The transmissivity, hydraulic head and electric conductivity (salinity) obtained from the result of the analysis were consistent with observed ones.

We propose this method would be useful for evaluating hydraulic properties in deep underground effectively.

Key Words: fluid electric conductivity logging, water-conducting feature, hydraulic property, fractured rock

1. はじめに

亀裂性岩盤における地下水流動のモデル化・解析においては、地下水の流動経路となる割れ目の位置や水理特性などを把握することが重要である。ボーリング孔を用いた調査により亀裂性岩盤中の水みちを検出する技術としては、従来、フローメータ検層(スピンナー式、電磁式など)や温度検層が用いられてきた。数十 km² 以上の領域における地下水流動場を評価する上では、断層破碎帯に伴うような規模の大きな水みちやその集中帯を把握することが優先的に求められることから、上記手法を用いることで目的を満たすことが可能と考えられる。しかしながら、数 km² 以下の領域における地下水流動場を評価するためには、より詳細な水みちの位置やその物性を把握することが必要となる。このための手法として、ボーリング孔内の水を本来の地下水と異なる電気伝導度の水に置き換え、電気伝導度の時間変化を測定することにより、詳細な水みちの位置や水みちの水理特性を把握する「電気伝導度検層」がある¹⁾²⁾。数百 m 以深を対象とした電気伝導度検層は欧米では実績があるものの²⁾³⁾、我が国では報告事例はない。したがって本測定手法のノウハウや実績を蓄積し、地表からの調査において地下深部の水みちの抽出やその水理特性を効率的に把握できる手法として確立しておくことが、今後、地下深部の地質環境を調査する際に有効となると考える。

今回、深度約 500m のボーリング孔において電気伝導度検層を実施し、詳細な水みちの抽出と得られた電気伝導度の分布の変化を数値解析により再現し、抽出された水みちの透水性や間隙水圧ならびに電気伝導度を求めた。さらにこれらの結果と別途実施した水理試験や水質分析の結果と比較した。

* 正会員 核燃料サイクル開発機構

** 正会員 大成建設(株) 土木技術研究所

*** ローレンスバークレー国立研究所(米国)

2. 研究実施位置および地質概要

試験は岐阜県瑞浪市にある，サイクル機構の瑞浪超深地層研究所用地の南側に位置する深度約 500m の鉛直ボーリング孔（DH-2 号孔）で実施した(図-1)。

本ボーリング孔周辺の地質は，基盤をなす領家帯花崗岩類(土岐花崗岩)と，これを被覆する 100~200m の厚さを有する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群などからなる。本ボーリング孔は孔口から深度約 170m まで存在する堆積岩部に $\phi 127\text{mm}$ のケーシングが設置されており，以深の花崗岩部は孔底部まで HQ-WL サイズ ($\phi 98.6\text{mm}$)の裸孔からなる。花崗岩部は本孔で実施された地質学的な調査結果により，深度 200~250m 付近に 2 箇所の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が，300~350m 付近には 3 箇所の，さらに 430~460m 付近には 2 箇所の高角度の割れ目集中帯がそれぞれ存在することが分かっている(図-2)。

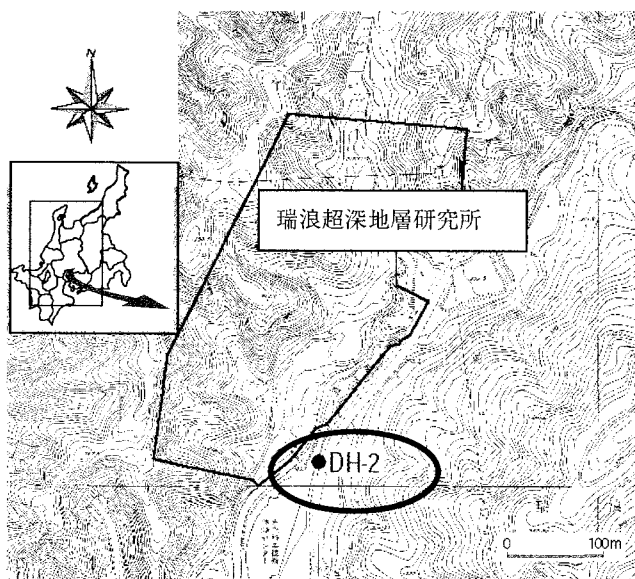


図-1 位置図

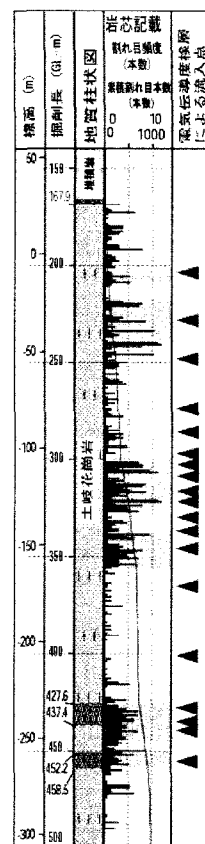


図-2 地質柱状図
(岩芯記載欄の帯は割れ目の集中帯)

3. 実施内容

電気伝導度検層は，以下の手順で実施した(図-3)。

- ① 地上部においてイオン交換樹脂を用いて脱イオン水を精製する。
- ② これをボーリング孔の孔底付近(約 495m)まで降下させたホースから送水し，同時に深度約 50m に設置した揚水ポンプにより揚水しながら孔内水と置換する（試験開始前に置換した孔内水の電気伝導度が地下水本来のそれと 2 桁程度の差異がついたことを確認する）。
- ③ 脱イオン水に置換直後の孔沿いの電気伝導度のプロファイルを測定後，孔上部に揚水ポンプを設置し，一定流量で揚水しながら，揚水開始直後の測定を含めてその後 1 時間に 1 回の割合で合計 7 回の電気伝導度の変化を測定する。この際の測定装置の昇降速度は既往の研究を参考に約 0.56m/s (=500m/15 分)とした。

今回は上記手順により、揚水流量を 10ℓ/min, 20ℓ/min, 5ℓ/min の順でそれぞれ変更し、測定を実施した。複数の揚水流量で測定することにより、透水性の小さい割れ目から大きい割れ目の抽出が可能となるとともに、各々の測定結果の整合性を確認することにより、精度の高い水理特性の評価が可能となる。測定に用いた電気伝導度検層のプロープの仕様は以下の通りである。

- ・ 測定項目： 電気伝導度, 温度
- ・ 電気伝導度測定範囲： 2-5000 $\mu\text{S/cm}$
- ・ 温度測定範囲： 0-60 $^{\circ}\text{C}$

4. 試験および解析結果

一例として揚水量 5ℓ/min での電気伝導度(FEC)の変化を図-4 に示す。一般的に地下水の流入箇所は電気伝導度に明瞭なピークとして現れる。図-4 の初期値(図中の initial で示した曲線)は揚水開始後 4~7 分経過後から測定を開始した結果であるが、深度約 300m 以深では揚水直後にもかかわらず、電気伝導度に大きな変化が見られる。同様の傾向は孔内水置換後の測定結果でも観測された。このことは自然状態において深度 300m 以深ではボーリング孔内で地下水の流入出があることを示唆する。

以下の手順で一次元の移流拡散方程式に基づく数値解析¹⁾により、得られた電気伝導度の分布変化を再現した。

- ① 電気伝導度の変化量の大きさに基づき孔内への地下水の流入点を抽出する。
- ② 数値解析のための入力条件として、各流入点における流入量の変化量の大きさに応じて流量を設定するとともに、全ての流入点に同じ塩分濃度(電気伝導度と NaCl の濃度との相関関係から算出)を与える。
- ③ 数値解析により実測の電気伝導度の分布にフィッティングするような塩分濃度と流量を計算する。

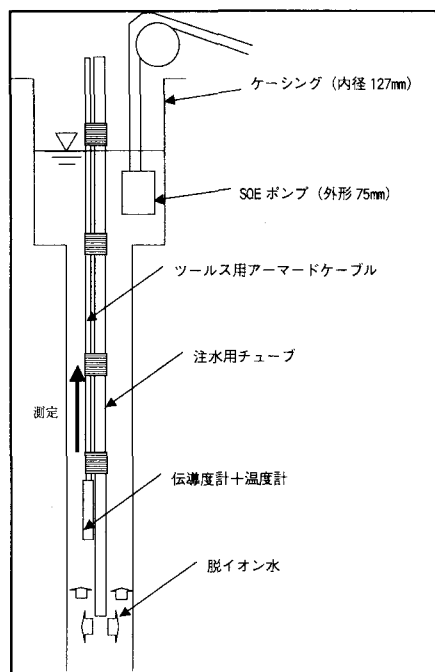


図-3 測定概念図

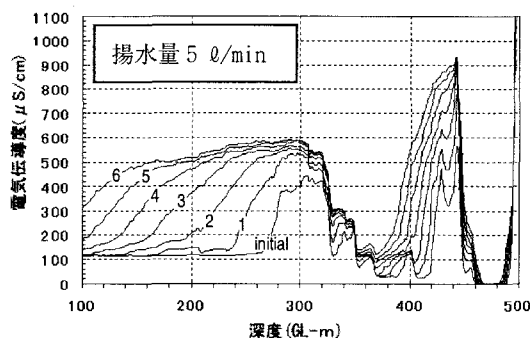


図-4 測定結果(20℃での温度補正後のプロット、図中の数字はデータ取得順位を示す)

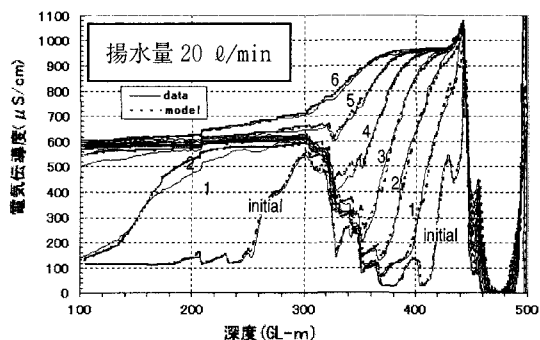


図-5 フィッティング結果(図中の数字はデータ取得順位を示す)

上記と同様の手順で他の揚水量における解析を実施した。その結果、5ℓ/min の揚水量では 14 箇所の地下水の流

入点が残りの揚水条件(10ℓ/min と 20ℓ/min)ではいずれも 19 箇所の流入点を抽出した。これらの流入点の多くは深度 200m～250m 付近に存在する低角度傾斜の割れ目集中帯と深度 300～350m, 430～460m 付近に存在が確認されている高角度の割れ目集中帯の中に存在することが判明した(図-2)。

20ℓ/min の揚水量における解析結果を図-5 に示す。これより解析結果は実測結果をよく再現していることが分かる。他の条件においてもフィッティングの結果は良好であった。

上述のように各々の条件での解析の結果、フィッティングの状況は良好であったが、各流入点の塩分濃度は揚水条件によって異なる値を示した(図-6)。本来、各流入点の塩分濃度の分布は、揚水量の違いによらず同一の値を示すべきである。そこで、異なる揚水量(50ℓ/min と 20ℓ/min)において各流入点の塩分濃度が同一となるようキャリブレーションを行ない、各点での流量を再計算した。ここで 10 ℓ/min の揚水時の結果を用いなかった理由は、これが最初の測定でありオペレータの不慣れなどにより、取得されたデータは 2 回目以降に比較して品質が劣っている可能性

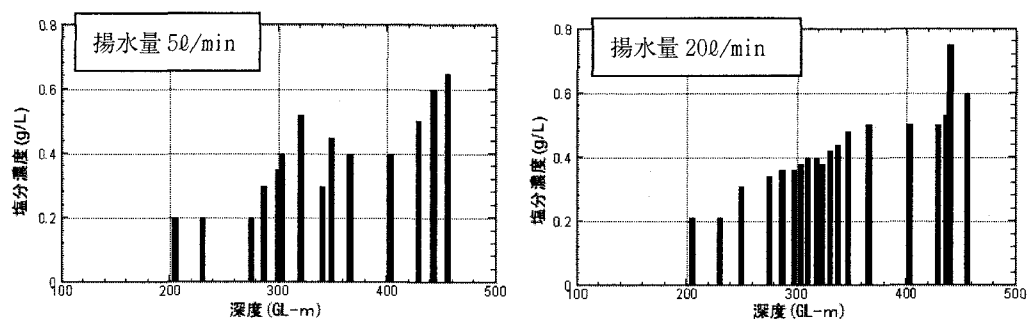


図-6 算出された塩分濃度分布

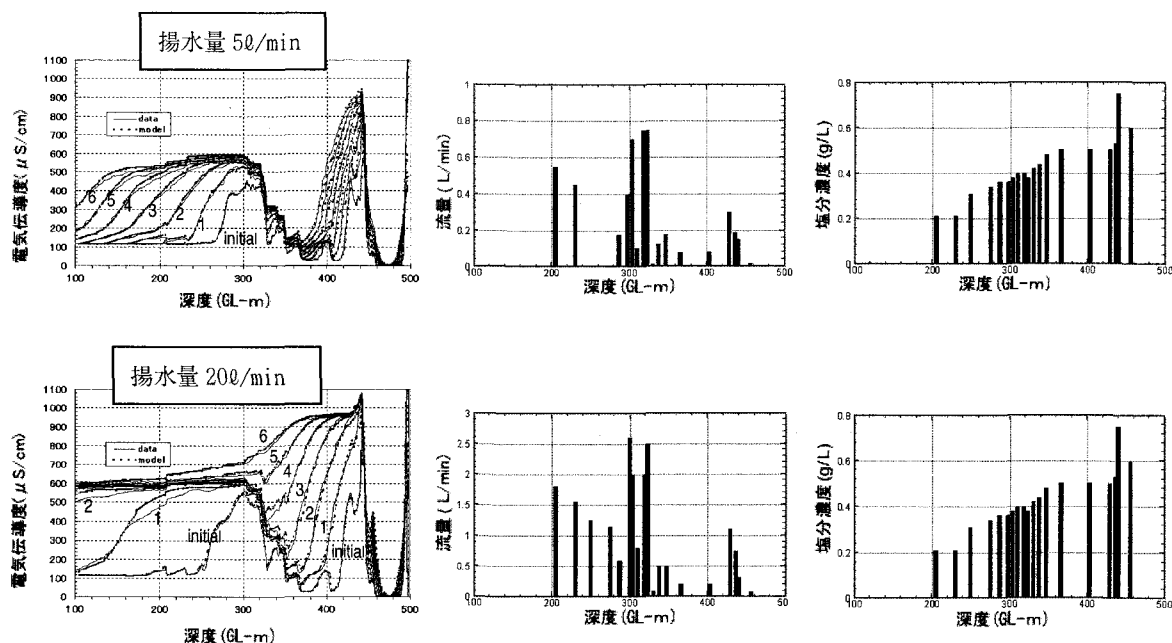


図-7 塩分濃度の分布を同一とした場合の解析結果

が考えられたためである。解析の結果、図-7 に示すように両揚水量の電気伝導度分布の解析結果は実測結果をよく再現するとともに、それぞれの揚水量における各流入点の流量が計算された。

図-7に示した解析により算出された2つの揚水条件での各流入点における流量の変化量を用いて、ダルシー則に基づく軸対象定常流を仮定した理論により、ボーリング孔の平均的な透水量係数(全孔での透水量係数を流入点の数で除した値: T_{avg})と個々の流入箇所(T_i)の透水量係数(T_i)の比(T_i/T_{avg})と間隙水圧に関する比($(P_i - P_{wb})/(P_{avg} - P_{wb})$)が計算される¹⁾。ここで P_i は個々の流入点における間隙水圧、 P_{wb} は定流量揚水時のボーリング孔の水位低下量、 P_{avg} は透水量係数を指標とした間隙水圧の重み付き平均($= \sum T_i P_i / T_{tot}$; T_{tot} はボーリング孔全体の透水量係数)である。ここでは広い範囲の流入量をカバーし、かつ試験データの品質が比較的良好と考えられる 50/min と 200/min の結果を用いた。各々の流入箇所における T_i/T_{avg} の値を図-8(a)に、 $(P_i - P_{wb})/(P_{avg} - P_{wb})$ の値を図-8(b)に示す。

図-8(a)から 200~250m 付近および 300~350m 付近で平均よりも高い透水性を有する割れ目が存在することが分かる。また図-8(b)からは深部の割れ目ほど高い間隙水圧を有していることが分かる。さらに本孔で別途実施した自然状態におけるヒートパルスフローメータの結果から、深度約 300m 以深から流入した地下水が深度約 200m の割れ目に流出する様子が観測されている。したがって自然状態では深部から浅部に向かう上昇流が存在することが推測される。このことは、図-4に示した電気伝導度の初期値が深度約 300m 以深で大きく変化することと整合している。

解析の結果算出された各流入点における塩分濃度を、次式を用いて電気伝導度に換算したものを図-9に示す。

$$FEC = 1,870C - 40C^2$$

ここで FEC は電気伝導度、 C は塩分濃度で、 $NaCl$

の濃度と電気伝導度との相関関係から求めたものである⁴⁾。図-9より深部の割れ目ほど高い電気伝導度(塩分濃度)を有する傾向があることが分かる。

5. 結果の考察

(1) 解析結果に基づく透水性の評価

数値解析結果に基づいて算出された透水量係数の妥当性を評価するために、本孔で別途実施した水理試験結果と比較した(図-10)。図-10の縦軸は個々の区間(数値解析結果においては抽出された流入点)における透水量係数(区間透水量係数)を全透水量係数で除した値である。原位置での水理試験は今回抽出された流入点を含む区間を主な対象として実施した短区間の試験とボーリング孔全体の透水性を把握するための長区間の試験結果である。これより、同じ深度における短区間の水理試験結果と解析結果を比較すると、いずれも約 10% 以内の範囲に収束していることが分かる。ここで解析結果における全透水量係数は、揚水量と水位低下量の関係から算出される値である。一方、

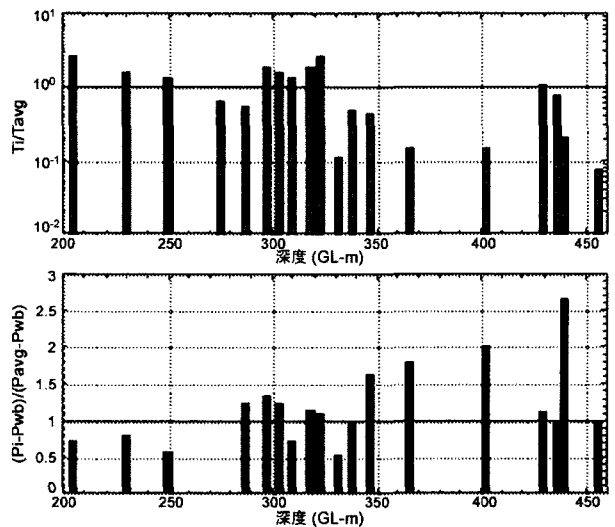


図-8 抽出された流入点における T_i/T_{avg} :(a) と $(P_i - P_{wb})/(P_{avg} - P_{wb})$:(b)

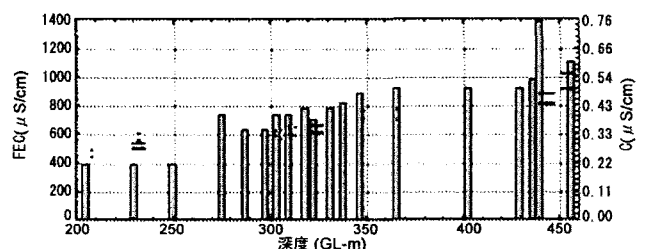


図-9 抽出された流入点における電気伝導度(左軸)と塩分濃度(右軸)

原位置水理試験結果における全透水量係数は長区間の水理試験結果の総和を用いた。両者は概ね同値($T \approx 5E-4m^2/s$)であることを確認しており、今回実施した電気伝導度検層に基づく透水量係数の算定結果は妥当な値であると判断される。

(2) 解析結果に基づく電気伝導度の評価

図-9には今回の解析結果に基づく電気伝導度の算出結果と同時に、原位置での水理試験中に採水した地下水の電気伝導度の値(20℃における温度補正の前と後)をプロットした(図中の短い横棒)。この結果から解析結果は実測値とよく一致していることが分かる。ここで深部で実測値が解析値よりも低い電気伝導度を示していることについては、解析結果が個々の流入点の電気伝導度を示しているのに対して、

実測値は試験区間長の設定の限界から、個々の割れ目の地下水の採水は不可能であり、異なる電気伝導度を有する複数の割れ目の地下水の平均的な値を示しているためと解釈できる。

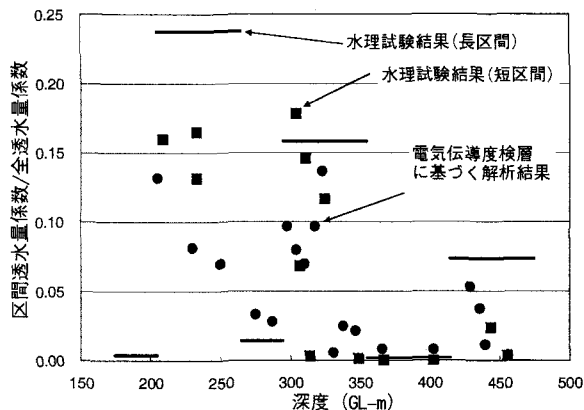


図-10 原位置水理試験結果と電気伝導度検層に基づく解析結果による透水性の比較

6. まとめ

今回深度約 500m のボーリング孔において、電気伝導度検層を実施し、数値解析により実測値の電気伝導度分布の変化を再現し、これに基づいて水理特性を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 電気伝導度の変化量の大きい箇所の特定制により、分解能の高い水みちの抽出が可能であることが分かった。
- (2) 数値解析から得られた水みちの透水性や間隙水圧ならびに電気伝導度は、別途実施した水理試験や地下水の分析結果とよく一致した。

以上のことから、本手法が地下深部を対象とした詳細な水みちの抽出ならびに水理特性の把握に有効な手法であることが確認された。

参考文献

- 1) Christine Doughty and Chin-Fu Tsang: Inflow and outflow signatures in flowing wellbore electrical-conductivity logs, rep. LBNL-51468, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2002
- 2) Chin-Fu Tsang, Peter Hufschmied and Frank V. Hale: Determination of Fracture Inflow parameters with a Borehole Fluid Conductivity Logging Method, Water Resources Research, vol.26, No.4, pp.561-578, 1990
- 3) Martin Mazurek: Geology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland and Derivation of Geological Input Data for Safety Assessment Models, Nagra NTB93-12, 1998
- 4) Hale, F.V. and Chin-Fu Tsang: A code to compute borehole conductivity profiles from multiple feed points, rep. LBNL-24928, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 1988