

フローメータ検層による花崗岩中の透水性割れ目の把握

尾方 伸久 小出 肇 竹市 篤史

東濃地科学センター

資料番号: 103-8

Investigated Conductive Fracture in the Granitic Rocks
by Flow-meter Logging

Nobuhisa OGATA Kaoru KOIDE Atsushi TAKEICHI
Tono Geoscience Center

地下水流動を把握するためには、地下水の流動経路や遮水壁の役割を果たすと考えられる地質構造の透水性を把握する技術の確立が重要となる。本研究は、岐阜県東濃鉱山周辺に掘削された試錐孔で実施したフローメータ検層結果を用いて、透水性割れ目の検出と、その透水係数を算出した。

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) フローメータ検層によって地下水の流入出が認められた部分の透水係数を算出した結果、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) オーダーの透水性を示し、同深度区間の原位置透水試験の測定結果と一致した。
- (2) 試錐孔内において、主要な透水性割れ目帯の分布の把握とその透水係数の算出には、フローメータ検層を用いた調査が有効であることが確認できた。

Test of the use of a measurement technique for the hydraulic conductivity of geological structures which act as flow paths or are impermeable to groundwater flow.

In order to prove the value of flow-meter logging as an in-situ technique for detecting conductive fractures in granitic rocks, the method has been applied to a borehole near the Tono uranium mine, Gifu, Japan.

This study is involved with detecting a conductive fracture and calculating the hydraulic conductivities. The results were as follows:

- (1) *In a zone of groundwater inflow into the borehole, the hydraulic conductivity was calculated to be of the order of the $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) from flow-meter logging.*
This value agreed with the results of a in-situ borehole permeability test carried out with a similar depth interval.
- (2) *The study showed that flow-meter logging is effective for detecting the distribution of high conductivity fractures and calculating the hydraulic conductivity.*

キーワード

フローメータ検層、透水性割れ目、花崗岩、透水係数

Flow-meter Logging, Conductive Fracture, Granitic Rock, Hydraulic Conductivity

1. はじめに

動燃事業団では、地質環境が本来有している地質学的、水理学的、地球化学的性質の把握を目的とした地層科学研究を行っている。この地層科学研究の一環として、地下水の流動と地球化学的性質の把握および、これに必要な調査・解析技術の開発を目的とした広域地下水流動研究を進めている。地下深部における地下水の流動を把握し、水

理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施するためには、断層・破砕帯等の地下水の流動経路や遮水壁の役割を果たすと考えられる地質構造の透水性等の水理学的性質の把握と、これを調査する技術の開発が重要となる。

試錐孔内において地下水の透水構造を把握する手法の一つとして、地下水の流入・流出箇所の深度と流体の量が測定可能なフローメータ検層があ

る。フローメータ検層は、石油資源開発等で用いられている手法であり、試錐孔内において深度方向に連続的に透水部分（割れ目帯）の深度が決定できるが、比較的大きな透水性を有する割れ目しか識別できない欠点がある。しかし、バッカー式の水理試験機を用いてフローメータ検層と同様の連続的な測定を実施するには、多大な測定時間と経費がかかる。また、破砕帯等の発達する部分で、バッカー式の水理試験機が使用できない岩盤の透水性を評価できる等の長所も有する。

フローメータ検層で得られる試錐孔内における流速は、割れ目の発達する箇所、地下水の流入出が生じている部分で主に变化する。この変化点を把握することで、試錐孔内における比較的大きな透水部分を確認でき、試錐孔を異なる水理特性の場として分割できる。この分割結果は、水理地質構造モデルへの反映および水圧等の長期観測を行う際のバッカー（試錐孔内で空圧もしくは水圧

で拡張する遮水装置）区間の設定等にも利用可能である。

本報告では、岐阜県土岐市の東濃鉱山周辺の花崗岩中に掘削された深度500mの試錐孔（DH-4号孔）でフローメータ検層を実施し、透水性割れ目の検出とその透水係数を算出したので、その結果について報告する。

2. フローメータ検層による透水性割れ目の把握

2.1 地質概要

試錐孔掘削地点周辺の地質状況は、嶺家帯の苗木・上松型花崗岩を基盤とし、新第三紀中新世の瑞浪層群、鮮新世の瀬戸層群ならびに沖積層が被覆している。調査を実施した試錐孔の地質は、試錐孔が丘陵部に位置することから瑞浪層群が欠如し、瀬戸層群の下部には基盤の花崗岩（細粒から中粒の黒雲母花崗岩）が分布する（図1）。

岩盤中には、試錐孔の全区間にわたって割れ目

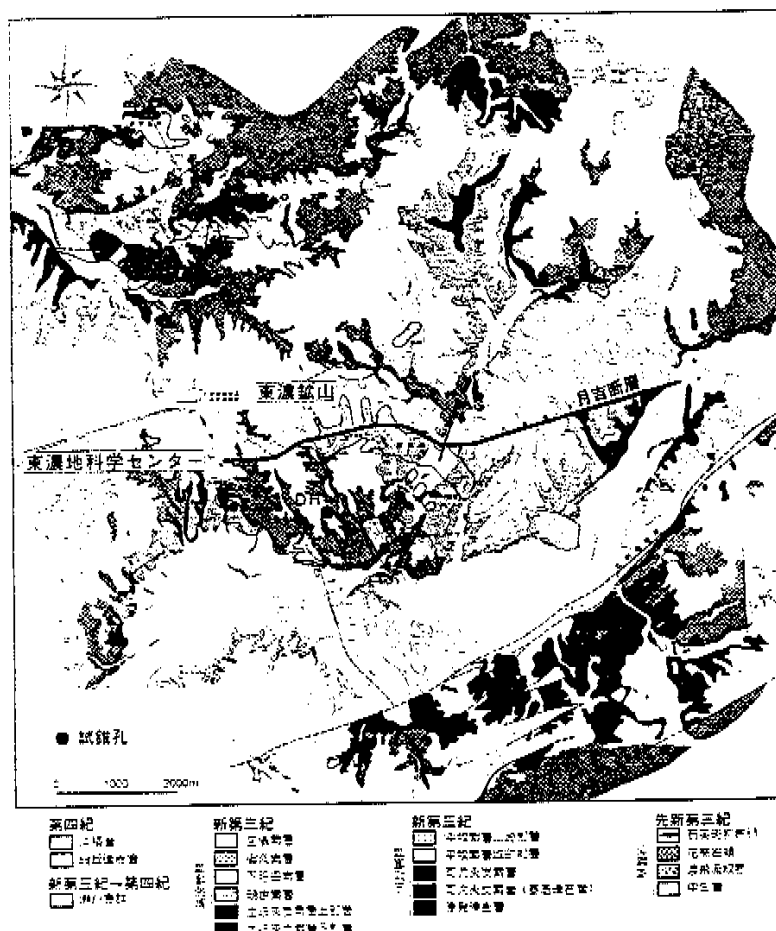


図1 試錐孔位置と地質概要

がよく発達しており、割れ目帯は、割れ目が集中する区間と比較的割れ目の少ない区間が交互に分布する傾向が認められる。

また、岩盤等級区分（電中研方式：岩盤の風化、変質および割れ目の発達状況の観察結果、ハンマー等の打診音から判断する方法）では、全体としてB～C_H級の岩盤で、割れ目集中部、破碎部でC_L～D級を示す。試錐孔浅部では、割れ目に沿った鉱化変質帯が発達し（深度60m～142.6m）、花崗岩母岩との境界部では褐色のバンドが生じている。

2.2 測定手法

フローメータ検層は、プローブの先端にインペラー（プロペラ）が取り付けられており、ケーブル装置で試錐孔内を上下させ、試錐孔内の上昇流、下降流をインペラーの回転数として測定し（図2）、同時に記録するケーブルの速度から補正して流体速度を算出する。

試錐孔で実施した測定は、花崗岩等の結晶質岩盤中での地下水の流動は一般的に小さいと考えられているため、試錐孔内の流体状況を変化させな

い自然状態での測定では、地下水の流入出部の把握が困難となることも考えられた。そのため、強制的に試錐孔内の流体状況を変化させた注水状態の測定も含めた3通りの水理条件を設定し、プローブの降下時および上昇時の2回をそれぞれ実施した。

- ① 自然状態（無注水）
- ② 注水状態（39ℓ/min）
- ③ 注水状態（130ℓ/min）

また、注水状態の測定では、試錐孔の孔口に、リューブリケータ（試錐孔内を加圧した状態でケーブルを用いた連続測定を行うことができる装置）を取り付け、加圧注水状態で常に水位が試錐孔の孔口に位置するように注水を行いながら測定を行った。

2.3 測定結果

フローメータ検層の結果、自然状態では顕著な流速差は認められなかった。しかし、注水状態では、流速差（インペラー回転数の変化）が認められる箇所が188m、254m、346mで確認された。図3に130（ℓ/min）注水状態での結果を示す。

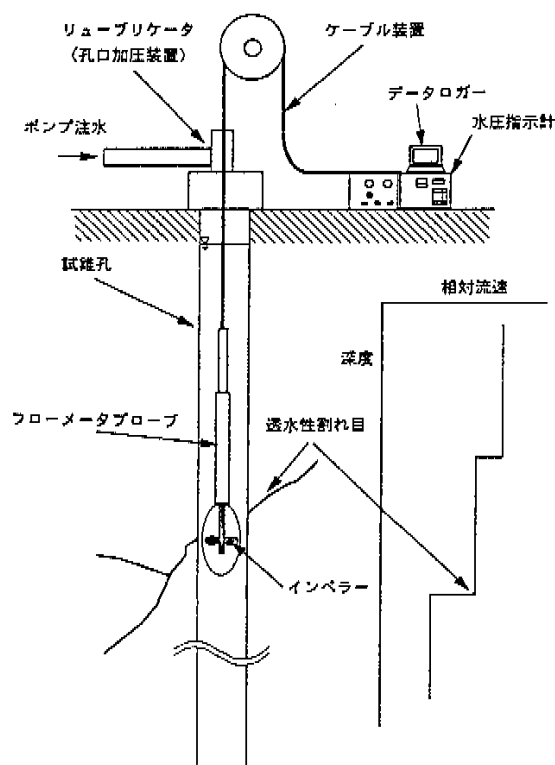


図2 フローメータ検層概念図

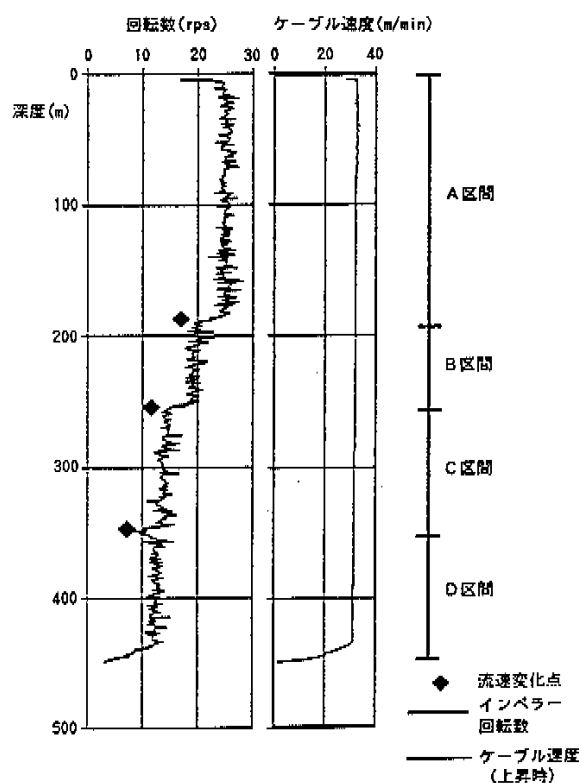


図3 フローメータ検層変化図（130ℓ/min 注水時）

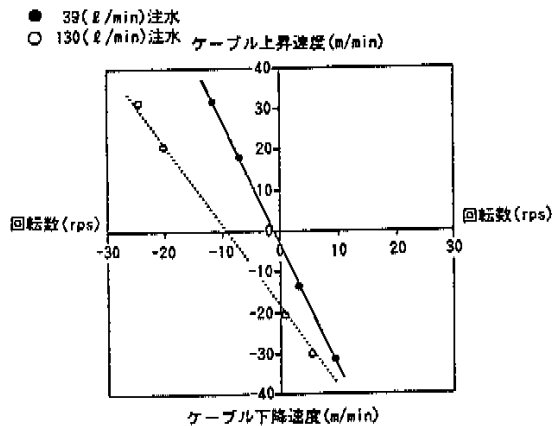


図4 フローメータ解析図（深度65～190m区間）

この変化部は、本試錐孔で実施したボアホールテレビ観察によって確認された割れ目集中部とも一致した。測定結果から、試錐孔は4つの区間（A区間65.0m～190.0m、B区間190.0m～255.0m、C区間255.0m～346.0m、D区間346.0m～435.0m）に分類できる。

次に、インペラーの回転数から、流体の見掛け速度を算出するため、図4に示すようにプロープ上昇時、下降時のデータを流速差が認められた各区間毎にプロットし、そのスロープ特性（(1)式）をもとめ、切片から流体の見掛け速度（(2)式）を算出した。なお、孔径検層の結果から、試錐孔の孔径が拡大した部分でインペラーの回転数の変化が孔内流体の流入出によるものか、孔径拡大による乱流の影響によるものが判別できなかった深度207.5m～212.5m、深度322.5m～330.0m、深度345.0m～355.0mのデータは除いた。

$$S = \frac{(n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (1)$$

S：スロープ特性 (m/min/rps)

Y：検層ケーブル速度 (m/min)

X：インペラー回転数 (rps)

スロープの切片が流体の見掛け速度 (Va) を示すことから、見掛け速度は次式で算出できる。

$$Va = \frac{\sum Y - m \sum X}{n} \quad (2)$$

Va：流体の見掛け速度 (m/min)

n：測定点の合計

フローメータ検層から算出される流体の見掛け

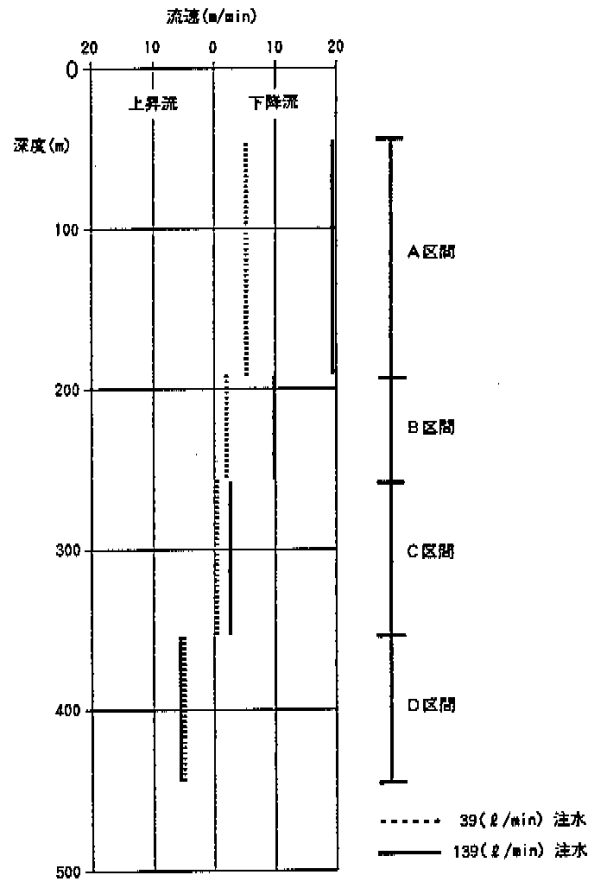


図5 流体速度変化図

速度 (Va) は、試錐孔径の中心部における流体の見掛け速度を表す。図5に(2)式より算出した各区間毎の流体の見掛け速度を示す。前述のように、注水流量が39l/min、130l/minともに、試錐孔上部の流体の見掛け速度が、注水の影響を受けて大きく変化しているが、上下の区間で流速差が認められる箇所（試錐孔壁での流入出部）での変化は、39l/min、130l/minともに同様である。また、深度345m以深で上昇流となっているのは、若干の湧水状態を示す。次に、各流速の異なる部分での流体速度の減衰率を各区間上下の流速差から算出した結果（130l/min注水時）を表1に示す。

3. 透水性割れ目の透水係数の算出

ボアホールテレビ観察結果を用いて、流速に差が見られた箇所の詳細観察を行った結果、割れ目が認められることから、これらの割れ目が透水性割れ目帯となっていることが推定される。この透水性割れ目帯の透水係数を算定するにあたって

表1 フローメータ検層から算出した孔内流速
(1302/min 注水測定時)

	深 度	流速 (m/min)	減 衰 率
A 区間	65.0~190.0m	19.3 (下降流)	51%
B 区間	190.0~255.0m	9.4 (下降流)	41%
C 区間	255.0~346.0m	1.0 (下降流)	8%
D 区間	346.0~435.0m	湧水状態	

は、フローメータ検層が、主に石油資源開発、地熱資源開発の分野で開発された手法であることから、これらの分野で使用されている算出式に従った¹⁾。この算出式は、フローメータ検層時に同時測定される試錐孔内の圧力減衰を用いるもので、注水停止後のフォールオフ（試錐孔内の圧力低下）を測定し、浸透率・層厚積(kh)を算出する。

ここで、計算上の仮定としては、基本的な透水場モデル（以下、貯留層とする）は均質等方の多孔質媒体で、ある厚さのもとに無限に広がっており、流体は単相で試錐孔を中心に等温で広がっているとしている^{2)~4)}。この仮定は、石油、地熱、地下水の分野では一般的に用いられている仮定であり、後述する原位置透水試験の解析式の仮定も同様である。この仮定のもと、ある貯留層内の流体の圧力Pの時間に対する変化は、圧力についての拡散方程式（(3)式²⁾⁵⁾）からもとめられる。

$$P - P_0 = \frac{2.303 \times Q \times \mu}{4\pi \cdot kh}$$

$$\left[\log t + \log \frac{4k}{\phi \times \mu \times C \times r} - \frac{a}{2.303} \right] \quad (3)$$

P : 圧力 (Pa) ϕ : 孔隙率 (-)
 P_0 : 初期圧力 (Pa) C : 圧縮率 (Pa^{-1})
 Q : 注水量 (m^3/s) r : 孔井半径 (m)
 μ : 粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) a : オイラーの定数
 k : 浸透率 (m^2)
 h : 貯留層厚 (m)

(3)式を時間に対する対数でプロットすると直線の関係となり、その直線の傾きは、(4)式で示される。

$$m = \frac{2.303 \times Q \times \mu}{4\pi kh} \quad (4)$$

m : 圧力降下曲線の傾き (Pa/cycle)

この(4)式より、浸透率・層厚積(kh)がもとめられる。この式を適用するにあたっては、圧力降下曲線の傾き(m)をもとめる必要があることから

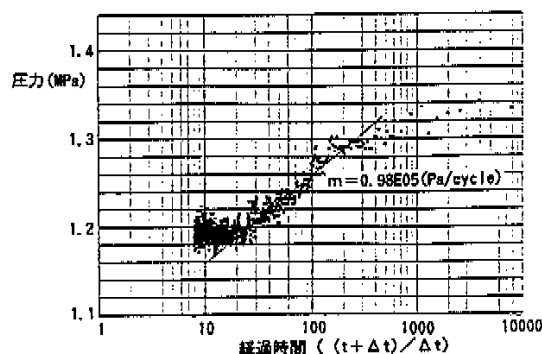


図6 フォールオフテストによる圧力計測結果

ら、フローメータ検層時に、試錐孔内への注水停止後からのフォールオフを測定した（図6）。図6からもとめた直線の傾き(m)は、 $m = 0.98 \times 10^5$ (Pa/cycle)となる。この値を(5)式に代入し、本試錐孔全体にわたる透水量係数(kh/ μ)をもとめた。

$$\begin{aligned} kh/\mu &= \frac{2.303 \times 6.5 \times 10^{-4}}{4\pi m} \\ &= 1.22 \times 10^{-9} (\text{m}^3/\text{Pa} \cdot \text{s}) \end{aligned} \quad (5)$$

次に、フローメータ検層で得られた各流入出部の透水係数(K (cm/sec))を算出するため、浸透率・層厚積(kh (m^2))、水の粘性係数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)から、フローメータ検層で確認した流入出部の厚さ(L (cm))における透水係数(K)を次式から計算した。

$$KL \times 10^{-8} = kh/\mu \quad (6)$$

$$K = \frac{kh}{\mu \times L \times 10^{-8}} \quad (7)$$

(7)式に、(5)式の透水量係数(kh/ μ)を代入すると(8)式となる。

$$K = \frac{1.22 \times 10^{-9}}{L \times 10^{-8}} \quad (8)$$

透水係数(K)をもとめるためには、流入出部の厚さ(L)を決定する必要がある。流入出部の厚さ(L)については、花崗岩等の結晶質岩盤の透水性に関与するのは主に割れ目と考えられることから、図3に示すフローメータ検層図で、流速差が認められた箇所、深度約188m、254m、346mに対応するボアホールテレビ観察結果から、割れ目集中帯を抽出し、ボアホールテレビ画像から判読できる開口割れ目の最大開口幅を抽出し、その区間における開口割れ目幅を決定した（図7）。

深度188m部は、ボアホールテレビ観察によっ

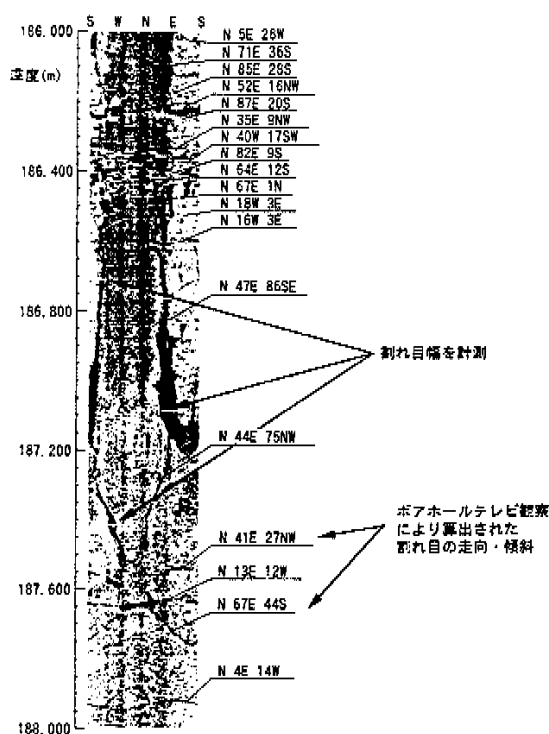


図7 ボアホールテレビ観測結果による開口割れ目幅の算出

で確認された深度186.0m～189.0mの割れ目帯に相当し、その開口割れ目幅の合計は、約16cmになる。同様に、深度254m部は、250.0m～255.0m、深度346m部は、345.0m～347.0mの割れ目帯に相当し、開口割れ目幅の合計は、それぞれ約30cm、約5cmとなる。

これらの、開口割れ目幅の合計を流入出部の厚さ(L)として(8)式に代入し、本試錐孔における地下水の流入出部全体の透水係数を算出した。

次に、各流入出部における透水係数を個別に算出するため、表1に示した各流入出部の流速の減衰率を流入出部全体の透水係数に乗じて各流入出部における透水係数(cm/sec)を算出した。

算出した透水係数を表2に示す。

表2 フローメータ検層から算出した透水係数 (130ℓ/min 注水測定時)

	深 度	減衰率	透水係数 (cm/sec)
A 区間	65.0～190.0m	51%	1.2×10^{-3}
B 区間	190.0～255.0m	41%	1.0×10^{-3}
C 区間	255.0～346.0m	8%	1.9×10^{-4}
D 区間	346.0～435.0m		

表3 原位置透水試験によって得られた透水係数

測定深度	透水係数 (cm/sec)
185.5～188.5m	1.1×10^{-3}
189.0～197.0m	6.3×10^{-4}
345.0～353.0m	4.3×10^{-7}
378.5～381.5m	2.3×10^{-8}

4. 原位置透水試験結果との比較

これまでに算出した透水係数について、本試錐孔で実施した原位置透水試験結果との比較を行った。原位置透水試験は、パッカー式の水利試験機である、動燃式低水圧制御水利試験装置(以下、JFT500とする)を用いて行った。このJFT500は、難透水性岩盤の透水係数(測定限界 10^{-9} (cm/sec)オーダー)をパルス法を用いて、高精度に測定するために開発された装置で、ダブルパッカー、シングルパッカー方式のいずれの方式でも計測区間の設定が可能である⁶⁾。JFT500による測定結果を表3に示す。原位置透水試験の結果では、割れ目が測定区間中に卓越する場合は 10^{-4} (cm/sec)オーダーの透水性を示し、比較的割れ目が少ない測定区間では、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (cm/sec)オーダーの透水性を示す。ここで、割れ目が卓越する測定区間は、フローメータ検層によって確認された流入出部付近に相当し、フローメータ検層により確認された地下水の流入出部の透水係数である $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (cm/sec)オーダーの値とはほぼ一致する。割れ目の少ない測定区間の透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (cm/sec)オーダーと小さいことから、フローメータ検層によって確認された透水性割れ目帯は、割れ目の少ない部分に比較して、かなり大きな透水係数を有する割れ目帯であることが分かった。

試錐孔内において主要な透水性割れ目帯の分布は、フローメータ検層によって流速の変化部を計測することによって把握可能であること、および試錐孔内でのフォールオフを計測し、開口割れ目幅を求めることから、原位置透水試験による透水係数ほどの精度は持たないものの、透水性割れ目の透水係数が算出可能であることが確認できた。また、原位置の透水試験により得られる透水係数も、主に試験区間内に存在する透水性割れ目がその透水係数を決定していると考えられる。

5. おわりに

本研究によって、以下の知見が得られた。

- (1) 花崗岩等の結晶質岩盤中に掘削された試錐孔においては、その地下水の流入出は主に透水性割

れ目および割れ目帯に規制されていることが今回の調査研究で明らかとなった。

(2) フローメータ検層によって地下水の流入出が認められた部分の透水係数を算出した結果、 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) オーダーの透水性を示し、ほぼ同様の深度区間で測定された原位置透水試験の測定結果と一致した。また、割れ目の少ない区間の原位置透水試験結果は、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (cm/sec) オーダーと小さな値を示すことから、フローメータ検層によって確認された透水性割れ目帯は、割れ目の少ない部分に比較して、4桁ほど大きな透水係数を有する割れ目帯であることが分かった。

(3) 試錐孔内において主要な透水性割れ目帯の分布の把握と、その透水係数の算出には、フローメータ検層を用いた調査が有効であることが確認できた。

今後は、注水流量の制御等の測定精度の向上と、透水性割れ目の検出精度の向上を図る。また、現在掘削されている試錐孔の深度は500mまでで

あるが、今後掘削される深度1,000m級試錐孔での測定を行い、より深部での適用性を把握する。

また、比較的、試錐孔間距離の短い試錐孔においてフローメータ検層を実施し、透水性割れ目帯の連続性の評価を実施する予定である。

参考文献

- 1) 花野峰行, 梶原竜哉, 他: "地熱資源の開発における地下き裂の意義とその事例", 地下水学会誌, 第36巻, 第2号, p.133~146, (1994).
- 2) 石戸経上: "地熱井における圧力遷移テスト", 地熱エネルギー, Vol.10, No.4, p.15, (1985).
- 3) Theis, C. V.: "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage", *Trans American Geophysical Union*, Vol.16, p.519~524, (1935).
- 4) 西垣誠: "Theis, 野満による揚水試験結果の解析理論とその仮定", 地下水と井戸とポンプ, 第29巻, 第5号, p.1~6, (1987).
- 5) Lee, J.: "Well Testing", *Society of Petroleum Engineers*, p159, (1982).
- 6) 柳澤孝一, 斎藤章, 他: "新しい現場透水試験法(動態式JT)の開発と測定例", 土と基礎, 第37巻, 第7号, p.47~52, (1989).