

孔内流速検層装置（フローメータ検層）による多層帯水層の透水性評価

Evaluation of Hydraulic Conductivity of Multilayered Aquifer by Flowmeter Logging in Observation Well

西垣 誠	Makoto NISHIGAKI	(岡山大学大学院)
柴田 卓詞	Takuji SHIBATA	((株)環境総合テクノス)
加藤 裕将	Hiromasa KATO	((株)環境総合テクノス)
平田 洋一	Yoichi HIRATA	((株)アースライズカンパニー)

再生可能エネルギーの利用が進む中、近年地下水の熱利用に注目が集まっている。地下水を有効利用するためには、帯水層のポテンシャルを事前に把握しておくことが重要となる。地盤の帯水層の水力ファクターを効率良く求める手法としてフローメータ検層がある。フローメータ検層は本来岩盤の透水性割れ目の水力ファクターの同定手法として開発されたものであるが、これを利用して未固結層の帯水層の水力ファクターを求める手法に適用した。1本の観測孔で複数の帯水層の水力ファクターを求めることができるのは経済的である。開発した装置の名称は「観測井内流速検層装置」とした。ここでは複数の帯水層の浸透特性である透水係数と、自然水位を1本の観測井内でのフローメータ検層で求める方法を提案し、その手法の妥当性を実際の現場での試験によって検証した。

キーワード：地中熱利用, 地下水調査, 透水係数, 自然水位, フローメータ, 地下水検層 (IGC : B02,C07,E07)

1. はじめに

我が国では、あらゆる分野での省エネルギーとエネルギーの有効利用を推進するとともに、再生可能エネルギーの導入が今後のエネルギー利用の柱の一つとして注目を集めている。その中の地中熱を利用したヒートポンプ自体は、確立された技術であり、「太陽光や風力と異なり天候や地域に左右されない安定性」、「空気熱利用と異なり大気中に排熱を出さない」、「省エネルギーでCO₂の排出量を削減できる」等のメリットを有していることから、一層の普及促進が期待されている。しかしながら、過去に地下水の過剰な汲み上げによる地盤沈下が発生したことを受け、建築物用地下水の採取の規制に関する法律等で現在でも地下水の取水規制が続いていることもあり、地中熱利用は進んでいない。したがって、地中熱利用の促進に当たっては、地下水を汲み上げた場合に地下水位が低下しないよう監視する必要があるとともに、地下水を利用する帯水層の透水性を的確に把握する必要がある。

地盤の透水性を評価する手法としては、ボーリング孔で実施する現場透水試験や井戸での揚水試験が挙げられる。地質調査のボーリング孔を利用した透水試験では、ボーリング孔先端部周辺の局所的な地盤の透水性を評価できるが、帯水層が厚い場合にはこの試験では有効長さが短いので帯水層全体の透水性を評価することは難しい。また、連続する複数の帯水層の評価が必要な場合、各地点で試験を実施する必要があり、孔内洗浄や段取り替えなどの手間が発生する。

複数帯水層の透水性をなるべく安価で連続的に把握できれば、帯水層の物理特性、透水性などを把握することで地下水の有効活用に寄与できると考えられ、地中熱開発時のリスク低減につながるものとして期待されることから、堆積地盤用のフローメ

ータ検層として、「孔内流速検層装置」を開発した。「孔内流速検層装置」は専用の観測井戸とフローメータ検層装置よりなる。本論文では、提案する手法の妥当性を検証するために、実際に大阪市内の多層帯水層に対して観測井内流速検層を実施し、その手法の有効性を論述する。

2. 多層地盤の帯水層の浸透特性の求め方

地中熱の有効利用を検討する際には地盤を構成する各帯水層の浸透特性を求める必要がある。一般にこの浸透特性を求める手法としては、現場透水試験や揚水試験がある。

2.1 現場透水試験法

現場透水試験には以下の3つの方法がある。

- (a) パッカー式透水試験法
- (b) ピエゾメーター法
- (c) オーガー法

このうちパッカー式透水試験法は岩盤を対象としているので、未固結地盤には対応できない。また、オーガー法は比較的浅い不圧帯水層を対象とするのでやはり適応できない。従ってここではピエゾメーター法が適応される。

現場透水試験は地盤調査の一環としてボーリング孔で実施されるため、深度方向の複数の深さで透水係数が求められる利点がある。しかし、透水性のよい地層では試験区間を維持するのは難しく、孔壁は崩壊する。これを回避するために試験区間に多孔管を打設する手法が用いられるが、玉石の混じったような硬質の砂礫層では、打設そのものが難しい。すなわち、通常的地盤調査の一環では高透水性地盤の透水係数を測定するのは極

めて困難であるといえる。

単孔式の透水試験方法には定常法と非定常法の2つがある。定常法は試験孔内の水位を揚水して対象地盤の自然水位より低くして、この時の水位と揚水流量から透水係数を求める手法である。一方非定常法は試験孔内の水位を一時的に数メートル低下させ、その後の水位の回復速度から透水係数を算出する。しかし、非定常法は透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以上の帯水層では水位回復が数秒で終わってしまうため、正確な透水係数を求めることは困難である。

従って透水係数が大きな帯水層での透水試験は定常法が有効とされている。しかし、地盤調査の一環として行われる定常法にも問題点があり、例えば掘削孔径に合った、必要とされる流量を確保できる細いポンプが一般的でないこと等である。

2.2 揚水試験法

透水性の良い帯水層に対して透水係数を求める試験として、複数の観測井を有する多孔式揚水試験は極めて有効な試験法である。しかし、試験設備が大掛かりで試験のコストや時間がかかる。また、帯水層が複数存在する場合、それぞれの層毎に試験を実施することになるが、その場合揚水孔も観測孔もそれぞれの層毎に別途設置しなければならない。

このように、複数の帯水層に対しては、揚水試験法は大掛かりで極めて不経済な試験となる。

3. フローメータ検層

ここでは、これらの試験法より経済的に優れ、且つ短期間で多層地盤での各帯水層の浸透特性を計測する、孔内流速検層装置を用いる手法を提案する。

フローメータ検層は海外ではボーリング孔を使用した地下水流動測定の新技術であり、わが国で独自に発達した水平方向の流れを計る地下水流速流向計もそのなかに含まれる²⁾。しかしここでは孔の鉛直方向の流れを計る検層に限定する。

フローメータ検層は本来岩盤を対象として発達した技術であり^{3) 4) 5)}、これまでの研究、実績は石油資源、放射性廃棄物処分等の分野で多く用いられてきた^{6) 7)}。あるいは地すべり調査におけるスベリ面の把握に用いられた報告もある⁸⁾。

フローメータ検層という名称はわが国では余り用いられず、例えば地下水検層、スピナー検層などと呼ばれるのが一般的である。しかし、それは測定方式の呼称であり、基本的原理に違いはない。スピナー検層は孔内に設置したプロペラの回転を計って地下水の流動を測定するものであり、地下水検層は孔内に投入した塩水の希釈速度（地下水の電気電導度）から同じく地下水の流動を測定するものである。更に最近では塩水ではなく、ヒーターによる温度を指標とした方法も報告されている⁹⁾。

始めに孔内流速検層装置について説明する。装置の全体は概ね図-1のような構成である。未固結の土砂地盤を対象とするため、スクリーンケーシングを有するところが大きな特徴である。

測定項目は基本的に流量とその時の深度の2つであり、図-1の流速計を内蔵するフローメータプローブと深度計を有するプ

ローブがそれに該当する。これらのデータはケーブルを介してリアルタイムでデータ収録PCに記録される。その他として流量制御のバルブや、地上での流量計等が含まれる。

揚水ポンプは揚程と想定される湧水量に見合ったものを選定するが、例えば透水試験に注入法と回復法があるように、付近で十分な水量が確保できるなら注水でも理論的には問題ない。しかし、注水は目詰まりの危険性があるので、極力避けるべきであると考えられる。

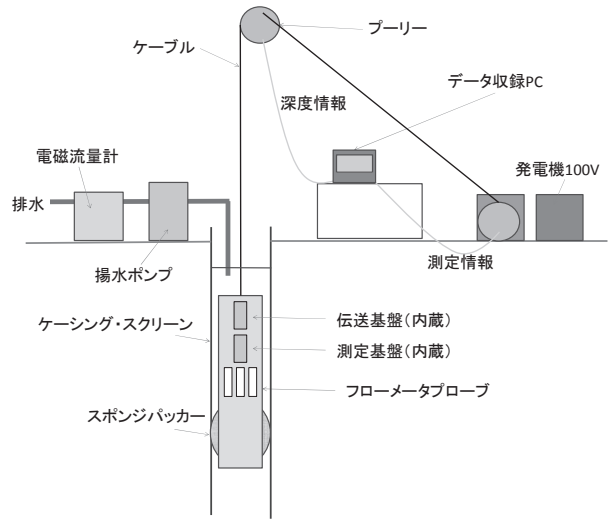


図-1 孔内流速検層装置

(1) フローメータの原理

図-1は、フローメータ検層装置の模式図であり、フローメータプローブ内の下部（図のスポンジパッカー部）に流速計が設置されている。検層は、

- ① 地上に設置した揚水ポンプによりボーリング孔内より揚水する
- ② ボーリング孔内の水位低下に伴い、岩盤の割れ目より井戸内に地下水が湧出する
- ③ 湧出した地下水の流速を、フローメータプローブ内の流速計で計測する
- ④ 計測した流速とプローブの断面積より湧出した地下水の流量を算定する

の手順により流量を算定する。

図-2に示す岩盤のように、3つの割れ目があり、F1とF3からは湧出があり、F2の割れ目は閉じていた場合を想定し、フローメータ検層装置を最下部から一定の速度で上昇させる。この時に、地表に設置した揚水ポンプは一定の量を揚水し、地下水位の低下量も一定とする。フローメータのスポンジパッカーがF3より下部にある間は、プローブ内を流れる地下水が無いことから流量はゼロである。スポンジパッカーがF1からF3にある間は、F3からの湧水量のみが計測され、結果としてF2が閉じていることが分かることになる。その後F1より上になるとF1とF3の合計の湧出量を計測できる、合計量からF3の湧出量を差し引くことでF1の湧出量を算定することが出来る。以上が岩盤の亀裂の水利ファクターを求める手法であり、今回この装置を帯水

層に適用し、帯水層の詳細な透水係数等の水理ファクターを測定することとした。

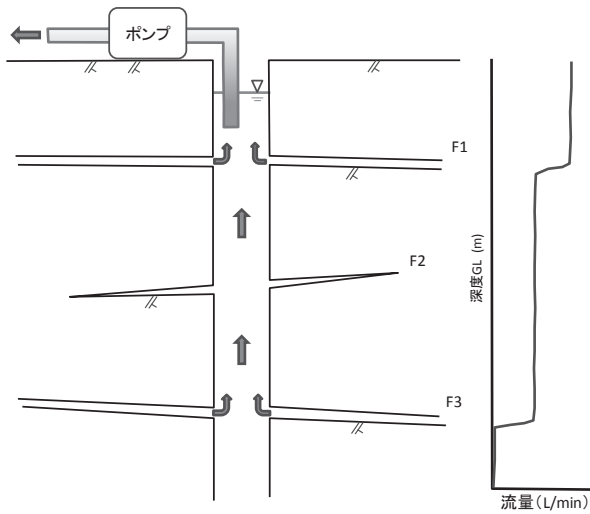


図-2 フローメータ原理説明図

(2) フローメータ検層より複数の帯水層の透水係数等を求める方法

フローメータ検層は本質的に定常流れを仮定するので、地盤工学会の土質調査法に示されている以下の定常法の現場透水試験の解析式が適用される。

$$k = \frac{Q}{2\pi bs} \ln(b/r) \quad (1)$$

あるいはこれを書き換えて

$$Q = \frac{2\pi bks}{\ln(b/r)} \quad (2)$$

ここに、

- Q: 揚水流量(m³/s),
- k: 透水係数 (m/s),
- b: 帯水層の層厚(m),
- s: 水位低下量(m),
- r: 揚水井の半径(m).

フローメータ検層では試験孔内に設置されたポンプで揚水し、孔内水位を s だけ低下させると、式(2)に示される湧水量が各帯水層から測定される。式(3)のパラメータにおいて、図-3 に示す i 番目の帯水層の層厚(b_i)は、フローメータ検層によってより確実に測定することができる。井戸半径(r)は初期の計画で決定される。各帯水層からの湧水流量(Q_i)はフローメータ試験結果より測定される。従って各帯水層の初期水位が分かれば式(1)より透水係数は求められる。

以下にフローメータ検層から自然水位（初期水位）を求める方法を示す。

図-3 のような観測井で揚水流量を変えて、その時の孔内水位を h_n とすると、帯水層 i からの流出流量(Q_{in})は次式により求められる。

$$Q_{in} = \frac{2\pi b_i k_i (H_i - h_n)}{\ln(b_i/r)} \quad (3)$$

ここに、

- Q_{in} : 帯水層 i からの流出流量,
- b_i : 帯水層 i の層厚,
- k_i : 帯水層 i の透水係数,
- H_i : 帯水層 i の自然水位,
- h_n : 観測井の n 番目の試験水位.

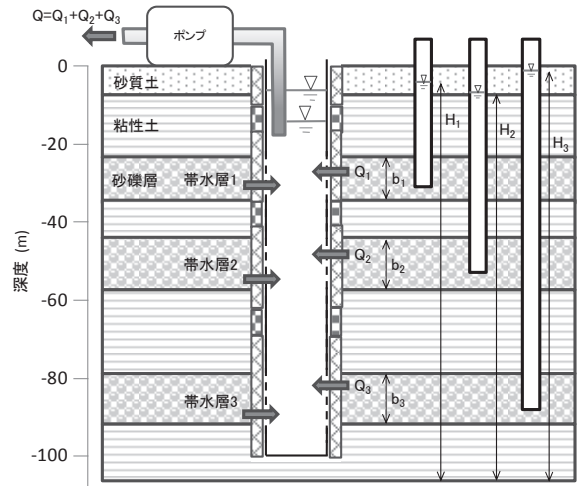


図-3 フローメータ検層による間隙水圧モデル

揚水流量を変えた時の各帯水層からの流出流量をそれぞれ Q_{i1}, Q_{i2} とし、式(3)を用いて比を求めると次式になる。

$$\frac{Q_{i2}}{Q_{i1}} = \frac{(H_i - h_2)}{(H_i - h_1)} \quad (4)$$

これより同様に2回の揚水流量を変更すると、i 番目の帯水層の自然水位は次式より求められる。

$$H_i = \frac{Q_{i2} h_1 - Q_{i1} h_2}{Q_{i2} - Q_{i1}} \quad (5)$$

なお、i 番目の帯水層の透水係数は次式で求められる。

$$k_i = \frac{(Q_{i2} - Q_{i1})}{2\pi b_i (h_1 - h_2)} \ln(b/r) \quad (6)$$

以上(5), (6)式でフローメータ検層から自然水位と透水係数を求める方法を示した。

4. 孔内流速検層装置

フローメータ検層は岩盤を対象としているので本質的に孔は崩壊せず、したがって裸孔である。それに対し未固結層、特に礫等の帯水層では裸孔では崩壊する。そのためスクリーンまたはケーシング等により井戸（観測井）を作成して、孔壁崩壊を防ぐ必要がある。この場合、帯水層の水理特性を極力損なうことなく観測井を設置しなければならない。つまり、孔内流速検層装置では観測井の作成も重要であり、装置の一部であると言える。

ここでは初めに観測井について述べる。観測井として必要な性能は次の2つである。

- ① 地盤の透水性を阻害しないような観測井構造とすること。
- ② フィルター部分での遮水が確実に帯水層間の地下水の移動が無いこと。

これに加えて、低コストで耐久性がよいことが基本条件として求められる。筆者らが大阪平野で実際に作成した井戸は図-4のような構造をしている。

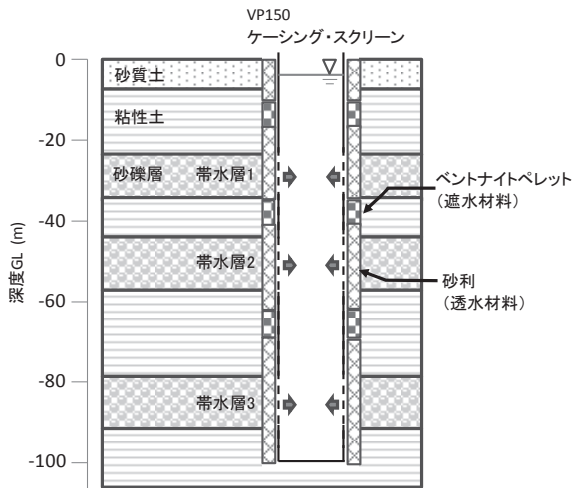


図-4 観測井構造図(大阪平野での事例)

大阪には高い透水性を持つ帯水層が存在することが知られているので、井戸抵抗を極力低減するために掘削孔径は $\phi 283\text{mm}$ としフィルター材は $\phi 5\text{mm}$ 程度の砂利を用いた。また、フィルター材を確実に設置するために、フィルター材の10倍程度のクリアランス確保を目標にVP150のケーシングとスクリーンを採用して片側50mm程度のクリアランスを確保した。スクリーンの開口率は10%とした。

帯水層間の遮水を目的とした充填剤は一般的にはベントナイトペレットを投入する。しかし、臨海部の平野では地下水の塩分濃度が高い地点が存在する可能性があることから、通常のベントナイトでは膨潤性能が低下する危険性がある。そのため、今回新たに塩水対応型ベントナイトペレットを開発して、一部に使用した。

フローメータプローブの外径は $\phi 50\text{mm}$ として今後使用可能な孔の拡張性に対応できるように極力細くした。

検層速度は作業効率を考える上で重要である。考慮すべき点はフローメータ検層では検層速度の変化が計測精度に影響することであり、検層速度は5cm/sを標準とした。

5. 孔内流速検層装置の現場適用例

5.1 流速測定例

ここに例として示す大阪駅北側の測定地点では、帯水層と考えられる砂礫層が上から第1、第2、第3と3層あり、削孔後、砂礫層主体の部分をストック構造として観測井を仕上げた。測定は、初めに孔底までフローメータプローブを降ろし、揚水流量0の自然状態での流れを測定した。流量0の目的は、後述

する間隙水圧測定のためである。

その後再び孔底までプローブを降ろしてから揚水を開始した。そして、水位が定常状態になるまで放置してから、フローメータ検層を5cm/sの速度で測定した。その2つの測定データを図-5に示す。

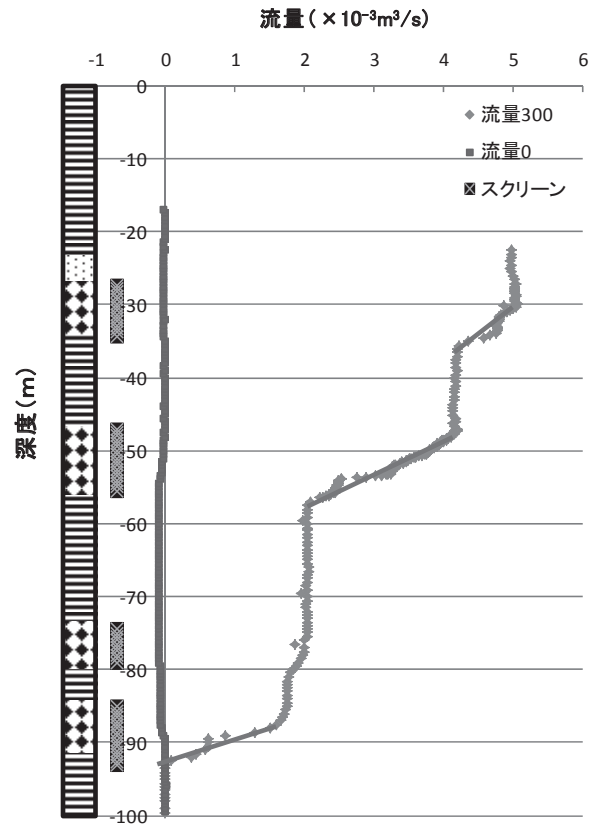


図-5 100m孔観測井内流速検層測定結果

図-5の各帯水層の透水係数の値を、式(6)を用いて計算すると表-1のようになった。

表-1 透水係数計算結果

層区分	透水係数(m/s)	層厚(m)	流量(L/min)
第1	1.7×10^{-5}	6.4	46.6
第2	3.3×10^{-5}	9.6	123.9
第3	3.9×10^{-5}	5.6	99.5

5.2 自然水位測定例

式(5)を用いて実際に自然水位を求めた。ここでは1回目の揚水は0として、自然状態での孔内流速を測定し、2回目で300L/minの揚水を行った。1回目の揚水を0としたのは、ポンプによる流量変動が測定結果に与える影響を恐れたためであったが、結果的に電磁流速計の精度下限値いっぱいになってしまい、精度的にやや疑問が残った。自然水位算定のための測定結果は表-2に示した。揚水をしない自然状態での水位はGL-0.8mであった。流量のマイナスはスクリーンへの流入を示すので、第3帯水層の水位が最も低く第1、第2帯水層から第3帯水層に流れ込んでいることが分かる。

表-2 自然水位推定の条件

水位(m)	流量 m^3/s			揚水流量
	第1帯水層	第2帯水層	第3帯水層	
-0.8	1.6×10^{-5}	8.3×10^{-5}	1.0×10^{-4}	0
-5.2	0.8×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.7×10^{-3}	5×10^{-3}

表-2 の値を用い、式(5)で計算した結果と実測値を次表に示す。

表-3 自然水位の計算結果と実測値

帯水層区分	自然水位(m)		
	計算値	実測値	差
第1帯水層	-0.71	-0.8	-0.09
第2帯水層	-0.65	-0.7	-0.05
第3帯水層	-1.05	-1.3	-0.25

今回測定に供した観測井は、フローメータ検層測定後に図-6のように構造を変更して各層の長期観測ができるようにし、水位観測を継続して行っている。表-3 は約1年後同時期の水位を実測値として比較したものである。時期が異なることから絶対値は一致していないが、傾向は一致していることが分かり、方法の妥当性が確認できたと考えている。

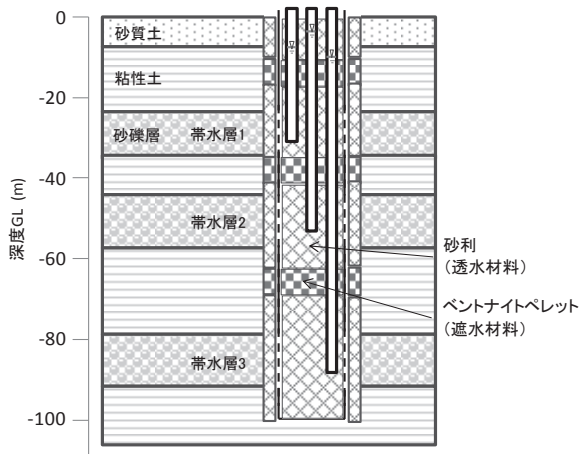


図-6 観測井の変更後構造

5.3 透水係数測定例

大阪駅南側の測定地点において、フローメータで得られた透水係数とその他の方法で測定した透水係数との比較を行った。ここで、その他とは単孔式揚水試験結果、ボーリング調査に伴う現場透水試験である。

初めに観測井内流速検層装置の測定結果を図-7に示す。スクリーンはGL-48.6~60.6mに設置され、この区間の湧出流量は45L/minである。これより透水係数は $4.0 \times 10^{-5} m/s$ と計算された。

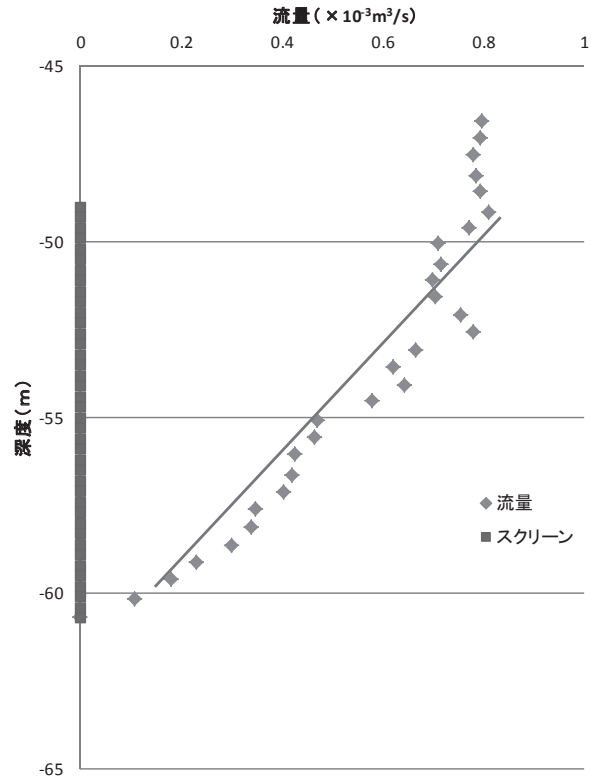


図-7 60m孔観測井内流速検層測定結果

次に揚水試験結果を図-8に示す。

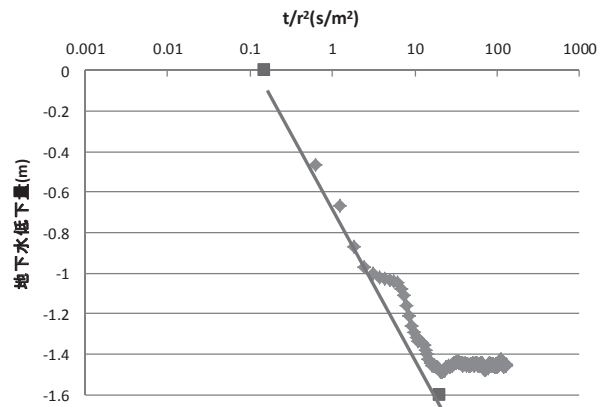


図-8 揚水試験 Jacob 法解析図

揚水試験結果の透水係数は Jacob 法の解析¹¹⁾で $1.2 \times 10^{-5} m/s$ となった。また、図-8を見ると後半で水位が安定し定常に達していると考えられるので、式(3)が適用できる。その結果、第3帯水層の透水係数は $3.2 \times 10^{-5} m/s$ である。

これらを表-5に整理した。平均すると $2.6 \times 10^{-3} m/s$ であり、2倍程度の違いで収まっている。これより、透水係数の計測精度を考慮すると、フローメータ検層から得られた透水係数の値はきわめて妥当な値が得られたことが分かる。

表-5 提案した試験法の妥当性の検証結果

試験方法	透水係数 m/s
フローメータ	4.0×10^{-5}
揚水試験Jacob法	1.2×10^{-5}
揚水試験定常法	3.2×10^{-5}
現場透水試験	2.3×10^{-5}

6. 結論

- (1) 自然水位の算定結果はその後の実測値と比較して良い一致をみており、手法の妥当性が確認できた。
- (2) 透水係数は他の方法との比較で良い一致を示しており、十分実用性があると判断できる
- (3) 今回開発した「孔内流速検層装置」は帯水層の透水係数を詳細に把握することができることを確認した。
- (4) 「孔内流速検層装置」により地盤の透水性を把握することで揚水井や還元井の計画に反映でき、地中熱利用の促進に寄与することができる。

謝辞

本研究はNEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発/再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発/都市域における、オープンループシステムによる地下水の大規模熱源利用のための技術開発」(研究代表者：北田奈緒子)として行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局土壌環境課 地下水・地盤環境室：

地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂版, 2015.

- 2) 河西 基, 小松田精吉, 平田洋一：電位差方式連続型地下水流速流向計の開発, 第30回水理講演会論文集, pp.337-342, 1986.
- 3) Roger, H. M., Alfred, E. H, and Fredrick, L. P. : Determining the distribution of hydraulic conductivity in a fractured limestone aquifer by simultaneous injection and geophysical logging, *Ground Water*, Vol.26, No.5, pp.587-595, 1988.
- 4) Alfred, E. H. : Identifying hydraulically conductive fractures with a slow velocity borehole flowmeter, *Can. Geotech*, Vol.23, pp.69-78, 1986.
- 5) Miyakawa, K., Tanaka, K., Hirata, Y., and Kanauchi, M. : Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed, *Engineering Geology*, Vol.56, pp.19-27, 2000.
- 6) 例えば, 一般財団法人電力中央研究所：平成28年度地層処分技術調査等事業報告書(岩盤中地下水移行評価確認技術開発), pp.19-22, 2017.
- 7) 原子力発電環境整備機構：技術業務の主な取り組み 2.2 地質環境調査・評価に関する技術開発, 2008.
- 8) 奥田武彦, 大塚文哉, 菊池茂央, 時田剛弘, 黒田清一郎, 有吉充：深度別地下水調査のための区間遮断機構ボアホール, *Journal of the Japan Land slide society*, Vol.43, pp.307-311, 2007.
- 9) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ, 雪崩地すべり研究センター：加熱式地下水検層法, 2016.
- 10) 社団法人地盤工学会：根切り工事と地下水, pp.83-84, 2005.
- 11) 社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説, pp.379-380, 2004.

(2018年6月18日 受付)