

孔内地下水の流向，流速測定に関する基礎的試験

Basic Determination of the Direction and Velocity of Groundwater Flow in Boreholes

根岸 正充* 本館 静吾** 伊藤 憲章***

Masamitsu NEGISHI, Seigo MOTODATE and Noriaki ITOH

孔内地下水の流向，流速測定の実用化を図るために，室内試験と現場における計測を実施した。

流向，流速の測定は，孔内地下水中に存在する水と同密度のトレーサー物質を映像で捕らえ，観察する方法である。

室内実験により，センサーの検出部の両端にパッカーを設けた，ダブルパッカー方式にすることにより，この原理で孔内地下水の流向，流速を測定できることが確かめられた。

現場測定では，孔内地下水の中の粒子が過多または過小で測定できない場合も多い。測定された流速は，他の岩盤の透水試験で求められる Darcy 流速と大きく異なる。しかし，測定流速の大小は透水係数の大小と対応しており，地層の相対的な透水性は調査することが可能である。

＜地下水；流向流速；透水性＞

We have examined a method to measure the direction and velocity of groundwater flow in boreholes by using tracer particles with the same density as water. The principle is to observe the tracer movement on a CRT and to determine the direction and velocity of the flow.

Laboratory experiments showed that successful results can be obtained with a double packer system where air packers are installed on both sides of a tester.

In fields, the measurement is often impossible due to excessive or very little tracer, and the obtained velocity is considerably different from that obtained with Darcy's law based on aquifer tests. However the relative permeability of strata can be estimated from the velocity, as it can be normalized with the permeability obtained in aquifer tests.

Keywords : groundwater, direction and velocity of flow, permeability.

1. ま え が き

ダムの基礎岩盤の透水性は多数のルジオンテストと，いくつかの揚水試験により調査され，地下水開発での地盤の透水性は揚水試験により調査されることが多い。い

ずれの場合も，より正確な地盤の透水性を求めることがきわめて重要であることに変わりないし，従来のこれらの方法でもそれなりの精度のデータを得ることはできる。しかしながら，筆者らは，より精度の高い地盤の透水性をより簡易に求めるにはボーリング孔を用いて自然の動

* 地質研究室長 ** 同室主任研究員 *** 同室員

水勾配下での地盤中の地下水の流向、流速から求めるのがよい方法と考える。

従来より、地下水の流向、流速の代表的な調査法としてトレーサー法があるが、労力、費用、精度などの面から難点も多い。したがって、より実用的な地下水の流向流速測定法の確立が望まれているところであり、筆者らはこのための基礎的な試験を始めた。

当報文では、最近開発された流向流速計により調査したボーリング孔内の地下水の流動に関する室内試験と現場計測の結果得られた若干の所見を述べる。

2. 地下水の流向流速計

測定に用いた地下水の流向流速計(PZ 1005型)¹⁾は、ボーリング孔内や観測井内の地下水の流向、流速を水中に存在する流動粒子の測定により求めるものである。

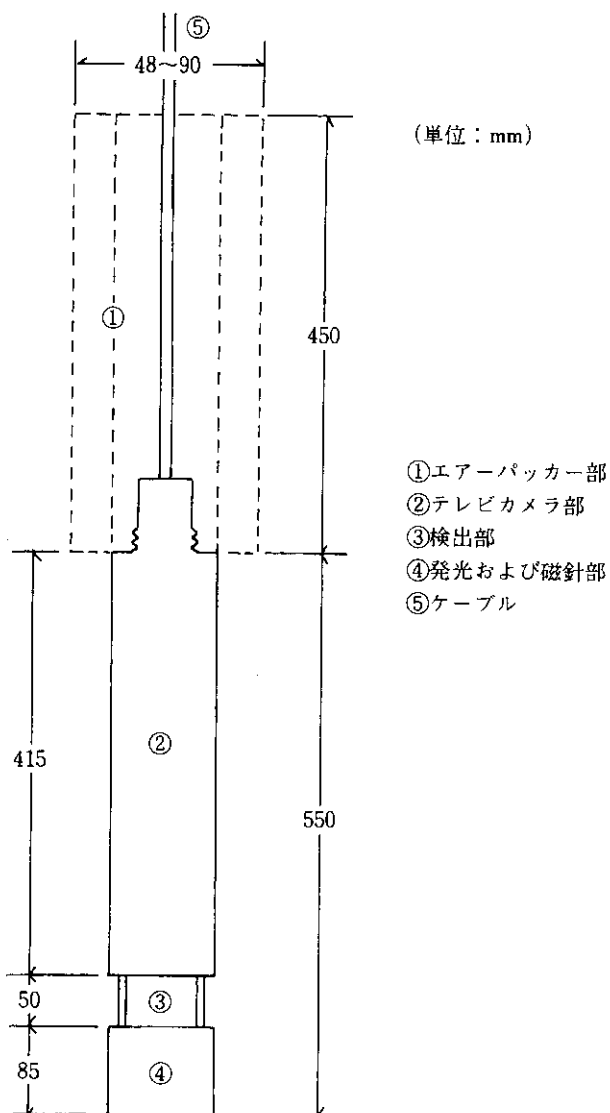


図-1 センサー

センサーにより捕捉された流動粒子の動きが25倍に拡大され、N方向とともにCRTの画面に映しだされるので、平面上(2次元)での粒子の移動速度と方向の測定が可能である。センサーの大きさは $\phi 48$ mm, L 600 mm, 流速の測定範囲は $10^{-4} \sim 10^{-1}$ (cm/sec)であり、さらに孔内地下水上下方向の流動を少なくするために上端にエアパッカーをつけることもできる(図-1)。電源はDC 12 V, AC 100 V いずれでも良い。

3. 室内試験

3.1 センサーの検出部と割れ目の位置関係

および測定される流向、流速

二重管の実験装置(図-2)を作製し、流向流速計で測定した流速(V_m)と計算流速(V_c)の比較をした。 V_c は装置の流入量と流出量をほぼ同じにし、流出量から $V_c = \text{流出量} / (\text{透水ゾーンの縦}(H) \times \text{横}(L))$ で算出したものであり、ほぼ実流速に近いものと考えられる。図-2のようなスリット(透水ゾーン)とセンサーの検出部の位置関係で V_m と V_c を比較してみると、流速を変えてもほぼ同じような値となる(図-3)。

このことから、水中に存在する微小粒子の動きを測定することにより、原理的には孔内地下水の流速を求めることができることがわかる。また、流向も一定であり、装置の位置からクリノメータで求めた方向とよく一致する。

一方、現場の割れ目性の岩盤における深いボーリング孔の中では、センサーの検出部が岩盤の割れ目の真横にくる図-2のような位置関係になるのはむしろ稀な例と考えられる。このため、センサーの検出部がスリットの位置から上、下に離れたら流速がどのように変化するかを調査した(図-4)。この結果、スリットの真横の流速が最

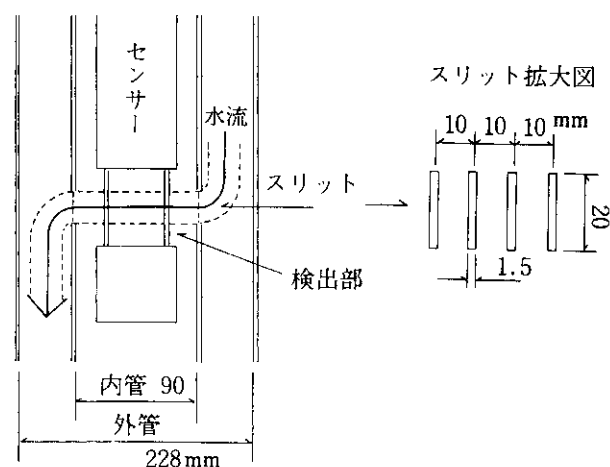


図-2 二重管実験装置のスリットと検出部の位置

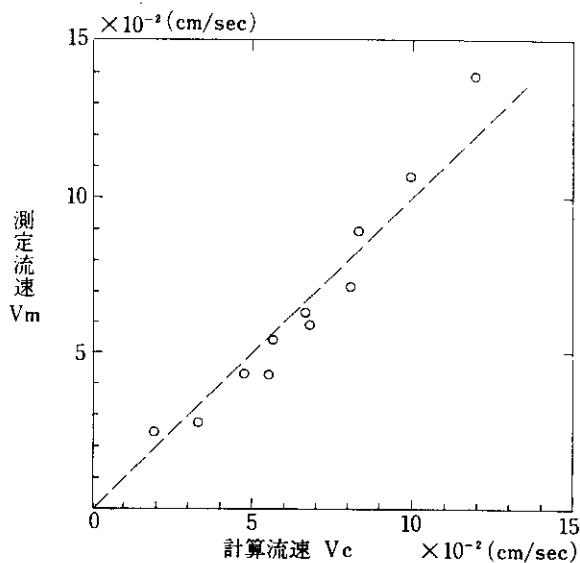


図-3 測定流速と計算流速

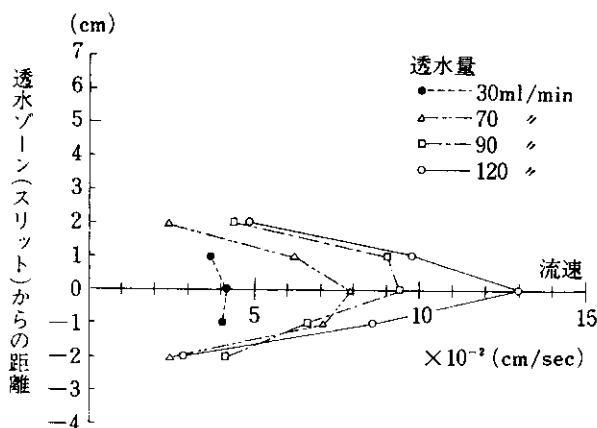


図-4 透水ゾーンからの距離と流速

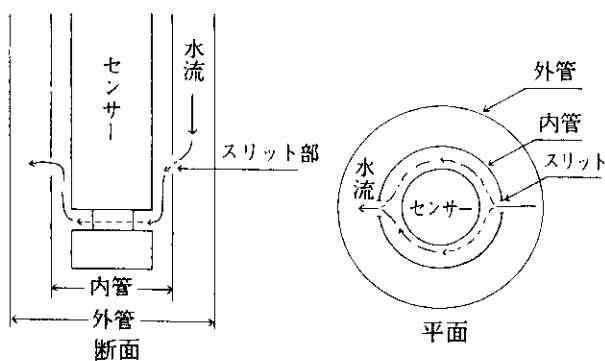


図-5 透水ゾーン(スリット)とセンサーの位置

大であり、上、下ともそれから2, 3 cm 離れた所まで流速が見られるが、それ以上離れるとほとんどゼロに近くなることが確かめられた。

このことから、割れ目性の岩盤において割れ目を透る地下水の実流速を求める場合、その真横にセンサーの検出部をセットすることが必要である。しかし、現場のボ

凡 例

A, B, C : 測定箇所

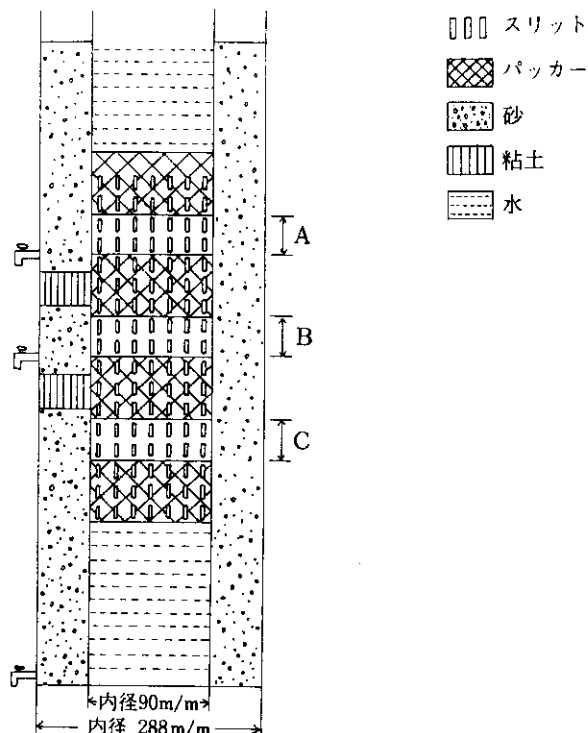


図-6 多段スリットにおけるパッカーとスリットと測定位置

ーリング孔においては、割れ目の多い岩盤はともかく割れ目の少ない岩盤ではかなりむずかしいと考えられる。

また、センサーの検出部がスリットから上、下方向に離れた場合、多段スリットの孔内では、横から浸透してきた水がセンサーにあたり、一部は水平方向にセンサーのまわりをまわりますが、一部は上、下方向に流れる(図-5)。このため、流向も安定しなくなり、計測された流向、流速が実際のものと異なることがあることが確かめられた。

一方、実際の岩盤では多数の割れ目が存在し、孔内は多段スリットの状態に近い。したがって、検出部の上下にパッカーを設け、この動きをなくする必要がある。

多段スリットの孔内で検出部の上、下にパッカーを設けた場合(図-6)と設けない場合の比較試験の結果(図-7)を示す。図のように、パッカーを設ければその区間で測定される流速は自然状態の孔内の水平方向流速に近い値であり、流向も安定する。しかし、パッカーがない場合は流速がその2~3倍であり、流向は安定しない。

3. 2 センサー設置に伴う孔内水の乱流

センサーを孔内に静かに降ろしても乱流が生じ、見掛け上水平方向の流速となつてるので、この影響度合いを調査するため高さ8 m、内径φ83 mmと56 mmの2種

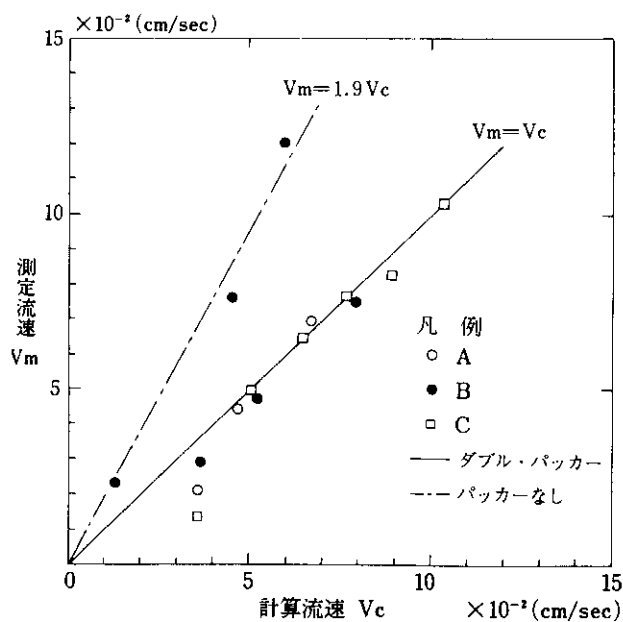


図-7 多段スリットにおける流速

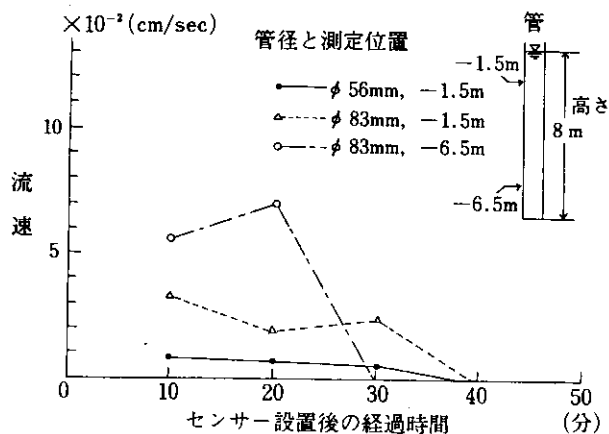


図-8 センサーの設置に伴う乱流の速さ

類の塩ビ管に水を充たし、センサーを入れて水の流向、流速を測定した。

流向はいろいろの方向に異なる場合と、かなりの時間一定方向に継続する場合とがある。流速は最大 7×10^{-2} (cm/sec) になり、30~40分後に停止した(図-8)。さらに、室内の高さ1m、内径 $\phi 90$ mmの管における測定では5~10分で停止した。

また、これらの停止にいたる時間は管の直径と長さ、センサーの上、下のパッカーの有無、管の外側の気温などさまざまな影響により異なる。いずれにしても、ボーリング孔内で地下水の流向、流速を求める場合、計器設置に伴う乱流の影響は大きい。このため、測定にあたっては、ボーリングにセンサーを設置後30分以上おき、設置に伴う孔内水の動きを除去する必要がある。

なお、以上の実験では水道水を用いたが、水中で動く

微粒子がないので少量のベントナイトを混入した。また、実験装置の内管の中の水に微粒子が存在しても、その外側から浸透してくる水に微粒子がなければ透水ゾーンでは最終的には水が澄んでしまい、流速があっても粒子の動きが見えなくなり、見掛け上流速がないように見えることが確認された。このため、地層中の地下水が微粒子を含む場合は測定可能であるが、岩盤のレッカ水などで地下水が澄んでおり、微粒子を含まない地下水を測定する場合にはさらに装置の改良が必要である。

4. 現場計測

北海道内P, R, S, Jの4ダムのボーリング孔とM, Hの2地区の深層地下水調査の揚水井で現場計測を実施した。

Pダムは新第三紀の弱固結砂岩で粗粒部の透水係数は 10^{-3} (cm/sec) オーダーであり、Rダムは新第三紀の弱固結のシルト~細粒砂岩で透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) オーダーであり、いずれも層水である。SダムとTダムは新第三紀の石英斑岩で、透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) オーダーであり、 10^{-5} (cm/sec) オーダーを主体とするレッカ水である。

M, H地区の揚水井は第四紀の羊蹄火山噴出物層の安山岩および火山砂で、透水係数は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ (cm/sec) オーダーであり、レッカ水と層水である。

これらの個所で求められた孔内地下水の流速を、図-9に示す。値は異なるが、いずれの個所の流速も 10^{-2} (cm/sec) オーダーであり、計測された流速は測定時間によりいくらか変動している。また、センサー設置後10分程度は乱流の影響が大きく、その後も30分ないしそれ以上継続するが、その影響度合は孔により異なる。

また、流向、流速とは別に孔内水の明暗から地下水の流動層と停滞層の相違がおおよそわかる(図-10)。これより、たとえばPダムの現場測定から次のようなことが

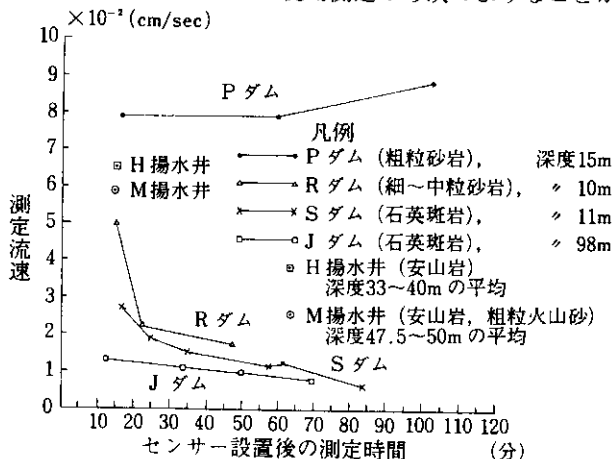


図-9 孔内地下水の流速

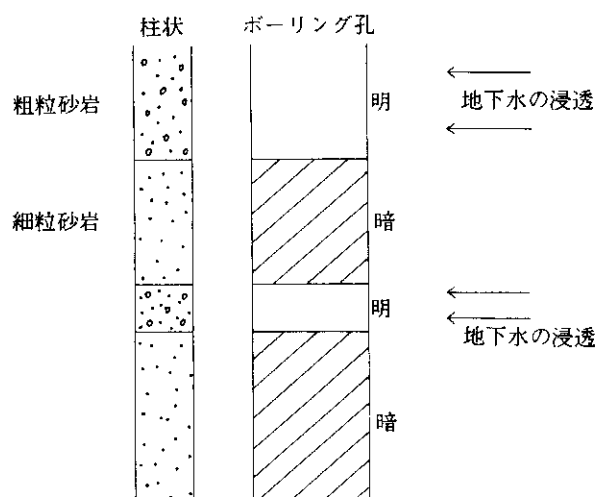


図-10 孔内地下水の明暗と流動

判明した。

孔内の地下水の微粒子の停滞度、孔内の明暗から見て、大きくみると粗粒砂岩では地下水が流動しており、細粒砂岩では流動はほとんどないと考えられる。これらの流動層は既存のボーリング柱状図の岩相と一致しないところがあり、地層の粒度変化を柱状図に表現しきれなかったところに原因があると考えられる。厚い粗粒砂岩では地下水の流動があるが、細粒砂岩中に挟まれた薄い粗粒砂岩では地下水の流動はほとんどない。粗粒砂岩がレンズ状に入っているか、または層状に入っている連続性がない場合は、圧入や揚水すればともかく、自然の動水勾配下では地下水が流動しづらいものとする。

なお、前述の6ヵ所の測定にあたり、いずれの個所の孔内水にも停滞粒子は存在し、センサーの設置時には乱流の影響もあり、粒子の動きが見られた。しかし、新第三紀の砂岩や泥岩よりなるP、Rダムでは、停滞粒子が多すぎて孔内が暗く、測定は不可能な個所が多かった。また、SやJダムのような岩盤のレッカ水は、当初は孔内に停滞した微粒子がセンサーの設置に伴う乱流により動き、一見地山地下水の流速を測定しているように見えるが、時間の経過とともに水が澄み、粒子が見えなくなり、実際に地下水が流動していても見掛け上流動していないような状態になる。このようなことから、当装置の改良とともに孔内水が濁って入る場合、他の原理の測定法による検討も必要であり、それらの方法も含めて、今後検討していきたいと考えている。

5. 地盤のDarcy流、孔内流速および測定値についての考察

地盤中のボーリング孔内では、地下水の流線が孔内に集中し、流速は地盤中と孔内では異なること、およびその

孔内地下水の流速分布の理論解が佐野(1983)²⁾により提示されている。さらに、木村ら(1988)³⁾は室内実験を行い、佐野の示した理論解による値が実測の孔内の流速とほぼ一致することを報告している。

それらの報告では、孔の中心からの距離で流速は異なり、中心部で最大流速を示し、孔の中心の流速は地盤中の流速(Darcy流速)の3倍になるとされている。

一方、安藤(1989)⁴⁾は試験槽の地盤の地下水流速をPZ-1005で測定し、Darcy流速の6~11倍の値を得ている。これは、前述の理論解の値である“Darcy流速の3倍”という値を考慮してもなお大きいこと、およびこの原因として、流向、流速計の検出部が水の流れを遮断し、縦方向にも水が収束することが考えられることを報告している。筆者らも、その原因については室内実験の結果から同様な考えにいたっている⁵⁾。

以上のことから、ボーリング孔内の地下水の流速は地盤内のDarcy流速と異なること、および流向流速計(PZ-1005)ではDarcy流速より1オーダーほど大きくでる可能性があることがわかる。このため、筆者らは、流向流速計の検出部の上下にパッカーを設けることにより理論値に近い流速を測定できるよう改良を行ったが、まだこの装置で現場測定を行うまでにいたっていない。

前項で述べた現場測定の流速の値は、パッカーなしの測定値である。測定値を単純に各個所の地層の透水係数と比較しても、1~2オーダー大きい値である。現場での動水勾配を考慮すると、さらにその差は1オーダー程度大きくなるものと考えられる。なぜ測定値がこのように大きな値となるかは、前述の佐野の理論解や安藤の実験結果を考慮しても説明できない。

一方、今回測定された孔内流速の値をみると図-10のように、透水性のよい地層で大きな値が得られている。値の大きさの順序は、おおむね従来の調査で考えられていた地層の透水係数の大きさの順序と一致する。したがって、流向流速計により、地層の相対的な透水性については調査できるものとする。この点で、地下水の調査法のひとつとして有用であるとする。しかし、地盤のDarcy流速を求めるためには、さらにいろいろな試験と装置の改良が必要である。

6. まとめ

流向流速計(PZ-1005)により、孔内地下水の流向流速を測定するために、室内試験および現場計測を実施した。その要旨を以下に示す。

- ① 室内実験の結果から、レッカ水では割れ目の真横にセンサーの検出部をセットできれば、水中の微粒

子の動きから実流速を測定できる。割れ目から2～3 cm以上離れると、実流速の値は測定できない。

- ② センサーを設置したとき生じる乱流の影響は、流速および継続時間とも意外に大きい。測定はセンサー設置後、十分な時間（15～30分）が経過してから行う必要がある。
- ③ 6カ所の現場で孔内の地下水の流向、流速を測定し、流速については図-10のような結果を得た。しかし、これらは注入試験や揚水試験で求められた透水係数より1～2オーダー大きい値であり、動水勾配を考慮すると岩盤内のDarcy流速との相違はさらに大きい。この原因と解釈については、今後検討してみたい。
- ④ 測定された流速は、他の透水試験で求められる岩盤内のDarcy流速と大きく異なる。しかし、測定された流速の大小は岩盤の透水係数の大小と対応しており、相対的な透水性は調査できる。
- ⑤ ボーリング孔内の地下水の明暗の観察により、地下水の流動層と停滞層はおおよそ区分できる。
- ⑥ 自然の動水勾配下では、周辺が難透水層で、その中の透水層がレンズ状であったり、薄層で連続性が小さい場合は地下水は流動していない。このため、測定される孔内地下水の流速とボーリング柱状図の岩相から予測される値とが必ずしも一致しない。自然の動水勾配での地下水の流動性は、圧入試験や揚水試験時以上に、岩質（粒度や割れ目など）の連続性に左右されていると考えられる。
- ⑦ 孔内地下水の流向は現場測定では地形から予測される方向と一致する場合としない場合があり、現計器では不安定である。室内試験では、センサーの検出部の両端にパッカーを設けることにより、流速と同時に流向も安定することが確かめられた。今後、

現場でも測定できる装置に改良していきたい。

6. あとがき

今回測定に用いた流向流速計は、地下水中の微粒子を光で映像として捕捉し計測するため、孔内水が濁っている場合と逆に非常に澄んでいる場合は測定できない。このため、当計器の改良、さらに別の原理による計器も必要である。しかし、当計器では一定の条件が整えば実際の孔内水の動きを直接微粒子の動きから測定できる利点があるので、今回これを用いて孔内水の流向、流速に関する基礎的な試験を実施した。

近年、電位差測定法など2、3の方法が開発されていることが報告されており、今後、装置や測定法の改良および別の原理による測定法との比較なども実施するとともに、水理的な解析を進め比較検討してみたい。

参考文献

- 1) 建設技術評価書（1978）：地下水流向流速計の開発、建技評第83402。
- 2) 佐野 理（1983）：多孔性媒質中に穿った円柱状空洞を過ぎる粘性流れ、日本流体学会、ながれ Vol. 2, pp. 252～259。
- 3) 木村浩志ほか（1998）：ボーリング孔内およびその周辺の地下水流れに関する実験的研究、土木学会第43回年次学術講演概要集、pp. 178～179。
- 4) 安藤義久（1989）：地下水流向流速計の実用化に関する研究 CTI サイエンスシステム報告書。
- 5) 根岸正充・本館静吾・伊藤憲章（1989）：孔内地下水の流向、流速に関する基礎的試験、日本応用地質学会北海道支部研究発表会講演要旨集、第11号、pp. 2～5。