微流速計の利用とその解釈

羽 田 忍*

The Application of Microflowmeter to Engineering Geology

Shinobu HADA

Abstract

Measurement of the vertical water velocities flowing through a bore-hole when the water is pumped out or injected will indicate the position of inlets or outlets in the hole.

Lowered into a bore-hole or into a suitable piezometric installation, Microflowmeter makes it possible to measure natural rates of flow and rates following pumping in and pumping out of water, and hence to deduce the permeability of the strata which the bore-hole crosses.

The instrument we have used consists of a propellor and a photo cell detection system, and is particularly suitable for bore-hole measurements.

Some examples of the test show that the measurement of the vertical water velocities flowing through a bore-hole is useful not only to determine the permeability of strata, but also to estimate the behavior of ground water through the basement rock of dams and around tunnels.

1. ま え が き

ボーリング孔内や井戸水の流動状況を測定し、地下水や地質構造の手掛りとする試みは、かなり古くからおこなわれていたらしい。1961年の第5回国際土質基礎工学会議（バリー会議）において、H. Camfort と G. Mazier が、井戸の地下水垂直流速の測定について述べている。最近では、孔内水の流動度測定検査方法と称する特許（特公昭 45-25029）もあり、この方法では、図-1 にしめたような円板を孔内に降下して、円板にかかる孔内水の上昇流下降流の圧力によって、ハカリの示す重さの変化（図-2）を読みとり流動状況を推定しようとするものである。

これから述べる方法は、微流速計（フランス国、Socosor 社製）を用い、ボーリング孔内における地下水（孔内水）の流動を測定するもので、いくつかの測定例と、測定によって解明された地質状況に関する見解も述べる。

我国における土木地質領域では、孔内微流速計の適用例に乏しいのが実情であり、本論文が、多少なりとも参考になれば幸いである。また、今後の微流速計利用につ

いて、御批判と御教示をとくにお願いする次第である。

本論における現場計測・実験には、株式会社応用地質調査事務所の技術者多数の協力があつた。ここに明記して感謝の意を表する次第である。

図-1 孔内流動測定器

* 株式会社 応用地質調査事務所

図-2 流動測定器測定例

2. 微流速計の概要

(1) 特徴

微流速計は、原理的には、河川の流量測定に用いられ

る流速計と同様の装置である。しかし、ボーリング孔内のような場所で使用するため、次のような点がとくに考慮されて作られている。

図-3 微流速計

図-4 微流速計の概要図 (MICROMOULINET)

- i) 低流速の測定ができること。
 ii) 測定による抵抗によって、水の流れに影響を与えないこと。

このために、流速計のプロペラの比重を、測定する流体（水）と近づけること、プロペラの回転数の検出のため、磁石（力）や抵抗体を用いるシステムによらず、光電素子を使用する検出法が採用されている。磁石や抵抗体を用いる検出方法は、羽根の回転に多少なりともトルクをあたえるからである。

(2) 構 成 (図-3, 図-4)

微流速計は、地表に置かれる測定計器部と孔内に降下

するゾンデ部およびケーブルとからなる。

i) 地表測定計器部

プロペラの回転数を表示する計測器本体、ケーブルを収納するドラム、ケーブルのくり出し長さを測る円板シープと1cm 読み取り可能な深度計および車輪付架台とからなっている。

ii) ゾンデ部

電球と光電素子からなる回転数検出部、光線遮断・開放のシャッターを軸に備えたプラスチックプロペラ、およびフレームからなっている。プロペラは、4枚羽根（低流速用）と6枚羽根（高流速用）とが準備されてお

表-1 孔内微流速計による試験結果記録

調査名 ; 下金田ダム地質解析業務

調査地 ; 広島県庄原市水越町大田

地点 ; No.30

羽根の種類 ; 6枚羽根 作業時間 ; 12.00 ~ 15.00

調査年月日 ; 昭和51年8月3日

地盤標高 ; 182.74 m

地下水位 ; G.L 0 m

測定者 ; 兼田, 久沢, 堀泉

深度 (m)	時間 (sec)	スクリューの 回転数 (r)	水流 方向 (+/-)	毎秒当りの 回転数 (r/sec)	孔内流速 (V cm/sec)	深度 (m)	時間 (sec)	スクリューの 回転数 (r)	水流 方向 (+/-)	毎秒当りの 回転数 (r/sec)	孔内流速 (V cm/sec)
1	20	70	+	3.55	64.21	24	10	63	+	6.3	113.03
2	20	68	+	3.4	61.55	26	10	68	+	6.8	121.90
3	20	71	+	3.55	64.21	27	10	68	+	6.8	121.90
4	20	74	+	3.7	65.88	28	10	67	+	6.7	120.13
5	20	71	+	3.55	64.21	30	10	69	+	6.9	123.68
8	20	71	+	3.55	64.21	32	10	68	+	6.8	121.90
9	20	70	+	3.5	63.33	33	10	64	+	6.4	114.80
9.50	20	70	+	3.5	63.33	34	10	68	+	6.8	121.90
10	20	76	+	3.8	68.65	35	10	67	+	6.7	120.13
10.025	20	86	+	4.3	77.53	36	10	67	+	6.7	120.13
10.050	20	91	+	4.5	81.08	37	10	65	+	6.5	116.58
10.075	20	100	+	5.0	89.95	38	10	66	+	6.6	118.35
10.10	20	110	+	5.0	89.95	39.5	10	60	+	6.0	107.70
10.20	20	117	+	5.85	105.04	39	10	61	+	6.1	109.48
10.50	20	120	+	6.0	107.70	40	10	64	+	6.4	114.80
11	20	120	+	6.0	107.70	40.5	10	58	+	5.8	104.15
12	10	64	+	6.4	114.80	41	10	58	+	5.8	104.15
14	10	61	+	6.1	109.48	42	10	58	+	5.8	104.15
16	10	63	+	6.3	113.03	44	10	56	+	5.6	100.60
18	10	61	+	6.1	109.48	46	10	57	+	5.7	102.38
20	10	61	+	6.1	109.48	47	10	56	+	5.6	100.60
22	10	63	+	6.3	113.03						

測定時の状況 :

4枚羽根				6枚羽根			
速度: 窪体 $\phi=70\%$ (孔径 80~90%)	$V=7.65 \times \bar{n} + 0.3$	速度: 窪体 $\phi=70\%$ (孔径 80~90%)	$V=7.65 \times \bar{n} + 0.3$	速度: 窪体 $\phi=70\%$ (孔径 80~90%)	$V=7.65 \times \bar{n} + 0.3$	速度: 窪体 $\phi=70\%$ (孔径 80~90%)	$V=7.65 \times \bar{n} + 0.3$
速度: 窪体 $\phi=42\%$ (孔径 52~60%)	$V=7.1 \times \bar{n} + 0.4$	速度: 窪体 $\phi=42\%$ (孔径 52~60%)	$V=7.1 \times \bar{n} + 0.4$	速度: 窪体 $\phi=42\%$ (孔径 52~60%)	$V=7.1 \times \bar{n} + 0.4$	速度: 窪体 $\phi=42\%$ (孔径 52~60%)	$V=7.1 \times \bar{n} + 0.4$

り、またフレームは、外径 42 m/m のものと外径 70 m/m のものとがあり、ボーリング孔径の大小によって取りかえるようになっている。

(3) 特 性

- i) 適用温度範囲 $0^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$
- ii) 内部電源 9 volts (単 1 乾電池 $\times 6$)
- iii) 外部電源 12 volts
- iv) 測定持続時間 内部電源 (単 1 乾電池 $\times 6$) に
より、毎分 400 回転の場合、
 20°C 条件下で約 20 時間
- v) 流速測定範囲 $2 \sim 200 \text{ cm/s}$
- vi) 標準ケーブル長 100 m
最大ケーブル長 400 m

3. 微流速計による測定

微流速計を使用するボーリング孔は、孔内を入念に洗浄し、孔壁崩壊の恐れがないか、事前に十分に検討しておく。このために、微流速計のゾンデ部 (フレーム) に似たダミーを作成しておき、孔底迄一旦降下して、孔壁状況崩壊の有無を確認しておくのがよい。

(1) 測定作業

ゾンデをボーリング孔内に降下する。その際、プロペラ位置を基準点 (通常ケーシング頭: ボーリング深度基準点) に一致させ、深度計目盛りを 0 に合わせておく。

通常は、孔底迄ゾンデを降下し、流速を測定しながらゾンデを引揚げける。測定結果は、表-1 のようにデータシートに記入する。測定間隔は、一般に 0.5 m おき位であるが、流速変化の急変する個所では、0.1 m おきに、あるいは変化のない区間では、1.0 m $\sim$ 2.0 m 間隔に適宜に実施してもよい。

孔内水の垂直流速が上昇か下降かの判定は、ケーブルを上下に移動させた時、カウントの変化を見れば比較的容易におこなえる。すなわち、ケーブルを上向きに引き

あげた時、カウント数が減少するならば水流は上向き (+) で、逆に増加するならば、水流は下向き (-) である。

測定結果は、ボーリング柱状図に併記してしめす。羽根の回転数から流速に換算するのは、実験によって求めた換算式によるが、この微流速計の場合、おおむね次式を用いている。

- i) フレーム径 42 m/m : 孔径 66 m/m の場合
4 枚羽根使用 : 流速 $v \text{ cm} = 7.1 \times n / \text{sec} + 0.4$
6 枚羽根使用 : 流速 $v \text{ cm} = 17.75 \times n / \text{sec} + 0.4$
- ii) フレーム径 70 m/m : 孔径 86 m/m の場合
4 枚羽根使用 : 流速 $v \text{ cm} = 7.65 \times n / \text{sec} + 0.3$
6 枚羽根使用 : 流速 $v \text{ cm} = 16.3 \times n / \text{sec} + 1.3$

換算式中の n は、羽根の回転数である。測定に際して n は 10 回以上になるまで測定する必要がある。したがって、流速が遅い場合には、60 sec 以上の時間をかけて回転数を計ることになる。

(2) 測定結果の解釈

ボーリング孔内における垂直方向の自然流速の測定のみでは有効な結果は得られない。すなわち、自然状態の測定では、流速増加部分と減少部分の一組ないし数組の組合せが示されるのみで、帯水層から湧水しているか、逆に逃水しているかの情報が得られるにすぎない。

ボーリング孔内の自然水位を揚水し (あるいは注水し) 変化させて流速測定をおこない、自然状態の水位における流速測定結果と比較して、はじめて有効な解釈が可能となる。

微流速計による孔内流速の測定結果を模式図として図-5 にしめす。図-5 の左側の曲線は自然水位における測定結果で、孔内水流が下向きであることをしめしている。右側の曲線は、孔内水を汲み出して、水位が低下している時の測定結果で、水流の向きは上向きである。測定された曲線に対する解釈は次のようになる。

図-5 微流速計による孔内流速測定

i) 上昇している水の速度がしだいに早くなるのは、孔壁からボーリング孔内に湧水していることを意味する。つまり、孔の断面積 (s) × 流速 (v) は流量 (Q) であり、ボーリング孔径が同一であれば流速変化は流量変化となるからである。

ii) 下降している水の速度がしだいに早くなるのも、i) と同じ理由から湧水があることになる。

iii) 上昇あるいは下降している孔内水の流速がその方向で次第に減少する場合は、その区間において、孔壁から逃水していることを意味している。

iv) 図-5 の自然水位における流速曲線では、ボーリング孔の上半部で湧水し、下半部で逃水していることが判明する。

v) 揚水して水位が定常状態になった場合の流速曲線では、水流の動きはすべて上昇しており、孔壁の全区間から湧水していると判定される。この場合、曲線の勾配がほぼ一定の区間は、孔壁からの湧水がほぼ一様であることを意味する。また、流速の増加する割り合いの大きい (勾配がゆるい) ところは、湧水の多い区間である。

さて、図-5 の左・右の曲線を比較した場合、自然水位状態で逃水区間であった下半部が、揚水によって湧水区間に変化している。このことは、孔内水位が自然状態の場合、地層中の水圧より孔内の静水圧が高く逃水していたものが、揚水によって水位を下げると静水圧が地層中の水圧より低くなってボーリング孔内に湧水するようになったことをしめしている。したがって、2つの曲線の変化は、孔内の水頭変化にしたがっており、水頭と地層内の水圧差によって孔壁から湧水したり逃水することが明らかである。

左右2曲線に見られる流速の差は、水頭変化による孔壁からの水の出入りの差をしめしている。両曲線の距離 (速度の変化量) をとって改めて、図-6 の自然水位と揚水水位による水量変化図 (曲線 C) を作成する。孔の断面積が常に一定ならば、水量変化は、断面積 × 速

度変化で表わされる。

図-6 の曲線 C において、等しい勾配の部分には、水頭変化に対して、一様な湧水量変化区間である。勾配が急なところは、ある水頭の変化に対し湧水の変化量の少ないところ、勾配がゆるいところは、水頭の変化に対し湧水量の変化の少ない激しいところ (すなわち透水係数の大きいところ) を意味する。

曲線 C の勾配は、単位深度長あたりの湧水量変化でしめされる。これを記号 Q_i で表わす。 Q_i は、ボーリング深度区間長 1 cm あたりの湧水変化量 cc でしめすことにする。

曲線 C において、勾配の一定な区間における透水係数 ($k = \text{cm/sec}$) は、その区間が水平な均一な連続層からなると仮定すれば、透水係数を与える de Dupuit の式を適用することができる。

$$k = \frac{Q_i}{2\pi \cdot \Delta P} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

ただし、 ΔP = 水頭変化量, cm. R = 影響圏半径, cm. r = 孔の有効半径, cm.

ここで、 R については別途の多孔揚水試験などで求めることになるが、対数項に入っている関係上、常識的な値を用いても k に対しては影響が小さい。また、この項を消去する方法として、水頭変化 (ΔP) を 3 回以上あたえて流速を測定し計算する方法もある。

4. 微流速計の利用

微流速計は、水流をプロペラの回転によって把える簡単な機器であるが、適用範囲は工夫次第でさまざまである。いくつかの適用例と問題点を以下に述べる。

(1) 定性的利用

i) 割れ目からの漏水

岩盤の透水試験として、ルジオン試験が一般的である。透水区間長を 5 m として、圧力水を注入し、圧力 10 kg/cm² における 1 m 区間長の透水量 (l/min) でし

図-6 自然水位と揚水水位による水量 ($v \times S$) 変化

図-7 割れ目から注水が逃げている場合

図-8 石灰岩の破碎部からの湧水と逃水

図-9 孔内流速測定結果図

めされるルジオン値が一般的な表示法である。しかし、岩盤の割れ目は、不規則に発達しており、必ずしも試験長全区間から逃水が均一におこなわれているわけではない。

図-7 のように逃水のはげしいボーリング孔にポンプで注水しながら微流速計で流速を測定してみると、特定の数個所で流速が低下している。この個所が逃水のはげしい割れ目の位置であることが明らかである。

図-8 は、石灰岩中に掘削したボーリング孔中での測定例である。No. 212 孔では、上昇流があり孔底に近い深度 43 m から 37 m の区間で湧水がある。また、地下水面に近い深度付近では逃水している。いっぽう、No. 206 孔では、下降流となっている孔内水の流速変化から、地下水面付近の深度 8 m 付近で湧水があり、深度 12 m から 18 m 間で逃水しているのが認められた。ボーリングコアで破砕部と推定される個所を各図の右に網目でしめしてあるが、大局的には、破砕部の周辺にのみ水の動きが存在することがわかる。

ii) 湧水層の検出

第三紀層の被圧地下水地帯の孔井中の測定例を 図-9 にしめす。流速曲線に勾配のついている個所が湧水層である。下方からみれば、深度 100 m 付近の軽石混り粗

図-10 孔内流速計測定結果図

図-11 キャリバーロ
グと孔内流速

せてから流速を測定したものである。したがって、自噴状態 (GL+48 cm) の曲線では、口元からの湧水量はほとんどない。この測定曲線の出入りがはげしいことから、キャリパーを用いて孔径の変化を測定した結果を、同図右欄にしめしておく。口径 66 m/m の掘削をおこなったにもかかわらず、軟質で湧水量の多い下位砂岩層 (Ssi) では孔径が 120 m/m 迄拡大している。孔径拡大箇所では、流速が小さくなり、孔径の小さい箇所では流速が早くなり、キャリパーによる孔径測定曲線と流速曲線とは、鏡対称のような関係になっている。このような場合は、各深度において、流速(v)×孔径断面積(s)=流量(Q)として解析しなければ不適当である。(図-11)

(2) 定量的利用

あるダムサイトのボーリング孔における流速測定結果

を 図-12 にしめす。ボーリングは、割れ目に富んだ安山岩熔岩を2枚貫らぬいており、2枚の安山岩熔岩の境界は、赤褐色の変色帯(深度 71.5 m~77.7 m)として認められる。

自然状態における孔内水の移動はすべて上昇流である。ボーリング孔内に湧水している個所は、変色帯(熔岩境界)からで、上部熔岩で徐々に逃水している模様が、曲線 ①、② でしめされる。曲線 ② は、ボーリング掘削直後の孔径 66 m/m の状態における流速測定結果である。曲線 ① は、ボーリング孔にストレーナーとして、多数のスリットをつけた内径 50 m/m の塩ビ管を湧入した後での測定結果である。

口径 66 m/m のボーリング孔断面積は、 34.19 cm^2 で、内径 55 m/m の塩ビ管断面積は、 19.63 cm^2 となるので、

図-13 被圧逸水水位計算例

同一水量が通過するとすれば、流速比は、 $34.19/19.63=1.74$ となる筈である。曲線 ① と曲線 ② を比較すると、塩ビ管湧入前に 5 cm/sec の流速をしめしたところが 9 cm/sec の流速となっており、流速比は約 1.8 倍であることから、ボーリング孔内の流水は、塩ビ管挿入後は、ほとんど管内を通過している結果となっており、塩ビ管外壁とボーリング孔壁との隙間を通過して上昇する水量は僅かであることが明らかとなった。

このボーリング孔内で実施した水温分布を温度検層結果として図-12の左から2列目にしめしておく。変色帯付近での湧水の温度は 13°C であるが、孔内を上昇するに従い水温は 10.5°C まで低下しており、変色帯をはさんで上下の安山岩層の地下水温度が異っていることを暗示する。

ボーリング孔内にポンプによって注水し、孔内水位を上昇させて、再び流速を測定した結果を図-12の曲線③にしめす。孔内水位は、自然水位に対し約 3m 上昇したが、この水頭変化によって、孔内流速は全区間におたり下降流となっている。すなわち、注水によって、孔内水は、孔壁から地山中に逃水している。曲線①(自然状態)と曲線③(注水状態)の各深度における流速の差で、流速変化量曲線④を画き、この曲線より求めた透水係数を図-12の右方にしめした。安山岩熔岩は、 $5\times 10^{-3}\text{ cm/sec}$ の透水性部分と $2\times 10^{-4}\text{ cm/sec}$ の比較的難透水性部分とからなっている。また、地下水位の位置する深度 45m から深度 52m にかけては、速水係数が 10^{-3} cm/sec のオーダーをしめしており、透水性の良好な区間となっている。このことは、この区間が現状より

難透水であれば、孔内の自然水位がさらに上部に位置するであろうこと、また、岩盤中の水位は、逃水の多い箇所(深度)まで降下するであろうことをしめしている。

図-13は、前例と同じダムサイトにおけるボーリングの孔内流速測定結果である。変色帯の付近に2箇所の湧水部(a, b)が認められ上方(深度 18.40m~20.40m)に逸(逃)水区間(c)がある。ボーリング孔に注水し、自然水位から 340cm 高く孔内水位を保つと、孔内水は下方に流動するようになる。

湧水区間に対し、孔内に注水し水頭を上昇させると、湧水量は次第に減少し、水頭が大となれば、湧水区間から逆に逃水するようになる。この途中において、湧水も逃水も起きないような水頭(孔内水位)をもって、その帯水層の被圧水位と定義する。de Dupuit の公式は、

$$k = \frac{Q_i}{2\pi \cdot \Delta P} \cdot \ln \frac{R}{r}, \quad \text{すなわち,}$$

$$\Delta P = \frac{Q_i}{2\pi \cdot k} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

でしめされるが、 Q_i は、自然状態の湧水勾配から注水状態の逃水勾配を差引いたものとなっている。したがって、逃水勾配=0 の $\Delta P'$ を求めればよい。この場合、図-13の a 区間(5m)を例にとれば、水頭差($\Delta P'$) 340cm で 20.5cm の流速差が現われたのであるから、6.0cm の流速差が出る水頭差($\Delta P'$)を求めればよく、計算式として

$$340\text{ cm}(\Delta P) : 20.5\text{ cm} = x\text{ cm}(\Delta P') : 6.0\text{ cm}$$

を計算すればよい。すなわち $x=99.5\text{ cm}$ であって、自然状態の水位(標高 244.50m)に 99.5cm を加えた標

図-14 あるダムサイト右岸の熔岩境界の被圧水頭分布

高 244.50 m の孔内水位において、湧水も逃水も生じないことになろう。

この逆に、逃水区間(c)において、孔内水頭を低下させるとその区間の逃水は停止することになる。この水頭を逸水(逃水)水位と定義すれば、計算は、被圧水位と同様におこなうことができる。計算の実例を、図-13 に被圧部(a・b区間)、逸水部(c区間)のそれぞれについてしめしておいた。

敷地内において、同一の被圧層について被圧水位を各ボーリング毎に計算し平面図にしめすことができる。図-14 はこのよめにして求めた安山岩境界部の被圧水位図の例である。

5. あとがき

微流速計の利用は、湧水層の判別、地層の透水係数の算出以外にも工夫次第によって種々の目的に使用可能と思われる。たとえば、パイピングの限界圧判定、グラウト効果の判定などがそれである。また、ダムサイトにお

ける透水性断面の作成や、トンネルにおける地下水断面の作成など、従来の単なる孔内水位から判断する資料に加えて、水の流動を解析し、一層具体的に地下水状況を判定する上で有効な調査手段となるものと思われる。残念なことに、未だ充分に普及した調査手法というわけではなく、測定資料も少ないので、今後一層の現場測定例を加えていきたいと思っている。諸兄の御協力と御教示をお願いする次第である。

参 考 文 献

- 1) H. Canbafort, G. Mazier (1961): Measurement of Water Flow and Undisturbed Sampling of Cohesive Soil, Proc. 5th ICSMFE (Paris), Vol. 1, pp. 441-445.
- 2) 大友 豊 (1970): 深井戸に於ける水の流動度測定検査方法, 特許出願公告, 昭 45-25029.
- 3) H. カンプフォール(斎藤, 福住共訳) (1969): 地盤注入, 鹿島出版会.