

地下水の流向・流速

Ground Water Flow Velocity and Drection

西 垣 誠 (にしがき まこと)

岡山大学助教授 工学部土木工学科

1. はじめに

地下水の流況を把握することは建設工事による地下水への影響評価、あるいは工事の際の排水処理設計において極めて重要である。地下水の流況とは、地下水がどの方向（流向）にどの程度の浸透速度（流速）で流動しているかの分布である。これを調査する方法として、帯水層内の水頭分布や単孔式透水試験あるいは揚水試験より透水係数分布を調査する方法が一般に用いられてきた。しかし、直接地下水の流向・流速を広域あるいは単孔内で計測する我が国独特の地下水調査法が開発されてきた。地下水の流向・流速を計測する意義を整理すると表-1のようになる。地下水の流向がわかると、根切り工事における地下水位低下や地下水脈の遮断による地盤環境への影響が予測しやすい。また、地すべり地の排水設計の際には、地下水の流向分布がわかれば集水井戸の位置などが的確に決定できる。そのほかに、情報量の少ない水位分布だけのデータに流向分布が加わると、地下水のコンターを書く作業が容易になる。

一方、地下水の浸透流速がわかると、薬注や凍結工法の効果の判定ができる。また、地下水汚染の解析に直接、流速を入力データや境界条件に用いることが可能となり、解析結果の精度がよくなる。このように、地下水の流向・流速を測定することは、地下水の挙動を定量的に取り扱う際に極めて重要であることがわかる。

2. 地下水の流向・流速の測定

地下水の流向・流速を測定する方法は、大きく二つにわけられる。一つは、地下水の流向と流速を地表面から電気探査や赤外線温度測定、放射能測定等

表-1 地下水の流向・流速を測定する意義

根切り工事	<ul style="list-style-type: none"> ・現状の地下水分布 ・境界条件, かん養源調査 ・止水工法の設計 ・薬注および凍結工法の効果の評価 ・多層帯水層間の連続性の評価 ・止水壁の漏水確認
自然災害	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防漏水調査 ・伏流水の浸透 ・迂回浸透 ・地すべり地の排水設計
環境保全	<ul style="list-style-type: none"> ・薬液, 泥水の地下水汚染 ・工事中の濁水の水源汚染 ・地下水汚染源の追跡調査 ・汚染物質の拡散調査
水資源	<ul style="list-style-type: none"> ・水源調査 ・かん養源調査 ・地下水賦存量 ・温泉源調査 ・流況調査

による広域の水源・温泉調査や伏流水調査であり、もう一つの方法は、帯水層内のボーリング孔を用いて局所的な地下水の流向・流速を計測する方法である^{1),2)}。

2.1 地表面からの測定

地下水の流向・流速を調査する最も理想的な方法は、地下水にトレーサーを入れて、地表面または空中からその三次元的な流動を測定する方法であるが、まだそのような便利な方法は開発されていない。比抵抗や電磁波トモグラフィーが発達すると、塩水によるトレーサーにより三次元の浸透挙動が計測できるであろう。地すべり地の地下水脈を求めめるために、竹内は1 m深の地温測定によって、浅層地下水の水脈を検出する測定法(地温探査法)を確立している³⁾。しかし、この方法では流速を測定することは不可能である。流速を検出する方法として、地すべり地の

ボーリング孔に食塩水を投入して、流下による流動電位の変化を地表面から検出する流動電位法が伊藤らによって開発された⁴⁾。これによって、トレーサーを投入して、観測井で採水して流向・流速を測定するという従来の方法の不確実性は解決された。この方法は広域にも利用でき平均的な流向と流速が測定できるが、動水勾配が小さく流速の遅い所では極めて長時間の計測が必要となる。また、多層地盤での各層の流向・流速を測定することも難しい。

2.2 孔内測定法

帯水層内に測定井を設けて地下水の流向・流速を求める方法は、多孔法と単孔法に分けられる。

a) 多孔法

対象とする領域に観測井を設けて、各井戸での地下水位を計測して、地下水の等高線を描く方法は、最も一般的な方法である。この方法では、地勢や地層構成、古地図、地下水利用状況、かん養源等の境界条件などを総合的に判断してコンターラインが作成されるべきである。無論、対象としている帯水層は同じものでなければならない。複数の帯水層があれば各帯水層に対して深度方向に多点での水位（水圧）の観測データを集めて、それぞれの帯水層の等高線を描く必要がある。このような等高線より地下水の流向がわかる。地下水解析のモデルの妥当性を評価する際にはこの等高線が基本となるため非常に注意深く描かねばならない。地下水の流速は単孔式透水試験や揚水試験により透水係数の分布を求め、これと等高線の傾斜の動水勾配から Darcy の法則より求める。したがって、流速にしても流向にしてもこの方法では間接的に求めている。

トレーサーを孔内に投入して、観測井より採水して水質調査より流向・流速を求める方法が古くより提案されているが、この方法で成功することは極めて少なく、海外で行われているような高い放射能レベルの物質をトレーサーとして用いない限りはあまりうまくいかない。

b) 単孔法

単孔内の点での流向・流速を計測する方法は、地下水検層での孔内に投入した食塩水が希釈する速度や方向を計測することが発想の基点となって、数種類の手法が開発されている。単孔法は地盤の不均質性が強い我が国独特の方法で、孔内のトレーサーと

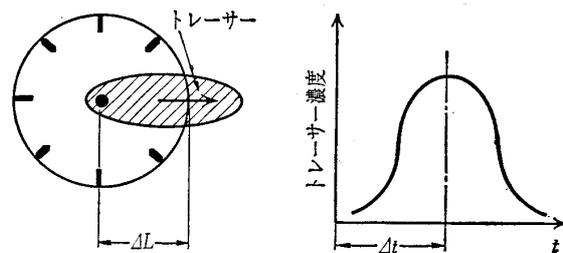


図-1 孔内のトレーサーの移動

して、ほう素、熱、食塩水、蒸留水、散乱粒子、浮遊粒子を用いている。

それぞれの計測の原理は類似しており、図-1のように孔内の周囲あるいは中心に検知器を設けてトレーサーの通過する時間 (Δt) を計測し、検知器間の長さ (ΔL) から流速を求め、最も良く検知された方向より流向を測定している。それぞれの方法の特徴を整理すると以下ようになる^{2),5)}。

1) 中性子検出法：ほう素が遅い中性子をよく吸収することを利用して、指向性中性子水分計を開発して、ほう素の希釈方向と流速を求めている^{6)~9)}。

2) 熱量法(1)：孔内の中心に発熱部、周囲に半導体センサー温度計を設置して、熱の移流を測定して流向・流速を測定する⁹⁾。

3) 熱量法(2)：孔の周囲に発熱部と温度センサーを設置して、熱の移流を測定する¹⁰⁾。

4) 電位差法(1)：孔内にガラスビーズを詰めた区間を作り、蒸留水で飽和させておき、周囲に電極針を設置し、開放後の希釈による電位差の変化から、流向・流速を測定する^{1),2),9),11)~13)}。

5) 電位差法(2)：食塩水をトレーサーに用い、孔の中心に投入し、周囲の電極で流向と到達時間を計測する^{14),15)}。

6) レーザー流速計法：レーザー流速計を孔内に挿入できるようにして、地下水中の散乱粒子の移動を計測することより流向・流速を測定する¹⁶⁾。

7) ボアホールカメラ法：孔内にボアホールカメラを挿入して、その先端の中心に浮遊粒子を投入して、その移動を撮影する。

c) 単孔法での注意点

単孔法は多孔法に比較して直接、流向・流速が計測できるため、極めて有効的な方法であるが、留意しなければならない点がある^{2),5)}。

1) 測定している流速は何か：

技術手帳

孔内の流速を種々の方法で測定しているが、実際に帯水層内を浸透している流速との関連をつけなければならない。計測孔内が空隙の場合には佐野の理論が用いられている¹⁷⁾。また、靱井らはこれを実験的に検証しているが¹⁶⁾、そこでの流速は 1.0×10^{-1} cm/s 以上の値である。実際の帯水層内では、流速が $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ cm/s であり、この程度の流速では、空隙内の温度や濃度勾配あるいは電位差によって自由にランダムに水が移動することが多く、極めて安定が悪い。したがって空隙で計測するより、空隙内に透水性の物を充填する方が安定がよい。透水性物質を充填すると、それぞれに対して、種々のモデル地盤についての補正係数を定めておく必要がある。

2) 平均的な流向が計測できているか：

単孔法では点の流向を計測している。したがって、 $\phi 100$ mm 程度の玉石が存在するような所では、ミクロな流れはいろいろな方向に流れているため、このような所には適用が困難である。多層地盤では、それぞれの帯水層で同じ地点であっても深さ方向のそれぞれの点でいろいろな方向に浸透していることがよくある。

3. おわりに

地下水の汚染が地盤環境で大きな問題となって来ており、地下水の流向・流速を計測することの重要性が増してきている。トレーサーとして人工物だけでなく、天然のトリチウムやラドンなども用いられている。また、地下水の水質調査からも貴重なデータを得ることも多い。しかし、単孔内での計測技術がここ10年間に飛躍的に進歩しており、このような流向・流速データを用いての浸透場の逆解析等の新しい技術も生まれてくると考えられる。

参考文献

1) 小松田精吉・菊池敏則・津田 豊：単一孔で測定できる地下水の流速流向計の開発意義と問題点，原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.131~138，1985。

2) 小松田精吉：流速・流向の測り方，地質と調査，第3号，pp.21~27，1990。
 3) 竹内篤雄：地すべり，地温測定による地下水調査法，吉井書店，産業図書，196 p.，1983。
 4) 伊藤芳朗・斉藤輝夫・市川 浩・南雲政博・川口英雄・竹内篤雄：地下水流速の新しい測定方法の試み，流動電位法，日本地下水学会誌，第26巻，第3号，pp.77~96，1984。
 5) 山本毅史・土谷 尚：新しい現地調査法，3. 透水性を求めるための現地調査法，土と基礎，Vol. 36，No. 5，pp.77~84，1988。
 6) 有泉 昌・山本毅史・土弘道夫：ほう素-中性子水分計を利用した単一井による地下水の流速・流向測定方法，第7回土質工学研究発表会講演集，pp.37~40，1972。
 7) 山本毅史・石谷尹利・土弘道夫：ほう素トレーサー法を用いた単一孔による地下水流動調査，原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.109~114，1985。
 8) 山本毅史・石谷尹利・土弘道夫：ほう素トレーサー法を利用した単一孔による地下水流動調査，土質工学会論文報告集，Vol. 25，No. 3，pp.187~196，1985。
 9) 昭和58年度建設技術評価「地下水流向・流速計の開発」，建技評，第83401号，第83402号，第83403号，1978。
 10) 梅田美彦・西垣 誠：地下水流向・流速計の試作，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.135~136，1988。
 11) 平田洋一・鹿野快男・日野 努：流速流向計L型の原理と特徴について，原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.115~122，1985。
 12) 平山光信：流速流向計L型を用いた地下水調査例，原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.123~130，1984。
 13) 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，土木学会第30回水理講演会論文集，pp.337~342，1986。
 14) 前田都喜春・伊藤恒雄：精密自記流向流速計による地下水流動の水理解析，第28回水理講演会論文集，pp.587~594，1984。
 15) 伊藤恒雄：流動地下水の挙動調査，地質と調査，第3号，pp.73~76，1985。
 16) 靱井和朗・神野健二・上田年比古・本村浩志・平野文昭・本田 保：ボーリング孔内の地下水流れに関する実験的研究，地下水学会誌，第31巻，第1号，pp.13~18，1989。
 17) 佐野 理：多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流，ながれ，2，pp.252~259，1983。

(原稿受理 1991.1.14)