自然界の物理因子を利用した地下水調査法

竹内篤雄*・渡辺知恵子**

Investigation Method of Groundwater using Physical Factor of the Natural World

Atsuo TAKEUCHI * and Chieko WATANABE **

キーワード：1 m 深地温探査、多点温度検層、流向流速測定、自然電位法、地下水流動調査

1. はじめに

地域開発が進むに従い、我々と地下水との関わりはますます複雑になってきている。平地では大雨・集中豪雨による切り土・盛り土などの斜面崩壊、河川増水による堤防破壊、ため池の堤体漏水に悩まされ、山地では長雨・大雨・融雪期に数多く発生する地すべり・山崩れ等の斜面災害に悩まされている。これらの諸災害の原因は、浅層地下水あるいは降水浸透に依存している場合が多い。

また、時代と共に地域開発も進み、大規模な地下構造物建設による浅層地下水の枯渇、化学工場などの排水問題、産業廃棄物に伴う地下水汚染による生活用水の使用制限の問題などが生じている。このように、地下水は我々の生活に対し多岐にわたって多種多様な影響を及ぼしており、高密度化された社会生活の中においては、マクロな考

えだけでは十分に対処しきれない問題が生じてきている。

これまでに多くの研究者・技術者が行ってきた成果を顧みると、地下水は単に地下水層として一様且つ層状に存在する以外に、いわゆる「水ミチ」として水脈状に存在している場合も多いことが指摘されている（竹内：1975）。また、土層区分から一枚の帯水層と見なされる場合においても、異なる水位・水頭を有する何枚かの帯水層で構成されており、それぞれの帯水層が地盤災害・地下水障害に及ぼす影響の度合いが異なっていることも指摘されている。

したがって、先述した諸問題を少しでも現実に近い形で解決しようとするならば、「水ミチ」状に存在する地下水と垂直方向並びに水平方向に何枚か存在する性質の異なる帯水層（これを「層別地下水」あるいは「領域別地下水」と呼ぶ）につ

* 自然地下水調査研究所（ ）

Natural Groundwater Research Institute,

** 株式会社 神陽技研（ ）

Shin'you Geo-engineering. Co., Ltd,

いて、それぞれの現状に合致した詳しい情報を得る必要がある。つまり自然状態における地下水の「あるがままの姿」を知り、それに対して適切な処置を講じることが大切であると考ええる。

これらの問題を解決する一手法として、我々は技術的な解析に際し主観が入りにくく、且つ環境に不要な負荷の掛からない「温度」あるいは自然界に存在している「電気」という物理的因子を用いた地下水調査法に注目した。この調査法はこれまでも様々な試行錯誤がなされ、研究上はかなりの成果が上げられていることは先人の示すところである。しかし、現場の調査手法としてはまだ高い評価を得ていなかったように思われる。ここでは「温度」と「電気」を利用した地下水調査法について紹介する。

2. 温度測定による地下水調査法

2.1 1 m 深地温探査法

(1) 概要

地下浅所（地表面下 1 m）の温度分布状況を詳細に測定することにより、地下水脈（「水ミチ」）の存在場所を推定する手法である。

地中に日変化の影響を受け難い深度 1 m の孔を掘り、その孔底の温度を測定する。1 m 深地温探査は、平常 1 m 深地温（「水ミチ」の影響を受けない場所の 1 m 深地温）と流動地下水の温度との差を利用するため、日本では調査最適時期と不適時期がある。調査対象地域にもよるが一般的には晩春～初夏（5～6月）と晩秋～初冬（11～12月）は不適時期とされている。条件にもよるが、「水ミチ」は地下 15 m 程度まで探査可能である。以下に本調査法の原理、調査計画立案法、測定方法等について簡単に述べる。

(2) 原理

地温測定の原理は、地下浅層を流れる「水ミチ」によって周辺の地温が乱される現象を利用したものである（図-1）。

夏秋季には周辺地温が流動地下水の温度よりも高いために、「水ミチ」直上とその周囲は地温が低くなる方向に乱される。一方、春冬季には逆に周辺地温が流動地下水の温度よりも低くなるために、「水ミチ」直上とその周囲は温度が高くなる

図-1 地下水流脈による平常 1 m 深地温への影響

方向に乱される。

(3) 1 m 深地温探査の実施時期

地温測定調査法は、流動地下水温と平常 1 m 深地温との差を利用した調査法であるため、両者が等しい温度を示す時期にはこの調査法の適用は難しい。過去の長期観測（「水ミチ」の湧水地点の水温と 1 m 深地温）結果によると、1 m 深地温は $\pm 7 \sim 10^\circ\text{C}$ とかなり大きな年変化を示すが、流動地下水の年変化は $\pm 1 \sim 2^\circ\text{C}$ 程度でかなり小さい（図-2）。

図-2 1 m 深地温の年変化と地温調査実施適切時期

表-1 測点網の設定例

調査対象物	測線数・間隔	測点間隔(m)
地すべり	5～20 m	5～10 m
堤防漏水	2～3 測線	2～5 m
ため池堤体	3～5 m	1～3 m
小さな「水ミチ」	2～3 m	1～2 m
小さな伏流水	流動方向に	1～2 m
大規模な伏流水	数本	50 m
トンネル切羽	100 m 1 m	1m: 赤外線放射温度計 1m: 接触型温度計

測点の設定 (測点測量)

観測孔の掘削 (深度1m)

测温体の挿入 (10分間放置)

温度測定

図-3 作業手順フローチャート

1 m 深地温探査結果から「水ミチ」の規模と存在深度を算出するためには、平常1 m 深地温と流動地下水の温度との差は $|2.5|^\circ\text{C}$ 以上あることが望ましいとされている(竹内:1983)。この点を考慮して日本における1 m 深地温探査による地下水流脈調査の可能時期を求めると、2月を中心とした厳寒期と8月を中心とした厳暑期であることが示された。

これらの時期に1 m 深地温探査を実施すると良好な結果を得ることができる。ただ、 $|2.5|^\circ\text{C}$ 以下の温度差で実施した場合でも、地表面の状況(地形、地質、植生など)が非常に均一である場合には、よい結果が得られた例もある(竹内他:1979)。

(4) 測点網の配置方法

「水ミチ」の流動経路をできるだけ正確に推定するためには、調査対象地区に適切な測点網を展開しなくてはならない。これの如何によって調査結果が大きく左右されるため、調査目的を考慮した現地踏査を十分に行った上でこれを決める必要がある。通常は1/1000あるいは1/500の縮尺の地形図を用いて測点網を描く。測点間隔は調査対象物によって左右されるが、最大でも推定される「水ミチ」の流動経路を横断する形で20m、流動経路と平行な方向に10mとする。大規模な河川伏流水を調査する場合はともかく、これ以上の測点間隔の広い測点網を設定しても良好な結果を得ることは難しい。規模の小さい地すべり地の場合は5 m×5 mのように細かい測点網を設定し、長さ50m程度のため池の漏水箇所を調査するような場合には2 m×3 m程度の測点網を設定する場合もある。また地下2～3 mに掘削された集水井の排水孔の存在場所を推定するため1 m 間隔に測点を設けて調査を行い、径10 cmの排水孔の存在場所を明らかにした例もある(竹内:1983)。

次に標準的な測点網の設定に関して、各調査対象分野別に示す。

(5) 測定作業手順

測定作業の手順をフローチャートで示すと下記の通りである(図-3)。

1 m 深地温の測定方法は、決められた測点上に径25mmの半鋼製の鉄棒で1 m 深の孔を穿ち、その後1 m 深地温探査用の测温体を挿入する。

挿入後、約10分経過してからその値を読み取る。測定された値は测温体番号、埋設時間、読み取り時間、地況などと共に野帳に記入する。

(6) 使用機器

使用機器は、1 m 深孔開け用鉄棒類とサーミスタ型精密温度計である(写真-1)。测温体の

写真-1 1 m 深地温測定器一式

A: 測定器 B: 测温体 C: 開孔用半鋼製鉄棒

精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ で、検出部はフルスケール 10°C とし最小目盛 0.1°C 、4段階切り替えで $0\sim 35^{\circ}\text{C}$ まで測定できる。

(7) 解析方法

測定値(温度)には、種々の因子による影響が

図-4 測定値解析手順

含まれている。したがって、これら諸因子の影響の度合いを検討し補正する必要がある(図-4)。

各項目の因子の影響を補正した値を $\theta_{z=1-y}$ 図(各測点における1 m 深地温図)として測線毎に描く(図-5)。これらの図は、地下水流脈の流動経路および水脈の規模を推定する時に用いられる。測線毎の結果を並べてみると、温度の高い部分と低い部分とが系統的に存在していることが示される。

また、これらの値を平面図にプロットし温度分布図として表現する(図-6)。この分布図に対する解釈は、夏秋季であれば低温部に、冬春季であれば高温部に着目し、地形地質構造やボーリング調査等のデータなどを考慮に入れ、地下水流動経路の推定を行う。

図-6 1 m 深地温分布図の例

図-5 $\theta_{z=1-y}$ 図の例

2.2 多点温度検層

(1) 概要

試錐孔内の温度を変化させ、孔内水位以浅並びに以深の地下水流動状況に関する情報を得る検層法である。これを行うことにより、地下水流動層の存在深度、層厚および流動層の性状（不圧層あるいは被圧層など）、概略の流速についての情報を得ることができる。

(2) 原理

自然状態の孔内温度を測定した後、温水注入により孔内温度を自然状態より大きく変化させ、30分程度の温度の回復過程を測定する。地下水が流動している箇所はそれ以外の箇所よりも速く自然状態の温度に戻るため、地下水流動箇所と数およびその厚さについての情報を得ることができる。また、経時的な温度回復状況から、被圧性の地下水・不圧性の地下水などその存在状態に関する情報を得ることも可能である。

(3) 実施方法

試錐孔内に 50 cm 間隔に温度計を設置したセンサーを挿入し、孔内温度に馴染んだ段階で自然状態の温度を測定する。その後、温水などを注入して孔内を昇温する。自然状態から十分に温度が変化した段階で30分程度、孔内温度を測定する（写真-2）。

(4) 解釈の方法

測定結果は「温度-深度」曲線（図-7）および「温度復元率-深度」曲線（図-8）に表現し、復元率の大小で地下水流動層あるいは地下水浸出部の検討を行う。

写真-2 多点温度検層一式

2.3 単孔式加熱型流向流速計

(1) 概要

これまで多数の流向流速計が開発されており、有益な情報を得ているが、大きな問題はセンサーをどの深度に設置するかである。これまでは地質

図-7 温度-深度曲線

図-8 温度復元率-深度曲線

柱状図に基づき測定深度の決定が行われていたが、同一地層内においても地下水の流動状況には大きな差が認められる。この場合、結果の信頼性が問題となる。そこで、まず多点温度検層を行い流動層の存在深度を調査する。次に、流向流速計設置深度を決めるという二段階の手法を取っている。

地下水の流動方向・流速検出部はヒーターと精密測温体で構成され、流動方向は磁気式モジュールで検出している（写真-3）。

写真-3 流向流速測定器一式

また、流向流速の計測を行う場合は十分な孔内洗浄状況と保孔管の開孔率（13%以上が望ましい）が重要な因子となる。

(2) 原理

センサーの中央部にヒーターを設置し、その周囲に8ないし16方向に温度計を配置してある。中央のヒーターに通電した場合、その熱は次のように拡散する（図-9）。

図-9 流向流速測定原理

地下水の流れがない場合はヒーターを中心として、同心円状に温度変化が生じる。流れがある場合は、センサーの上流側では、地下水の流れによって熱が下流側に移流され温度が低下する。そのため、温度変化状況はヒーターを中心として偏芯状になる。この際、一定電圧をヒーターに対して加電しており、発生する熱量は一定である。したがって、地下水の流れの状況（流速）に応じた温度上昇（温度差）が生じる。これらの現象を利用することによって、地下水の流動方向や流速に関する情報を得ることができる。

(3) 流速の求め方

加電前の温度と加電後の温度との差から流速を推定する。一定電圧をヒーターに与えているため、流速が大きいかほど多くの熱が奪われその温度差は小さくなる。逆に流速が小さい場合は、奪われる熱量が小さいため、その温度差は大きくなる。検出された温度差を、開孔率毎に求められた校正曲線に当てはめて流速を算出する（図-10）。なお、地下水流速の測定範囲は $1 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ である。

図-10 温度差-時間曲線

(4) 流動方向の求め方

任意時刻における各センサーの温度分布を描き、高温部・低温部を検出する。地下水の流入する側は低温部を示し、下流側は高温を示す傾向があることから流向を判断する（図-11）。

2.4 注意点

(1) 孔内洗浄

地下水調査を始める前に、十分に孔内を洗浄す

図-11 任意時刻における等温線図

る必要がある。例えば、掘削時に形成された泥壁の存在や目詰まり等によって地下水流が遮断されている場合は正確な流動層の情報は得られない(竹内・渡辺:2004)。

(2) 開孔率

流向流速測定の際、孔内の地下水流がストレーナの位置に左右されないよう、開孔率は13%程度で穴が千鳥に配置してあるのが良い。

3. 自然電位法

(1) 概要

自然界には様々な原因によって生じる小さな電位が存在している。この中に地下水の流動によって生じる電位変化がある。この小さな電位変化を捉えることによって、地下水に関する各種の情報を得ようとするものである。

(2) 測定方法

電位変化測定法は大きく分けて2種類ある。移動電極法と電極埋設法である。前者は「水ミチ」の平面的な分布状況を把握するために行われ、後者は地下水の流動方向と流速に関する情報を得るために行われる。

3.1 移動電極法

一対の電極を一定間隔に保ちながら、移動させて測定する(図-12)。

電極間隔は調査対象によって異なるが、精度の

図-12 移動電極法

高い結果を望むのであれば、1～2 m程度の電極間隔で測定する必要がある。測線上に「水ミチ」が存在する場合は、特有の電位変化が生じる(図-13)。

図-13 自然電位接地法測定例

3.2 埋設法

主に地下水流向流速調査や堤体漏水確認調査に用いられている。自然電位を長時間連続記録する手法で、一方向に一対の電極を任意の測点あるいは試錐孔を中心として数組埋設する。試錐孔内には地下水流動層を対象として、電解質溶液(一般的には飽和塩水溶液)を注入し、溶液の流動方向と流速を埋設された各電極の電位変化から推測する(図-14)。これは流動電位法の中の一手法である。

また、河川・堤体漏水調査では流動方向に加えそれに直交する方向に電極を埋設して測定を行う。その結果をベクトル合成することで流動方向の変化を検出する(図-15)。

図-14 流動電位法測定例

図-15 ベクトル合成図

3.3 注意点

自然界に存在する微弱な電位変化が調査対象となるため、都市部における測定では人工的なノイズが多く、また金属物が埋設されている箇所ではその影響を受ける。

4. まとめ

上記に述べたように、自然界に存在している「温度」と「電気」という物理的因子を用いた各種調査を実施することにより、「あるがままの地下水の姿」を、定量的かつ三次元的に把握することができるのではないかと考える。

5. 今後の展望

今回述べた諸手法は、当初地すべり地を対象として適用されてきた。その後、多くの方々のご理

解とご協力により、河川堤防基盤漏水、ため池堤体漏水、トンネル湧水、河川伏流水、水資源調査などにその適用範囲が拡大され、最近では社会的な問題となっている地層汚染・地下水汚染分野にまで適用範囲が広がりを見せてきている。また、特殊な適用例としては、樹木の生育と「水ミチ」の関係、あるいは草や特殊の草と「水ミチ」の関係などの調査例も増えてきている。

このような状況から判断すると、今回紹介させて頂いた調査手法が今後どのような広がりを見せるか非常に興味あるところである。

今後とも計器の改良・計測法の改善に力を尽くすと共に、調査精度とその信頼性の向上に努めて行くことが大切であると考えます。

参考文献

- 竹内篤雄 (1975): 地すべり活動に対する地下水流脈の役割について、応用地質、第16巻第3号、115-125.
 - 竹内篤雄・内藤光雄・松浦健二 (1979): ある切り取り斜面に認められた地下水流脈の路頭と1 m 深地温との関係について、第14回土質工学研究発表講演集、1061-1064.
 - 竹内篤雄 (1983): 地すべり 地温測定による地下水調査法、吉井書店、35-37、134-137.
 - 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法、古今書院、278-342.
 - 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法、古今書院、343-366.
 - 竹内篤雄・渡辺知恵子 (2004): 孔内洗浄の必要性、地下水技術、第46巻第4号、1-12.
 - 伊藤芳朗・楠見晴重・竹内篤雄 (1998): 斜面調査のための物理探査—地すべり・地下水・岩盤評価、吉井書店、106-134.
 - 竹内篤雄・中山健二・渡辺知恵子 (2001): 温度を測って地下水を診断する—あるがままの地下水の姿を探る、古今書院、125-134.
 - 竹内篤雄・中山健二・渡辺知恵子 (2001): 温度を測って地下水を診断する—あるがままの地下水の姿を探る、古今書院、32-39.
- (受付: 2005年2月17日、受理: 2005年6月11日)