

現場浸透試験実施事例

株式会社東建ジオテック 長谷川 亮典

1. 調査の経緯

愛知県某所の 160m×70m 程度の敷地に 40m×20m 程度の雨水貯留槽の設置が計画されていた。当初は、3 箇所実施のボーリング孔の内の 1 孔を利用した現場透水試験を指示され、実施を予定していた。

ところが、現場着手前に「現場浸透試験」の実施を指示された。

2. 現場浸透試験について

(1) 雨水浸透阻害行為について

宅地や商業施設に造成される前は、雨水は地下に浸透し、地表を流れる水は抑制されていた。しかし、開発行為によりコンクリートなどに土地が覆われたことで、短時間に多量の地表水が河川へ流入するようになった。これらの開発行為のことを雨水浸透阻害行為という。

この地表水の増加を抑えるために、ある一定規模（愛知県は 500m² 以上、国土交通省や東京都や大阪府では 1000m² 以上）の開発を行う場合、雨水浸透阻害行為許可の判断し、許可の申請が必要とされた場合、雨水を貯留・浸透させる対策の実施が必要となる。許可対象となる阻害行為は、宅地以外の土地を宅地などにする行為である（表-1）。

表-1 雨水浸透阻害行為にあたる土地の一例

宅地以外の土地	宅地等に含まれる土地
山地・林地・耕地・草地 締め固められていない土地	宅地・道路・池（ため池） 水路・鉄道線路・飛行場

(2) 現場浸透試験とは

本調査で基準としたものは、「雨水浸透阻害行為許可等のための雨水貯留浸透施設設計・施工技術指針（新川・境川（逢妻川）・猿渡川流域編）（愛知県）¹⁾」であるが、その中に、「浸透試験の設計に使用する単位浸透量（単位設計浸透量）は、日浸透量に土壤の飽和透水係数と各種影響係数を乗じて算定する（資料-1 参照）」とある。この中の飽和透水係数を求めるための試験が、現場浸透試験である。

資料-1 設計に使用する浸透施設の浸透量の算定方法¹⁾

浸透施設の設計に使用する単位浸透量（単位設計浸透量） Q は、比浸透量 K_f に土壤の飽和透水係数 k_0 と各種影響係数 C を乗じて算定するものとする。
また、比浸透量 K_f は、現地透水試験結果を参考に、浸透施設の形状と設計水頭をパラメータとする簡便式を用いて算定する。

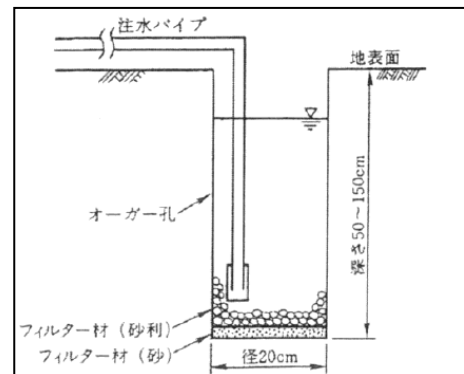
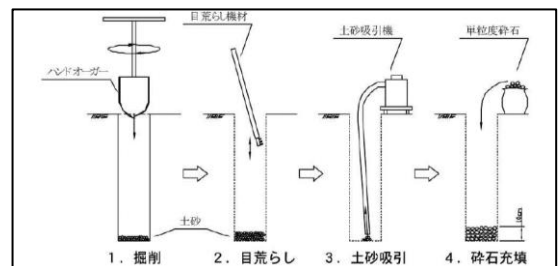
施設の単位設計浸透量 Q
 $=$ 比浸透量 $K_f \times$ 飽和透水係数 $k_0 \times$ 各種影響係数 C

Q : 設計に用いる浸透施設単位 (1m、1 個あるいは 1 m²) 当たりの浸透量 (m³/hr)
 K_f : 浸透施設の形状と設計水頭により簡便式で算出した比浸透量 (m)
 k_0 : 土壤の飽和透水係数 (m/hr) ← 現場透水試験で求められる値
 C : 各種影響係数

なお、現場浸透試験の実施方法は、「雨水浸透施設技術指針（案）調査・計画編（公社）雨水貯留浸透技術協会²⁾」を参考にしている。

(3) 現場浸透試験方法

「雨水浸透阻害行為許可等のための雨水貯留浸透施設設計・施工技術指針（新川・境川（逢妻川）・猿渡川流域編）（愛知県）¹⁾」で記載のある、現場浸透試験の試験施設と作成手順、試験状況の手順・概要を図-1～図-3に示す。

図-1 ポアホール法で用いる試験施設¹⁾図-2 ポアホール法で用いる試験施設作成手順¹⁾

(iv) 定水位注水法の手順

- イ) 実施施設の設計湛水深に相当する水位まで注水し、初期条件とする。
- ロ) 水源からの注水量を調整し、上記湛水深を維持する。
- ハ) 経過時間毎に流量計などで注水量を測定する。測定時間間隔は 10 分間隔を目安とするが、変化の著しい場合には間隔を細かくする。
- ニ) 注水量がほぼ一定になるまで、ロ)～ハ) を継続する。試験継続時間の目安は 2 時間程度である。

図-3 浸透試験状況概要¹⁾

図-1で示した試験孔は、図-2で示したように以下の手順で作成する。①ハンドオーガー等で掘削②熊手などで孔壁の目荒らし③掃除機により土砂を吸引④フィルター材として砂・砂利を充填。

試験手順は、図-3に示すとおり、試験に使用する水は、蛇口などから採水し、バルブで流量を調整しながら、経過時間ごとの注水量を流量計で測定する。

これらを実施する前には、①掘削径・深度（表層から何mまでの深度で試験を実施するか）と②設計湛水位（設置する施設にためる水の水位）を設計者に確認しておく必要がある。

また、現地作業時の注意点として、①試験に必要な面積（20m²程度以上）が確保できるか②近くに使用できる水源があるか③浸透を阻害する地下埋設物が近くにあるか④実施する位置の地層が浸透地盤を代表しうる位置かどうか、などを確認しておく必要がある。

なお、本論文で紹介する現地観測は、透水性のよい地盤ではなかったため、①蛇口などの水源は必要なく、200Lタンクで持参した水で対応した②水源を使用していないことで、流量計も使用せず、流入量の分かるビーカーを使用して試験を実施した。

3. 調査結果

(1) 地形地質概要

調査地は、丘陵地上に位置しており、表層から粘性土をやや多く混入する砂礫層が確認される地域であった。

これは、ボーリング調査結果でも確認されている。

(2) 現場浸透試験結果

現場浸透試験結果について、図-4内に示す算定式より、試験孔の浸透能力（土壌の飽和透水係数 k_0 ）を算定した。

飽和透水係数は、浸透試験結果から得られる試験施設の形状と湛水深に対応した最終浸透量をもとに算定される。

このように測定結果を飽和透水係数に換算することによって、種々の条件下の浸透試験結果を同一の指標で評価することが可能となる。なお、湛水深（H）は碎石を設置した深度（GL-1.0m）からの立ち上がりとした。

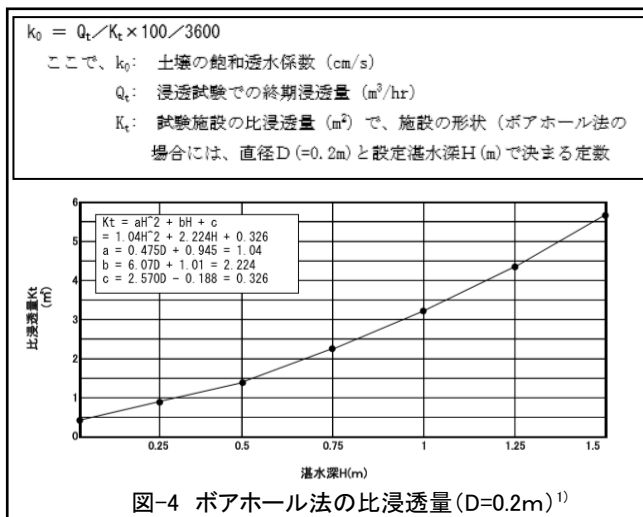


図-4 ボアホール法の比浸透量(D=0.2m)¹⁾

本調査では、2箇所試験を実施し、そのうちの1箇所の結果をまとめたものを表-2・図-5に示す。

試験結果と試験施設から求められる定数から、飽和透水係数は、 $k_0 = 1.3 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$ （平均 $k_0 = 1.5 \times 10^{-6}$ ）(m/s)と算出された。

表-2 現地浸透試験ボアホール法注入法結果まとめ表

調査地点	浸透試験-1
浸透面の土質	シルト質砂礫
湛水深 H (m)	1.00
最終浸透量 (L/min)	0.28
最終浸透量 Q_t (m ³ /hr)	0.0168
施設直径 D(m)	0.20
a	1.040
b	2.224
c	0.326
試験施設の比浸透量 K_t (m ²)	3.590
飽和透水係数 K_0 (cm/s)	0.00013
飽和透水係数 K_0 (m/s)	0.000013

試験により
←求める値
←試験孔により
決まる値

←解析結果

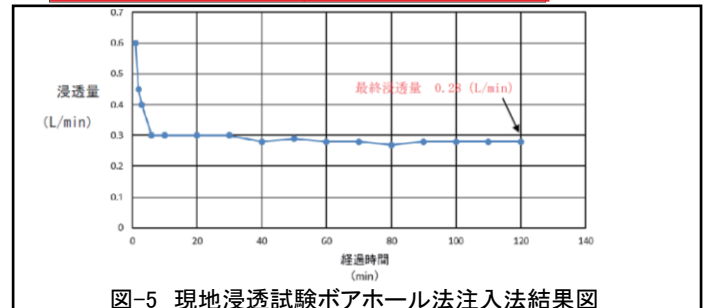


図-5 現地浸透試験ボアホール法注入法結果図

4. 本業務での結論と学んだこと

(1) 結論

本試験で調査地の表層1m程度までの飽和透水係数は、平均 $k_0 = 1.5 \times 10^{-6}$ (m/s)程度を示した。この値は、この地域一帯の一般値として本調査で用いた指針内で記載のある $k_0 = 0.01$ (m/hr) $= 2.8 \times 10^{-6}$ (m/s)よりも小さい値を示した。

地形地質的な特徴から、試験前の段階である程度予想はされていたが、地盤に粘性土の混入が多かったことで、一般的な透水性よりも小さい値を示す結果となった。

また、粘性土の混入量にややばらつきのある可能性も考えられるため、本調査結果と土質のばらつきを踏まえて、浸透施設の設置・設計をされたいと設計者に注意を促した。

(2) 反省点と学んだことおよび今後の課題

- ①本業務が、現場浸透試験に関わる最初の事例であった。そのため、試験の現場実施および解析に関しては、全く無知であり、実施したすべてのことがよい経験となった。
- ②今回実施した調査地は、透水性が小さかったため、蛇口などの水源から大量に水を送る必要はなかった（実際に使用した水は50L/1箇所程度）。しかし、今後透水性の大きな地盤（粗い砂や砂礫）で実施する場合は、水源の確保は確実に必要であると感じた。
- ③今後は同じような地盤で、現場浸透試験の結果が、現場透水試験結果や粒度試験から推定される透水係数との関連について考察することで、調査手法の幅が広がる可能性があると感じた。

《引用・参考文献》

- 1) 愛知県建設部河川課：雨水浸透阻害行為許可等のための雨水貯留浸透施設設計・施工技術指針（新川・境川（逢妻川）・猿渡川流域編）設計資料編,p.2-44～2-48,2017.10
- 2) 雨水貯留浸透技術協会編：雨水浸透施設技術指針（案）調査・計画編,2019.11

岩盤中における帯水層の評価事例

株式会社エイト日本技術開発 ○東原 壮汰、原 伸匡、花木 勇太、大嶋 篤

1. はじめに

花崗岩類及び安山岩類の分布する地域において、新たな水源確保を目的として、新設井戸が計画された。

本稿では、地表地質踏査や高密度電気探査等の結果に基づき、周囲の水理地質を把握した上で、岩盤中の地下水脈及び、帯水層の評価を行った。

2. 調査の流れ

岩盤中における帯水層の評価を行う方法としては、まず、既往資料や地形・地質情報から水源候補となる地点を選定し、現地確認により電気探査測線の位置を決定した。電気探査実施後、その結果に基づき、水源候補地を選定し、調査ボーリング、現場透水試験、電気検層を行い、岩盤中の帯水層を評価した上で、最終的な井戸の掘削深度及び有孔管の位置を決定した。

図-1に調査フローを示す。

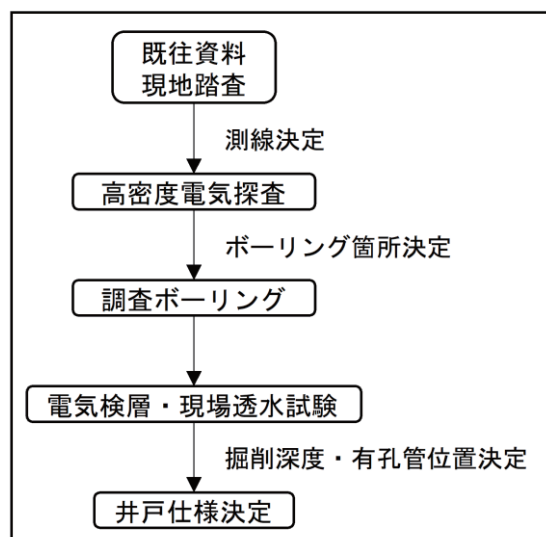


図-1 調査フロー

3. 高密度電気探査

(1) 調査方法

電気探査とは、地盤を構成する物質の電気的性質の相違を測定することにより、地盤状況や地層の性状を把握する方法である。特に、人為的に地盤に電流を流し、地盤の電気比抵抗分布を測定する方法を比抵抗電気探査と呼ぶ。求められた地盤の比抵抗分布により、帯水層の厚さや深さを推定する。

本調査では、地盤及び地下水性状を把握することを目的とし、2極法電極配置による測定を実施した。

(2) 測線位置の選定

電気探査測線の位置の選定は、既往資料や現地踏査から得られる地形・地質情報によって、1測線(測線長:400m、

電極間隔:5.0m)を選定した。

(3) 電気探査結果

電気探査の結果、得られた比抵抗断面図を図-2に示す。

①Ⅰ層は比抵抗値2000[ohm-m]以上の高比抵抗を主体とする崖錐堆積層で主に右岸の急傾斜面と左岸の段丘面にも分布する。極めて高比抵抗値であることから空隙が多く、飽和していないものと考えられる。

②Ⅱ層は比抵抗値600~2000[ohm-m]を示す中位比抵抗域で右岸の急傾斜面の地下に広く分布する。比抵抗値の分布は概ね均質であるが、河床付近から測線起点方向にかけて1000[ohm-m]以下の低比抵抗域へ漸移する。岩盤の亀裂の発達や地下水の浸透によるものと考えられる。

③Ⅲ層は比抵抗値300~500[ohm-m]を示す低比抵抗域で、河床部と測点140m付近の深部を中心に分布する。この低比抵抗域はある程度広範で、岩盤部の亀裂帯はもとより地質境界の不連続に起因する比抵抗表現と推察される。Ⅰ層、Ⅱ層に比べて、地下水胚胎の可能性が期待されることから、水源候補地として選定する。

④上記以外で比抵抗値200[ohm-m]以下を示す低比抵抗域で測線起点側の平坦面の地下に水平に分布する。比抵抗値と周辺のボーリング結果から概ね未固結の土層で粘性土主体の状態と考えられる。

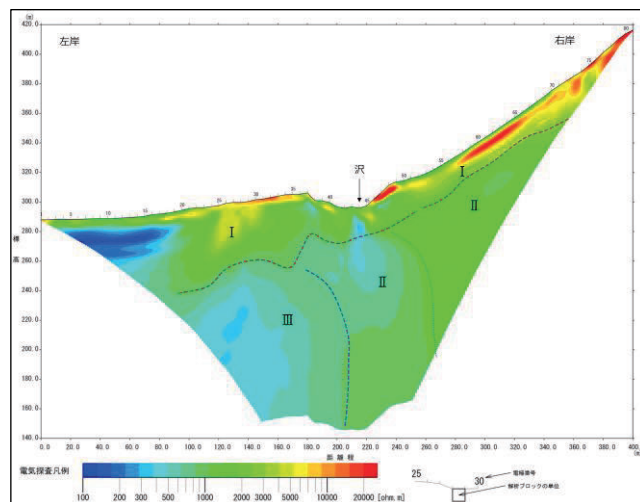


図-2 比抵抗断面図

4. 調査ボーリング

水源候補地で実施した鉛直ボーリング(掘進長:150m)の結果より得られた推定地質断面図を図-3に示す。

(1) ボーリング結果

ボーリングの結果、概ね軟質で破砕された安山岩質の岩盤が連続し、所々硬質な岩盤が出現する。

なお、透水区間については、弾性波探査より得られる低速度帯及び地表地質踏査結果による地層の傾斜から推

定し、ボーリングにより確認された区間を第1透水区間、電気探査による推定区間を第2透水区間とした。

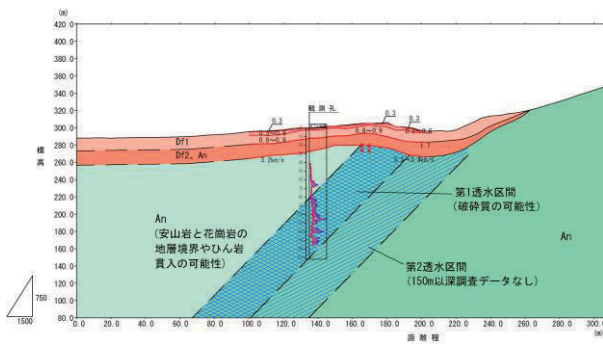


図-3 推定地質断面図

(2) 電気検層・現場透水試験結果

電気検層及び現場透水試験の結果より推定される帯水層の分布を図-4に示す。電気検層区間は GL-40～135m、透水試験は GL-60～120m 間で行っている。

GL-40～80m は、電極間の比抵抗値に差がなく、概ね難透水である。GL-80～100m は、電極間の比抵抗値に差が出始めるが顕著ではなく、やや透水性のある地層である。GL-90m での透水試験の結果は、 $6.5 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 。GL-100m 以深は、電極間の比抵抗値の差が明瞭に表れる。GL-120m での透水試験の結果は、 $2.3 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 。GL-120m 付近から地下水の流動区間が大きくなる。

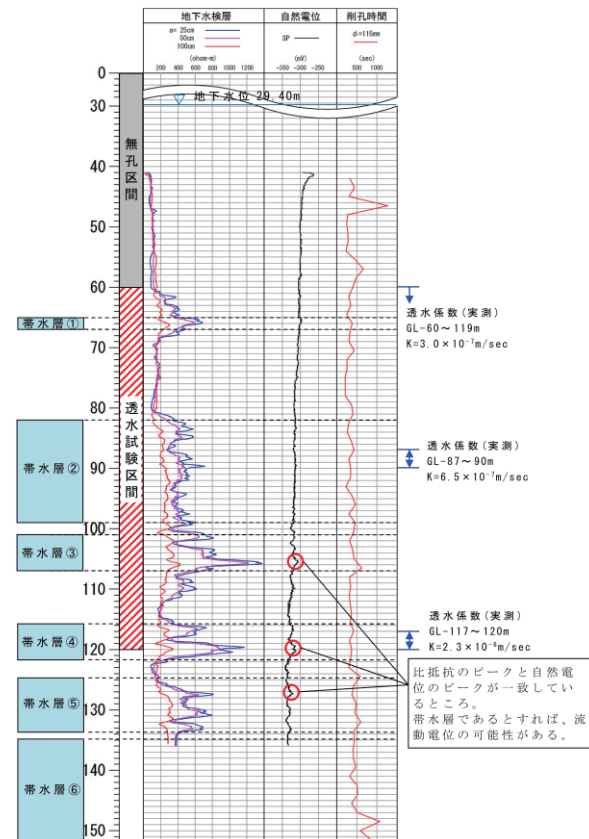


図-4 帯水層の分布

(3) 取水量の見込み

透水性のある帯水層としての可能性が高い帯水層③以深の帯水層を対象に取水量を計算する。GL-135m 以深については、比抵抗値がないため、半分の割合で帯水層が

分布すると仮定する。水位低下量については、湛水深さに対して3割を想定する。

井戸深さを210m とすると224L/分となり、連続揚水量を70%目安とすると、取水量は156L/分と推定される（表-1）。

表-1 取水量の見込み

項目	帯水層③ 101.0m～107.0m	帯水層④ 116.0m～122.0m	帯水層⑤ 126.0m～134.0m	帯水層⑥ 135.0m～210.0m
平衡水位 (GL-m)	29.4	29.4	29.4	29.4
帯水層厚 (m)	6.0	6.0	8.0	37.5
水位下端 (m)	83.6	83.6	83.6	83.6
透水係数 (m/sec)	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}
水位低下見込み量 (m)	54.2	54.2	54.2	54.2
推定取水量 (L/min)	23.3	23.3	31.1	145.8
備考	GL-120mの透水係数 $\times 0.65$	GL-120mの透水係数 $\times 0.65$	GL-120mの透水係数 $\times 0.65$	半分の区間で帯水層と想定 GL-120mの透水係数 $\times 0.65$

5. 本井戸

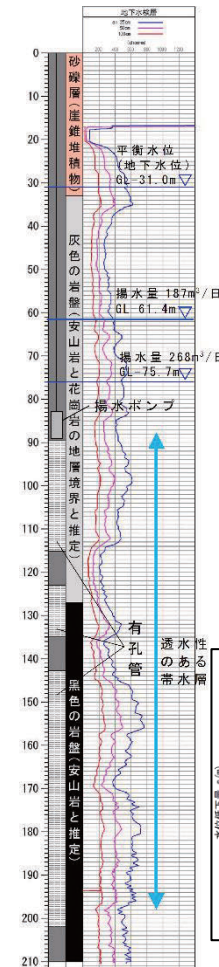


図-5 本井戸

本井戸（井戸深さ:210m）は、観測孔より5m 谷側の位置に設置した（図-5）。地下水位はGL-31m、透水性のある帯水層はGL-91m 付近から現れ、GL-202m 付近まで断続的に続く。透水性のある帯水層を対象に延長96.75m の有孔管を設置した。段階揚水試験の結果（図-6）、明瞭な限界揚水量（急激な水位の変化点）は確認できなかったが、186L/分で水位の変化量が変わり始めていることから、186L/分を限界揚水量とする。連続揚水量は、限界揚水量の70%を目安とすると130L/分となり、取水量の見込みと概ね一致した。

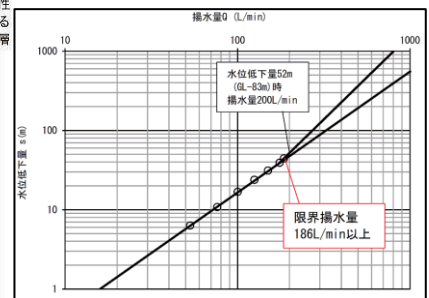


図-6 段階揚水試験

6. まとめ

深井戸による水源確保では、費用が高額になる場合が多く、確実な水量が求められる。そこで、電気探査、電気検層、現場透水試験等の結果を総合的に評価することで、高い精度で水量を推定することが可能となる。

課題点は、調査ボーリングを実施した区間において、確実に調査を行うことが出来れば、調査精度をさらに高めることができ、より確実な水量の推定が可能になると考えられる。

地下ピット浸水対策における地質調査の実施事例

(株)日さく ○小山祥代, 佐藤俊介, 長谷川智史

1. はじめに

地下ピット浸水を防止するために対策井戸(ディープウェル)での揚水を行っている。今後の対策方針の検討にあたり、周辺地下水の自然水位やピット侵入水の由来を把握するための地下水調査を実施した。

2. 対策井戸の概要と調査経緯

東日本大震災後、降雨により建屋の地下ピット内に浸水がみられたため、応急対策として、建屋外周に DW1～DW7の7本の対策井戸¹⁾を設置し、地下水の揚水を実施した。対策井戸は、主に沖積層(Ac層・Ap層)から取水している DW2、DW5(Aグループ)と洪積砂礫層(Dg層)までを取水対象とする井戸(Bグループ)に分けられる。ポンプの運転は、井内に設置した運転開始センサ、運転停止センサにより制御している。対策実施後、ピット浸水はなく、一定の浸水防止効果が確認されている。一方で、応急対策であったことから、ポンプの運転状況や地下水位は十分把握されておらず、過剰な揚水も懸念されたため、今後のメンテナンスや対策を検討するための調査を行った。

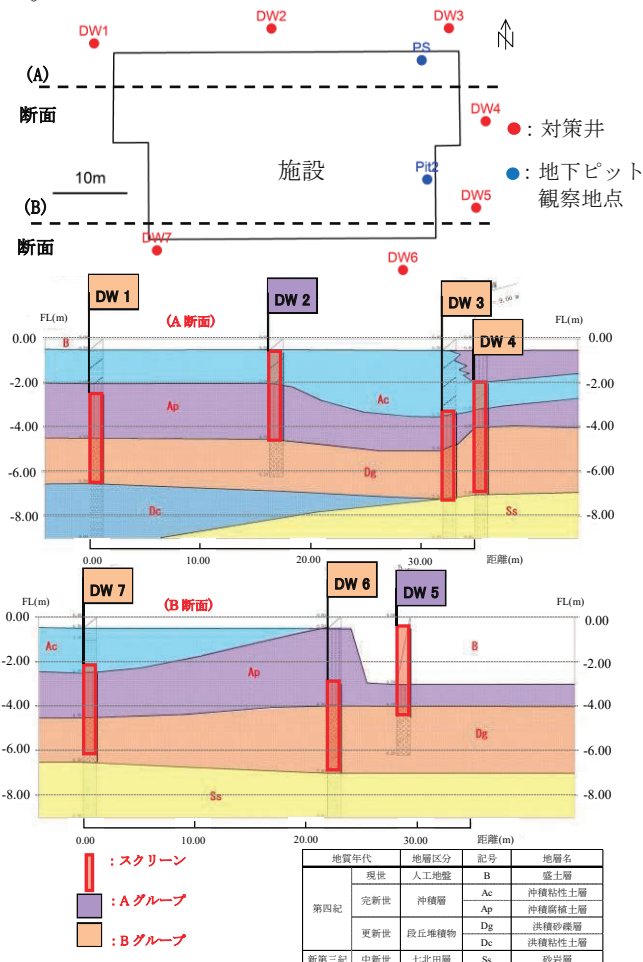


図-1 位置図および各井戸の地層断面図

3. 調査項目

(1) 自記水位計による地下水観測

ポンプ運転による水位変動の確認ため、対策井戸7か所および浸水が生じた地下ピット2箇所(PS、Pit2)を対象に自記水位計を設置し、地下水位の連続観測を実施した。また、自然水位把握のため、ポンプ停止時の水位を測定した。

(2) 水質分析

ピット内水の由来を把握するため、水質分析を実施した。洪積層対象としてBグループのDW3、DW7、沖積層対象としてAグループのDW5で水質分析を実施した。地下ピット湧水は常に認められるわけではないため、参考として、地下ピットのPit2内の溜水についても水質分析を実施した。なお、採水及び水質分析は8月に実施した。

分析項目は、pH、電気伝導度、鉄、亜鉛、主要イオン8項目とした。

4. 調査結果

(1) 地下水位観測結果

① ポンプ運転時の水位

運転開始水位センサが自然水位以上である DW2、DW5は降雨時²⁾のみ稼働し、センサが自然水位以下であるその他の井戸は常時稼働している(図-2中のa))。

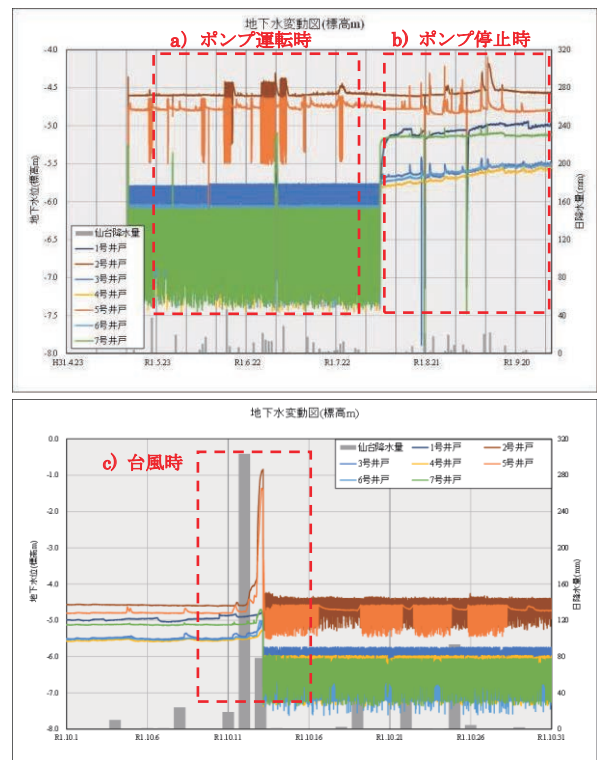


図-2 地下水変動図

② 自然水位

ポンプを停止させ、自然状態での水位を把握した(図

2中のb))。自然水位の測定から、Bグループの地下水は、西から東へ流動している(図-3)。なお、通常時と台風による集中的な降雨時とで、流向に変化はみられない。

Aグループについても、西側のDW2の水位がDW5より高いため、地下水流動方向は西から東であると推定される。両グループとも、地下水流動方向に季節変化はみられない。なお、Aグループは降水時以外の水位変動に乏しく、水位はスクリーン下端に位置することから、定常的には泥溜り管の孔内滞留水となっていると考えられる。

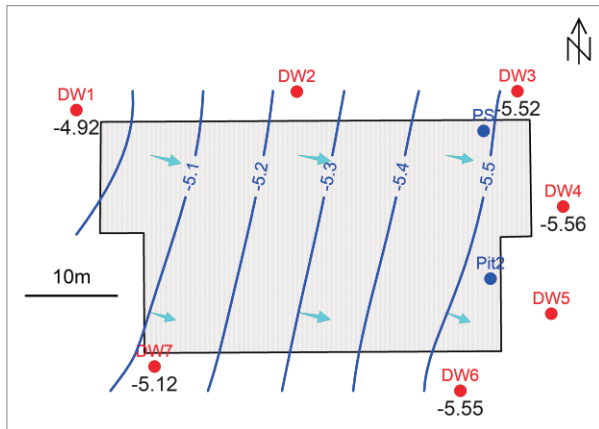


図-3 地下水位等高線図(R2.10.10台風前:Bグループ)

当該地の旧地形は谷地形であり、谷の中軸部の方向は、地下水流動方向と概ね一致することから、旧地形に沿って地下水が流動していると考えられる。

③台風降雨時の水位

令和元年(2019年)10月の台風時に地下ピット PS において浸水が見られた。この際にピット底板まで水位が上昇した井戸は、DW2、DW5のみである。浸水確認後、全対策井戸が稼働し、浸水は停止した。その後、地下ピット内に残留した水はポンプにより排水を行った。

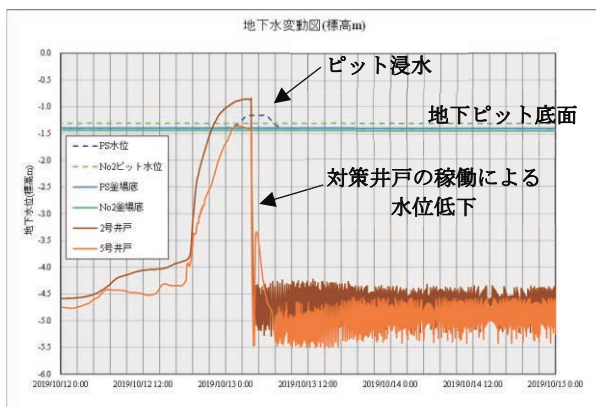


図-4 地下ピット浸水発生時の地下水変動図

(2) 水質分析結果

DW3、DW7と比べて、Aグループに属するDW5の鉄の含有量が少ない。また、井戸内の酸化物の付着量もDW2、DW5で少ない傾向にあることから、洪積層よりも沖積層で鉄の含有量が少ないことが考えられる。一方、地下ピット

のPit2の溜水も鉄が少なく、浸水後の酸化鉄(赤錆)などは確認されていないことから、ピット浸入水には鉄が少ないと考えられる。これらの点から、地下ピットの水がDW2、DW5と同様の鉄分に乏しい沖積層中の地下水に由来する可能性が考えられる。

表-1 水質分析結果

地点	地下ピットNo2	5号井	3号井	7号井
採水日	2019.8.21	2019.8.21	2019.8.21	2019.8.21
pH	9.4	7.2	6.8	6.7
電気伝導度	468	54.2	34	42.9
鉄	0.05	1.98	12.9	13.1
マグネシウム	25.1	8.6	6.1	4.8
ナトリウム	922	23.5	19	30.2
カリウム	442	11.6	4.8	15.6
カルシウム	9.8	73.9	38.2	42.5
炭酸水素イオン	1780	209	96	104
硫酸イオン	544	28.9	15.3	32
硝酸イオン	23.9	1.1	3.3	1.9
亜鉛	<0.1	0.7	0.2	0.3
塩化物イオン	54	35	33	39

5. 考察

水質分析結果と自然水位から、DW2、DW5に代表される沖積層の地下水が地下ピットに侵入していると考えられる。ただし、DW2、DW5に代表される沖積層の地下水は定常的にピット底面よりも低く、地下ピット内浸水が懸念されるのは、降雨時のみである。

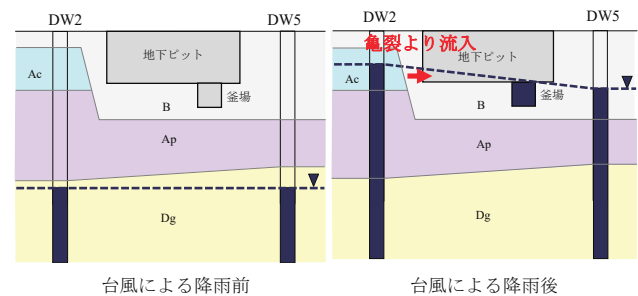


図-6 台風流入前後における地下水流入の模式図

6. まとめ

令和元年(2019年)の台風19号通過時の地下水ピット浸水における地下水位変動および水質の比較から、地下ピットに侵入する地下水は沖積層の地下水(Aグループ)に由来する可能性が高い。

A、Bグループの井戸はともに、無降雨時の水位は地下ピット底板以下であり、降雨時に水位が地下ピット底板より高くなる地点はDW2、DW5(Aグループ)のみである。そのため、DW2、DW5の運転については、浸水防止効果があるため運転条件は現状通りとした。他の井戸については、無降水時には過剰な揚水となっていることから運転水位の引き上げを提案した。

《引用・参考文献》

- 1) 液状化対策の調査・設計から施工まで(1997,6,10,地盤工学会),3.3章ディープウェル工法,p.285-298.
- 2) 気象庁ホームページ 過去の気象データ(降水量)
(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>)

主成分分析による地下水の水質特性の把握

株式会社エイト日本技術開発 ○花木 勇太、原 伸匡
風見 健太郎、大嶋 篤

1. はじめに

主成分分析は、多くのデータを統計解析することでデータがどのような傾向があるか整理することが出来る検討手法である。主成分分析は多くのデータを処理し、得られた結果により総合的に解釈することが出来る。

トンネル施工箇所付近の井戸や湧水で実施された施工前後の水質分析結果を用いて主成分分析を実施した結果、水質の変化が認められたため、以下にその事例について報告する。

2. 調査概要

(1) 調査目的

本調査は、水質試験結果を用いて主成分分析を実施し、トンネル施工前の水質特性を把握し、施工影響による水質特性の変化を把握するものである。

(2) 使用データ

ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム、硫酸、炭酸水素、塩化物各イオン、pH、電気伝導率 (Ec) の水質分析結果を用いて分析を行う。

(3) 分析手法

主成分分析は図-1に示すとおり、ばらつきの大きい散布図があり、新たに分散が最大（ばらつきが大きいところ）となるように軸Aを引く、次に軸Aに直角になるように軸Bを引くことにより新たな相関性を得ることで、データに最大限の意味を与える手法である。

地下水については、その水質に着目した場合、地下水成分がどのような傾向を示すのか統計手法を用いることで多量のデータを分かりやすく表現するために用いられる。

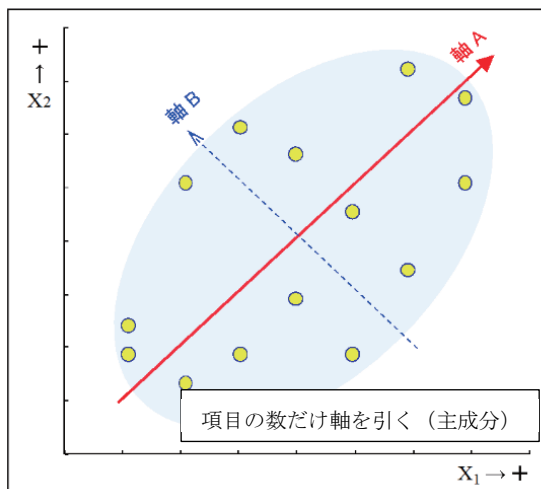


図-1 主成分分析について

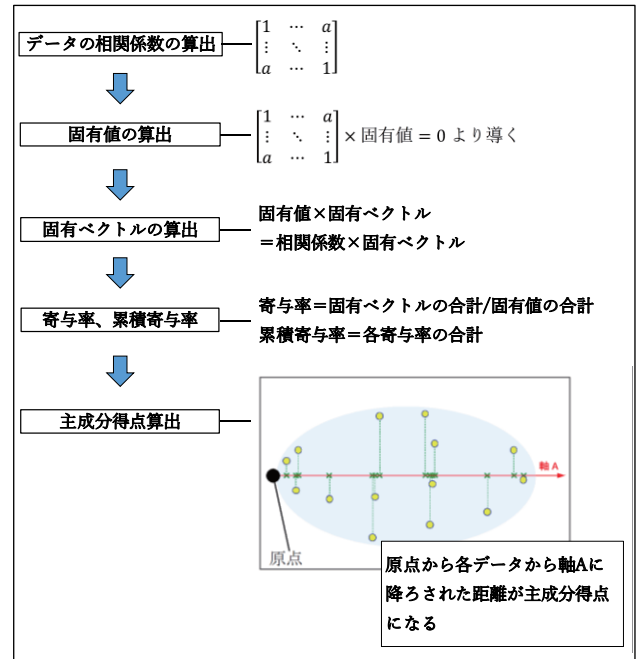


図-2 主成分分析の方法

3. 分析結果

トンネル施工に伴う地下水への影響を推定するために施工箇所周辺の井戸や湧水の施工前後の水質分析結果を用いて主成分分析を実施した。

主成分分析結果から得られた固有ベクトル（各主成分の性質）、固有値（各主成分が有するデータ数）、寄与率（各主成分がデータを表現できる割合）、累積寄与率を表-1に示す。表-1（第6主成分以降は省略）に示すとおり、第2主成分までで全データの約70%を表現できる結果となった。

表-1 固有ベクトル、固有値、寄与率、累積寄与率

固有ベクトル	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	第5主成分
ナトリウムイオン	0.237	0.387	0.483	0.460	0.371
カリウムイオン	0.173	-0.593	0.186	0.416	-0.570
カルシウムイオン	0.391	-0.090	-0.083	-0.501	0.027
マグネシウムイオン	0.339	0.019	-0.538	0.150	0.086
硫酸イオン	0.246	-0.249	0.602	-0.424	0.149
炭酸水素イオン	0.423	0.176	-0.205	-0.110	-0.059
塩化物イオン	0.397	-0.171	-0.069	0.380	0.298
pH	0.225	0.599	0.166	-0.013	-0.643
Ec	0.446	-0.093	-0.007	-0.073	-0.030
固有値	4.810	1.521	1.079	0.874	0.397
寄与率	53.45%	16.90%	11.99%	9.72%	4.41%
累積寄与率	53.45%	70.35%	82.34%	92.06%	96.47%

4. 考察

(1) 第1主成分

図-3、図-4に示すとおり、第1主成分の固有ベクトルは、塩化物イオン、炭酸水素イオン、硫酸イオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、カリウムイオン、ナトリウムイオン、Ec がプラス側であり、第1主成分得点とEc は正の相関となっていることから、第1主成分得点は岩石からの溶出特性を示しており、得点が高いほど地下水、低いほど表流水起源であると考えられる。

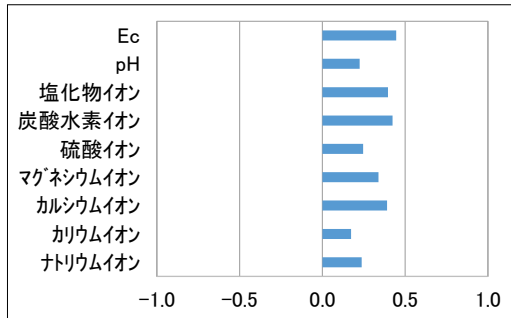


図-3 第1主成分の固有ベクトル

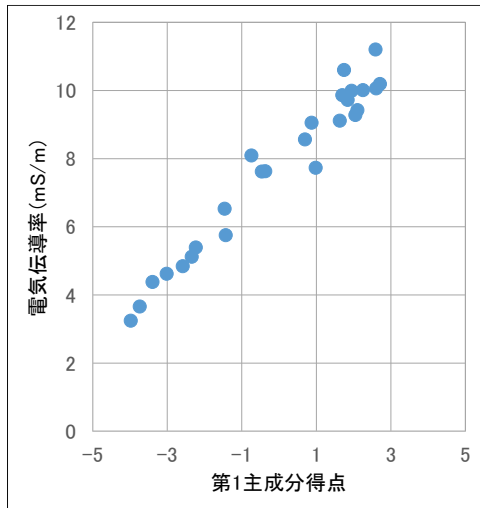


図-4 第1主成分得点と電気伝導率の関係

(2) 第2主成分

図-5に示すとおり、第2主成分の固有ベクトルは、炭酸水素イオン、マグネシウムイオン、ナトリウムイオン、pH がプラス側となっている。高 pH やナトリウム成分が多い地下水は、一般的に深層地下水の特徴的を示し、施工前に第2主成分得点が高かった地点は深層地下水の特性を示していたことから、第2主成分得点が高いものは深層地下水に分類し、低いものは浅層地下水に分類した。

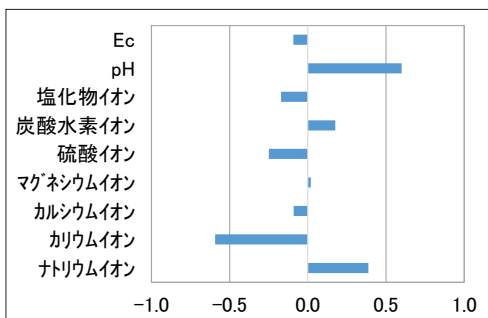


図-5 第2主成分の固有ベクトル

(3) 調査地周辺の地下水成分

第1主成分得点と第2主成分得点の関係図を図-6に示す。施工箇所周辺の地下水は三角形ABCで示すように、第1主成分が低いA：表流水系、第1主成分得点が高く、第2主成分得点の高いB：深層地下水系、第1主成分得点が高く、第2主成分得点の低いC：浅層地下水系の3成分で形成されているものと考えられる。

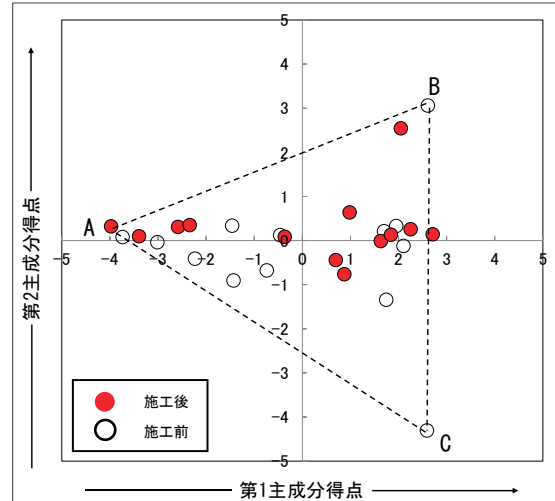


図-6 第2主成分の固有ベクトル

(4) 施工前後の成分比較

図-7に施工前後の第1主成分得点の関係図を示す。

第1主成分得点は濃度変化を示していることから、地点A、Bでは施工後に濃度が高まっている一方で、地点C、D、E、Fでは施工後に濃度が低下している。これはトンネル施工により施工箇所付近の水質特性が変化していることを示している。

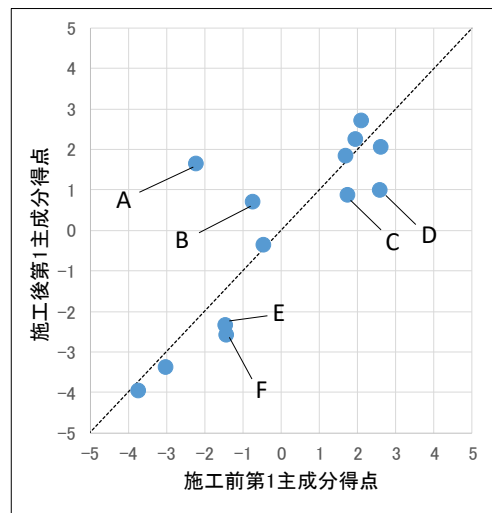


図-7 施工前後の第2主成分得点の関係図

5. 最後に

本稿では、トンネル施工前後の水質試験結果を用いて主成分分析を実施し、地下水の水質変化を把握することが出来た事例を紹介したが、工事に限らず、土地利用の変化等による水質の変化も把握することが可能であり、活用の幅を広げていきたい。

表計算ソフトを利用した現場透水試験（曲線一致法）の半自動解析

川崎地質株式会社

○相澤 穂高, 内田 秀樹

1. はじめに

単孔を利用した透水試験方法（現場透水試験法）は、ボーリング調査の一貫として実施される比較的簡易な透水試験法で、我が国でも多くの適用実績があり、地盤工学会では JGS 1314-2012 に基準化されている。その基本となる手法は、1951年に Hvorslev の表した技術報文¹⁾に従って構築された試験方法で、その後、1976年に Cooper らの表したスラグ試験法²⁾で改良が行われた。非定常法による試験結果の解析方法として、直線勾配法 (Hvorslev 法) と曲線一致法 (Cooper 法) が、JGS 基準³⁾の附属書 A に記載されている。

本報告では、表計算ソフト (EXCEL) を用いて曲線一致法の非定常解析で、水理定数を半自動解析するツールを開発したので、現場事例を用いて紹介する。

2. 解析ツールの概要

解析ツールは EXCEL のマクロ記述言語 VBA を用いて作成し、標準曲線と測定データを PC 画面上でマッチングさせて水理定数を求めるものであり、2枚の片対数紙（データ曲線と標準曲線）を用いて行う作業と同じである。マッチング指標には観測データとそれに対応する標準曲線の値との誤差二乗和を用い、これが最小となった時にマッチングと判定する。解析ツールとして EXCEL を利用したのは、下記のような利点があるからである。

- ①統計関数などは EXCEL の組み込み関数を利用することでプログラム開発を省力化できる。
- ②標準曲線の計算をユーザ定義関数にすることにより、関数の引数となるセルの値を変更するだけで、自動計算が行われる。
- ③解析結果は EXCEL のグラフ機能を用いるので解析者が自由に作成あるいはカスタマイズできる。

3. 曲線一致法の解析手順(手動解析)

JGS 基準では、試験結果が地盤の貯留性の影響を受けていないと判断される場合は直線勾配法を、地盤の貯留性を受けて $\log s-t$ 曲線に明瞭な直線が見られないと判断される場合は曲線一致法を適用するとしている。

Cooper ら (1967) は、被圧帯水層に設置された完全貫入井戸で実施した透水試験 (スラグ試験) における井戸の中の水位変化 (低下あるいは上昇) 量の一般解として次式を示している。

$$\frac{H_w}{H_0} = F(\alpha, \beta) \quad \dots \dots (1)$$

$$F(\alpha, \beta) = \left(\frac{8\alpha}{\pi^2}\right) \int_0^\infty \frac{\exp(-\beta y^2/\alpha)}{y^2 \Delta(y)} dy \quad \dots \dots (2)$$

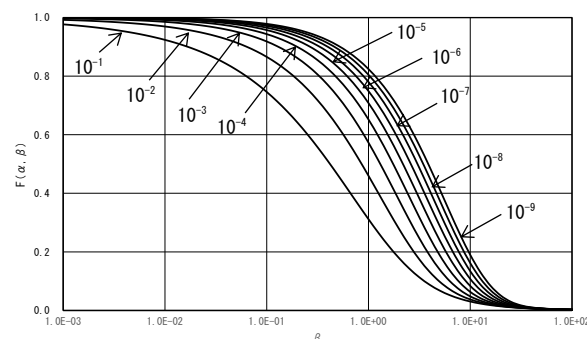
$$\alpha = S r_w^2 / r_c^2 = S s B r_w^2 / r_c^2 \quad \dots \dots (3)$$

$$\beta = T t / r_c^2 = K B t / r_c^2 \quad \dots \dots (4)$$

$$\Delta(y) = [u J_0(y) - 2\alpha J_1(y)]^2 + [y Y_0(y) - 2\alpha Y_1(y)]^2 \quad \dots \dots (5)$$

ただし、 J_0, J_1, Y_0, Y_1 : 第1種及び第2種ベッセル関数
ここに、 H_w : ケーシング内水頭、 H_0 : 初期水頭、 r_w : 試験区間半径、 r_c : ケーシング半径、 S : 貯留係数、 Ss : 比貯留係数 (=S/B)、 T : 透水量係数、 K : 透水係数、 B : 被圧帯水層の厚さ、 t : 時間:

$F(\alpha, \beta)$ は井戸関数で、図-1に示すような一連の曲線群となる。

図-1 井戸関数 $F(\alpha, \beta)$

上記の一般解は試験井戸が完全貫入井戸であるが、現場透水試験で行われるような不完全貫入井戸の場合は、帯水層厚さ B を試験区間長 (有効スクリーン長) L に置き換えることで用いることができる。ただし、不完全貫入井戸の透水試験では、 α あるいは試験区間のアスペクト比が大きい場合は、帯水層の実際の透水係数より大きな値を与えることが検証されており (Hyder ら1994)、透水係数の上限値と見なす方がよいとされている。⁴⁾

曲線一致法の解析手順は以下の5つのステップからなる。

- 1) 経過時間 t を対数スケールで横軸 (X 軸) に、水位差比 H_w/H_0 を縦軸 (Y 軸) にとって試験結果をプロットする。
- 2) データ曲線と同じスケールで作成した標準曲線を重ねて、X 軸方向に平行移動させながらデータプロットに最も一致する標準曲線 (α_m) を選ぶ。
- 3) 任意のマッチポイントを選択する。計算を簡略化するため $\beta=1.0$ に対応する実時間 (t_m) をデータプロットの X 軸から読み取る。
- 4) 透水係数 K を β の定義式から計算する。
- 5) 比貯留係数 Ss を α の定義式から計算する。

4. 解析ツールによる解析手順(半自動解析)

(1) 地盤構成と試験の概要

試験地は第三紀泥岩層を主体とする丘陵地で、透水試

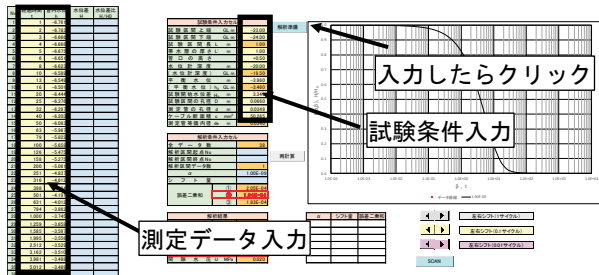
験は泥岩層の GL-23m～24m 間に挟在する厚さ1m の砂層で実施した。試験区間はは GL-25m まで掘削して、砂層の厚さを確認した後、砂層の上端部をパッカーで締め切って区間設定を行った。なお、試験区間は裸孔である。試験条件を表-1に示す。

表-1 試験条件

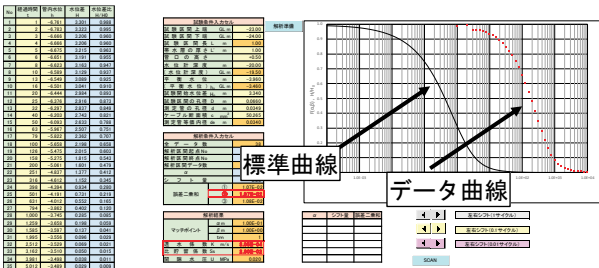
試験方法	試験区間の深さ (GL-m)	試験区間長 L (m)	試験区間孔径 D (m)	ケーシング内径 d (m)	平衡水位 (GL-m)
非定常法 (水位上昇)	23.00～24.00	1.00	0.066	0.034	3.460

(2) 解析ツールの操作手順

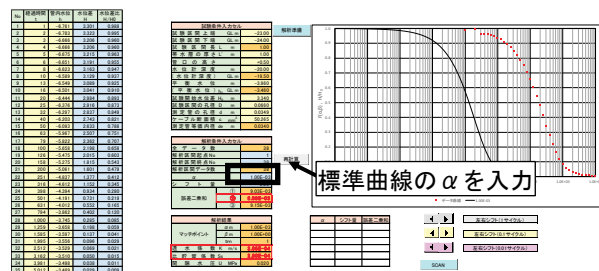
手順①：別のシートで整理した透水試験の測定データと試験条件入力セルに入力し、解析準備ボタンをクリックする。



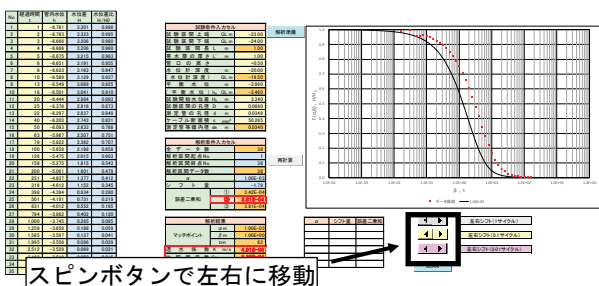
手順②：標準曲線 ($\alpha=1E0, 1E-1, 1E-2$) とデータ曲線が表示される (初期画面)。



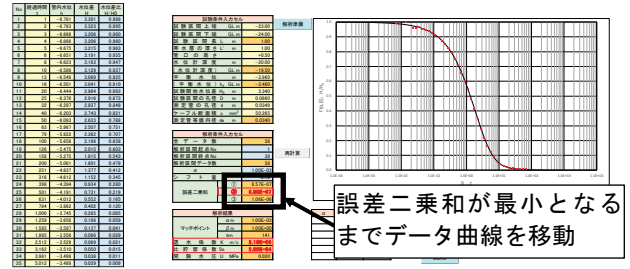
手順③：描きたい標準曲線の α 値を該当セルに入力すると、グラフの標準曲線が描き直される。



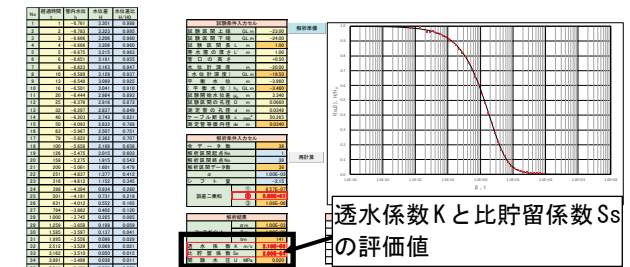
手順④：グラフ下のスピノボタンをクリックするとデータ曲線が左右に移動するので、標準曲線と最も一致する箇所を探す。データ曲線のシフト量は直接セルに値を入力することも可能である。



手順⑤：データ曲線と標準曲線の誤差二乗和が最小となるまで、データ曲線をシフトする。



手順⑥：標準曲線の α を変えて、同様に最適フィットを探す。最も小さな誤差二乗和を示した α の標準曲線が最適フィットであり、その時の透水係数、比貯留係数が透水試験結果による評価値である。この試験では $\alpha=1-3$ の時に誤差二乗和が最小値となり、透水係数 $K=2.16E-(m/sec)$ 、比貯留係数 $S_s=2.80E-4(m^{-1})$ が得られた。



5. 今後の改良点

算は複雑であり、EXCEL VBA でプログラミングしている関係で、CPU 性能によっては計算に多少時間を要する場合がある。よって、今後の改良点としては井戸関数の外部プログラム (DLL: Dynamic Link Library) とすることにより、処理速度と計算精度の向上が期待される。

《引用・参考文献》

- 1) Hvorslev, M. (1951): Time lag and soil permeability in ground-water observation, Warerways Experiment St. Corps of Eng., U.S. Army, No. 36
- 2) Cooper, H.H. Jr., Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S. (1967): Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources. Research, 3(1), 263-269.
- 3) 地盤工学会：改訂版(2013)：地盤調査の方法と解説-二分冊の1-, 512-614
- 4) Butler, J.J. Jr. (2020): The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests. CRC Press, 266p.

隣接孔地下水位測定を併用した透水試験による透水連続性の検討

株式会社地圏総合コンサルタント ○海老原 直暉, 藤本 泰史, 徳留 亮, 田村 正春

1. はじめに

ダム建設事業に際して、止水処理方法を設計・施工するために、ダム基礎岩盤及び貯水池周辺地山の水理地質構造を把握することが重要である。一般に、水理地質構造は複数のボーリング調査により与えられる地質情報および透水性状に加え、初生的な地質構造や営力の影響をふまえて構築される。

ダム建設事業におけるダムサイトの地質調査は、一般に想定ダム軸に平行および直行する調査測線を設定し、測線の交点で調査を行うグリッド方式が採用される¹⁾。地山の透水性の把握は、ボーリング孔を利用する注水式の透水試験であるルジオンテストで行われることが一般的である。

グリッド方式の調査では、等間隔で平均的に水理地質情報の収集が期待される一方で、測線間の水理地質構造は、地質構造や営力を考慮して補完されることとなる。

我々はダム基礎岩盤における透水帯の連続性把握の一助となることを期待し、ルジオンテスト実施期間中、隣接する既設地下水位観測孔での水位観測を実施した。ルジオンテストによる注入水によって、隣接孔で水位上昇が認められれば、試験孔の試験区間の透水帯が隣接孔へとつながっている可能性が高いと判断することができる。本発表では、ダム基礎岩盤の水理地質構造調査において、ルジオンテスト実施中における隣接観測孔水位観測の有効性を確認した調査事例について報告する。

2. 調査結果

(1) 地質概要

本調査で新規掘削した D-R2-1孔および D-R2-2孔ではともに地表面から未固結の崖錐堆積物、上位凝灰岩類ユニット、溶岩・火山角礫岩ユニット、凝灰岩類・自破碎溶岩類ユニットを確認した。調査地の岩盤は B 級を主体とし、一部で脆弱化した C~D 級岩盤が確認される。

(2) 孔内観察

孔内観察は、ボアホールスキャナを用いて実施した。比較的透水性の高い区間では、開口亀裂の存在や亀裂の密集などが確認された。

(3) 岩盤透水試験(ルジオンテスト)

ルジオンテストは「JGS-1323-2012 ルジオン試験方法」²⁾ および「ルジオンテスト技術指針・同解説」³⁾ に基づき実施した。試験は1ステージ5m を原則とし、ダム天端標高以深で実施した。試験の注入圧力パターンは、低圧重視型の10段階昇圧パターンを採用した。昇圧は0→0.05→0.10→0.15→0.20→0.30→0.40→0.60→0.80→1.00MPa の昇圧パターンで実施した。また、最大の送水

量は120L/min とした。各孔のルジオンテストの結果は以下のとおりである。

D-R2-1孔は標高275.69m 以浅では一部で $10 < Lu \leq 20$ を示すが、標高275.69m 以深は $Lu \leq 2$ の低透水を示す。

D-R2-2孔は標高236.41m 以浅では $Lu \leq 2$ を主体とし、一部で $Lu \leq 10$ を示す低透水領域である。標高211.41~236.41m で $Lu > 10$ を示す高透水領域が分布する。標高211.41m 以深は $Lu \leq 10$ を示した。

3. 隣接観測孔での水位応答

(1) 概要

透水帯の連続性の確認の一助となることを期待し、既往調査で設置された水位観測孔3孔に、自記水位計を設置(図-1)し、地下水位観測を実施した。地下水位の観測はルジオンテストを実施する期間中とし、測定の間隔は15分とした。

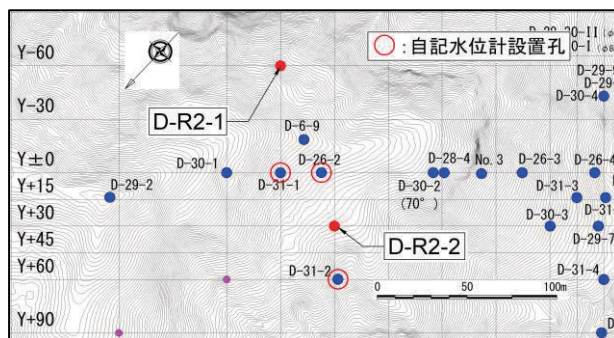


図-1 調査位置および水位観測実施孔

(2) 結果

自記水位計を設置した3孔のうち、1孔(D-31-2孔)で、ルジオンテストによる注水期間中に水位応答が認められた。水位応答が認められた日時の直近では降雨が認められないことおよび、ルジオンテストの実施時間中に水位の応答が認められたことから、ルジオンテストの注水による水位上昇と判断される。

水位応答は D-R2-2孔の21st 以降のルジオンテスト実施時に、試験孔の北西側約30m に位置する D-31-2孔で確認され、水位上昇は10cm 以上であった(図-2)。他の2孔では、降雨に応じた水位上昇は確認されたが、ルジオンテスト実施時間中の水位応答は確認されなかった。

D-31-2孔で水位上昇が認められた際のルジオンテストの特徴は以下のとおりであった。

- ① 水位応答はルジオンテストの後半に生じる。
- ② 水位応答が認められたルジオンテストでは100L/min 以上の流量を供給している。
- ③ 送水量が100L/min 以下の場合、水位応答はない。

- ④ 21st 以降のルジオンテストでは、ルジオン値と限界圧力のいずれも低い値を示した。

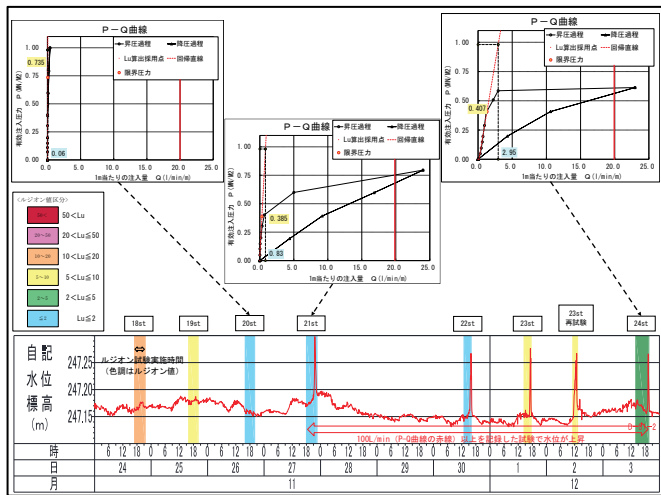


図-2 P-Q 曲線と水位応答 (D-31-2孔)

4. 透水連続性と亀裂性状・方向の検討

水位応答が認められた D-31-2孔での過年度調査では、標高220～250m 付近にルジオン値 $20 < Lu \leq 50$ の高透水帯 (図-3中①) の分布が報告されている。

D-R2-2孔の21st 以降 (標高201.41m 以深) のルジオンテスト区間で観察された水みちとなりうる開口亀裂等の姿勢をルジオンマップ断面に整理した結果、本区間に分布する開口亀裂の多くは、D-31-2孔の標高220～250m 付近の高透水帯方向に向いていることが明らかとなった。

以上より、D-R2-2孔の21st 以降のルジオンテスト区間に分布する透水帯は、D-31-2孔の高透水帯へ連続している可能性が示唆された。

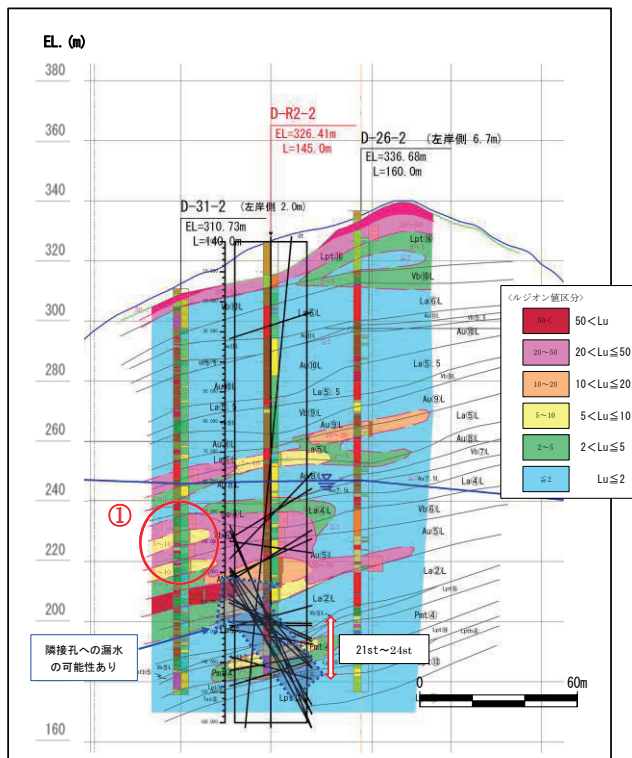


図-3 透水連続性の検討(開口亀裂の見かけ傾斜)

5. まとめ

ダム基礎岩盤の調査に伴い、水理地質状況把握および透水帯の連続性の検討の一助になることを期待し、ルジオンテスト実施中に隣接観測孔での自記水位観測を実施した。結果は以下のとおりであった。

- ① ルジオンテスト実施中に隣接観測孔で地下水位観測を実施し、1孔で地下水位の応答を確認できた。
- ② 孔内観察による亀裂の方向性や性状を考慮し、透水帯の連続方向を推測することができた。
- ③ 自記水位計を用いることで、安価にかつ容易に着手可能な方法で、調査測線間 (グリッド間) の透水帯の連続性を補完することができた。

6. 課題と展望

本発表ではルジオンテスト実施時における隣接孔の水位観測の実施が、透水帯の連続性検討に有効である事例を紹介した。隣接孔地下水位観測を併用した透水帯の連続性の検討法が適用可能な条件として、下記の条件があげられる。

- ① 地下水位観測が可能な既設観測孔があり、透水性の把握がされていること。
- ② データ測定間隔の短い測定機器を使用可能なこと。
- ③ 孔内観察を併用し、透水性亀裂の方向を把握すること。

以上のようにこれらの手法の適用範囲には制約があるが、ルジオンテスト実施に際して、水位観測の可能な隣接孔がある場合は、水位観測を実施することで、孔内観察 (ボアホールカメラ) 結果も踏まえ、透水帯の連続性の適切な評価が行えると考えられる。

《引用・参考文献》

- 1) 土木学会編:ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計, p.47,2001.6.
- 2) 地盤工学会編:地盤調査の方法と解説, pp.574～586., 2013.3.
- 3) 国土技術研究センター編:ルジオンテスト技術指針・同解説, 2006.7.

各種物理探査による地下水の挙動傾向の推定

(株)日さく ○井上 結衣、久保 範典

1. はじめに

本発表は、トレンチ調査地の近隣の井戸において井戸涸れが発生したとの情報を受け、トレンチ調査と井戸涸れとの因果関係を探求することを目的として地下水調査の観点から、高密度電気探査による地下地質構造の把握、1m 深地温探査による水ミチの推定、及び自然電位探査による地下水の挙動傾向の推定を行ったものである。

2. 本地区の状況

(1) 調査地地形

本地区は奈良県北部に位置にする。調査地周辺は、全体的には東から西に向かって緩やかに傾斜し、調査地の中央には、東西方向の谷地形が認められる。平成初期に圃場整備が行われ、調査地内は主に水田として整備されている。

(2) 調査地地質

既存資料による地質状況は以下のとおりである。

- ① 盛土層：上部は耕土、下部はシルト混じり真砂土
- ② 段丘層：砂混じりシルト、粘土
- ③ 岩盤層：領家花崗岩類(閃緑岩、花崗閃緑岩)

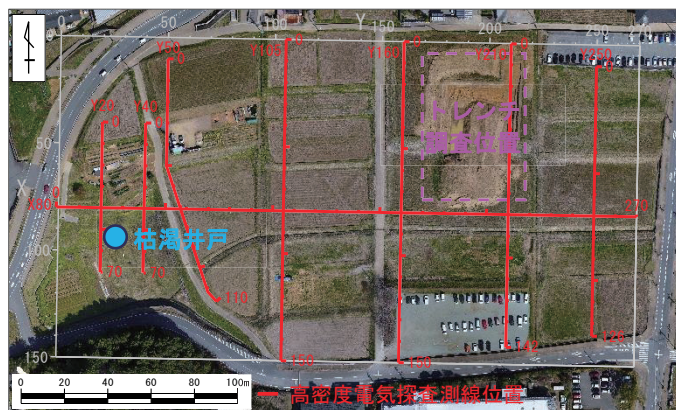


図-1 電気探査調査位置図

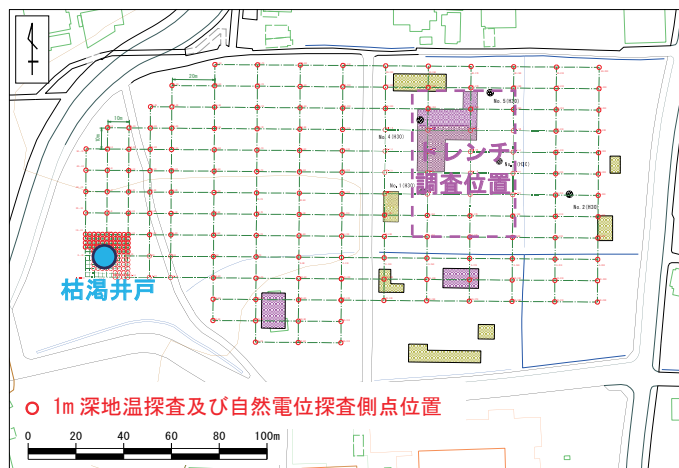


図-2 1m 深地温探査及び自然電位探査位置図

3. 調査方法

(1) 高密度電気探査

高密度電気探査は、調査地の地質状況を三次元的に把握するために縦横断に測線を配置した。

(2) 1m 深地温探査

1m 深地温探査は、地下水と地中温(深度1m)に温度差が生じることを利用し、水ミチの存在位置を推定する方法である。測定は10~20m グリッドで行った。写真-1は地温の測定状況である。



写真-1 1m 深地温探査機材

(3) 自然電位探査

自然電位とは、地表・地中に自然に存在する電位である。自然電位探査は、地下水の流れに対して下流ほど電位が高くなることを利用し、地下水の流れの情報を得る方法である。測定は10~20m グリッドで行った。写真-2は探査に使用した電極である。



写真-2 自然電位探査電極

4. 調査結果

(1) 高密度電気探査結果

高密度電気探査の結果、盛土部の高抵抗は空隙増加によるもので、浅部の低抵抗は細粒化した強風化岩や谷状を呈する谷底堆積物に相当することが推定された。深部で低抵抗が高・低にそれぞれ収束する低抵抗領域は基岩の不透水性基盤に相当する。この高・低抵抗領域を分ける垂直的な低抵抗漸移帯に、裂か帯(開口した割れ目帯)が推定される。このため、地下水は谷底堆積物中を流下する浅層地下水(地層水)と、深部の割れ目帯に沿って流動する裂か水に区分される。図-3に比抵抗断面パネルダイアグラム、図-4に比抵抗断面図を示す。

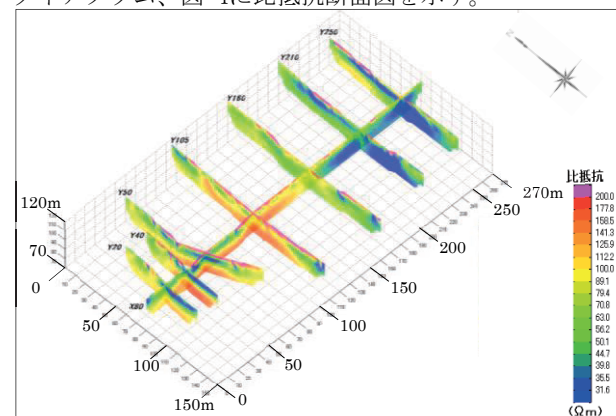


図-3 比抵抗断面パネルダイアグラム

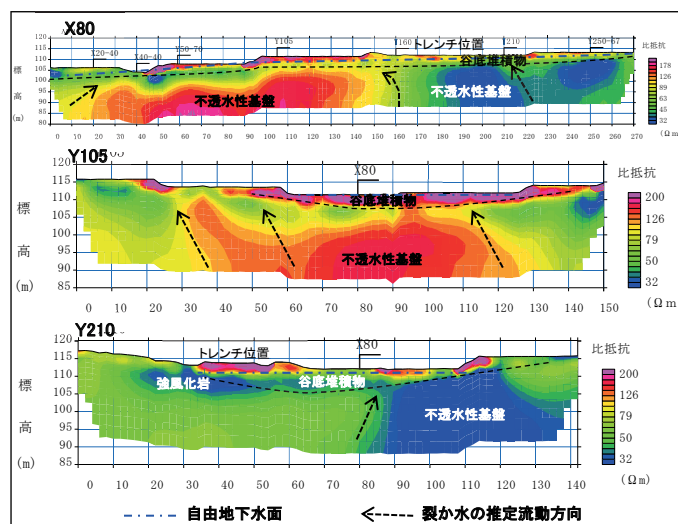


図-4 比抵抗断面図(上:X80、中:Y105、下:Y210)

(2) 1m 深地温探査結果

1m 深地温探査の結果、比較的1m 深地温が高い領域(概ね12℃以上)が、以下に示す3つの範囲で認められた。

- ① 調査範囲北東部～中央やや西寄りに延びる帯状の領域
- ② 井戸周辺およびその北西側の領域
- ③ 調査範囲南西部の領域

①～③の比較的1m 深地温が高い領域は、高密度電気探査によって認められた鉛直方向の比抵抗漸移帯の位置に概ね一致する結果が得られた。高密度電気探査結果の解釈では、この比抵抗漸移帯は、基盤岩の裂か帯(開口した割れ目帯)と推定している。このことから、基盤岩の裂か帯(割れ目)に沿って、地下深部から地下水(裂か水)が流動している可能性が考えられ、1m 深地温が比較的高い領域は、裂か水の湧水域を示していると推定される。

一方、1m 深地温が相対的に低い領域は、調査範囲の中央付近よりやや南寄りの東西方向に連続的に認められるが、これは浅層地下水の流動を反映しているものと推定される。図-5に1m 深地温探査結果平面図を示す。

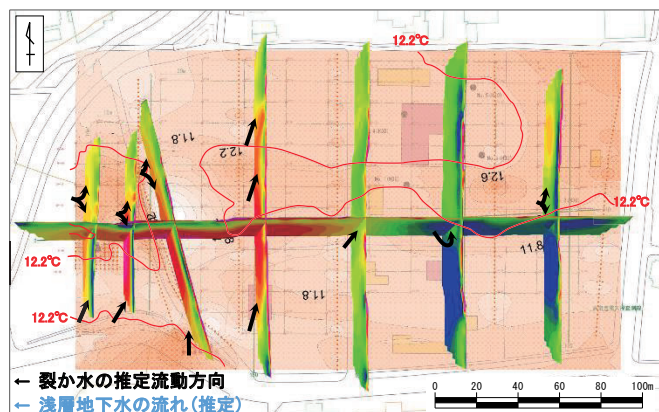


図-5 1m 深地温探査結果平面図

(3) 自然電位探査結果

自然電位探査の結果、自然電位は概ね南から北に向か

って高くなる傾向が認められた。これは、高密度電気探査の際に銅メッキ電極を用いて測定した横断測線(Y20～Y160)の傾向と同様の傾向といえる。このことから、自然電位が北側へ高まる傾向は、変成岩の構造と整合し、基盤岩の割れ目を反映するとともにこの割れ目を流動する地下水の流動方向を反映している可能性が考えられる。

図-6に自然電位探査結果平面図を示す。

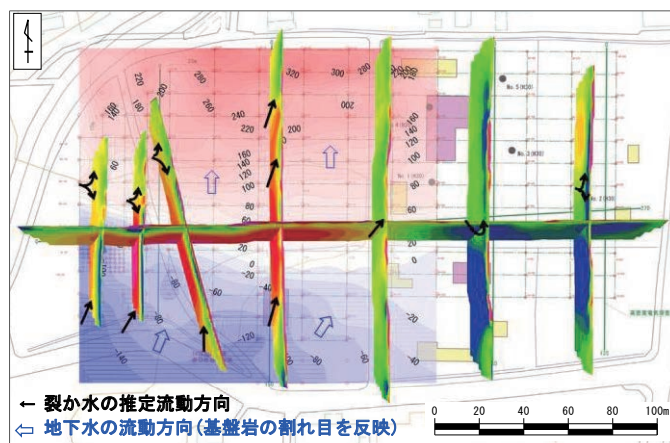


図-6 自然電位探査結果平面図

5. 調査結果考察

(1) 調査結果まとめ

高密度電気探査の結果、地下水は浅部で低比抵抗を示す難透水性層に沿った谷底堆積物中を流下する浅層地下水(地層水)と、深部で垂直的な比抵抗漸移帯を示す割れ目帯に沿って流動する裂か水に区分された。

1m 深地温探査の結果、水ミチあるいは湧水帯と推定される地温が比較的高い領域が認められ、高密度電気探査で得られた鉛直方向の比抵抗漸移帯の位置に概ね一致する結果となった。

自然電位測定結果では、調査地に分布する変成岩の構造と整合し、基盤岩の割れ目を流動する地下水の流動方向を反映する結果となった。

(2) トレンチ調査と井戸洩れの因果関係についての考察

上記の地下水流動(湧出)が推察される領域は、井戸施設近隣にも認められることから、井戸への地下水の主な供給源としては、基盤岩中の裂か水であると考えられる。

従って、調査ボーリングおよびトレンチ調査との関連性は低いと考えられる。

6. おわりに

各種物理探査による地下水調査の結果は概ね整合性が認められた。本調査内容は、既存の井戸に対する水ミチの把握だけでなく、新規の水源地開発や井戸掘削位置の検討に有効であると考えられる。

《引用・参考文献》

- 1) 竹内篤雄、地下水調査法 1m 深地温探査、2013.11.

簡易水質調査等による地下水流動系統区分の検討

サンコーコンサルタント株式会社 ○小平真綺, 飯野竜一, 中村静也

1. はじめに

地下掘削を伴う工事では、工事施工による地下水環境への影響評価を目的とした地下水モニタリング調査が実施される場合が多いが、モニタリング調査の計画立案にあたっては、あらかじめ地下水流動状況や地下水流動系統区分を行うことが重要である。

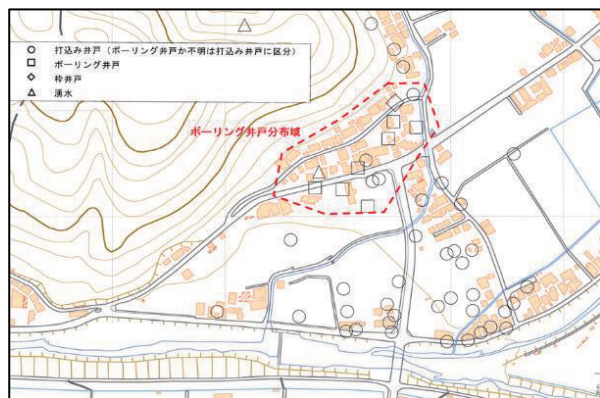
本論文では、水源調査・水質調査から上記を検討した例を紹介する。

2. 水源調査結果による地下水流動系統区分

山地と河川に挟まれたある地域で井戸調査を行った。地下水流動を把握するにあたっては、井戸水位測定結果による地下水面図の作成が有効であるが、本地域のほとんどの井戸は水位測定が不可能であったため、水源の種類や簡易水質測定結果から地下水流動系統を考察した。

(1) 水源種類分布

水源種類について、打込み井戸は○、ボーリング井戸は□、井戸は◇、湧水は△として図に示した(図-1)。打込み井戸かボーリング井戸か不明なものは○とした。

図-1 水源種類分布図 (国土地理院地図¹⁾ に加筆)

全体的に打込み井戸が多いが、山麓部ではボーリング井戸が分布する。ボーリングによる井戸掘削は深井戸を掘ることが前提と想定されるため、ボーリング井戸の分布域周辺は深く掘る必要があったと考えられる。したがって、山麓部は平野部に比べて標高が高くなることから地下水位が低い、または地下水量が少ない可能性がある。

(2) 水温分布

水温について、水温が高い井戸を暖色系、低い井戸を寒色系として図に示した(図-2)。

また、近隣地区の水温定期調査結果を図-3に示す。井戸調査期間は秋季にあたり、河川水温が夏季から低下している時期である。山際の井戸5の水温は一定で井戸調査期間では最も低い。井戸調査期間では高い水温を示す井戸水は河川水からの涵養が、水温が低い井戸水は山地か

らの涵養が考えられる。これを踏まえて水温分布をみると、山麓部の井戸水の水温は低く、地下水は山地から供給されていると考えられる。河川寄りの井戸水の水温は高く、地下水は河川から供給されていると考えられる。

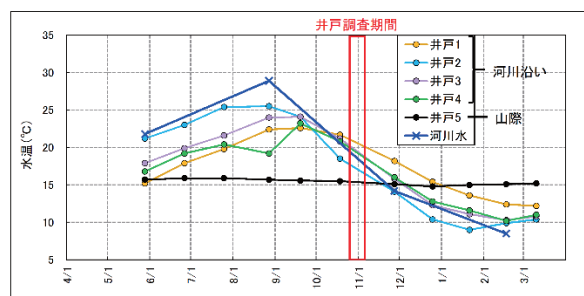
図-2 水温分布図 (国土地理院地図¹⁾ に加筆)

図-3 水温定期調査結果

(3) 電気伝導度分布

電気伝導度について、高い井戸を暖色系、低い井戸を寒色系として図に示した(図-4)。

図-4 電気伝導度分布図 (国土地理院地図¹⁾ に加筆)

水の電気伝導度は溶存成分の多少をあらわすもので、雨水は溶存成分をほとんど含まず電気伝導度は低いが、地下水となって地中を流動するにつれ溶存成分が次第に増加し電気伝導度は高くなる。このことから地下水の流動系統の推定に用いられることが多い。

図-4をみると山麓部の井戸水の電気伝導度は低く、山

地の湧水の電気伝導度は低い。河川寄りの井戸水の電気伝導度は低く、河川水の電気伝導度も低い。したがって、山麓部の地下水は山地から供給されており、河川寄りの地下水は河川から供給されていると考えられる。また、中間部の井戸水の電気伝導度は高く、中間部の地形は平坦なことから、地下水の流れは遅いと考えられる。

(4) pH 分布

pH については、pH が高い井戸を暖色系、低い井戸を寒色系として図に示した(図-5)。

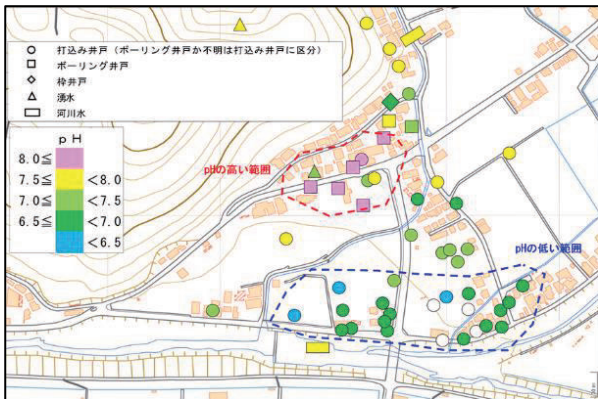


図-5 pH 分布図(国土地理院地図¹⁾に加筆)

深い地下水は炭酸塩鉱物の緩衝作用などにより pH が高いことが多く、浅い地下水は一般に降水の浸透や土壌中微生物活動・有機物の分解による二酸化炭素の排出などのため pH が低いことが多い。

図-5をみると山麓部の井戸水の pH は高く、河川寄り・平野部の井戸の pH は低い。したがって、山麓部の地下水は降水に影響されにくい深い地下水、河川寄り・平野部の井戸は降水の影響を受けやすい浅い地下水と考えられる。

(5) 地下水流動系統区分

(1)～(4)より、この地域は地下水流動状況から3つに区分される。作成した系統区分図を以下に示す(図-6)。

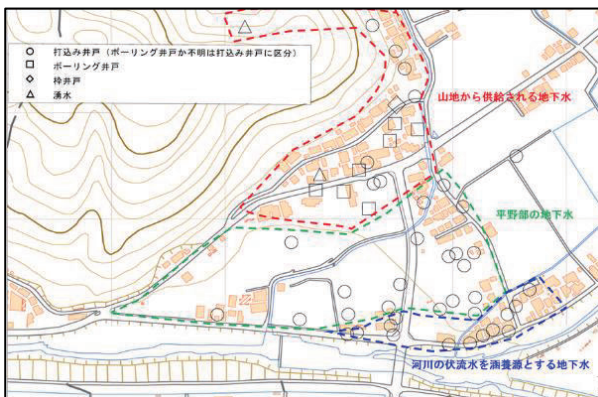


図-6 地下水流動系統区分図(国土地理院地図¹⁾に加筆)

赤色で囲まれた範囲は、ボーリング井戸が分布し、水温・電気伝導度が低く、pH が高い傾向がある。したがって、地下水が山地から供給されていると考えられる。

青色で囲まれた範囲は、ボーリング井戸の分布はみられず、水温が高く、電気伝導度・pH が低い傾向がある。したがって、地下水が河川の伏流水を主な涵養源とする

地下水域であると考えられる。

緑色で囲まれた範囲は、ボーリング井戸の分布はみられず、水温・pH が中間的な値を示し、電気伝導度が高い傾向がある。したがって、平野部の地下水であり、地下水流動は遅いと考えられる。

3. 水質分析結果による地下水流動系統区分

井戸調査を行った地区とは別の地区で、下記イオン項目の水質分析を行った。

分析項目: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^-

分析結果からヘキサダイアグラムを作成し、地下水系統区分を検討した。その結果を地図上に示した(図-7)。

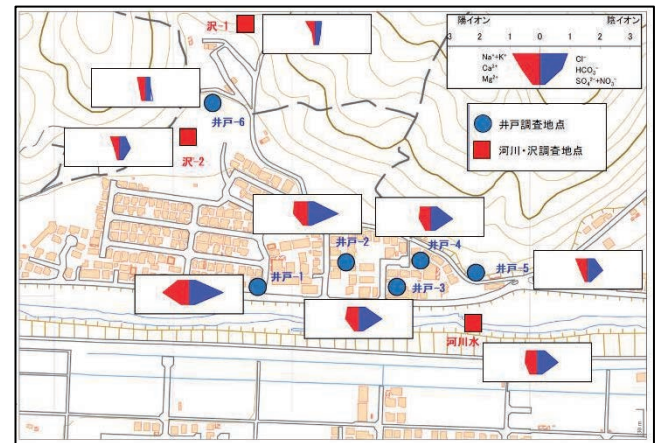


図-7 ヘキサダイアグラム平面分布図

(国土地理院地図¹⁾に加筆)

井戸-1、井戸-2、井戸-3、井戸-4 は河川水と類似しているが、井戸-5 は、井戸-6、沢-1、沢-2 と類似している。このことから井戸-1、井戸-2、井戸-3、井戸-4 の井戸水は河川から涵養されていると考えられる。しかし、井戸-1、井戸-2、についてはカルシウムイオンの値が高く、流動経路の長い地下水の影響も受けていると考えられる。井戸-5 の井戸水は、山から供給されていると考えられる。

4. まとめ

この結果を用いて各地下水流動系統の代表地点を選定し地下水モニタリング計画を立案した。

このように、井戸調査による水源種類や簡易水質測定結果、水質分析結果の平面分布図は、地下水流動状況を把握し、地下水系統を区分するのに有効である。今回の事例では特に、簡易水質測定により河川伏流水や山地からの供給範囲を推定することが可能であった。

地下水の水温・電気伝導度・pH は現地では簡便に測定でき、地下水現状を検討する情報を多く持っている。今後も現地データを平面的・時系列的に蓄積・検討し地下水の現況や変化を把握していきたい。

《引用・参考文献》

1) 国土地理院 地図。

<https://maps.gsi.go.jp/#18/35.427388/135.336944/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f0&d=m>

段階揚水試験における揚水量と温度変化について

(株)日さく ○高松 泉歩, 峯浦 康平, 若槻 望美

1. はじめに

温度検層は、ボーリング孔内における温度を深度方向に連続的に測定する検層方法である¹⁾。温度検層によって得られた鉛直水温プロファイルは、帯水層の位置検討等に利用される。一般に帯水層では、地下水流動量が多く、水温プロファイル上で特徴的な形状を示す。また、同一帯水層内であっても、水温プロファイルに変化が生じる事例も多い。これは、地下水が帯水層中を一様に流動するのではなく、透水性が良い箇所を選択的に流動していることを示唆するものと考えられる²⁾。

既報(全地連技術フォーラム2019)において、揚水試験に伴う水温変化について報告した。本報では、比較的深い被圧帯水層を対象として、揚水試験時に温度検層を実施した。既報と同様、揚水に伴う水温変化が確認された。また、井戸洗浄前後に実施した段階揚水試験においても水温プロファイルの変化が確認されたので、以下に報告する。

2. 調査概要

(1) 段階揚水試験

水源開発のために新設した揚水井 W-1において、揚水能力を把握するため、段階揚水試験を実施した。揚水試験は、井戸洗浄前後とも揚水量80～480L/minの範囲内で6段階に区分し、各段階60分間の揚水を行った。

調査地における地質断面図を図-1に示す。浅層にはローム層および凝灰質粘土層が分布し、その下位に洪積層の複数の砂質土層および粘性土層が分布する。

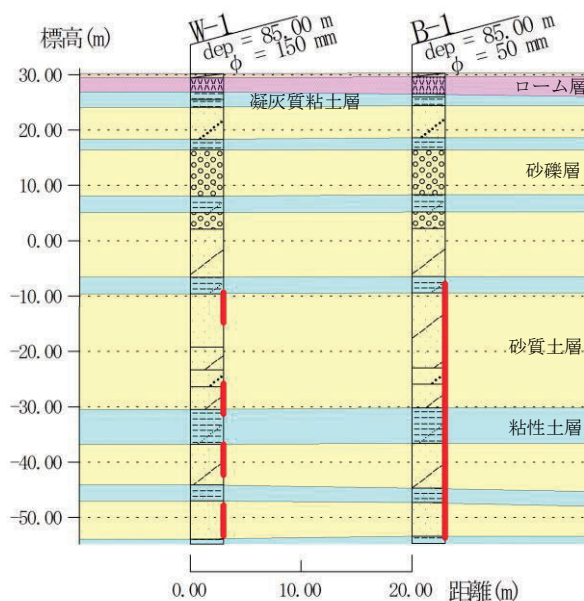


図-1 地質断面図

(2) 温度検層

段階揚水試験とあわせ、観測井 B-1において精密温度検層器(高分解能温度電気伝導度検層装置)を用いた温度検層を実施した。

測定方法は、精密温度検層器の温度センサを孔底まで降下もしくは引き揚げ、2cmごとに水温測定を行った²⁾。温度センサはできる限り低速度(2.0m/min以下)で上下させ、孔内の攪乱を防ぐものとした。

(3) 水質分析

段階揚水試験時に各段階の終盤に採水し、主要イオン分析を行った。

水質分析結果よりヘキサダイアグラム等を作成し、段階揚水試験における水質変化についても確認することとした。

3. 結果

(1) 段階揚水試験

段階揚水試験の結果を図-2に示す。井戸洗浄前の揚水試験における $Q-s$ 曲線の傾きは約55° となった。明瞭な変曲点は認められないものの、第4段階以降で揚砂が認められたため、揚水井の限界揚水量を第4段階の320L/minと判断した。

井戸洗浄後の段階揚水試験における $Q-s$ 曲線は約49°の傾きの直線上にプロットされ、明瞭な変曲点は認められなかった。また、揚砂は認められず、限界揚水量に達していないと考えられる。 $Q-s$ 曲線の傾きが緩くなり、比湧出量が増加したことから、井戸洗浄の効果が確認された。

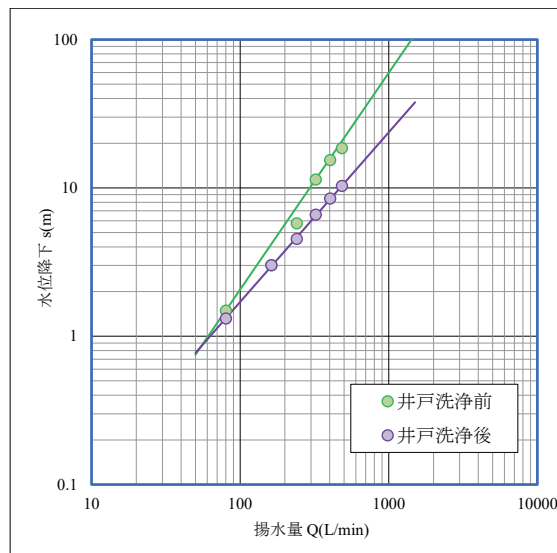


図-2 段階揚水試験結果($Q-s$ 曲線)

(2) 温度検層

①井戸洗浄前

井戸洗浄前の観測井 B-1における温度検層結果を図-3に示す。

深度38～50m 区間では、揚水量の違いによる温度変化はほとんど見られなかった。しかし、4段階目(揚水量320L/min)以降、60m 前後で約0.5℃の温度変化が見られた。60m 以深においては、揚水量の増加に伴い、水温が高くなる傾向が見られた。

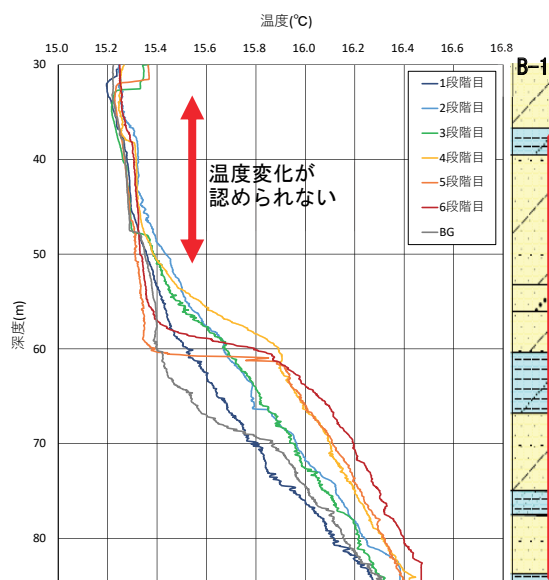


図-3 温度検層結果(井戸洗浄前)

②井戸洗浄後

井戸洗浄後の温度検層結果(図-4)では深度38～50m 区間においても、揚水量の違いによる温度変化が認められた。これは、揚水井の井戸洗浄により、スクリーンの目が開き、当該深度における地下水流動が促進されたものと考えられる。

とくに深度55～70m 区間における温度変化が大きく、1～3段階目と4～6段階目では、0.2～0.4℃程度の温度差が見られた。

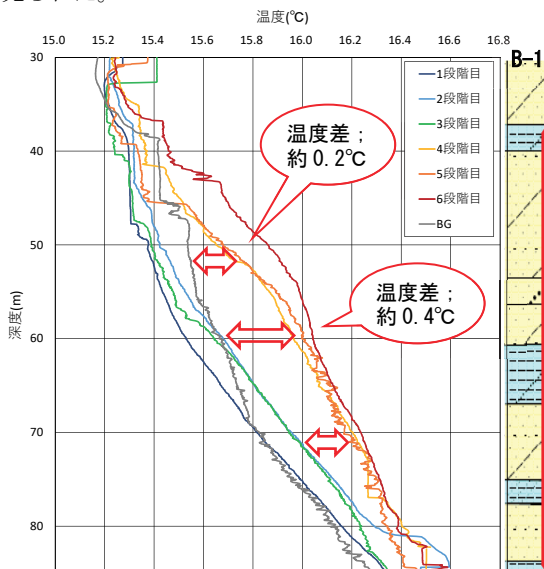


図-4 温度検層結果(井戸洗浄後)

(3) 水質分析結果

段階揚水試験の各段階時の水質分析結果を図-5に整理した。

井戸洗浄前は温度検層結果同様、段階揚水試験4段階目以降において、水質の変化が見られた。

井戸洗浄後は、各段階でほぼ同じ水質を示し、揚水量の違いによる水質変化は認められなかった。

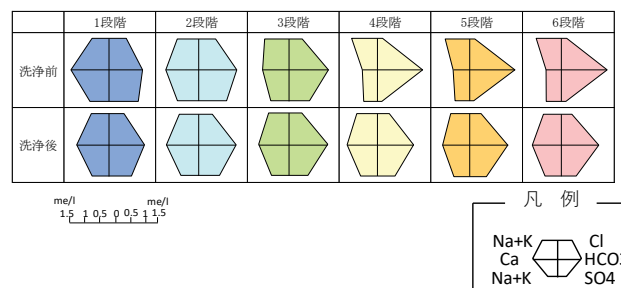


図-5 水質分析結果(ヘキサダイアグラム)

4. 考察・まとめ

深層の被圧帯水層において、井戸洗浄前後に関わらず、揚水量の増加に伴い水温が上昇する傾向が認められた。既報では、浅層地下水において同様の傾向であったことから、帯水層深度によらず、揚水量の増加に伴い水温が変化する傾向にあることが確認できた。

井戸洗浄前の段階揚水試験において、4段階目以降、深度60m 前後で水温上昇が約0.5℃と大きく、水質の変化も4段階目以降で認められた。また、井戸洗浄後の温度検層では、揚水量の増加に伴う水温上昇幅がスクリーン区間で一様ではなく、揚水量により、各帯水層からの地下水の混合割合が変化していることが示唆された。

井戸洗浄前、深度38～50m 区間においては揚水による水温変化が認められなかったが、井戸洗浄後は水温変化が見られたことから、温度検層によって、井戸洗浄の効果を確認できた。

今回、既報同様、揚水に伴う水温プロファイルの変化が確認されたが、揚水量増加に伴う水温変化のプロセスについては明らかになっていないため、今後も事例を増やし、引き続き検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 山本荘毅(1983.3.10,古今書院):新版 地下水調査法, p.119
- 2) 竹内篤雄(1996.3.12,古今書院):温度測定による流動地下水調査法,p.18,p.254

水道水源施設における大揚水量揚水試験の実施

榎日さく ○佐々木 元気、荒井 正、会津 隆士

1. はじめに

扇状地に位置する水道水源施設において、井戸の取水能力の再検討を目的として揚水試験を行った。主な取水層は2層の被圧帯水層であり、それぞれの帯水層で別々に試験を行い、水位変動を観測した。

2. 想定される調査地の地下水涵養機構

調査地は、西部山地から東流する河川Aが形成した扇状地の上～中部に位置するとともに、北から流下する支流が形成した扇状地の扇端部にも位置する。一般に扇状地の地下水は扇頂部で下向き、扇端部では上向きの流れを有することから、調査地周辺では支流扇状地の深層地下水が供給されている可能性も考えられる。このほか北西側の山地部が形成する小河川が平地内に流れ込んでいるが、このような低山の表流水は扇状地面に降る雨と一緒に「降水」として涵養源のひとつとなる(図-1)。

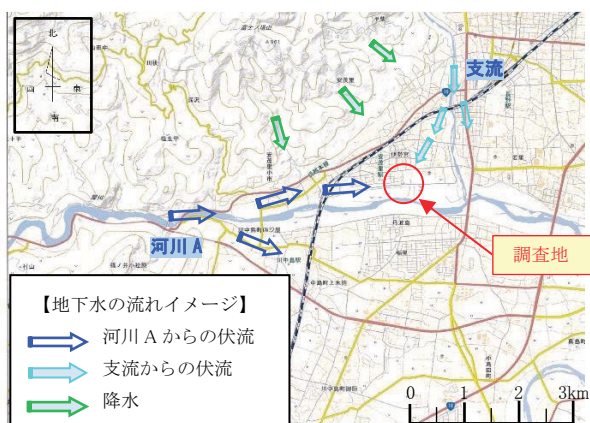


図-1 調査地の地下水供給機構の概念図¹⁾

3. 調査地の水理地質構造

調査地周辺の帯水層は図-2に示すように4層に区分されている。今回の調査は被圧第1帯水層と被圧第2帯水層を取水対象とする井戸を選定し、揚水試験を行った。

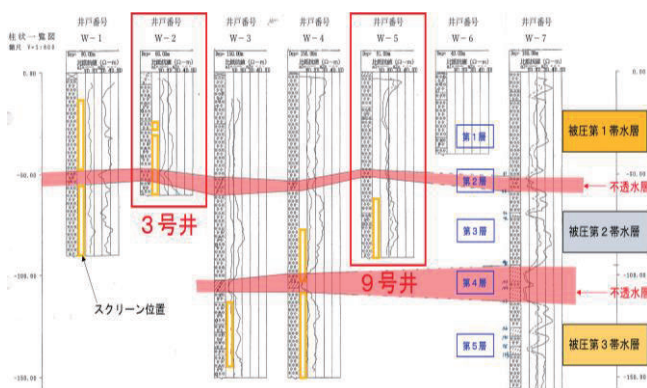


図-2 調査地周辺の帯水層区分

4. 実施内容

(1) 対象揚水井

調査対象施設における、井戸分布状況を図-3に示す。このうち、今回調査対象となる「被圧第1帯水層」および「被圧第2帯水層」の地下水をそれぞれ別々に取水できる井戸を表-1の通り選定した。

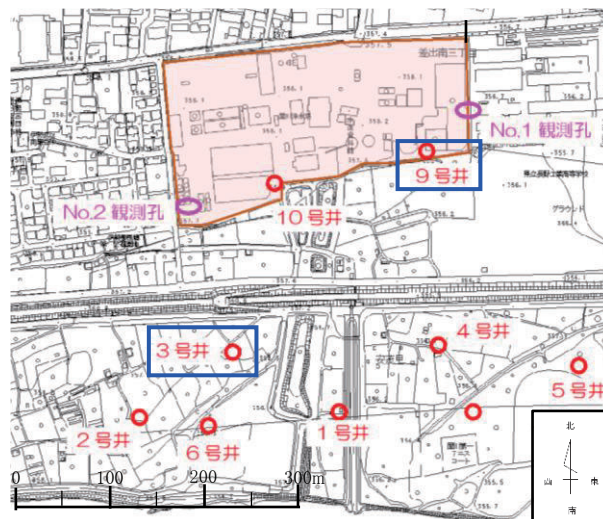


図-3 水源施設の井戸分布状況(発注者提供平面図に加筆)

表-1 対象揚水井

井戸名	井戸深度	取水層	スクリーン位置
3号井	60m	第1帯水層	32.5～56.5m
9号井	91m	第2帯水層	61～91m

(2) 地下水位測定

揚水井本井(3号井・9号井)および水位測定管が設置されている他の揚水井に加え、施設敷地西端と東端に新設した観測孔(深度20m・50m・100m)に自記水位計を設置し、1分毎の連続観測を実施した。

(3) 揚水試験

揚水は井戸に設置されている水中モータポンプを用い、既設の電磁流量計で流量管理を行った(写真-1・写真-2)。ポンプの運転停止等の操作は施設の集中制御室にて遠隔で行った。

表-2 揚水試験内容

予備揚水試験	揚水施設動作チェック
段階揚水試験	1時間×5段階程度
連続揚水試験	24時間揚水
水位回復試験	概ね自然水位に回復するまで計測



写真-1 電磁流量計

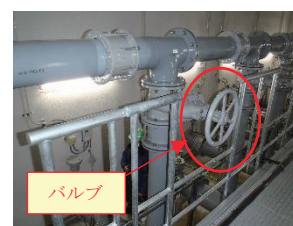


写真-2 流量調整状況

5. 調査結果

表-3、表-4に3号井、9号井それぞれの揚水試験結果を示す。

表-3 3号井(被圧第1帯水層)の揚水試験結果

段階揚水試験	実施日時	令和3年1月12日 9:00~13:00				
	自然水位	管頭-4.16m [GL-6.56m]				
		段階1	段階2	段階3	段階4	段階5
	揚水量(L/min)	3500	4000	4500	5000	5500
	揚水時間(分)	60				
	揚水水位(管頭-m)	9.20	10.13	11.03	12.01	13.10
	水位降下量(m)	5.04	5.97	6.87	7.85	8.94
	限界揚水量(L/min)	5500				
連続揚水試験	実施日時	令和3年1月12日17:00~令和3年1月13日17:00				
	自然水位	管頭-6.50m [GL-8.90m]				
	揚水水位	管頭-15.87m [GL-18.27m]				
	揚水量(L/min)	5670				
	揚水時間	1440分 [24時間]				
水位回復試験	水位回復確認時間	300分 [5時間]				

表-4 9号井(被圧第2帯水層)の揚水試験結果

段階揚水試験	実施日時	令和3年1月14日 9:00~12:00				
	自然水位	管頭-11.36m [GL-12.91m]				
		段階1	段階2	段階3	段階4	段階5
	揚水量(L/min)	5000	5500	6000	6300	-
	揚水時間(分)	60				
	揚水水位(管頭-m)	26.90	29.94	32.57	34.02	-
	水位降下量(m)	15.54	18.58	21.21	22.66	-
	限界揚水量(L/min)	6300				
連続揚水試験	実施日時	令和3年1月14日17:00~令和3年1月15日17:00				
	自然水位	管頭-9.77m [GL-11.32m]				
	揚水水位	管頭-32.88m [GL-34.43m]				
	揚水量(L/min)	6080				
	揚水時間	1440分 [24時間]				
水位回復試験	水位回復確認時間	1440分 [24時間]				

水理定数の算定は、揚水による影響圏を把握するために、水位観測孔の孔内水位の低下量を利用し、テームの式による定常流解析²⁾を行った。表-5に得られた水理定数を示す。被圧第1帯水層の透水係数は砂～礫層の一般値に相当し、被圧第2帯水層の透水係数は砂層の一般値に相当する。

表-5 水理定数一覧

帯水層	透水量係数(T)	透水係数(k)	
	(m ² /s)	(m/s)	(cm/s)
被圧第1帯水層	2.9×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-1}
被圧第2帯水層	1.4×10^{-2}	4.6×10^{-4}	4.6×10^{-2}

6. 考察

表-6に揚水試験時の揚水井本井および各水位観測孔で観測した井内水位低下量を示す。

3号井は被圧第1帯水層から揚水しており、帯水層が同じ観測孔は No. 1-2と No. 2-2である。揚水井からの距離が遠いために水位低下量は小さいが、それぞれ0.41m と 0.83m の低下が生じている。この時、帯水層が不透水層によって完全に遮断されていれば、被圧第2帯水層の No. 1-3と No. 2-3では水位低下が生じないはずであるが、実際にはそれぞれ0.15m と 0.21m 低下している。

一方、9号井は被圧第2帯水層から揚水しており、同じ

帯水層の No. 1-3と No. 2-3観測孔の水位は2.56m、1.06m と大きく低下している。この時異なる帯水層の No. 1-2と No. 2-2でもそれぞれ0.67m、0.25m と水位低下が認められる。したがって、被圧第1帯水層と被圧第2帯水層は完全には分離されていないことが判明した。

また、それぞれの帯水層における影響半径はそれぞれ700m と800m 程度であった(図-4)。

表-6 揚水試験時の地下水位低下量

孔番号	3号井揚水試験(被圧第1層)		9号井揚水試験(被圧第2層)		帯水層の 深度区分
	2021/1/13 16:00		2021/1/16 16:00		
	水位低下量(m)	距離(m)	水位低下量(m)	距離(m)	
No.1-1	0.02	364	0.02	58	■
No.1-2	0.41	364	0.67	58	▲
No.1-3	0.15	364	2.56	58	●
No.2-1	0.18	166	0.01	270	■
No.2-2	0.83	166	0.25	270	▲
No.2-3	0.21	166	1.06	270	●
3号井	8.24	—	0.18	306	▲
4号井	0.59	225	0.29	213	▲
6号井	0.62	86	0.26	387	★
7号井	0.58	267	0.47	281	★
9号井	0.2	306	23.07	—	●

■	●	▲	★
■		▲	★
●		★	
▲		★	
★			

■	▲	●	★
▲		●	★
●		★	
★			

■	▲	●	★
▲		●	★
●		★	
★			

■ : 20m ▲ : 20m ≦ ▲ < 60m ● : 60m ≦ ● < 100m ★ : 20m ≦ ★ < 100m

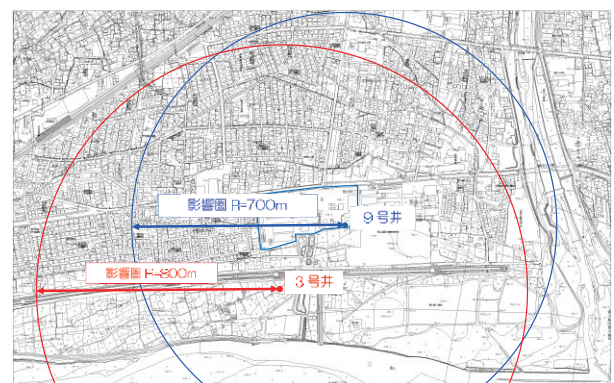


図-4 帯水層毎の影響圏平面図(発注者提供平面図に加筆)

7. 今後の課題

今回の帯水層毎の揚水試験により、主要な帯水層の水理定数と影響圏が判明した。対象となる水源施設には8井の稼働可能な揚水井が存在しており、施設全体の取水能力を正確に評価するためには、次の課題が考えられる。

(1) 各井戸の井戸ロスの評価

揚水井では、帯水層本来の地下水位よりも降下量が大きくなる井戸ロスが生じており、8井で揚水を行う場合、個々の揚水井における井戸ロスの実態を把握して、実際の水位低下量を評価する必要がある。

(2) 帯水層相互の干渉の評価

被圧第1帯水層と第2層の両層から同時に揚水する場合、干渉状況を把握して評価する必要がある。

8. おわりに

今回の技術発表に際し、調査データの公表を承認していただいた関係機関に深く感謝致します。

《引用・参考文献》

- 国土地理院(電子国土 Web) : 地理院地図
<https://maps.gsi.go.jp/> (確認日2021.6.2)
- 地盤工学会 : 地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説(2017年度版),資料番号3-01
https://www.jiban.or.jp/?page_id=4519&preview=true (確認日2021.6.2)

地下水情報をリアルタイムで検知可能なボーリング掘削工法に関する試み

ハイテック（株） ○朴 春澤，小宮 国盛，黒谷 愛理

1. はじめに

地下水環境をより正しく評価するためには、地下水位、地下水流動層などを正確に把握する必要がある。

ボーリング調査では掘削流体を用いて作業を実施するため、孔内水位という概念が存在する。孔内水位は平衡状態に回復するまで時間が必要となるため、現状としては孔内水位を地下水位とすることが多い。また、複数の帯水層あるいは岩盤の亀裂や割れ目に流れている裂か水（いわゆる水ミチ）が存在する場合、実際の地下水位と孔内水位が異なるケースが多く、孔内水位の観測だけでは複数存在する地下水位や水ミチを把握することはできないため、計測結果の信頼性がなくなる恐れが拭えない。

上記の問題点を解決するため、本研究では、一定濃度の塩水を掘削流体とし、コアチューブ内に設置する電気伝導率計（EC 計）と温度計を用いて、塩分濃度及び温度の変化を捉え、リアルタイムで地下水の流動性をキャッチし、より正確に地下水環境を評価する試みを行った。

2. システムの概要

本研究では掘削流体として一般的に使用されている清水、泥水などの代わりに、事前に配合した一定濃度の塩水を利用することが大きな特徴である。

掘削深度が地下水位に到達、もしくは裂か水に当たると、掘削流体の塩分濃度及び温度の変化をセンサーで検知する。迅速に地下水流動層の深度を把握することができ、複数の帯水層においても、それぞれの深度を確認できると考えられる。

(1) 使用 EC 計と温度計について

図-1に示すように、ダブルコアチューブのヘッド部に EC 計と温度計、裏にデータ転送用の基板と専用ケーブルを設置する。そして、図2のように地上でデータロガーにデータを集約すると共に、ソフト上でモニタリングした。掘削流体の塩分濃度と温度を計測することによっ

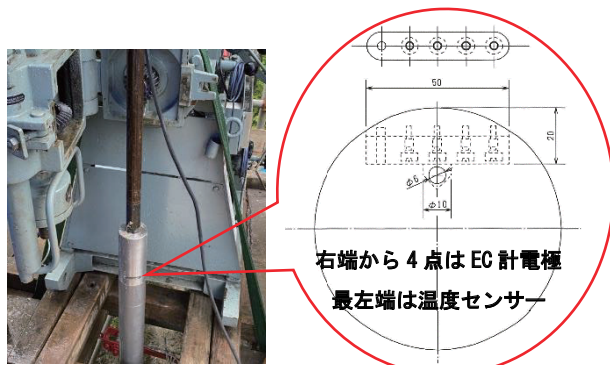


図-1 センサー設置状況

て、地中の水環境の変化をリアルタイムで捉える方法である。

また、諸データの変化をより捉えやすくするため、水タンク

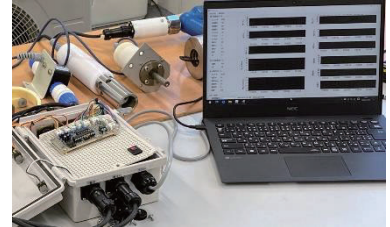


図-2 データロガーと表示画面

の中に別途 EC 計と温度計一式を入れ、参考基準値としてモニタリングを行った。

表-1は使用センサーのスペックを示す。

表-1 EC 計と温度計のスペック

EC 計	測定方式	交流4極
	材質	ステンレス
	測定レンジ	0-200mS/m
	精度	±4mS/m（温度補償なし）
	最小表示	1mS/m
温度計	測定方式	半導体センサー
	測定レンジ	0-50℃
	精度	±0.2℃
	最小表示	0.1℃

(2) 掘削流体(塩水)

掘削流体として使われている塩水の適切な濃度について検討を行った。表 2 のように、導電率は塩分濃度と正比例している。急な数値の変化は見られないが、塩分濃度に対して非常に敏感に反応することが分かった。

また、同温度条件であれば、一定の塩分濃度に対し、導電率は非常に安定している。ただし、清水が流れ込むと、導電率はすぐに反応し、数値が下がり始める。この特徴を利用して掘削流体の初期値が分かれば、地下水脈による希釈現象が捉えられると考えられる。

本研究では、0.01%の塩分濃度を利用した。すなわち、1 m³の掘削流体に対し、100g の塩を投入した。前述のように、水タンクに別途 EC 計と温度計で参考基準値と

表-2 塩分濃度と導電率の関係

No	塩分濃度 (%)	導電率(ms/cm)
1	0	0.188
3	0.002	0.201
4	0.003	0.222
5	0.006	0.265
6	0.01	0.360
7	0.03	0.590
8	0.05	1.083
9	0.1	2.001
10	0.2	3.873
11	0.3	5.221
12	0.4	7.181
13	0.5	8.952
14	0.6	11.022
15	0.7	12.351
16	0.8	14.224
17	0.9	15.863
18	1.0	17.113

してモニタリングを行い、2 箇所の塩分濃度と温度を比較しながら、地下水環境を図ろうと試みた。これは塩分の絶対値を計測するのではなく、相対変化を捉えるため、異なる塩分濃度でも問題ないが、経済性、作業性などを考慮した上で、0.01%という濃度を採用した。海水の塩分濃度（3.4%）と比べると、かなり微量であり、周りの環境に及ぼす影響は最小限に抑えられると考えられる。

3. 計測状況

今回の実証テストは本研究の初期段階であるため、計測データを転送する専用ケーブルの長さが限られていた。従って、実際の対象空間は4m 以浅の地下水位以上の不飽和帯とした。また、地下水環境の変化を模擬するため、掘削流体の切換えによる検証実験を行った。すなわち、塩水と清水との切換え動作によって、地下水環境の変化を模擬させた。

(1) 調査地の地質状況

掘削地域の地質状況としては、深度8m 前後まで、礫混じり砂質土の段丘堆積物となり、その下部は基盤岩の超丹波帯砂岩で、頁岩と互層する箇所もある。今回の掘削深度は4m までにとどまるため、計測結果に影響するのは礫混じり砂質土の段丘堆積物となる。

(2) 実証テストの結果

図3と図4（①と②の縦軸は温度、③と④の縦軸は導電率、横軸は時刻となる）は、掘削流体の切換えによるモニタリング結果を示す。図3の①はコアチューブ付近の水温を示す。②は水タンク内部水温を示す。今回の掘削深度は浅く、地下水の影響が少ないため、水温の変化が見られず、①と②はほぼ同じ温度を示した。図4の①と②とも同様の結果だった。

図3の③はコアチューブ付近の導電率を示す。④は水タンク内部の導電率を示す。掘削流体を切換えする前、③と④はほぼ同じ値を示している。④は水タンク内部で安定した数値を示しているのに対し、③は回転しながら計測を行っているため、ノイズがみられる。ただし、大きなずれはなかったことが分かった。そして、塩水から清水に切り換えると（緑丸の時点）、約10分後、導電率の値が減り始め、約10.8mS/m に達すると、再び安定した横ばいの状態に回復した。10.8mS/m という数値は現地の地下水の導電率となり、掘削流体は完全に清水に変わったことが分かった。

図4の③の緑丸の箇所は、清水から塩水に切換えのタイミングであり、約2分後グラフが④の水タンク内部の導電率まで回復したことが分かった。

(3) 計測中の問題点について

コアチューブのヘッド部に設置するセンサーによる導電率と温度の計測は回転と振動という過酷な条件下で実施されたために、ノイズの影響は予想よりも大きかった。また、図5に示すように、センサーの電極部にスライムの

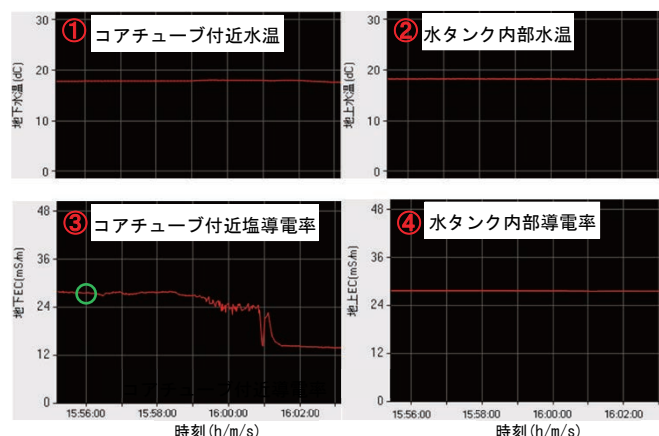


図-3 掘削流体切換え後のグラフ変化（塩水⇒清水）

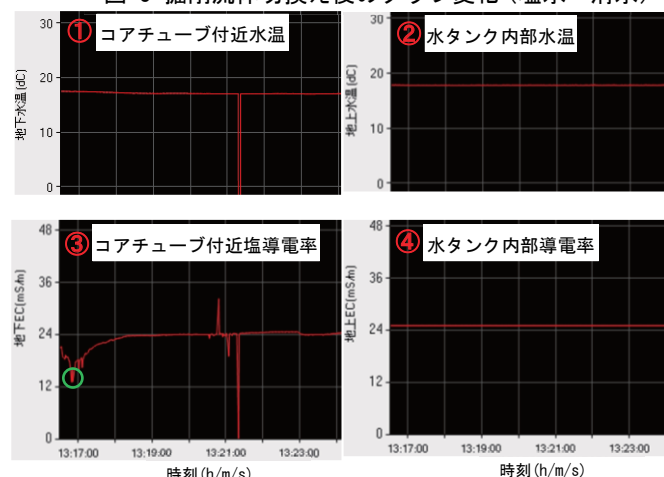


図-4 掘削流体切換え後のグラフ変化（清水⇒塩水）



図-5 センサー電極部のスライム堆積状況
（左側は粘土質、右側は砂質）

堆積によって大きなノイズが発生し、計測不可に陥ることがあった。特に粘土質の地盤付近では顕著であった。

そして、掘削流体を切換えた後、センサーで検知するまでに時間差が生じた。この原因としては、先端ビットからセンサーまで約130cmの距離があること、軟弱地盤の漏水による循環速度の遅れも原因の一つと考えられる。

4. おわりに

今回の実証テストを通じて、当初に定めた本システムの方向性は、微調整が必要であるものの、ほぼ間違っていないことが分かった。システムの構成についての再検討、資機材の改良など、問題点と課題を解決しながら、計測精度の向上が今後の目標となる。