

地下水調査で出現した黒色粒子の発生要因と工事との関係性

国際航業株式会社 ○長谷川 友祐, 美村 泰裕, 増山 孝行, 栗原 健

1. はじめに

道路事業において、建設工事に伴う地下水への影響予測に必要な基礎資料を得る目的として、水文観測（モニタリング）が実施される。観測において確認された事象（地下水位低下、濁りの発生等）が建設工事の影響によるものか、または、他の要因によるものか判断することが重要である。

本報告において確認された事象は、トンネルの施工中から施工後のモニタリングにおいて、周辺井戸の排水口から井戸水と共に黒色粒子の流出を確認した（写真-1）。

これより、黒色粒子の成分を分析し、井戸周辺の情報を踏まえて、その発生機構とトンネル工事との因果関係について、考察した事例を紹介する。

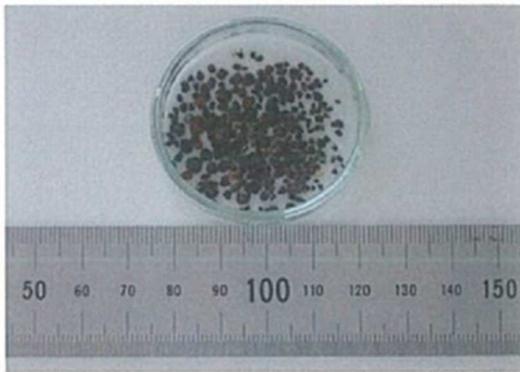


写真-1 井戸水から検出された黒色粒子

2. 調査地の概要

(1) 地形・地質

当該地域は、標高200m程度の丘陵地が主体であり、周辺には小規模な谷が発達し、沖積低地が広がっている。

丘陵地は、主に花崗岩類から成る。なお、トンネルは花崗岩内に計画され、貫通した状況にある（図-1）。

(2) 井戸の仕様

当該井戸は丘陵地内に位置している。井戸水は一旦ポンプで揚水した後、タンクに貯水して利用している。

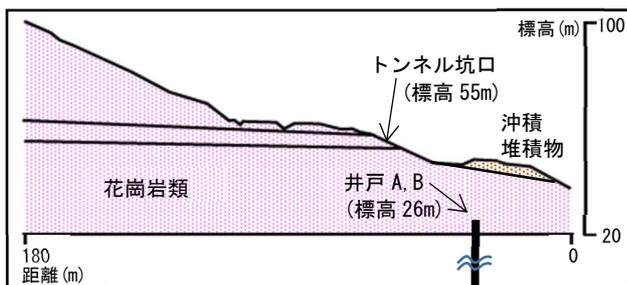


図-1 トンネル付近の模式縦断面図

水源管理者へのヒアリングから、当該井戸は古い井戸（以下、井戸A）と新しい井戸（以下、井戸B）の2基が存在する。各井戸の配管は独立しており、タンクに貯水する前に、汲み上げた地下水が合流することはない。

3. 黒色粒子の排出状況

黒色粒子が排出された井戸Aのみである。その長径は1mm程度であり、概して硬質で角張った形状である。

4. 調査方法

(1) 調査方針

今回確認した黒色粒子の発生機構とトンネル工事との因果関係を検討するため、以下の点より考察を行った。

- 1) 工事前後の観測データの比較
- 2) 井戸水の水質及び流出した粒子の成分分析
- 3) 周辺状況（地形、地質、取水深度）との総合解析による工事影響の有無

(2) 調査内容

調査内容を以下に示す。2)水質分析試験の項目に関し、黒色粒子の外観から推定して、鉄とマンガンを追加した。

- 1) 簡易水質測定（水温、pH、電気伝導度、濁度）
- 2) 水質分析試験（主要イオン分析と鉄、マンガン）
- 3) 黒色粒子の成分分析（EDS分析）

5. 調査結果

(1) 簡易水質測定結果

井戸A、井戸Bから採取した試料で実施した簡易水質測定結果を表-1に示す。測定結果を比較した処、両井戸に顕著な差は認められなかった。また、周辺井戸の観測結果からも、トンネル工事の前後期間中で、簡易水質の測定値に顕著な変化は認められなかった。

表-1 簡易水質測定結果

測定項目	井戸A (古い)	井戸B (新しい)
水温 (°C)	18.9	18.2
pH	7.27	7.17
EC(電気伝導度) (mS/m)	18.35	21.70
濁度 (NTU)	0.0	0.0

(2) 水質分析試験結果

黒色粒子が排出した井戸Aを対象に、主要イオン8項目に加えて、鉄とマンガンの水質分析を行った。

水質分析結果より、カルシウムイオン、炭酸水素イオンに富んだCa-HCO₃（炭酸カルシウム）型の地下水であることが分かった（図-2）。

また、鉄、マンガンの濃度はそれぞれ0.07mg/L、

0.02mg/Lであり、微量ながら井戸水中に溶存していることを確認した。

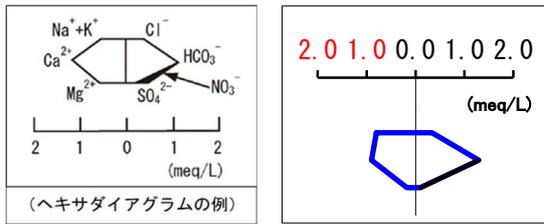


図-2 ヘキサダイアグラム(左:例、右:水質分析結果)

(3) 成分分析(EDSによる元素分析)結果

EDSによる元素分析結果を図-3に示す。

黒色粒子の主な成分は鉄と酸素であり、全体の約9割を占めていた。その他、炭素やケイ素、カルシウム、マグネシウム等が検出された。なお、一般的に花崗岩に含まれる鉱物の主要元素(図-4)であるケイ素やアルミニウムの混入率は低かった。

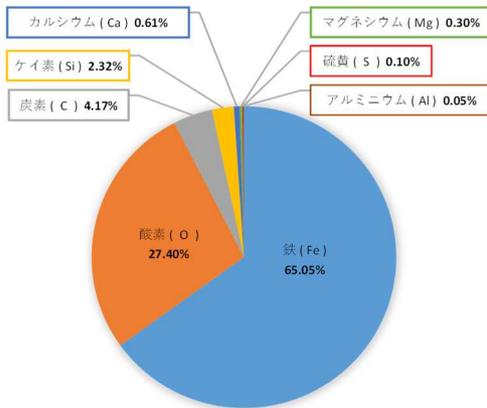
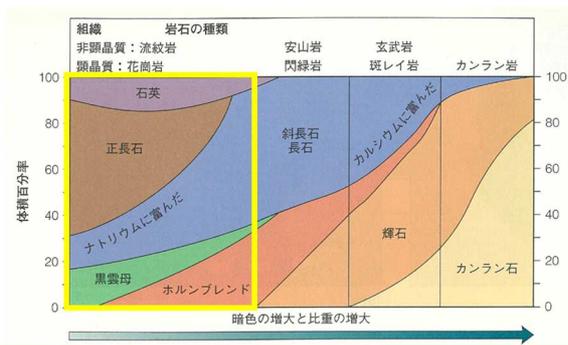


図-3 EDS 分析結果



鉱物	主な化学式
石英	SiO ₂
正長石	KAlSi ₃ O ₈
斜長石	NaAlSi ₃ O ₈ , CaAl ₂ Si ₂ O ₈
ホルンブレンド(角閃石)	Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₄ Al[(OH) ₂ AlSi ₇ O ₂₂]*1
黒雲母	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F,Cl) ₂ *2
(参考) 磁鉄鉱	FeFe ³⁺ ₂ O ₄ *2

図-4 岩石の種類と主な鉱物¹⁾

6. 黒色粒子の発生要因及び影響評価

当該井戸で確認した黒色粒子の発生機構を井戸周辺の情報(井戸仕様や周辺環境、地形・地質等)や水文観測結果から推定し、トンネル工事に伴う影響を評価した。

(1) 地形、地質

当該井戸は丘陵地内に位置している。周辺の地質構成から、この井戸の取水帯水層は花崗岩中の裂か水であると推定されることから、黒色粒子が花崗岩由来の物質である可能性も考えた。しかし、花崗岩を構成する鉱物の主な元素は、ケイ素やアルミニウム、酸素である一方、黒色粒子の主要構成元素は、鉄、酸素が主体である。

このことから、岩盤中の裂か水から鉄が析出する可能性は低いと考えた。

(2) 取水深度

当該井戸周辺の主な建設工事はトンネル工事であり、標高55m付近(トンネル坑口)に位置している。

一方、当該井戸は標高26m付近に位置しており、取水標高は約-225m(井戸深さ250m)付近となる。

これより、トンネル工事で生じる湧水と当該井戸での取水深度は明らかに異なると考えた。

(3) 井戸の水質

両井戸の諸元(井戸深さなど)がほぼ同じであること、簡易水質測定でも水質の差が認められないことから、仮にトンネル工事に伴い黒色粒子が排出するのであれば、井戸の新旧を問わず、両井戸から黒色粒子が排出されるものと考えた。しかし、黒色粒子は設置時期が古い井戸Aのみ確認された。

(4) 黒色粒子の発生機構及び影響評価

上記の要素(地形地質、取水深度、井戸の水質)等を踏まえて、黒色粒子の発生機構を以下に推察する。

- ①地下水に溶存した鉄が空気中の酸素と反応し、井戸配管の内壁に酸化鉄として付着する。
- ②長年の井戸利用により、酸化鉄の付着量が徐々に増加し、時間経過とともにその一部が剥離することで、井戸水と共に蛇口から流出する。

以上の考察結果から、地下水と共に流出した黒色粒子については、周辺でのトンネル工事に伴う影響ではないと判断した。

7. まとめ

今回の事例では、井戸水の水質調査に加え、地形地質の他、地下水に関する情報と排出された黒色粒子の成分分析を直接に実施することで、黒色粒子の発生機構を明らかにして、トンネル工事による建設影響について評価することができた。今後は、今回の評価プロセスを参考に、地下水に関する観測結果(地下水位や水質等)だけでなく、対象物質の直接的な分析を行うことで、発生機構のより正確な把握が可能になり、工事影響の評価においても有効である。

以上

《引用・参考文献》

- 1) B.W.ピプキン、D.D.トレント(2003). シリーズ 環境と地質 I 環境と地質

庄内砂丘の冠水被害と地下水構造

(株)新東京ジオ・システム ○後藤 啓太, 瀬野 孝浩, 中臺 直之

1. はじめに

庄内砂丘地区では、平成23年6月から9月にかけての豪雨や台風等により、砂丘畑地で広範囲の冠水被害が発生した。

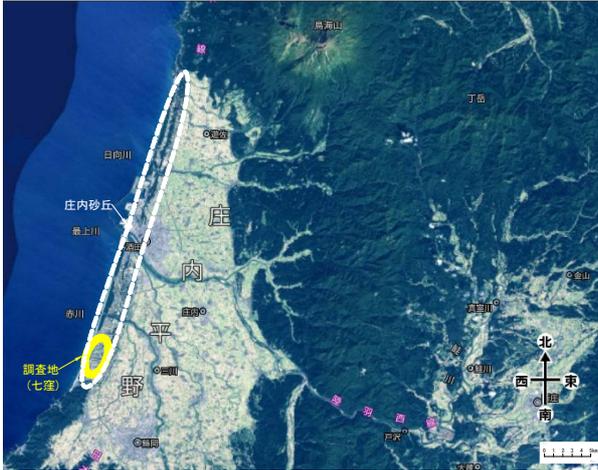


図-1 全体平面図¹⁾

それを受け、地域内の地下水の経年変動を把握するために平成24年より水位観測を実施し、対策工により冠水被害の抑制を図っている。

今回は、庄内砂丘の冠水被害の経緯と地質的な構造の概要を整理し、継続した水位観測によって得られた水位変動の特徴と対策工による地下水位の変化について報告する。

2. 調査地概要

(1) 地質・土質概要

砂丘の微地形は、海側に標高15~20m程度の人工砂丘が位置し、内陸側に標高50~60mの旧期砂丘及び新期砂丘が配列されており、両者の間に今回の調査地となる「砂丘列間低地」と呼ばれる窪地が形成されている。

対象となる砂丘堆積物の、砂の粒子は淘汰のよい細砂~中砂からなる風成砂であり、透水性を左右する砂の粒径は0.4mm程度を主とし、透水係数は $k=10^{-3} \sim 10^{-4}$ (m/sec)程度を示す。

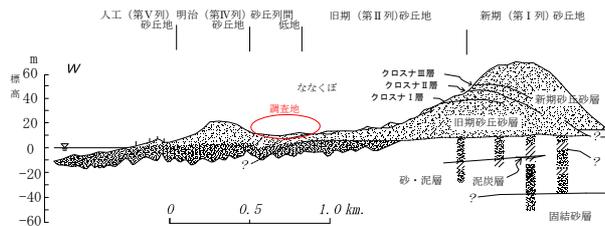


図-2 庄内砂丘地帯の地形・地質断面図²⁾

(2) 地質状況

調査深度内の砂丘堆積物は砂の粒径は概ね均一な細砂~中砂であり全体的に緩く、下位ほど締まりが良くなることが判明した。

なお、図-2に示すような新期砂丘と旧期砂丘を区分する明瞭な境界は確認できなかった為、打ち込みサンプリング時の貫入抵抗の大小により区分した。

当地区の水位観測孔は深度10~15m程度とし、掘削孔径φ66mmでオールコアボーリングを実施し、VP50のストレーナー管を用いて設置した。

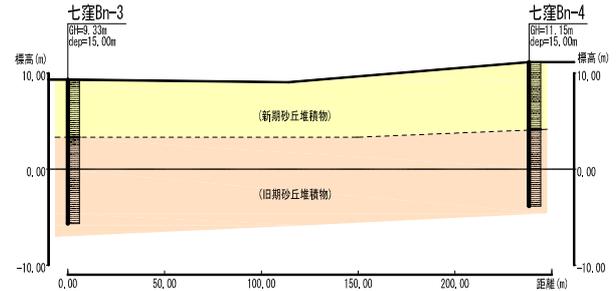


図-3 土層推定断面図(代表断面)

3. 水位観測関連実施状況

(1) 水位観測孔設置状況

水位観測孔は図-4に示すように、各対策工事計画路線沿いに水位観測孔(Bn-1~Bn-7)を配置した。

観測方法に関しては初年度のみ通年の水位変動を連続的に採取するために、投げ込み式自動水位計を用いて1日毎に水位観測を行い、その後は原則2週間に1回程度の間隔で触針式水位計による水位観測を実施した。

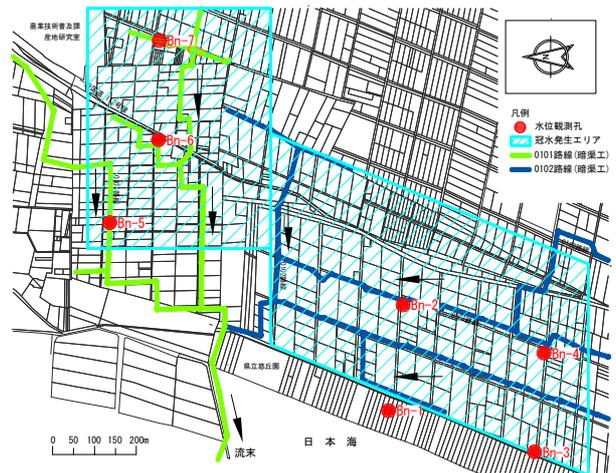


図-4 観測孔設置状況

(2) 対策工実施状況

平成30年より流末方向から順次実施され、0102路線は令和元年4月から9月、0101路線は同年10月から翌年3月までの期間で主たる対策工事が実施され、その後令和2年から3年の間で枝線が整備され、現在では予定区間の9割が施工完了した状況にある。

対策工事の内容は大きめにφ100~800mm程度のポリエチレン製波状管(主に有孔管)をGL-1.50~4.00m程度の区間に埋設し水位上昇の抑制を図っている。

4. 水位観測結果

(1) 水位変動状況

年間の水位変動は降水量が例年並みの場合、緩いサインカーブを描き変動し、最低水位を10月に記録し、その後、秋雨期間を経て上昇に転じ、12月から3月の冬期間に最高水位を記録する。3月以降は再び最低水位に向かうという変動を示すことが確認できた。

冠水被害を発生させた平成23年の8/18には日雨量280mm、9/20~9/21の2日間は計150mmの降雨が確認されている。観測開始以降の平成25年7/11~7/12の2日間でも計150mmの降雨が確認され、同様に冠水被害が発生していることから、冠水被害は降雨と明確な相関を有しており、累積雨量が100mmを超えるようになると急激に水位が上昇し、場合によっては冠水被害を発生させるものと判断される。

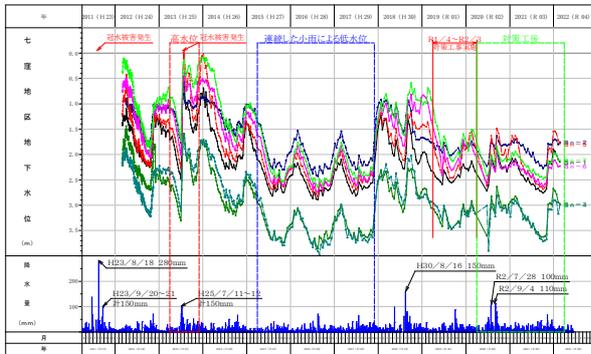


図-5 水位変動状況

(2) 対策工事の効果について

令和元年の対策工事以降は地下水位が年間を通して低く推移し、令和2年の7月や9月の日雨量100mmを超える降雨の際にも、冠水被害は発生しておらず、対策工事で設置した排水管からも多量の排水が確認された。

以上のことより、対策工事の効果が発揮されているものと推測されるが、平成25年以降は、過去に冠水被害を発生させたような降雨は観測されていない為、他の対策効果の評価材料として回帰分析を行った。

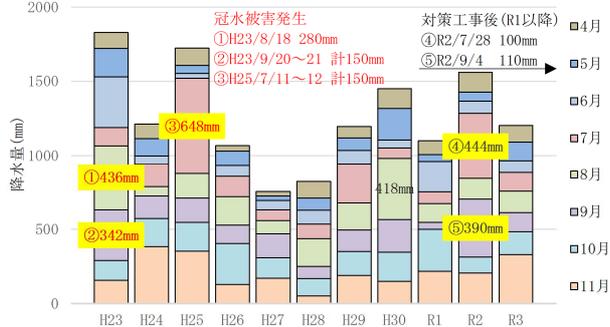


図-6 年度毎の月別降水量

5. 回帰分析

今回は平成24年の自動水位観測データのうち、水位低下の傾向を把握するために最低水位を記録する1か月前の9月から降雨により水位が急上昇した11月までの3か月間に期間を絞り回帰分析を実施し、得られた回帰式を用いて以降の降雨に対する水位変動を推定した。

(1) 分析条件

解析に用いた降水量のデータは調査箇所付近に近接する庄内空港に設置されているアメダス浜中³⁾のデータを使用し、9月1日~11月30日までの91日間の降雨に対する水位変動から実効雨量の算出を行った。

なお、実効雨量は以下に示す条件の組み合わせから、最も大きい相関係数を得られた結果を用いた。

- ・ 逓減係数(α): 0.800~0.900 (0.010刻みで計算)
- ・ 累積日数(n): 1~30日(1日刻みで計算)
- ・ 遅延日数(d): 0~20日(1日刻みで計算)
- ・ 回帰式: 直線回帰式および指数回帰式の両方

(2) 分析結果

相関係数は0.89~0.92を示しており、逓減係数や累積日数及び遅延日数も、概ね妥当な数値を示すことから、今回の解析結果から推定される水位は対策工事を実施しなかった場合を再現できているものと推測される。

表-1 回帰分析結果一覧

地下水水位データ	逓減係数 α	累積日数 n	遅延日数 d	回帰式	相関係数	判定
Bn-1	0.90	23	8	$Y = \exp(0.93107 - 0.00484x)$	0.91873	◎
Bn-2	0.90	22	7	$Y = \exp(0.69617 - 0.00443x)$	0.91339	◎
Bn-3	0.90	21	8	$Y = \exp(1.05221 - 0.00293x)$	0.91269	◎
Bn-4	0.90	21	8	$Y = \exp(1.20030 - 0.00226x)$	0.89752	◎
Bn-5	0.90	22	8	$Y = \exp(0.90064 - 0.00433x)$	0.92343	◎
Bn-6	0.80	22	7	$Y = \exp(0.80497 - 0.00455x)$	0.91087	◎
Bn-7	0.90	22	10	$Y = \exp(0.69095 - 0.00436x)$	0.89182	◎

6. 考察

水位推定結果の一例を以下に示すが、平成25年の冠水被害を発生させた豪雨や、対策工事前の多雨に対する実測値と推定値は近似しており、対策工事以降になると降雨に対しての実測値と推定値に50~75cm程度差があることが確認できた為、今回の解析は対策工事の効果が発揮されていることを確認できる評価材料の一つとなりうると考えられる。

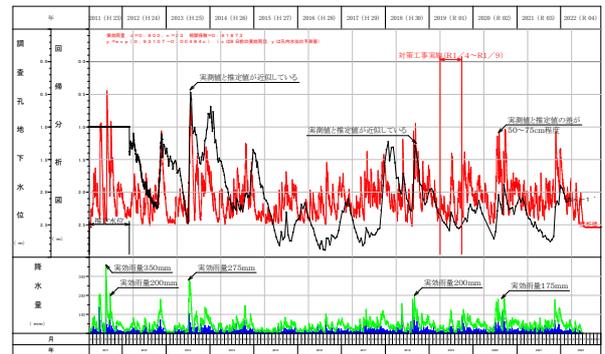


図-7 Bn-1実測水位と推定水位の比較

《引用・参考文献》

- 1) 国土地理院(写真+注記) ※一部追記
- 2) 角田清美:「日本海および東シナ海沿岸の主な海岸砂丘地帯の形成期と固定期について」第四紀研究14巻(1975)4号 P255
- 3) 国土交通省 過去の気象データ, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2022.06.21)

地下水利用が盛んな扇状地における地下水位変動因子分析

株式会社建設技術研究所 ○安富達就, 南部卓也

1. はじめに

持続的な地下水利用や将来的な地下水位を予測する際には、地域における地下水位変動の特徴を適切に評価することが重要である。本稿では、地下水利用の盛んな扇状地における地下水位変動の特徴を理解するため、対象地の水文地質環境を整理し地下水位変動因子を抽出した後、重回帰分析によって各因子の影響度を考察した。

2. 水文地質環境の整理

(1) 地形地質概要

調査地は、濃尾平野北端に位置する岐阜市域の低地部である(図-1)。地形は、長良川起源の扇状地が広がり、上位に長良川・木曾川等による氾濫平野が形成されている。地質は、第四紀更新世後期および完新世に堆積した砂礫層が50m以上の厚さで分布し、その上位を粘性土層が数m~10m程度の厚さで覆う。砂礫層は不圧帯水層を形成し、透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ オーダーと大きい。

(2) 地下水利用状況

調査地は、金華山から忠節観測所の上に長良川から豊富な河川表流水が地下へ浸透する地域であり¹⁾、行政届出義務のある大規模な井戸のみでも岐阜市内に1,000箇所近く分布し、年間1億 m^3 近くの地下水が利用されている。荒田川より南側の低地部では、農業井戸等の大規模揚水施設が夏期に稼働する影響で6~9月の揚水量が多い²⁾。



図-1 調査地周辺の治水地形分類と主要な観測地点

(国土地理院 治水地形分類図に加筆)

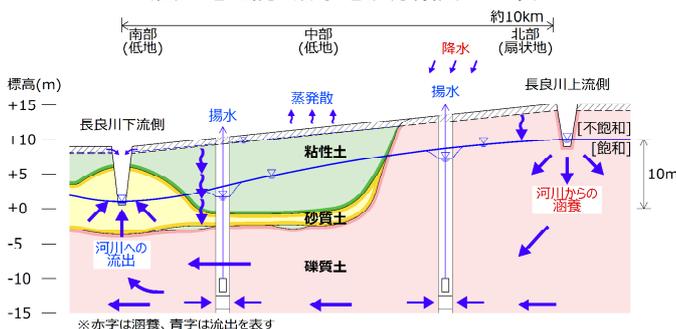


図-2 調査地の水循環機構概念図

(3) 地下水位変動因子の選定

地形地質や地下水利用状況から想定される扇状地内の水循環機構の概念図を図-2に示す。この循環系の中で地下水位変動に影響を与える主要事象として、降水・揚水・河川水位の3つを因子分析で取り扱う対象データとした。

3. 検討対象地点および期間

検討対象は、岐阜市の地下水位連続観測地点のうち、扇状部に位置する「明德」・扇端部に位置する「天満」・低地部に位置する「華陽」の3地点を対象とした(図-1)。検討対象期間は10年間を基本とし、各地点の観測開始時期を考慮して決定した。

4. 検討方法

(1) 収集データ整理

収集データは、データ間で測定間隔が異なるが(河川水位・降水量:1時間間隔、揚水量:1ヶ月間隔)、本検討では中~長期的な地下水位変動に着目し、全データを日単位間隔に整理した。揚水量は使用者申告に基づくため年によっては情報の欠落を含む可能性があるが、集計結果より揚水量の変動特徴は年によって大きく変わらないと判断し、集計期間の平均的な月間変動パターンを揚水量の時系列データとして取り扱った。

(2) 解析手法

地下水位変動因子の分析には、線形重回帰分析を用いた。ある時間 n (日)の観測地下水位 y_n (m)は降水量の影響 R_n 、揚水量の影響 P_n 、河川水位の影響 L_n 、定数 C 、ランダムホワイトノイズ ε_n の和で表現できると仮定する。

$$y_n = R_n + P_n + L_n + C + \varepsilon_n \quad (1)$$

ここで、降水量、揚水量、河川水位は、時間遅れを伴いながら一定の期間地下水位に影響を及ぼすと考えられる。この時間遅れを考慮すると式(1)は次式となる。

$$y_n = \sum_{i=1}^{M_1} a_i r_{n-i} + \sum_{i=1}^{M_2} b_i p_{n-i} + \sum_{i=1}^{M_3} c_i l_{n-i} + C + \varepsilon_n \quad (2)$$

ここで、 r_n :降水量($\text{mm}/\text{日}$)、 p_n :揚水量($\text{m}^3/\text{日}$)、 l_n :河川水位(m)、 a_i 、 b_i 、 c_i :偏回帰係数、 $M_{1\sim3}$:各因子が地下水位に影響を及ぼす期間(日)である。

式(2)を地下水位の時系列変動の実測値(実測地下水位)に近づくよう最小二乗法により各説明変数(因子)の偏回帰係数を求め、降水量 r_n 、揚水量 p_n 、河川水位 l_n と偏回帰係数の積から、降水量の影響 R_n 、揚水量の影響 P_n 、河川水位の影響 L_n を求めた。

(3) 地下水位変動への各因子の影響度評価方法

降水量、揚水量、河川水位の3つを説明変数として重回

帰分析を実施する場合、多重共線性の影響により、降水量の影響と河川水位の影響は正確に分離できない。一方で、揚水量は、人為的な行為に依存し、降水量や河川水位との間に相関関係のない説明変数であることから、揚水量の影響は他の説明変数の与える影響から独立した変動とみなせる。そこで、本検討では降水量の影響と河川水位の影響を合成し、その時系列変化の標準偏差を「自然的影響度」、揚水量の影響の時系列変化の標準偏差を「人為的影響度」として評価した。

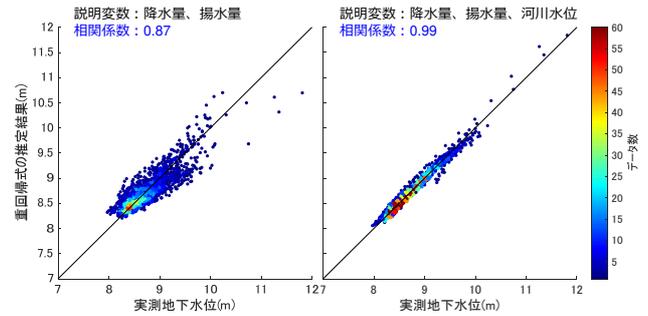


図-5 実測値と再現値の相関図比較(明德)

5. 検討結果

自然的影響および人為的影響の時系列変動の例を図-3に、影響度(式(1)各項の標準偏差)を図-4に示す。

(1) 自然的影響度(降水量+河川水位)

自然的影響度は、全3地点で人為的影響度よりも大きく、特に扇中央部に位置する「明德」では他の地点に比べて自然的影響度が大きかった。

(2) 人為的影響度(揚水量)

人為的影響度は、自然的影響度と比較して小さく、地点毎の差が大きい。扇中央部から低地部へ向かう方向に大きくなる傾向を示した。

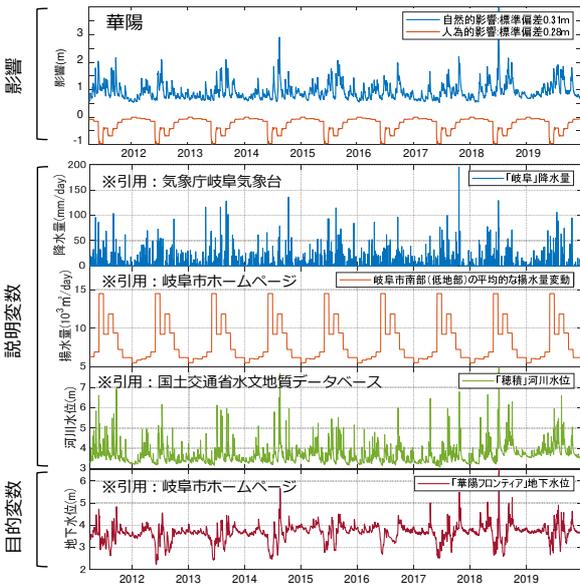


図-3 各因子と地下水水位への影響の時系列変動(華陽)

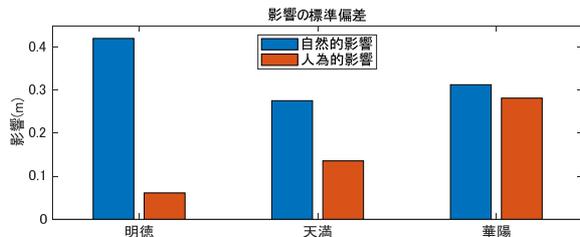


図-4 地下水水位変動における各因子の影響度

6. 検討結果に対する考察

(1) 自然的影響度の変動要因

降水量と河川水位の影響の合成である自然的影響度を決定づける要因について考察した。

まず、最も自然的影響度の大きい「明德」は、既往文献¹⁾にて長良川の失水区間(涵養区間)に隣接し、多量の河川水が地下浸透することが示されていた扇中央部に位置する。さらに「明德」の地下水水位観測データを重回帰式で再現する場合、説明変数に河川水位を加えることで再現性が飛躍的に向上した(図-5)。これらのことから長良川扇中央部付近の地下水水位変動は涵養源である河川水位の影響を強く受けていると想定される。

次に、降水量と河川水位変動を境界条件とした断面2次元非定常浸透流解析により降水量と河川水位の影響を定性的に分離した結果、長良川から2km以上離れると河川水位の影響が減少し、降水量の影響が支配的となった。このことから、自然的影響度は河川との距離に左右されるが、河川から離れても降水量の影響を受け一定程度の影響度を有すると考えられる。

(2) 人為的影響度の変動要因

人為的影響度は、地下水利用に伴う地下水位の低下として現れ、その大きさは地下水水位観測箇所周辺の地下水利用形態(揚水状況)に依存すると考えられる。人為的影響度の小さい「明德」の位置する扇中央部には上水道水源井戸等があり、年間を通して揚水量の絶対量は多いものの季節変動は小さい。一方、人為的影響度の大きい「華陽」の位置する低地部では、農業井戸等の大規模揚水施設が夏期に稼動する影響で、揚水量の季節変動が大きい。これらのことから、人為的影響度は、地下水水位観測箇所周辺における揚水量の季節変動幅に依存すると考えられる。

6. まとめ

地下水利用の盛んな岐阜市域の扇状地における地下水水位は、河川に近い扇中央部では河川水位の影響を強く受ける一方、低地部では揚水による人為的な水利用の季節変動の影響を強く受けていることがわかった。

《引用・参考文献》

- 1) 大橋他(2018):扇状地河道における失水現象に着目した表流水および地下水の統合解析,土木学会論文集 B1, Vol.74, No.5, pp.1325-1330, 2018.
- 2) 神谷他(2014):溶存イオンデータの多変量解析に基づいた広域地下水流動系の評価,地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.219-231.

調整池の漏水要因を特定するための複合調査例

中央復建コンサルタンツ(株) ○今井 千鶴、岡島 信也、金村 和生、木山 修
西日本高速道路(株) 野本 太一

1. はじめに

一般に、ため池の漏水は堰堤部から生じることが多い。漏水対策を検討する際、漏水の条件、範囲、形態および漏水量を詳細に把握することが不可欠である。また、漏水対策を確実にを行うためには、考えられる漏水の要因を抽出したうえで効果的な調査計画を立て、要因を絞り込むことが重要である。今回、複合的な調査を行い、漏水の要因を分析・評価した事例を報告する。

2. 調査地概要

調査地の地形・地質概要として、北側には上部白亜紀の堆積岩からなる山脈が連なり、南側には沖積平野と鮮新世末から更新世前期の堆積層ならびに段丘堆積層が分布する。対象のため池はその南側斜面山裾に位置する。

既往地質調査結果から、ため池堤体は、段丘堆積物、谷底堆積物上に設置されたことが確認されていた。

3. 調査計画および内容

(1) 課題

道路建設に伴う調整池としての改修工事完了後、堤体のり尻付近から約30L/minの漏水が確認された。樋管付近が水みちと推定されたため、薬液注入を実施したところ、漏水は一旦停止した。しかしながら、半年後、樋管下流の用水路から約3L/minの漏水が確認され、その後も、貯水側堤体のり尻に鋼矢板を打設する等の対策工を実施したが、現在も約1.5L/minの漏水が確認されている。

これらの状況を踏まえ、現在も継続する漏水メカニズムを解明するための調査計画を立案した。

(2) 調査内容

図-1に調査計画位置図を、また、表-1に主な調査内容を示す。電気探査については、満水の状態(降雨時期:5月下旬)と池の水を抜いた状態(無降雨時期:11月中旬)、計2回実施する計画とした。さらに、比較的表層の水みちを捉えることを目的に、1m深地温探査も実施することとした。その他、ボーリング調査、原位置試験、室内土質試験、水位観測等を実施した。

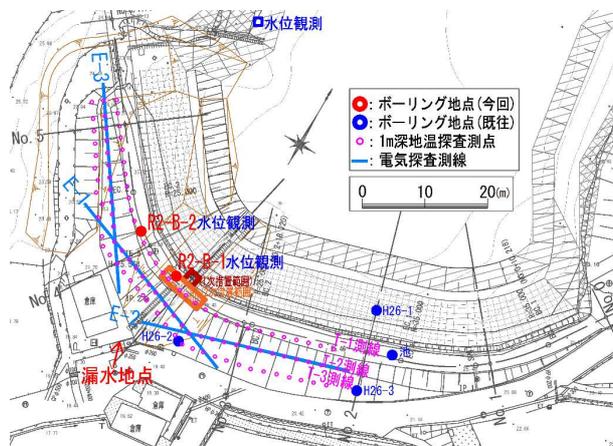


図-1 調査計画位置図

表-1 主な調査内容

調査ボーリング	φ86mm×8m:2孔
物理探査	電気探査[差分法]:0.102km(2回)
	1m深地温探査:100地点
原位置試験	標準貫入試験:16回
	多点温度検層(8m):2孔
室内土質試験	土粒子の密度、土の粒度、土の液性・塑性、土の湿潤密度、土の透水(変水位)
水位観測	貯水位、地下水位(2孔):5か月

4. 調査結果

(1) 電気探査

電気探査(差分法)は、貯水位の変化に伴う堤体漏水箇所での含水率の変化を、比抵抗値の差分として把握するために実施した。

図-2に、電気探査結果の差分断面図(各電気探査測線結果の合成図)を示す。差分の値が大きいほうが漏水の可能性が大きいことを表す。樋管設置の開削範囲内に数箇所、貯水位の変動による影響で比抵抗値が変化しと思われるゾーンが確認された。

(2) 1m深地温探査

1m深地温探査は、地下浅層を流れる水みちによって周辺の地温が変化する現象を利用したものである。1m深地温探査の実施日、緯度・経度、標高から推定される1m地温と調査時の池水温を基に、3測線の各地点で計測した地

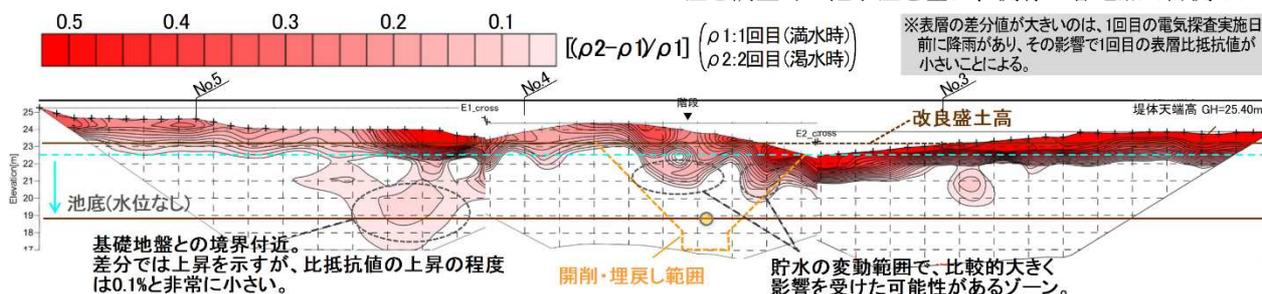


図-2 電気探査差分断面図(1回目の値を初期値とする)〔縦横比 1:1〕

温に対し、測温体、経日変化、地状について補正を行い、地温を断面上に整理した後、平面図上にプロットした。

図-3に、1m 深地温探查結果を示す。同図によると、堤体のり肩からのり尻にかけて、4条の水みちが確認された。



図-3 1m 深地温探查結果平面図

(3) 調査ボーリング・原位置試験・室内土質試験

R2-B-1は樋管設置時の開削・埋戻し範囲を、R2-B-2は非開削範囲を対象に、ボーリングを行った。

開削・埋戻し範囲と非開削範囲のいずれも、N 値に大きな違いはなく、また、室内土質試験結果の粒度組成も概ね似た傾向を示し、細粒分が多く透水性が低いことが確認された。

図-4に、湯投入から30分間の多点温度検層結果を示す。同図によると、R2-B-1はGL-4.7m 付近（堤体盛土：樋管開削・埋戻し範囲）とGL-7.4m（段丘堆積物）で、R2-B-2はGL-7.3m（段丘堆積物）で弱い地下水流動箇所が検出された。

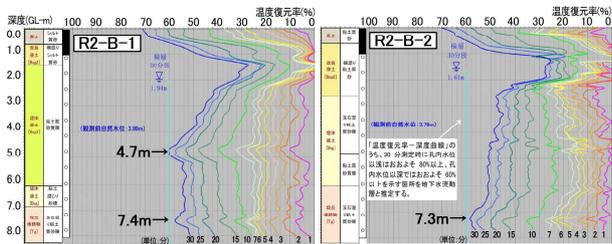


図-4 多点温度検層結果図(30分間経過)

(4) 水位観測

2回目の電気探査を実施するにあたり、池貯水位を段階的に下げており、この時の貯水位、観測孔水位と漏水量の関係を整理した。

図-5に、水位観測結果を示す。同図によると、池貯水位が標高水位21.5m より低下すると、漏水量も減少する

関係性が確認された。さらに、貯水位と R2-B-1の孔内水位は、降雨の影響がない時は似た変動を示し、その傾向は人為的に貯水位を下げた期間と水位が回復する期間で特に顕著であった。

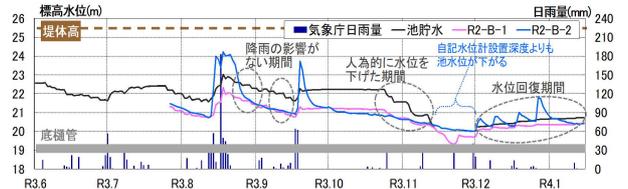


図-5 水位観測結果図(貯水位・孔内水位)

5. 考察

現地調査結果、水位観測結果から判明した事項を整理すると、以下のとおりである。

- ・電気探査結果より、樋管周辺は貯水位の違いで比抵抗値の違いが生じていることから、貯水位の影響を受けており、相対的に貯水との関連性が高い。また、右岸側は地下水が飽和している。
- ・1m 深地温探查結果より、地表面付近に貯水を起源とする水みちが形成されている。
- ・調査ボーリング、原位置試験、室内土質試験結果より、明瞭な透水層は確認されないが、一部に弱い地下水流動箇所が確認される。
- ・水位観測結果より、R2-B-1付近（樋管埋戻し部）では、貯水が堤体内（開削・埋戻し範囲）に浸透している可能性がある。

現地調査以外に、残っている工事記録についても検証を行った。池改修工事は樋管設置だけでなく、余水吐の付替えも行われており、堤体の位置によっては施工ヤードのための大規模な掘削が行われた経緯がある。埋戻し時の締め固めの程度も無視できないと考えられた。

以上より総合的に考察した結果を、図-6に解析結果図（堤体正面図）として示す。地下水に関しては、堤体材料は透水性が低いため、均一な自由地下水面が形成されているとは考えにくいものの、局所的な導水経路に伴う水みちを形成すると考えられる。樋管施工時に開削・埋戻しを行った範囲で局所的な水みちが形成している可能性が高いと結論付けた。

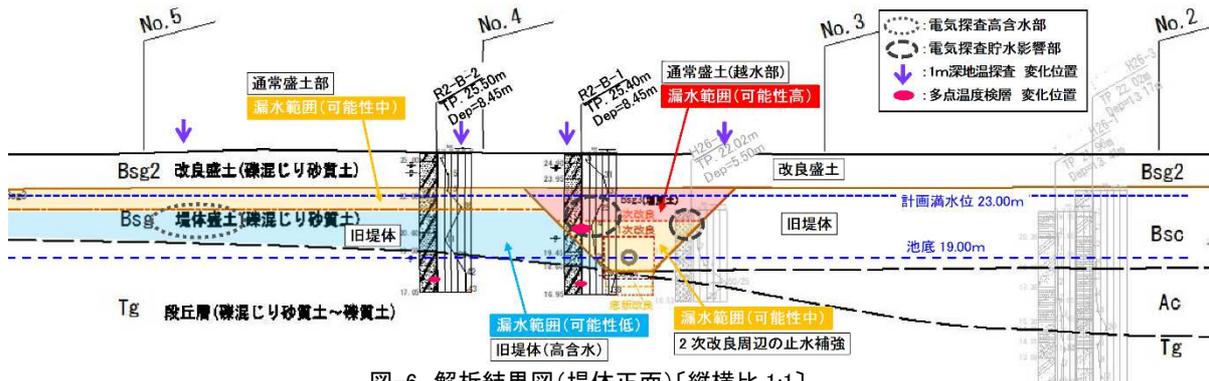


図-6 解析結果図(堤体正面)〔縦横比 1:1〕