

◆ 特集 土砂災害を防ぐ ◆

溶存酸素をトレーサーとした地下水流动調査

柳原幸希* 綱木亮介** 吉田克美***

1. はじめに

地すべり発生の主要な要因となる地下水は、降雨・融雪などの浸透したもの、河川・湖沼または水田・用水路・貯水ダムなどから漏水したもの、あるいは地すべり区域外の地下水が流入したものがあり、このような地下水のすべてが地すべりに影響するとは限らない。したがって、この中で地すべりを誘発あるいは助長するおそれのある地下水を判別し、地すべり防止対策を効率的に計画するために地下水調査は、きわめて重要である。

一般的に地すべり地において行われている地下水流动調査は、ボーリング孔内に食塩等の電解物質を投入、溶解させ、流入地下水の比抵抗値の変動より流动状況を知るものである。しかしながら、この方法では、計測開始時にピックアップの上下によって孔内水の攪拌が生じたり、各深度ごとの測定に要する時間のため同一時間間隔での(塩分希釈濃度の)評価ができない場合がある^{1),2),3)}。

溶存酸素は、水中に遊離のガスとして溶解しているものであり、この値は、岩石の風化・粘土化に伴う消費、また、有機物の分解などによって減少する。したがって、地下深部あるいは長期に滞水している地下水ほど溶存酸素が減少しているものと思われる。一方、溶存酸素は希釈が容易であり、水中に溶け込むと上下動が少ないと、などの利点がある。本研究では、これをトレーサーとして食塩検層と溶存酸素検層を現地で行った。以下に流动調査方法と新第三紀層と破碎帯の地質的特徴を示す二つの地すべり地においての現地計測結果を示す。

2. 地下水流動調査方法と流速の推定方法

まず、調査ボーリング孔内水の深度別溶存酸素量を計測しておき、これをバックグラウンド値とする。その後、ボーリング孔底までセンサおよびポリエチレンチューブを降ろし、酸素ボンベで一定時間酸素を送り込む。孔内水が飽和溶存状態になった

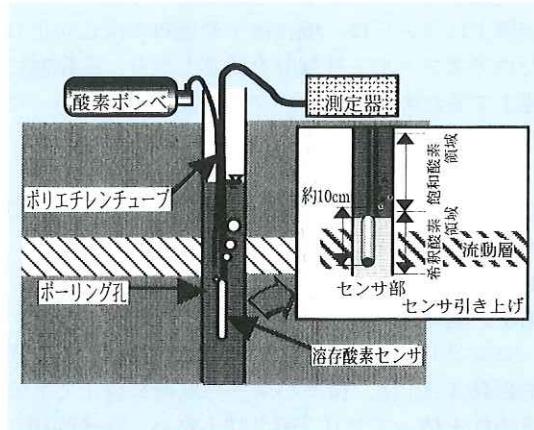


図-1 溶存酸素による地下水検層概念図

所で、孔底からセンサを引き上げ、ある時間間隔における溶存酸素の減少量を計測する。地下水の供給が常にある深度の溶存酸素は、大きく減少する。したがってこの深度が地下水流动層と予測できる。計測中は絶えず酸素を供給しているため、センサより上部は常に飽和溶存酸素状態になっている(図-1)。

飽和溶存酸素状態から地下水が流入することによって減じられる溶存酸素量とその時間間隔により、流速の推定を行った。この際、ボーリング孔壁からセンサまでの距離により、測定値が変化するまでのタイムラグが生じるため、測定値が減少を始めた後に2回計測し、測定値の差と時間間隔から溶存酸素減量を求めて流速の計算を行っている。

飽和溶存酸素がバックグラウンド値まで減少する時間は、流速によって変化し、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ までの早いもので2~3秒、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ で15秒、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ で50秒程度の時間を必要とする⁴⁾。

飽和状態の溶存酸素が減少を始めた初期値を DO_{init} 、その後の測定値を DO_{means} 、バックグラウンド値を DO_{BG} をとし、初期値から測定値までの時間間隔を δt とすると、溶存酸素がバックグラウンドまで減少する時間 (t) は、次式によって求められる。

$$t = \frac{(DO_{init} - DO_{BG}) \times \Delta t(\text{sec})}{DO_{init} - DO_{means}} \quad (\text{sec}) \quad (1)$$

また、ポーリング口径を 5.0cm とすると、孔壁からセンサまでの距離はおよそ 2.5cm となり、次式によって流速 (V) を推定することができる。

$$V = 2.5/t \quad (\text{cm/sec}) \quad (2)$$

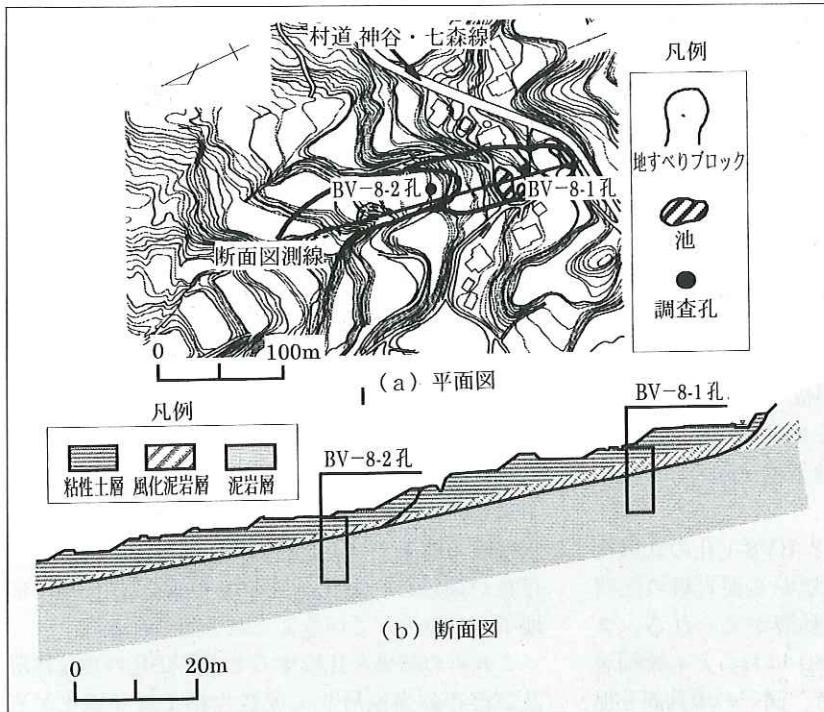


図-2 沖見地すべり平面図及び断面図

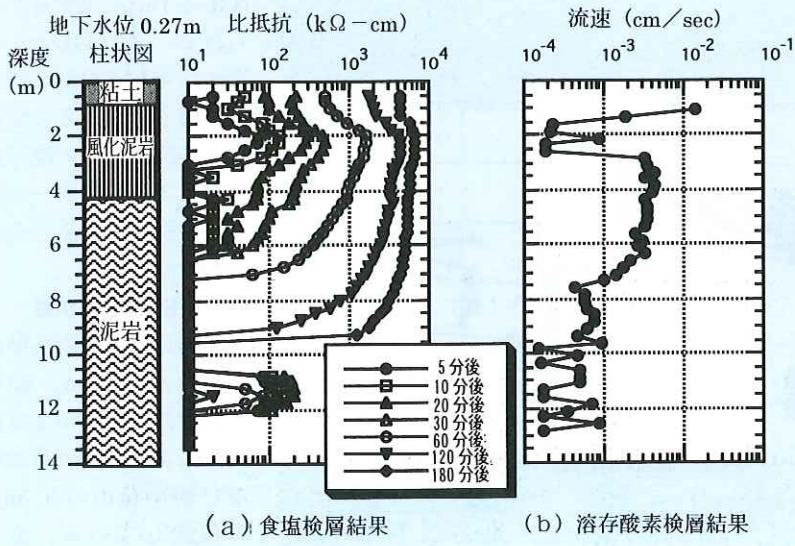


図-3 BV-8.1 孔検層結果

3. 地すべり地での現地計測結果

3.1 沖見地すべり

沖見地すべりは、上越市の東方約 14km、東頸城丘陵の一角を占める標高 100~300m の牧~三和丘陵にあり、保倉川水系高谷川の一支流である平方川の右岸側に位置する。地すべり規模は、最大幅約 500m、延長約 1,500m、面積約 70ha である。また、斜面勾配は約 10° であり、比較的緩やかな地形を形成している。地すべり地周辺の地質は、新第三紀中新世の泥岩層から構成されている(図-2)。この泥岩層は、一般に、黒灰色塊状で岩相の変化に乏しいが、薄い酸性の凝灰岩をしばしば介在し、ノジュールを多産する点に特徴がある。調査ブロックは、沖見地すべりの西端、村道神谷・七森線の北側に位置し、両側を尾根状地形に挟まれた凹状地形を呈している。ブロック上部~中部にかけては湿地化している。また、ブロック上部には、ため池が数ヵ所あり、そこから浸透水がブロック内に流入していると考えられる。このブロック内の地下水位調査孔 BV8-1 孔、BV8-2 孔において食塩検層及び溶存酸素検層を行った。ここで測定深度間隔は、食塩検層及び溶存酸素検層ともに 25cm とした。

食塩検層及び溶存酸素検層結果を図-3、図-4 に示す。BV8-1 孔での食塩検層の結果では、深度 GL-0.5~9.5m、GL-10.5

~12.5mに流動状態が見られた。特にGL-0.5~6mにおいて比抵抗値が60分で 5×10^2 kΩ-cm以上の増大が認められ準確定流動面と推定される⁵⁾。またGL-10.5~12.5mにおいて食塩投入後5分後で比抵抗値に 10^2 kΩ-cm以上の増大が認められ、その後、時間が経過するに従い比抵抗値が減少しており、潜在流動面と推定される⁵⁾。

一方、溶存酸素検層結果では、GL-0.75~2.5m、GL-2.75~9.5m、GL-10.75~13mに流動状態が見られる。

ポーリングコアの観察では、表土と泥岩片混じり粘土の境界がGL-0.8m付近であり、GL-1.1m以浅では、含水多く軟質である。このような状況からみてこの境界から地下水が流入していると見られる。また、GL-5.75~5.85m、GL-6.1~6.2m、GL-6.5m~6.9mの区間では風化が著しい。GL-7.1~7.5m、GL-8.2~8.4m、GL-8.7~8.8m、GL-12.8~12.9mにおいて亀裂が見られ地下水の滲み出しが予想される。また、平成8年度に行われた簡易揚水試験の結果ではGL-3.0~9.5m付近まで有圧水の存在が確認され、地下水が流入していることが予想される。

これらの結果を比較するとBV8-1孔の食塩検層及び溶存酸素検層共に表層から泥岩層の区間(GL-0.5~13m)において流動層が見られる。また、泥岩層(GL-10.5~13.0m)においても流動層が見られる。これらの結果は、同一の流動面を捉えているものと思われる。

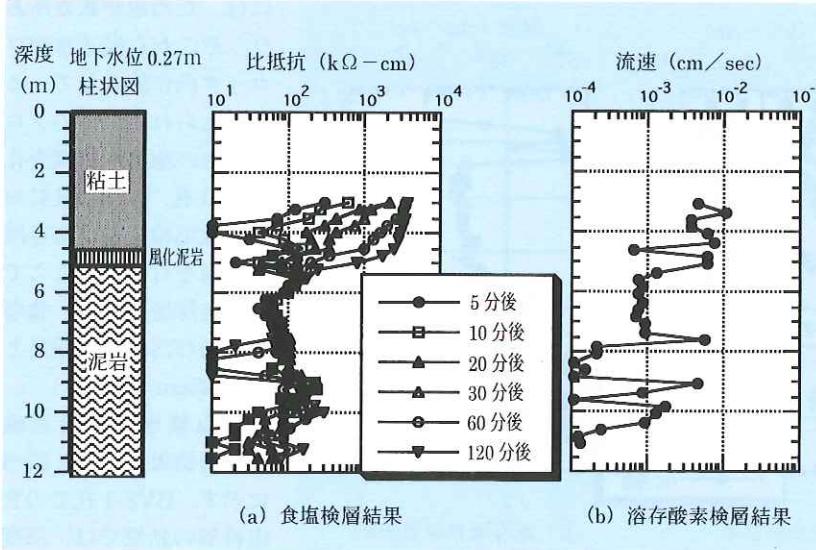


図-4 BV-8-2孔検層結果

各深度において測定値の増大が食塩検層では幅をもって確認されるが溶存酸素検層では、はっきりとした流速の違いが確認される。これは、食塩投入後の食塩の拡散³⁾による影響が考えられる。

次にBV8-2孔での食塩検層の結果では、GL-3.0~6.0m、GL-7.75~8.0m、GL-9.5~11.75mに流動状態が見られる。特にGL-3.0~5.0mにおいて食塩投入後30分で比抵抗値に 2×10^2 kΩ-cm以上の増大が認められ準確定流動面と推定される⁵⁾。GL-6.0m以深では、約 10^2 kΩ-cmの比抵抗値増大が認められ、潜在流動面と推定される⁵⁾。

一方、溶存酸素検層では、GL-3.0~5.0m、GL-7.75m、GL-9.5~9.75m、GL-10.0~11.0mに流動状態が見られる。

ポーリングコアの観察では、泥岩片粘土層と風化泥岩層の境界がGL-4.6mであり、風化泥岩は、所々破碎している箇所がある。したがってこの境界面からの地下水の流入が考えられる。また、GL-5.3~5.6m間、GL-6.25~6.45m、GL-6.6~6.7m、GL-7.1~7.2m、GL-8.0~8.1mにおいて破碎が著しい状態となっており各層からの地下水の流入が予想される。また、平成8年度に行われた簡易揚水試験の結果ではGL-6~12m付近まで有圧水の存在が確認され風化泥岩の境界面(GL-6.2m)に地下水が流入していることが予想される。

これらの結果を比較するとBV-2孔の食塩検層及び溶存酸素検層共に泥岩片粘土層と風化泥岩境界面(GL-4.6m)、風化泥岩層と泥岩層の境界面(GL-5.1m)に流動層が見られる。またGL-8m以深の溶存酸素検層及び食塩検層を比較すると流動域と不流動域との境界が一致しており、同一の流動面を捉えているものと思われる。

3.2 小柏地すべり地

小柏地区は、群馬県藤岡市の南西15km、関東山地西部の三波川変成帶の中にあり、東御荷鉾山及び西御荷山の北3kmに位置している。地すべりの規模は、最大幅約

950m、延長約400m、面積19haである。また、斜面勾配は、 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ であり、比較的緩やかな地形を形成している。地すべり地周辺の地質は、主として三波川変成帯の結晶片岩よりなるが、当該地区の中央～東寄りに東西200～300mにわたって御荷鉢緑色岩体が分布している(図-5)。

当地区東側地すべりブロックのA-4孔、A-7孔で食塩検層、溶存酸素検層を行った。当地区での測定深度間隔は、食塩検層で25cm、溶存酸素検層で50cmとした。

食塩検層及び溶存酸素検層結果を図-6、図-7に示す。A-4孔での食塩検層の結果では、深度GL-25.5m～33.5m、35.0～38.0mに流動状態が見られた。GL-25.5m～28mにおいては 5×10^2 以上の比抵抗値の増大が認められ、潜在流動面と推定される⁵⁾。GL-28.0m以深では、比抵抗の増大は、

少量ながら確認できるが流動層と判定できるまでには至っていない。

一方溶存酸素検層では、GL-25.5m～27.0m、GL-29.5～30.5m、GL-32.0m、GL-33.5m、GL-34.5m、GL-37.0m付近の7カ所に流動域があると見られる。

ボーリングコアの観察によると、GL-25.0～26.0m、GL-26.3～26.7m区間が破碎風化の進行した砂質粘土状を呈する。また、GL-30.5～30.6m、GL-30.8～30.83m、GL-31.7～31.85mでは、砂質片岩の風化が進み砂状を呈している。

泥質片岩層のGL-32.0～33.25m、GL-34.0～34.6m、GL-34.6～36.0mでは、亀裂面から風化が進行し、破片状の充填物からなっている。

これらの結果を比較するとA-4孔の食塩検層及び溶存検層では、GL-25.0～28.85mの泥質片岩層

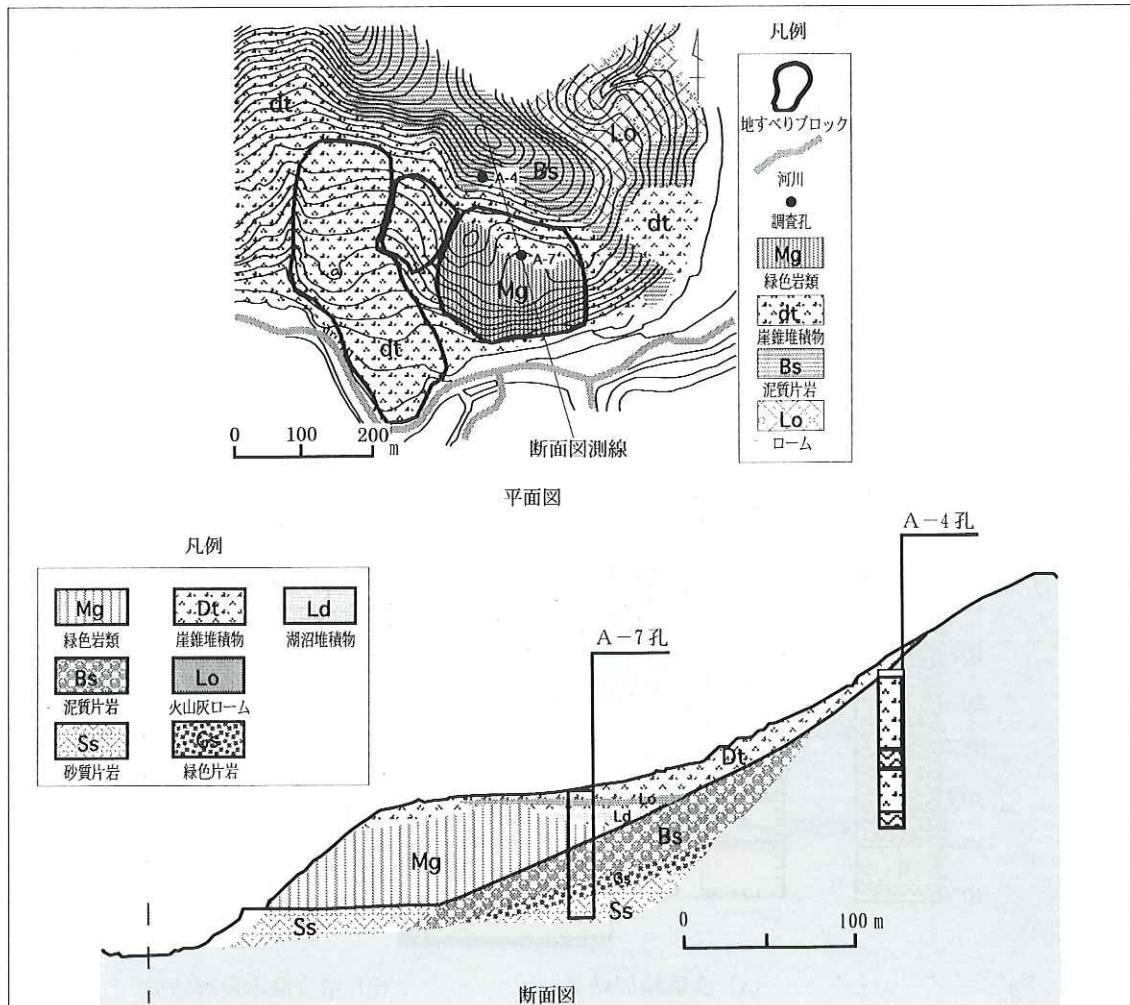


図-5 小柏地すべり平面図及び断面図

に層全域にわたり流動域が確認される。

また GL-28.85m 以深の砂質片岩、泥質片岩とともに食塩検層では比抵抗値が $10^2 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 以下の増加しか示していないが溶存酸素検層では、およそボーリングコアで見られた破碎、亀裂の層にそって流動状態が確認できる。

次に図-7 の A-7 孔での食塩検層の結果では、GL-5.75m～10.0m、GL-11.5m～35.5m の間に流動層が確認される。深度 GL-6.75m～9.25m、GL-11.5m～17.5m において食塩投入後 30 分後に $1 \times 10^2 \Omega\text{-cm}$ 以上の比抵抗値の増大が認められる。

GL-6.75m～9.25m、GL-12.0m～15.5m において 120 分後に 3×10^2 以上の比抵抗の増大が認められ、潜在流動面と推定される⁵⁾。

一方、溶存酸素検層では、GL-7.0m、GL-8.0m～10.0m、GL-12.0m～12.5m、GL-27.5m、GL-38.0m 付近に流動域が確認できる。

ボーリングコアの観察では、GL-16.10m まで崖錐堆積物であり、片岩起源の角礫から構成されており、地表面からの流入が考えられる。GL-8.3～11.6m の層は、湖沼堆積物の礫混じり粘土で構成されており、遮水層と判断される。GL-16.10m

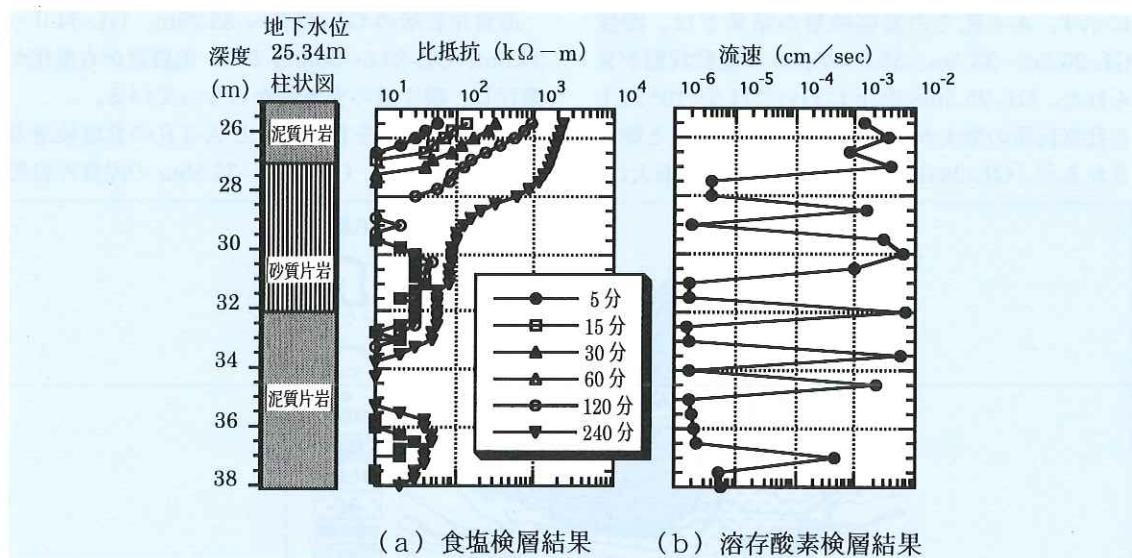


図-6 A-4 孔検層結果

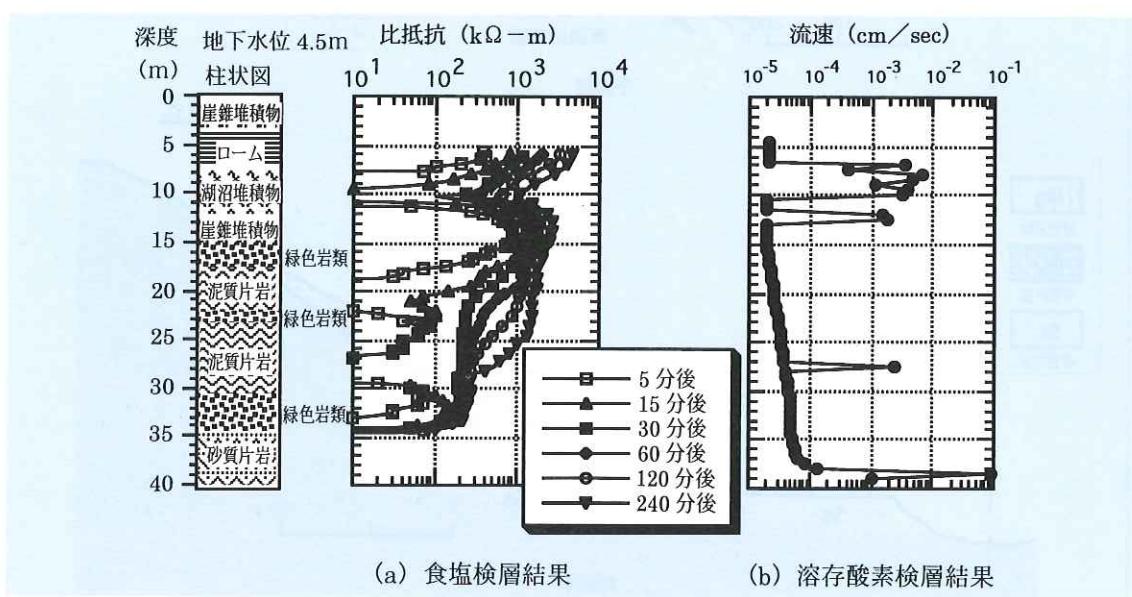


図-7 A-7 孔検層結果

以深の層では、緑色片岩、泥質・砂質片岩が相互に堆積しており、境界面や亀裂部からの地下水の流入が考えられる。

これらの結果を比較すると A-7 孔の食塩検層及び溶存酸素検層では、崖錐堆積物で構成されている。

GL-16.10m 以浅では両検層ともに流動層が確認される。湖沼堆積物が堆積している GL-10.25~11.0m において、両検層の測定値の減少がみられ不透水層と考えられる。食塩検層では、風化が著しい緑色片岩から構成されている GL-22.40~23.05m、GL-30.45~34.45m に食塩投入後に $10^2 \text{k}\Omega\text{-cm}$ 程度の比抵抗増大が確認された。しかし、溶存酸素検層では、これらの層に流動域は、確認できなかった。岩の亀裂よりの流量の少ない流量が考えられる。

これらの結果を念頭において食塩検層法と溶存酸特徴をまとめると表-1 のようになる。

4. まとめ

溶存酸素検層の信頼性を検証するために食塩検層との現地計測を行い、次のようなことが判明した。

- (1) 食塩検層で流入層と判断された層は溶存酸素検層でも同様な層と判断される。
- (2) 溶存酸素検層の流動区分の幅が食塩検層に較べ狭い範囲となり流動層のより的確な判定が可能である。
- (3) 食塩検層でプローブによる攪拌作用を受けたと思われる不透水層の箇所で流動層が明確に計測される。

表-1 食塩検層と溶存酸素検層の特徴

	長所	短所
溶存酸素検層	1) 流入量の少ない流入層にも適応する。 2) 流速の大小により簡単に流動層が判定し易い。	1) 孔内が飽和溶存酸素状態になるため再測が困難。
食塩検層	1) 機器のメンテナンスが容易であり、計測に困難を要しない。 2) 経過時間ごとの計測を行うので計測ミスの確認ができる。	1) 扩散の影響により少量の流入量は判定できない。 2) 食塩の攪拌による誤差がある。

5. おわりに

溶存酸素検層は、1回の計測で流動層の判定が可能であり、時間の短縮がはかられ、明確な流動域の確認ができることが分った。しかし現段階では計測数が少なく、様々なタイプの地すべりについての計測を行い、地すべりの特性による適否の判定や精度の向上を図って必要がある。

参考文献

- 1) 申潤植：地すべり工学－理論と実践－，第3刷，pp.417~431，山海堂，1994。
- 2) 申潤植：地下水検層についてその(1)問題点と理論解，地すべり，Vol.13, No.3, 地すべり学会，1976。
- 3) 奥西一夫：ボーリング孔中の地下水の鉛直混合について，地すべり，Vol.13, No.3, 地すべり学会，1976。
- 4) G.A.Truesdale et al. : The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea-water, J.Appl.Chem., Vol.5, No.5, pp.53-62, 1955.
- 5) 谷口敏雄、藤原明敏：地すべり調査と解析，第4刷，pp.107，理工図書，1978。

柳原幸希*



建設省土木研究所砂防部
地すべり研究室
Koki YANAGIHARA

綱木亮介**



同 地すべり研究室長、
学術博
Dr.Ryosuke TSUNAKI

吉田克美***



建設省北陸地方建設局阿賀野川
工事事務所調査課
(前 地すべり研究室研究員)
Katsumi YOSHIIDA