

第三紀層の地すべり地における加熱式地下水検層の適用について

LOGGING GROUNDWATER FLOW BY WATER-HEATING ON LANDSLIDES IN TERTIARY STRATA

丸山清輝*・古谷 元**・大河原 彰***・鈴木聡樹****・北川淳一*****
Kiyoteru MARUYAMA, Gen FURUYA, Akira OKAWARA, Souki SUZUKI and Jun'ichi KITAGAWA

NaCl injection has often been used to detect groundwater flow in landslide masses in Japan. However, the logging results through NaCl injection have several problems: (1) the measurements take too long to complete; (2) there are concerns about the environmental impacts of NaCl on the ground; and (3) it is difficult to interpret the measured data. In this study, we applied a new method of logging groundwater flow based on the measurement of groundwater temperature distribution before and after applying heat. Smaller differences in temperature between before and after heating indicate greater flow. We used this method in two landslides (Takisaka and Shimofurusawa landslide) that are located on areas of tertiary strata, and the results showed that this new method is more accurate and costs less than conventional groundwater logging by means of NaCl injection.

Keywords : groundwater flow, temperature, heating, sodium chloride (NaCl), Takisaka landslide, Shimofurusawa landslide

1. はじめに

地すべりの移動機構の解明や地すべり対策工の計画を実施する際には、地すべりの主誘因となる地下水の流動箇所情報を把握することが非常に重要である。より正確な地下水の流動状況を把握すれば、詳細な地すべりの安定性評価や効率的な対策工計画が可能になる。

従前より地すべり土塊内部の地下水流動層を推定することを目的として、NaCl等の電解物質を用いた地下水検層(ここでは従来型地下水検層と称する)が実施されてきた。この検層は多くの地すべり地に対して適用されているものの、2に述べるように、いくつかの問題点も指摘されている。

これに対して計測作業が容易でかつ調査精度も高い新しい地下水検層(同加熱式地下水検層と称する)が(独)土木研究所により考案されている。この検層は後述するように非常に単純な物理現象を利用した手法であり、室内試験によりその基本特性が確かめられている¹⁾。

本報では、加熱式地下水検層の現場における適用性を検証することを目的として、2箇所の地すべり地を試験地としてこの検層を実施した。さらに加熱式地下水検層結果とこの検層を実施した孔における従来型地下水検層の結果と

を比較、検討し、加熱式地下水検層の有用性について考察した結果を報告する。

2. 従来型地下水検層の問題点

従来型地下水検層は、斜面はもちろんのこと地盤にボーリング孔を掘削した後に、孔内にNaCl等の電解物質を投入して人為的に電気抵抗を下げ、地下水流入により電気抵抗の回復を経時的に計測する方法である。この方法は、計測作業が容易であるものの、①計測の時間が掛かること、②電解物質による地盤・地下水環境への負荷が懸念されること、③時として孔内における電解物質溶液濃度の不均一性や電解物質沈降の影響等の問題が生じている。

3. 加熱式地下水検層の概要

(1) 原理

加熱式地下水検層の原理¹⁾は、地下水を加熱するヒータおよび地下水温を測定する温度センサを取り付けたプローブを観測孔内に降下させながら温度を約1cmごとに計測し、両センサ間の温度差が相対的に小さい箇所を地下水流動層と判別する手法である(図-1)。すなわちヒータにより地下水を熱した箇所において、「この箇所に流動層が存在する場合は、地下水の流れにより熱が奪われてヒータ温度が上昇しない。逆に流動層が存在しない場合は、

* (独)土木研究所 雪崩・地すべり研究センター
** 新潟大学災害復興科学センター (元新潟支店 技術部)
*** 新潟支店 技術部
**** 四国支店 技術部(元(独)土木研究所 雪崩・地すべり研究センター)
***** 新潟支店 長野事務所

水の交換が無いためにヒータの箇所水温が上昇する。」という極めて単純な物理現象をもとにして地下水流動層を判別するものである。

なお、1cm ごとの計測が可能であることから、通常 25cm 毎の測定であった従来型の地下水検層と比較した場合、地下水流動層の検出（推定）精度もおおのずと高くなることが期待される。

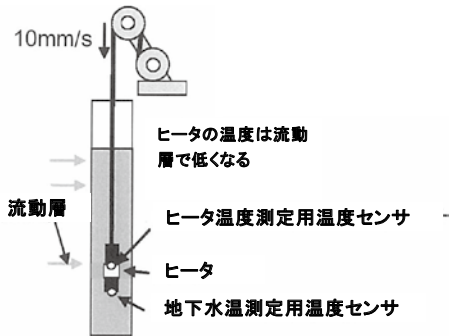


図-1 加熱式地下水検層の原理（参考文献1に加筆）

(2) 検層器の構造

図-2 に加熱式地下水検層の構造を示す。この図において本検層は、加熱式地下水検層器（ヒータ出力：5W）、加熱式地下水検層用計測器、データ収集用ロガー、パソコン、加熱式地下水検層用昇降機、発動発電機より構成される。検層器には、ヒータ温度測定用の温度センサと地下水温度測定用の温度センサがそれぞれ上下に取り付けられている。今回使用したセンサの大きさは長さ 36cm、径 1.6cm であり、地すべり地において一般的に設置されている水位観測孔（ $\phi = 40 \sim 50\text{mm}$ ）で十分適用可能である。総重量は約 45kg である。

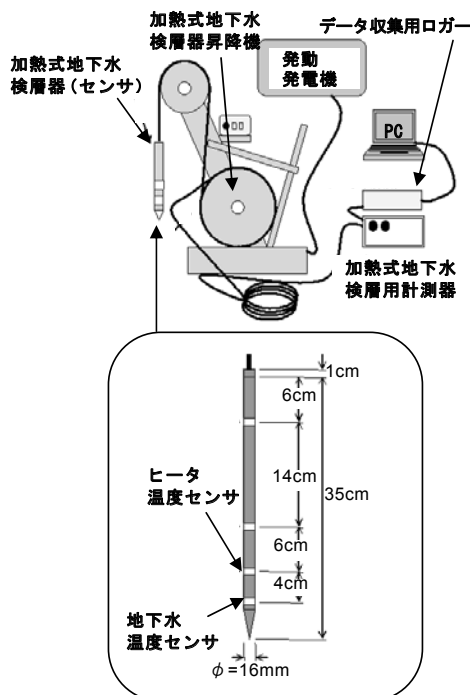


図-2 加熱式地下水検層の構造（参考文献1に加筆）

4. 試験地および計測の概要

試験地は滝坂地すべり地および下古沢地すべり地（図-3 および 4）を選定し、双方の地すべり地のうち以下に述べる代表的なボーリング孔で加熱式地下水検層を実施し、この検層の有用性について検討した。

(1) 試験地の概要

1) 滝坂地すべり地

滝坂地すべり地は、福島県西会津町に位置し、阿賀川右岸に面する面積約 150ha の地すべりである。この地すべり地の地質は、花崗閃緑岩が基岩になり、その上にグリーンタフ期のアルコース砂岩・凝灰岩・泥岩、さらにその上位に第四紀の堆積物が被っている。試験孔は松坂ブロックの BV-231 である（図-3 および表-1）。このブロックは、滝坂地すべりの中で北西側に位置し、長さ約 600m、幅約 100m の細長い形状の範囲で概ね北から南へ滑動している。その滑動量は、年間数 cm であり、活発な地すべり活動が生じている。BV231 は松坂ブロックのほぼ中央部に設置されており、平成 11 年度に従来型地下水検層が実施された²⁾。

2) 下古沢地すべり地

下古沢地すべり地は、長野市の西約 15km（上水内郡中条村）、土尻川の支流である刈宿沢に面した地すべりである（図-4）。刈宿沢沿いには多数の地すべり地が分布していることが知られている。特に下古沢地すべり地を含む七二会丘陵地では、1847 年の善光寺地震（M7.4）の際に大規模な地すべり、崩壊が多数発生した。試験孔は同地すべり地の A2 ブロック内、BV20-4 とした。この孔の基岩は新鮮な泥岩（第三紀の論地泥岩）、地すべり土塊は強風化岩と崩積土から構成されている。基岩部は比較的硬質であるが、一部に亀裂が発達したコアが採取されている（表-2）。

BV20-4 では、3m 掘削する毎に裸孔中の地下水を汲み上げて、その後の地下水の回復状況（地下水の流動箇所）を把握することを目的とした簡易揚水試験、加熱式地下水検層の直前に従来型地下水検層が実施された³⁾。

(2) 計測の概要

1) 加熱式地下水検層による計測

加熱式地下水検層による計測は以下の手順で行った。

- ① 孔内水をベラーで 1～2 m ほど汲み上げた後に、検層器を孔内水位直下に下ろした。その後、ヒータを通電し、5 分程度加熱させた。
- ② 加熱後、1cm/sec の速度で検層器を降下させながら温度センサとヒータ温度センサの測定値をデータレコーダ（サンプリング周期：400kHz）を介してパソコンに収録した。データ収録間隔は 1 秒ごとである。

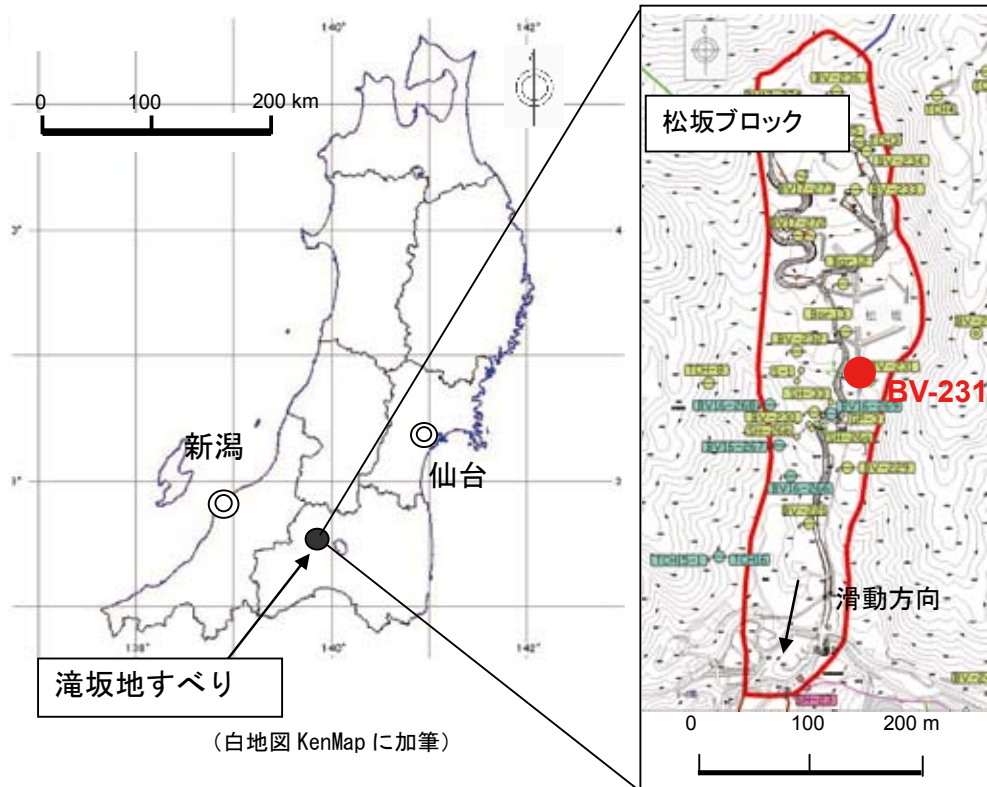


図-3 試験地位置図 (滝坂地すべり地松坂ブロック)

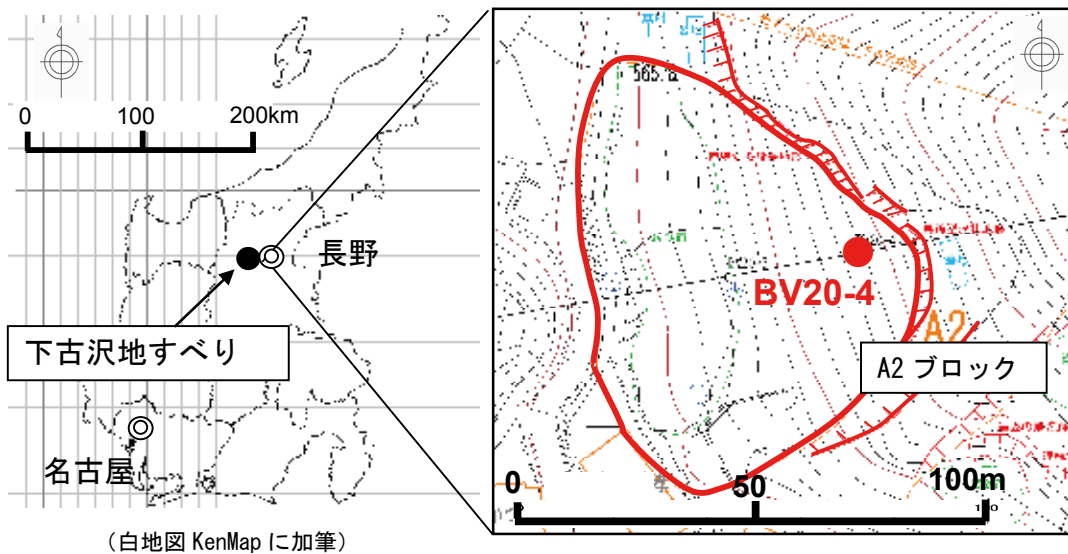


図-4 試験地位置図 (下古沢地すべり地 A2 ブロック)

表-1 滝坂地すべり地 BV-231 におけるボーリング結果の概要

区間 (GL- m)	地質状況		簡易揚水試験
	コア状況	色調	
0-0.55	表土		【0-3.0m】 0.21L/min
0.55-2.60	岩片混りシルト質の崩積土	暗褐色-淡褐色	
2.60-13.00	一般的に岩片状の強風化泥岩		
13.00-35.00	風化を受けて軟質な部分と比較的硬質な部分が入り混じった凝灰岩(中風化岩) ・亀裂箇所: 19.15m, 19.40m, 20.45m ・25.50-27.00mでは含水多く、粘土化が著しい(想定すべり面)	・13.00-19.00m: 黄褐色-淡緑色 ・19.00-20.45m: 乳白色 ・20.45-25.50m: 黄褐色-淡灰色 ・25.50-27.00m: 乳黄色-灰色 ・27.00-35.00m: 緑灰色	【3.0-6.0m】 1.24L/min

表-2 下古沢地すべり地 BV20-4 におけるボーリング結果の概要

区間 (GL- m)	地質状況		簡易揚水試験
	コア状況	色調	
0-0.10	表土	黒色-褐色	【0-3.0m】 0.21L/min
0.10-1.50	崩積土		
1.50-3.00	非常に脆い強風化泥岩(岩片状~角礫状) (想定すべり面: 3m)	暗灰色	【3.0-6.0m】 1.24L/min
3.00-6.50	一般的に風化があまり進んでいない泥岩 ・3.00-4.20mでは多数の亀裂が認められる	黒色-暗灰色	

③ 収録されたデータを表計算ソフト上で深度と温度差の関係を作図した。

2) 従来型地下水検層による計測

下古沢地すべり地 BV20-4 では、加熱式地下水検層に先立って従来型地下水検層と簡易揚水試験を実施し、藤原の方法⁴⁾により地下水流動層を判定した(表-3)。従来型地下水検層による計測は以下の通りとした。なお滝坂地すべり地 BV-231 は、既存資料²⁾ データをもとに地下水流動層を判定した。

- ① 孔内水をベラーで1~2mほど汲み上げた後に、孔内の初期電気抵抗値(BG値)を測定した。
- ② ボーリング孔内で一様な濃度になるようにNaClを投入した。
- ③ 抵抗値の変化を経時的に測定した。測定時間は、電解溶液の投入直後、10分後、20分後、30分後、60分後、120分後とした。
- ④ 測定の結果を比抵抗値変化曲線図に整理した。
- ⑤ 同図において比抵抗値の増大状況を調べ、表-3をもとに流動層を判定した。

表-3 従来型地下水検層による地下水流動層の判定種別

種別	比抵抗値増大($\Omega \cdot \text{cm}$)				増大値の累積傾向	流動面存在の地質的可能性
	30分以内	60分	120分	240分		
確定流動層	10^3 以上	還元(真水)	-	-	顕著	有
準確定流動層	2×10^2 以上	5×10^2 以上	10^3 以上	-	やや顕著	"
潜在流動層	10^2 以上	2×10^2 以上	3×10^2 以上	5×10^2 以上	ややあり	"

5. 試験結果と考察

(1) 滝坂地すべり地 BV-231

図-5に滝坂地すべり地 BV-231 で実施された加熱式地下水検層結果(a)および従来型地下水検層結果(b)を示す。この加熱式地下水検層の結果において、深度10m以浅は検層前にヒータを過熱させた影響が含まれていると考えられたこと、孔底付近では堆積したスライムの影響があったと考えられたため深度10~28mの区間で検討した。この区間でのヒータ温度センサと温度センサとの温度差に着目し、図中に示すように温度差1.8°Cに点線(補助線)を引くと、温度差のグラフに凹凸状の分布が生じていることが分かる。そのうち矢印で示した5箇所(深度11m、15m、21m、24m、および27m付近)では、温度差のより小さくなる方向に凸型の分布を示し、“相対的”に小さくなっている。加熱式地下水検層の原理を考慮すると、これら5箇所に地下水流動層の存在が推定される。

図中の簡易柱状図および表-1と加熱式地下水検層の結果とを比較すると、この検層によって抽出される地下水流動層は、ボーリング調査より地下水の流動層の存在が予想される強風化部、中風化部で酸化が認められる箇所、および粘土化が著しい箇所の直下に相当する。

加熱式地下水検層結果と従来型地下水検層結果とを比較すると、加熱式地下水検層により流動層として推定された箇所のうち深度11mおよび24m付近は、従来型地下水検

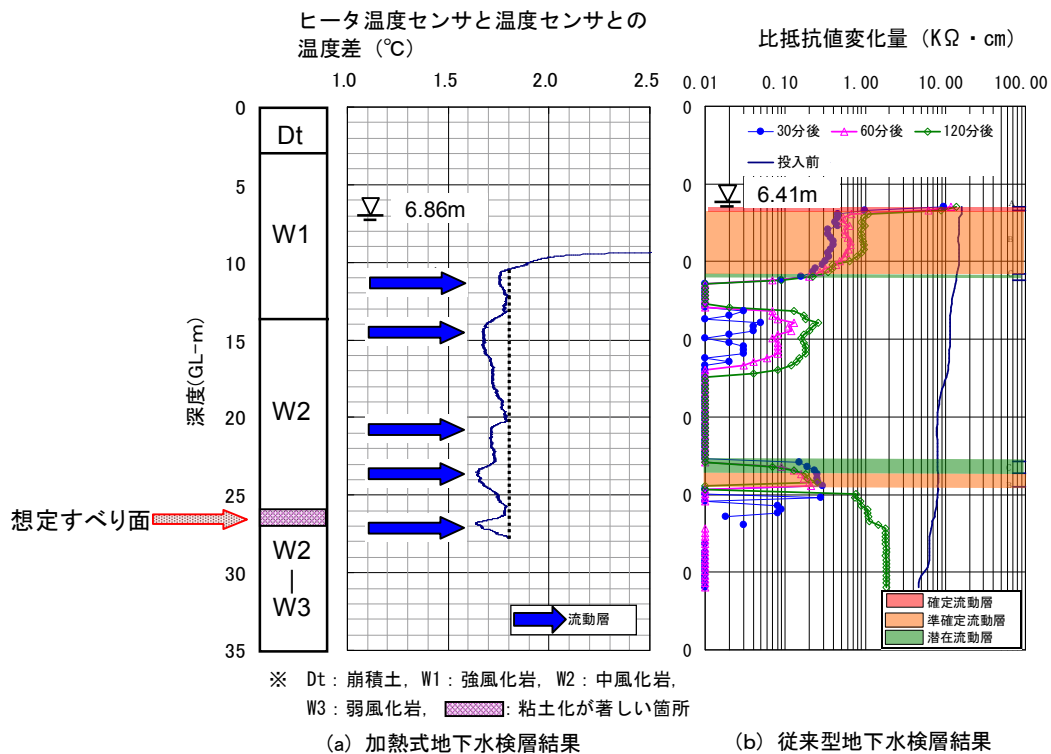


図-5 滝坂地すべり地 BV-231 における試験結果

層により準確定～潜在流動層として判定される箇所にはほぼ一致する。また深度 15m および 27m 付近は、従来型地下水検層では流動層として判定されない箇所であるものの、比抵抗値の若干の回復が認められる箇所に概ね一致している。

一方、表-1 に示した亀裂箇所が確認されている深度 20.45m 付近は、加熱式地下水検層結果では流動層が推定されたが、従来型のそれでは比抵抗値の回復がほとんど認められなかった。以上より滝坂地すべり地 BV-231 における試験では、加熱式地下水検層は従来型地下水検層に比べて詳細な地下水流動層の推定が可能であると考えられる。

この孔における双方の作業時間は、機材の搬入・搬出および計測準備を含めて加熱式地下水検層の計測終了までの総所要時間は約 90 分であり、従来型地下水検層のそれは約 150 分であった。このことは、加熱式地下水検層は地すべり地における地下水流動層の判定（推定）において作業の省力化が図れることを意味する。

(2) 下古沢地すべり地 BV20-4

図-6 に下古沢地すべり地 BV20-4 で実施された加熱式地下水検層結果 (a) および従来型地下水検層結果 (b) を示す。この加熱式地下水検層の結果において、深度 3.7m 以浅は検層前にヒータを過熱させた影響が含まれていることが考えられたため、また孔底付近では堆積したスライムの影響が考えられたため、ここでは深度 3.7～6.3m の区間におけるヒータ温度センサと温度センサとの温度差に着

目する。この区間では、小刻みな温度変化が生じている。その中でも 4.2m、4.6m、5.1m、5.7m、および 6.2m 付近に計 5 箇所のスパイク状の温度差が小さい部分がある。これらの箇所は、表-2 によると弱風化岩で構成されている。

加熱式地下水検層結果と従来型地下水検層結果とを比較すると、4.2～5.1m の箇所は、従来型地下水検層の準確定～潜在流動層として判定された範囲に含まれ、5.7m の箇所はその若干下部になる。表-2 に示した簡易揚水試験の結果によると、加熱式地下水検層でスパイク状の温度差の小さい部分のうち 4.2～5.7m の箇所は、簡易揚水試験の 3～6m の区間の中にあり、約 1.2 ℓ/分の揚水量が記録されている。これらの箇所では、地下水が流入している可能性が考えられる。

深度 6.2m 付近は、加熱式地下水検層では地下水流動箇所として推定されるが、従来型地下水検層では比抵抗値の回復がほとんど認められない箇所である。既往資料³⁾によると、この深度付近では全般的に硬質な泥岩であるものの、割れ目のあるコアが採取されている。

以上より下古沢地すべり地 BV20-4 における試験は、深度 5.7m 以浅では滝坂地すべり地 BV-231 と同様に、加熱式地下水検層は従来型地下水検層に比べて詳細な地下水流動層の推定が可能と考えられる。また深度 6.2m 付近においては、今後、孔内流速計などの他の手法による計測を実施し、この結果を踏まえた上で地下水流動の有無について検証する必要がある。

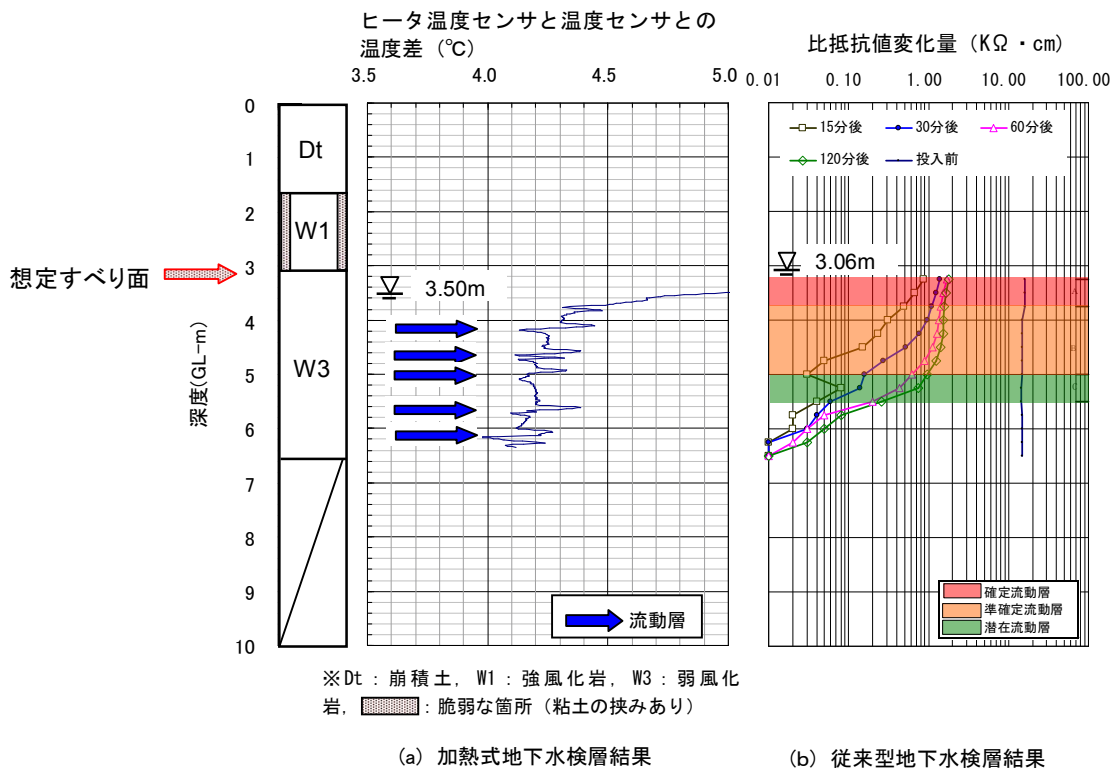


図-6 下古沢地すべり地 BV20-4 における試験結果

下古沢地すべり地 BV20-4 における機材の搬入・搬出および計測準備を含めた加熱式地下水検層の計測終了までの総所要時間は、約 45 分であった。この結果は、滝坂地すべり地 BV-231 と同様に従来型地下水検層に比べて地下水流動層の判定（推定）の作業効率が良いことを示している。

6. 課題と展望

上述のように加熱式地下水検層は従来型地下水検層に比べて高精度でかつ低コスト化が望める地下水調査手法であることが考えられた。しかしながら本報では、地下水流動層の推定において相対的な温度差を用いており、やや定性的な評価であった。最近、丸山ほか⁵⁾ が本検層で定量的な地下水流動層の推定を試みている。今後の課題として、加熱式地下水検層による定量的な地下水流動層の推定法の検討を実施する必要がある。

本報では、地すべり地を対象として実証試験を実施したが、加熱式地下水検層の原理は、非常に単純な物理現象を利用したものであることを述べた。これは地盤内に有孔管が設置さえされれば、本検層を適用することが可能と考えられる。今後の展望として、斜面のみならず沖積地における地下水流動層推定への展開も検討する必要がある。

7. まとめ

従前より地すべり地における地下水流動層を把握するために、NaCl 等の電解物質を用いた地下水検層が実施されてきたが、いくつかの問題点が指摘されている。この問題点を改善するために、加熱式地下水検層が開発された。本報では、加熱式地下水検層の適用性を検証することを目的とし、福島県および長野県の地すべり地で実証試験を実施した。さらにこの結果と NaCl を用いた従来の地下水検層の結果とを比較、検討した。その結果得られた知見は、以下の通りである。

- ① 加熱式地下水検層は、従来の地下水検層に比べて地下水流動層の検出（推定）精度が高いことが推察された。特に、従来型の地下水検層で比抵抗値の回復が遅い箇所でも地下水流動層の推定が可能と考えられた。
- ② また現地における計測作業時間は、従来型の地下水検層に比べて短時間で済み、計測作業の低コスト化が望めることが示唆された。
- ③ 本報では、加熱式地下水検層による地下水流動層の推定においてやや定性的な評価で実施した。今後はこの推定に対して定量的な評価法を検討する必要がある。
- ④ 本検層は基本原理が非常に単純な物理現象を利用したものであり、地盤・地下水の調査に広く応用可能

と考えられ、また NaCl 等利用しない点で環境への影響を排除できることから、地すべり地（山地・斜面）のみならず沖積地における地下水流動層推定への展開が期待できる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所および長野県土尻川砂防事務所の支援を頂いた。また（独）土木研究所 雪崩・地すべり研究センターの中村 明氏のお世話になった。紙面を借りて御礼を申しあげる。

参考文献

- 1) 丸山清輝、花岡正明、鈴木 滋、野田 猛、酒井 優、吉田克美：加熱式センサを用いた地下水検層法の現地試験、第 46 回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.241-244、2007。
- 2) （独）土木研究所・日本工営株式会社：平成 18 年度滝坂地すべり松坂地区地下水流下経路調査報告書、75p、2006。
- 3) 日本工営株式会社：平成 20 年度国補 地すべり対策事業に伴う調査業務委託、101p、2009。
- 4) 藤原明敏：地すべり調査と解析 - 実例に基づく調査・解析法改訂版、pp.106-108、1994。
- 5) 丸山清輝、鈴木聡樹、ハスパートル、石井靖雄：加熱式地下水検層による地すべり地の地下水調査、日本地下水学会秋季講演会講演要旨、pp.244-247、2008。