■加熱式地下水検層による地すべり地の地下水調査

Groundwater logging using thermocouples in two landslide areas

丸山清輝* Kiyoteru MARUYAMA／(独)土木研究所 Public Works Research Institute

中村 明 Akira NAKAMURA／日本工営株式会社 Nippon Koei Co., Ltd.

野呂智之 Tomoyuki NORO／(独)土木研究所 Public Works Research Institute

キーワード：地すべり，地下水検層，温度センサ

Key words：landslide, groundwater logging, thermocouples

1. まえがき

地すべりの主な誘因である地下水は、透水性の良い地層や亀裂などの地下水流動層を流れると考えられているが、地下水の流下状況の把握は容易ではない。また、効率的な地すべり防止工事を実施するには、地すべり機構を解明し適確に地下水排除施設を配置することが重要である。このため、地下水検層および地下水追跡などの地下水調査法の高精度化と省力化が必要となっている。この中で、地下水検層は全孔ストレーナ管を用いたボーリング孔内の地下水中に食塩を溶かし、地下水中の塩分濃度の変化から地下水流動層を調査しており、課題として以下のことが挙げられる。

- ①調査に時間がかかる。
- ②地下水の比抵抗の変化から地下水流動層を判定するため、その判定が難しい場合がある。
- ③井戸水などの地下水への影響が懸念される。

そこで、(独)土木研究所では調査の省力化と高精度化を開発目標とした地下水調査法の開発を行っている¹⁾。本文では、加熱した地下水の温度分布から地下水流動層を調査する加熱式地下水検層の水槽での性能確認試験と現地適用試験結果について示す。

2. 加熱式地下水検層

加熱式地下水検層は地すべり斜面における地下水流動層の深度を調査する方法であり、現在用いられている地下水検層（以後食塩検層とする）に比べて省力化した調査法である。調査ではボーリング孔内の孔内水位面下にセンサを下降させながら、地下水温、地下水を加熱するヒータ温、加熱された地下水温を計測し、それらのデータを整理して地下水流動層を調査する。

図－１は、加熱式地下水検層器のボーリング孔内の孔内水中に挿入するセンサを示したものである。直径1.6 cmのセンサをボーリング孔内の孔内水位面下から下降させ、下部温度センサで地下水温、下ヒータ温度センサでヒータ温、上部温度センサでヒータにより加熱された地下水温をそれぞれ計測する。今回は、上ヒータ温度セ

ンサは使用していない。

図－２には、下ヒータ加熱時の下ヒータ温、下部水温、上部水温の各経時変化を示した。下部温度センサは地下水温を計測するためのものであり、下ヒータ加熱による影響を受けないようにする必要がある。図－２は、下ヒータ加熱による下部水温の影響を調べた結果である。温度

図－１ 加熱式地下水検層器センサ

図－２ 下ヒータ加熱時の下ヒータ温、下部水温、上部水温の経時変化

* 連絡著者／corresponding author
〒944-0051 妙高市錦町2-6-8
2-6-8 Nishikicho, Myokoshi, Niigata Prefecture

の計測は、図-1に示したセンサを水中に鉛直に吊し実施した。下ヒータ加熱開始後の温度は、下ヒータ温と上部水温については上昇しているが、下部水温の上昇は認められない。なお、上部水温の上昇は、ヒータで加熱された水の上昇によるものである。これらのことから、計測された下部水温は下部ヒータ加熱の影響を受けないことが確認された。

図-3, 4は、センサのボーリング孔内下降速度とセンサで計測された温度との関係を示したものである。調査時間はできるだけ短くしたいことから、センサのボーリング孔内下降速度を1 cm/secと2 cm/secにした場合のセンサで計測される温度の違いを調査した。調査は、後述する赤崎地すべりのボーリング孔内で実施した。図-3はセンサ下降速度を1 cm/sec、図-4は2 cm/secにした場合の各センサによる温度計測結果を示したものである。計測された温度は、センサ下降速度1 cm/secに比べて下降速度2 cm/secでは微細な温度変化が捉えられていない。これは、センサの下降速度が速い場合、ヒータの熱が地下水に伝わり難くなるためと考えられる。この結果から、センサのボーリング孔内下降速度をより微細な温度変化が捉えられる1 cm/secとして性能確認試験と現地適用試験を実施することにした。

図-3 センサ下降速度 1 cm/secでの温度計測結果

図-4 センサ下降速度 2 cm/secでの温度計測結果

写真-1は、加熱式地下水検層に使用する機器を示したものである。機器は、①加熱式地下水検層器(センサ)、②センサ昇降機、③計測器、④データ収集用ロガー、⑤パソコン、⑥発動発電機で構成され、総重量は約70kgである。また、調査可能深度は最大145mである。

3. 水槽による性能確認試験²⁾

図-5には、加熱式地下水検層の性能確認に用いた試験装置を示した。試験装置は、水槽、ボーリング孔に相当するストレナ管(本調査法は $\phi 40\text{mm}$ の地下水位観測専用孔を対象としたものであり、現場で用いられているものを使用した)、地下水流動層としたパイプ($\phi 4\text{mm}$)とから構成されている。試験では、水面下132cmの地下水流動層に等流量の水道水を流しながら、ストレナ管内にセンサを下降させ、各温度センサで温度を計測した。なお、地下水流動層に流した流量は、20, 50, 100, 200m ℓ /minである。

図-6は、地下水流動層に流量100m ℓ /minを流した場合の各温度センサで計測された深度方向の温度分布を示したものである。上部水温は下部水温に比べて高くなっており、ヒータによる加熱の影響が出ている。また、下ヒータ温は水面付近では低下するが、その後ほぼ一定

- ①加熱式地下水検層器(センサ)
- ②センサ昇降機
- ③計測器
- ④データ収集用ロガー
- ⑤パソコン
- ⑥発動発電機

写真-1 加熱式地下水検層機器

値で推移し、深度130cm付近で局部的に低下した後また上昇し、その後ゆるやかに低下している。水面付近でのヒータ温の低下は、センサを水面付近で5分間予備加熱した後に下降させたため、その影響によるものである。また、深度130cm付近の局所的な温度低下は、地下水流動層からの水流によるものである。

水槽試験では、下ヒータ温と上部水温に地下水流動層からの水流による局所的な温度低下が生じており、下ヒータ温と上部水温の深度方向の分布から地下水流動層の深度を容易に判定することができる。しかしながら、後述する地すべり地における各温度センサで計測されたボーリング孔内地下水の深度方向の温度分布の変化は複雑であり、各温度センサで計測された深度方向の温度分布から地下水流動層の深度を判定することが難しい場合が数多く認められた。そこで、各温度センサで計測された温度データから、地下水流動層と地下水流動層から湧出する流量の各深度方向の分布を求めるデータ整理法として加熱率による方法を考案した。

図-7には、加熱率の深度方向の分布を示した。加熱

図-5 性能確認試験装置

図-6 温度の分布

率は(1)式で求めたものであり、ヒータ温と地下水温との差に対するヒータによる地下水温上昇量の比率を表す。

$$\lambda = (T_{w2} - T_{w1}) / (T_h - T_{w1}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ : 加熱率

T_{w1} : 地下水温 (°C)

T_{w2} : 加熱された地下水温 (°C)

T_h : 下ヒータ温 (°C)

である。

加熱率は、地下水流動層とした深度130cm付近で局部的に低下している。これは地下水流動層からの水流によりヒータ温とヒータによる地下水温上昇量が減少したため、加熱率が低下したものである。このことから、加熱率の深度方向の分布から地下水流動層の深度を判定することが確認された。

水流がない深度での加熱率は、後述する地すべり地における試験ではボーリング孔毎に異なった(地質及び水質の影響と推定される)。このことから、水流がないと考えられる深度の加熱率を1.0とする基準化した加熱率を(2)式で求め、深度方向の流量の分布の推定に用いることにした。

$$\lambda_d = \lambda / \lambda_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ_d : 基準化した加熱率

λ_b : 地下水流動層からの水流の影響がない深度の加熱率

である。

図-7に示した基準化した加熱率の算出では、 λ_b は加熱率がほぼ一定値で推移し地下水流動層からの水流の影響がないと考えられる深度100~120cmの値を用いた。

図-8は、流動層からの流量を変えた場合の流量と基準化した加熱率との関係を示したものである。流量と基準化した加熱率の間には、明瞭な関係が認められる。

図-7 加熱率の分布

この関係をもとに、基準化した加熱率から流量の多少をイメージできる(3)式を作成した。なお、水流がない深度の流量を0 mℓ/minとし、基準化した加熱率を1.00とした。

$$Q = 495.53\lambda_d^2 - 1187.30\lambda_d + 691.36 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、Q: 地下水流動層からボーリング孔内に流入する流量 (mℓ/min)

である。ただし、 $\lambda_d > 1$ の場合は、 $Q = 0$ とする。

図-9には、流動層に流量100mℓ/minを流した場合の(3)式による流量推定結果を示した。流量は深度130cm付近でピーク値84mℓ/minを示し、地下水流動層の深度と流量をほぼ正確に示している。なお、地下水流動層以外の深度で示された流量は、地下水流動層からの流水が下降するセンサに誘導され下方に流れたために生じたものと推定される。

以上のことから、水槽による性能確認試験で加熱式地下水検層により計測された温度データを加熱率に変換したことで、地下水流動層の深度とそこから供給される流量の多少が求められることが確認された。

4. 地すべり地における適用試験

4.1 滝坂地すべり

4.1.1 地すべりの概要

滝坂地すべりは、福島県西会津町の阿賀川の右岸に位

図-8 基準化した加熱率と流量との関係

図-9 流量の推定結果

置している。地すべりの規模は、南北約2,100m、東西約1,300m、面積約150haである。地質は、主に新第三系のグリーンタフ（緑色凝灰岩、砂岩、泥岩）が分布し、先第三系花崗閃緑岩を基岩としている。

4.1.2 試験結果

a. ケース1

図-10は、ボーリング孔 (BV-286) の孔内水位面下における各温度センサで計測された深度方向の温度分布を示したものである。下部水温は、孔内水位面から深度約43mまではほぼ一定値で推移し、それ以深では細かく変動しながら上昇した後、深度約60mから下降している。下ヒータ温は、地下水面付近では水槽試験と同様にヒータによる予備加熱の影響による温度の低下が認められ、それ以深では細かく変動しながら深度52m位までゆるやかに上昇した後に細かく変動しながらゆるやかに下降している。上部水温は、地下水面から深度58m位まで細かく変動しながらゆるやかに上昇した後に、深度62m位まで下降に転じ、それ以深では急に上昇した後にゆるやかに下降している。各温度センサで計測された温度変化は、地下水流動層からの水流が影響したものと推定される。

図-11には、加熱率の深度方向の分布を示した。なお、

図-10 温度の分布 (BV-286)

図-11 加熱率の分布 (BV-286)

基準化に用いた加熱率 λ_b には、深度34mの値を用いた。加熱率は地下水面から深度47mまで0.43前後で推移した後、0.43以下で大きく変動し、深度70m以深ではまた0.43付近に戻っている。加熱率の深度47～70mまでの変化は、地下水流動層からの水流により下ヒータ温と上部水温が低下したためである。加熱率の変化はほぼ0.43から始まり、大きく変化した後また0.43に戻っている。このことから、加熱率の分布から深度方向の地下水流動層の判定が容易にできると考える。

図-12には加熱式地下水検層による流量の推定結果を、図-13には食塩検層の結果をそれぞれ示した。加熱式地下水検層では、深度45～69mで流量が200m³/min以上に達する地下水流動層が捉えられている。一方、食塩検層では深度48～68mで比抵抗の増大があり、地下水流動層が捉えられている。加熱式地下水検層の地下水流動層は、食塩検層の地下水流動層とほぼ一致している。

図-12 推定流量の分布 (BV-286)

図-13 食塩検層の結果 (BV-286)

b. ケース 2

図-14は、ボーリング孔 (BV-284) 孔内水位面下における各温度センサで計測された深度方向の温度分布を示したものである。下部水温は局所的な変化がなく、深度の増大とともに緩やかに上昇している。下ヒータ温と上部水温は、深度72m付近で上昇しているが、全体の傾向は下部水温と同様である。下ヒータ温の深度72m付近での上昇の原因は不明である。

図-15には、加熱率の深度方向の分布を示した。なお、基準化に用いた加熱率 λ_b には、深度65mの値を用いた。加熱率は局所的には細かく変動するが、深度方向ではほぼ一定値で推移し、流量の大きな地下水流動層がないことが容易に判定できる。

図-16は加熱式地下水検層による流量の推定結果を、図-17は食塩検層の結果をそれぞれ示したものである。加熱式地下水検層では、深度76～90mで10m³/min前後の流量の少ない地下水流動層が捉えられている。一方、食塩検層では深度62～85mで比抵抗の増大があり、地下水流動層が捉えられている。加熱式地下水検層の地下水流動層は、食塩検層の地下水流動層に含まれている。

なお、推定流量と比抵抗の変化量の関係が、図-12, 13

図-14 温度の分布 (BV-284)

図-15 加熱率の分布 (BV-284)

に示した関係と異なったことについては, 加熱式地下水検層と食塩検層が同じ日に実施されなかったため, 各調査時の流動層の流量が異なったことが考えられる。また, 深度90mにおいて, 加熱式地下水検層の流量が大きくなっているのに対し, 食塩検層の比抵抗の増大が認められないのは, 加熱式地下水検層のセンサが孔底に堆積した泥の中に入り, 地下水温の変化を計測できなくなったためと考えられる。センサが泥の中に入ってしまったことは, センサをボーリング孔から引き上げた際に, センサに泥が付着していたことで推定される。ボーリング孔の孔底に泥が堆積している場合は, 孔内を清水で洗浄した後に地下水検層を実施する必要があると考える。

4.2 赤崎地すべり

4.2.1 地すべりの概要

赤崎地すべりは, 新潟県阿賀町の阿賀野川の右岸に位置している。地すべりの規模は, 長さ約1,000m, 幅約

500mである。地質は, 基岩が新第三系の津川層に相当する凝灰岩とアルコース質砂岩から成り, 地すべり左岸側には流紋岩の貫入岩帯が存在している。

4.2.2 試験結果

図-18は, ボーリング孔の孔内水位面下における各温度センサで計測された温度分布を, 図-19には加熱率の分布をそれぞれ深度方向について示したものである。なお, 基準化に用いた加熱率 λ_b には, 深度17mの値を用いた。各温度は, 深度の増大に伴い上昇する傾向がある。それに対して, 加熱率は, 局部的に亀裂水流入の影響を受けて変動している。

図-20には加熱式地下水検層による流量の推定結果を, 図-21には食塩検層の結果をそれぞれ示した。加熱式地下水検層では, 流量が50m ℓ /minに達する地下水流動層が5箇所で見えられている。一方, 食塩検層では深度20~31mで比抵抗の増大があり, 地下水流動層が見えられている。食塩検層の深度20~31mの地下水流動層は,

図-16 推定流量の分布 (BV-284)

図-17 食塩検層の結果 (BV-284)

図-18 温度の分布 (赤崎地すべり)

図-19 加熱率の分布 (赤崎地すべり)

図-20 推定流量の分布 (赤崎地すべり)

加熱式地下水検層の深度20～30mの地下水流動層が対応すると考える。加熱式地下水検層と食塩検層の各結果を比較すると、地下水流動層は食塩検層では大まかに深度が捉えられるものの、その規模の判定も難しくなっているのに対して、加熱式地下水検層では詳細な深度とその規模を流量として捉えられることが分かる。

以上のことから、滝坂地すべりと赤崎地すべりでの現地適応試験により、各温度センサで計測された温度を考案した加熱率に変換することで、地下水流動層の判定が容易にできることが確認された。また、加熱式地下水検層で求められた地下水流動層は、食塩検層で求められた地下水流動層とほぼ一致した。

5. まとめ

本文では、加熱式地下水検層の水槽での性能確認試験と現地適応試験結果について示した。以下に、そのまとめを示す。

- ①水槽による性能確認試験で加熱式地下水検層により計測された温度データを加熱率に変換したことで、地下水流動層の深度と概略的な流量が求められることが確認された。
- ②滝坂地すべりと赤崎地すべりでの現地適応試験に

図-21 食塩検層の結果 (赤崎地すべり)

より、各温度センサで計測された温度を考案した加熱率に変換することで、地下水流動層の判定が容易になることが確認された。

- ③加熱式地下水検層で求められた地下水流動層は、食塩検層で求められた地下水流動層とほぼ一致した。

謝辞

地すべり地での適用試験では、国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所に多大なご理解とご協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 丸山清輝・鈴木 滋: 大規模地すべり地の地下水流動層追跡調査法の高度化, 土木技術, 63巻1号, pp.77-83, 2008
- 2) 吉田克美・武士俊也・山崎宣悦・長友聖二: 改良した温度検層器による模型実験結果, 第42回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.519-520, 2003
(原稿受付2011年12月22日, 原稿受理2012年3月29日)