

## ステップ式地下水検層による 帯水層(束)と圧力水頭の検証

——ステップ式汲み上げ地下水検層の有効性について——

土田 雅志\*  
酒井 義明\*

### 1. はじめに

地すべり対策を行う場合、まずその地すべりの機構を知ることが必要であるが、その機構を知る上で、地すべりに関わる地下水を知ること、それが極めて重要であることはいうまでもない。

地すべりの機構解析の結論は安定解析式で数式的に表すが、安定解析式の中にある間隙水圧 $U$ を正しく評価すること、これが地下水を知る目的といえる。

この間隙水圧 $U$ は、すべり面に働く地下水のもつ圧力であるから、地下水を把握するということは、まずすべり面に働く地下水の存在を知ることであり、次にその地下水の圧力を知ること、この2点に集約されるといってよい。

この地下水を知るために、これまでいろいろな調査法が試みられてきたが、現在最もポピュラーな調査法は地下水検層、あるいは食塩水検層といわれるものである。

地下水検層は、ボーリング孔内水を食塩等の電解質溶液で置き換え、孔内へ流入してくる地下水による水比抵抗の増加から地下水の流動区間を検出する方法で、地下水の存在を直接検知できる点で優れた調査法と評価されている。

しかし、地下水検層は極めて優れた調査法ではあるが、それを行うボーリング孔に関わる地下水は単一ではなく、何枚もの地下水層あるいは地下水脈が複雑に入り交じった状態にあるため、単純なやり方では対象となる地下水、すなわちすべり面に関わる地下水を検出できない場合が多い。そのため、地下水検層を行うに当たっては、種々の工夫（自然水位検層に対して、例えば、汲み上げ検層、あるいはステップ式検層等の工夫）が必要となってくる。

その工夫の一例として、ボーリング掘削時に行う簡易揚水試験に、さらに平行して地下水検層を実施するという、一つの理想的な条件下での地下水検層を今回試験的に行った。その結果同一孔で行った従来の自然水位、また汲み上げ検層法の結果とは異なった成果が得られ、その有効性が確認されたので以下に報告する。

\* 国土防災技術株式会社新潟支店

## 2. 地下水検層の実施に工夫が必要な理由

### 2.1 地下水検層の検出原理

なぜ地下水検層を実施する上で工夫が必要か、また本報告の主旨の理解の上から、まず図 2.1 により、地下水検層の検出原理について説明を加える。

特別な工夫なしの地下水検層はボーリング孔掘削完了後の孔内自然水位状態で行うもので、自然水位検層という。図 2.1 はその例を示す。

図中の  $H_w$  をある特定深さにある帯水区間（帯水層または帯水束）のもつ圧力水頭、 $h_w$  を当の帯水区間から測った孔内水位高とし、 $\Delta h = H_w - h_w$  とすれば、孔内水と地下水との流動変化は以下の 3 つのパターンに区分される。

- ① 地下水の流れは水圧のバランスによって生じるため、地下水の圧力水頭面がボーリング孔内の静水圧面より高い時、当然のことながら水は高さから低きへ流れ、このため地下水は孔内へ流入する。したがって、 $\Delta h > 0$  の場合のみ、すなわち、帯水層または帯水束のもつ圧力水頭  $H_w$  が孔内水位高  $h_w$  より大きい時のみ、地下水は孔内へ流入する。……(b)図、および(d)図の  $\Delta h' > 0$  の上層地下水の場合
- ② 一方、地下水のもつ圧力水頭面が孔内の静水圧面より低い時、すなわち、 $\Delta h < 0$  の場合、逆に孔内水がその地下水脈に流れ出すことになる。……(c)図、および(d)図の  $\Delta h < 0$  の下層地下水の場合
- ③ そのほか、地下水のもつ圧力水頭面が孔内の静水圧面と同じであった時、すなわち、 $\Delta h = 0$  の場合、孔内水と地下水とはバランスを取って、その間での流動変化は生じない。……(a)図の場合

この結果、孔内に地下水が流入する例は①のみで、地下水検層の結果では、(b)、(d)図の右図にあるとおり、水比抵抗値  $\rho$  が  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ ……と時間が経つにつれて大きくなり、食塩投入以前の水比抵抗値（B.G.値）に回復する変動パターンで検出される。この水比抵抗曲線でピークをなす箇所または区間が帯水層、あるいは帯水束と判断され、そこに地下水の存在が確認されたことになる。またその地下水のもつ圧力水頭  $H_w$  は、 $H_w > h_w$  ((b)図の場合)であることが分かる。

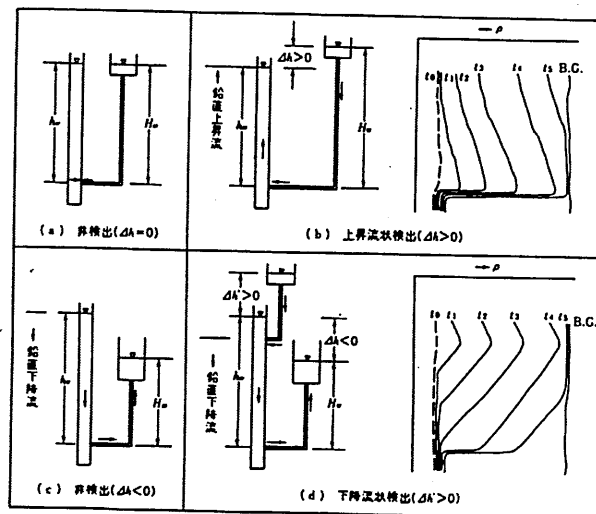


図 2.1 地下水検層原理

## 2.2 地下水検層の実施に工夫が必要な理由

図 2.1 で、地下水層（東）にすべり面が存在するとした場合（(d)図では、下位の地下水）、自然水位検層で、すべり面に関わる地下水が検出できる例は(b)図の場合のみで、他の 3 例は全て検出不可可能である。

例えば(d)図の検層結果では、著しく流入する地下水が検出されたことになるが、すべり面が下層の逸水する深度にある以上、すべり面の地下水の存在はもとより、その地下水の圧力水頭も把握できたとはいえない。検層の実施例には実にこの(d)図のパターンが多く、ここに検層が単純にはいかない理由がある。

安定計算に与える間隙水圧  $U$  は、この図の場合  $H_w$  であるにも関わらず、誤って水位面まで高さ、すなわち  $h_w$  を与えてしまう例が多々あるが、これは明らかに間違いであることは(d)図でも理解されることである。仮に  $h_w$  を間隙水圧と評価した場合、地下水排除工の効果を極めて過大に評価することになり、結果として過小設計、すなわち地すべりを防止するに至らずということになりかねない。

このため、間隙水圧を正しく評価するには、どうしても  $H_w$  を知る必要があり、ここに地下水検層を実施する場合の工夫が必要となるわけがある。

## 3. 地下水検層を行う場合の工夫（地下水検層法）

### 3.1 汲み上げ地下水検層

この  $H_w$  の圧力水頭をもつ地下水を知るためには、(b)図の例のように静水圧  $h_w$  を  $H_w$  より低くする工夫が一方法である。その工夫とは、ボーリング孔内水を汲み上げ、静水圧  $h_a$  が  $H_w$  より下に下がるまで、すなわち、対象とする地下水が孔内へ流入するのを確認するまで、孔内水を汲み上げながら検層を行う方法で、これを汲み上げ検層という。

自然水位の状態では、対象となる地下水が検出できない場合が多いため、どうしても汲み上げ検層を実施せざるを得ないのが現状である。

ただし、汲み上げ検層にも問題がないわけではない。

検層を行うボーリング孔は特別な場合を除いて、一般には口径 66mm の小口径の調査孔である。そのためその孔内に入れられるような小口径のポンプがないこと、仮にそれがあっても、ポンプを稼働させながら検層を行うような口径に余裕はないことから、汲み上げは勢いペーラーによる人力作業に頼らざるを得ない。

そのため、対象以外の地下水が多い場合、あるいは対象とする地下水が深い場合等にあっては、人力では汲み上げきれないことが数多く、この汲み上げに関わる問題がこの検層法の最大のネックとなっている。

### 3.2 ステップ式地下水検層

この検層法は、当初基盤岩が破碎された亀裂の多い地すべり地、例えば変成岩地帯の地すべり地の検層法として活用されてきた。

基盤岩に亀裂が多い地すべり地の場合、孔内水が亀裂に逸水して孔内水位を形成しない例、つまり、ボーリング掘削完了後の孔内には水なし、あるいは孔内水があったとしてもその水位はすべり面以深に落ち込むといった例が多い。そのため、それらのボーリング孔の地下水検層は実施不可能

としていた。そこに考えられたのが、ボーリング掘削途中で段階的に行うこのステップ式地下水検層である。

この検層法が実施されるに至った発端は上記のとおりであるが、以下の理由から、変成岩地帯だけに限らず、地すべり地全般にも有効な方法であることから、現在各地でその実施が進められている。

目的とする地下水層（束）までの間にすべり面とは直接的には無関係の地下水層（束）が何枚あったとしても、それらと孔内水とはケーシングで縁切りされるため、常に図 2.1 の(d)図の上層地下水を遮断した状態での検層となり、その結果、目的とする地下水が検出される可能性は極めて高いといえる。

この検層法は、ボーリング掘削の間毎日繰り返して行う必要がある。そのため、例えば日進 5 m 掘削で全長 30 m のボーリング孔であれば、計 6 回の検層を行うことになり、その手間はかなりのものとなる。

従来は全て人が張り付き、ボーリング掘削作業に支障を与えない早朝あるいは夜を狙って、しかも手作業で計測を行っていたが最近ステップ式検層用の自動地下水検層器が開発されたため、その日の掘削作業が終了したとき自動検層器をセットし、夜間に無人計測をして、翌朝回収するという極めて便利な方法が採られるようになった。

### 3.3 簡易揚水試験併行地下水検層（以下、ステップ式汲み上げ検層法）

簡易揚水試験は、新潟県ほかの調査様式に組み込まれているもので、調査ボーリングの掘削時に一定間隔で簡易揚水試験を行うことになっている。当検層法は、その簡易揚水試験に抱き合わせて実施する地下水検層法である。

一般に行われる簡易揚水試験は、ボーリング孔の全深度に亘って掘削区間 3～5 m 毎に実施する。試験区間の上部層はケーシングで遮水しているため、一応その試験区間のみを対象とした揚水試験となっている。このためこれに平行して地下水検層を行うと、試験区間 3～5 m に区切ったのステップ式検層であり、しかも孔内水を揚水するため、同時に汲み上げ検層を実施することになる。このため、地下水検層を行う条件としては誠に理想的な状態での検層といえる。

## 4. ステップ式汲み上げ検層の実施例

実施例は、新潟県の新第三紀中新世寺泊層の泥岩分布の地すべり地で試験的に行ったものである。

試験孔は全長 15 m の調査ボーリング孔、地表から 3 m 間隔で簡易揚水試験を行う設計となっていた。この内簡易揚水試験と平行して地下水検層を実施した区間は、深度 6～9、9～12、12～15 m の計 3 区間である。以下各区間の検層図とその結果を示す。

[6 m～9 m の検層図] ……図 4.1

地表から 6 m までケーシングを挿入し、上部層との縁切りを行っている。ケーシング尻の 6 m に流動は認められないため、縁切りは確実であると判断される（以下の各区間においても同様な結果が得られている）。

水比抵抗曲線を見ると、6.5～7.5 m 区間に流動変化が表れ、その区間に地下水が著しく流入していると判定される（以下、7 m の流入と称す）。

[9 m～12 m の検層図] ……図 4.2

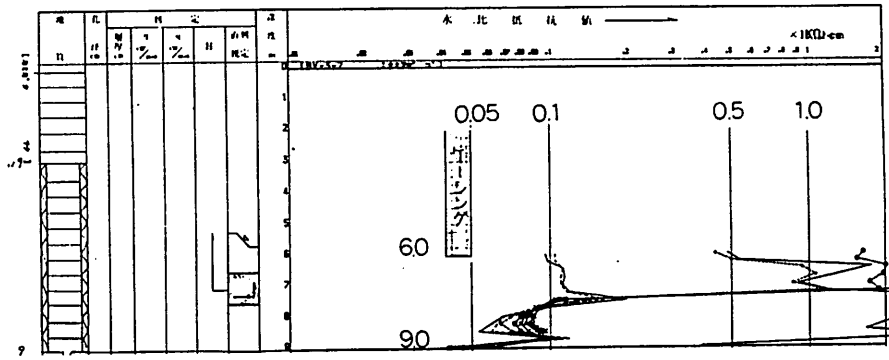


図 4.1 6 m~9 m 検層図

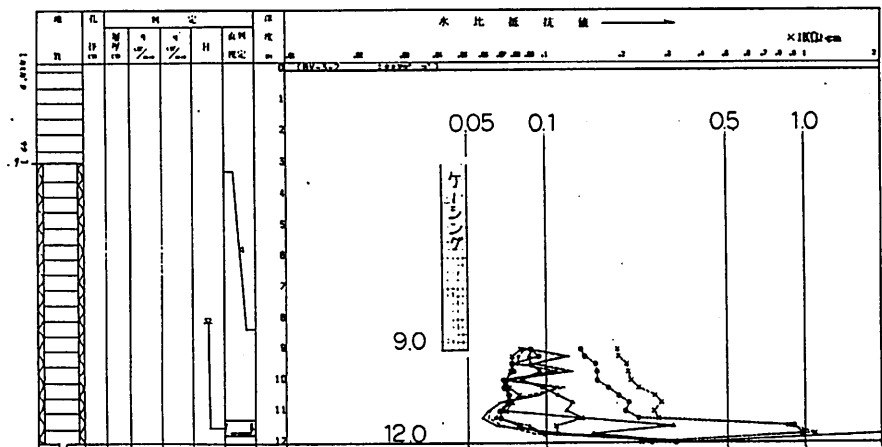


図 4.2 9 m 12 m 検層図

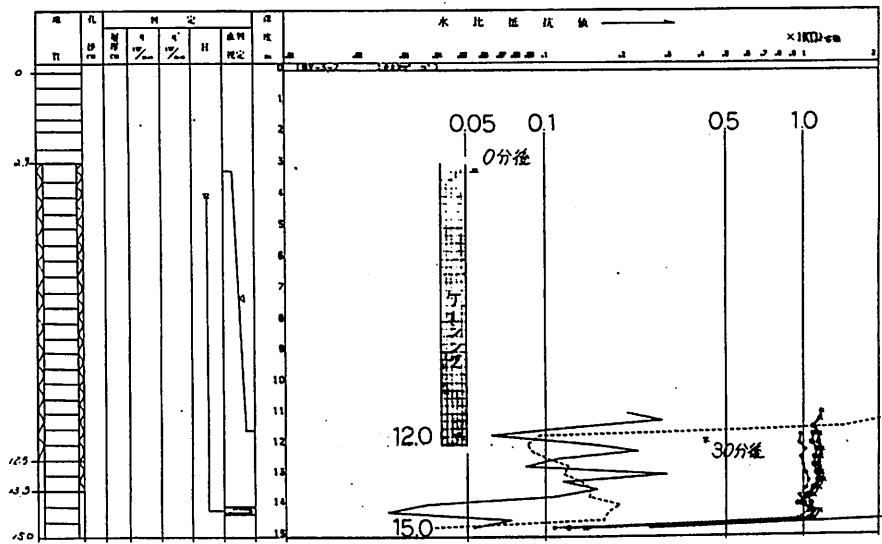


図 4.3 12 m~15 m 検層図

深度11.25～11.75m区間に注目すると、検層開始45分後の水比抵抗値にピークが表れ、地下水が流入してきたことが分る。孔内水位の低下に伴って、地下水が流入してきたことになる（以下、11.5mの流入と称す）。

[12m～15mの検層図] ……図4.3

検層3m区間の水比抵抗値が一気にバックグラウンド値（B.G.値）に回復した様子から、地下水の流入が激しいと判断される。

しかし、試験地の地質が泥岩層であるということから、3m区間全層で地下水が流動していることは考え難い。検層開始20分後の水比抵抗曲線のピークから14.0m付近での流入とするのが妥当と判断する（以下、14m流入と称す）。

## 5. 同一孔で実施した従来の検層結果との対比

### 5.1 自然水位検層結果との対比

図5.1はボーリング孔が全深度掘り終わった状態での自然水位法の検層図である。同図に4.2のステップ式汲み上げ検層の解析結果（7、11.5、14m各地下水箇所）を図示した。

地下水流入箇所計3箇所の内、自然水位検層で明らかに検出されたのは14mのみである。

11.5mに流入を思わせるのは20分後の測定1回だけで、その1回だけの水比抵抗値のピークをもって「地下水流入」と判定することは神業的な判定といわざるを得ない。

自然水位の検層では12～13mに直後から10分後までの計3回の測定にピークがみられるが、その後の測定には現れていない。また、ステップ式汲み上げ検層にも、同深度にそのような動きはない。したがって、同深度には地下水の流入はないと判断するが、図5.1のみを見た場合いかにも「流入あり」と判定しかねない変動ではある。

7mの流入箇所を特定するような変動は、図5.1には全く現れていない。4～8m区間の水比抵抗曲線に流入を思わせる変動があるが、これをもって「流入あり」とするには疑問がある。また地質から考えて、あまりにも厚層すぎることに問題がある。

### 5.2 汲み上げ検層結果との対比

図5.2汲み上げ検層図に示すとおり、検層開始の時の孔内水位は3.85mであったが、孔内水を汲み上げ、5.5mまで水位を下げながら検層を行っている。約1.7mの水位低下である。

同一孔ではあるが、自然水位の検層とはかなり違った変動パターンをなす。

14m、11.5mの地下水流入箇所が図5.2の水比抵抗曲線にピークとして現われているのは、14mで直後、5分後の2回、11.5mで5分後の1回だけで、その後の測定では変動が鈍いか、あるいはピークが消滅した変動となっている。

自然水位検層で14mに検出された地下水の圧力水頭は $H_w > 10\text{m}$ （14mの地下水対応の水位高 $h_w = 10.15\text{m}$ の時）と判定されたが、汲み上げ検層では水位高を約1.7m（ $h_w = 8.5\text{m}$ ）も低下させたにもかかわらず、水位を低下させるに従って14mの地下水の流入は鈍く、また停止状態となっている。理屈から考えれば、 $\Delta h (= H_w - h_w)$ が大きくなればなるほど、地下水の流入は活発になっていい筈である。しかし、この例では $\Delta h$ が大きい汲み上げ検層結果より $\Delta h$ が小さい自然水位検層結果のほうがより鮮明に流動が現われるといった、理屈とは逆の結果となっている。

また、11.5mの地下水に注目した場合、そのもつ圧力水頭は $H_w = 3.5\text{m}$ である。それに対し

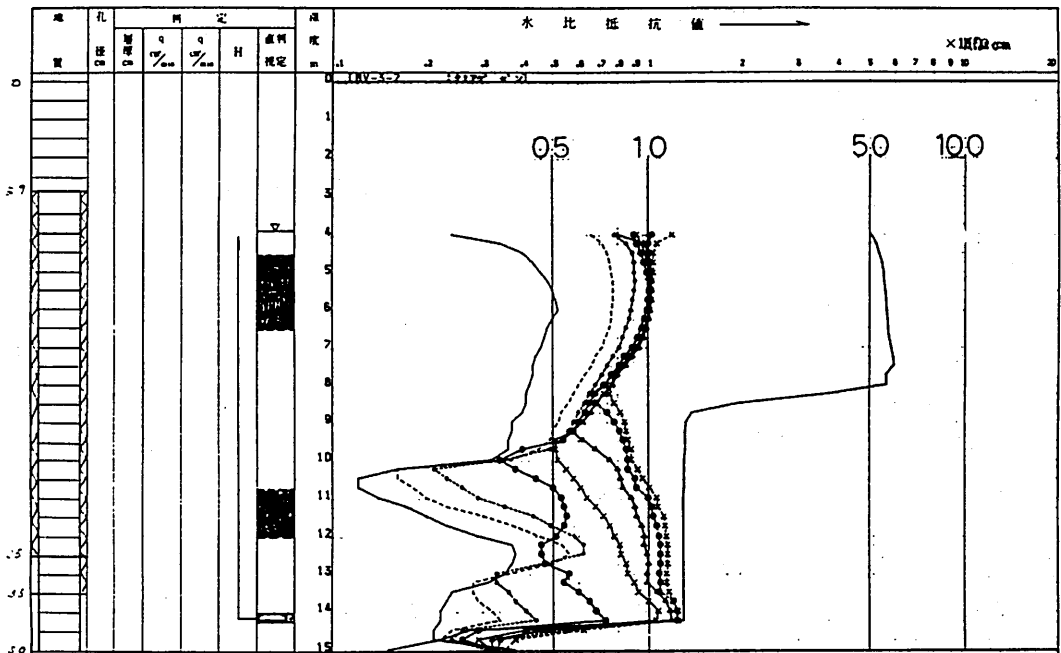


図 5.1 自然水位検層図

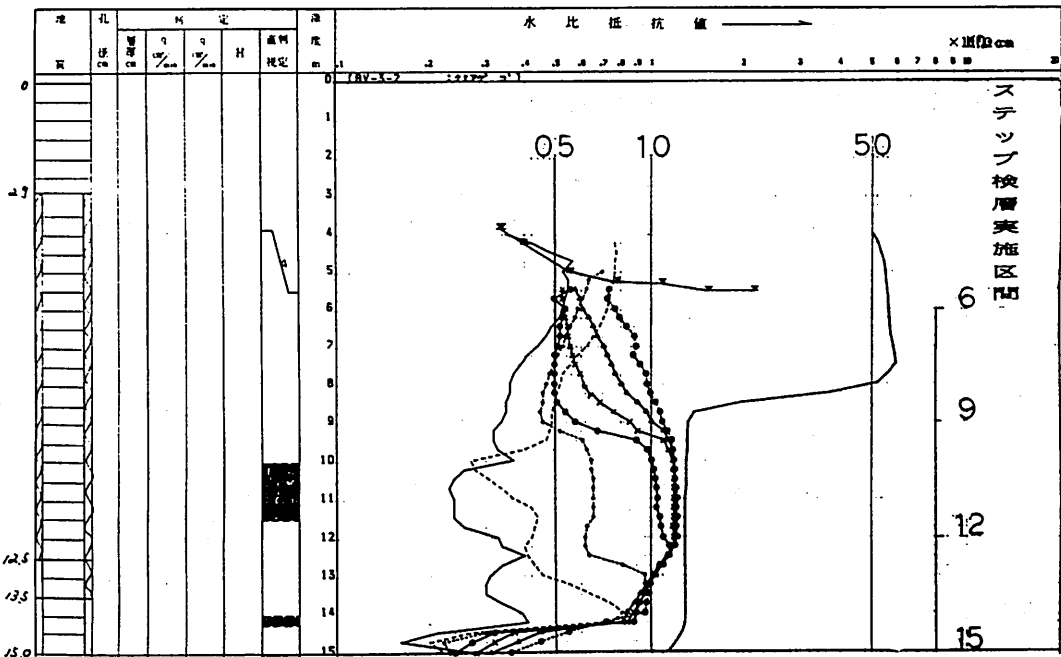


図 5.2 汲み上げ検層図

て、その対応する水位高は、汲み上げ最大時においても  $h_w = 6.0\text{m}$  である。したがって、 $\Delta h = H_w - h_w = 3.5 - 6.0 = -2.5\text{m}$ 、すなわち  $\Delta h < 0$  から、11.5mの地下水が孔内へ流入する条件は満たしていない（仮に11.5mの地下水を汲み上げ検層で確認するとすれば、孔内水位をさらに2.5m以上低下させなければ検出は不可能な管である）。このため同深度に5分後の1回だけに現われたピーク、さらに10~12m区間がいち早くB.G.値に回復する変動には説明を窮するものがある。

7mの地下水の圧力水頭は  $H_w = 1.7\text{m}$  である。それに対応する水位高は検層開始時において、 $h_w = 3.15\text{m}$  であったが、その後の孔内水の汲み上げによって  $h_w = 1.5\text{m}$  まで水位を低下させている。この結果、開始当初は  $\Delta h < 0$  であったものが、汲み上げによって  $\Delta h > 0$  に変化したため、55分後の水比抵抗曲線に僅かながら地下水流入のピークの傾向が現われ始めている。 $\Delta h > 0$  の状態でそのまま測定を継続していたとすれば、そのピークはさらに鮮明に検出されたものと判断する。

図5.2の検層図は図5.1、図4.1、4.2、4.3とは異なり、流入、特に流入箇所の特に鮮明さを欠くため、それだけでの判定にはかなり苦しいものがある。せいぜい10~12m付近、および14m付近に地下水が流入しているらしいと曖昧な判定とならざるを得ない。

## 6. 地下水検層法についての一考察

同一ボーリング孔での3通り計5回の検層結果を見てきたが、その3通りの検層法の中では、今回試験的に実施したステップ式汲み上げ検層が検層区間を小区間に区切って、しかも各区間毎に孔内水の汲み上げを実施するという点で、現在考えられる検層法としては理想的なものといえる。

その結果その検層では7、11.5、14mの計3箇所に地下水の流入を、さらにその各地下水のもつ圧力水頭をも明瞭に検出できた。それに対して、従来から実施している自然水位、および汲み上げ検層で明瞭に検出できたのは、自然水位検層の場合で、14mの地下水流入が1箇所のみである。

それらを対比して、自然水位、および汲み上げ検層の問題点を整理すると、以下のとおりとなる。

- ① 実際の地下水流入箇所が現われないことがある。
- ② 流入傾向があるとしても、シャープさを欠くことがある。

その結果、

- ③ 地下水の流入傾向を示す変動が、実際の流入箇所からずれた位置に現われたり、
  - ④ 地下水の流入傾向を示す変動区間が、実際の流入区間よりはるかに厚く検出されたことがある。
- さらに、

- ⑤ 地下水検層の検出原理では理解し難い流動変化を示すことがある。

等から、結論として、

- ⑥ 自然水位検層の問題点を補うものとして、汲み上げ検層を実施しているが、両検層ともに万能足り得ずということになる。

なぜこのような問題が発生するかその原因を考えると、自然水位、および汲み上げ検層は共に掘削完了後の全深度（実施例では15m）を貫いたボーリング孔での検層であること、それに対して、ステップ式汲み上げ検層は小区間（実施例では3m区間）に区切って上下層とは縁切りされた検層であること、ここに大きな違いがある。

全深度を貫いたボーリング孔であれば、当然のことながらそれが貫く地下水層（束）は数多くなる（今回の実施孔では少なくとも計3枚の地下水束が存在）。その結果、ボーリング孔に掛かる何枚もの



地下水がそれぞれに複雑に干渉しあって、①～⑥のような問題が生じるものとする。

上記から、それらの問題を解消するには小区間で縁切りされた検層法が有効である。その一方法として、3.2のステップ式地下水検層があるが、同検層では検層時の状態が必ずしも $\Delta h > 0$ （地下水が孔内へ流入する条件）を満足するものとは言えない。そのため、それにさらに汲み上げを加えたステップ式汲み上げ検層は極めて理想的な検層法であると言える。

## 7. おわりに

現在一般に実施されている自然水位検層はもとより、汲み上げ検層においても、6の①～⑥のような問題がある以上、それらの問題点を解消する工夫が必要である。

今回の実施例では、11.5mにすべり面が判定されるが、従来の自然水位、また汲み上げ両検層、いずれの場合であっても同深度に地下水は検出できず、ステップ式汲み上げ検層のみに検出された。

はじめに述べたとおり、地すべり対策においては、地下水を知ること、しかもそれはすべり面に関わる地下水であり、さらにその地下水の圧力水頭を知ることが重要で、逆に欠くことができないものである。

今回の試験的な実施例を踏まえ、さらに地下水調査の目的を考えた場合、ステップ式汲み上げ検層は極めて有効な検層法であり、その導入が望まれる次第である。

導入に当たってはそれなりの手間は掛かるが、ボーリング掘削の間に行う簡易揚水試験は仕様、あるいは設計に組み込まれているため、そのとき行う地下水検層分の手間が別途に掛かるだけである。今回実施した検層は、最近ステップ検層として開発された自動地下水検層器を使用したため、その取扱いに慣れていないこと、また検層器をセットした状態での揚水に手間が掛かったことなど問題がなかったわけではない。しかし、それらの問題が解決すれば、仕様の確立、設計への組み込みも十分可能なことである。