

地すべり地の簡易揚水試験の在り方

信州大学名誉教授 川上 浩

1. まえがき

地すべり地では、地下水調査の一環として、ボーリング孔を利用して簡易揚水試験が実施されている。これを有効に活用すれば、きわめて有用な地下水に関する情報が得られると考える。しかしながら、この簡易揚水試験から透水係数を求める方法が不明確であり、また試験方法にも困難が伴う等の理由により、活用されているようにはみられない。

このボーリング孔における簡易揚水試験は、1972年から新潟県で実施されたといわれている¹⁾²⁾が、その後、1976年建設省の河川砂防技術基準³⁾に採用され、さらに林野庁の設計基準(1987)⁴⁾・農林省の設計基準(1989)⁵⁾に採用され、また各都道府県の仕様書⁶⁾⁷⁾にも決められたことで、多くの現場で実施されるようになったと推察される。

しかし、地盤工学会が1985年に実施したアンケート調査⁸⁾では、試験方法・解析法における個人差、使用される解析式の違い、孔壁の崩壊、砂地盤への適用など多くの問題があることが示されている。

地すべり学会中部支部抑制工法研究委員会で、この試験方法について論議する中で、試験法としての問題点、解析方法の注意点などについて気付いたことを取りまとめて報告したい。

2. 簡易揚水試験

簡易揚水試験では、図-1 に装置の概要を示すように、ケーシングパイプを用いてボーリング孔上部の遮水を行い、下部に裸孔の試験区間を設けて、孔内水を一定水位を保つよう40分間汲み上げる。この水位を保つための揚水量 Q_0 を求める。汲み上げを中止した後、水位の回復を測定する。揚水量と時間～水位回復曲線より、試験区間の透水係数を算定する。

試験結果の解析には、各基準ではヤコブ式を使用するよう決められているが、具体的な公式までは示されていない。そこで、実際の業務では、いろいろな解析式が用いられてきており、調査会社によって異なるのが実情である。

地すべり学会中部支部で、各社に報告願った資料で使われていた解析式は以下の3式である。

一定時間 t_p だけ揚水をおこない、その後水位の回復を測定した場合には、次式¹¹⁾ が示されている。ただし、式中の記号は、図-1 の図中で説明している。

$$k = \frac{0.183 Q_0 \log((t_p + t)/t)}{s \cdot L} \quad (1)$$

この他に解析式として、会社によっては、次の形のものが用いられている。

$$k = \frac{0.183 Q_0 \log(tp+t)}{s \cdot L} \quad (2)$$

$$k = \frac{0.183 Q_0 \log t}{s \cdot L} \quad (3)$$

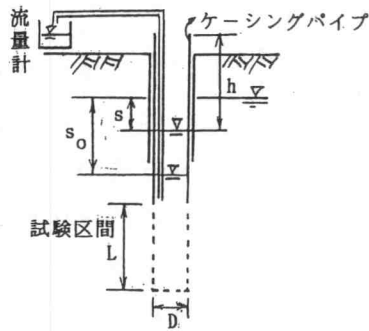


図-1 簡易揚水試験の概要

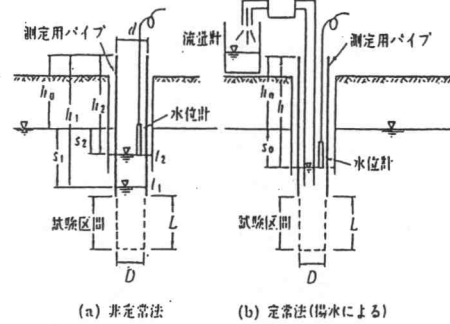


図-2 JGS透水試験方法の概要

(1)式は時間 t_p における揚水停止の意味を、等量の水 Q_0 を孔内に注入すると解釈すれば得られる。この式が回復法の正確な式である。時間 t_p における水位が保持され、その後の水位回復を示すとなれば、(2)式が得られる。また、水位回復時曲線にのみ着目すれば、(3)式を使用できる。すなわち、(1)式が厳密解であり、(2)式、(3)式は近似解として使用できる。したがって、上の3式の場合、解析時に描く水位回復曲線の時間座標が異なるのみであり、この水位回復曲線をいかに簡単に描くことができるかという観点で、使用する式に相違が生まれたものであろう。

3. 土質工学会基準による透水試験

1995年地盤工学会の試験法の基準化に際しては、砂質土地盤を対象として、試験方法を非正常法と定常法に区分し、透水係数を求めるには、ポシュレフ式を採用している。これは、ポシュレフ式の誘導の明確さ・妥当性を検討した結果⁹⁾¹²⁾の判断とみられる。簡易揚水試験に対応するのは、定常法であるが、地すべりの現場では非正常法による透水係数の測定も実施されることもある。ここでは直接関連する定常法についてのみ触れておきたい。

JGS1314 の定常法の装置の概要を図-2 に示す。ボーリング孔の孔内水を揚水または注水して、孔内水位と流量が一定となった時の水量を測定する。これより平衡水位からの水位変動量 s_0 と、定常時の流量 Q_0 を用いて次式で透水係数 k を算定する。

$$k = \frac{1.15 Q_0 \log(2L/D)}{\pi s_0 L} \quad (4)$$

定常法では、簡易揚水試験におけるように、汲み上げ中止後の水位回復を測定する事なく、汲み上げ時の水位低下量と揚水量のみから、透水係数を算定できる。

4. 簡易揚水試験で得られる透水係数

地すべり地で多く実施されている簡易揚水試験の結果が、使用される解析式によりどの程度異なるものか調査した。3社から提供された試験結果は、それぞれの現場について、

(1)(2)(3)式のいずれかにより解析されているので、直接の対比が困難である。そこで比較のための基準値としては、最も簡単に計算できるJGS-1314定常法の(4)式を用いることにする。これならば、水位回復曲線を描くことなく、簡単に透水係数をけいさんできる。

図-3には、ヤコブ式の(1)式でえられる透水係数を(4)式による値に対比して示している。(1)式で得られる透水係数は、かなり小さい傾向がある。また、透水性が大きいところで、ばらつきが大きくなり、透水性のよい砂地盤での問題がうかがわれる。

次に、(2)式でえられる透水係数をJGS定常法(4)式による値と対比して図-4に示す。(2)式で得られる透水係数は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sの狭い範囲にのみ分布しており、分布幅が

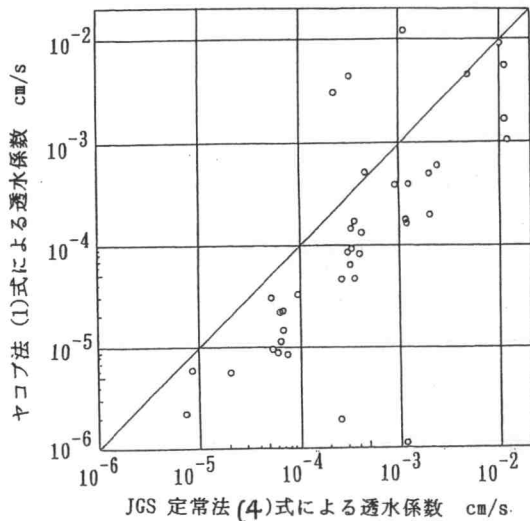


図-3 (1)式による透水係数と(4)式のk

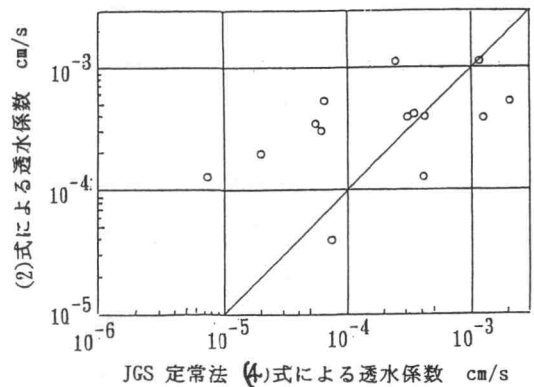


図-4 (2)式による透水係数と(4)式のk

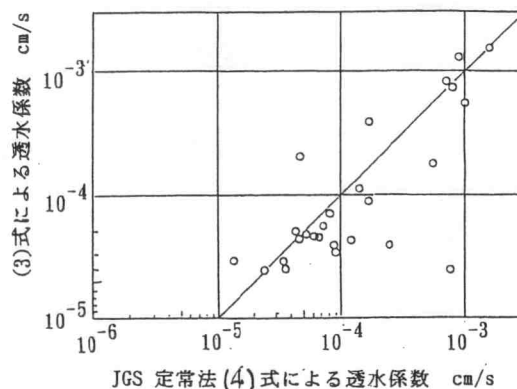


図-5 (3)式による透水係数と(4)式のk

狭いものとなっている。

次に、(3)式でえられる透水係数を(4)式による値と対比して図-5に示す。この場合には、比較的対応のいい関係がみられる。ヤコブ式で透水係数を求めるには、水位回復曲線を描いて、その直線部の勾配を用いて計算する。この時、水位曲線の初期部分を用いるか、終期部分を用いるかの違いによっても、計算結果は異なったものとなる。

使用する解析式により、得られる透水係数の数値に違いはあるが、桁が違うほどの問題ではない。しかし、もともと厳密解と近似解との違いであるから、それほどの違いはないはずと予想していたにもかかわらず、大きな開きがあるといわねばならない。

そこで著者自身が、3社の試験結果から水位回復曲線を描いて、透水係数を再計算することにした。その結果(1)(2)(3)式のいずれを用いても、大きな差は生じないことが判明した。結果に大きな差異が生じる原因は、水位回復曲線を描いてどの部分に直線を引いてその勾配を求めるかの違いにある。水位回復曲線の初期部分に着目して直線を引くか、水位回復曲線の終末部分に直線を引くかの違いにより、得られる透水係数には大きな差が生まれる。水位回復曲線では、通常は安定した初期の勾配を用いるのがよいと考えるが、この点が試験法に明文化されていないために、各社の各技術者がそれぞれの判断で決めている実情がある。

5. 調査結果の表示

次に、得られた結果の表示方法として、透水係数を列挙するだけでは役に立たない。透水性がいいということと地下水が豊富であるということは意味が異なる。水の流動性がよいためには、透水係数が大きいこととそこに水頭があることが必要である。その結果として、揚水が可能となるものであり、揚水量そのものの方が実用的意味がある。同時に、地すべりの安定性に直接影響する地下水の水頭も重要な要素であり、それを計測している簡易揚水試験の意味もある。

事例として、長野市下石川地すべりの例¹³⁾を引用したい。図-6には下石川地すべり地の1つのボーリング孔で複数の簡易揚水試験を行った結果を示している。得られた透水係数と共に、揚水量及び水頭を示しているが、透水係数よりは、揚水量そのものの方が実用的意味は高い。どの深さに流動性の高い水があるか、その水頭は高いのか低いのかに答えてくれる表現が必要である。図示の場合、試験区間の全長に互り、地下水水頭も高く、水量も豊富であると判断できる。

地下水検層の結果があれば併記することが求められているが、地下水検層は、ボーリング孔全長が裸孔である時の地下水流動を示していることに留意する必要がある。例えば、図-6の場合、地下水検層を行えば、6~12mの区間で12~18m区間よりも水頭が高いので、浅い区間から水が出て、深い区間で水が逃げていくという結果が得られるであろう。しかし、それは本質的ではなく、6~18m全長にわたり水頭も高く、地下水が豊富であるという判断が大切である。簡易揚水試験は、特定の深さに試験区間を設けて、その深度の地下水情報を提供しているという大きな利点を持つ試験法である。

図-7には、下石川地すべり地で実施された多数のボーリング孔での結果を示している。

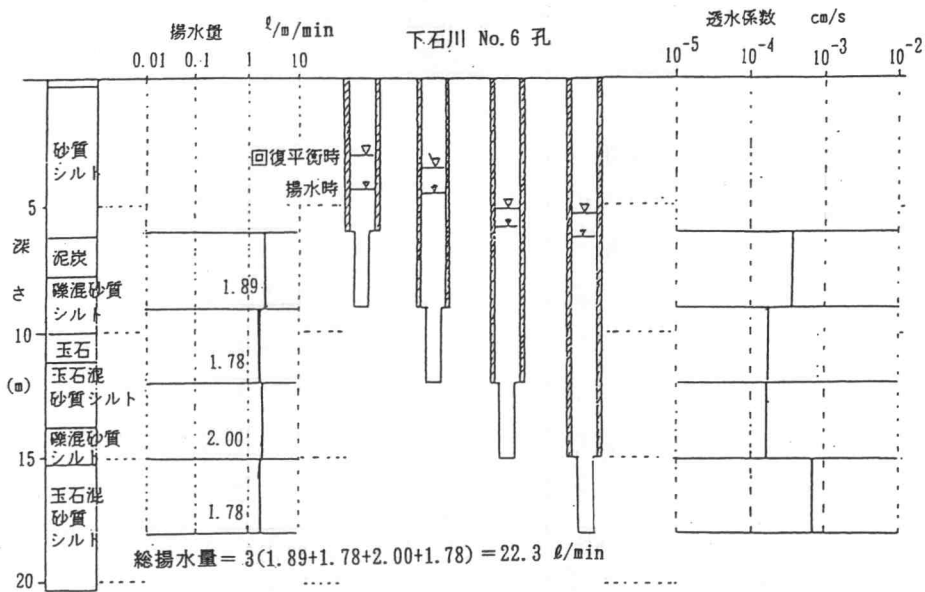


図-6 下石川地すべり地のNo. 6孔の揚水試験結果

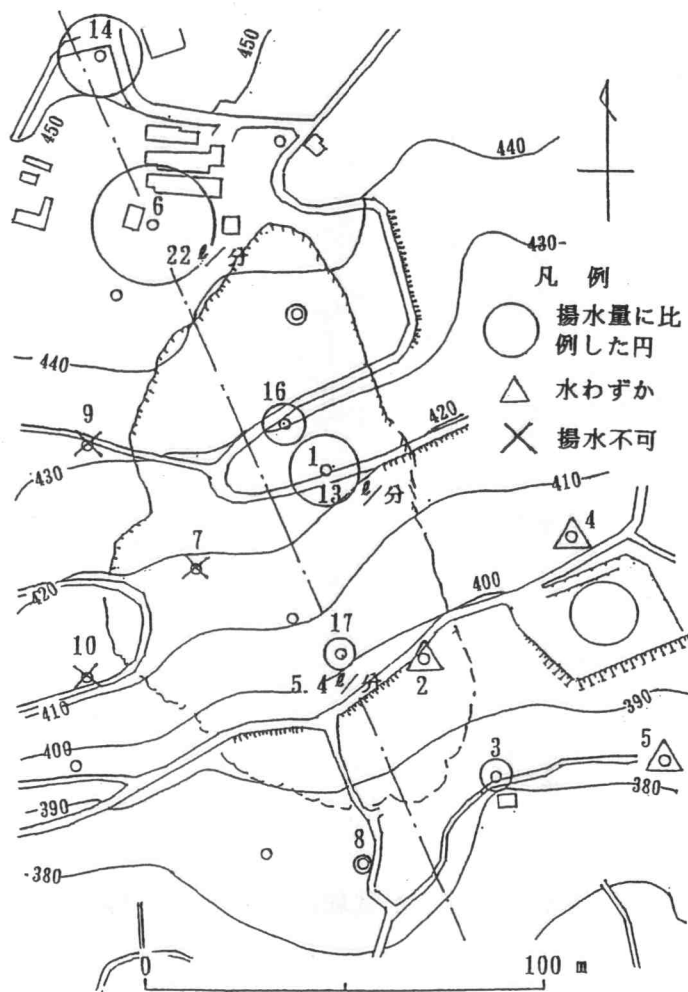


図-7 下石川地すべり地の揚水量分布

各孔で実施した複数の試験の揚水量の和を、円の大きさに示している。地すべり地西側のボーリング孔No.9,7,10では、水が少なく揚水不可である。また、東側のNo.4,2,5孔では水はわずかである。地すべり地の周囲のボーリング孔では揚水量が極めて少ないのに対し、地すべり地上部から地すべり地中心部にかけて揚水量が大きく、中央に地下水の主要な流下ルートがあると推察できる。この例にみられるように、揚水試験から単に透水係数を求めるよりも、揚水量に実用的価値があると考えられる。

簡易揚水試験では、どの平面位置に水があるかというばかりでなく、どの深さに水があるかを示すことができる。図-8には、斜眼紙を用いて揚水量を立体的に示している。凡例に示すように、ボーリング孔に地下水が無くて揚水ができない場合から、わずかに水はあっても揚水すれば試験条件を満たさなくなり、揚水試験を実施できないものまである。図-8では、これらを記号で区別して示している。この図から、下石川地すべりでは、地すべりブロック中心の深さ10~20mのところに地下水が豊富であると判断することができる。図-8には、揚水試験前の水頭分布も示している。集水井からの排水ボーリングを、何処をめぐらして実施すべきかの資料となろう。

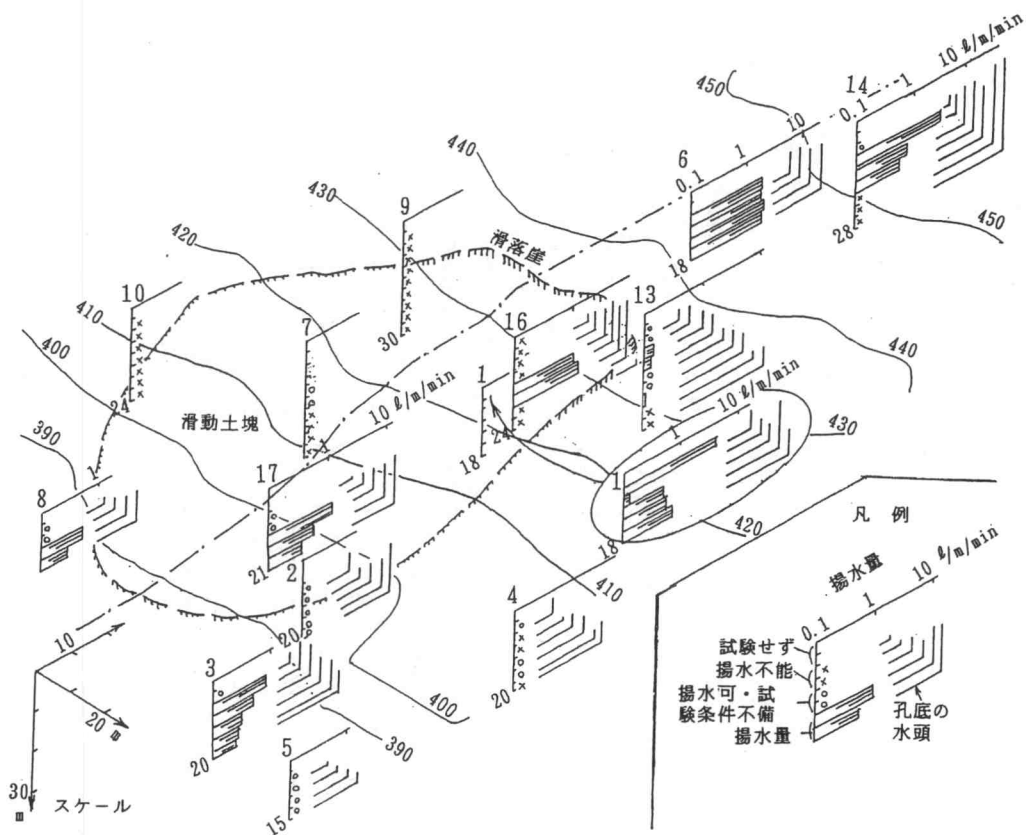


図-8 下石川地すべり地揚水試験結果の総括的表示

6. 簡易揚水試験の問題点

- 1) 試験精度の改善 現在揚水にはベイラー等を用いるとされているが、ベイラーでは、手早く正確に揚水することは困難である。ポンプによる揚水を工夫して、一定水位を保ちながら揚水を行い、揚水量を正確に計る必要がある。また、回復水位の測定に際しても、電気的水位計の活用により、連続的に正確な水位を計る必要がある。
- 2) 試験時境界条件の厳守 ベイラーによる揚水のため、かなり雑な揚水が実施され、透水性の小さい試験孔で過大な揚水が実施されている例が多い。揚水により、ボーリング孔の試験区間に水位が低下することが多い。揚水による水位低下は大きくなくとも、精度の高い水位計測を行えば、水位回復曲線は得られるはずである。試験区間の1 m上まで水位を低下させるよう指示している基準⁷⁾もあるが、大きな水位低下を生ぜしめることは、試験区間の孔壁の崩壊の原因ともなり、好ましいことではない。
- 3) 揚水時間の検討 現在の基準では、40分の揚水が指定されているが、これは地すべり地で実施するという前提で、透水性の小さい地盤を想定している。透水性の高い砂礫地盤では、長時間の揚水は、自由地下水面が低下する問題が生じがちである。どのような地盤ならば、40分揚水が可能なのか、より具体的に示していく必要がある。
- 4) 透水係数算定法の検討 現在水位回復曲線からヤコブ法により透水係数を求めることが決められているが、現実には種々の式が使われており、JGSの非定常法・定常法まで含めると、5種類の透水係数が存在することになる。加えて、この曲線のどの部分の勾配により透水係数を算定するのかにより、結果に大きな影響を及ぼしている。透水係数は、オーダーが問題だから、少々のばらつきは構わないが、水位回復曲線のどの部分の勾配を使うのかは大きな問題であり、示様書で決めて統一を計る必要がある。水位回復曲線の安定した初期の勾配を使用すべきであろう。
- 5) 簡易揚水試験の結果として透水係数は得られるが、地すべりの判断には揚水量とその時の水頭が重要である。これを報告することが大切である。

7. 結論

地すべりが降雨や融雪による地下水の働きによることはよく知られてはいるものの、斜面内の地下水の流れを見極める努力は不足していると常々考えている。地盤の中の眼に見えない存在の地下水ではあるが、種々の計測を利用してより明確にしていくことが大切であろう。現在実施されている簡易揚水試験は、試験法と解析法に改善すべき点はあるものの、マクロに地下水の存在を知ることができる方法であり、今後さらに活用をはかるべく、改善を計るべきであろう。

参考文献

- 1) 地すべり学会新潟支部(1974)：新潟県の地すべり，地すべり，Vol. 11, No. 2, pp. 39-42
- 2) 布施 弘(1975)：新潟県の地すべり調査と防止工法について，地すべり研究，No. 19, pp. 1-12.
- 3) 日本河川協会(1976)：建設省河川砂防技術基準・調査編，260p.
- 4) 日本治山治水協会(1987)：治山技術基準解説（地すべり防止編），87p.
- 5) 農林水産省構造改善局(1989)：土地改良事業計画設計基準「計画・農地地すべり防止対策」，pp. 42-43.
- 6) 新潟県土木部砂防課(1997)：砂防地すべり（計画と設計）.
- 7) 長野県建設技術センター(1991)：長野県土木工事特記仕様書集.
- 8) 土質工学会(1985)：単孔式透水試験の問題点，原位置透水試験法と地下水調査に関するシンポジウム論文集，pp. 17-26.
- 9) 地盤工学会(1995)：地盤調査法－ボーリング孔を利用した透水試験方法，pp. 288～293.
- 10) 地盤工学会基準部(2002)：JGS1314 ボーリング孔を利用した透水試験方法，土と基礎，Vol. 50, No. 12, p. 93-96.
- 11) 土質工学会(1982)：土質調査法，364p.
- 12) 西垣 誠(1986)：単孔式透水試験法の問題点の検討と改良，地下水と井戸とポンプ，Vol. 28, No. 9, pp. 1-10.
- 13) 白石秀一他(2000)：長野市下石川地すべりの地質とメカニズム，第39回地すべり学会研究発表講演集.