

地すべり斜面の自由地下水位、地下水圧の観測と解析について

Observations and Analyses of Free Groundwater Levels and Groundwater Pressure in Landslide Slopes

吉田 昭 治 (よしだ しょうじ)

新潟大学教授 農学部

中野 俊 郎 (なかの としろう)

新潟大学助教授 農学部

稲葉 一 成 (いなば かずなり)

新潟大学大学院 自然科学研究科

佐藤 修 (さとう おさむ)

新潟大学教授 積雪地域災害研究センター

1. はじめに

新潟県などに多く分布する第三紀層地すべりは、融雪期や豪雨時に多発することはよく知られている事実である。この地すべりの発生機構は、融雪水や降雨などの地表供給水によって地下水位が上昇し、すべり面の間隙水圧が増大することによって、その有効応力が減少するため、すべり面における土の強度低下をきたすことによるとされている。このように土質力学的に比較的単純な地すべり発生機構を想定したとしても、地下水の実体把握は土の強度の評価とともに重要となる。このことから、地すべり現場で地下水位や地下水の水圧の観測・調査が重視され、そのデータに基づき地すべりの安定解析がさかんに行われているにもかかわらず、第一に、この地下水位、地下水圧（間隙水圧）の観測方法について、第二に、観測データの解釈の仕方、したがって観測データから地下水位やすべり面の地下水圧を推定する方法について、現在なお、いくつかの基本的な問題点があると考えられる。本報告はこれらの問題点について、筆者らがここ数年行ってきた新潟県の松之山越りや東虫亀地すべり地²⁾の具体的な観測例に基づいて、検討したものである。

2. 地下水位、地下水圧、間隙水圧の定義

地下水の水圧、水位にかかわる用語が、その定義があいまいなまま使われている面があるので、まず、これらの点について検討する。

2.1 地下水位

いま、地下水中の任意の点の標高を z 、水圧を p とすると、水の単位体積重量を γ_w として、地下水

の全水頭 h は $h = z + p/\gamma_w$ で表される。これは、浸透流に関するダルシーの法則との関連からはポテンシャルとも呼ばれ、またピエゾメーター水位 (piezometric level) とも呼ばれる。地すべりや地下水文学などの現場の地下水を対象とする分野では、この h を地下水位と呼び、同時に自由地下水位 (= 不圧地下水位) を指すものとして用いられている³⁾。しかし、地すべり地内の地下水のような傾斜流の場合は、不圧帯水層では静水圧分布をなさないから、1本の鉛直線上では深さによって h が異なり、「A地点の地下水位」という表現はできない。なぜなら、図-1でA地点の鉛直線上の地下水位はa点では h_a 、b点では h_b であり、自由地下水位はc点であり、単にA地点の地下水位といった場合、そのどれを指すか特定できないからである。 h が鉛直線上で一定になるのは静水か水平流の場合か、それに近似できる場合に限られるのであり、この場合のみ、A地点の地下水位 (ピエゾメーター水位) は深さによらず自由地下水位と一致し、ただ一つの値で示されることになる。すなわち、従来の地下水位なる用語は、地下水圧の鉛直方向の分布を考慮しないで一次元的

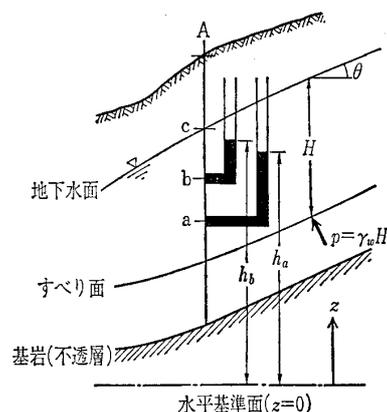


図-1 自由地下水位、地下水頭、地下水位

報文—2176

に扱う場合に限り有効であるといえる。以上のような混乱を避けるために、単に地下水位という時は、自由地下水位を指すものとし、広義の意味の場合の地下水位には地下水頭⁴⁾か全水頭なる用語を使った方が良いと考えられる。

2.2 間隙水圧

地下水の水圧として最も普通に使われている間隙水圧は、もともと、土質力学の圧密や強度の問題と関連して示された概念であり、かなりマイクロに（土粒子の大きさのオーダーで）みても均質な間隙の存在を前提として、その間隙水の水圧を指している。しかし、実際の地すべり地で様々な方法で観測される水圧は、例えば、泥岩の小土塊内のマイクロな間隙内の水圧ではなく、土塊と土塊の間の亀裂や水みちを含むような、少なくとも数 cm^2 から 1m^2 のオーダーの断面にわたる平均水圧とみなすべきであろう。また、現地の地下水流動の解析にダルシーの法則を適用する場合の水圧も、この地下水圧である。したがって、例えば、泥岩層の現場透水試験で得られる $10^{-3}\sim 10^{-6}\text{cm/s}$ のオーダーの透水係数も、これは明らかに土塊そのものの透水性ではなく（泥岩土塊そのものの透水係数は 10^{-7}cm/s 以下であろうから）、この 1m^2 のオーダーの断面の亀裂などを含んだ平均的な透水性を表すものと解すべきであろう。

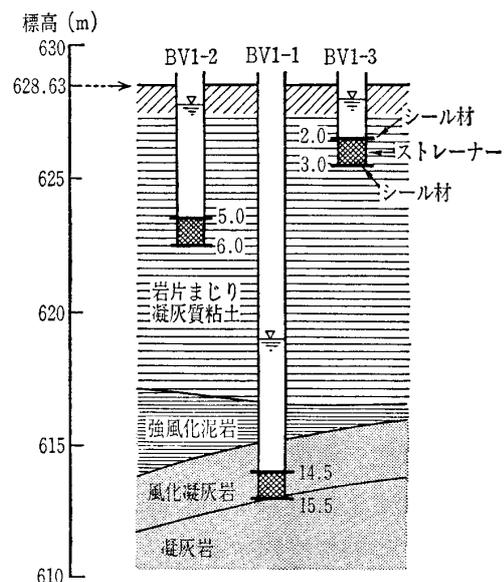
以上の考察からは、地すべり地などの現場で計測される水圧や、現場の浸透流解析に用いられる水圧は、普通はこの地下水圧であると考えられる。この考え方からすれば地すべりの安定解析に用いられる水圧も、この地下水圧であるということになるが、従来の間隙水圧には、この平均的水圧の概念は含まれていなかったと考えられる。しかし、従来の間隙水圧の概念が一般に広く定着していることを、また間隙水圧のような基礎的な用語の定義（概念規定）は学会規模の問題であることなどを考慮して、ここでは、間隙水圧は、先の地下水圧の概念を含めた広義の意味に理解することにして、以下の議論を進めることにする。

3. 地下水位、地下水圧の観測

現在、地すべり地における地下水の観測には、全長ストレーナー式観測孔か、地中に埋込み式の間隙水圧計が用いられているのが普通であるが、部分ス

トレーナー式観測孔はあまり用いられていない。後者の場合、ストレーナー部分の上下で孔壁と塩ビ管の間がシール材できちんと遮水されていると、特定の深さの地層の水圧を測定することができる（図—2）。また、この方式の観測孔の利点は、埋込み式の間隙水圧計の場合と違って、孔内水位計測用の圧力センサーが故障した場合にも、センサーを修理さえすれば、観測孔は継続して使用できる点である。埋込み式の場合は、センサーの経時変化による誤差をチェックする方法がなく、データの信頼性が設置後の経過時間とともに低くなる点に注意を要する。

全長ストレーナー式観測孔の場合には、まわりの地層の地下水との関係で孔内水位が決まることから、川上が詳しく指摘しているように⁴⁾、この水位は何を表すことになるかは、極めて複雑な問題になる。地下水頭の異なる帯水層が2層以上ある場合には、この孔内水位は、透水量の卓越した帯水層や水みちのもつ地下水頭によって最も強く支配される⁴⁾。このため、さらにほかの付加的なデータが無いと、この全長ストレーナー式観測孔の孔内水位から、地層の地下水頭を特定することは、極めて難しい。また驚くべきことに、地すべり地の地下水が一般にそうであるように、地下水が下向きに傾斜して流れている場合には、この全長ストレーナー式観測孔の孔内水位は、まわりの不圧地下水位より低めに現れ、しかもこの両者の水深の違いは実測上無視できないほ



図—2 部分ストレーナー観測孔（松之山越：BV1地点）（ストレーナー部の数字は地表面からの深さm）

ど大きいことが、筆者らの研究⁵⁾で明らかにされつつある。

4. 傾斜流の地下水圧の鉛直分布について

4.1 不圧帯水層の場合

現在、地すべり斜面の安定解析には、すべり面の地下水圧(間隙水圧) p は、その点の自由地下水面からの深さを H 、 γ_w を水の単位体積重量として

$$p = \gamma_w H \dots\dots\dots(1)$$

で求めるのが普通になっている(図-1)。この式は、地下水圧が静水圧分布をなすものとして扱っていることと同義であるが、地下水が静水圧分布をなすのは、先にも述べたように静止しているか、水平流^{注1)}の場合に限られる。地すべり斜面内の地下水のように、傾斜流の場合には、(1)式を一つの近似式として用いるのは、その傾斜角 θ が、水平に対しせいぜい 10° 以下程度に限定すべきものと思われる。したがって、実測上にしる、計算上にしる地すべり面の間隙水圧を求めるには、何らかの方法で自由地下水位を求めたとしても、さらに鉛直方向の地下水圧分布を知る必要がある。いま、地下水流の全水頭 h を

$$h = p/\gamma_w - y \dots\dots\dots(2)$$

(y は鉛直下向きに正、 p は地下水圧)

とする。 h の水平方向 x 、鉛直方向 y の勾配をそれぞれ J_x, J_y とする。すなわち

$$J_x = -\partial h/\partial x, \quad J_y = -\partial h/\partial y \dots\dots\dots(3)$$

とすると、 k を透水係数として、ダルシー則は

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -k \frac{\partial h}{\partial x} = k J_x \\ v_y &= -k \frac{\partial h}{\partial y} = k J_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

で表される。

まず、透水性が一様な均質土層内を自由地下水面をもって地下水が流動する場合、圧力水頭 p/γ_w の鉛直下向きの勾配を

$$I_p = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\gamma_w} \right) \dots\dots\dots(5)$$

とすると、流れが下向きの流速成分をもつ、すなわち $v_y > 0$ ならば、

$$v_y = -k \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\gamma_w} \right) - 1 \right\} > 0$$

ゆえ、 $I_p = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\gamma_w} \right) < 1$ となる。

流れが上向きの流速成分をもつならば $v_y < 0$ となり、上とは逆に $I_p > 1$ となる(図-3)。

いま、流れの水平からの下向きの傾き(俯角)を θ とすると、図-3を参照して $\tan \theta = v_y/v_x$ 、一方、ダルシーの式(4)より $v_y/v_x = J_y/J_x$ ゆえ

$$J_y/J_x = \tan \theta$$

流れの方向 s の h の勾配を $J_s = -\partial h/\partial s$ とすると、図-3を参考にして

$$J_y = J_s \sin \theta \dots\dots\dots(6)$$

一方、

$$J_y = -\frac{\partial h}{\partial y} = 1 - I_p \dots\dots\dots(7)$$

ゆえ、(6)、(7)から

$$I_p = 1 - J_y = 1 - J_s \sin \theta \dots\dots\dots(8)$$

を得る。(8)式が示すことで注目したいのは、圧力水頭勾配 I_p と h の流れ方向の勾配 J_s との関係は、透水係数 k の大小によらず、各点の地下水流の傾き θ のみによって決まるということである。また、全く一様な平行流でないかぎり、一般には1本の鉛直線上で動水勾配 J_s の値は、深さ y によって異なるから、(8)式は圧力水頭勾配 I_p も深さ y によって異なることを示す一般式となっている。このような検討はあまりなされていなかったようである。

二次元流では、(8)式の J_s と θ は深さによって異なるから、 I_p も深さによって異なるが、土層の厚さが急変しないような斜面内の地下水流では、平面上の各地点の傾斜流は、それぞれの地下水面にほぼ平行とみなす近似は実際的に許される場合が多いであろう。この場合には、この地点の動水勾配 J_s は深さ方向にほぼ一定となり、自由地下水面の傾斜角を θ とすると、この水面上の動水勾配は $\sin \theta$ となることから $J_s = \sin \theta$ となる。したがって、圧力水頭勾配 I_p は(8)式から

$$I_p = 1 - \sin^2 \theta = \cos^2 \theta \dots\dots\dots(9)$$

となる。この関係式は、一様な平行流についてよく解説的に示されている式と一致しているが、異なるのは、斜面方向に θ は一定でない一般の二次元流の場合に拡張されている点である。

分割法で地すべり斜面の安定解析をする場合で、すべり面も不圧地下水帯内にある時、分割細片の底辺に働く地下水圧を求めるのに、(1)式ではなく、そ

注1) ダルシーの式(4)から、水平流であると $v_y = 0$ 、すなわち $\partial h/\partial y = 0$
 $\therefore h = p/\gamma_w - y = \text{const.}$ or $p/\gamma_w = y + \text{const.}$ (静水圧分布)。

れより良い近似として次のような方法で求めることを提案したい。

ボーリング孔内水位の観測値等から自由地下水面を仮定した時、各分割細片においては、その点の地下水面勾配にほぼ平行な流れで近似するものとして扱う。この場合には、各分割細片では深さ方向に $I_p = \text{一定}$ と近似できるから、(9)式から地下水面から深さ H の圧力は、(1)式の代わりに

$$p = \gamma_w H \cos^2 \theta \dots\dots\dots(10)$$

を適用する(もっと本格的には、有限要素解析などによる数値解から直接 p を求めた方がよい)。

(10)式の係数 $\cos^2 \theta$ を考慮した場合、計算結果にどの程度影響するかを次に確かめる。

$\cos^2 \theta$ の値は表-1 のようになる。 $\cos^2 \theta$ を考慮しない場合の水圧を p_0 とすると、考慮した場合の水圧 p との相対誤差は

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{|p - p_0|}{p_0} = \frac{|\gamma_w H - \gamma_w H \cos^2 \theta|}{\gamma_w H} = 1 - \cos^2 \theta \dots\dots\dots(11)$$

となる(表-1)。すなわち、 $\theta = 10^\circ$ でも $\Delta p/p = 3.0\%$ ゆえ、水深 H が 20m の場合では、

$$\Delta p / \gamma_w = 20\text{m} \times 0.03 = 0.60\text{m}, \theta = 15^\circ \text{ では } \Delta p / p = 6.7\% \text{ ゆえ, } \Delta p / \gamma_w = 20\text{m} \times 0.067 = 1.34\text{m}$$

となる。孔内水位を実測する場合、cm の単位まで実測しているのが通常であることを考えるとき、この程度の値は地下水圧を実測する時でも無視できない値であることは明らかである。

土のせん断強度 τ_f に、この水圧誤差と同程度の影響を与えるような強度定数 ϕ' の誤差の大きさについて次に確かめる。それには、 τ_f は

$$\tau_f = c' + (\sigma - p) \tan \phi'$$

で与えられるとすると、 $\Delta \tan \phi' / \tan \phi'$ の大きさを

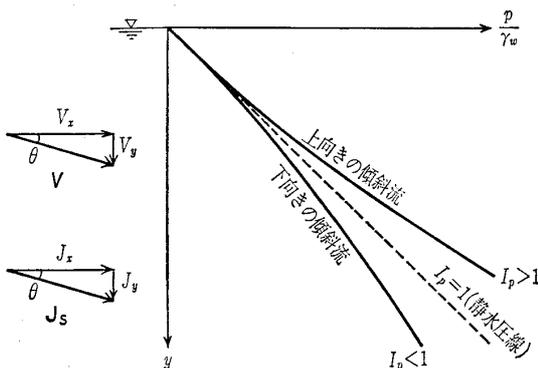


図-3 地下水圧の鉛直方向の勾配

表-1 傾斜角 θ による静水圧分布からの水圧のずれ

θ (度)	5	10	15	20	25
$\cos^2 \theta$	0.992	0.970	0.933	0.883	0.821
$\Delta p/p_0$ (%)	0.8	3.0	6.7	11.7	17.9

$\Delta p/p$ と比較すればよい。これによると、例えば、 $\theta = 15^\circ$ の時の圧力水頭の相対誤差は 6.7% となるから、これと同じ誤差を $\tan \phi'$ に与えるとすれば、 $\phi' = 10^\circ$ の時は $\phi' = 9.3^\circ$ に、 $\phi' = 15^\circ$ の時は 14.0° に低下することになる注2)。このことからわかるように、地すべり斜面の安定解析において、従来のように地下水圧の評価を簡単にして、残留強度等、土のせん断強度定数 c' 、 ϕ' のみを精度を上げて安全率を求めても、バランスを欠くことになる。すなわち、地下水圧を強度定数の評価とバランスよく求めるには、地下水面勾配が $10 \sim 15^\circ$ 以上になるならば、かなり大ざっぱな近似とはいえ、せめて地下水圧は(10)式によった方がよいと言える。

4.2 2層以上の帯水層がある場合

鉛直方向に 2~3 点の地下水圧を測定して、水圧の分布図が得られた時、その勾配が(8)または(9)式で見積られる値に比べて明らかに異なる場合には、その斜面の土層は鉛直方向に、少なくとも 2~3 層の透水性の異なる層構造をなすものとみなさなければならない。このような例として、松之山越地すべり地の頭部 BV 1 で観測された地下水圧分布を図-4 に示す。この例では、不圧帯水層とみなされる 10m 以浅の土層では、静水圧分布に近いが、すべり面以下の土層では、これとは相対的に不連続な地下水圧分布を示している。実際に、1986年8月の排水ボーリングの影響で、15m 深度の地下水圧は約 5.7m 低下したが、不圧地下水位はほとんど変わらない。このことから、深さ 10m と 15m の間に古い地すべりによってすべり面が形成され、これが難透水層となっていて、これを境にして上下の地下水が遮断された形になっていると解釈される。このような理解の上に立つと、地下水圧分布も図-4 のように、AB 線の直線で表されるのではなく、図-5 のように、薄い難

注 2) ϕ' を rad とすると、
 $\Delta \tan \phi' \approx (d \tan \phi' / d \phi') \Delta \phi' = \sec^2 \phi' \cdot \Delta \phi'$ ゆえ、 $\Delta \tan \phi' / \tan \phi' = r$ とおくと、
 $\Delta \phi' = \cos^2 \phi' \cdot \Delta \tan \phi' = r \cos^2 \phi' \cdot \tan \phi' = (r/2) \sin 2\phi'$ 。
 これより $r = 6.7\% = 0.067$ で $\phi' = 10^\circ$ の時は、 $\Delta \phi' = (0.067/2) \sin 2 \times 10^\circ = 0.0114 \text{ rad} = 0.66^\circ$ だけ低下し、同じく $\phi' = 15^\circ$ の時は、 $\Delta \phi' = 0.0168 \text{ rad} = 0.96^\circ$ だけ低下する。

透水性のすべり面粘土層で急激な水圧低下が生じ、A—A'—B'—Bのような水圧分布をなすものとみるべきであろう。このように、この地点の地下水圧分布は深さ約15mの所に透水性の低い難透水層（すべり面粘土層）が存在すると仮定してはじめて、図—5のような圧力分布になるものとして合理的に説明することができる。

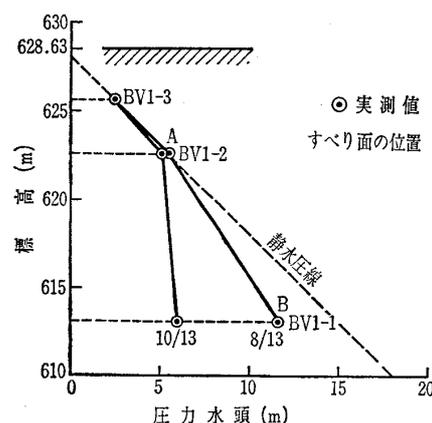
以上のように、2層以上の帯水層がある場合は、従来のように、すべり面の間隙水圧を自由地下水面からの深さ H から(1)式によって求めることは、もはや近似としても成り立たなくなる場合があることに注意すべきであろう。

5. 地下水圧分布を考慮した地すべり安定解析

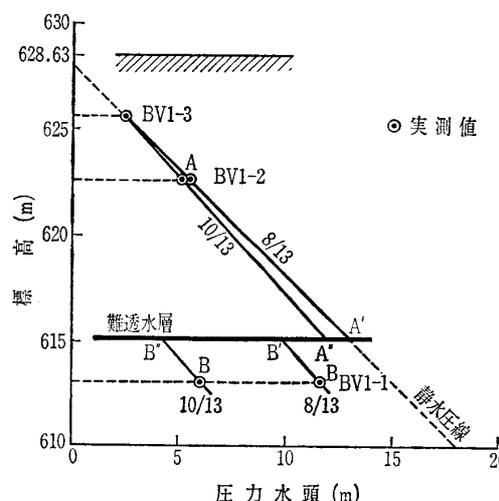
自由地下水面からのすべり面までの深さに相当する静水圧でもって、すべり面の間隙水圧とする従来の算定方法は、地すべり斜面下の地下水のような下向き傾斜流の場合には、安全側とはいえ無視できない誤差を生ずることは先にも指摘したが、これ以外に地すべり斜面が層構造をなす場合には、不圧帯水層以下の層では、静水圧分布から大きくずれてくる場合が多いと考えられる。次に、このような例として、松之山越地すべり地の観測例をあげて検討する。

まず図—5の10月13日の地下水圧分布は、排水ボーリングによって地すべり面の難透水層の下層が減圧状態になることによって形成されたものと考えられる。このような水利断面モデルに基づく地下水圧分布の想定が妥当なものとすると、排水ボーリングの施工後の安定解析には、このような地下水圧分布を考慮してすべり面の間隙水圧を求めるべきである。

松之山越地すべり地のBV1（頭部）、BV2（中腹部）、BV3（末端部）の3箇所の地下水圧観測データから、自由地下水面WL線と、深さが約13~15mのA—B線（一点鎖線）に沿った地下水頭線を描くと図—6の破線UL線ようになる。排水工施工前の図—6(a)では、中腹部では、地下水頭線は自由地下水位を上まわり、下層は被圧状態になっていることが示される。これに対し、排水工施工後の図—6(b)では、下層の水圧はかなり低下し、被圧部（UL線がWL線より高い部分）はBV2とBV3との間の部分にのみ現れるようになっている。



図—4 地下水圧の実測値（松之山越 BV1 地点，1986）



図—5 難透水層を考慮した地下水圧の鉛直分布（松之山越 BV1 地点，1986）

そこで、図—6の水平座標値で50mから120mの区間の、不圧帯水層より深い（難透水層より深い）位置にあるすべり面の間隙水圧は、下層土層中のA—B線に沿った地下水頭線ULから、それ以外は自由地下水位WL線からすべり面までの鉛直距離に等しいものと近似して（流れの平均傾斜角は5~6°であるので、(7)式によらず、それぞれの土層で静水圧勾配とみなすことに相当）求める。その分布図を従来の静水圧法（すべてWL線から求めることに相当）によるものと比較して示した（図—6(a)、(b)）。この間隙水圧分布を用いて安定解析を行った結果を表—2に示した。土の強度定数は仲野⁶⁾の実測により残留強度 $\phi'_r = 14.0^\circ$ 、 $c'_r = 0$ とした。水抜き前（図—6(a)）と水抜き後（図—6(b)）の安全率を比較すると、地下水頭線法（仮称）による水抜き後の安全率は約0.13大きくなり、水抜き工の効果をよく評価できる。これに対し、従来のすべり面の間隙水圧をすべて自由地下水位の深さのみか

表-2 安全率の比較

期日(条件)	静水圧法		地下水頭線法	
	簡便法	簡易 Janbu法	簡便法	簡易 Janbu法
8月13日 (水抜き前)	1.13	1.15	1.03	1.06
10月13日 (水抜き後)	1.13	1.15	1.17	1.19

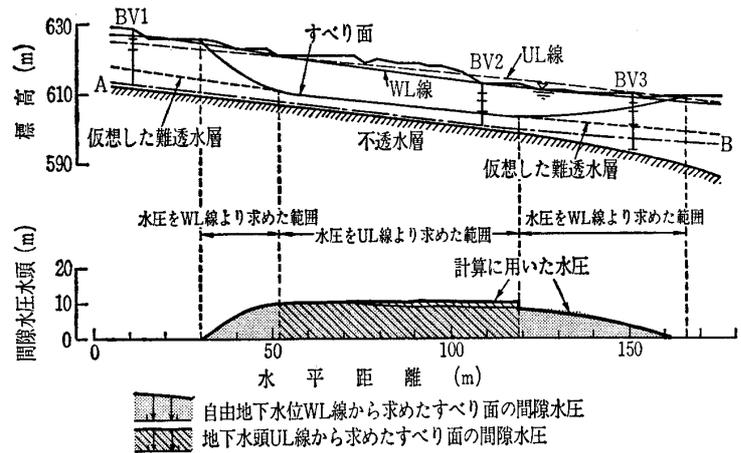
ら求める方法(静水圧法)では,この例では特に自由地下水位がほとんど変化しないから当然のことながら,水抜き工の前後での安全率はほとんど変わらず(0.001の増加にすぎない),したがって,減圧効果を正しく評価できないことがわかる。

6. おわりに

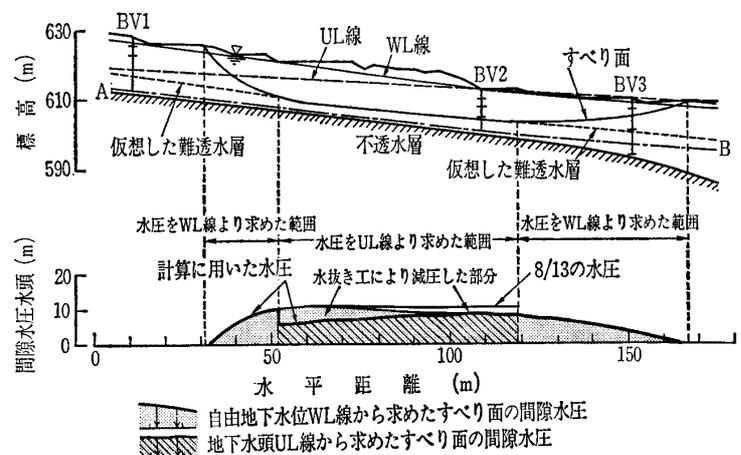
地すべり地のような現場で対象とする地下水の水圧は,計測上も計算上もかなり大きい断面の平均水圧であり,これを一般に地下水圧と呼ぶことにすると,安定解析にいう間隙水圧は,均質土層ではない多くの場合には,この地下水圧の意味を含んだものとみなす必要があることを指摘した。また,地下水流を二次元的に扱う場合は,地下水位を自由地下水位とピエゾメーター水位の両方を表す用語とすると混乱が生ずることを示し,したがって,地下水位は自由地下水位を表す用語として限定して用い,ピエゾメーター水位には地下水頭または全水頭をあてた方がよいことを示した。

傾斜した地下水流において,地すべり斜面の安定解析に必要なすべり面の間隙水圧を強度定数の精度とバランスよく求めるには,流れの傾斜が 15° 以上くらいからは鉛直方向の圧力分布を考慮すべきこと,またこれを流れの傾斜角から近似的に求める簡易法などを示した。

すべり面のすべてが不圧帯水層中にある場合には,当然のことながら,従来の地下水面からの深さのみからすべり面の間隙水圧をすべて求め,これを安定解析に用いることは,近似としても成り立たない場合が生ずることを松之山越の実測例から具体的に示し,すべり面の間隙水圧は,すべり面が位置しているそれぞれの帯水層の地下水圧から求めるべきことを示した。なお,本研究の一部は文部省科学研究費によった。



(a) 水抜き前(8月13日)の自由地下水位WL線



(b) 水抜き後(10月13日)の自由地下水位WL線

図-6 地下 \overline{AB} 線に沿った地下水頭UL線(上図)とすべり面の間隙水圧分布(下図)(松之山越, 1986)

参考文献

- 1) 吉田昭治・佐藤 修・中野俊郎・長崎 明・稲葉一成・中沢武司: 自動観測システムによる地すべり地の地下水観測と地下水挙動の特性について—松之山越地すべり地を例として—, 新潟大災害研年報, 9, pp. 99~114, 1987.
- 2) 稲葉一成・吉田昭治・佐藤 修: 東虫亀地すべり地の融雪期地下水の特性について, 新潟大災害研年報, 10, pp. 61~75, 1988.
- 3) Todd, D.K.: Ground Water Hydrology, John Wiley & Sons, p. 149, 1959.
- 4) 川上 浩: 地すべり調査に関する2, 3の問題, 地質学論集, 28, pp. 87~95, 1986.
- 5) 井村英樹・吉田昭治: 全長ストレーナ式ボーリング孔内の水位形成機構に関する研究, 農業土木学会講演要旨集, pp. 208~209, 1990.
- 6) 仲野良紀: 新第三紀層の力学的性質と地すべり・トンネル・ダム, 新潟大災害研創立10周年記念講演会論文集, pp. 49~68, 1988.

(原稿受理 1991.4.25)