

水頭変動からみた自然斜面内の地下水の流れ

川上 浩*・阿部廣史**・坂口一俊***

自然斜面のような不均質土の斜面では、地下水は斜面内の透水性の良い地層あるいは亀裂に沿って流下している。深度別の水頭を計測した結果によれば、水頭は浅いところでは高く、深いところでは低くなっている。これは近似的に斜面内のすべての深さにおいて間隙水圧がゼロであることを意味する。その後降雨により、透水層の中の水頭は上昇し、均質土中の流れに類似した流線網が形成される。この地下水の挙動は、計算機を用いたシミュレーション解析により、よく説明できる。

Keywords : piezometer head, natural slope, groundwater flow, pore water pressure, slope stability

1. ま え が き

地すべりが降雨期・融雪期に多発することは良く知られており、降雨と地すべりの因果関係、地下水位と地すべり移動量の関係を示す報告も数多く示されている。しかしながら、斜面の中を地下水はどのように流動しているのか、そのイメージについては明確には示されていない。最も単純な均質土の斜面内では、一定の自由地下水面が示され、この自由地下水面が上下するような地下水の流れが示されている。理想的な滞水層のある場合を除いて、実際の不均質土の斜面で、このような一定の自由地下水面が形成されているとは考えがたい。自然斜面内では、ある水みちを通して地下水が流れ、この水も時には枯れたり、流路をかえたりしている。ここでは多くの斜面で計測した深度別ピエゾメーター水頭をもとに、斜面内の地下水の流れを考察する。

2. 地下水水頭の計測方法

一般的な地下水調査法として、垂直なボーリング孔に多孔管を挿入してその孔内水位を計測することが普及している。しかし、一般に地盤内の地下水の水頭は深さごとに異なっており、これでは地下水の状況を把握出来ない。このことは岸本¹⁾、小川他²⁾によっても指摘されてきている。これまでこのような不合理な計測方法が普及してきたのは、装置が簡便であること、これでも近似的に水量の豊富な深さの水頭を指示し、大略地すべりの移動とも関連性を示すものがあつたからであろう。反面、地すべり移動とは関連のない計測結果も多かったはずである。

最も単純な斜面内の水の流れとして、均質土の斜面内に地表面に平行な自由地下水面が存在する場合を考える。すなわち、箱の中に砂を詰めて、箱を傾斜させ、箱の上端より水を供給する場合を考えればよい。この時には、図-1に説明するように、地表面に平行な流線とこれと直交する等ポテンシャル線をもつ流線網の流れが生ずる。図-1の流れの場合、地下水面下 h の深さの点では、 $h \cos^2 \beta$ の水頭をもつことを示している。この場合も深さによって水頭が変化している。

特殊な場合として、図-2に示すように、流線が水平で、等ポテンシャル線が垂直な場合にのみ垂直なボーリング孔内の水頭は等しくなり、孔内水位の計測結果は意味のあるものとなる。これはある特殊な状態でのみ生ずるものであり、一般的には深さごとに地下水の水頭は異なるものと考えねばならない。ここでは、ボーリング孔内の特定の深さの水頭を計測している。

3. 地附山地すべり地での深度別水頭の計測

実際の自然斜面ではどのような地下水の水頭が計測されているか、計測結果をみてみよう。前述のように、ボーリング孔に多孔管を挿入して孔内水位を計測したものは、地盤内の正確な水頭は計り得ない。ここでは、フィルターの設置深度が明確な計測結果のみを引用する。これらのボーリング孔は孔の先端部にフィルターを設け、その上部には無孔管をとりつけ、ボーリング孔と無孔管の間隙は粘土でシールして埋戻したものである。したがって、この管内の水位は管先端のフィルター深度の水頭を指示することになる。1985年7月26日大崩落を起こした長野市地附山地すべり地では、崩落後地すべり地の内外3か所においてそれぞれ3つの深さでの地盤内の水頭を計測している³⁾。その計測地点は、地すべり地東縁滑落崖直下 ($W-5 \sim 7$)、主要滑動土塊の東端部 ($W-8 \sim 10$) 及び地すべり地外 ($W-11 \sim 13$) の3か所で

* 正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科
(〒380 長野市若里 500)

** 正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科

*** 正会員 工修 長野県松本建設事務所

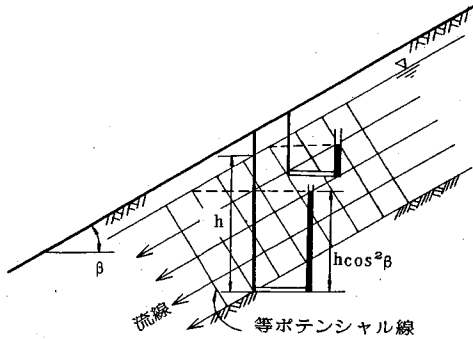


図-1 地表に平行な流れの流線網

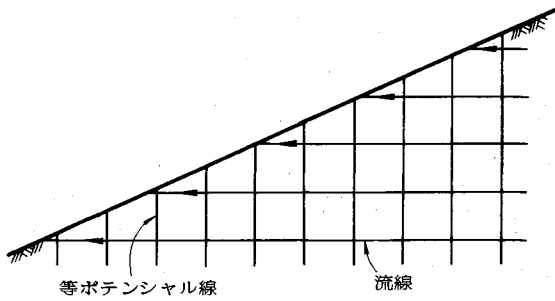


図-2 ボーリング孔内の水頭一定にみあう流線網

ある。それぞれの地点で深さの異なる3本のボーリングを行い、先端部約5mを多孔管とし、その上部はベントナイトでシールしている。その水頭計測結果を図-3~5に示している。図-3の浅いW-5では降雨の影響により、また季節により水頭変動を示している。また、中間深度のW-6では孔底より約8m高い水頭を保ち、ほぼ一定している。深い穴のW-7では、当初孔底より約2m高い水頭を保っていたが、その後孔内に水がなくなり計測を中止している。

地附山地すべりでは、泥岩礫交じり凝灰岩、または泥岩の部分にすべり面が生じている。ちなみに、W-8~10の観測孔地点は、地すべり発生前には、ボーリング孔内水位が降雨時に大きく変動した地点である。地すべり後の水頭計測では降雨による変動はみられない。ここでは、すべり面が現地表面下12mにあり、地すべりにより地表面は6m低下している。

図-3~5に示したように、地附山地すべり地では、地すべり後の浅層での地下水水頭は高く、深くなればなるほどその水頭は低くなっている。すなわち、地すべり後の水頭はその深度と同じかまたはいくらか高い水頭を示している。

4. 他の地域での深度別水頭の変化

姨捨地区の斜面での計測例⁴⁾を図-6に示す。この斜面は姨捨土石流堆積物が厚く堆積した所で礫まじり粘

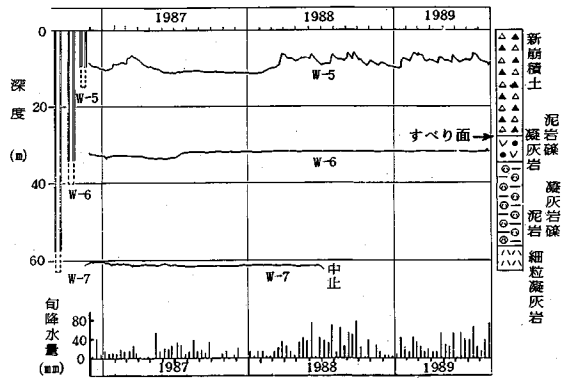


図-3 地附山深度別水頭その1

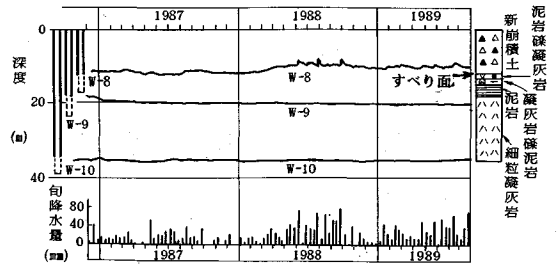


図-4 地附山深度別水頭その2

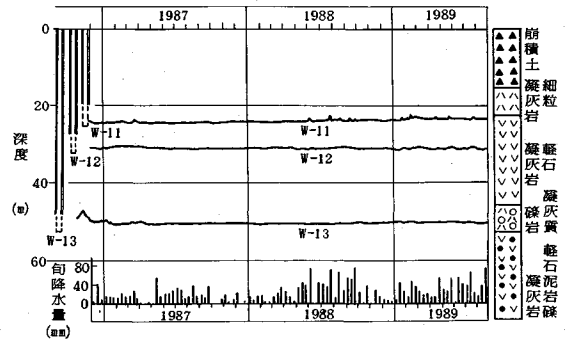


図-5 地附山深度別水頭その3

土・砂礫の互層により構成されている。1本のボーリング孔に3本の塩化ビニール管を挿入し、それぞれ5m, 18.5m, 35mの先端部にのみ多孔部を設けて、深度別水位計⁵⁾として設置したものである。浅層では地表面に近い水頭を示すが、深層での水頭は、浅層の水頭より大きく低下している。しかし、深さ35mでは孔底より約10mの水頭を保持している。そしていずれの孔の水頭も降雨の影響がみられず、ほぼ一定した水頭を保っている。

この付近での他の計測例をまとめると表-1の通りで、いずれも深度別水位計を設置したものである。「更級川左岸」及び「姨捨駅前」では、前述の通り、フィルターの設置深度が浅いと水頭は高く、深度が深くなると

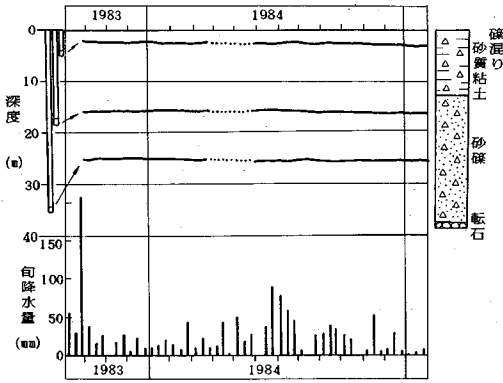


図-6 姨捨斜面内の深度別水頭 (道路公団⁴⁾)

表-1 姨捨地区の深度別水頭の観測結果 (道路公団⁴⁾)

位置	孔番号	設置深度 (m)	最高水位 (m)	最低水位 (m)	変動幅 (m)	降雨との関係
更級川左岸	B-2	7	2.57	2.94	0.37	無
		11	7.15	9.34	2.19	微弱
		19	15.39	16.19	0.80	微弱
姨捨駅前	B-5	6	2.36	2.48	0.12	無
		11	9.61	10.08	0.47	微弱
		16	14.37	14.66	0.29	無
姨捨入口	B-8	6	0.18	0.51	0.33	無
		12	3.14	3.44	0.30	無
		16	2.65	2.89	0.24	無
姨捨入口付近	55-10	20	4.51	9.30	4.79	一部有
		45	32.91	34.45	1.54	無

観測期間 1982年1月~1985年12月

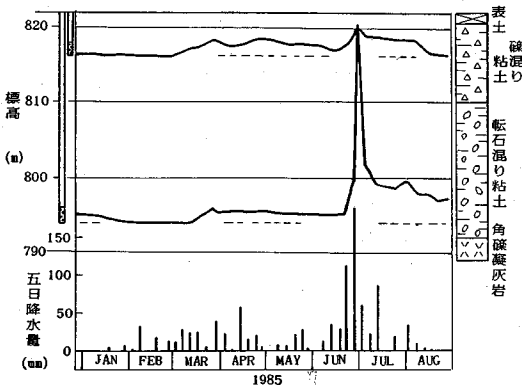


図-7 諏訪清陵斜面 No. 6 孔の水頭変動

水頭も低くなる傾向にある。しかし、「姨捨入口」ではすべての深さにおいて水頭が高く、地下水が豊富であるといえる。また、深さ12mと16mで水頭が逆転しており、ある特定の深さで被圧しているといえる。「姨捨入口付近」では、浅深いずれも孔底より10m余の水頭を有しているが、浅いものでは降雨時に水頭はさらに上昇している。

次に、諏訪清陵高校裏山の斜面での計測結果を示す。

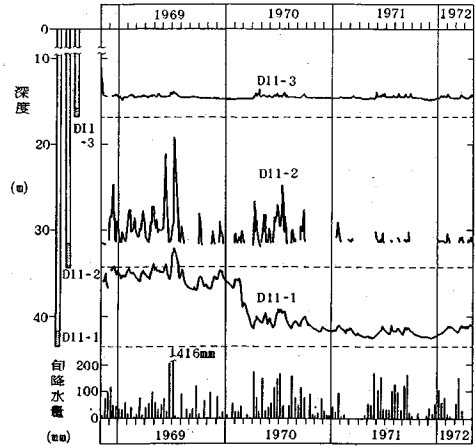


図-8 鷲尾岳地すべり地での深度別水頭 (岸本⁵⁾)

この斜面では、基盤岩は凝灰岩よりなり、この上に安山岩の角礫を含む古い崖堆積物(礫まじり粘性土)が30m余も厚く堆積している。ここに1mはなして浅深2本の孔をあけ、孔底から2mのみを多孔管としている。測定の結果を図-7に示す。この斜面では、フィルターの設置深度より5~10m高い水頭がみられ、いずれも降雨時には水頭が上昇している。特に、6月末の降雨時に深層の地下水頭が浅層のそれに一致するまで急上昇している。一般に、このように深層の地下水頭が降雨時に急上昇することは、すべり面が深い位置に想定される場合、斜面の安定性の上からは好ましいことではなく、降雨のたびに水頭が上昇する斜面は崩壊の危険性の高い斜面と考えられる。

また、岸本⁶⁾が鷲尾岳地すべり地で計測した結果の一部を引用すると、図-8に示す通りである。深さ16m, 32m, 42mにフィルターをもつ深度別水位計は浅いものは高い水頭を示し、深いものは低い水頭を示している。ここでは浅いものは降雨の影響がみられず一定の水頭を示しているが、深いものは降雨の影響により水頭変動を示している。沢地形のところに設置された水位計のため、深層のもののみが降雨の影響をうけているかと推察している。

5. 斜面内の地下水の流れ

前節に示した斜面内の地下水の水頭分布から、斜面内の水の流れを考える。

地附山での計測例でみられるように、水頭計測地点で水頭が殆ど存在しない状態を想定すると、それは全深さにわたって間隙水圧0の状態を想定することになる。その流れ図は、図-9に示すように、ポテンシャル線が水平であり、流線が垂直下向を示すものとなる。これは降雨浸透水はすべて鉛直下向きに浸透することを意味する。

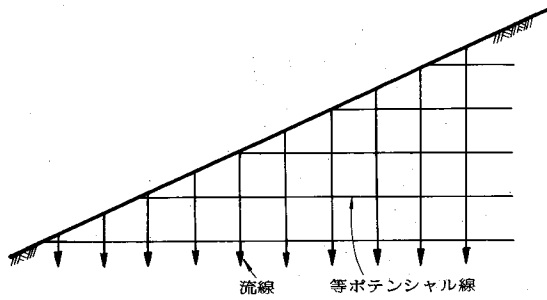


図-9 斜面内の水頭ゼロの流線網

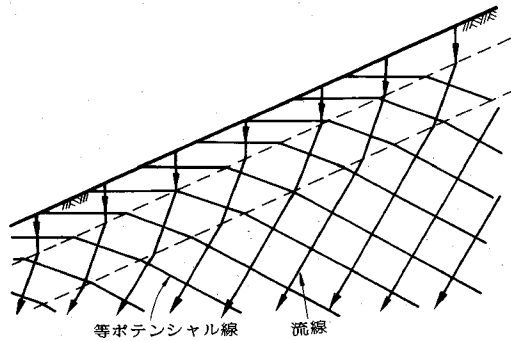


図-10 深層の水頭上昇時の流線網

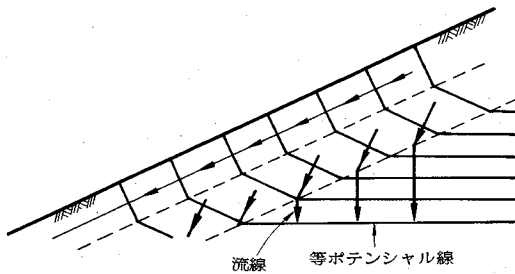


図-11 浅層の水頭上昇時の流線網

また、姨捨斜面での計測結果のように、浅層では水頭0の状態を保ち、深層では孔底より水頭がいくらか存在するような場合には、図-10に示すような流線網となる。図-9に比し、斜面の深い所の等ポテンシャル線が多少傾斜した流れとなることを意味している。

次に、諏訪清陵の図-7の場合について考える。降雨がない時、浅層・深層ともにそれぞれの孔底の高さの水頭をもつ状態は、図-9の流線網の状態にある。しかし、降雨により浅層・深層ともに水頭が上昇し、両者が一致する程に上昇した場合には、斜面内の流線網は図-1ないし図-2の状態に変化していると考えうる。

斜面の安定を考える上には、すべり面の間隙水圧が上昇した場合が危険であり、図-1～図-2の状態は危険なものとなる。

逆に浅層の水頭が先に上昇し、深層の水頭は変化しな

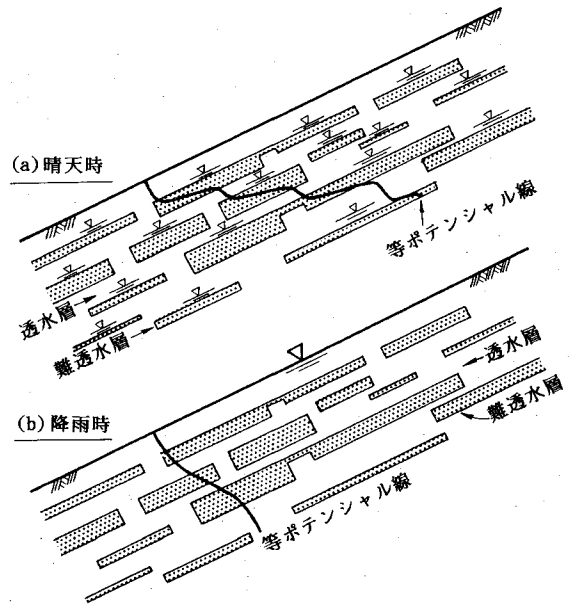


図-12 自然斜面の地下水の流れの模式図

い場合には、図-9の状態から、図-11の状態にかわることが推測される。この場合は、浅い層でのすべりが発生しやすくなる。風化した砂質土斜面での薄層すべりは、このような状態によるものと考えうる。

晴天時から降雨時に水頭が変化する状態は、図-9の状態から図-10または図-11の状態を経て、図-1または図-2に類似の状態に変化することを意味している。等ポテンシャル線が水平から段々に立ち上がり、図-2の垂直の状態あるいはもっと被圧した状態まで変化していくと考えうる。

6. 斜面浸透の数値実験

これまでは均質土の斜面について考えてきたが、実際の斜面は均質な土ではなく、不均質なものと考えられる。斜面の表層部は、崩積土から構成されることが多いので、地表面に平行に透水性の異なる地層が何枚も存在し、その厚さも長さも不規則に分布するものと考えうる。さらに、そこに水が浸透してくる状況も境界条件、気象条件により複雑なものとなる。しかし、斜面は透水性の悪いものの中に透水性の良いものがレンズ状に、あるいは管路状に挟まれていて、その中を水が流れていると考えられる。そこで、図-12に示すような模式図が考えられる。晴天時には、浸透水は難透水層の上を薄層で流れている。この時斜面内はすべての点で水頭が0の状態にある。降雨時には薄層の流れの深さが増大し、最終的には見掛け上1つの地層内のような流れが生じ、斜面内の水頭は上昇すると推察される。かかる模式的斜面の水頭が浸透水の状況に応じてどのように変動するものか数値

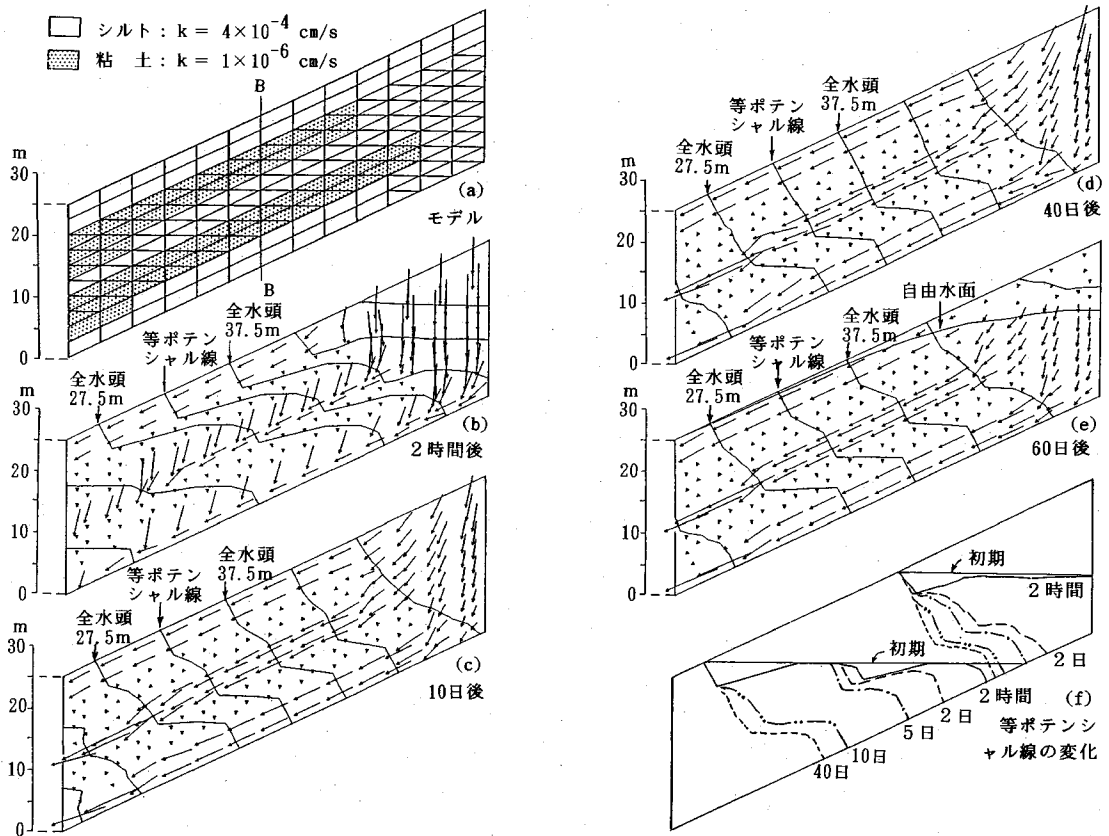


図-13 斜面内雨水浸透の数値実験

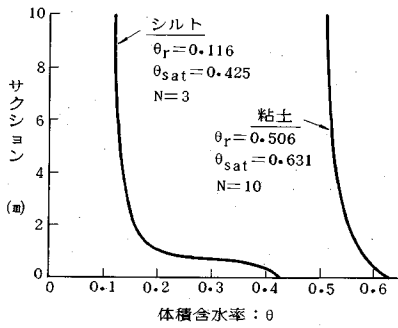


図-14 地盤材料の保水特性

実験によって確かめたい。

図-13 (a) に示すように、傾斜 27° の斜面が 2 種の透水性材料より構成されているものとする。初期状態は斜面内すべての点で水頭が 0 という図-9 の状態を設定する。計算は西垣・竹下が開発した飽和・不飽和浸透流プログラム PC-UNSAF を使用した。計算に必要な地盤材料の保水特性は図-14 に示すとおりとする。図中、 θ_r は最小含水量で、ここではサクシオン 10 m 時の体積含水率である。 θ_{sat} は飽和体積含水率、 N は飽和体積含水率と不飽和透水係数の関係を推定する Hillel 式の常数である。シルト及び粘土の飽和透水係数は、シルトの

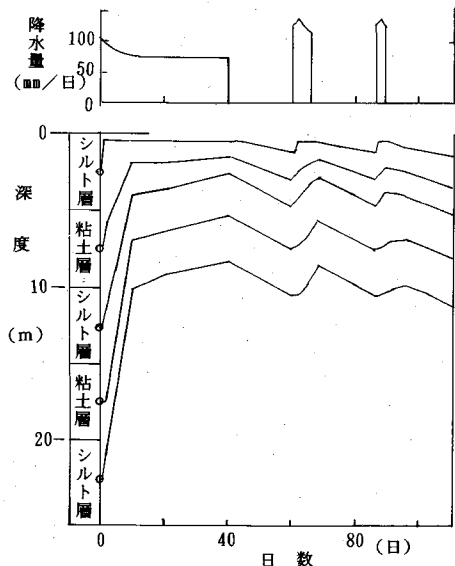


図-15 斜面中央部 B-B の水頭変化

$k=4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、粘土の $k=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を用いている。シルトについては砂に近い特性を設定しており、粘土については、高含水比粘土として地附山地すべり粘土の試験結果を用いている。

連続して雨を降らせた場合、斜面内にどのように雨が浸透し、地下水の流れに変化が生ずるかを図—13 (b), (c), (d) に示している。雨水は地表より浸透するかぎり浸透させるものとする。降雨開始後、まず表層の透水層の中で水頭が上昇する。これが (b) 図の状態である。さらに時間が経過すると、(c) 図のごとく深層の粘土層の水頭も上昇し、等ポテンシャル線は立ち上がってくる。そして40日間の降雨で (d) 図の状態に達している。

この間の斜面内の水頭の変化をわかりやすくするために、(f) 図に40日間の等ポテンシャル線の変化をまとめて示している。全水頭27.5m及び37.5mの等ポテンシャルのみを示している。時間の経過により等ポテンシャル線が立ち上がる状況がわかる。このことは斜面内の深いところで水頭が上昇することを示している。

(d) 図の状態で降雨を止め、その後20日間は晴天であったとすると、斜面内の水頭は (e) 図のようになり、これまでとは逆に斜面内の水頭は低下しはじめる。(e) 図では深層での水頭がより大きく低下している。

このような降雨・晴天・降雨の繰り返しの中で、斜面中央部の地盤内で間隙水圧がどう変化したかを図—15に示している。図—15の上部に示した雨量が浸透した場合、最初の長期の雨で斜面内の水頭は上昇し、雨が止めば水頭は減少し、降雨によりまた上昇する。

斜面内の水頭の変動は、モデルの設定・地盤材料の性質により大きく影響されようが、ここに示した例によりその1つの変動パターンを示し得たと考える。

7. 結 論

実際の斜面の中の地下水の流れは自由地下水面をもつ均質土の中の流れのように単純なものではない。網目状

に透水性の異なる地層が交錯し、大小様々な水みちや透水層が存在するものと考えたい。平常の斜面内では、水頭0の状態が安定的状態として存在し、降雨時に水頭が上昇するものと考えうる。不均質土の斜面における水頭上昇の状況は、まず表層部の透水層で水頭が上昇し、その後深部の透水層、そして難透水層と続き、斜面全体の水頭が上昇することになる。

このように不均質な斜面内の地下水の流れを把握するには、従来のボーリング孔に多孔管を挿入して測定する方法では無理がある。地下水の状況を正確に把握するには、深さごとに水頭を計るよう、多数の深度別水位計または間隙水圧計を設置して観測することが大切である。最後に、多くの測定記録を提供下された長野県および道路公団、ならびに飽和・不飽和浸透の計算プログラムを提供下された岡山大学西垣先生に感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 岸本良次郎：地すべり地における地下水・地表水（第三報）——深さ別の地下水位・水圧変動現象の研究，地すべり，3-3，pp. 21~39，1967.
- 2) 小川正二他：融雪期における地すべり地の間隙水圧・地下水位・地温の変動特性，地すべり，23-3，pp. 21~27，1986.
- 3) 長野県：地附山地すべり機構解析報告書，1989年5月.
- 4) 高速道路技術センター：明科～更埴間地すべり検討委員会報告書，1985年3月.
- 5) 岸本良次郎：地下水観測施設の一例，農業土木学会誌，36-10，pp. 663~668，1969.
- 6) 岸本良次郎：鷲尾岳地すべり地における地下水の浸透機構に関する研究，防災科学技術総合研究報告，No. 22 & 32，1970 & 1974.

(1991. 3. 18 受付)

GROUNDWATER FLOWS IN NATURAL SLOPES OBTAINED FROM PIEZOMETER HEAD MEASUREMENTS

Hiroshi KAWAKAMI, Hirofumi ABE and Kazutoshi SAKAGUCHI

In homogeneous soil slopes, underground water flows down, forming a definite free water table. However, due to the many kinds of permeable layers in natural slopes, groundwater must flow through either the permeable layers or cracks in the ground. According to the results of piezometric measurements of waterheads in natural slopes, the waterheads are high in shallow places and low in deep places. This means that porewater pressures are nearly zero in all depths of stable slopes. During rainfalls, waterheads gradually rise in the permeable layers and a flownet of deep streams is formed such as those in slopes of homogeneous soil.

Behavior of groundwater during rainfalls can be explained through numerical simulation analyses using a computer.