

1. まえがき 斜面安定問題においては、地下水（あるいは間隙水圧）の挙動が解析結果に大きな影響を与えることは良く知られており、地すべりでは、地下水位と移動量の関係、降雨との因果関係などを示す報告が多数示されている。また、ボーリング孔に多孔管を挿入し、その孔内水位を計測する地下水位調査法が一般的によく普及しているが、一般に、斜面内の地下水位は、ボーリング孔の深さを変えると、異なった水位を示し、地下水の状況を正確に把握できていないのが現状でもある。このことは、岸本<sup>1)</sup>、小川ら<sup>2)</sup>によっても指摘されている。

一方、原位置におけるサクシオンを測定した場合、植生のない裸地などにおいては、比較的大きなサクシオンを示し、地表では、縦横に乾燥クラックの入る様子が観察できる。しかしながら、植生がある場合には、地表面下30cm程度までは、比較的大きなサクシオンを示すこともあるが、深くなるにしたがいごくわずかなサクシオンを示すのみであり、変動も少ないのが一般的な挙動である。このような挙動は、我国のような湿潤地帯では、めずらしいものではない。しかしながら、このわずかなサクシオン（あるいはわずかな正の間隙水圧）は、測定深度を変えても、同様な状況が観察される。深度を変えた、地下水位観察およびサクシオン測定で示される以上のような挙動は、地下水のどのような現象をとらえているかについて考えたい。

最も単純な均質土の斜面では、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一般には示されている。しかしながら、理想的な滞水層のある場合を除くと、実際の斜面では、このような一定の自由地下水面が形成されているのは希であると考えている。

ここでは、原位置サクシオンの測定結果および深度別ピエゾメータ水頭の計測例をもとに、斜面内における地下水の流れについて考察する。

2. 斜面内の地下水の流れと水頭の測定 最も単純な斜面内の水の流れとして、均質な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。この時には、図-1に示すように、地表面に平行な流線網とこれに直交する等ポテンシャル線を持つ流線網の流れが生ずる。この場合、地下水面下 $h$ の深さの位置では、 $h \cos^2 \beta \gamma_w$ なる水頭を持つことを示し、ここでも、深さが変わると水頭も変化してくる。また、このような

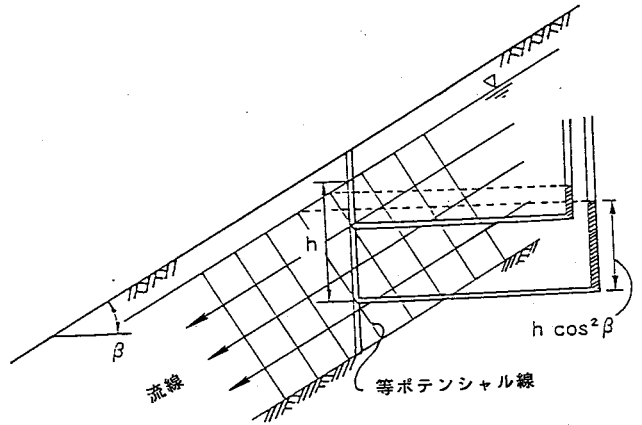


図-1 地表に平行な流れの流線網

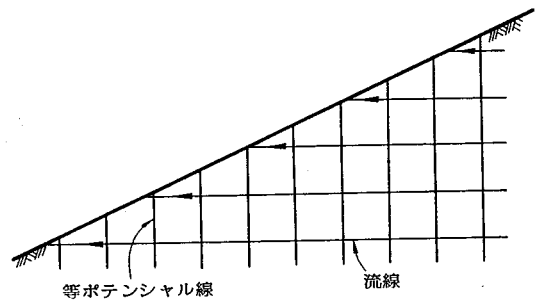


図-2 深度にかかわらず水頭一定となる流線網

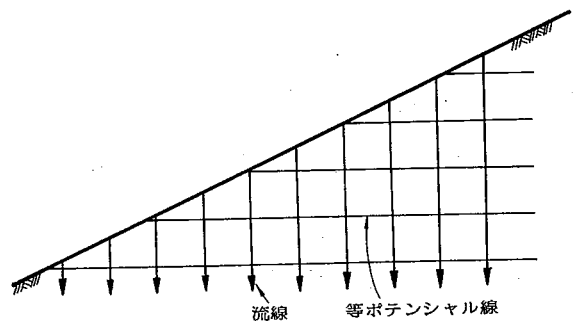


図-3 斜面内各深度で水頭零となる流線網

地下水の流れが生ずることは、後述するように一般的状態とは言い難い。ボーリング孔内の水頭が深さにかかわらず等しくなるには、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のみである。この場合、多孔管を挿入した孔内水位の計測は意味のあるものとなるが、これはある特殊な状態でのみ生ずるものである。

地下水の水頭計測地点で、各深度において水頭がほとんど存在しない状態を考えると、それは全深さにわたり間隙水圧が零の状態を想定することになる。このとき流線網は、図-3で示すように、ポテンシャル線が水平で、流線が鉛直下向きに浸透していくことを意味している。

ここまでで示した3例は、どちらかと言うとかなり極端な例であると言えるが、このような地下水の流れが、斜面の状況に応じて組合わされた形で存在すると言える。以下では、2つの組合わせ例について考える。

浅層ではほぼ水頭零の状態を保ち、深層では、孔底よりいくらか高い位置に水頭が存在する場合、図-4に示すような流線網が得られる。図-3と比較すると、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。降雨により深層の水頭がさらに上昇すると、斜面内の深部の流線網は、図-1ないし図-2の状態まで変化することが考えられる。斜面の安定性を考える時、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の状態になることが最も危険なものとなる。

逆に、浅層の水頭が先に上昇し、深層の水頭は変わらない場合には、図-3の状態から図-5の状態へと変化することが推測される。この場合には、浅い層でのすべりが発生しやすくなり、風化した砂質土斜面での薄層のすべりは、この様な状況によるものと考えられる。

晴天時から降雨時に水頭が変化し、斜面崩壊が生ずるような状態は、図-3の状態から図-4あるいは図-5の状態を経過し、図-1または図-2に近い状態まで変化していくことを意味している。等ポテンシャル線は水平から徐々に立ち上がり、図-2のような垂直な状態まで変化し、さらに被圧した状態まで変わっていくことも考えられる。一般的な地下水位調査法としては、前述のように垂直なボーリング孔に多孔管を挿入し、その孔内水位を計測することが普及している。しかしながら、一般に地盤内の地下水の水頭は深度ごとに異なっておりこれでは地下水の状況を把握できない。これまで、このような不合理な計測手法が普及してきたのは、設置が簡便であり、これでも近似的に水量の豊富な深さの水頭を示し、地すべりの移動との関連性が認められるものもあったためと思われる。反面、地すべり移動とは関連のない計測結果も多くあったはずであるが、このようなデータは公表されないので実態は把握しづらい面もある。

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性質のものであり、どの深さの水頭を計測しているかが問題である。なお、ここでは地下水の水頭に着目して、話を進めたが、水頭を間隙水圧（あるいはサクション）に置き換えても、同じことが言える。間隙水圧の測定は、地下水の運動を規定する圧力ポテンシャルが直接計測でき、工夫すれば、不飽和状態、飽和状態のいずれもが計測できることを考えると、水頭測定にかわって、普及すべきである。圧力センサーの進歩、自動観測システムの発達により、自動記録が容易になってきたことを考え合わせると、安定解析に対する情報のみならず、地下水の流れを把握する有力な手段として間隙水圧測定が取り上げられなくてはならない。

なお、ここで取上げる、フィルターの設置深度が明確な場合のボーリング孔は、孔の先端部（あるいは途中）にフィルターを設け、その上部（あるいは上・下部）には無孔管をとりつけている。ボーリング孔と無

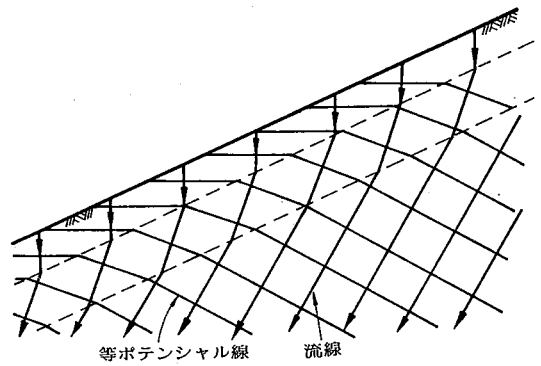


図-4 深層の水頭上昇時の流線網

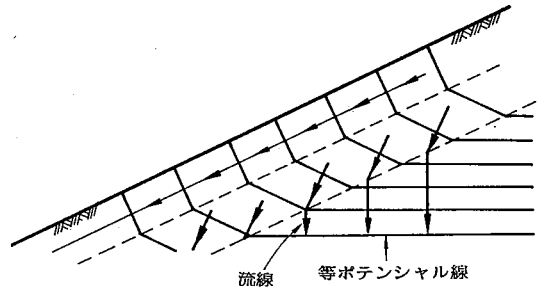


図-5 浅層の水頭上昇時の流線網

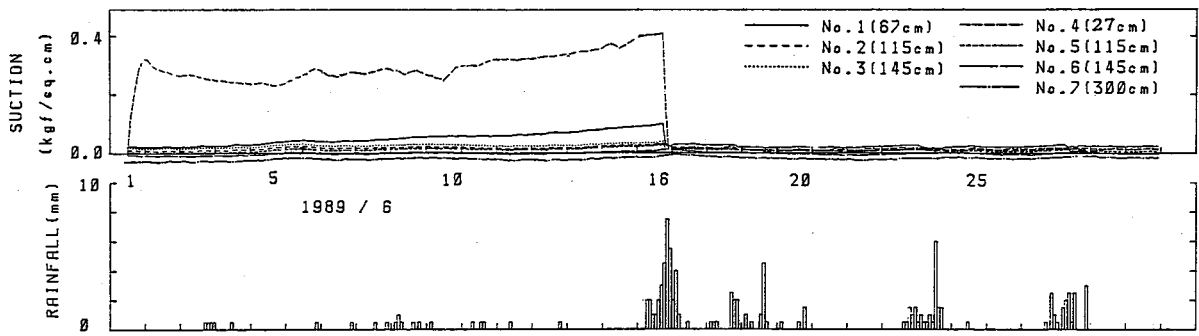


図-7 地附山での深度別サクシジョンの変動例

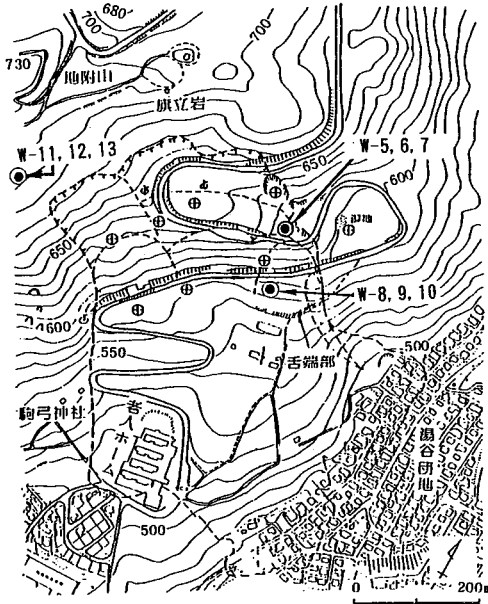


図-6 地附山地すべり地平面図

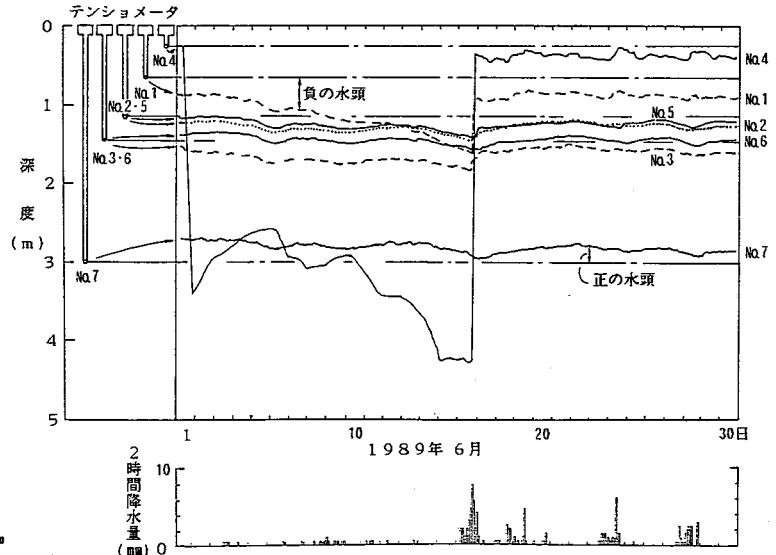


図-8 地附山でのサクシジョン計測から得られた水頭の変化

孔管の隙間は粘土等でシールし、埋め戻したものである。したがって、この管内で示される水位は、フィルター部分の深度の水頭を指示していることになる。

### 3. 深度別サクシジョン・水頭の計測

#### 3.1 地附山地すべり地での計測

1985年7月26日に大崩落を起こした長野市地附山地すべり地では、崩落後、地すべり地内でサクシジョン測定、内外の3か所で地盤内の水頭を計測している<sup>3)</sup>。その計測地点は、図-6に示すように、水頭計測が東縁滑落崖直下(W-5~7)、主要滑動土塊の東端部(W-8~10)及び地すべり地外(W-11~13)の3地点である。サクシジョン測定は、W-5~7の近傍で実施している。

まず、テンシオメータを用いたサクシジョン測定結果を見ると、図-7に示したように、浅い深度では、降雨が少ないと0.4kgf/cm<sup>2</sup>程度のサクシジョンを示すが、1m以下ではまったく変動せず、線の区別が出来ないほどである。やがてまとまった降雨が続くと、浅い部分のサクシジョンも解放される。この計測状況を各深度における水頭として示すと、図-8が得られる。ここでは、計測点からサクシジョン分を負の水頭として差し引くことにより表示しているが、これらの線は各々ポテンシャルが負から正へと変わる境界であり、自由水面を示しているとも言える。しかしながら、降雨の多い時期では、各々の計測点付近に多数の自由水面が存在することになる。また、降雨の少ない時期では、水面の位置関係が逆転した状況すら示している。

水頭を計測している3地点では、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、その上部は無孔管を入れベントナイトでシールしている。その計測結果を図-9~11に示している。サクシジョン測定と同じ位置である図-9では、W-5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。W-6は、孔底より約8m高い水頭を保ち、ほぼ一定している。また、W-7では、孔底より約2m高い水頭を保持している。図-10,11では、浅い観測孔では降雨によりわずかな変動を示すが、深い孔

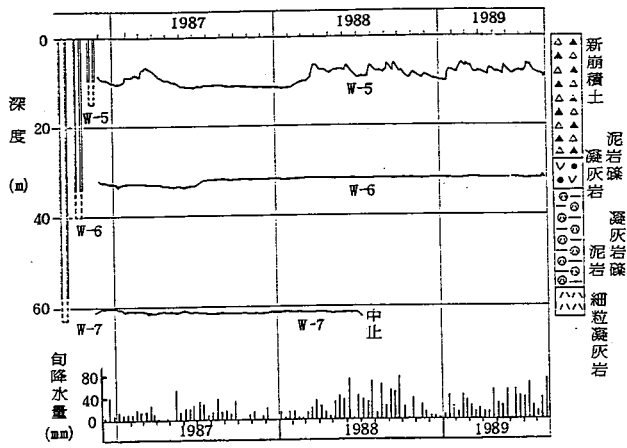


図-9 地附山での深度別水頭変化(その1)

では孔底に近い水頭を示したまま変動はほとんど見られない。図-9~11を見ると、浅層での地下水の水頭は孔底よりやや高く降雨による変動も多少受けるが、深くなるほどその水頭は低くなっていくと言え。すなわち、通常の安定した斜面では、斜面内の水頭は、その深度と同じかまたはその深度よりいくらか高い水頭を示すものと考えられ、図-3の流線をやや傾けた流れが想定できる。

### 3.2 阿南町地すべり地での計測

長野県の南端に近い阿南町で、1989年9月3日に崩壊土量約8万 $m^3$ の地すべりが発生した。滑落崖には明瞭な断層が観察される。崩落部の横には、不安定な土塊が残存しており、この土塊の内外で水頭を計測している。計測地点は、図-12に示すように、残存土塊外(B-3,8)、土塊内(B-9,4)である。

図-13では、隣接するB-3(多孔管を挿入した水頭計測)とB-8(深度別水頭計測)を合わせて示している。ここで、B-8-3及びB-8-1の一部を×印で示すのは、水頭が検出されなかったことを示す。これは、この部分で不飽和状態と考えるよりは、わずかに負の水頭を示していると考えられるべきであろう。水頭測定に限界が示されているとも言える。深度別水頭を見ると、B-8-2で約3mの水頭が測定される程度であり、上層部ではほぼ下向きの流れが考えられる。一方最も深いB-8-4では約8mの水頭が存在し、図-4で示すような流線網が想定できる状況にある。残存土塊の後背部でもあり、今後の動向が注目される。一方、多孔管を挿入しているB-3は、水頭の高い時期にB-8-4とほぼ一致しており、この深度付近の地下水の供給が最も豊富であることをうかがわせている。またB-3は、深度別水頭計測に比べ、水頭変動が顕著にあらわれている。これは多孔管を挿入しているため、各地層における地下水変動の総和としての影響が表示されるためである。4月に入り、水頭の低下傾向を示すが、対策工の効果かあるいは季節変動であるかは、今後の経過を見なければ判断できない。

残存土塊上部で水頭観測中のB-4及びB-9の水頭変動は、図-14に示す。深度別水頭を計測しているB-9では、標高600m付近に断層が確認されており、これが、止水層の役割を果たしていると思われる。すなわち、断層上

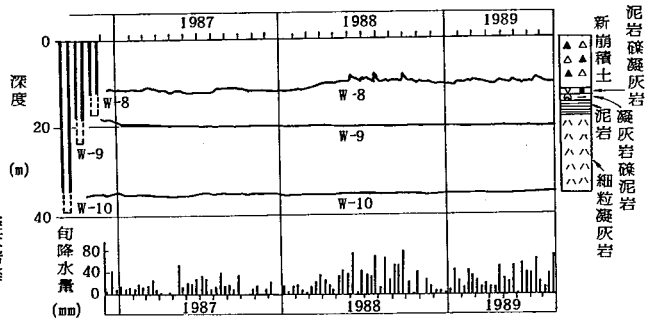


図-10 地附山での深度別水頭変化(その2)

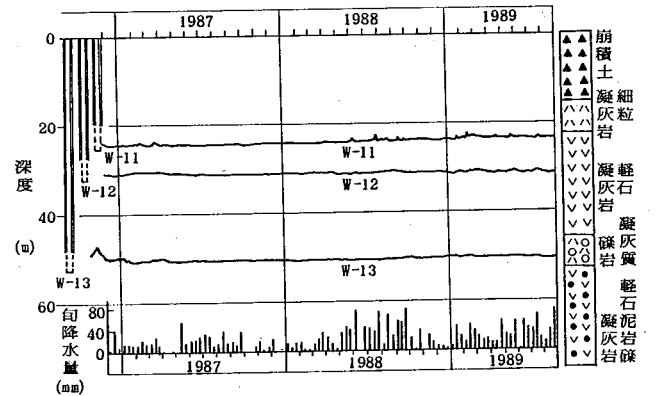


図-11 地附山での深度別水頭変化(その3)

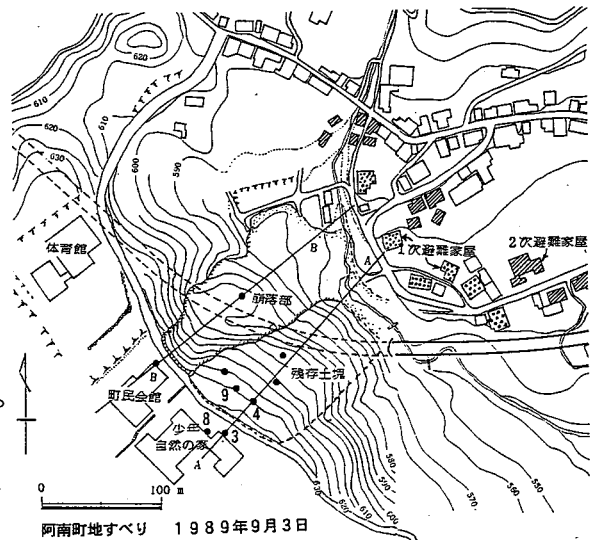


図-12 阿南町地すべり地平面図

部にある B-9-2では、5～6 mの水頭を示すのに対し、上部の B-9-3では、ほぼ測定深度に近いわずかな水頭を示すのみである。全長にわたり多孔管を挿入している B-4では降雨に対応して、顕著な変動を示す。降雨後の挙動が B-9-1とほぼ一致することから、この付近に水量の豊富な地下水が存在することをうかがわせる。図-13と同様に、

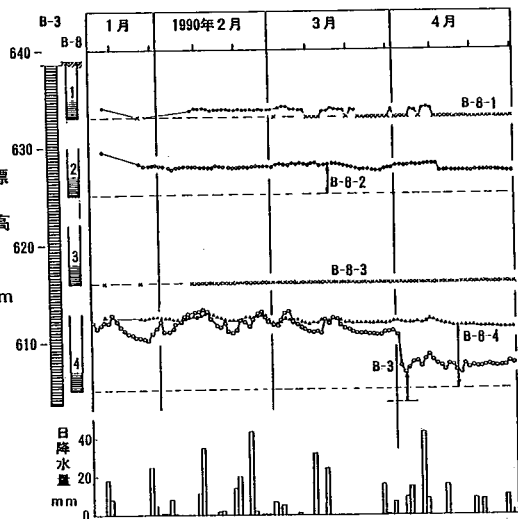


図-13 阿南町地すべり地残存土塊外での水頭の変化

B-9-4で約8 mの水頭を示しており、想定すべり面より約20m深い位置ではあるが要注意である。また B-4及び B-9-4が4月中旬から、これまでとは異なった傾向を示しており今後の経過が注目される。

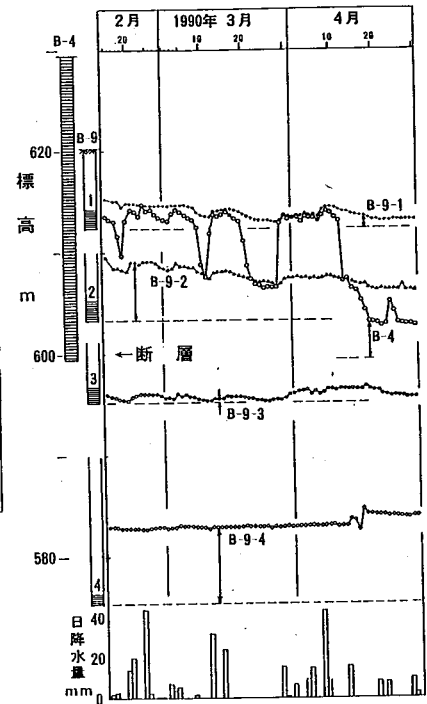


図-14 阿南町地すべり地残存土塊内での水頭の変化

### 3.3 姨捨地区斜面での計測

この地区の斜面は、土石流堆積物が厚く堆積したところである。水頭の計測は、1本のボーリング孔

に3本塩ビ管を挿入し、それぞれ5 m, 18.5 m, 35 mの先端部にのみ多孔管を設ける岸本式深度別水位計を用いている。この地区での計測結果を図-15に示す。上部の2点では、測定深度より2 m程度高い水頭を示すのに対し、深さ35 mでは、約10 mの水頭を保っている。そして、いずれの深度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のが特徴である。

この地区での他の計測例をまとめると表-1となり、いずれも岸本式深度別水位計を設置している。「更級川左岸」及び「姨捨駅前」では前述の通り、測定深度よりいくらか高い水頭を示す傾向にある。一方、「姨捨入口」ではすべての深さにおいてかなり高い水頭を示し、地下

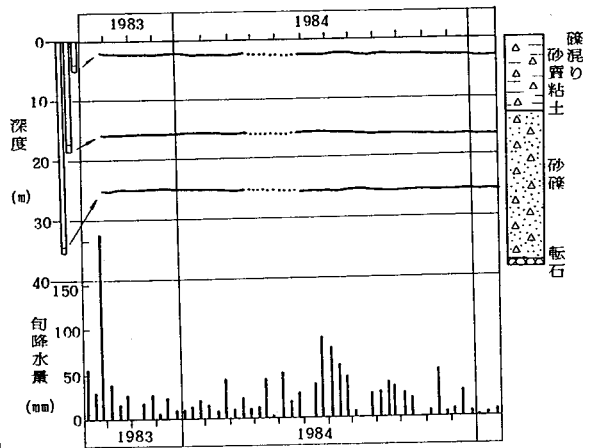


図-15 姨捨斜面内の深度別水頭の変化

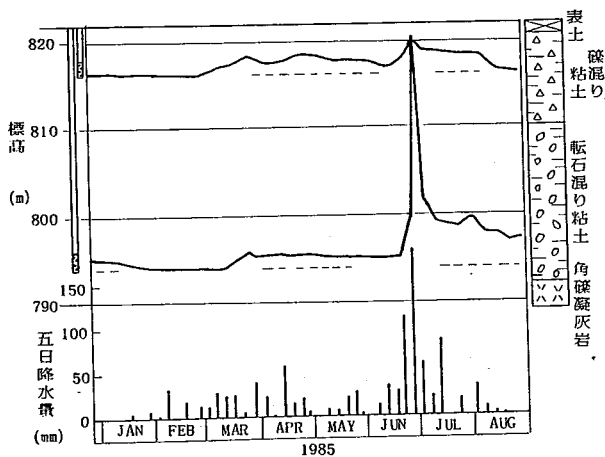


図-16 諏訪清陵斜面 No. 6孔の水頭変化

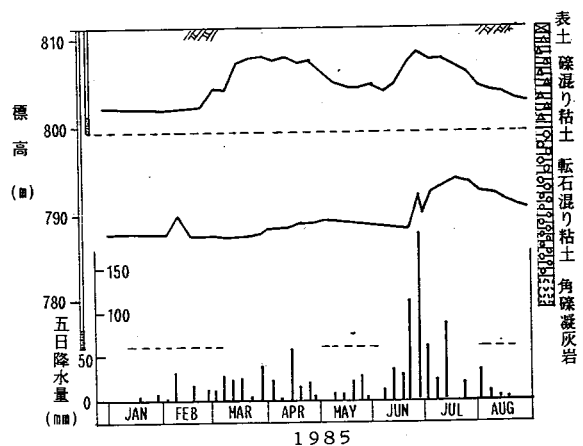


図-17 諏訪清陵斜面 No. 7孔の水頭変化

水が豊富であるといえる。また、深さ12mと16mでは水頭が逆転しており、ある特定の深さで被圧していると考えられる。「姨捨入口付近」ではいずれも孔底より10m余りの水頭を有することが特徴であるが、浅いものは降雨時にさらに水頭が上昇している。

**3. 4 他の地域での計測** 諏訪市、諏訪清陵高校裏山斜面での計測例を示す。この斜面では、古い崖錘堆積物（礫まじり粘土）が30m余りも堆積しているが、ここに約1m離して、浅深2本の孔をあけ、孔底から2mのみを多孔管として水頭変化を計測している。測定結果を図-16,17に示す。この斜面では、相対的に水頭変動が大きくいずれも降雨時に水頭が上昇している。特に図-16では、降雨時に深層の水頭が浅層のそれに一致するまで急上昇し、図-2を想定できるほどである。一般に、このように深層の水頭が降雨時に急上昇する斜面は、安定性を考える上からは好ましいことではなく、このような斜面は崩壊の危険性の高い斜面と考えられる。岸本<sup>5)</sup>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-18に示す通りである。前述の岸本式深度別水位計を用いた計測であり、1969年には中間及び深層で著しい水頭変動を示し、深層では測定深度より10m高い水頭を示している。1971年で見ると、変動も少なくなり、いずれも測定深度から2~3mの水頭を示す程度で安定した状態に近づいていることがうかがえる。ここでは浅いものは降雨の影響もほとんど受けず一定水頭を示している。沢地形のところに設置されたため、深層のみが降雨の影響を受けているかと推察している。

小川ら<sup>6)</sup>による長岡市濁沢地すべり地での計測例を引用すると、図-19の通りである。間隙水圧計はいずれも埋設深さより約10m高い水頭を示し、融雪により多少の変動を示している。全長多孔管の孔底は標高184mにあり、間隙水圧計NCUの埋設深さとほぼ同じであるため、多孔管内の水頭は、間隙水圧計と同様な変動傾向を示している。しかし、水頭には約2mの差がみられる。多孔管は孔底より約2~3m高い位置の水頭を示していると推察される。また、この付近に比較的豊富な地下水脈が存在するものと思われる。

**3. 5 盛土での計測** 高さ5.3mの盛土のり肩部から深度を変えて、サクションを測定した例が図-20である。テンショメータを用いた長期計測の一部を示したが、交差する部分もあるが設置深度にほぼ対応したサクション変化を示し、降雨が20mm程度となると浅いところ（0.5mと0.9m）でその影響を示している。また設置深度2.5mが降雨の影響を受けるのは、40mmを越える雨量に対してであることなどが読みとれる。しかしながら、サクション変動は高々0.1kgf/cm<sup>2</sup>程度であり、かなり微妙な計測となっている。一方、得

表-1 姨捨地区での深度別地下水位の観測結果<sup>4)</sup>

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	無微弱微弱
		11	7.15	9.34	2.19	
		19	15.39	16.19	0.80	
姨捨駅前	B-5	6	2.36	2.48	0.12	無微弱無
		11	9.61	10.08	0.47	
		16	14.37	14.66	0.29	
姨捨入口	B-8	6	0.18	0.51	0.33	無無無
		12	3.14	3.44	0.30	
		16	2.65	2.89	0.24	
姨捨入口付近	55-10	20	4.51	9.30	4.79	一部有無
		45	32.91	34.45	1.54	

観測期間 1982年1月~1985年12月

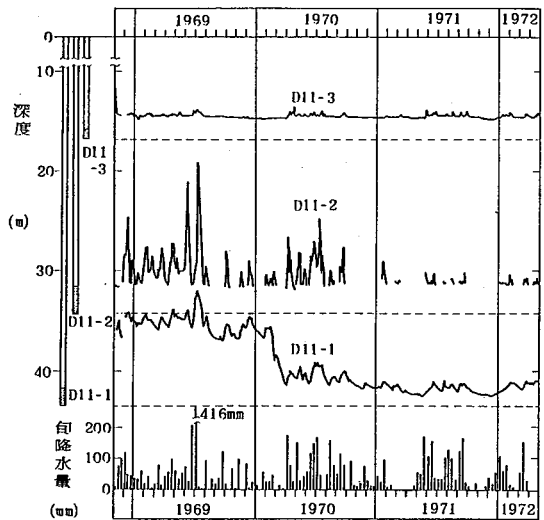


図-18 鷲尾岳地すべりでの深度別水頭の変化（岸本<sup>5)</sup>）

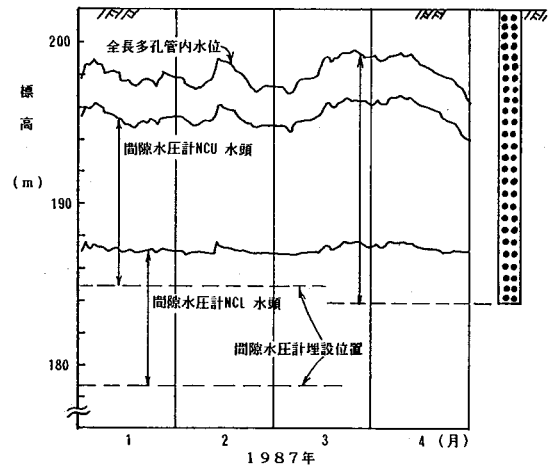


図-19 濁沢地すべり地の間隙水圧と孔内水位（小川ら<sup>6)</sup>）

られたサクシオンを負の水頭として深度別に示すと、図-21が得られる。テンショメータと同じ位置で、深度6mの位置に埋設された間隙水圧計の測定結果も水頭として合わせて示している。この間隙水圧計は、のり尻付近に地下水位が認められたため、同じレベル付近に埋設されている。この図を見ると、テンショメータから得られる水頭は、各測定深度より0.5~1m程度低い位置にあり、9月初めの降雨による影響が、その後ほぼ同じ傾向をもって解消されてくることがわかる。これは、下向きの不飽和浸透状態にあると想定でき、この浸透水が盛土底部に貯留されて、間隙水圧計が正の水頭を示していると見られる。盛土においても、底部に正の間隙水圧が生ずることは好ましいことではない。

4. 等ポテンシャル線の傾きと斜面の安定性 斜面内の地下水の流れを考えるモデルケースとして、図-1~5を提示した。この場合、流線あるいは等ポテンシャル線が、どのような傾きを持つかが重要な意味を有することになる。そこで等ポテンシャル線の傾きに着目し、斜面の安定性について検討してみる。

安定解析は、地表面傾斜角及びすべり面傾斜角が $25^\circ$ である分割細片について、等ポテンシャル線の傾き $\beta$ 及び $\phi'$ を変えて計算している。計算結果は、図-22となる。この勾配をもつ斜面では、 $\beta = 25^\circ$ において、地表面に平行な流線が描かれることになるが、 $\phi' = 40^\circ$ の材料であっても安全率は1.0を下まわることになる。この図からも、地下水の浸透状況をいかに想定するかが、斜面の安定性の検討に著しい影響を及ぼすことが認められる。

5. まとめ 実際の斜面の中の地下水の流れは自由地下水面をもつ流れのように単純ではないことを示した。平常時の斜面内では、各深度において水頭零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られる。水頭上昇時に、どの深度で上昇するかが問題である。

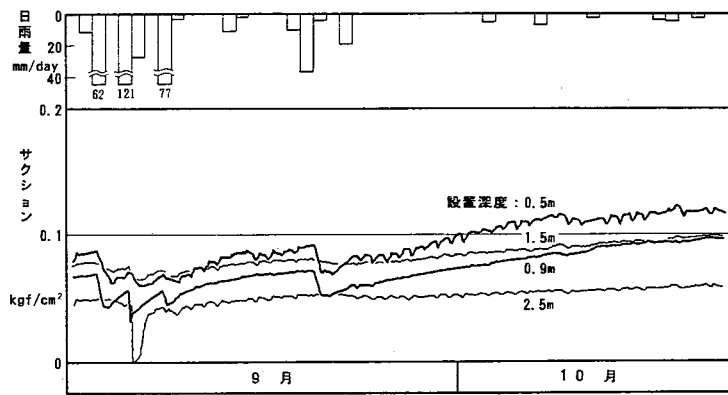


図-20 盛土におけるサクシオン変動

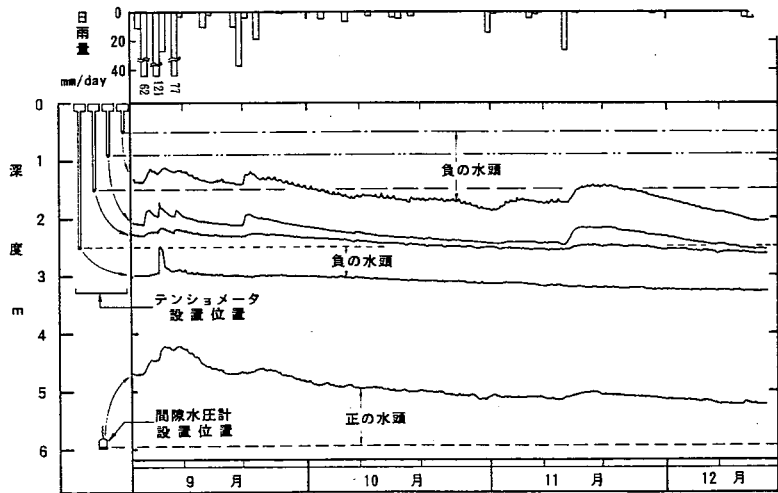


図-21 盛土のサクシオン・間隙水圧計測から得られた水頭の変化

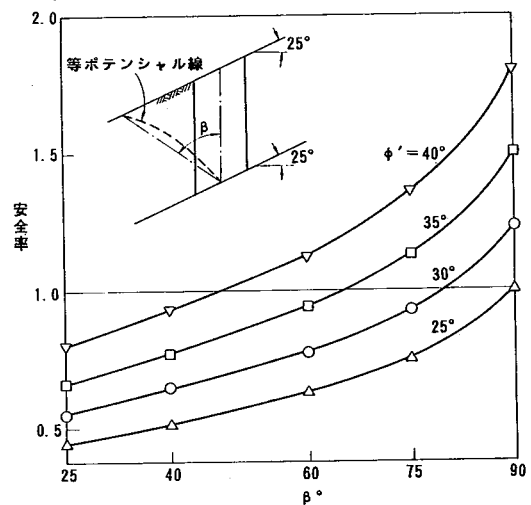


図-22 等ポテンシャル線の傾きと安全率

この研究は、原位置サクシヨンの長期計測結果を解釈することから開始している。特に、我国のような湿润地帯では、サクシヨンはいずれの深度においてもわずかに存在することが多く、微小な正の間隙水圧を示すことも珍しいことではない。一方、地すべり地などで実施される地下水位調査では、同一地点で複数の地下水位が存在することは広く認められてきており、提示したもののほか、多くのデータが得られている。いずれのデータも、ここでの解釈が適用できるものである。そこで、これらの挙動は、相互に直接結びつくべきものと考え、地下水の浸透問題として考えている。

斜面内の地下水の流れを把握し、地盤の安定問題あるいは浸透問題を考える場合、従来より多く使用されている、ボーリング孔に全長にわたり多孔管を挿入して水位を測定する方法では限界があると言える。地下水の浸透状況をより正確に把握しようとするならば、深さごとに水頭を測定する手段を講じなければならない。この目的のためには、多数の深度別水位計または間隙水圧計を設置し、観測することが大切である。サクシオン測定も可能なタイプの間隙水圧計を利用すると、負の水頭も検出でき、また、時間遅れの影響も無視できることから、このタイプの使用が最も適した観測手法であると考えられる。

最後に、測定記録を提供していただいた関係各位、ならびに、とりまとめの際に手伝っていただいた本学大学院生榎本雅夫君の協力を感謝いたします。

#### < 参 考 文 献 >

- 1) 岸本良次郎 (1967) : 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, Vol. 3-3, pp. 21~39.
- 2) 小川正二, 亀井健史, 和田 正, 橋本正樹 (1986) : 融雪期における地すべり地の間隙水圧・地下水・地温の変動特性, 地すべり, Vol. 23-3, pp. 21~27
- 3) 長野県 (1989) : 地附山地すべり機構解析報告書.
- 4) 高速道路技術センター (1985) : 明科~更埴間地すべり検討委員会報告書.
- 5) 岸本良次郎 (1970, 1974) : 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.
- 6) 小川正二他 (1988) : 濁沢地すべり地における融雪水・間隙水圧・地温の変動特性, 地すべり, Vol. 25-1, pp. 21-27 .