

37. 地下水研究 50 年史－斜面災害と地下水－(4)

(6) 斜面の不安定ポテンシャルと地下水

a) はじめに

山地流域における地形発達のプロセスは地震や地盤隆起といった地殻変動に伴うものを除いて、崩壊という突発現象と、浸食・運搬・堆積という常時の連続現象からなり、それを概念的に示せば図 34 のように表すことができる。

この図で不安定ポテンシャルとあるのは、河谷浸食に伴う斜面の不安定化、崖錐堆積物、風化残積土などの不安定材料の蓄積、地山基盤岩の劣化^{脚注}などを指し、また斜面の改変や土地利用などの人為要因は多くの場合、この不安定化を増進させる。その際、山体斜面の水文過程(図 35)、は不安定化の素因にもなり、また加速要因にもなる。

したがって図 34 の過程において、地中水の存在は重要な位置を占めることになる。

図 35 にあるパイプについてはすでにこのシリーズの 35. で述べ、深部への「浸透－流出」に関しては同じく 36. で述べたところである。

そこでこの号では主にそれらの中間に位置するゾーン(ほぼ図 35 の着色部分)に焦点をあてて、話を進めることとする。

b) 埋没地形

太田猛彦(1987)は多摩丘陵にある東京農工大学の実験林の小流域において、貫入試験機によって求めた貫入抵抗(Nc 値)が 20 以上を示し

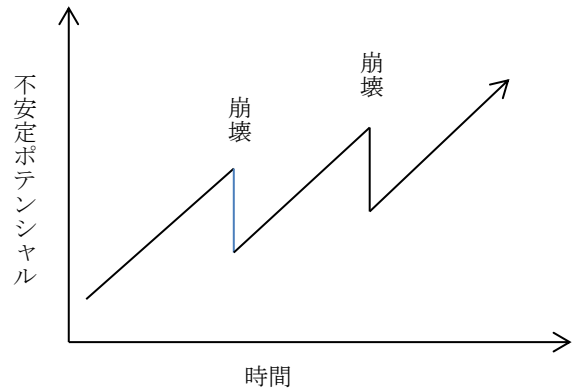


図 34 斜面の不安定ポテンシャル

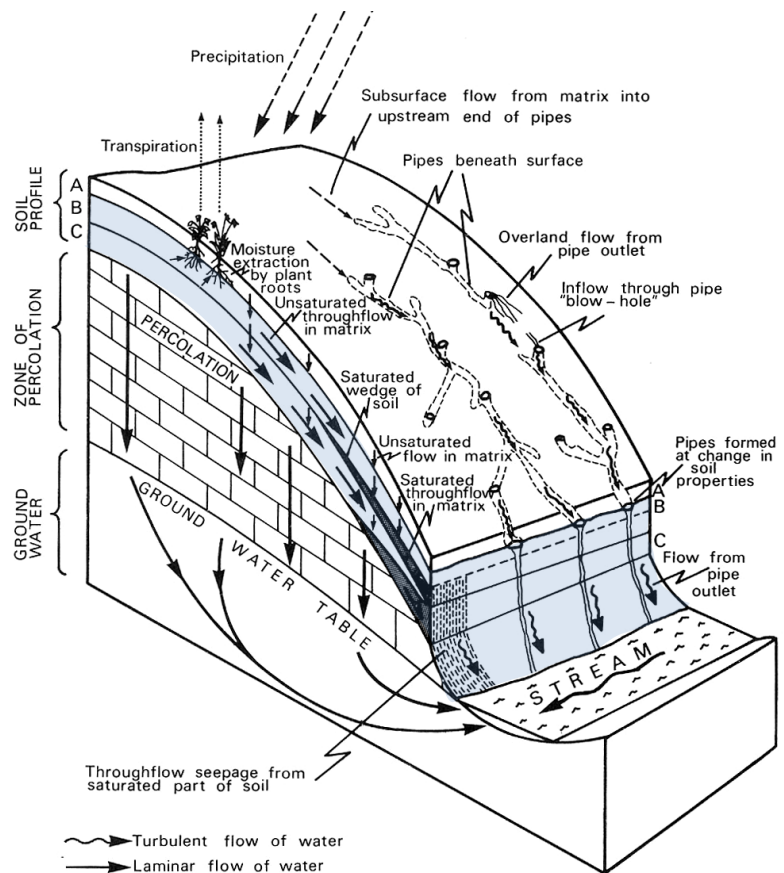


図 35 斜面における地中水の流動経路

(出典: Hillslope Hydrology edited by M. Kirkby, 1978)

脚注: 岩盤クリープのような現象も広義にはこの範疇にはいる。これに関しては次号で触れる予定。

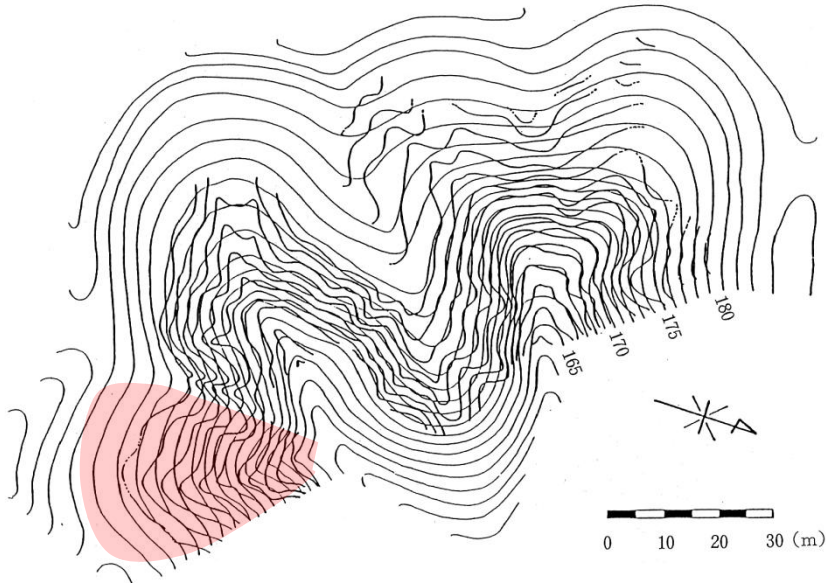
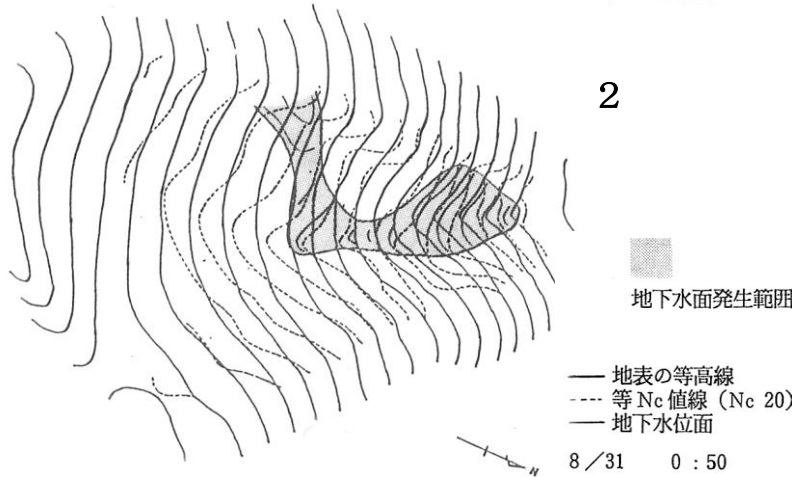
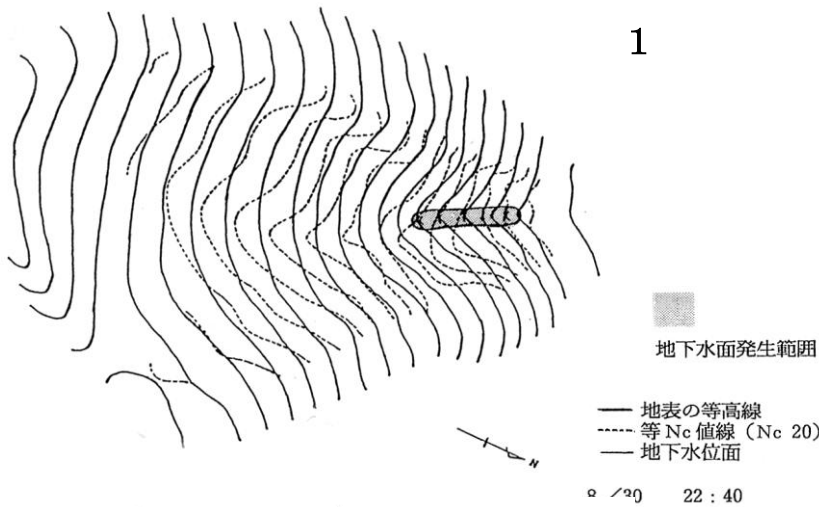


図 36 Nc 値等高線図 (Nc=20)

た深さを基盤の位置として図 36 を画いた。この図でスムーズな線は現地形、それを切る複雑な線は基盤表面の形状である。この両者の差は表層土壌、ローム層、風化帯を含めた森林土層に相当するもので、これがそのままかつての地表面を表すものではないが、地中水の動態を強く支配しているという事実から、ここでは埋没地形とする。



太田は図 36 の着色部分について降雨時の飽和帯の消長を克明に追った結果、図 37 に示したように最初に土層の薄い斜面下部に飽和帯が形成され、順次これが上方にひろがり、その最大時には埋没凹地を中心として広く飽和帯が成長することを示した。この時の総降水量は 60 mm で、この程度の降水量は特段に大きいというのではなく、図のような飽和帯の消長による土層の乾湿は頻繁に行われているといえ、土層

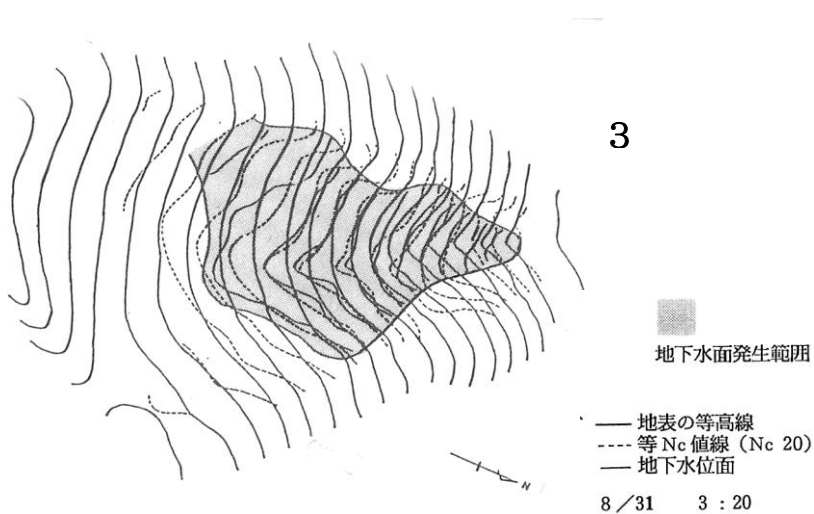


図 37 凹斜面における一時的地下水の挙動

(出典：太田猛彦,1987)

の劣化を増進させる。

このような埋没地形が斜面災害時にどのようなかたちで発現するのかといったことを知る絶好の機会に恵まれたのでこれを以下に紹介する。その場所は上記実験林の東側にある宅地造成地で、偶然切り取り斜面の工事によって露出した埋没谷を目にすることが出来

た。写真 43 の中央部に見えるのがそれで、基盤の連光寺互層を刻み込む埋没谷には黒色土の堆積がみられる。筆者はこの場所は早晚崩壊するであろうと予測していたが斜面工事が完了した直後に予想していた通りの崩壊が発生し (写真 44)、土砂は建設中の住宅地まで流れ込んだ (写真 45, 46)。



写真 43 切り取り斜面に出現した埋没谷 (矢印)



写真 44 露出した埋没谷に発生した崩壊 (数か月後)



写真 45 埋没谷の 崩壊

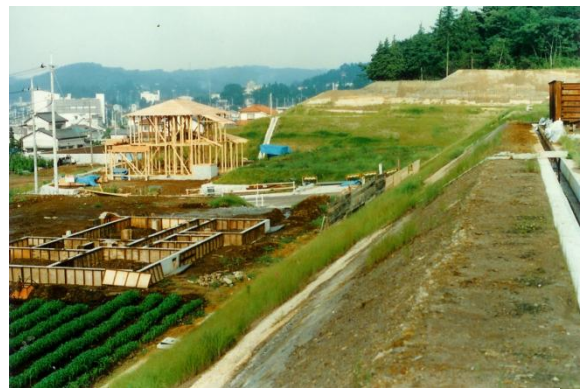


写真 46 宅地造成地に流れ込んだ崩土

(崩壊は埋没谷の底面付近から発生、それを切っ掛けとして連鎖的に拡大した)

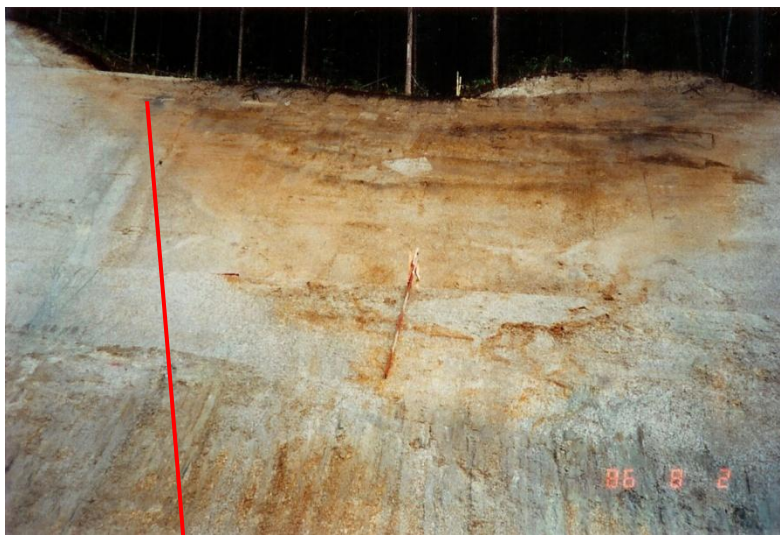


写真 47 風化花崗岩に刻まれた埋没谷 (1986年8月)

筆者は同じような露頭を、愛知県豊田市から岐阜県瑞浪市にぬける県道419号線の拡張工事の際に観察した(写真47)。

基盤の花崗岩は風化が極度に進んでいて、その上部はマサ化が著しい。ここに深さ約4m、幅10mほどの谷状の変色部分が見られ、少なくともその上部の層状部分は埋没谷と思われる。



写真 48 埋没谷側壁のガリ浸食

掘削完了直後から埋没谷の側壁部分から湧水が見られるようになり、15日ほどのち、写真48にあるようなガリ浸食が発生し、これが徐々に拡大した。この埋没谷の下の基盤(花崗岩)は埋没谷からしみ込んだ地中水に起因した変質が著しく、劣化していたため、写真48に続いて



写真 49 基盤の変形

写真48に続いて写真49のように基盤部分に変形が生じ、5年後には写真50のような崩壊につながった。



写真 50 埋没谷直下に発生した崩壊 (1991年9月)

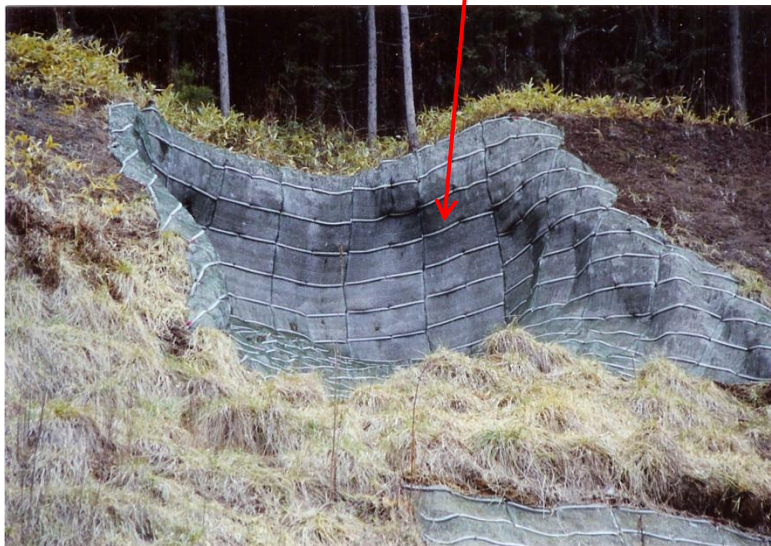


写真 51 埋没谷部分の安定処理(1993年5月)

この斜面が写真 51 のように安定処理されたのは、さらに2年後のことである。なおこれは応急処理のように思われるが、その後の状況は把握していない。

c) 斜面土層の異方性と水理^{脚注)}

一般の土壤にみられる腐植に富む A 層、その A 層から溶脱した物質が集積している B 層、風化母岩からなる C 層といった土壤層位は、地層のように明確な層理面を持たないが、水理的な性質の上ではかなり明確な違いを示すことが多い。傾斜地のように土材の移動や地中水の流動が活発で、かつ凍結融解や風化作用による表層剥離、シーティングなどが進行し、さらに根系網、地中小動物といった生物活動が加わる場合にはこの水理的異方性はより一層明確となり、これが増長されれば斜面の不安定化の要因となる。

このような異方性に支配された地中水の顕著な流動状態は降雨時に増幅される。図 38 に示した「東京農工大学フィールドミュージアム多摩丘陵」の実験斜面における地

脚注：ここで対象とする斜面の部位は主として図 35 の着色部分（中間流領域）である。

中水の水理水頭等値線図の例によれば、図中破線（--）で示した部分（B, C層の境界にあたる）で降雨時に顕著な地中水の流れが推定される。なおこの部分にはパイプ網が発達していて、注水時で 5m/hr 以上といった速度で流動していることが丹下 勲(1988)^{脚注}による調査から確認されている。

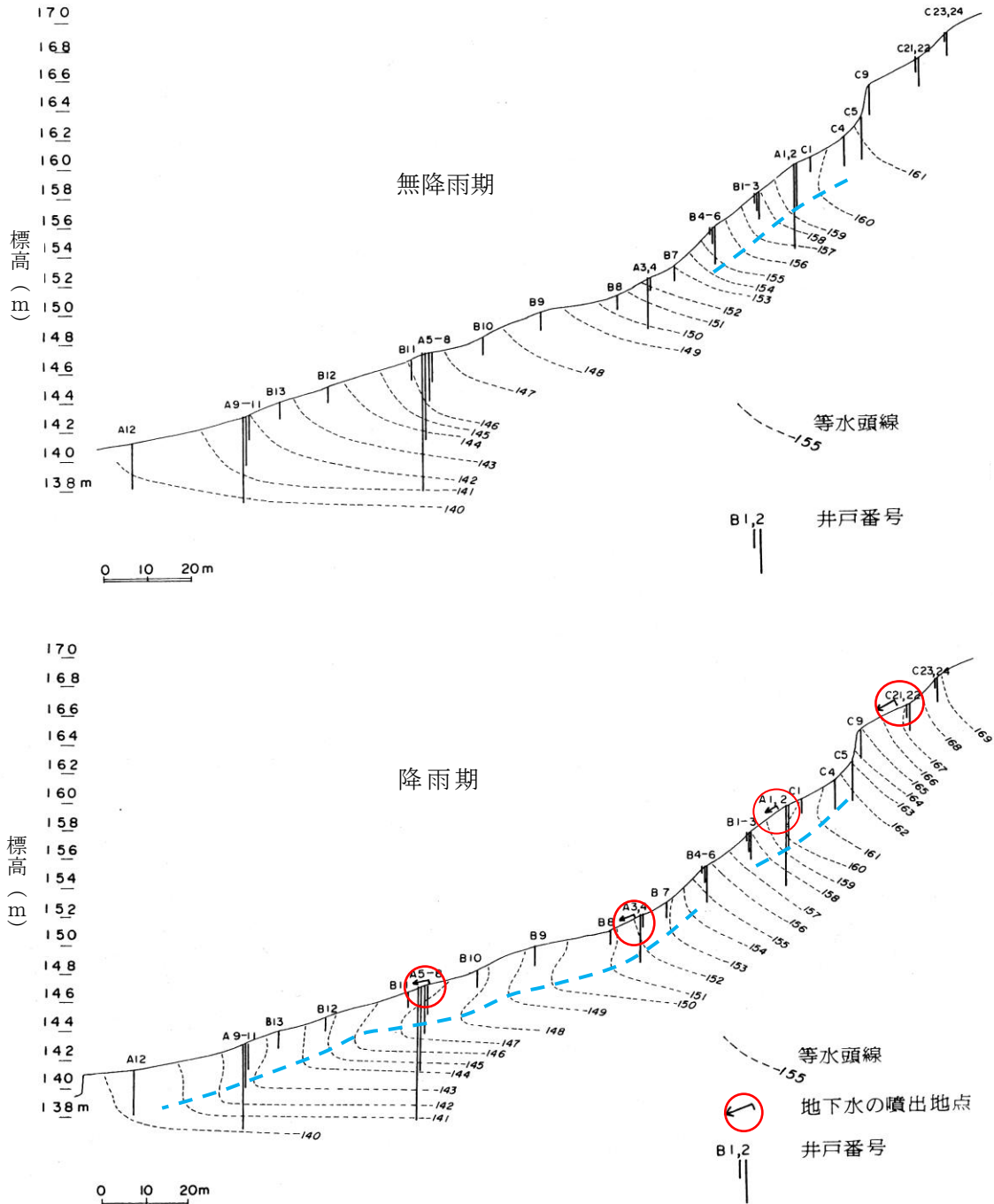


図 38 無降雨期と降雨期の斜面内地中水の等水理水頭線
 (降雨時に斜面の各所から復帰流が発生しているのが注目される。○印)

脚注：丹下 勲編著「丘陵地の水文研究」(1988) 丹下 勲教授退官記念論文集

図 39 は斜面内地中水のこのような流れが、どのように崩壊などの斜面変状に結びついているかを理解するのに考えてみたモデルである。また写真 52～57 はその例である。

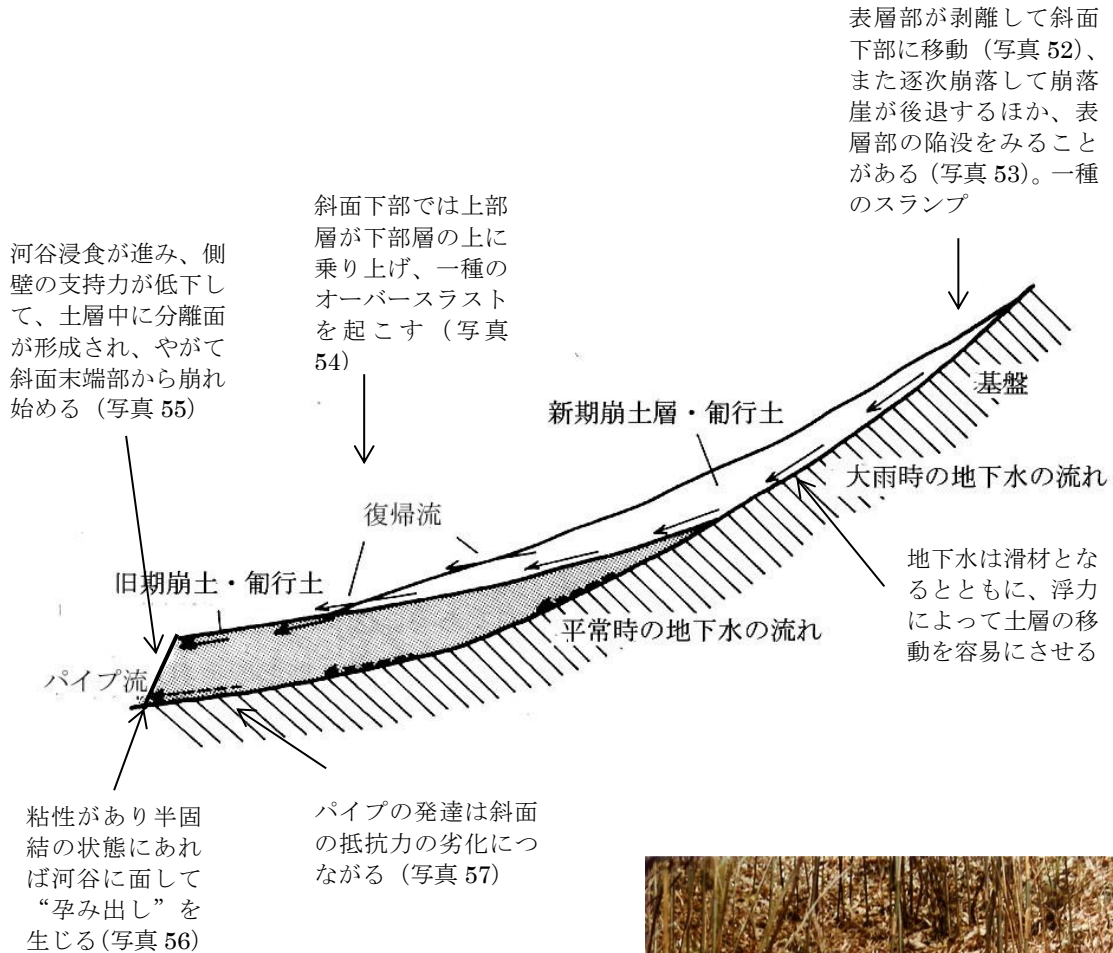


図 39 斜面内地中水と斜面の変状



写真 52 表層部の基盤からの剥離
(基盤は花崗岩、剥離土層は 30 cm 程度。愛知県小原村)



写真 53 パイプ網の陥没
(この下流部から水流が発生。川崎市早野)



写真 54 オーバースラスト状の変位 (矢印)
(千葉県嶺岡山地)

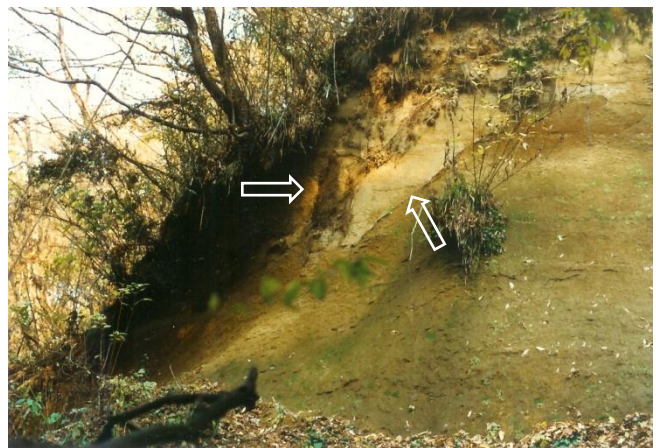


写真 55 河谷斜面における分離面の形成 (矢印)
(八王子市長沼、多摩丘陵)



写真 56 河谷底に向かう“孕み出し”
(クリープ状態で張り出してきたもの、八王子市長沼)



写真 57 河谷崖のパイプ列
(不連続面に沿ってパイプが発達、八王子市長沼)

d) 斜面の人工改変と地中水

図 40 はピット掘削による斜面地中流への影響と、その滲出面背後にできる楔形の飽和帯の様子を示したものである。急角度で切った実際の掘削面でも同じような現象が生じるものと思われ、斜面の不安定化につながる事が予想される。

写真 58 は異なる切り取り面角度での地中水の滲出状況や流亡土砂量を追跡するために東京農工大学の実験地に設けさせていただいたもので、斜面中央部にあるのが切り取り部、下部にあるのが観測小屋である。また斜面上部と

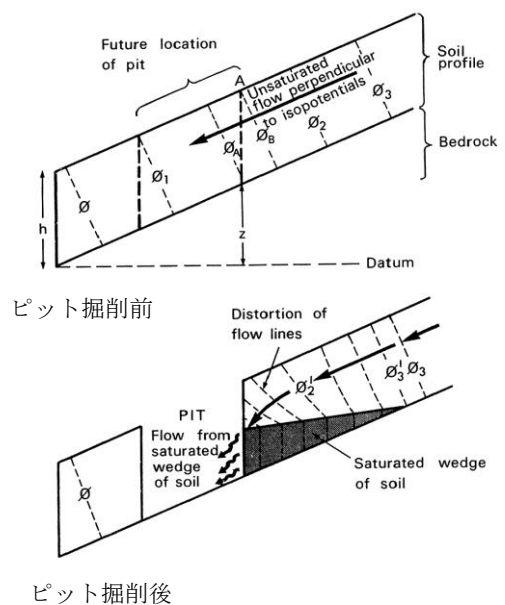


図 40 ピットによる斜面地中流への影響
(出典: Hillslope Hydrology edited by M.kirkby, 1978)



写真 58 切り取り斜面での地中水の動態観測

切り取り部にはテンシオメーターが設置してある (○印)。なお切り取り面は 40° , 50° , 60° の3角度で、いずれも覆いがしてある。またこれとは別に露天の切り取り斜面が敷設されている (□印)。なお観測開始時では斜面は平滑に均され、その後定期的に斜面の後退量や流亡土砂量が記録された^{脚注)}。

写真 59, 60 は斜面からの滲出状況を示したもので、通常は乾いていることが多いが、降雨開始時には写真のように特定部分から滲出だし、やがてこれが拡がってくる。



写真 59 60度斜面での滲出状況



写真 60 50度斜面での滲出状況

滲出量は図 41 の記録にみるように、切り取り面の角度の大きさが 60° のものが他に比べて圧倒的に大きい点が注目される。大雨時に地中水分量が増加して、飽和側方流が活発になり、図 40 にある飽和楔(Saturated wedge)が成長してくると背後の地中水は切り取り面の角度の大きさに支配された滲出面の拡大や、収束的な流れが卓越するようになるためと思われる。また滲出開始時間が他の斜面からのものより早いのもこれらのごとに関係しているように思われる。なお当然のことながら滲出は斜面一様に行われるのではなく、部分的に集中する傾向があり、長期間を経てその部分での斜面後退も目立つようになった (矢印)。

脚注：斜面の地質はこの地域の基盤をなす一様な連光寺互層の礫層からなる。

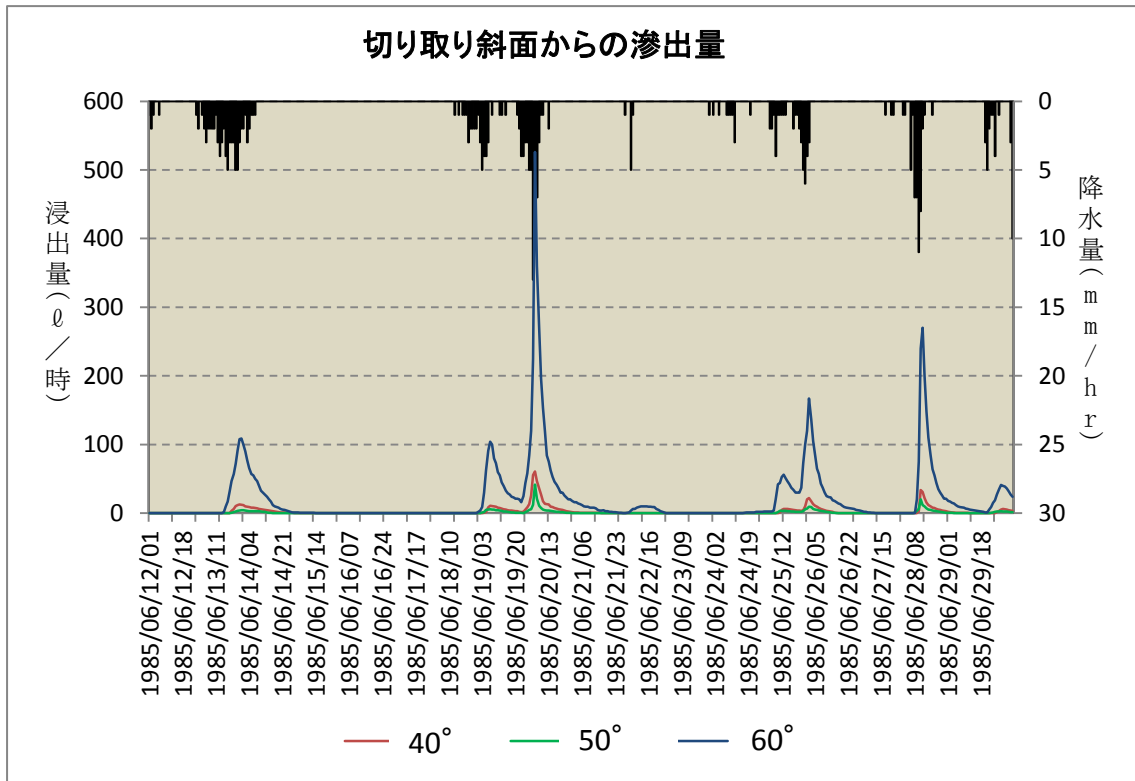


図 41 斜面切り取り角度による滲出量の違い

(東京農工大学実験地 (多摩丘陵))

丘陵地などにおける切り土や盛り土が大掛かりに行われる造成工事で代表的なものはゴルフ場であろう。ここでは大量の掘削土によって谷が埋められ、表層は転圧されて固められるので、自然土とは大きく異なる土層構造を示すようになる。

一例として千葉県の特 T ゴルフ造成地での調査例をあげておく。図 42 はその違いを貫入抵抗によって示したもので、自然の土層は表層から深部へと徐々に締まっていて、この部分で水循環を制御する形になっているのに対して、人工地盤ではこれが逆で表層部の浸透能が低く、表面流を容易に発生させるかたちになっている。また間隙率や、間隙径も図 43 にあるように自然土の A₀ 層や A 層 (表土) では間隙率、間隙径ともに大きい のに対して盛り土では極端に小さく なっており、また透水係数も表 1 のように自然土と盛り土では大き

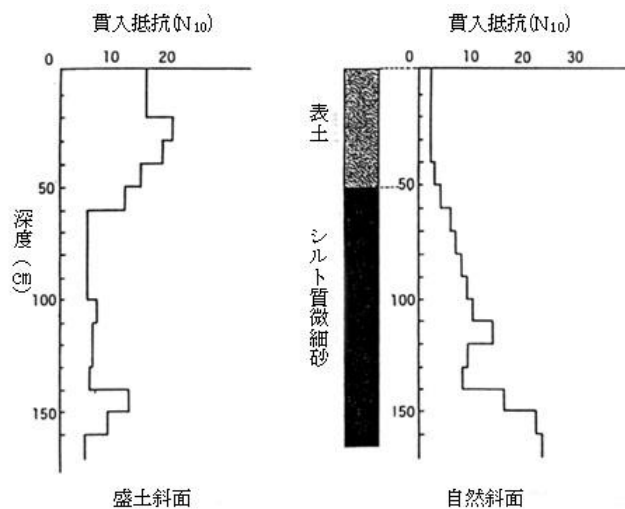


図 42 盛り土と自然土における貫入抵抗

く異なっていて、容易に地表流を発生させる。

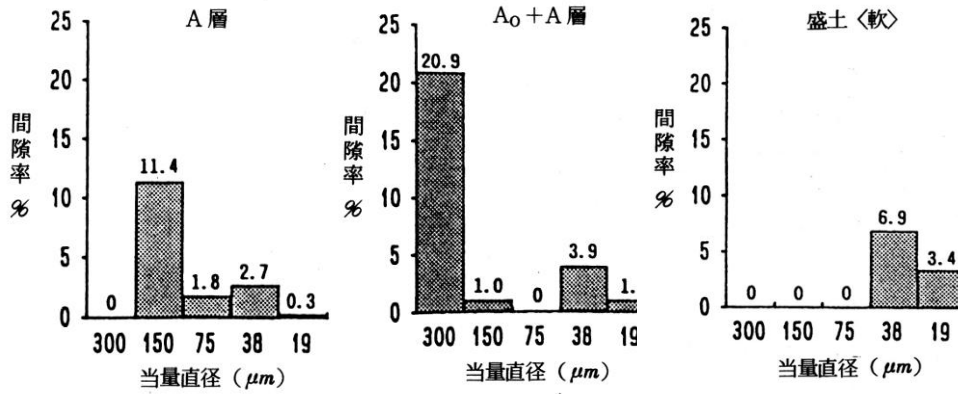


図 43 盛土と自然度の間隙率と間隙径

表 1 自然土と盛土の透水係数の違い

	自然状態		開発状態	
	Ao+A層	A層	盛土<軟>	盛土<固>
透水係数 (cm/S)	2.20×10^{-1}	7.84×10^{-2}	6.10×10^{-4}	2.02×10^{-5}

地表流の発生はガリ浸食をもたらし、削り取られた土砂は下流に堆積して大降雨時には土石流として下流側に被害をもたらすことも珍しくない。写真 61 は造成中の様子、写真 62 はガリ浸食と堆砂、写真 63 はそれらによって埋めつくされた元の谷筋である。

この工事の最中、1990年10月に台風19号がこの地区に大降雨をもたらし、写真64のような土石流が発生して下流の農地に大きな被害を与えた。



写真 61 ゴルフ場の造成風景
(山は削り取られ、その土砂は谷に埋められた)



写真 62 ガリ浸食の進行
(谷部を埋める流亡土砂)



写真 63 堆砂で埋め尽くされた元の谷筋



写真 64 開発の”付け”ともいえる土石流被害

e) 隠れた素因—山体地下水と崩壊—

崩壊にはその素因と誘因の多様性から様々なタイプが存在するが、その中において“水”に関しては直接的には大降雨時の地表流によるガリ浸食に関連して、また間接的には溪流の下刻による斜面基部の支持力低下などに関連して多少は取り上げられているが、より深部の地中水との関わりについては深く追究した例はあまり聞かない。しかし渇水期の山地溪流の流量を維持しているのは山体地下水であり、降雨時の河川ピーク流量の多くを占めているのも地下水であることはよく知られていることで、これが崩壊の素因、または拡大要因となっていることは充分考えられる。

たとえば崩壊発生後、地山内部からの水流、あるいはその痕跡を見ることは多く、元々存在したパイプ網、風化帯開口部などの透水ゾーン、また場合によってはポケット状の帯水部などが崩壊の位置や規模に大きく関わっていたのではないかと思われる例は少なからずある。



写真 65 崩壊後出現した透水ゾーン

〔長野県西部地震時の崩壊、王滝村松越地区、出典：信州大学
自然災害研究会(1985)「昭和 59 年長野西部地震による災害」〕



写真 66 シラス台地の崩壊

〔鹿児島県大口市の豪雨災害、出典：国立災害科学研究所
(1987) 災害年表〕

写真 65 は 1984 年 10 月 5 日長野県西部地震時に長野県木曾郡王滝村の松越地区で発生した崩壊で、地中水との関わりを示す好例と思われるので引用させていただいた。この画像に依れば崩落崖の各所に湧水とそれが排出した地中物質の痕跡が認められる。

また写真 66 は 1969 年 6 月 30 日鹿児島県大口市のシラス台地における梅雨前線に伴う豪雨による崩壊で、崖の各所にパイプ状の地下水の吹き出し口が認められる。

同じような視点から筆者が注目しているのは崩壊の素因としての“山体表層部の緩みと地中水の動態”である。この両現象は互いに影響し合っていて、より規模の大きい崩壊につながる可能性があり、注目すべき課題だと筆者はかねがね考えている。次号ではこのことについて考えてみたい。