

自然斜面における浸透流の取扱い

た
田なか
中しげる
茂*

1. はじめに

雨水が自然斜面に降ると、降雨強度と斜面を構成している地層の浸透能との大小関係により、斜面内への雨水の浸透のみが行なわれる場合と浸透と斜面上を流れる表面流出とが同時に起こる場合とがある。斜面表層を鉛直浸透のみが行なわれる場合の多くは不飽和浸透に属するものである。斜面を構成している地層は均一なことは珍しく、透水係数を異にしている層が互層をなしている場合のほうがむしろ普通である。このような地層内へ雨水が浸透する場合は雨水がある層上に貯留せられ、その層内は飽和浸透が行なわれたり、他の層では不飽和浸透が行なわれたり、複雑な状況を呈する。また、土のような多孔質媒体ではなく、節理やき裂の多い岩盤と表層とから自然斜面になっている場合には、き裂の内部を雨水が浸透するという特殊な浸透状態を示す。

鉛直浸透が行なわれている地層の表面に貯留される水深、もしくはその上を表流する水の深さとこの浸透とは無関係ではないのである。

さらに注意したいことはつぎの事象である。鉛直浸透が開始される直前に土壌間ゲキ内に存在していた空気が浸潤前線の進行に伴い、圧縮せられて、大気圧よりある程度高い圧力を呈し、この現象が鉛直浸透の速度を遅らせると同時に、下方の毛管水帯に加わる圧力の若干の増大が毛管水の一部を重力水に変えることにもなる。したがって、場合によっては、浸潤前線が斜面の表面からさして下方に進行していないにもかかわらず、表層の底部に水面が出現する現象が発生することがある。もう一つは、一降雨で地表面から浸透しうる鉛直深さはどれくらいであるかということである。透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度の表土層に、継続時間 10 時間で 400 mm の降雨があったとしても、せいぜい飽和状態に近くなっている鉛直浸透深は 1.5 m を越えることはまずないのである。

自然斜面を構成している基岩などに破碎帯が発達していることがよくある。ここに筆者がいう破碎帯というのは、断層破碎帯はもとより、地殻変動や造山運動などで基岩が圧力を受けた結果、断層のようにそこで「ずれ」が生じなくて、単に破碎を受けた部分をも含ませているのである。

このような破碎帯内には脈状地下水が包蔵せられていることが多い。この地下水の水頭は豪雨時には、意外なほど上昇し、その結果、当該破碎帯に隣接している透水層のほうへ、この地下水がかなりの抵抗を受けつつ横方向に浸透するようになることがある。

豪雨時に発生する自然斜面の崩壊現象の多くは、上述の破碎帯が発達している地盤の斜面に多いことが筆者の研究の結果明らかになってきた。このような破碎帯の存在しない地盤からなる斜面が崩壊することは珍しいのである。

2. 自然斜面への雨水の鉛直浸透

筆者は降雨強度が雨水を受ける土の浸透能よりも大きい場合のその土中への鉛直浸透を「強雨浸透」と名付け、前者が後者よりも小さい場合のそれを「弱雨浸透」と称する。前者の場合には当然のことながら、その土の上面に、降雨強度から浸透能をさし引いた差に相当する量の雨水が貯留せられることになる。その上面が傾斜しているときは、しかるべき水深をもって流れる。またこの場合の鉛直浸透時には、浸透開始直前にその土の間ゲキに存在していた空気は浸潤前線の背後でその一部が間ゲキにとどまるほか、その前方に押しつけられることとなり、大気圧よりある程度大きい値にまで圧縮せられることとなるが¹⁾、圧縮せられた空気は血路を開いて大気中へ間欠的に逃げ去る現象が起こる。

後者の浸透の場合には、浸透が行なわれる土層の上面には湛水が行なわれず、不飽和状態で鉛直浸透が行なわれる。

この場合も浸潤前線の前方では間ゲキ空気が少し圧縮せられるが、前者の場合のような程度にはならない。

一降雨が降り終わった後における土層中の水の運動についても考察することが大切である²⁾。また、一つの低気圧に起因する降雨に関して、強雨浸透と弱雨浸透とが交互に行なわれたり、強雨浸透、中休み、弱雨浸透などが組合わされて行なわれることを考慮して、どのような場合でも比較的容易に解析を行なうようにすることも大切である。

つぎに上記のいろいろな場合について論ずる。

2.1 均等質土層への鉛直浸透

A. 間ゲキ空気圧の圧縮を伴う場合

図-1 に示すように、浸潤前線が地表面から Z' だけ鉛直下方に進んでいると同時に、毛管上昇限界が地下水面よ

* 工博 神戸大学教授 工学部長

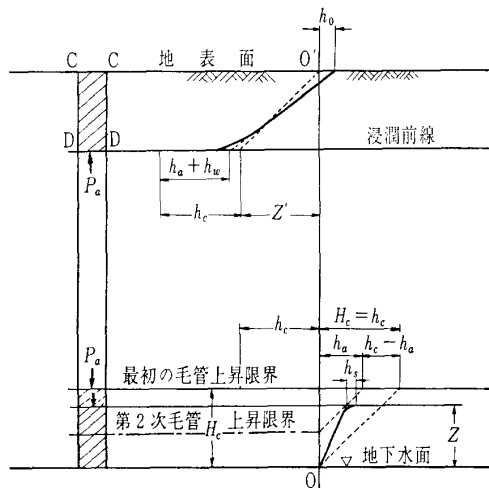


図-1

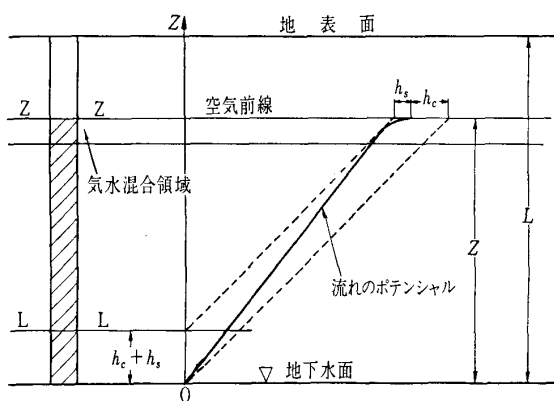


図-2

り H_c だけ上にあったものが少し下がって同水面から Z だけ上にまで降下してきたときを考えてみる。

$$\frac{dZ'}{dt} = \frac{k}{ns} \left(1 + \frac{h_t}{Z'} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに

- k : 土の透水係数
- n : 間ゲキ率
- s : 浸透後の土の飽和度から浸透前のそれをさし引いた値
- t : 時間
- h_c : 浸潤前線における毛管吸引力を水頭で表わした値
- h_0 : 地表面上の湛水深
- h_a : 浸潤前線における間ゲキ空気圧を水頭で表わした値
- h_w : 浸潤前線に接している浸潤帯における浸潤に伴う圧力損失を水頭で表わしたもの
- h_t : $h_0 + h_c - h_a - h_w$

$$t = \frac{ns}{k} \left[Z' - h_t \log_e \left(1 + \frac{Z'}{h_t} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

他方、毛管水帯の水は、その下の重力水帯の水面が常に一定高さを保っているという条件で、どのように動くかを

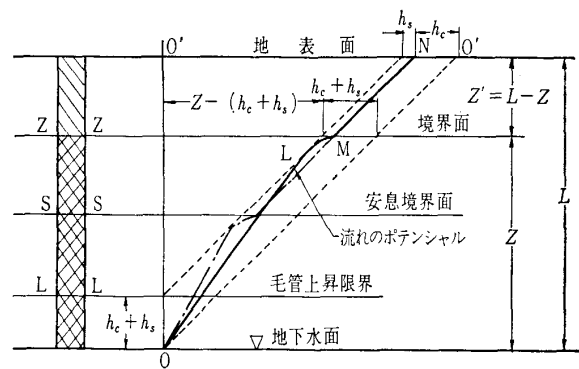


図-3

考えると、

$$\frac{dZ}{dt} = k \frac{h_a - H_c + Z}{Z} \cdot \frac{1}{ns} \quad \dots\dots\dots(3)$$

および

$$t = \frac{ns}{k} \left[H_c - Z + (H_c - h_a) \log_e \frac{h_a}{Z - (H_c - h_a)} \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

B. 強雨が突然やんだ後の水の運動

強雨がやみ、地表面上の湛水が0になった瞬間から、ただちに地表面から空気が土壌粒子間ゲキにはいりこみ、空気と水との境界においては毛管負圧が作用するほか、空気と水との混合が起こる際にはエネルギーの損失があるわけで、これが図-2の気水混合領域で行なわれる。そこで

$$\frac{dZ}{dt} = -k \frac{Z - (h_c + h_s)}{Z} \cdot \frac{1}{ns} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$t = \frac{ns}{k} \left[L - Z + (h_c + h_s) \log \frac{L - (h_c - h_s)}{Z - (h_c + h_s)} \right] \quad \dots\dots\dots(6)$$

C. 強雨が突然に弱雨に変わったときの浸透

強雨による浸透と弱雨によるそれとの間の境界が時間とともに降下する。いまこの境界面が図-3に示すように地下水面から高さ Z の位置にあるときを考えると、これより上の領域の水の運動に対する流れのポテンシャルコウ配は、この領域の含水量がほぼ一定と考えられるので、重力のポテンシャルコウ配と同じである。この境界面には、その面の上下の土の含水量の差に起因する毛管負圧が作用するし、この付近にエネルギー損失があるから、流れのポテンシャルコウ配の変化は図-3に示すようになる。いま k_{unsat} を不飽和浸透領域の透水係数とすると、上の弱雨浸透領域に対しては

$$\frac{dZ}{dt} = k_{\text{unsat}} \frac{1}{ns_{\text{unsat}}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

下の強雨浸透領域に対しては

$$\frac{dZ}{dt} = k \left(1 - \frac{h_c + h_s}{Z} \right) \frac{1}{ns} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$ns_{\text{unsat}} \frac{dZ}{dt} = ns \frac{dZ}{dt}$ なる関係、すなわち境界面の上下の流量が等しくなるまで上記境界面が降下して平衡を保つ

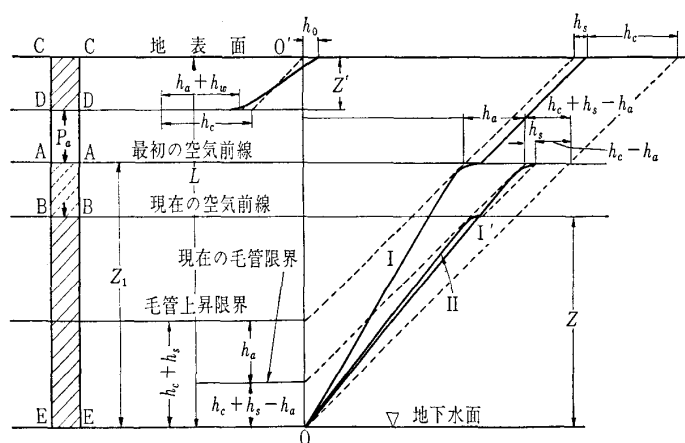


図-4

てとまる。この位置は上の両式を等しいとおき、

$$Z = \frac{h_c + h_s}{1 - \frac{k_{\text{unsat}}}{k}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $h_c + h_s \leq Z < L$

湛水深が0になった瞬間から上記境界面が安息境界面に達するに要する時間 t は

$$t = \frac{ns}{k} \left[L - (h_c - h_s) \frac{k}{k - k_{\text{unsat}}} + (h_0 + h_s) \log_e \frac{L - (h_c + h_s)}{(h_c + h_s) \frac{k_{\text{unsat}}}{k - k_{\text{unsat}}}} \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

D. 前記降雨停止後小休止の後再降雨

図-4 で線A-Aは再降雨が始まったときの空気前線の位置を示している。再降雨が始まると同時に、A-Aより下の部分の水の運動に対する流れのポテンシャルコウ配線は図-4 のIから瞬間的にIIに移る。再浸透開始から t 時間後に空気前線がB-Bの位置、新しい浸透水の浸潤前線はD-Dの位置にきたとする。

前期降雨の浸透したものについては

$$\frac{Z}{Z - (h_c + h_s - h_a)} dZ = - \frac{k}{ns} dt \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$t = \frac{ns}{k} \left\{ Z_1 - Z + (h_c + h_s - h_a) \log_e \frac{Z_1 - (h_c + h_s - h_a)}{Z - (h_c + h_s - h_a)} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

新しく浸透してきた水については

$$t = \frac{ns}{k} \left\{ L - Z - h_t \log_e \left(1 + \frac{L - Z}{h_t} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$h_t = h_s + h_c - h_a - h_w \quad \dots\dots\dots (14)$$

新しく浸透してきた水の前線がさきに浸透した水のあとに続く空気前線を追って降下し、あるところで追いつくこととなる。

$$L - Z_1 = (h_c + h_s - h_a) \log_e \frac{Z_1 - (h_c + h_s - h_a)}{Z - (h_c + h_s - h_a)} - h_t \log_e \left(1 + \frac{L - Z}{h_t} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

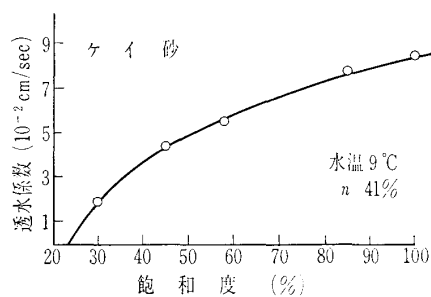


図-5

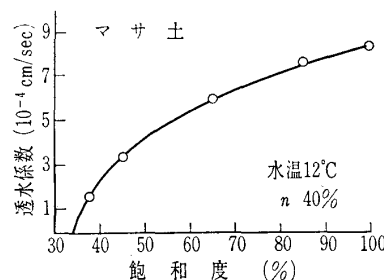


図-6

上述のような諸式を実地に適用するに際して、 h_c , h_w , h_s , h_a , k , k_{unsat} などの値を当該土について求めておく必要がある。

h_w , h_s は多くの場合 5, 6 cm 程度のことが多い。 h_a は細砂については最大 20 cm であり、マサ土については最大 40 cm である。 h_c は比較的容易に実測しうる。ある土の k および k_{unsat} を求めるには、長さ 2.5 m 程度の円筒を用意して、これに土の試料を空気泡が間げきに残らぬように水で完全に飽和されるようにてん充して、Marriott Flask を用いて給水するようにし、いろいろな飽和度で浸透させて実験する³⁾。図-5、図-6 は筆者が実験して得た結果の一部である。

これらによると、飽和度が低くなると、急に k_{unsat} の値が減少することがわかる。

地表面から深い盛土などへ雨水が浸透する際には、一降雨の継続時間中に地表面から鉛直に浸透する深さが 1.0 m 余とすると、降雨が停止した瞬間から後に、そのときまでに地中へ浸透した水がどのように降下運動をするかを明らかにする必要がある。浸透を受ける土層の初期条件とにらみ合わせて、土粒子の周囲に付着または吸着せられ、重力の作用では動かない水となる水量が上記浸透した水が降下するにつれて失われていく。したがって、前記の k_{unsat} が浸潤前線の進行とともに減少して、前線がある距離進むと $k_{\text{unsat}} = 0$ cm/sec となり進行がとまることになる。

2.2 透水係数を異にする互層への鉛直浸透⁴⁾

A. 上部粗粒土下部細粒土からなる地層

図-7 に示すような水平地層をとり上げ、この地層へ強雨浸透が行なわれる場合をとり上げる。上層内を鉛直浸透している場合は前述のとおりである。上層内を浸潤前線が

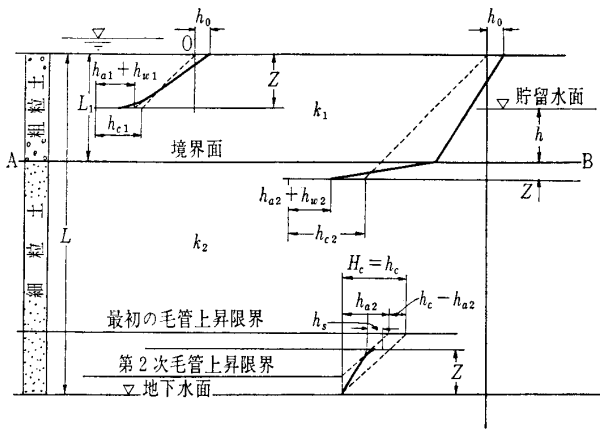


図-7

降下して上下両層の境界面を通過して、下層へ進むようになり、境界面から Z だけこれが降下したときを考える。このとき、境界面上に水深 h の貯留が行なわれている。

上層の単位面積当たり鉛直下方に動く流量は

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_1 = k_1 \left(1 - \frac{h-h_0}{L_1}\right) \dots\dots\dots (16)$$

下層の単位面積当たり鉛直下方に動く流量は

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_2 = k_2 \left(1 + \frac{-h+h_{c2}-h_{a2}-h_{w2}+L_1+h_0}{Z}\right) \dots\dots\dots (17)$$

式に用いた記号は図-7 に示すとおりである。

$(dQ/dt)_1 > (dQ/dt)_2$ という関係が存在する限りは h は増大し続けるが、これらの両流量が等しくなると h は一定になる。

B. 上部細粒土下部粗粒土からなる地層

上層中を浸潤前線が降下しつつあるときの関係は前述のとおりである。浸潤前線が上記二層の境界に到達した瞬間の後は前線は下層の内部にはいる。前線が上記境界面から鉛直下方に Z だけ下がったときの関係はつぎのとおりである。

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_1 = k_1 \frac{h_0 + L_1 + h'_{c2}}{L_1} = k_1 \left(1 + \frac{h_0 + h'_{c2}}{L_1}\right) \dots\dots\dots (18)$$

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_2 = k_{2\text{unsat}} \left(1 + \frac{h_{c2} - h_{a2} - h_{w2} - h'_{c2}}{Z}\right) \dots\dots\dots (19)$$

ここに

h'_{c2} : 境界面で下層の土が上層の土中の水に作用する吸引力を水頭で表わしたもの

h_{c2} : 下層内で浸潤前線に作用する土の吸引力を水頭で表わしたもの

$k_{2\text{unsat}}$: 下層の不飽和浸透流に対する透水係数

式(19)のカッコのなかの値は、 $h_{c2} - h_{a2} - h_{w2} > h'_{c2}$ のときには Z の増大とともに減少し、 $h_{c2} - h_{a2} - h_{w2} < h'_{c2}$ のときには Z の増大とともに増加して、1に漸近する。

2.3 自然斜面への雨水の浸透

図-9, 図-10 は凹状斜面および凸状斜面の表土層内への雨水の鉛直浸透の状況を示したものである。このように

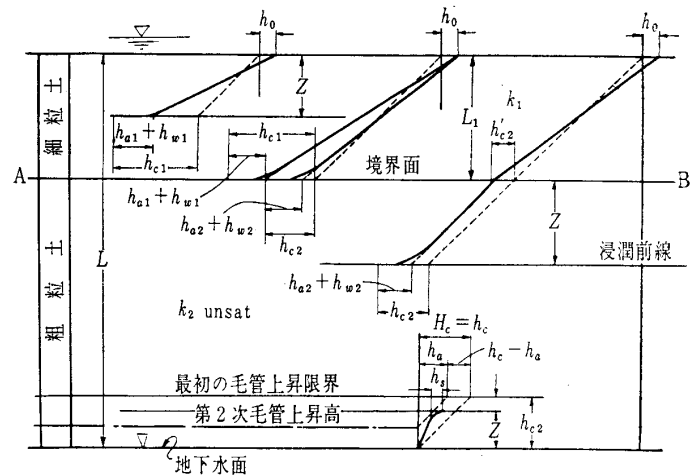


図-8

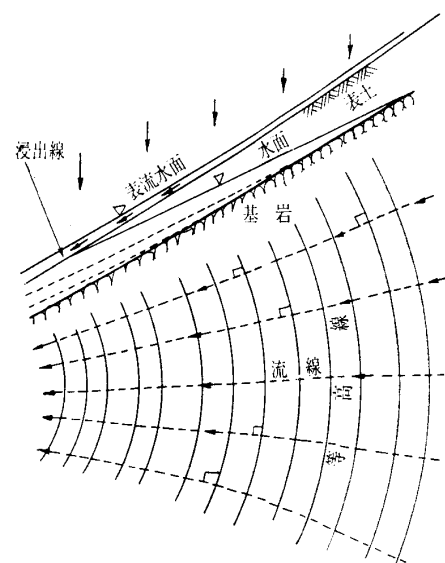


図-9

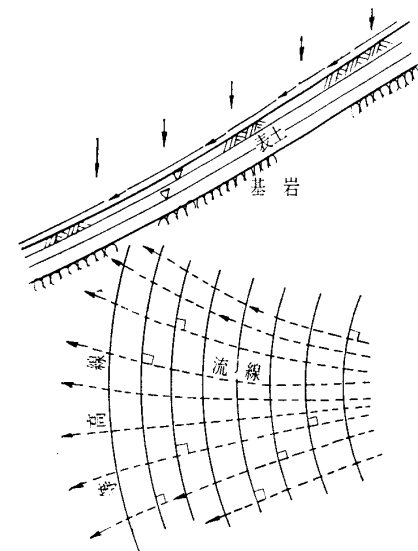


図-10

表層内に貯留が行なわれるためには長時間の降雨の継続が必要である。凹状斜面は表流水が斜面のすそ(裾)近くでは集まってくる傾向が強く、浸潤前線の進行速度は頂部近く

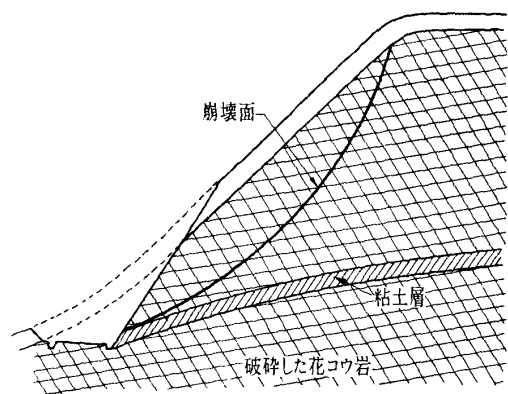


図-11

からすそに近付くにつれて、強雨浸透の場合には大きくなる。

基岩に節理や割れ目が発達してその内部の地下水位が低いときには、図-11 のように雨水は表土層を浸透した後これを通って基岩内に浸透する。この図は神戸市丸山付近の山ろく道路の切取り斜面で、粘性土の薄層をかんているがために、ここで割れ目に侵入した水は足がついて、横方向に流れる。

図-12 は立山ドライブウェイの建設せられたき裂の多い凝灰岩、安山岩、花コウ岩からなる斜面を示す。安山岩と凝灰岩の境界は広い面積で浸透水を受け、これを局所的に集中する形状をなしている。

図-13 は粘土層、砂質土層などが互層をなしている自然斜面を形造っているものである。このような斜面に降雨があると、図のように砂質土層に浸透が行なわれ、十分降雨が継続すると、粘土層上に雨水の貯留が行なわれ、この層が傾いていると、低いほうへ流れる。

2.4 破砕帯の発達している自然斜面⁵⁾

自然斜面を構成している基岩に破砕帯が発達していて、そのなかに地下水が脈状をなして存在しているとき、豪雨時においてこの地下水の水頭が大きくなる場合がある。実際の例を取り上げて説明を加えることにしたい。図-14 は兵庫県相生市国道 250 号線の高取峠のバス転落事故を起こした自然斜面に存在している破砕帯の平面図である。

図-15 は兵庫県御津町の基山を構成している基岩に発達している破砕帯の平面図であり、この図の a b と g h の二本の線の交点をねらって図に示すように水平ボーリングを行なった。その柱状図を図-16 に示す。このときの孔口からの湧水量のボーリング掘進中の長さ方向の変化をも示してある。

図-17 は神戸市東灘区渦森地区の山を構成している断層破砕帯の平面図であって、この内部の水がその頂部から溢流していたが、図に示すように水平ボーリングと水位観測用鉛直ボーリングを施工した。図-18はそのうちの No. A, No. B の水平ボーリングからの湧水量と水位の両方の時間変化と降雨によるそれを示している。No. 1~No. 3 は水位観測井戸で、これらの水位は 30 mm/day 程度の降

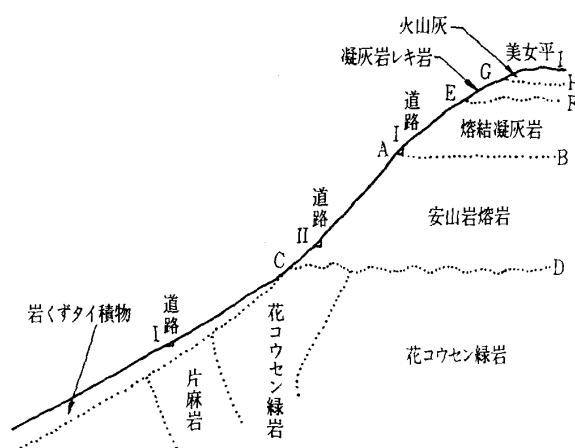


図-12

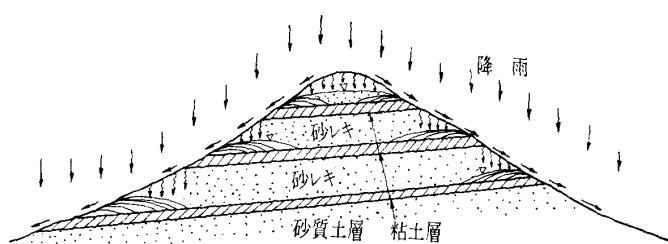


図-13

雨ではほとんど影響を受けないが、70 mm/day を越えるとかかなり影響を受けて、よく対応している。このような対応からみると、この破砕帯の水位は、有効降雨がかなり広い面積に降り、これが集中的に集まって破砕帯の頂部からその内部へ流入した結果によるものと考えられる。

破砕帯の頂部がすべて大気開放されているのではなく、目詰まりを起こしている部分が多く、局所的に頂部が開放になっていることが多い。断層粘土やうすい粘土層で破砕帯内の地下水が逃げにくくなっていることが多い。

図-19 は神戸市鶴甲地区の北部の切取り斜面に発生した花コウ岩のスベリを横断図により示したものである。ここは大月断層とこれに続く土橋断層が走っているほか、数多くの小規模な破砕帯も斜面部を走っている。斜面上手部の破砕帯内の地下水頭が平素からかなり高く、降雨条件によってはそれが急速に上昇するために、風化が著しい花コウ岩内にスベリが生じたのである。

破砕帯内の地下水の水位と降雨の hyetograph との対応性のよさはさきにも述べたが、図-20 もそのよき一例である。これは図-17 の横ボーリング D とその付近の破砕帯内の水位を示している。梅雨期の豪雨で 10 m 以上の水位上昇を呈している。神戸市鶴甲地区、妙法寺地区などにおける破砕帯内の地下水位も敏感に降雨と対応し、その日降雨量 60~150 mm に対応した上昇高が予想外に大きいことが観測せられている。

破砕帯が発達している自然斜面は、単に徹視的にその斜面のみをながめるのではなく、その周辺十数 km² にわたる地域を巨視的にながめることも大切である。このように



図-14

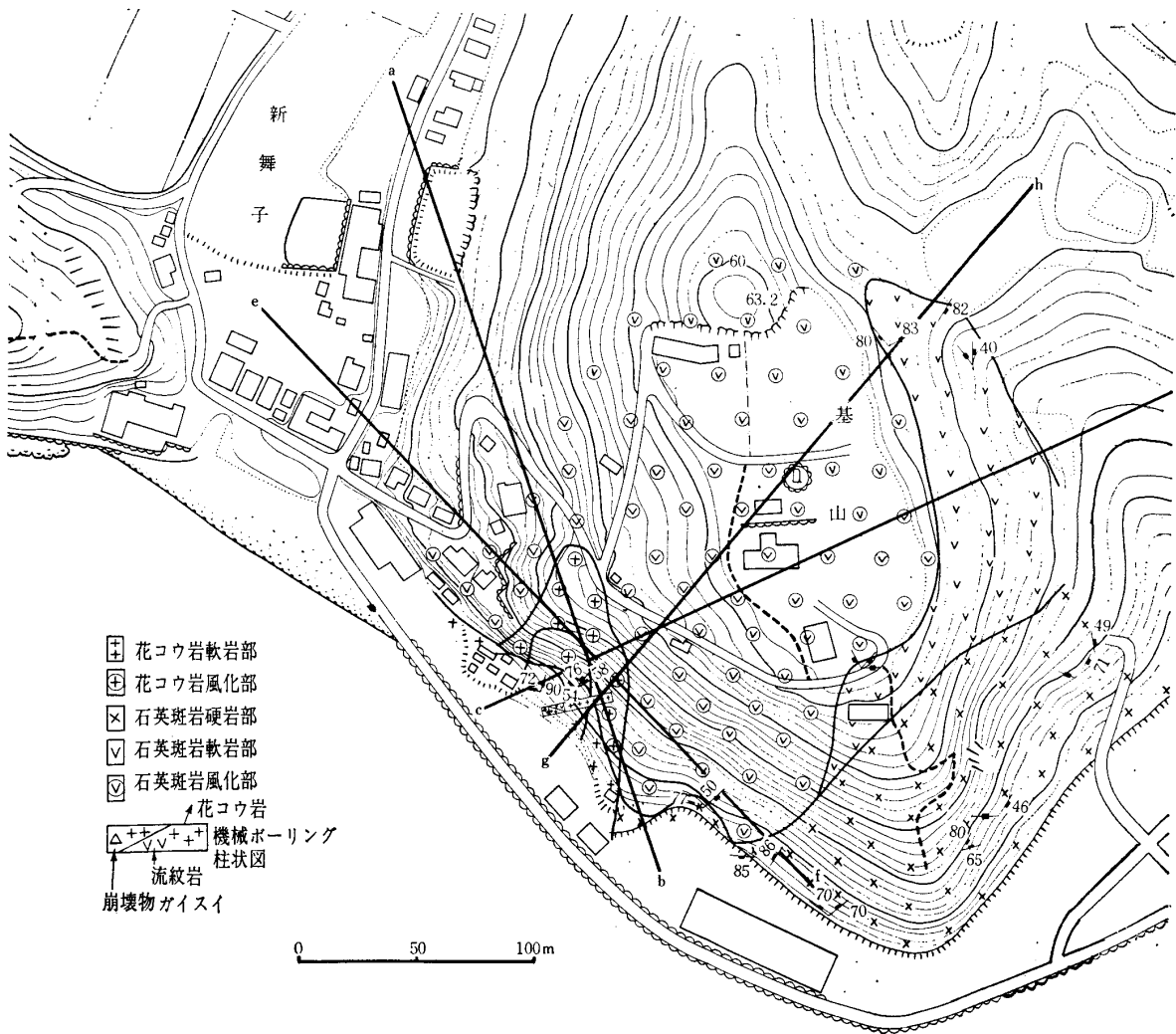


図-15

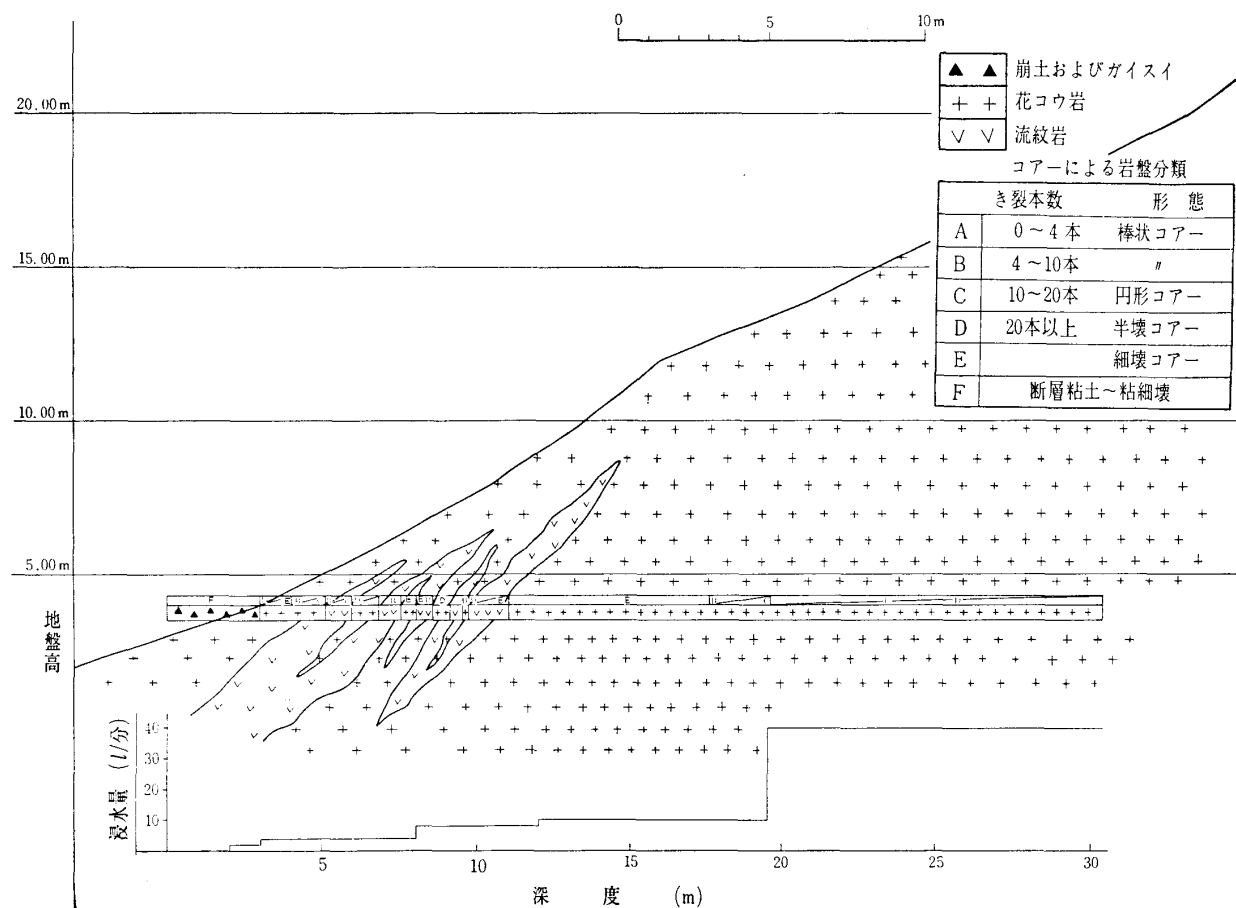


図-16

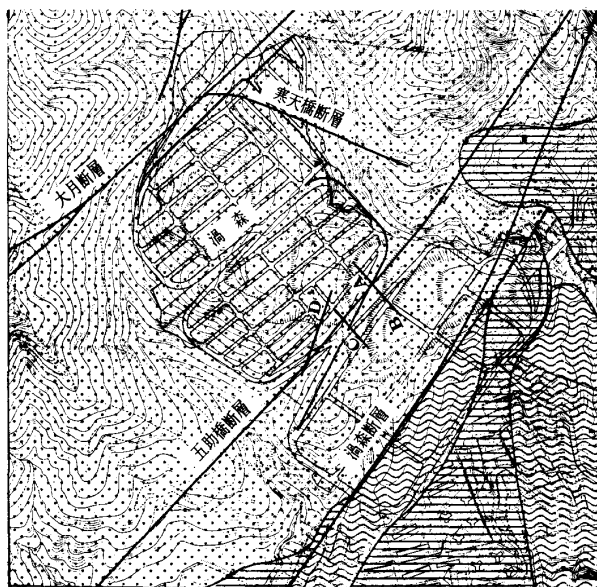


図-17

して、当該斜面を通してどのような破碎帯がどちらのほうへ走っていて、溪床などをどこで横切っているかを明らかにする必要がある。豪雨時にはその斜面の表面から雨水が浸透するばかりでなく、そこから離れた場所の溪流などに広い集水区域から集まってきた雨水が破碎帯にはいり、そのために「連通管の原理」により、当該斜面の破碎帯内の地下水面が急上昇をする。表土層は上下から水の浸透を受

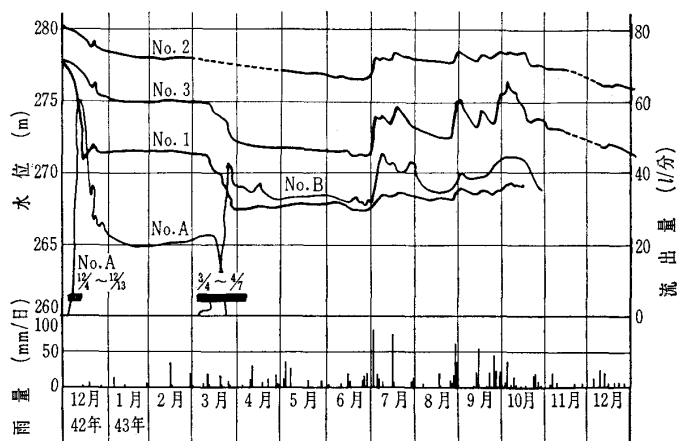
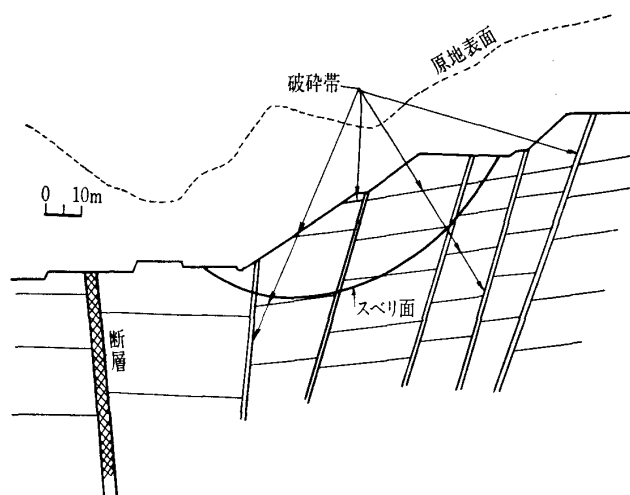


図-18 鉛直ボーリング内水位、水平ボーリング流出量と雨量との関係(神戸市)

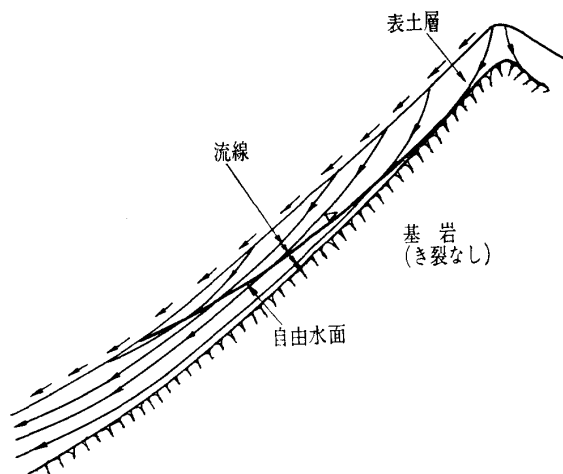
けることになり、崩壊しやすくなる。またときには割れ目の多い基岩も崩壊しやすくなる。

3. 自然斜面への雨水の第2段階の浸透

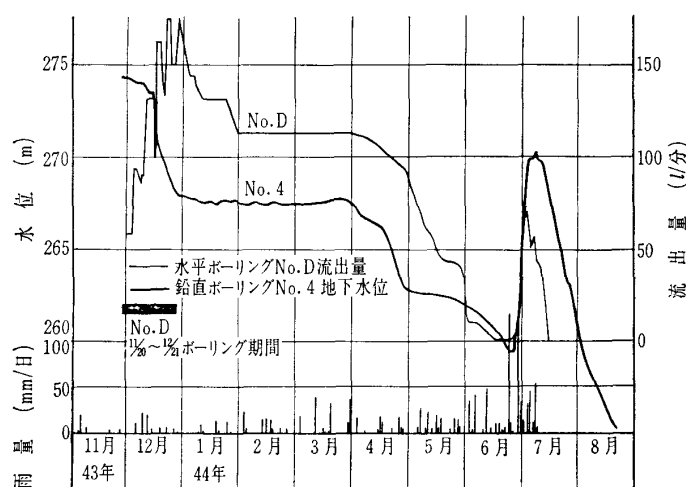
雨水の斜面への浸透は2段階に分けて考える必要があろう。第1段階のものは鉛直浸透が進行して、前線が透水性の悪い層に達して消失するまでのものをさす。これが終了すると第2段階の浸透に移行する。すなわち、難透水層の上に自由水面が出現し、これが急速に上昇し始めると同時に、いままでは鉛直下向きになっていた流線が方向を転換し



図—19



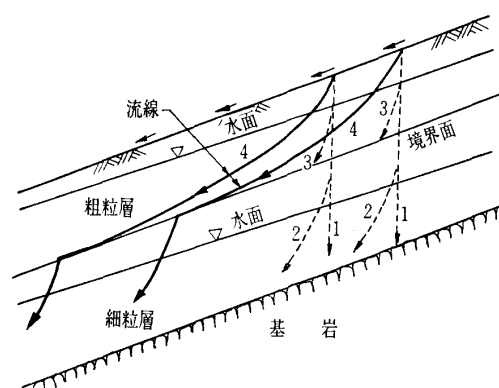
図—21



図—20

始める。すなわち、地表面、難透水層などの「境界条件」に大きく支配されて流れる浸透流の流線となるまで、方向を各流線は変える。この段階では先行条件の影響があまり存在せず、境界条件の影響が支配的となる。換言すれば、前段階で作用していた作用力のうち、土壌の吸引力は消滅し、重力と静水圧のみが働く。

一つの斜面全体が与えられたとき、その境界条件、浸透層の透水係数、降雨強度などが明らかなきときには、第2段階の浸透が定常状態になったときの流線群や自由水面は、簡単な境界条件の場合には等角写像などを用いた解析が可能であるが、そうでないときには模型実験などの方法によらなければならない。図—21は難透水性の基岩の上の山腹斜面を構成している表土層に、十分長時間強雨が継続すると仮定したときに出現する流線群と自由水面を示している。しかし、現実にはこのような状態が出現することはまれであり、それ以前で降雨がやむのが普通であるし、さらに基岩中へも鉛直浸透が行なわれるのである。図—22は基岩の上に粗粒と細粒の二層が載っていて、十分降雨が継続したとき流線が境界面で屈折している状態と、流線の向きが時間の経過につれて変わる状態を示す。



図—22

4. 結 語

自然斜面に雨が降り、雨水が斜面に浸透する問題を取り上げ、その取扱い方について述べたが、降雨そのものの hyetograph と、それを受ける側の土や基岩の浸透能の両方の組み合わせによりこれは決まるものである。水の供給が絶えまなく継続する場合の浸透とは雨水のそれは異なることを銘記しておく必要がある。自然斜面の崩壊現象は本論で述べたような浸透問題を十分把握して初めて解明せられるのである。

参 考 文 献

- 1) 田中 茂：土壌間隙空気の圧縮を考慮した地中への鉛直浸透，第13回土木学会水理講演会講演集，pp. 61～65，昭和44
- 2) Shigeru Tanaka : An Approximate Theory Concerning Infiltration, Memoirs of the Faculty of Eng. Kobe Univ., 1960
- 3) 田中 茂外4名：浸透並びに土砂輸送に関する研究，第1部浸透に関する研究，建設工学研究所報告，No. 2, pp. 249～270, 1961
- 4) Shigeru Tanaka, et al. : Researches on Infiltration of Rain Water into Stratified Soils Associated with Pore Air Compressions, 建設工学研究所報告 No. 10, pp. 215～225, 1967
- 5) 田中 茂：急勾配流域からの流出土砂量並びに流木量の予想法について，第9回災害科学総合シンポジウム論文集 pp. 175～178, 1972

(原稿受理 1973.5.11)

土と基礎，21—8 (186)