

72 斜面内部での雨水の浸透過程に関する実験的考察

パシフィックコンサルタンツ株

○平松 晋也

建設省土木研究所 石川 芳治 草野 慎一 福澤 誠

1. はじめに

降雨時やその終了直後における山腹斜面内部での雨水の挙動を明らかにすることは、流域の水循環機構のみならず、雨水の浸透に伴う斜面崩壊の発生機構を考える上でも重要な課題となる。

本研究では、斜面内部における雨水の浸透・流下過程に着目し、不飽和状態での鉛直浸透過程から側方流として斜面を流下していく過程を把握し、山腹崩壊現象を理解する上での一助とすることを目的として室内斜面浸透実験を実施した。

2. 斜面浸透実験

2.1 実験装置及び実験条件

実験装置は、図-1に示すように幅60cm、高さ40cm、水平距離240cmの実験水路と散水装置により構成されている。この散水装置を通して水路表面に与えられた雨水の挙動及び地下水位は、斜面の縦断方向に60cm間隔で4測線（深度方向に10cm間隔で3深度）に設置された計12本のテンシオメータ及び斜面下端部より20cm間隔で12地点に設置されたマノメータによりそれぞれ計測されるようになっている。

また、斜面下端部からの地下水流出口は、助走部下流に設置された定水槽内の量水堰よりオーバーフローさせ、微量流量センサーにより計測される。

実験に用いた試料は豊浦標準砂であり、水路内への充填は水締めとした。なお、斜面下端部の助走部においては、常に地下水位が一定に保たれている。実験ケースの一覧を表-1に示す。

2.2 斜面内部における雨水の挙動

図-2にCASE-7を例として、斜面の最下端部（A測線）並びに最上端部（D測線）における各深度の土壤水分吸引圧の経時変化を示す。また、土壤水分吸引圧が低下し始める時点を雨水の到達時刻と考え、各テンシオメータ設置地点における雨水到達時間をとりまとめたものを図-3に示す。以上の結果より、斜面の下端部においては初期水分状態がより湿润状態に保たれているということもあいまって、雨水の到達時刻は、土層深度にかかわらずほぼ同時刻となり、下層部のほうが上層部よりも早くなるケースも認められたため、これらの領域においては斜面に沿った側方流が存在するものと考えられる。一方、斜面の上端部においては降雨の開始とともに雨水が表層部より順次下層部へと到達していく様子が認められ、またテンシオメータの設置位置にかかわらず雨水の到達時刻は各深度部においてほぼ同時刻となっている（図-3）ことより、これらの領域においては鉛直一次元方向の不飽和浸透過程が卓越しているものと判断される。この傾向は、①水路の横断面形状を平行型とした場合、②急勾配斜面部及び③斜面の上端部において顕著に現れている。図-4に、CASE-7における散水期間中の2次元等ポテンシャル分布を示す。なお、同図には当該時刻における地下水位も併記した。図-4より、降雨開始とともに鉛直一次元方向の不飽和浸透過程が卓越するようになり、この時のフラックスは斜面上部ほど大きくなることがわかる。そしてその後の時間経過とともに斜面下端部の土層深部で

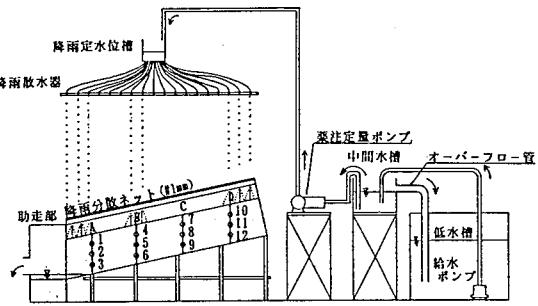


図-1 実験装置

表-1 浸透実験ケース

ケース	傾斜角度	斜面形状	降雨強度 (mm/hr)	散水時間 (min)
1	15°	平行型	29.3	1565
2	15°	平行型	19.5	2825
3	15°	平行型	10.2	2880
4	15°	谷型	28.9	1323
5	15°	谷型	18.4	2460
6	15°	谷型	10.0	2790
7	25°	平行型	29.2	1320
8	25°	平行型	19.2	1440
9	25°	平行型	8.5	1980

は斜面に沿った側方流が認められるようになるものの、その表層部や斜面の上端部では依然として鉛

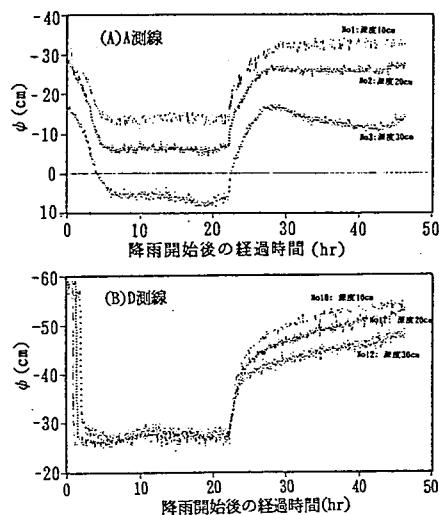


図-2 土壤水分吸引圧の経時変化(CASE-7)

直一次元不飽和浸透過程が卓越している。さらに時間が経過し、斜面下端部からの地下水流出量が定常状態となった時点においては斜面下端部での側方流出過程(飽和・不飽和)がさらに顕著に認められるようになる。この斜面に沿った不飽和側方流が顕著に認められた地点における飽和度は、その大部分において90%以上となるため、土壤はほとんど飽和に近い状態にあったものと考えられる。この斜面に沿った側方流の存在は、斜面勾配を同一とした場合には平行型斜面よりも雨水の集水域となる谷型斜面において、また降雨強度の増加とともにより顕著となる。

また、以上の結果を基に、斜面勾配の相違による斜面内部での土壤水流動の変化を眺めると、

- ① 降雨強度の増加とともに降雨到達時間が早くなるという傾向は、斜面勾配如何にかかわらず認められたが、斜面の傾斜を緩勾配とした場合(15度)、各深度ともに着目している斜面の位置によって降雨の到達時間は異ったものとなる。
- ② これに対し、より急勾配とした場合(25度)には、斜面最下端部(A測線)を除き、同一深度における雨水の到達時間は斜面の位置にかかわらずほぼ同値となる。

といった事項が確認された。

のことより、森林山腹斜面の様な急勾配斜面における土壤水の挙動は、特に降雨初期段階において降雨強度の影響をより強く受けるようになるものと判断される。

2.3 斜面下端部からの地下水流出量

2.3.1 降雨強度の相違による地下水流出量の変化

斜面勾配を15度とし、降雨強度を10mm/hr ~ 30mm/hrへと変化させた時の地下水流出量の挙動を示す図-5からも明らかなように、各ケースともに地下水は散水直後より流出し始めその後の時間経過とともに増加を続ける。しかしながら、地下水流出量が定常状態へと到達するのに要する時間(図-6)

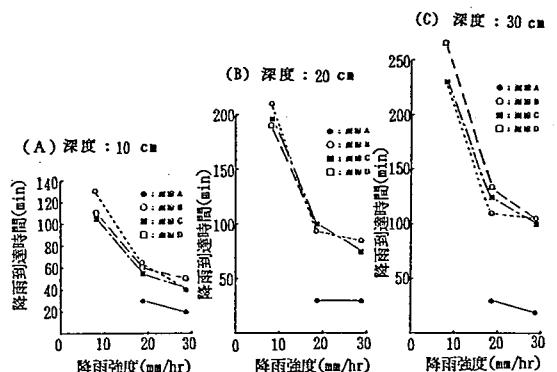


図-3 降雨強度と降雨到達時間との関係($\theta = 25$ 度、平行型斜面)

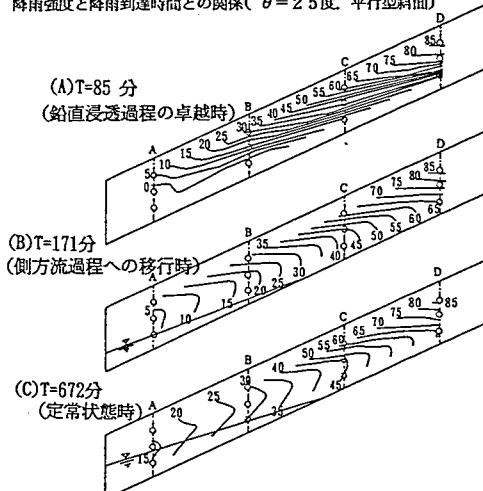


図-4 斜面縦断面のポテンシャル分布(CASE-7)

は、降雨強度の増加とともに短縮化される傾向にあるものの、その境界条件として与えられた降雨強度と比較するとその相違はそれほど顕著には現れていない。

また、散水終了とともに地下水流出量は急激に低下し始めるようになるが、斜面勾配を15度とした場合には地下水流出量が散水強度の約50%、25度とした場合には約60%となった時点を境にその漸減傾向は緩かとなる。この変曲点の出現時には、斜面内の地下水深の大部分が消失してしまっていることより、散水終了直後の流出量はその大半が飽和側方流出成分により構成され、その後の変曲点以後の流出量は不飽和側方流出成分によりその大部分が構成されるようになるものと判断される。

2.3.2 斜面勾配の相違による地下水流出量の変化

図-7に示す斜面勾配の相違による地下水流出量の変化図及び図-6より明らかのように、斜面勾配の増加とともに地下水流出量の上昇速度は早くなり、その値が定常状態へと到達するのに要する時間も短くなる。また、斜面内に発生する地下水位並びにその発生領域は斜面勾配の増加とともに小さくなる。これは、斜面の構成材料として用いた標準砂の飽和透水係数が $2.08 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ と大きいため、急斜面ほど位置水頭勾配が大となり土層内での地下水深の形成速度よりも早く斜面下方へと雨水が流下していくことによるものである。

実験により得られた地下深及び動水勾配を基にダルシー則 ($q = h \cdot K s \cdot I$ (1)) より得られる飽和領域からの流出量と実測値とを比較したものを図-8に示す。同図より明らかなように、斜面下端部からの地下水流出量の大部分(約60%以上)は飽和側方流により構成されるものの、不飽和側方流による影響も少なからず認められた。

このように、斜面内部での雨水の挙動並びに斜面下端部からの地下水流出量を詳細に検討しようとする場合、斜面長方向の不飽和流出成分は無視し得ないものとなることが確認された。

3. 斜面内における土壤水分フラックス

土層内における水流動は、不飽和領域へと拡張されたダルシー則により表され、斜面長方向(X軸方向)及び鉛直方向(Z軸方向)のフラックスはそれぞれ次式により与えられる。

$$q_x = K (\partial \phi / \partial x + \sin \omega) \dots (2), \quad q_z = K (\partial \phi / \partial z + 1) \dots (3)$$

ここでは、実験結果を基に上式を用いて土壤水分フラックスの挙動について検討を加えた。

また、 $\theta \sim \phi$ 曲線及び $\phi \sim K$ 曲線はVan-Genuchten式を用いてモデル化した。

3.1 斜面長方向のフラックス

図-9に示すCASE-1の斜面縦断面の水分フラックス図より斜面内部における雨水の挙動を概観すると、境界条件として斜面表層部に与えられた雨水は、降雨開始とともに斜面内を浸透し、やがて土層深部より順次斜面長方向のフラックスが形成されるようになり、その後の時間経過とともにこの値は増加し、より浅層部においても斜面長方向のフラックスが形成されるようになる(定常状態時)ことがわ

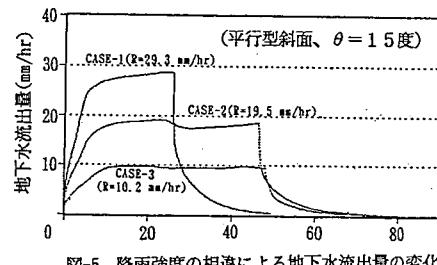


図-5 降雨強度の相違による地下水流出量の変化

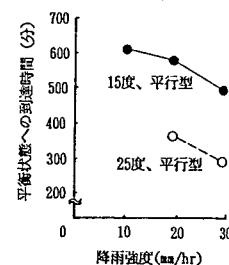


図-6 降雨強度と地下水流出量が平衡状態となるのに要する時間との関係

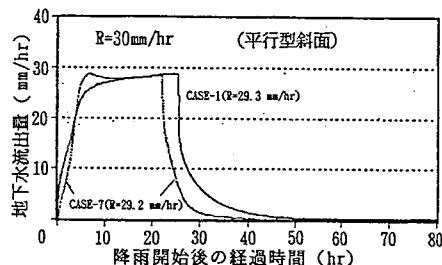


図-7 斜面勾配の相違による地下水流出量の変化

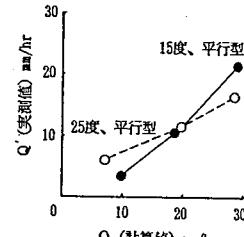


図-8 地下水流山量の実測値と計算値との比較

かる。そして、降雨終了直後の排水過程時には、降雨開始時より定常状態に至るまでの湿润過程時とは逆に、斜面長方向のフラックスはその表層部より徐々に減少していくようになる。

今、(2)式に着目すると、圧力水頭勾配は位置水頭勾配に比べて小さくなることが予想される。このため、位置水頭勾配のみによって得られたフラックス (q_x' ; $q_x' = K \cdot \sin \omega$ (4)) もあわせて算定した。図-9中白矢印は圧力水頭をも考慮した場合の、黒矢印は位置水頭のみによって得られたフラックスを示す。斜面勾配を25度とした場合の各測線間 ($\Delta x = 60\text{cm}$) における q_x と q_x' の関係を図-10に示す。図-11は斜面の最上端部 (D測線) と最下端部 (A測線) 間 ($\Delta x = 240\text{cm}$) における q_x と q_x' の関係を示したものである。

以上の結果より、雨水の移動過程を数10cm区間というように微視的に眺め、その挙動を詳細に把握しようとする場合には、圧力水頭勾配は無視し得ないものとなるが、斜面長がその表土層厚と比較すると極端に大となるといった実際の森林山腹斜面のような急勾配斜面内部におけるその基本的な雨水の浸透・流下過程を理解し、斜面表層部で生じる山腹表層崩壊機構等を考える上では、圧力水頭勾配は位置水頭勾配と比較して極端に小さくなるため、圧力水頭勾配はほとんど無視し得るものとなる (図-11) ことがわかる。

3.2 鉛直方向のフラックス

鉛直方向のフラックスは、各測線におけるテンシオーメータ設置間 (深度; 10cm~20cm, 20cm~30cm) 每に(3)式により算定した。また、鉛直方向の雨水の挙動に及ぼす圧力水頭の影響を評価するため、位置水頭勾配のみを考慮したフラックス ($q_z' = K \cdot \sin \omega$ (5)) をもあわせて算定した。 q_z と q_z' の関係を図-12に示す。

以上の結果より、鉛直方向のフラックスについては、斜面長方向のフラックスと比較して圧力水頭の影響が大きくなることがわかる。特に、降雨開始直前の土層全体が乾燥状態にある降雨初期や降雨終了後の排水過程時においては圧力水頭勾配と位置水頭勾配を考慮した場合、上向きのフラックスが存在し蒸発傾向が認められたのに対し、当然のことながら位置水頭勾配のみによるフラックスにはこれらの傾向は認められない。以上の結果より、雨水の鉛直方向の挙動を知るために、圧力水頭勾配は無視し得ないものとなることがわかった。

4. 今後の課題

斜面内での雨水の挙動を把握するとともに斜面崩壊の発生機構を理解する上での一助として、斜面浸透実験を実施した。今後は、上記実験により得られた知見を基に既に提案した『崩壊モデル』に改良を加え、より実現象に即した『モデル』とすることが課題となる。

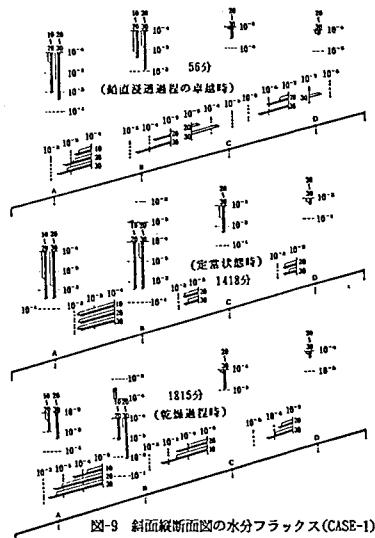


図-9 斜面横断面図の水分フラックス(CASE-1)

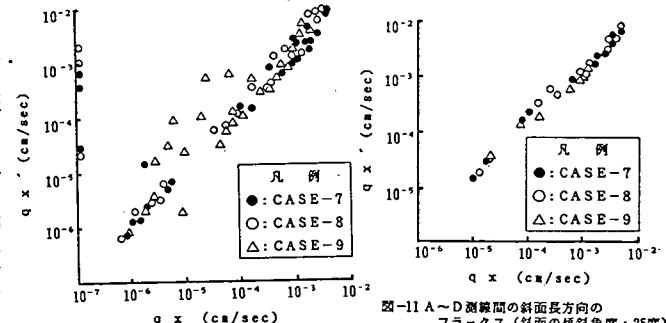


図-10 斜面勾配を25度とした場合の q_x と q_x' の関係

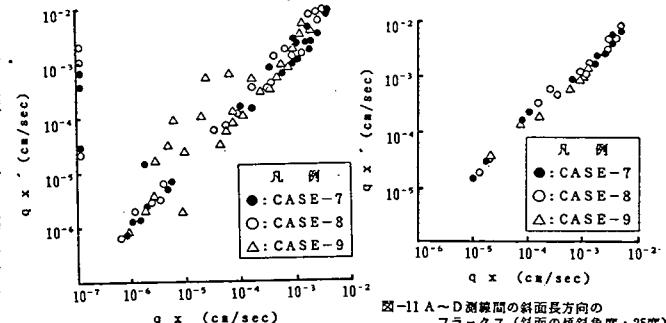


図-11 A～D測線間の斜面長方向の
フラックス (斜面の傾斜角度: 25度)

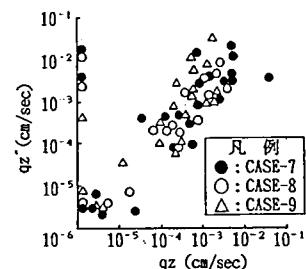


図-12 q_z と q_z' の関係図