

斜面土層の地中水の挙動に関する降雨実験

Rainfall Experiment on the Behavior of Subsurface Water in Slope Soil Layers

菅野 康*・松本 栄次**・寺島 治男***

Yasushi SUGANO, Eiji MATSUMOTO and Haruo TERASHIMA

I はじめに

降雨に伴う斜面崩壊の発生機構や発生条件を究明する上で、降雨中の斜面土層の地中水の挙動についての基礎的な研究が求められている(松本ほか, 1969など)。降雨に伴う斜面地中水の挙動を野外の斜面において検討した主な研究としては、Dunne and Black (1970) およびWeyman (1973) などの研究がある。前者は透水性のよい土壌での流出には地下水面の上昇による飽和地表流の影響が大きいことを認め、後者は透水性に関して不連続な面における飽和側方流の発生が流出に大きく影響すると考えている。近年わが国でも、新藤 (1983, 1984)、Tanaka *et al.* (1981)、田中ほか (1983)、望月・松本 (1986) などのように、斜面地中水の挙動についての研究が実際の山地・丘陵斜面において検討されるようになってきた。

一方、斜面模型を用いた降雨実験によって、斜面崩壊の要因を解明することを目的とした研究も、近年数多く行われはじめた(たとえば、小橋ほか, 1971; 小橋ほか, 1975; 寺島ほか, 1976; 寺島ほか, 1977; 森脇, 1978; 寺島ほか, 1980など)。しかし、崩壊に先立つ時間に、斜面土層中において地中水の状況がどのように変化していくかについて詳細に検討した実験は多くない。

本研究は、大型斜面模型に人工的に降雨を与える方法によって、降雨に伴う斜面土層中の地中水の挙動について検討しようとするものである。使用した大型斜面模型は、難透水性の基盤土層を透水性の表土層が覆うという二層構造の斜面模型である。これは、ルーズな土壌層と若干緻密な基盤土層からなるものが多い実際の台地・丘陵斜面を模したものである。今回の実験では、このような斜面に浅い谷地形を設け、地表の微妙な起伏や土層の構造に対応して地中水の挙動がどのような特徴を示すかを検討することにした。

II 実験

1) 人工降雨装置

実験は科学技術庁国立防災科学技術センター内、大型降雨実験室の施設、設備を使用して行った。

大型降雨実験装置は、実験用移動建屋(縦48m×横72m×高さ16m)の上部天井面に雨水供給用配管を敷設し、これに雨水放出用ノズル(降雨強度15mm/h~200mm/hに応じて4種類の孔径のものを各544個)を取り付けたものである。地上16mにあるこの装置は、最大72m×44mの散水面積に対して、散水強度200mm/hの時、1時間30分連続的に散水できる能力を持っている。その雨滴の粒径は直径0.3mmと細粒であり、雨量分布精度は地上レベルで±10%以内であ

*筑波大学・院・環境科学研究科(現 住宅・都市整備公団) **筑波大学地球科学系 ***国立防災科学技術センター

る。

2) 実験斜面

実験斜面には四角錐台の形をした台地模型の一側面を用いた。この台地模型の底面は縦40m・横30m、上部の平坦部(天端)は縦9m、横5.2mで、その高さは6mある。使用した斜面の斜面長は12.5m、平均傾斜は25°である。

台地模型本体の構成物質は難透水性の砂質粘土ローム土であるが、実験斜面として使用した一側面と天端とは、砂質の表土層で覆われている。以下では、基盤をなす砂質粘土ローム土を下層、砂質の表土層を上層と呼ぶことにする。上層の厚さは天端および斜面先端部で50cm、斜面下方へ漸増して斜面下端では1mである。上層と下層との境界面は傾斜30°の平滑斜面をなしている。谷地形はこのような土層構造の斜面の中部から下部わたって、上層のみを浅く削ってつくられている。したがって、谷底部ほど上層が薄くなっており、最も薄い部分では20cmほどである(第5図参照)。

上・下層構成物質それぞれの物理的性質は以下の通りである。

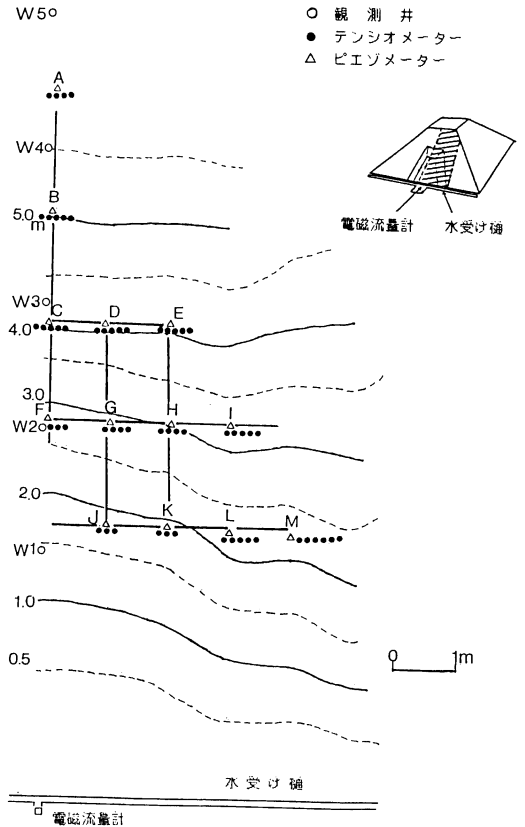
固相率・空隙率: 平均値として固相率は上層物質が48.9%, 下層物質が39.1%, 空隙率は上層物質が51.1%, 下層物質が60.9%である。

透水係数: 上層物質は飽和透水係数 1.9×10^{-2} cm/secで、透水性良であり、下層物質は飽和透水係数 6.5×10^{-3} cm/secで、透水性普通~低い部類に属す。

粒度特性: 上層物質はかなり粒径が揃っていて、全てが粗砂と細砂よりなっている。一方、下層物質は粗砂が1%, 細砂が78%, シルト・粘土が21%である。

3) 測定項目

この実験では、地下水位、土層中の水理水頭値、および流出量の測定を行った。従来の実験の結果(蒲野, 1988)から、下層の地下水とは不連続な地下水体が上層中に生じることが明らかになっているので、地下水位については下層のものと上層のものそれぞれを測定した。観測機器の配置は第1図に示した通りである。谷の概形がほぼ左右対称であるため、測器は谷の片翼(左岸)だけに設置した。以下それぞれ



第1図 斜面模型の地形と観測機器の配置

れの測定方法について述べる。

a) 下層の地下水位

下層の地下水位は台地模型の基底に達する観測井を用いて測定した。観測井には直径5cmの塩化ビニールのパイプを使用した。ストレーナーは下底から約1m上の所まで設けられている。これらの観測井は、谷底沿いに斜面下部より天端にかけて、ほぼ等間隔に5本(W1~W5)埋設されている。水位の計測はすべて20分間隔の手測で行った。

b) 上層の地下水位

水理的に不連続である土層境界面より上、すなわち上層中に、下層の地下水と分かれて生じる地下水体の水位を測定するには、直径3cmと直径5cmの塩化ビニールパイプ製のピエゾメーターを使用した。これらは谷底および谷の左岸に、斜面縦断方向に2

m間隔、横断方向に1m間隔に、総計13本(A~M)設置した。ピエゾメーターの下底は土層境界面とほぼ一致するように埋設された。直径5cmのパイプを用いたA~E及びM地点では、水位計を設置して自動計測、直径3cmのパイプを用いた残りのF~L地点では、20分間隔の手測を行った。

c) 土層中の水理水頭値

不飽和帯での地中水の動きを調べるために、テンシオメーターを用いて斜面土層中の圧力水頭値を測定した。この圧力水頭値に重力水頭値を加え水理水頭値を得た。ここに、重力水頭値は台地模型の基底にとった基準面からテンシオメーターのポラスカップまでの高さである。

テンシオメーターはピエゾメーターを設置した各地点に、3ないし6本ずつ、ポラスカップの埋設深度を変えて設置した。おもに上層中と土層境界面付近の地中水の挙動の把握が目的であるため、ポラスカップは上層中に重点的に配置し、下層中には、原則として1個ずつ、その上縁部に埋設するにとどめた。設置数は全部で57本で、計測はすべて20分間隔の手測で行った。

d) 流出量

降雨に対する実験斜面からの流出特性を知るために、流出量を測定した。実験斜面下端に沿って水受け樋をひき、実験斜面から流出する直接流出と地下水流出を中央のトレンチに集めて電磁流量計に流れ込むようにして自動計測した。

4) 実験方法

今回の実験は、実際に崩壊を発生させて崩壊発生の時点における諸条件を直接検討するものではない。したがって、むしろ大規模な崩壊が発生せず、繰り返し実験を行いうような降雨条件を選んだ。すなわち、降雨強度は1時間あたり15mm、25mm、35mmの3段階、降雨継続時間は状況によって140~280分と加減した。この場合、降雨停止のおおよその目安は、斜面上部の観測井における下層の地下水位が急上昇しはじめた時点である。

降雨実験は、1988年7月22日から9月8日までの間にさまざまな降雨条件で6回実施した。1つの降雨強度のもとで各2回の実験を実施したが、各実験

は、前回の実験の影響を少なくするため、3~4日の間隔をおいて行った。

III 実験結果および考察

上記の諸実験の結果、降雨強度が大であるほど、また、前回の降雨以後の時間が短いほど、上下の各土層内における地下水体の形成・発達などの水文学的応答が早くなることが示されたが、地中水の挙動の様式については実質的な差異がみられなかった。したがって、今回の報告では、主として8月12日に実施された降雨強度25mm/hの実験の結果について述べることにする。この実験の降雨時間は180分、計測時間は220分である。

1) 上層中の水理水頭分布と地下水位

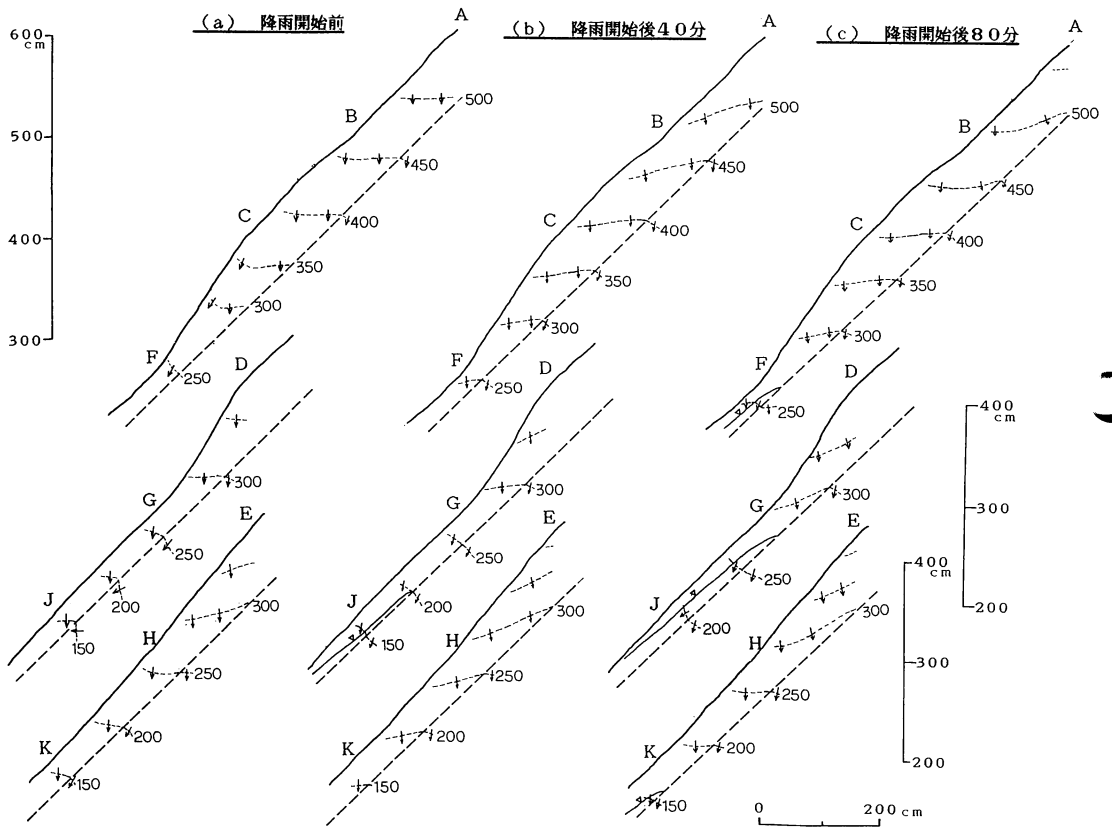
上層中および下層上縁部の地中水の水理水頭分布とそれから推定される地中水の流動、および上層中に発達した地下水体について、斜面の縦断方向と横断方向の断面に分けてみる。

a) 縦断方向の断面

第2図a~fは、この実験における、地中水の水理水頭分布・流動方向(縦断方向成分)と地下水面の経時変化である。図中、A~Kはテンシオメーターとピエゾメーターの埋設地点を示す(第1図参照)。したがって、A-F断面は谷底に沿った斜面中~上部の縦断面、D-J断面は谷底近辺の縁辺部の斜面中~下部の縦断面である。なお、これらの図では縦(高度)のスケールが誇張されているため、流線の方法は、van Everdingen (1963)の方法によって記入されており、等ポテンシャル線と垂直にはなっていない。

降雨開始前(第2図a)：いずれの断面においても上層中に地下水体は形成されていない。また、上層中の不飽和地中水はおおむね鉛直降下流をなしている。ただし、ごく一部において、地表近くを斜面下方へ向かう側方流や、下層上縁部で上向きないし側方への不飽和流など、前の実験の影響が残ったと思われる現象が認められる。

降雨開始後40分~80分：降雨開始後40分(第2図b)には、前述のような前の実験の影響がほとんど消え、鉛直降下浸透流が全般的に卓越している。ま



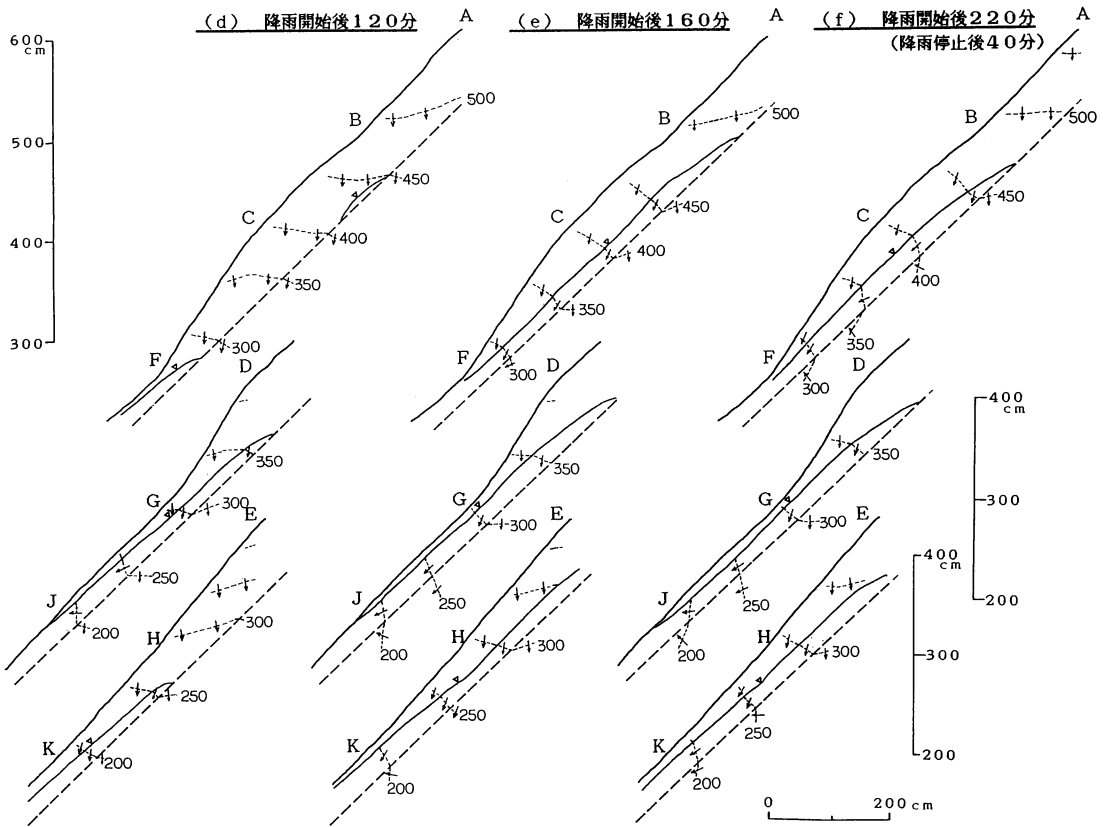
第2図(その1) 上層中の水理水頭分布と地下水面 (降雨強度25mm/h)

た、D-J断面の斜面下部(地点J)ではすでに地下水体が成長しはじめており、その付近の上下層の地中水の流れは若干の側方流成分をもっている。A-F断面の斜面下部には測点がないため地下水体の形成の有無は明かでないが、D-J断面と類似した状況と考えられる。降雨開始後80分(第2図c)には、A-F断面とD-J断面では地下水体が斜面中部まで拡大し、その内部では顕著な飽和側方流が生じている。E-K断面では、ようやく斜面下部に地下水体が出現しはじめている。

降雨開始後80分~120分:各断面とも不飽和帯においては鉛直降下成分が卓越したまま、地下水体の成長が継続した。ただし、A-F断面では例外的に地点Cでの地下水体の形成が遅れ、斜面下部からの

地下水体と離れて地点Bに、降雨開始後100分頃から局所的な地下水体が形成されはじめた。降雨開始後120分の時点(第2図d)では、D-J断面の斜面下部で(おそらくはA-F断面の斜面下部でも)地下水水面が地表面に達し、地表面に向かう地下水の流れが認められる。一方、E-K断面では、斜面中部(地点H)まで達した飽和帯で側方流成分が現れだした。なお、この時点でも、下層の上縁部では鉛直降下成分が卓越している。

降雨開始後120分~180分:この間、降雨開始後140分には、斜面最上部(地点A)を除いて全ての部分に顕著な飽和側方流が卓越する連続的な地下水体が形成されている。また、降雨開始後120分頃から一部において見られたことであるが、不飽和帯の等水理



第2図(その2) つづき

水頭線が立ち上がりはじめて不飽和側方流の発生を示すようになる。ただし、A—F断面(おそらく他の断面も)の斜面最上部やE—K断面の斜面中部以上は、依然、鉛直降下流の卓越域をなす。降雨開始後160分(第2図e)には、地点F・J・Kなどにおいて、下層上縁部の流れが下層から上層への上向きに転じていた。

降雨開始後180分に降雨を停止した。上層中の地下水位は低下し始めたが、これ以降も、降雨開始後220分の第2図fに見られるように、地表面へ向かう上層の地下水の流れは一部の地点では継続しており、また、とくに各断面の斜面下部では、下層上縁部から上層へ向かう流れが一層顕著になっている。

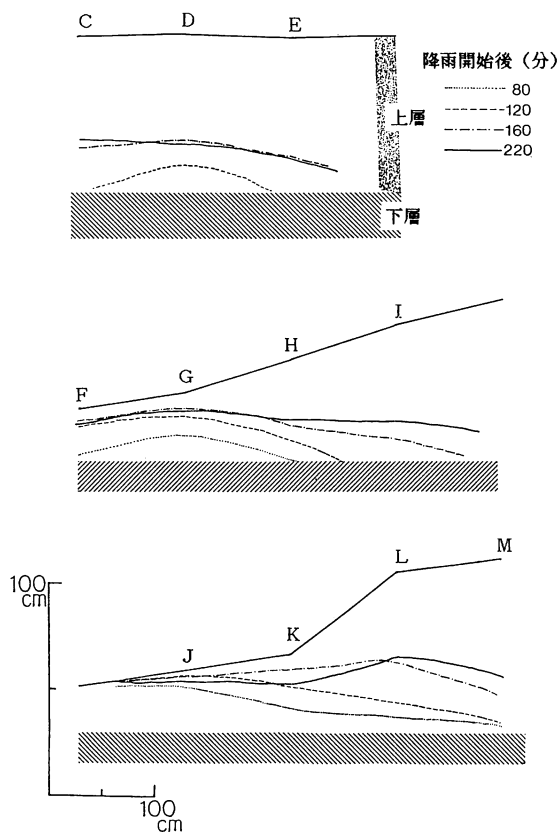
b) 横断方向の断面

第3図は斜面横断方向の断面における地下水面の

経時変化である。C—E断面は斜面中部であるが谷頭より上方にあたり、断面全体が厚い上層からなる部分、F—I断面は同じく斜面中部であるが上層が薄い谷頭部を含む断面、そしてJ—M断面は斜面下部にあっている。

若干の例外はあるが、一般に、谷底部では地下水体の形成が早期に開始され、急速に成長して地表面に達し、降雨停止とともに速やかに低下しはじめた。一方、上層が厚い谷の縁辺部では、地下水体の形成が遅れて始まり、いったん形成された後には急速に成長し、また、降雨停止後もかなりの時間、地下水位の上昇傾向が継続した。

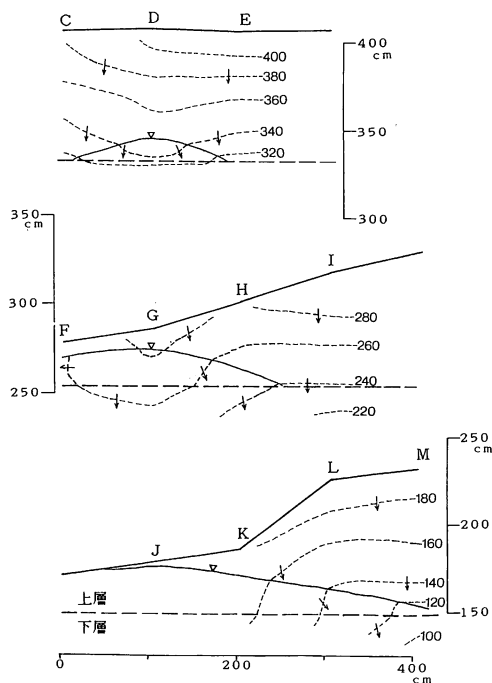
第4図は横断方向の地中水の挙動を示す一例で、同じ実験における降雨開始後120分の地下水位と水理水頭分布である。不飽和帯での等水理水頭線はほ



第3図 斜面横断面における上層地下水面の経時変化 (降雨強度25mm/h)

ほぼ水平で、横断方向の不飽和流は認められない。一方、早期に形成された谷底部の地下水体内の流れには、若干であるが、谷底部から谷縁辺部に向かう成分が認められる。

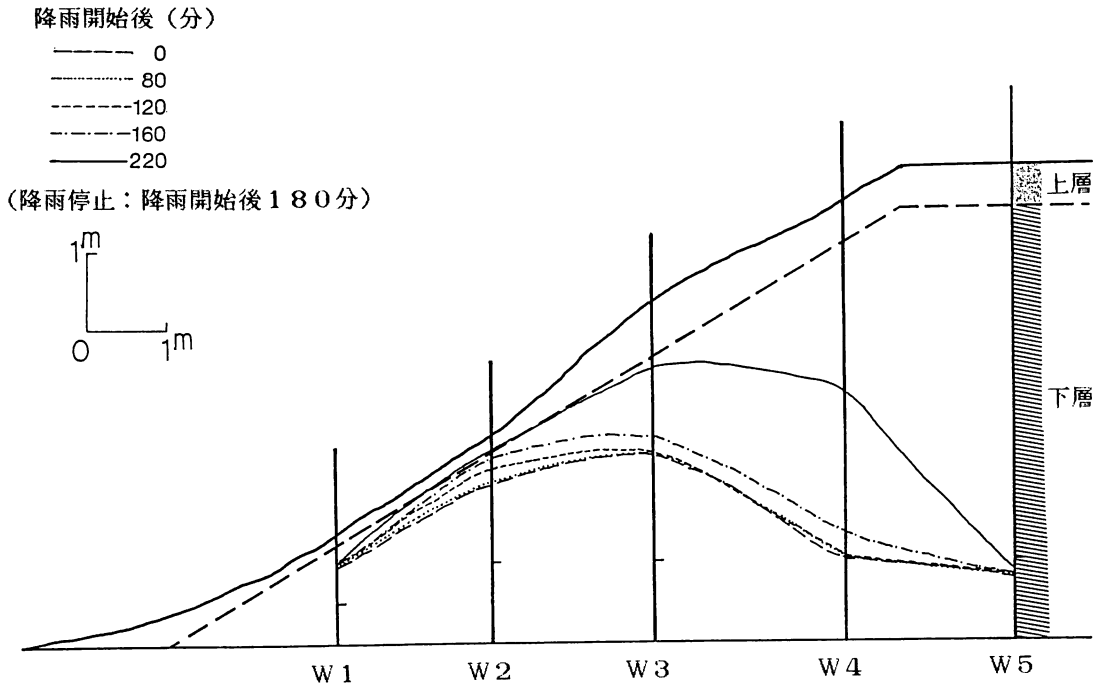
以上で見てきた上層の地中水の挙動をまとめると次のようである。降雨初期には、全般的に鉛直降下不飽和流が卓越するが、これによって、まず、斜面下部の谷底近辺に地下水体が形成され、これが斜面上方および谷の縁辺部に拡大していく。地下水体内では、はじめ斜面下方への側方飽和流が卓越するが、しだいに地表に向かう流れも現れるようになる。また、谷底部から谷縁辺部に向かう流れも発生する。不飽和帯では、一般に鉛直降下流が卓越し続けるが、地下水体の成長に伴って、斜面下方への側方流成分



第4図 斜面横断面における上層地中水の水利水頭分布と地下水面 (降雨強度25mm/h, 降雨開始後120分)

を若干もつようになる。やがて、下層から上層へ向かう流れが加わるようになるが、これは後述のとおり、下層の地下水位の上昇に係るものであろう。

このような斜面モデルにおける上層中の地下水体の形成・成長に関しては、斜面上の位置とともに上層の厚さが大きな要因となっていると考えられる。すなわち、まだ全般的に鉛直降下流が卓越していた降雨初期に谷底部の斜面下部にいち早く地下水体が形成されたのは、谷という地形の直接の影響ではなく、おもに谷の部分で上層がもっとも薄かったことによるとみるのが妥当である。このことは、谷底に集中するような地中水の流動は認められなかったこと、また、おなじ斜面下部でも上層が厚い所では地下水体の形成が遅かったことなどからも裏付けられよう。ひとたび地下水体が形成されると、顕著な斜面下方への飽和側方流が生じて、斜面下方の地下水を涵養する。このため、斜面におけるこの種の地下水体は、一般に、斜面下方から上方へ向かって成長していく



第5図 下層中の地下水面の縦断形の経時変化(降雨強度25mm/h, 谷底に沿う縦断面図). W1~W5は観測井で, 下底から目盛り状のマークまでストレーナーが設けられている

形をとると考えられる。

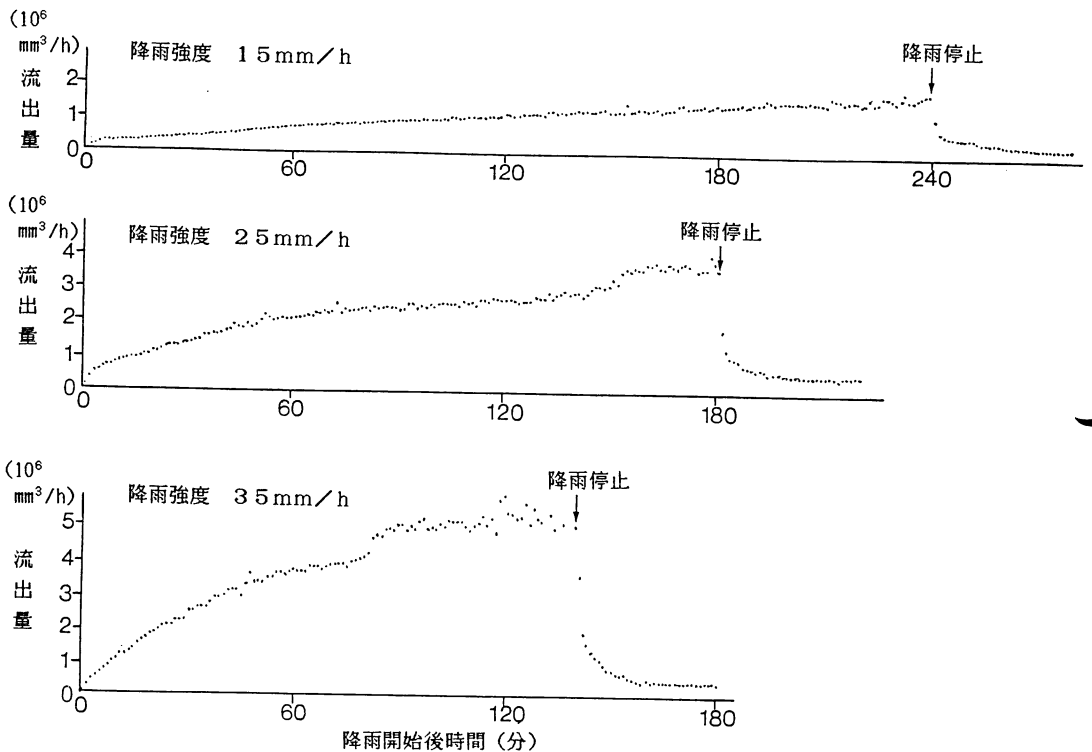
2) 下層の地下水位

第5図は, 同実験における下層の地下水面の縦断形の時間的变化を示すものである。降雨開始前(0分)の地下水面は, 斜面中部(W2, W3付近)で高くなっていて, 斜面上部(W4, W5付近)に向かって徐々に低くなっている。この特徴的な形態は全ての実験を通してみられた。このような地下水面の形態は, 背後に地下水の涵養域をもたない今回の斜面模型のような孤立丘の特殊性とも考えられるが, 今後検討を要する問題である。

降雨開始後の地下水面の応答は, 斜面中部のW2地点において最も早く, 降雨開始後80分頃から地下水位が上昇しはじめた。地下水位上昇は降雨停止後まで続くが, 160分には下層の地下水面がほぼ土層境界面にまで達して, 上層中の地下水と合体している。一方, 斜面中・上部のW3・W4地点において

は, 降雨開始後120~140分頃まで地下水位はほとんど変化しなかったが, その後急速な上昇が始まり, 降雨停止(開始後180分)後まで継続した。斜面下部のW1地点における水位はW2地点に次いで応答を始めたが, 上昇はきわめて緩慢であった。また, 天端下のW5地点の地下水位にはほとんど変化がみられなかった。

降雨強度15mm/hおよび35mm/hの実験の場合にも, 下層中の地下水位の変化の速さには差があるものの, そのパターンは降雨強度25mm/hの場合とほとんど同一であった。ただし, 降雨強度15mm/hの実験では, 降雨開始後240分に降雨を停止した時点においても地下水位が土層境界面まで達することはなかったのに対し, 35mm/hの実験では, 斜面の中・下部において, 降雨開始後120分頃までにほぼ土層境界面に達している。



第6図 実験斜面からの流出量の経時変化 (ハイドログラフ)

3) 流出量

降雨強度15・25・35mm/hの3つの実験における実験斜面からの流出量の経時変化 (ハイドログラフ) を第6図に示す。

降雨強度15mm/hの場合、流出量は穏やかに増加し、降雨停止と同時に急減する。降雨強度25mm/hの場合には、当然のことながら、15mm/hの場合よりも急速に流出量が増大している。流出曲線の形自体は15mm/hの場合とほとんど変わらないが、降雨開始後150分付近で流出量が急に増大する点が異なっている。降雨強度35mm/hの場合には、さらに流出量の増加率が大きく、また、この場合にも、降雨開始後80分ごろに流出量の飛躍的な増大が認められる。なお、降雨停止後、流出が完全にみられなくなるまでの時間はいずれの降雨強度の場合でもほぼ同じで、降雨停止から約24時間経過した後であった。

降雨強度25mm/hおよび35mm/hの実験において認

められた流出量の飛躍的な増大が生じる時期は、斜面中部において下層の地下水面が上層のそれと合体した時にほぼ一致している。一方、上層と下層の地下水体の合体が生じなかった降雨強度15mm/hの実験では、流出量の急増はみられない。これらのことから、この種の流出量の急増は、斜面中部の下層地下水が上昇してきて、これが流出に加わったために生じたものと考えられる。このことは、前に述べた上層地中水の水利水頭分布・流動の経時変化からも裏付けられよう。

IV おわりに

難透水性土層 (下層) を透水性の表土層 (上層) が覆う斜面の一部に、深さが表土層の厚さにも満たない浅い谷地形を刻んだ大型斜面模型に人工的に雨を降らせ、斜面土層中の地中水の挙動が、降雨に伴いどのように変化していくのかを検討した。その結

果、以下の諸点が明らかになった。

1) 透水性の表土層内の地中水の挙動を支配する主な要因は表土層の厚さなどの土層構造である。すなわち、降雨初期には斜面全般に不飽和降下浸透が卓越し、やがて表土層中に地下水体が形成されるが、この際、表土層が薄いところほど早期に地下水体が形成される。今回の実験で用いた斜面模型の場合、谷底部の上層がもっとも薄かったために、谷底部の斜面下部にまず地下水体が現れた。ひとたび地下水体が形成されると、そこには斜面下方に向かう顕著な飽和側方流が生じて斜面下方の地下水体を涵養する。このため、地下水体は同じ谷底部でも斜面下部ほど早期に形成され、次第に斜面上方へと成長する。また、早期に形成された谷底部の地下水体から斜面横断方向へ向い、上層が厚くて地下水体の形成が遅れた谷縁辺部を涵養するような流れも生じる。

2) 難透水性の基盤土層(下層)中の地下水の水位は特徴ある変化を示す。とくに、斜面中部の下層地下水面は、降雨開始後比較的長時間、不変のままであるが、やがて急速に上昇しはじめて土層境界面まで達して表土層(上層)の地下水と合体する。このような下層地下水の動きの機構については今後検討すべき問題である。ここでは、斜面中部の下層地下水面のこのような急上昇と、それによって生ずる下層から上層への地下水流の付加が、斜面流出量が急増する現象、ひいては斜面崩壊の発生に密接な関係をもっている可能性を指摘するにとどめておく。

謝 辞

本研究に際し、終始有益な御助言をいただいた筑波大学地球科学系の古藤田一雄教授、安仁屋政武助教授、田瀬則雄講師、田中正講師に厚く御礼申し上げます。また、実験にあたっては、筑波大学環境科学研究科学生の吉沢誠氏、鈴木克律氏に格別の手助けをいただきました。重ねて御礼申し上げます。

文 献

蒲野秀之(1988):降雨に伴う斜面土層中における地中水の挙動について。筑波大学大学院環境科学研究科修士論文(未発表), 94p.

小橋澄治・今井重利・草野国重(1971):表層崩壊の実験(II, III). 新砂防, 79, 6-12.

小橋澄治・草野国重(1975):表層崩壊の実験(IV). 新砂防, 96, 6-12.

新藤静夫(1983):谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動. 昭和57年度文部省科学研究費自然災害特別研究成果報告書, 94p.

新藤静夫(1984):谷頭部斜面に発生する崩壊と地中水の挙動, 第2報. 昭和58年度文部省科学研究費自然災害特別研究成果報告書, 160p.

田中 正・安原正也・酒井 均(1983):丘陵地源流域における流出現象と地中水の挙動. 丘陵地の流出特性に関する研究. *Miscellaneous Publication, Institute of Geoscience, University of Tsukuba*. No 1, 37-49.

寺島治男・福囿輝旗・森脇 寛・中根和郎・富永雅樹(1976):斜面崩壊に関する実験的研究(I). 国立防災科学技術センター研究報告, 15, 75-88.

寺島治男・福囿輝旗・森脇 寛(1977):斜面崩壊に関する実験的研究. 新砂防, 102, 18-24.

寺島治男・新藤静夫・田中芳則・井口 隆(1980):滑面を有する斜面の崩壊実験. 国立防災科学技術センター研究報告, 24, 111-124.

松本栄次・井口正男・石井孝行(1969):豪雨に伴って多摩丘陵におきた斜面崩壊. 東京教育大学地理学研究报告, 8, 103-112.

望月倫博・松本栄次(1986):谷頭部の土層中における地中水の挙動. 筑波大学水理実験センター報告, 10, 81-94.

森脇 寛(1978):斜面崩壊の発生過程について(I). 国立防災科学技術センター研究報告, 19, 51-64.

Dunne, T. & R.D. Black (1979): An experimental investigation in permeable soils. *Water Resour. Res.* 6, 478-490.

Tanaka, T., Sakai, H. and Yasuhara, M. (1981): Detection of dynamic responses of subsurface water during a storm event with tensiometer and piezometer. *ハイドロロジー*, 11, 1-7.

van Everdingen, R.O. (1963): Groundwater flow-diagrams in sections with exaggerated vertical scale. *Geol. Survey Canada, Paper*, 63-27.

Weyman, D.R. (1973): Measurements of the down-slope flow of water in a soil. *J. Hydrol.*, 20, 267-288.