

実験斜面における表面流出の発生に関する研究

On Surface Runoff from the Experimental Slope

国立防災科学技術センター 正員 ○ 岸井 徳雄

国立防災科学技術センター 大倉 博

1. まえがき

洪水流出特性の基本として、流出率、流出係数があるが、それらの値は、流域の条件によっても変化するが、降雨強度、総雨量、継続時間等によっても変化する。この流出率、流出係数が降雨強度等によって変わる原因を説明するためには、実流域の斜面で生起している流出現象、特に洪水流出の主成分である表面流出を観測し、流出率、流出係数との関連を明らかにすることが重要である。

ここでは、第1歩として以下に述べる土壌水分と表面流出との関係解明の可能性を明らかにするため実験斜面において実験を行ない有効な結果が得られたのでここに述べる。ここで表面流出と早い中間流出とは、實際上、分けることは難しく、本実験では、両者を一括して表面流出として取り扱う。

実験上、採用する降雨特性としては総雨量、継続時間も考えられるが、本実験では降雨強度を取り上げ、降雨強度と流出率、流出係数の関係、さらに降雨強度と表面流出発生域との関係について実験を行なった。

実験は、当センターの大型降雨装置内に作った実験斜面上に3種類の強度の降雨を発生させて行なった。このような実験装置を用いると任意の降雨強度が得られ、さらに、実流域では大きい降雨強度の洪水記録を得にはある程度の期間が必要であるが、実験では、任意強度に対する流出率、流出係数および表面流出の発生に関して短期間で観測結果が得られ好都合である。

2. 実験方法

2-1 実験斜面の諸元

当センターの大型降雨実験装置内に、2年間養生した実験斜面を対象にした。2年間の養生期間に斜面上には1年生の草木が繁茂し、表層土壌の空隙は自然状態に近く、空隙率は85%程度となっている。斜面は長さ138m、巾4mの細長い矩形で傾斜角は10度であり、全域にわたって深さ50cmまでは関東ロームに被われ、その下の層は、粘土質の難浸透性の土層である。斜面の上端および側方は塩ビ製の波板を深さ70cmまで埋設してある。(図-1)

実験斜面は、2年間養生したが人工斜面なのでその表層土壌の性質を明らかにしておかねばならないので、粒径分布、比重、透水係数の測定を行なった。

粒径分布は、斜面中心部の地表下5cm、25cm、40cmから採取した土壌を対象にした。(JIS A1218の方法による)地表下5cmでの土壌の粒径加積曲線を図-2に示した。この図から、粒径は0.0015mmから0.84mmまで分布し、0.054mmから0.84mmまでの粒径の土壌が大部分を占め、0.054mm以下の粒径の土壌少ないことがわかる。25cm、40cmでの深さの土壌の粒径分布も同様な傾向を示した。

含水比は、地表下5cm、25cm、40cmで、それぞれ637%、725%、717%であった。

比重は、含水比と同様の深さで、それぞれ269、270、270であった。測定方法は、JIS A1202によった。

透水係数が斜面上でどのような平面分布をしているかは、表面流出の発生域を決める重要な因子の一つと考えられる。そこで透水係数の斜面上での分布を把握するため、斜面下部(下流端の集水トビから斜面上方へ0.7m)、中央部(同じく4.5m)、上部(同じく9.0m)のそれぞれ地表下5cmの土壌を採取してその値を測定した。測定方法は、JIS A1218によった。その結果、斜面下部で透水係数の値は $5.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、中央部で $4.6 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、上部で $5.9 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ が得られた。これらの値から、透水係数は、斜面

下部から上部にわたってほぼ様な値を持つと言える。

2-2 表面流出量の測定および水分計の設置

表面流出量の測定方法は、斜面下流端で地表下 5 cm に斜面表面に平行に上方へ向って巾 30 cm のトタン板を入れ、地表を流下して来る雨水をトビで集水した。これを開度 30 度の三角ゼキに導き越流深を測定し流量を求めた。越流深は、触針型サーボ水位計（精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ）で計測した。

表面流出量の定義として、地表下どの程度の深さまでを流下して来る雨水を言うかは困難である。地表は細かい凹凸があるため余り浅くトタン板を入れると、凹部からの表面流出は捕捉されずに流れ去る。逆に、余り深くトタン板を入れると土壌内を浸透流下して来る遅い中間流出まで捕捉することになる。これらのことを考慮して本実験では、地表下 5 cm にトタン板を入れて、流下して来る雨水を集水し、これを表面流出量とした。

さらに、土壌水分が飽和する時間を観測するため、前述した斜面下部、中央部、上部にそれぞれ地表下 5 cm の深さに水分計（テンションメータ）を設置した。検出部のポーラスカップは直径 2 cm、長さ 6 cm である。圧力水頭を計るための圧力変換器は DHF 1KG（出力 3 mV/水頭 cm）を使った。

面積雨量の算出は、6 個所の雨水マスの湛水深によった。雨水マスの大きさは、内径 20 cm、高さ 30 cm、肉厚 7 mm の塩ビ製の円筒である。

2-3 降雨強度

表面流出が降雨強度によってどのように変化するかを観測するため、総雨量を一定とし、降雨強度 20 mm/hr, 50 mm/hr, 100 mm/hr の 3 種類の矩形波の降雨を与えた。

実験後算出された降雨強度、総雨量、降雨継続時間は次のとおりである。総雨量は 6 個の雨量マスの算術平均値、降雨強度は総雨量を降雨継続時間で除した値である。

A. 降雨強度	19.8 mm/hr	総雨量	99.2 mm	降雨継続時間	5.00hr
B. 降雨強度	50.0 mm/hr	総雨量	99.9 mm	降雨継続時間	2.00hr
C. 降雨強度	104.7 mm/hr	総雨量	112.0 mm	降雨継続時間	1.07hr

3. 表層土壌の水分状態の変化

表層土壌の浸透能は土壌中の水分量の関数として表わされるという実験結果¹⁾より考えると表面流出の発生量の多少は、表層土壌中の水分状態、特に飽和か不飽和かの状態によって大きく異なってくる。

そこで、2-2 で述べた個所に水分計（テンションメータ）を埋設し、土壌中の水分変化の状態を知るために圧力水頭を測定した。この結果の 1 例として B の場合を図-3 に示す。同図の縦軸には水分計の圧力水頭 (cm) を横軸には降雨開始からの時間をとってある。B, C の場合も同様な結果が得られている。

3-1 降雨強度別の圧力水頭の変化

降雨強度毎 (A, B, C) に降雨開始から飽和に達する状態を斜面の各部について述べる。なお、ここでは水分計で圧力水頭が 0 cm を越えた時点を飽和と定義する。

A の場合では、降雨開始後急激に圧力上昇があり、水頭で 80 cm 程度で、20 分後にはほぼ圧力は定常状態となる。各時刻で斜面の各部における圧力は、斜面の下部、中央部、上部の順に圧力は小さくなっている。圧力水頭が 0 cm より大きい部分、すなわち、土壌が飽和した部分は、斜面の下部のみであり、中央部、上部では未だ飽和状態に入っていない。

B の場合では、圧力水頭が 0 cm を越える時間は、A よりさらに短縮し、斜面の下部で 8 分、中央部で 30 分経過した後である。上部では圧力水頭は 0 cm まで達していない。この結果、斜面下部と中央部では土壌は飽

和状態にあり、上部では不飽和状態が続く。

C の場合は、A および B の場合よりさらに圧力増加は急激であり、降雨開始後 6 分で斜面下部は飽和し、中央部では 7 分、上部では 17 分経過後、土壌は飽和状態となる。すなわち、斜面下部から上部までの表層土壌は、降雨開始後 17 分以後飽和状態が継続している。

以上、A の場合から C の場合までの圧力水頭からみた飽和開始時間をまとめると図 - 4 のようである。この図から、降雨強度が大きくなると土壌が飽和する時間は短くなる。さらに、斜面上では、降雨強度が大きくなると表層土壌が飽和状態となる区域は斜面上方へと拡大することがわかる。

3 - 2 斜面下部の水分変化

斜面下部において表面流出が始まる時点までの土壌水分の増加量を推算してみる。

2 - 1 で述べた透水係数は通常の強度の降雨が重力で浸透するに十分な大きさを持つため、地表では湛水が生じるまで不飽和浸透が行なわれる。斜面下端の地表では表面流出が発生するまで不飽和浸透が行なわれる。この地表流出は、自由水面が難浸透性の粘土上から上昇して地表まで達したためではなく、地表から地表下 5 cm 程度までが新たに飽和したものである。B の場合は、斜面下部の降雨前の圧力水頭（テンション）の値は $-35.9 \text{ cm H}_2\text{O}$ 、降雨開始 7 分後の表面流出発生時のそれは $-1.1 \text{ cm H}_2\text{O}$ である。同地点の土壌サンプルを加圧膜法で測定した土壌水分特性曲線によると、各々の圧力水頭に対応する体積含水率は 42.0 % と 61.4 % になり、両者の差が 19.4 % になる。地表から地表下 5 cm までの水分が 19.4 % 増加すると仮定すると、増加総量は 9.5 mm になる。一方、表面流出発生まで 7 分間の雨量は 5.8 mm になる。表層土壌の水分増分が降雨量より多いのは斜面上流からの流入のためと考えられる。同様の解析を C の場合について行なうと降雨開始から表面流出発生までの時間はケース 2 と同様 7 分であるが、表層土中の水分増加量が 9.25 mm、降雨量が 11.7 mm となり降雨量の方が多くなる。このように降雨強度の違いより、水分増加量と降雨量との関係に相違があるが目下検討中である。なお、ここで用いた表面流出発生時間は、5 章で説明するハイドログラフより読み取った。

4 . 表面流出発生域の変化

表面流出とは、まえがきで述べたように実際上は、早い中間流出を含むものであり、表面流出発生域とは、目視によって地表面が水膜で被われる区域および小水面が生じたと判別された区域とする。

以下、目視による表面流出の発生状況を述べる。

A の場合では、降雨開始から相当時間が経過するまで、降雨は斜面の地表から浸透し、表面流出の発生は観察されない。15 分経過後、斜面下部で所々に土壌の粒子表面が光を反射し、水膜の付着を示した。その後徐々に水面は増加し、3 時間 30 分経過後には、斜面下部において下端から 0.8 m までの区域において、水面または水膜による光の反射が見られ表面流出発生域が生じた。この区域は、最初は直径 2 ~ 3 cm の小さなくぼ地が小水面を形成し、さらにそれ以後、互いに連結されて小水面が拡大されて行った。従って、表面流出発生域は全面的に水で被われた面が形成されるのではなく、最初に小水面が形成され、次第にそれらが連結されて成長して行くものである。

B の場合では、降雨開始後 5 分で斜面下部および下流端から 2 m、6.8 m の区域で、くぼ地に直径 10 cm 程度の水面が形成され、15 分経過後には、それらの水面積の合計は 5 倍程度増加した。25 分経過後には、斜面下流端から 8.7 m までの区域に数多くの小水面が形成され、小水面と小水面の間は、土壌が飽和していることを示す水膜による光の反射が観察された。その後は表面流発生域は、斜面上方へ拡大しないで、一定面積（下流端から 8.7 m まで）を維持していた。降雨終了後は、5 分経過して小水面はほとんど消滅し、25 分経過後では、斜面下流端 2 個所で小さい湧水口からの少量の湧水を見たのみであった。

C の場合では、降雨開始後 4 分経過して、斜面下流端から 4.9 m までの区域の所々に小水面が形成され、6

分経過後その全域で光の反射がみられ、12分経過後には、10.3 mまでの区域の全域に小水面が形成された。降雨終了後は、3分経過して小水面はすべて消滅した。

以上のように、表面流出発生域は、小さなくぼ地に水面が生じ、その小さい湛水池の水深が増すとそれらが互いに連結されてより大きい水面を持つ湛水池となり、数10cmの大水面を形成した。水面を形成しない凸部の部分においても土壌は飽和状態にあり、水膜による光の反射が見られる。表面流発生域は、この両者から形成されていた。

5. 流出率、流出係数

斜面下流端で集水した表面流出のハイドログラフについてその変化を簡単に説明し、さらに流出率、流出係数を算出して目視による表面流発生域と比較する。

Aの場合のハイドログラフから、流出量は降雨開始から25分経過後までは増加し、25分から70分にかけて増加は著しくない。その後、漸次増加して流出高7 mm/hr程度の値を示し定常状態に入っている。

Bの場合では、降雨開始後50分から60分にかけて、流出高で20 mm/hr程度の部分で明りょうとは言えないが階段状ハイドログラフとなっており、流出量が一定に近い部分がある。

Cの場合では、降雨開始後50分まで上に凸の形で流出量は増大し、50分での流出高は60 mmに達する。その後降雨終了時までハイドログラフは波打つように複雑に変化する。

実験斜面を用いて表面流出を観測した例²⁾では、降雨強度が50 mm/hr以上になると明りょうな階段状ハイドログラフとなっている。しかし、本実験では50 mm/hrの降雨強度において明りょうな階段状ハイドログラフは得られなかった。この原因としては、本実験では、斜面の表層土壌内を流下する表面流出成分が比較的少なかったためであると考えられる。

次に以上3種類の降雨強度で得られたハイドログラフに基づいて流出率、流出係数を算出し、表面流出発生域との関連を降雨強度別に求めた。

流出率 (f_T)は

$$f_T = \frac{Q}{R}$$

で定義する。ここでQは洪水継続時間内の総流出量である。流出量の測定時間間隔は30秒であった。洪水継続時間は流出の低減状況を見た上で流出量が十分小さくなる時点までとした。Rは雨量マスによる面積雨量である。

流出係数 (f_P)は

$$f_P = \frac{q_p}{r_m}$$

で定義する。ここで、 q_p は降雨終了時の最大流出高、 r_m は降雨強度すなわち総雨量を降雨継続時間で除した値である。

AからCまでの場合について流出率を算出するとAの場合は0.302、Bで0.440、Cで0.469である。流出係数は同様に、Aで0.339、Bで0.515、Cで0.615である。

さらに、AからCまでの各々の場合において表面流出発生域が最終的に一定となった時点での表面流出発生域、すなわち最大表面流出発生面積率を算出するとAでは0.06、Bでは0.64、Cでは0.75である。

以上の流出率、流出係数、表面流出発生面積率と降雨強度との関係を図-6に示した。

図-6から明らかなように降雨強度が大きい程、流出率、流出係数が大きい値となること、表面流出発生面積率も同様に降雨強度が大きい程、増大することがわかる。さらに、表面流出発生面積率が大きくなると、流出率、流出係数の値も大きくなることが言える。

その他、流出係数は流出率より大きい値をとること、この傾向は降雨強度が大きい程顕著となることがわ

かる。

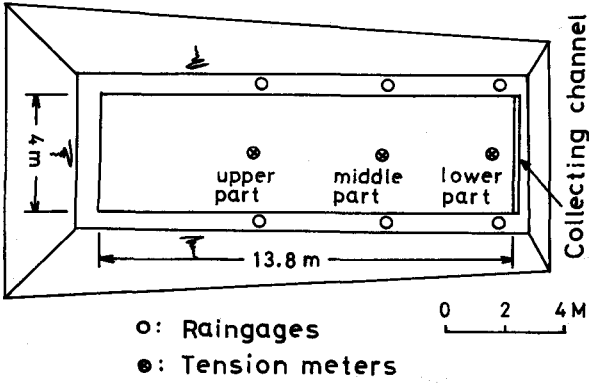
6. あとがき

ここで述べたことは実験で観測された事実を中心とした。今後、透水係数、体積含水率～PF 値の関係等を使って解析を進める予定であるが、今までに得られた結果を列挙すると次のようである。

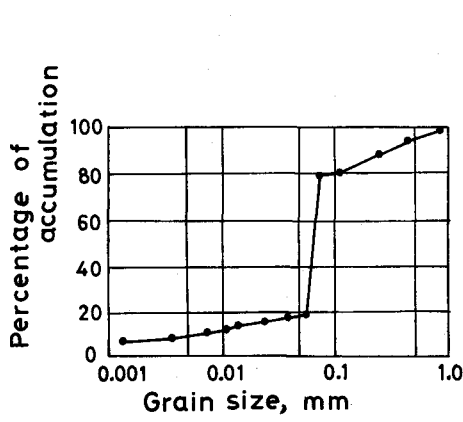
- (1) 表面流出発生面積率は降雨強度が大きくなると増大する。と同時に表面流出が発生する区域は降雨強度が大きくなると共に斜面の下部から上部へと拡大する。
- (2) 流出率、流出係数は値は、降雨強度が大きくなると共に増加する。
- (3) 従って、表面流出発生面積率が増大すると流出率、流出係数の値は増加する。
- (4) 表面流出発生域の表層土壌は水分計（テンションメータ）の測定値から飽和していると推定される。しかし、斜面下流端の表層土壌水分の増加量と降雨量との収支についてはさらに検討を進める必要がある。

参考文献

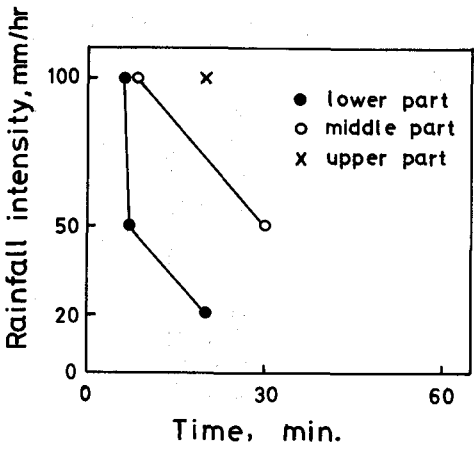
- (1) 青木佑久：山地流域における洪水流出の追跡。建設省土木研究所報告，第143号，pp 33～39. 1972
- (2) 木下武雄・中根和郎：表面流出に関する研究（その1）。国立防災科学技センター報告，第18号，pp35～49. 1977.



図－1 実験斜面



図－2 表層土壌の粒径加積曲線



図－4 降雨強度と表層土壌の飽和開始時間

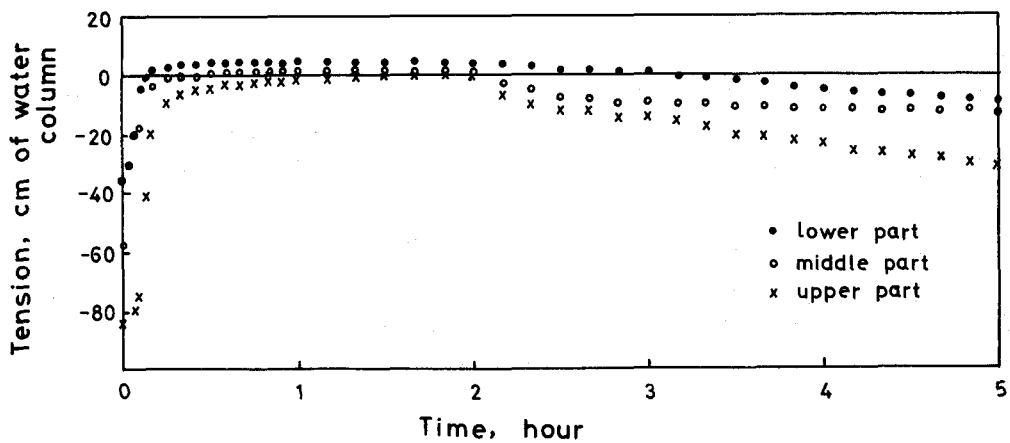


図-3 表層土壌内の圧力水頭の変化 (降雨強度: 50 mm/hr)

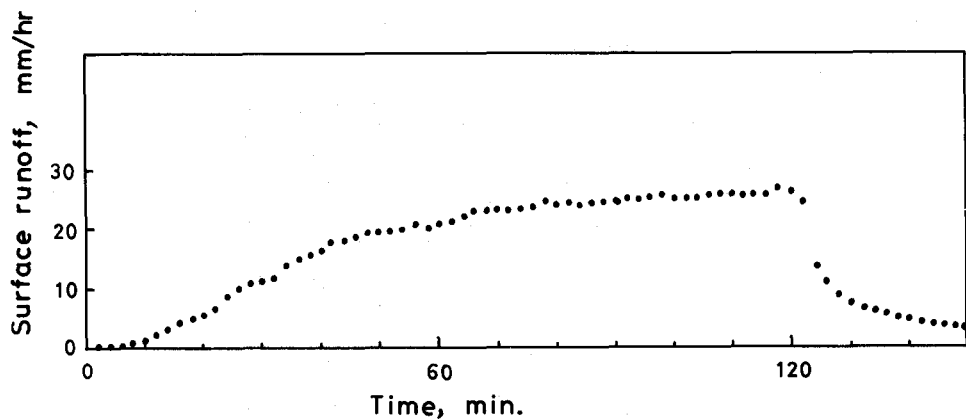


図-5 表面流出のハイドログラフ (降雨強度: 50 mm/hr)

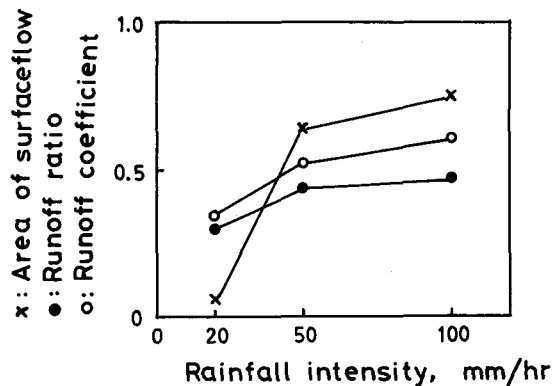


図-6 降雨強度と流出率, 流出係数, 表面流出発生面積率の関係