

表面流出の発生に関する実験

岸井徳雄*

国立防災科学技術センター

On the Experiment of Surface Runoff from Experimental Slope

By

T. Kishii

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Surface runoff is a main component of the flood runoff and runoff ratio, runoff coefficient represent the characteristics of the flood runoff. But the relation between them is not evident at the present time. In order to research the relation between them and rainfall intensity, three kinds of experiment were carried out by use of the large-scale rainfall simulator. Rainfall intensity, 20mm/hour, 50mm/hour and 100mm/hour were chosen in the experiments respectively.

The size of slope is 4m wide, 13.8m long and the angle of the slope was 10 degrees. The surface of the slope was covered with Kanto Loam. Discharge of surface runoff was measured by a triangular weir to which surface flow was collected at the lowest end of the slope. In addition, tension meters were installed under the surface of the slope at the depth of 5cm at a distance 0.7m, 4.5m and 9.0m apart from the end of the slope to measure time of saturation in the soil from the beginning of rainfall.

As a result of the experiments, areas occupied by surface runoff were 3.1m² in case of 20mm/hour rainfall intensity, 34.8m² in 50mm/hour, and 41.2m² in 100 mm/hour.

The larger the rainfall intensity was, the larger were the runoff ratio and the runoff coefficient of the surface runoff.

1. はじめに

降雨特性により洪水流出特性がいかに変化するかということを解明し、その結果を用いて総流出量、最大洪水流量等の洪水予測を行なうことを目的として、千葉県養老川上流の浦白川に6次谷、3次谷、1次谷というそれぞれ流域面積の異なる小流域を設け水文観測を行な

* 第1研究部

っている。各次谷の洪水流出特性についての成果の一部(岸井, 1978)は既に報告した。本実験は6次谷, 3次谷, 1次谷における洪水流出特性を調査するシリーズの一つである。

洪水流出特性の基本として, 流出率, 流出係数があるが, 流出率, 流出係数は流域の条件によっても変化するが降雨特性(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, 流出係数が降雨特性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。換言すれば1次谷における表面流出発生状況に基づいた流出率, 流出係数の解釈がより深い意味を持って来ると考えられる。

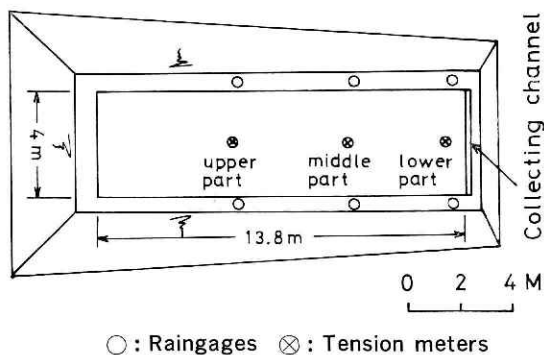
このような現象を現地で観測することも目下実施中である。実流域の斜面では落葉層があり, 斜面長は長く, 実験斜面の条件とは異なるが, 予備的段階として以下に述べる土壌水分と表面流出との関係解明の可能性を明らかにするため実験斜面において実験を行ない有効な結果が得られたのでここに報告する。ここで「表面流出」と「早い中間流出」とは実際上両者の分離は困難であるので, 本実験では両者を一括して表面流出として取り扱う。

実験として取り上げる条件の内, 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採用し, 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通りの強度の降雨を発生させ行なった。

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ることは一つの長所であり, さらに実流域では数十mmの降雨強度の大きい降雨は希で降雨強度の大きい洪水記録の機会を得るにはある程度の年月を要するが, 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比較的短期間で観測結果が得られ好都合である。

以下, 順を追って実験条件, 各々の降雨強度時の表面流出の発生状態, 表面流出のハイドログラフ, 流出率, 流出係数および水分計(テンションメータ)の観測結果から見た土壌の飽和開始時間等の実験結果を中心として報告する。

2. 実験条件



○: Raingages ⊗: Tension meters
 図1 実験斜面
 Fig. 1 Experimental slope

2.1 実験斜面 (図1)

実験斜面は、当センターの大型降雨実験施設内において2年間養生した斜面を用いた。この2年間の養生期間により斜面の表層は1年生の草が繁茂し、表層土壌は自然状態に近い空隙の多い組成となっている。斜面の大きさは長さ13.8m、幅4mの矩形で傾斜は10度であり、全域にわたり深さ50cmまで関東ロームに被われ、その下の層は難浸透性の粘土層である。斜面の上端および側方は塩化ビニール製の波板を深さ70cmまで埋設し雨水の上端および側方からの漏水を防ぐよう努めた。

2.2 土壌の特性

実験斜面の土壌は、2年放置されたものの人工斜面のため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、斜面中心部において地表下5cm、25cm、40cmから採取した土壌を対象に団粒構造は失われるが土自体の粒度の目安としてJIS A1218の方法に基づいて行なった。地表下5cmでの土壌の粒径加積曲線を図2に示す。粒径は0.0015mmから0.84mmにわたって分

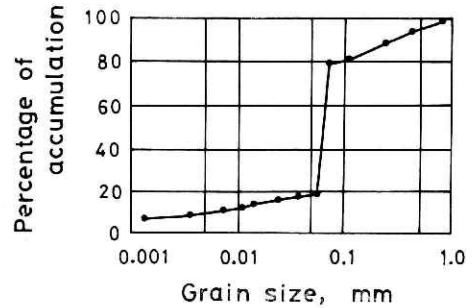


図2 実験斜面の表層土壌の粒径加積曲線
Fig. 2 Grain size accumulation curve on surface soil of the experimental slope

布し、0.054mm以下と、0.074mm以上に大きく分類される。均等係数は14でJISによれば粒度分布はよい部類に属する。他の深さでの粒径分布もほぼ同様な傾向を示した。

含水比は、地表下5cm、25cm、40cmでそれぞれ63.7%、72.5%、71.7%であった。

比重は、含水比と同じ深さでそれぞれ2.69、2.70、2.70でJIS A1202の方法により得られた値である。

透水係数の平面的分布は、斜面上での表面流出の発生域を決める重要な因子と考えられる。そこで透水係数の斜面上の分布を知るため、斜面下部(下流端のトイから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、JIS A1218の方法に従って測定した結果、斜面下流で 5.1×10^{-2} 、中央部で 4.6×10^{-2} 、上部で 5.9×10^{-2} の値(単位 cm/sec)が得られ、斜面の下流から上方にわたり一様な透水性を持つといえる。

2.3 計測方法

表面流出量の観測方法は、斜面下流端で地表下5cmに斜面表面に平行に上方へ向って幅30cmのトタン板を入れ、表層を流下してくる表面流をトイで集水し、これを開度30°度の三角ゼキの越流深を測定し流量に変換した。越流深は触針型サーボ水位計(精度 ± 0.5 mm)により計測した。

次に、土壌水分の飽和時間を観測するため、斜面下部（下流端から0.7m）、中央部（同4.5m）、上部（同9.0m）にそれぞれ地表下5cm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2cm、長さ6cmである。圧力変換器はDHF 1kg（出力3mv/水頭1cm）を用いた。

さらに面積雨量を計算するため、内径20cm、高さ30cm、肉厚7mmの塩ビ製の雨量マスを6個所配置した。

水分計および雨量マスの配置を図1に示す。

2.4 降雨強度

降雨強度によって表面流出量がどのように変化するかを観測するため総雨量を一定になるように降雨強度20mm/hr、50mm/hr、100mm/hrの3種類の矩形波（ケースと呼ぶ）を与え表面流出の発生状態を観測した。雨量マスで測定した雨量を表1に示す。表1の内、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。

表1 実験対象とした降雨特性
Table. 1 Characteristics of rainfall on the experiment

実験名種	雨量特性 降雨強度(mm/hr)	総雨量 (mm)	降雨継続時間(hr)
ケース1	19.8	99.2	5.00
ケース2	50.0	99.9	2.00
ケース3	104.7	112.0	1.07

3. 表面流出の発生状態

表1に示した各々の降雨強度別の実験中における目視による表面流出の発生状態を記述する。

ケース1では降雨開始から相当時間経過後までは雨水は、斜面表層から浸透し表面流出の発生は観察されなかった。15分経過後、斜面下部で所々土壌粒子の表面が光を反射し水膜が付着していることを示した。3時間30分経過すると、斜面下部において下端から0.8m地点まで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の発生個所と思われる部分が発生した。この部分は、最初は直径2~3cmの小さいくぼ地が湛水池となり、さらにそれ以後、互いに連結されて水面が拡大されて行った。従って、表面流発生域は全面的に水で被われた面ができるのではなく、最初に小水面が形成され、次第にそれらが互いに連結されて成長していった。

ケース2では、降雨開始後5分で斜面の下部、下流端から2mおよび6.8mの部分で、くぼ地に直径10cmの水面が形成され、15分経過後にはそれらの水面積は5倍程度拡大した。25分経過後には、斜面下流端から8.7mまでの部分に数多くの小水面が形成され、小水面と小水面の間は、土壌の飽和状態を示す水膜による反射が観察された。その後は表面流発生域は、斜面上方へ拡大しないで、一定面積の表面流発生域を生じていた。降雨終了後は、

5分経過して水面はほとんど消滅し、25分経過後では、斜面下流端で2カ所の小さい湧水口を示すのみであった。

ケース3では、降雨開始4分経過後、斜面下流端から4.9mまでの部分に所々小水面が形成され、6分経過後全域的に光の反射がみられ、12分経過後には、10.3mまでの部分に全域的に水面が形成された。降雨終了後は、3分経過して水面は消滅した。

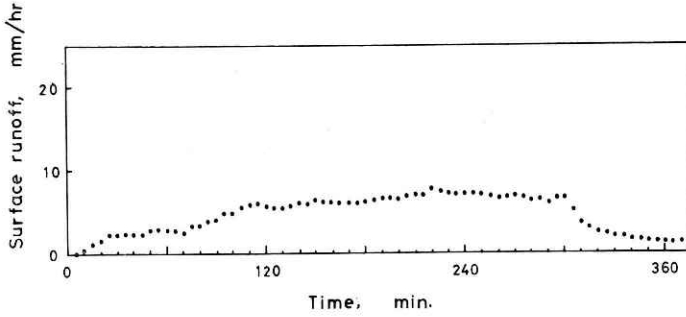


図3 ケース1 表面流出のハイドログラフ (降雨強度:19.8mm/hr)
 Fig. 3 Case 1. Hydrograph of surface runoff (rainfall intensity:19.8mm/hr)

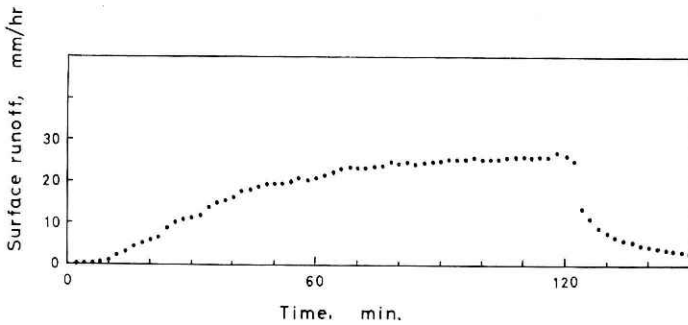


図4 ケース2 表面流出のハイドログラフ (降雨強度:50.0mm/hr)
 Fig. 4 Case 2. Hydrograph of surface runoff (rainfall intensity:50.0mm/hr)

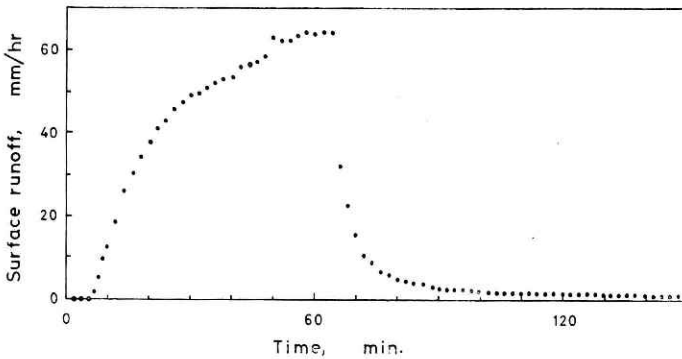


図5 ケース3 表面流出のハイドログラフ (降雨強度104.7: mm/hr)
 Fig. 5 Case 3. Hydrograph of surface runoff (rainfall intensity:104.7mm/hr)

以上述べたように、表面流出発生域では、小さなくぼ地に湛水し、水深が増すことによりそれらが互いに連結され、径10cm~30cmの大水面を形成した。水面を形成しない表層土壌の凸部においても土壌は飽和状態にあり、水膜の反射が観測された。

4. ハイドログラフ

図3から図5はケース1からケース3までのそれぞれの表面流出ハイドログラフを示す。当然、表面流出には早い中間流出も含まれるがここでは一括して表面流出と呼ぶ。横軸は降雨開始後の経過時間である。

ケース1(図3)の場合、流出量は降雨開始25分経過までは増加し、25分から70分の間はほとんど変化しない。その後は、少しづつ増加し、流出高で7mm/hr程度で定常状態に達している。

ケース2(図4)では、降雨開始後50分から60分にかけて20mm/hr程度で明りようとは言えないが、階段状ハイドログラフとなり流出量が一定の部分がある。

ケース3では、降雨開始後50分まで流出量は増加し、50分から60分にかけてハイドログラフは複雑に変化する。

実験斜面を用いて表面流出を観測した例(木下・中根1977)では、降雨強度が50mm/hr以上で明りような階段状ハイドログラフが観測されている。しかし、本実験では、50mm/hrの降雨強度で明りよ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

表2 流出率, 流出係数
Table. 2 Runoff ratio and runoff coefficient of surface runoff

実験名種	降雨強度 (mm/hr)	総雨量 (mm)	総流出高 (mm)	ピーク流量 (mm/hr)	流出率	流出係数	最終表面流出 発生域面積率
ケース 1	19.8	99.2	29.98	6.72	0.302	0.339	0.06
ケース 2	50.0	99.9	43.93	25.77	0.440	0.515	0.64
ケース 3	104.7	112.0	52.49	64.34	0.469	0.615	0.75

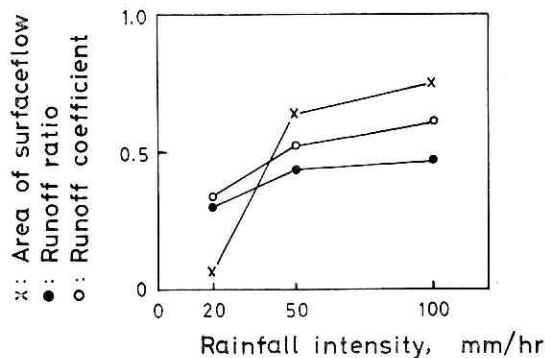


図6 降雨強度と流出率, 流出係数, 表面流出発生面積率の関係
Fig. 6 Change of runoff ratio, runoff coefficient and the ratio of areas occupied by surface runoff to the total area related to rainfall intensity

験に用いた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。

5. 流出率, 流出係数

4章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, 降雨強度および表面流出発生域との関係を求めた。

流出率(f_T)は, 以下に定義する。

$$f_T = \frac{\int_0^{T_e} q dt}{R}$$

ここで, T_e は洪水継続時間であり, 流出の低減状況を見た上でケース1では降雨開始後8時間20分, ケース2では9時間20分, ケース3では5時間50分とした。これ以後の流出量は小さく無視した。 q は流出高で30秒毎の観測値を用いた。 R は雨量・マスによる面積雨量である。

流出係数(f_p)は以下に定義する。

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

ここで, q_p は最大流出高(降雨終了時) 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。

ケース1からケース3までの流出率, 流出係数等を表2に示す。

表2の流出率・流出係数および3章で得た表面流出発生域の面積率をまとめて図6に示す。

図6から, 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降雨強度が大きい程, 増大することが示される。さらにこれらのことから, 表面流出発生面積率が大きい程, 流出率, 流出係数の値は大きくなる。

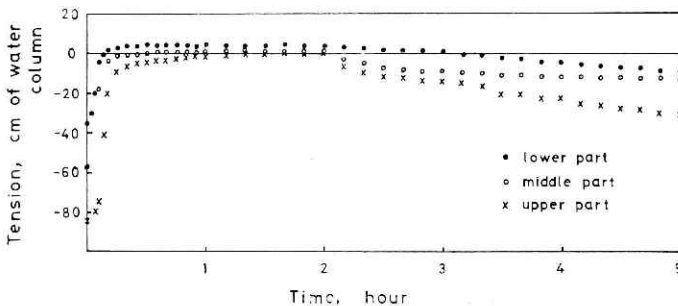


図7 表層土壌内の圧力水頭の変化(降雨強度:50.0mm/hr)
Fig. 7 Change of tension in the surface soil (unit:cm water column)

6. 表層土壌の水分変化

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(青木, 1972)より考えると表面流出の発生量の多小は, 表層土壌中の水分状態, 特に飽和か不飽和かによって大きく異なる。

そこで, 2.3で述べたように水分計(テンションメータ)を埋設し, 土壌中の水分変化を測定した。その結果の1例としてケース2(降雨強度 50mm/hr)の場合を図7に示す。他のケースでも同様の傾向が得られている。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いる。

それぞれのケース毎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。なお飽和の定義としてここでは, 水分計で計測された水頭0 cm以上とする。

<ケース1>

降雨開始後急激に圧力上昇があり, 水頭で80cm程度で, 20分後にはほぼ圧力は定常状態に達する。さらに斜面の各部の各時刻での圧力を見ると, 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, 上部では未だ土壌は飽和状態に達しない。

<ケース2>

圧力が0 cmまで増加する時間はケース1よりさらに短く, 斜面の下部では8分, 中央部では30分経過した後である。上部では圧力が0 cmに達しない。すなわち, 斜面の下部および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。

<ケース3>

ケース1およびケース2よりさらに圧力増加は急激であり, 降雨開始後6分で斜面の下部は飽和し, 中央部では7分, 上部では17分経過後飽和状態となる。すなわち, 斜面の下部から上部までの表層土壌は, 降雨開始後17分以後飽和状態が続いている。

以上, ケース1からケース3までの降雨強度と降雨開始から土壌が飽和するまでの時間の関係を図8に示す。この図から降雨強度が大きい程, 土壌が飽和するに要する時間は短くなる。斜面平面上では, 降雨強度が大きい程, 土壌が飽和状態となる部分は斜面上方へと拡大することを示している。

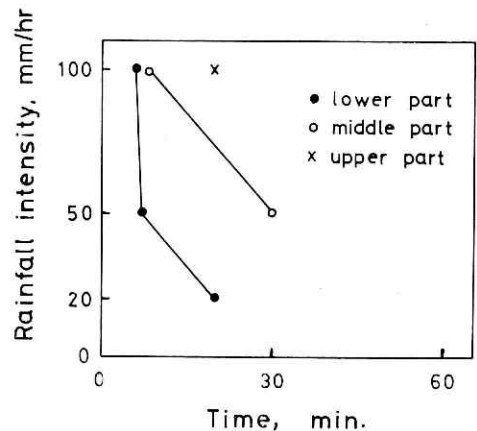


図8 降雨強度と表層土壌の飽和開始時間
Fig. 8 Relation between rainfall intensity and the time from the beginning of rainfall till saturation of the surface soil

7. ま と め

実験結果については今後もシミュレーション結果等により解析してまとめる予定であるが、以上のように既にわかった結果を要約すると次のようになる。

ア. 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。そして表面流出が発生する部分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。

イ. 流出率、流出係数の値は降雨強度が大きくなると共に増大する。

ウ. 従って、ア、イから表面流出発生面積率が増大すると、流出率、流出係数の値も増大する。

エ. 表面流出が発生する部分の表層土壌（地表下5 cm）は、水分計（テンションメータ）の測定値から、飽和している。

以上のような結果は既に多くの研究者により調査されている部分もかなりあるが、この方法が表面流出の発生に極めて有意義であることがわかったので、今後は実際の山地斜面での表面流出および流出率、流出係数とどのような対応があるかを浦白川を中心とした現地調査によって研究して行く。

本研究を進めるにあたり、水分計の設置・計測を担当した第4研究部大倉博氏、および実験にあたり種々御協力頂いた第3研究部降雨実験室長、寺島治男氏はじめ同研究室、施設課の諸氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 青木佐久(1972)：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，33—39.
- 2) 木下武雄・中根和郎(1977)：表面流出に関する研究（その1）．国立防災科学技術センター研究報告，第18号，35—49.
- 3) 岸井徳雄(1978)：浦白川流出試験地の洪水流出特性，国立防災科学技術センター研究報告，第20号，17—30.

(1980年12月13日原稿受理)