

模型斜面での表面流発生と雨水浸透 との関係について

張 学棟*

中国科学院西北水土保持研究所

Experimental study on the relations between the surface flow and the rain infiltration in slope model

By

Zhang Xuedong

Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica

Abstract

Relation between the occurrence of surface flow and the percolation of rain water at the slope was studied in this paper. Electric resistivity meter was used here to measure the percolation of water in the slope. The occurrence of surface flow was found depending on the percolating state in the surface layer. Similar phenomena were observed in both loamy soil and sandy soil in which loamy soil was mixed with 25 percent of sand.

The transmission front, which is a boundary section between the transmission zone and the wetting zone, was located about 125mm below the soil surface when the surface flow occur (The intensity of rainfall was 75 to 150 mm/h).

The locations of the wetting front, and the transmission front were deeper in 30° slope than in 10° slope when surface flow occurred.

1. まえがき

中国の黄土高原の侵食状況は顕著で、黄河によって毎年下流へ運ばれる泥砂は16億トンに達し、黄河の水1m³あたり泥砂含有量は36kg(中国河南省陝県)にもなる。中国の黄土の丘陵地帯では植生が悪く、また、雨滴の衝撃により表土が飛散されやすいため、表面流による土砂流出量の増加を促す結果になっている。

斜面での降雨による土壌侵食は雨滴の衝撃力による地表面付近の土粒子の飛散(松尾, 1971), およびその後の表面流による土粒子の運搬によって発生する。雨滴の衝撃力の効果については中国および日本でもいろいろな研究(松尾(1971), 川口(1951), 三原(1951), 陳(1983))がなされている。

* 1981年12月から1983年12月の間、科学技術庁国立防災科学技術センターに留学

表面流の発生については一般に斜面勾配，降雨強度，土層の密度，土層の含水比および植生などと関係があるが，自然の降雨を待つ野外での観測ではととのったデータを得るのが困難である。

本論文では雨水の表層での浸透状況と表面流発生との関係および侵食状況を調べるために国立防災科学技術センター大型降雨実験施設を用いて，実験を行った結果について報告する。

2. 実験方法

実験に用いた土はローム土とローム土の中へ25%の砂（砂とローム土の体積比が25%である）を混ぜた土（以下，混合土という）である。現実には斜面土壌は種々の土質条件によっ

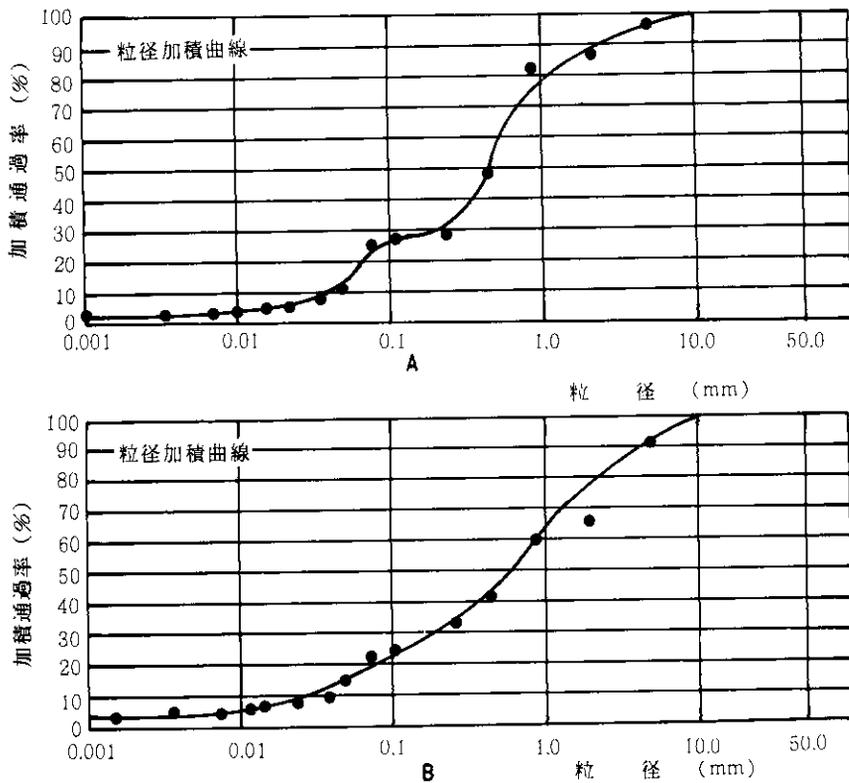


図1 供試土の粒度分布曲線
(A) 混合土 (B) ローム土

Fig. 1 Grain size distribution curves of the cohesive soil used in the experiments:
(A) Sandy soil. (B) Loam.

表 1 供試土の物理性質

Table 1 Physical properties of the cohesive soil used in the experiments.

項 目	ローム	ローム+25%砂
比 重	2.55	2.73
均等係数	29.3	13.2
液性限界	74.3 %	50.5 %

て構成されているが本実験は二種類の土を用いることにした。図 1 に土の粒度分布曲線を示す。表 1 に供試土の物理性質を示す。

模型土槽の勾配は 10° 、 20° 、 30° の三種類で、降雨強度は 75, 100, 125, 150 mm/h の四種類である。予備実験では 25 mm/h の降雨強度を 2 時間継続しても、表面流が起きなかった。本実験では降雨強度を 75 mm/h から始めた。

三種類の勾配の模型槽を用いた理由は異なる勾配での表面流の発生状況と浸透状況を観測するためである。本実験では一時間だけ降雨を与え、その後使った土を取りだし、新しい土を模型槽に詰めて、次の実験を行うということをくり返した。

模型土槽の寸法は長さ 4 m、幅 30 cm、深さ 50 cm である。本実験では当センター富永雅樹氏の製作した比抵抗計で雨水の土層への浸透状況を測定した。比抵抗計の使用法、解析法については富永雅樹氏の論文（富永（1978, 1980 - 1, 1980 - 2, 1981）を参照されたい。

写真 1 は本実験で使用した模型である。写真 2 は比抵抗計のセンサー部分で、電極間の距離が 50 mm、全長が 45 cm、測定点が 6 個である。図 2、表 2 に比抵抗計のセンサーの位置を示す。

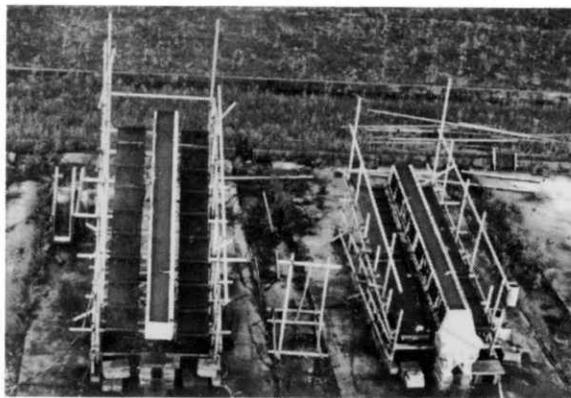


写真 1 (A) 使用した模型

斜面勾配；左 30° 、右 10°

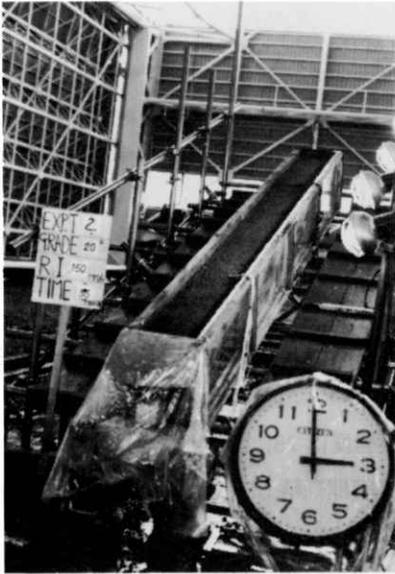


写真1(B) 使用した模型
斜面勾配； 20°

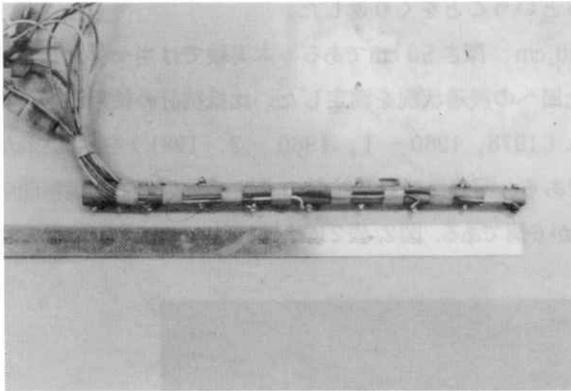


写真2 使用した比抵抗計の
センサー部

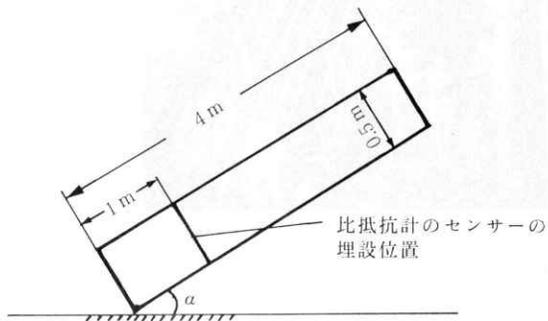


図2 比抵抗計のセンサーの埋設位置

Fig. 2 Locations of sensors of specific resistance meter.

表 2 比抵抗計の測定点の位置

Table 2 Locations of measuring points of specific resistance meter.

測定点	0	1	2	3	4	5	6
地表面からの深さ (mm)	0	7.5	125	175	225	275	325

3. 実験結果および考察

(1) 表面流が発生するまでの時間と雨水の浸透について

図 3, 4, 5 はそれぞれ表面流出が始まった時刻における浸潤前線の位置と地中水分分布が平衡浸透状態になっている深さを示すものである。浸潤前線の位置は地中各部に設置した電極での比抵抗値が降雨開始前にくらべ低くなり始めた時刻に浸潤前線が当該測点に到達したものと考え、時刻に対する補間法によって表面流出発生時刻での位置を決定した。また地中各部での比抵抗値が降雨継続中に時間的に変化しなくなり始めた時刻を土中の浸透状態が平衡に達した時刻と考え、その位置を平衡浸透状態の深さとした(富永, 1978)。表面流

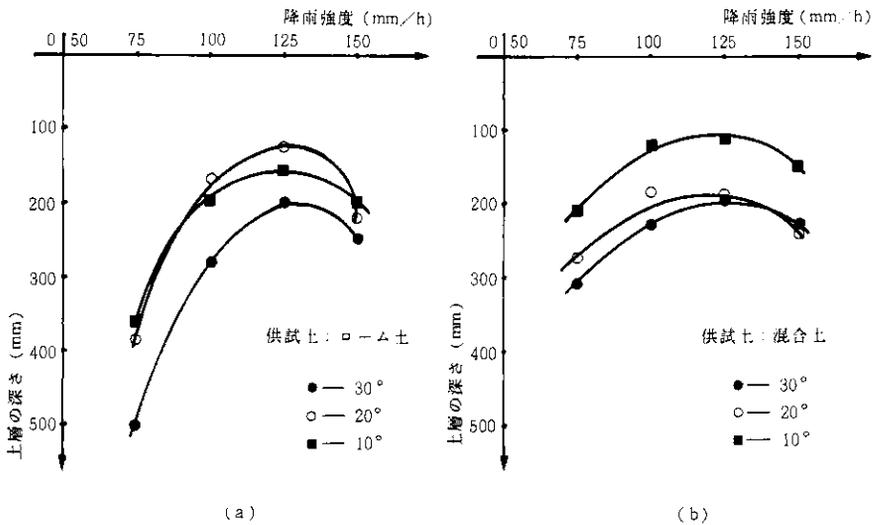


図 3 表面流が発生した時の浸潤前線の位置図

Fig. 3 Location of wetting front at the time when surface flow occurred.

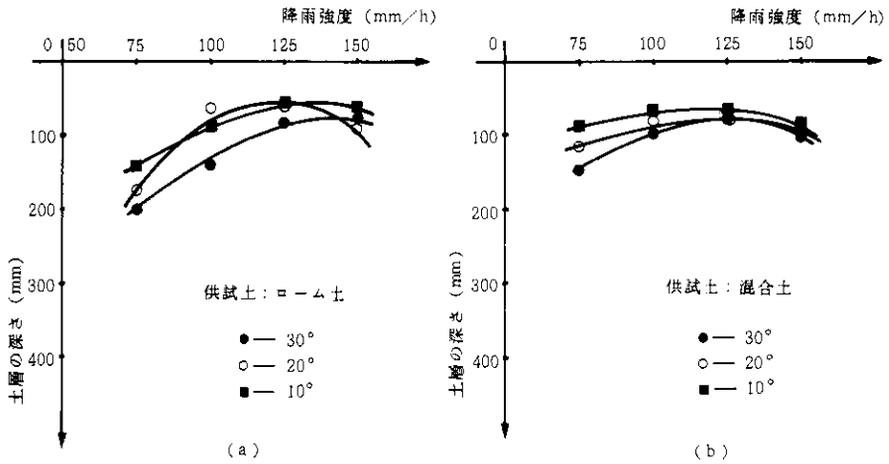


図4 表面流が発生した時の平衡状態の位置図

Fig. 4 Location of transmission front at the time when surface flow occurred.

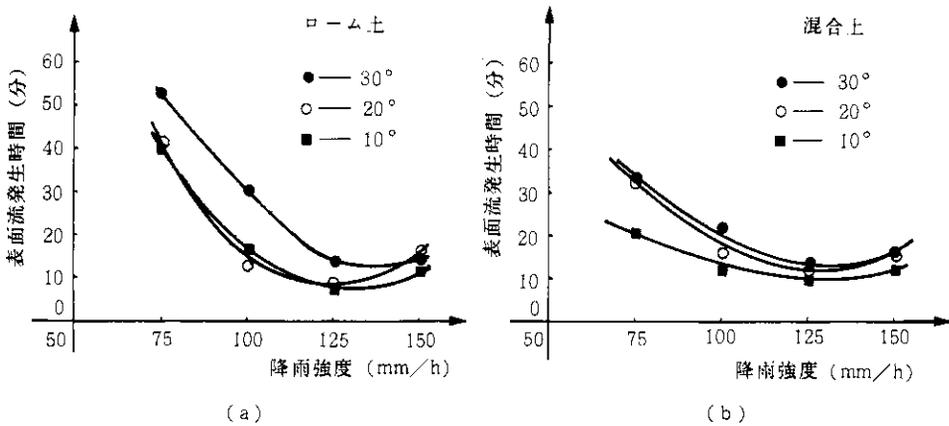


図5 降雨強度と表面流発生時間の関係

Fig. 5 Intensity of rainfall and the time when surface flow occurred.

発生時刻での深さは浸潤前線の位置と同様に補間法で決定した。実験では容量500ccの転倒ます流量計で表面流出量を測定した。降雨初期では流出量が少ないため、ビーカーを使い人力で5分おきに測定した。図3, 4, 5では降雨開始時刻から転倒ます流量計の第一回目の転倒が起きた時刻までを表面流が発生するまでの時間とした。

図3および図4から、

(A) 表面流出が始まった時の浸潤前線の位置は斜面角度、土質、降雨強度にかかわらず、土層表層から100mm以下に達し、平衡浸透状態の深さは一般に土層表層から50mm以下に達した。

(B) 10°斜面に比べれば、30°斜面のほうが土質と降雨強度にかかわりなく、浸潤前線の位置および平衡浸透状態の深さともに深くなっている。

(C) ローム土及び混合土ともに、降雨強度が大きくなるにつれて、斜面角度にかかわらず浸潤前線の位置と平衡浸透状態の深さは浅くなる傾向にあるが、150mm/hのときは再び深くなっている。

(D) 土質と斜面角度にかかわらず、浸潤前線の位置及び平衡浸透状態の深さと降雨強度の間に非直線性の関係があるだけでなく、ローム土と混合土における非直線性の関係の動きはほぼ似ている。さらに定量的に解明する必要がある。

(E) ローム土と混合土では土質の相異による浸潤前線の位置及び平衡浸透状態の深さの異なるところは降雨強度125mm/hと150mm/h時に有意な差を認めにくいけれど、降雨強度75mm/hと100mm/hの場合には角度にかかわらず一般にローム土のほうが混合土よりも深くなっている、ということがわかる。

図5は表面流出が始まるまでの時間と降雨強度の関係を示している。この図から、

(F) 10°斜面に比べれば、30°斜面のほうが土質及び降雨強度にかかわらず遅れて表面流出が始まっている。

(G) 20°斜面から言えば、一般に表面流出が土質にかかわらず、10°斜面よりも遅れて始まった。そのほかローム土の場合には降雨強度150mm/hの場合をのぞいて、10°斜面における表面流出の発生時刻の間に有意な差が小さいけれど、混合土の場合には逆に30°斜面における表面流出の発生時刻の間の差が小さくなった。

(H) ローム土及び混合土ともに、降雨強度が大きくなるにつれて斜面強度にかかわらず、表面流出は早く始まる傾向にあるが、150mm/hのときは再び遅くなっている。ということがわかる(表3(A)～(E))。

以上の観測結果から、表面流出が始まるまでの現象として、

①降雨強度100mm/h以下において、斜面傾斜角度は表面流の発生に大きく影響を与えた。すなわち、30°と10°斜面における表面流出の時刻の差が大きく、平衡浸透の深さの差も大きい(土質にかかわらず)。しかし降雨強度が強くなるにつれて、上述の差が速く小さくなる。(ローム土と混合土では同じ現象である) すなわち強い降雨強度の場合には斜面傾斜角度は表面流の発生に与えた影響が弱くなった。つまり降雨強度が一定強度を超えると、表面流の発生に対して、降雨強度が主な素因になった。

②土質の異なることは表面流の発生に影響を与える。しかし、この影響は降雨強度100

表 3(A)~(D) 実験条件と表面流の発生時間

Table 3(A)~(D) Experimental conditions and occurrence of surface water flow.

(A)	実験模型勾配		10°							
	供 試 土		ローム土				ローム土 + 25%砂			
	雨量強度	mm/h	75	100	125	150	75	100	125	150
	乾燥密度	g/cm ³	0.58	0.54	0.52	0.61	0.70	0.70	0.72	0.74
	初期含水比	%	71.76	74.42	85.63	66.47	47.83	48.75	48.54	48.25
	表面流発生時間	分	39	16.26	7.4	11.3	20.48	11.30	11.03	11.98

(B)	実験模型勾配		20°							
	供 試 土		ローム土				ローム土 + 25%砂			
	雨量強度	mm/h	75	100	125	150	75	100	125	150
	乾燥密度	g/cm ³	0.55	0.53	0.53	0.62	0.69	0.73	0.72	0.80
	初期含水比	%	76.72	73.75	83.91	66.08	46.97	46.3	49.51	43.93
	表面流発生時間	分	44	12.78	8.67	16.76	32.17	15.83	12.2	16.63

(C)	実験模型勾配		30°							
	供 試 土		ローム土				ローム土 + 25%砂			
	雨量強度	mm/h	75	100	125	150	75	100	125	150
	乾燥密度	g/cm ³	0.54	0.54	0.52	0.59	0.72	0.74	0.73	0.71
	初期含水比	%	77.63	73.77	82.07	69.37	47.15	44.75	52.22	46.42
	表面流発生時間	分	52.67	30	14	14.35	32.98	21.52	12.78	16.83

(D)	実験模型勾配		20°							
	供 試 土		ローム土				ローム土 + 25%砂			
	雨量強度	mm/h								
	乾燥密度	g/cm ³	0.52				0.71			
	初期含水比	%	77.51				47.32			
	表面流発生時間	分	85				90			
備 考	雨量強度は1時間ごとに25 mm/hから150 mm/hまで25ずつ増加する						ローム土と同じ			

表 3 (E) 実験条件と表面流の発生時間

Table 3(E) Experimental conditions and occurrence of surface water flow

実験模型勾配	30°						
供 試 土	ローム土				ローム土+25%砂		
雨量強度	mm/h						
乾燥密度	g/cm ³	0.53			0.74		
初期含水比	%	75.57			43.78		
表面流発生時間	分	73			78		
備 考	雨量強度は1時間ごとに25 mm/hから150 mm/hまで25ずつ増加する				ローム土と同じ		

mm/h以下の場合の現象である。降雨強度が100 mm/hよりも大きい場合には、(本実験の125 mm/hと150 mm/hの場合)、土質の相異による表面流出の時間の差と平衡浸透状態の深さの差が基本的に認めにくくなった。

③降雨強度が大きくなるにつれて、表面流の発生に対する、斜面傾斜角度と土質の相異による影響は弱くなって、降雨強度による影響は強くなった。したがって、浸潤前線の位置と雨水の平衡浸透状態の深さは浅くなることだけでなく、土質の相異による差も認めにくくなった。

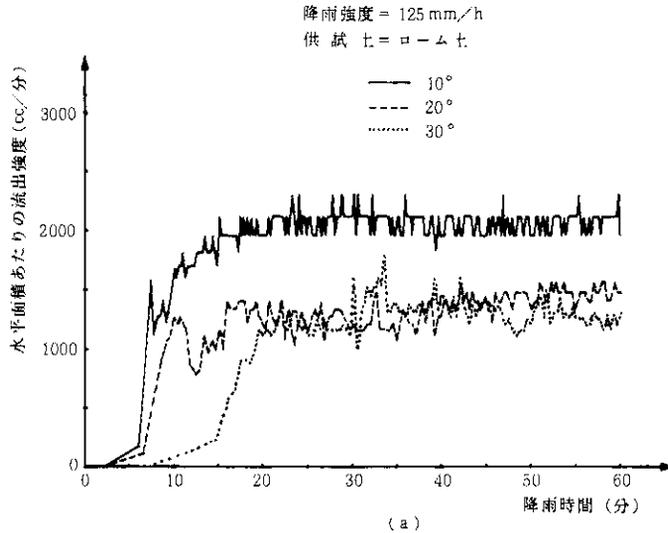


図 6 (a) 各斜面の水平面積あたりの流出強度の変化

Fig. 6(a) Change of the runoff from an unit area of each slope with time.

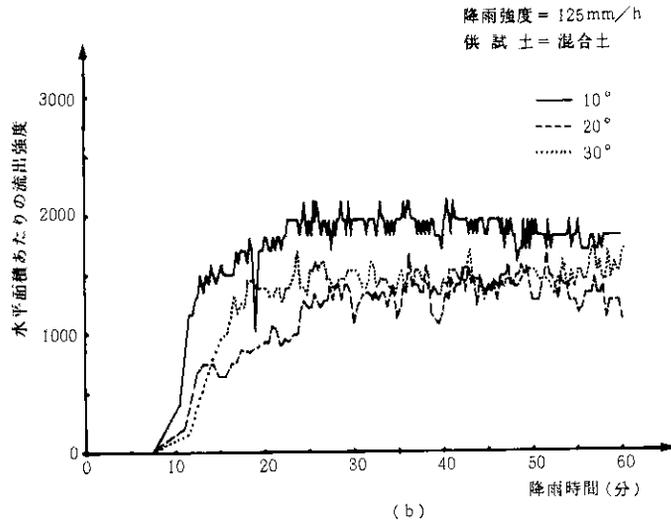


図 6 (b) 各斜面の水平面積あたりの流出強度の変化

Fig. 6(b) Change of the runoff from an unit area of each slope with time.

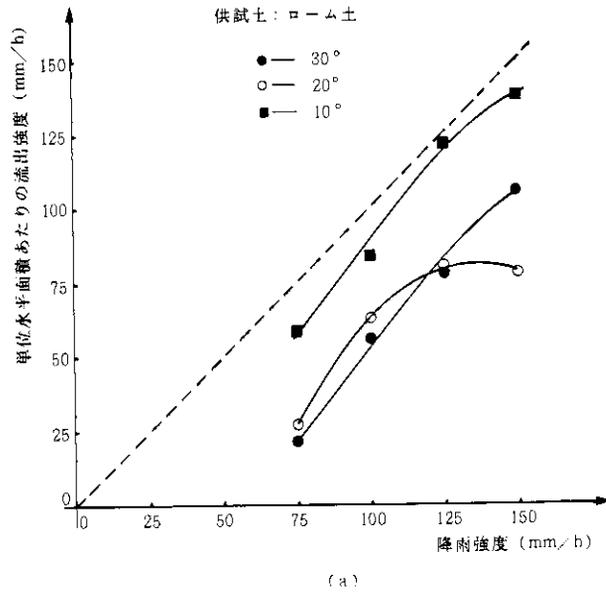


図 7 (a) 各斜面の単位面積あたりの流出強度と降雨強度の関係

Fig. 7(a) Relation between runoff from an unit area and rainfall intensity.

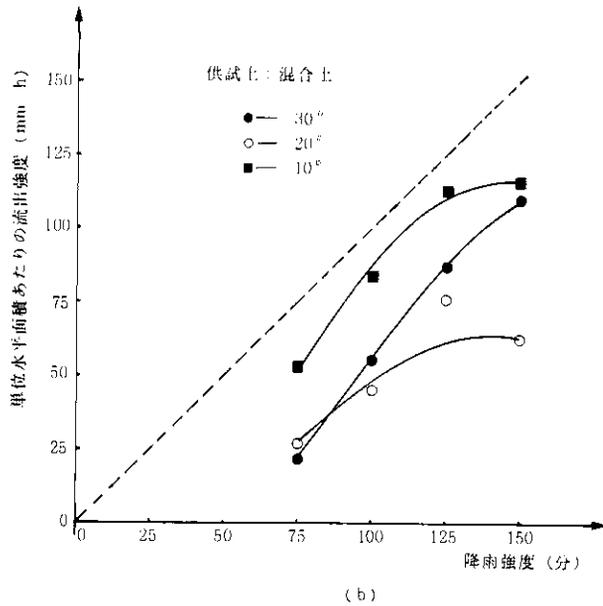


図 7 (b) 各斜面の単位面積あたりの流出強度と降雨強度の関係

Fig. 7(b) Relation between runoff from an unit area and rainfall intensity.

④ 20° 斜面は土質が異なることにより、上述の結果と異なった現象が表われたので検討する必要がある。

(2) 平衡状態での表面流出強度について

図 6 は降雨強度が 125 mm/h のときのそれぞれの斜面における表面流出強度の時間変化である。

図 7 はそれぞれの実験 (土質, 斜面角度, 降雨強度が異なる計 24 回の実験) について表面流出強度の時間変化のグラフ (図 6 はその一例である) を書き, それらのグラフから表面流出がほぼ平衡に達したと思われる時刻から降雨終了時 (各実験ごとに 1 時間の降雨を与えた) までの平衡状態での平均表面流出強度を求めたものである。45° の破線は [表面流出強度] = [降雨強度] を示す直線であるから, プロットされた各点とこの直線との差がそのときの平均浸透強度ということになる。

図 6 および図 7 から以下のことがわかる。

(L) 10° 斜面のほうが 30° 斜面よりも土質にかかわらず平均表面流出強度が大きい。

(M) 平衡に達する前, 20° と 30° 斜面における流出強度は異なって, 平衡に達した後, ほぼ同程度の流出強度になっている。

(N) 平衡状態での平均表面流出強度はローム土および混合土で一般的に有意な差を認めに

くい(すなわち同じ斜面角度と降雨強度であれば、ローム土、混合土にかかわらず同じ程度の流出強度になっている)

(S) 表面流出が始まってから、表面流出強度が平衡に達するまで(ほぼ25分)、土質にかかわらず、同じ斜面では流出強度曲線の動きは、ほぼ似ている。そして、 10° と 20° 斜面ではその期間でローム土における流出強度は混合土における流出強度より大きい。

(K) もし降雨強度 150mm/h のときの2個の例外(混合土の 10° および 20°)及び降雨強度 100mm/h のときの1個の例外(混合土の 20°)をのぞけば、ローム土および混合土ともに、降雨強度が大きくなるにつれ斜面角度にかかわらず平均表面流出強度は増大するだけでなく、土質の相異による差も小さい。

以上の観測結果から平衡状態での表面流出強度については、

⑤降雨強度および土質にかかわらず、 10° 斜面のほうが 20° と 30° 斜面よりも平均表面流出強度が大きい。この現象は表面流出が平衡状態に達してからの現象であるから、各斜面の地表面にはつねに一定量の表流水が流れていたことになる。 10° 斜面での表流水の流下速度は 30° 斜面にくらべ遅いとすれば、 10° 斜面の表流水の水膜が厚かったと考えられ、その結果浸透強度が弱くなり、流出強度が増したともいえる。

⑥平衡に達した後、流出強度が基本的に土質との関係はなくなった。

⑦斜面の傾斜角度は表面流出強度に影響がある(10° 斜面における表面流出強度は 20° 斜面における表面流出強度より大きい)。しかし、角度が増大しすぎれば、例えば 30° 斜面の場合には、斜面の増大による影響は基本的になくなった。

⑧表面侵食から言えば、土砂流亡は表面流出強度が平衡に達する前に主に発生するものである。例えば図9から角度と土質にかかわらず、土砂流亡のピークは25分前に起っており、(S)から土質が異なっても、土砂流亡曲線の動きは大体似ていることがわかる。

⑨(1)の④で述べたと同じく、 20° 斜面における例外があるので、検討の必要がある。

(3) 土砂流亡における斜面臨界傾斜角について

流亡土砂量は表面流出水測定用の転倒ます型流量計の受水口の上部に 0.42mm 目の金網をはった容器をおき、そこに残った土砂量の体積を5分毎に測定した。このような計量は同じ土質に対して、斜面が異なる場合では流亡土砂を相対的に比較することができると考えられる。

図8は降雨強度 100mm/h のときのローム土および混合土の5分おきに測定した土砂流亡量の時間的変化である。図9は降雨強度 25mm/h から、 50 、 75 、 100 、 125 、 150mm/h までの5段階の降雨を各一時間ずつ連続して与えたときの土砂流亡量の変化である。

図8と図9から以下のことがわかる。

(P) 20° 斜面における土砂流亡量(cc/5分)は 10° および 30° 斜面よりも多い傾向が認められる。

模型斜面での表面流発生と雨水浸透との関係について一頁

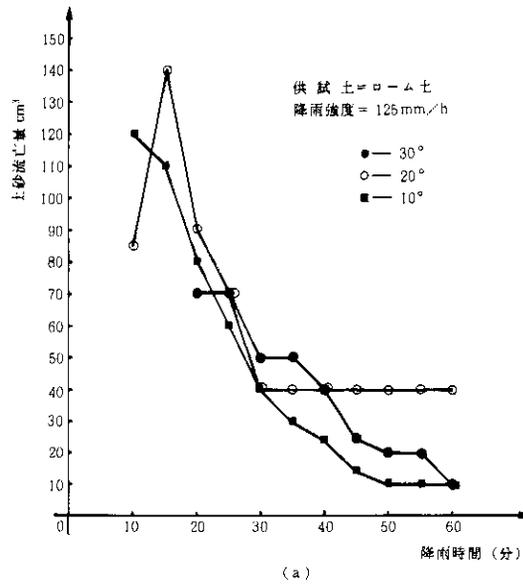


図 8 (a) 斜面勾配と土砂流亡の関係

Fig. 8(a) Relation between slope gradient and soil loss rate.

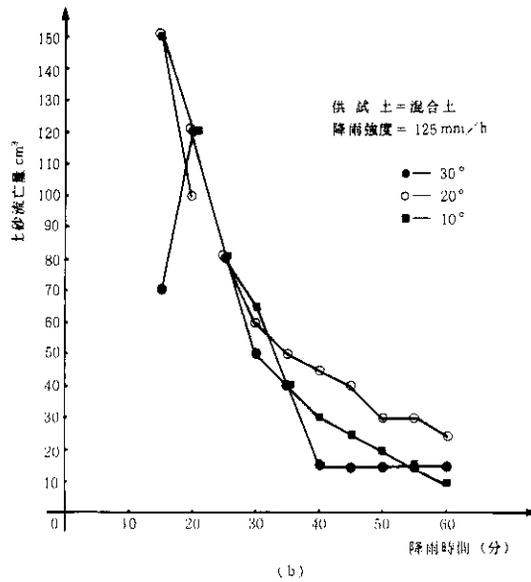


図 8 (b) 斜面勾配と土砂流亡の関係

Fig. 8(b) Relation between slope gradient and soil loss rate.

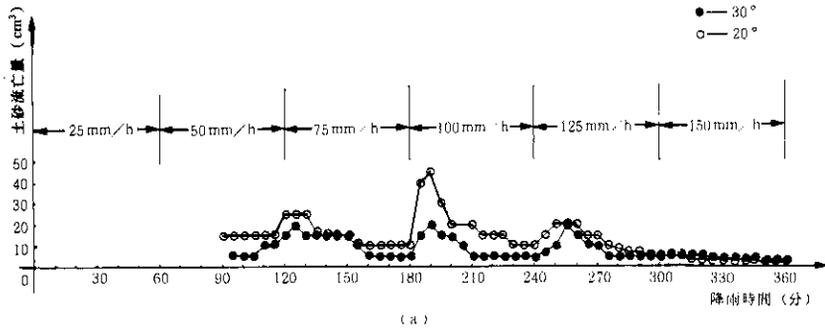


図 9(a) 降雨強度の変化と土砂流亡の関係 (ローム土)

Fig. 9(a) Change of rainfall intensity and soil loss rate with time.

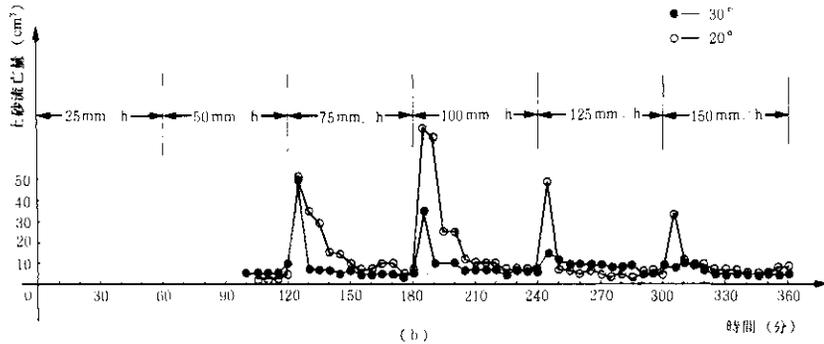


図 9(b) 降雨強度の変化と土砂流亡の関係 (混合土)

Fig. 9(b) Change of rainfall intensity and soil loss rate with time.

(X) 降雨継続中の土砂の総流亡量は 20° 斜面から流れた量のほうが 30° 斜面よりも多い
 (Y) 土砂流亡量のピークは基本的に土質と斜面角度にかかわらず実験開始後20分頃に発生している。その後は流亡量が急激に減少する傾向を示している。

以上の結果として、

⑩日本のローム土に対して、三原義秋氏が1951年の論文(三原, 1951)で、中国の黄土に対しては、陳永宗氏(陳, 1983)が土砂流亡量は斜面傾斜角度の増加につれて増加するが、ある角度をすぎると逆に減少しはじめることを述べている。

本実験では降雨強度 $100 \text{ mm/h} \times 1 \text{ h}$ と $125 \text{ mm/h} \times 1 \text{ h}$ の場合および段階的に強くなる降雨を与えた場合の結果は 20° 前後で土砂の流亡量が最も高くなっているようである。しかし、降雨強度 150 mm/h の場合は 30° 斜面での流亡量が最大になっている。したがって、臨界傾斜角については降雨強度と関係があるのかどうか、さらに検討の必要がある。

① 表面流出強度は土砂流亡量と異なっている。例えば 10° 斜面においては表面流出強度は 3 種の斜面角度中最大である傾向があったが、土砂流亡量はそうではない。斜面の傾斜角度の表面流出と土砂流亡に対する寄与のしかたは異なるといえる。

4. 結 論

以上で述べた結果を要約すると、以下のようである。

- ① 表面流が発生した時の浸潤前線および平衡浸透状態の深さは降雨強度の増大につれて浅くなるが、土層表面から 50mm 以下にある。そしてこの変化は非直線性である。
- ② 降雨強度 100mm/h 以上になると、土質の相異および斜面傾斜角度は浸潤前線の位置及び雨水の浸透平衡の深さに対する寄与がきわめて少ない。
- ③ 表面流出強度と土砂流亡量に対する斜面傾斜角度の寄与は異なっている。
- ④ 土砂流亡に対して、 20° と 30° の間に臨界傾斜角がある。

5. 謝 辞

最後に実験を遂行するにあたり、第三研究部長植原茂次氏に有益な御指導を得た。筆者の指導教官である降雨実験室長寺島治男氏には実験の構想から本報告書の作成までつねに熱心に御指導とご協力を得た。降雨実験室の研究員福園輝旗氏と井口隆氏にはデータの取り方について御指導を得た。実験模型の作成には研究員森脇寛氏と佐藤照子氏のご援助をいただいた。また、施設課の青木秀夫氏、高田秀二氏には長時間にわたる実験にもかかわらず、降雨装置の運転操作の面で御支援をいただいた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 福桜盛一 (1982) : 水滴の衝撃に対する破碎の影響について --- 水滴の衝撃と土壌飛散に関する基礎的研究 (I) 農業土木学会論文集, No 101, 26 - 32.
- 2) 川口武雄 (1951) : 山地土壌侵食の研究 (第一報), 林業試験場集報, 第 61 号.
- 3) 松尾新一郎 (1971) : 土中水 - 理論と対策 - 第 1 版, 日刊工業新聞社, 389 pp.
- 4) 三原義秋 (1951) : 雨滴と土壌侵食, 農業技術研究所報告 A, No 1, 1 - 59.
- 5) 寺島治男 (1966) : ガリ侵食機構に関する実験的研究, 新砂防, 61, 21 - 31.
- 6) 寺島治男ら (1976) : 斜面崩壊機構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.
- 7) 陳永宗 (1983) : 黄土高原溝道流域産砂過程の初步分析, 地理研究, 第 2 巻第 1 号, (中国語)
- 8) 富永雅樹 (1978) : 地下水の涵養量推定のための水理実験 (I), 国立防災科学技術センター研究報告, 20, 123 - 135.

- 9) Tominaga, M (1980): Experiments on Rain Infiltration in Soil (2) -Mathematical development of specific of mixed materials for measurement of water content of soil-. Report of the NRCDP, No. 23, pp. 131-139.
- 10) Tominaga, M (1980): Experiments on Rain Infiltration in Soil (3) -Dynamic characteristics of rain infiltration and ground water flow-. Report of the NRCDP, No. 23, pp. 141-184.
- 11) 富永雅樹・木下武雄 (1981) : 混合物質の抵抗率と野外での土中水分量測定への利用. 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.8, 819 - 824.

(1984年1月25日 原稿受理)