

## 不織布フィルターにより表面からの浸透性を高めた模型斜面における降雨浸透と斜面崩壊

Infiltration of Rainfall and Slope Failures in Model Slope  
with Enhanced Surface Permeability by Non-Woven Textile

丸田 亮	Ryo MARUTA	(広島大学大学院工学研究科)
細川大吉	Daikichi HOSOKAWA	(香川県庁)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)

土砂災害を模擬した模型斜面を用いた実験は一般的に裸地斜面で行われている。しかし、実斜面においては下層植生等が繁茂し裸地斜面であることは少ない。そこで本研究では模型斜面の表面に不織布フィルターを敷設し、地表流を抑制することで地下水位がどのように上昇するかを裸地斜面との比較から検討することを目的とした。不織布フィルターの有無のみが異なる実験による結果の比較から斜面表面にフィルターを敷設することにより地下水位が上昇を開始するまでの経過時間および崩壊までの経過時間は約 30~35 分程度短縮され、地下水位の平均上昇速度は約 2.0~3.5 倍上昇する結果となり、フィルターが雨滴衝撃を緩和するとともに地盤の浸透能を高い状態に保つことがわかった。

キーワード：斜面，模型実験，不織布フィルター

(IGC : E06, E07)

## 1. はじめに

近年、日本において局地的、集中的な降雨が数多く発生しており、非常に強い降雨の発生回数が年々増加傾向にある。局地的な豪雨により 2014 年 8 月 20 日に広島市で発生した土砂災害のような大規模な災害も発生しており、被害を防ぐまたは減らすための対策は重要となっている。

土砂災害への対策を考える上で、発生機構や崩壊の過程を知るために模型斜面を用いた実験が行われてきた。筆者らは模型斜面を用いて豪雨時に地下水位の挙動を観察する実験を行ってきたが<sup>2)</sup>、非常に強い降雨を斜面に与えた実験（表層は裸地）において、弱い降雨に比べ早い段階で地下水位が上昇するものの、斜面崩壊に至る時間には大きな違いがないという結果になった。観察によると強雨時には地表流による斜面表面の浸食が激しく、地表流の増加が地盤内への雨水の浸透を減少させていることが考えられた。実斜面に関する既往の研究では下層植生が失われ裸地化した場合に浸透能が低下することが知られており<sup>3), 4), 5)</sup>、模型斜面の実験結果は、下層植生の失われた実斜面に近く、下層植生のあるときの実斜面での現象とは異なっている可能性がある。そこで、本研究では、浸食防止と雨水の浸透性を高めるため模型斜面表面に不織布フィルター（以下、フィルター）を敷設した条件で降雨実験を実施し、地下水位の挙動と斜面崩壊に至る過程を裸地斜面における実験結果との比較から検討を行った。

## 2. 表面流およびフィルターに関する既往の各研究

一般的に実斜面における浸透能は降雨開始直後に大き

な値を示し、その後減少し、最終的に一定値に漸近するように変化すること、また降雨強度が土壤の浸透能以下である場合でも土壤に浸透しない余剰分が土壤表面を流下するいわゆる Horton 表面流が発生することが知られており、後者の要因として実斜面において想定している区域内が不均一なためであると考えられているが<sup>3), 6)</sup>、その不均一性は下層植生や落ち葉などからなるリター層の有無によって生じると考えられる。シルトや粘土等から構成される団粒構造は雨滴衝撃によって破壊されると土壤表面における孔隙が目詰まりを起し非常に薄い難透水性の層（土壤クラスト）が形成される。これにより土壤の透水性が  $10^{-4}$  から  $10^{-6}$  cm/sec のオーダーまで著しく低下するとされている<sup>7)</sup>。このため、植生やリター層によって地表面が被覆されると雨滴衝撃が緩和され土壤クラストの形成が抑止されやすく、土壤の透水性が低下しにくい。また、表面粗度が高い斜面では表面流の流下過程における地盤内への浸透機会の増加のため表面流出量が小さくなることが確認されており<sup>8), 9)</sup>、表面粗度を高めるという観点からも下層植生の存在は表面流出量低下につながると考えられる。これらのことは実斜面または室内実験における以下をはじめとした実験においても確認されている。

湯川、恩田による実験において、ヒノキ林斜面における人工降雨実験では土壤を被覆する下層植生やリター層が少ない場合には、下層植生が繁茂している場合と比べ浸透能は低くなり、裸地化した地盤表面に土壤クラストが観察されている<sup>3)</sup>。さらに、室内実験による下層植生のクラスト形成抑止効果に関する実験では下層植生等が雨滴衝撃を緩和し、土壤クラストの形成を抑止することで土壤の地盤の浸透能低下を抑制していることが確認されている<sup>4)</sup>。

また、宮田ら<sup>5)</sup>による異なる 3 ヶ所の試験地の森林斜面

における表面流観測では、被覆率が低く表層土壌における単位体積当たりのシルトや粘土の含有量が多いほど表面流出指標が大きくなる結果が得られている。このことは土壌の被覆率と表層土壌のシルト・粘土含有量がそれぞれ顕在的、潜在的に影響を及ぼすことで土壌クラストの形成を抑制し、地表面の透水性低下を抑えたためである。また、土壌の被覆が地表面粗度を増加させ表面流の浸透を促すことにも寄与することが確認されている。

一方、フィルターを用いた実験からフィルターによって雨滴衝撃が緩和されることが報告されており<sup>10), 11), 12)</sup>、本実験では、植生のない模型斜面にフィルターを敷設することで、実森林斜面にみられる下層植生等有する地盤表面の浸透性を高める効果を代替することとした。

松本ら<sup>13)</sup>は、野外に造成した実斜面の表層にフィルターを敷設し、降雨実験を行ってフィルター敷設の効果について報告している。試験された斜面は幅10m、長さ20m、傾斜30°であり、2009年7月21日に山口・防府豪雨災害で土石流が多数発生した区域内から採取したまさ土が使用された。松本らの実験における降雨条件は100mm/hrの降雨を最長5時間与えるというもので、非常に強い降雨である。松本らによると、裸地斜面における実験では斜面表面においてボイリング等が斜面全体に広く発生し広範囲に表面流による浸食が発生したが、フィルターを敷設した斜面ではボイリングの発生と表面流による浸食が大幅に抑制されたとされている。また、フィルターを敷設した斜面では裸地斜面よりも早い段階で地盤内の間隙水圧が上昇するという興味深い結果が示されている。

本研究では、以上の研究を参考にして、裸地斜面とフィルター敷設斜面における表面流の発生、地盤内地下水位の形成時間、地下水位の上昇速度に着目して、模型地盤を用いた降雨実験を行った。

### 3. 実験の方法と条件

#### 3.1 模型斜面の概要

本実験で用いた模型斜面の概要を図-1に示す。また、地下水位を測定するためのピエゾメータの配置状況を図-2に示す。土層厚さを10cm、斜面の勾配は30°とし、ピエゾメータは10cmの等間隔で16本（ケース1のみ19本）を不透水層（油粘土層）と土層の境界に、斜面中央に上部から下部へかけて一直線となるように配置した（斜面下側正面から見て図-3の真下となる位置）。

土層には市販されている園芸用のまさ土を用いた。用いたまさ土の物性値を表-1に示す。また、本実験におけるフィルターは1m<sup>3</sup>あたり約45g、厚さ約7mmのものを使用した<sup>14)</sup>（図-4(a), (b)）。フィルター敷設時の模型斜面の状況は図-3のとおりとなっている。

なお、模型斜面は間隙比、土粒子密度等から必要となる土量を算出し、全土量を5等分した量で土層高さが2cmとなるように1層ずつランマーを用いて締め固め、作成した。

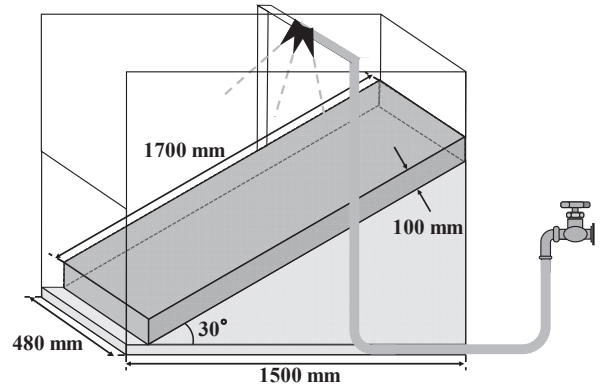


図-1 模型の概要

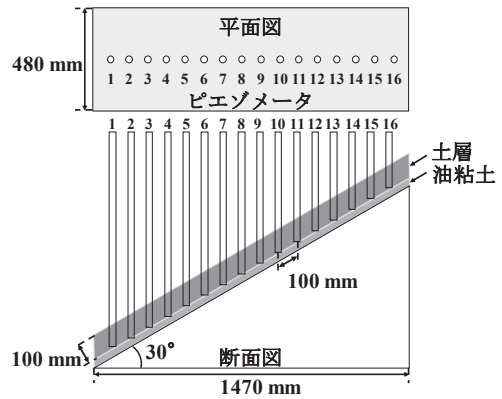


図-2 ピエゾメータの配置図

表-1 まさ土の物性値

基本的な特性	値
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.67
最大間隙比	0.98
最小間隙比	0.58
飽和透水係数 (cm/s)	6.04×10 <sup>-3</sup>

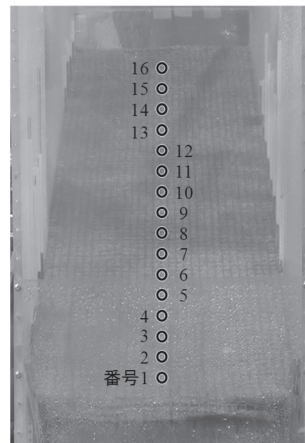
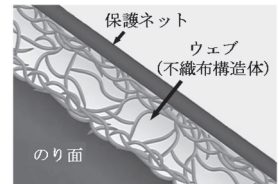
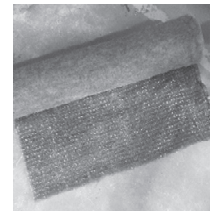


図-3 フィルター敷設状況と



(a)<sup>14)</sup>



(b)

図-4 フィルターの概要  
ピエゾメータ位置図

#### 3.2 実験方法

各実験条件を表-2に示す。すべてのケースで間隙比を0.90とし、まさ土の初期飽和度は30%、50%の2通りで

表-2 実験ケース

実験ケース	間隙比	初期飽和度 (%)	降雨強度 (mm/hr)	フィルターの有無	地下水位上昇開始までの経過時間 (min)	地下水位の平均上昇速度 (cm/min)	崩壊までの経過時間 (min)
1	0.90	30	85	無	62.5	0.27	76.5
2		30	140	無	32.9	0.52	42.7
3		50	140	無	6.2	0.20 (0.55)	43.1
4		50	140	有	5.3	2.00	9.9
5		30	140	有	10.4	2.21	13.3

注) ケース 3 における地下水位平均上昇速度 ( ) 内は経過時間 15 分までの値

模型斜面を作成した。また、降雨条件はケース 1 のみ 85 mm/hr で行い、その他のケースでは 140 mm/hr で実験を実施した。表-1 より土試料の飽和透水係数は  $6.04 \times 10^{-3}$  cm/s ( $\approx 217$  mm/hr) であり、実験条件である降雨強度 85mm/hr, 140 mm/hr よりも高い透水係数を有している。降雨強度 85 mm/hr, 140 mm/hr の実験において降雨とともに飽和度と透水性が上昇し、飽和に達すると地盤が飽和透水係数のそれぞれ 39.2, 64.5% 以上の浸透能を発揮した場合、地盤内へ雨水がすべて浸透すると考えられる。

地下水位の変動は 30 秒ごととピエゾメータを読み取ることによって測定を行った。なお、本実験では斜面の土砂が移動し、動きが止まらない状態となることを崩壊の定義とした。また、斜面下端には斜面内の水が排水されるよう 106  $\mu$ m の網 (外枠が縦 12cm, 横 48cm の矩形) を設置しており、斜面内部からの流出水と表面流の合計をコンテナとはかりを用いて計測した。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 裸地斜面における実験

実験ケース 1, 2, 3 では裸地斜面で実験を実施した。間隙比を 0.90 で統一し、土の初期飽和度はケース 1, 2 では 30%, ケース 3 では 50%, 降雨強度はケース 1 では 85 mm/hr, ケース 2, 3 では 140 mm/hr で実験を実施した。このうち本章では特にケース 2, 3 について述べる。ケース 2, 3 における斜面崩壊発生時の斜面状況を写真-1, 写真-2 にそれぞれ示す。また、ケース 2, 3 における地下水位の経時変化を図-5, 図-6 にそれぞれ示す。なお、図中の凡例は図-2 におけるピエゾメータの番号を示している。また、ピエゾメータは特徴的な挙動示したものを代表して示している。さらに、斜面内部からの流出水と表面流の合計を累積した、累積流出水量を図-7 に示す。図-7 における観測した累積流出水量  $Q$  と想定される最大の地下水流出量から次式 (1) により想定される最小の表面流出水量  $f$  を算出したケース 2, 3 における結果を図-8 に示す。なお、図-8 においてケース 2 の 33 分頃、ケース 3 の 35 分頃のデータが欠落しているのは実験中に水量を測定するためのコンテナの交換を行ったためである。

$$f = Q - A \times v \times T \quad (1)$$

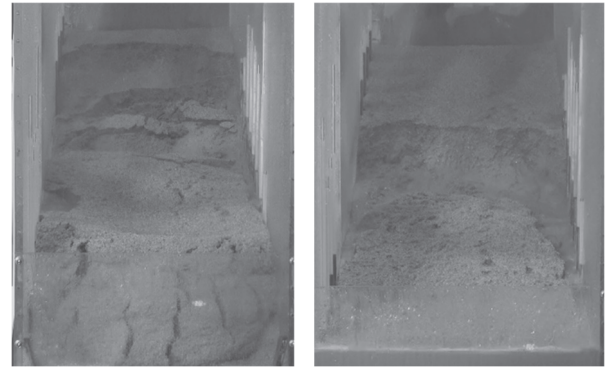


写真-1 ケース 2 における崩壊時の斜面状況

写真-2 ケース 3 における崩壊時の斜面状況

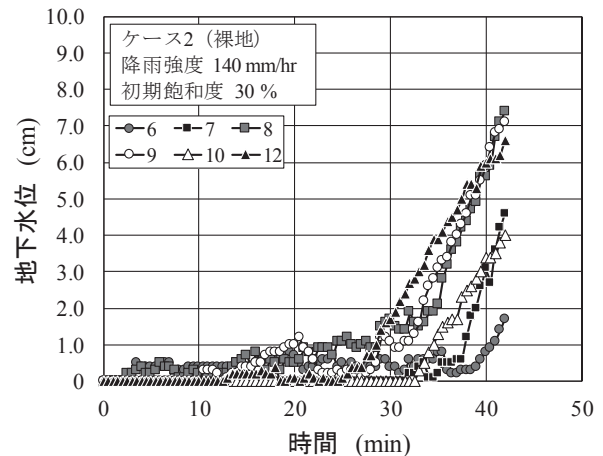


図-5 ケース 2 における地下水位の経時変化

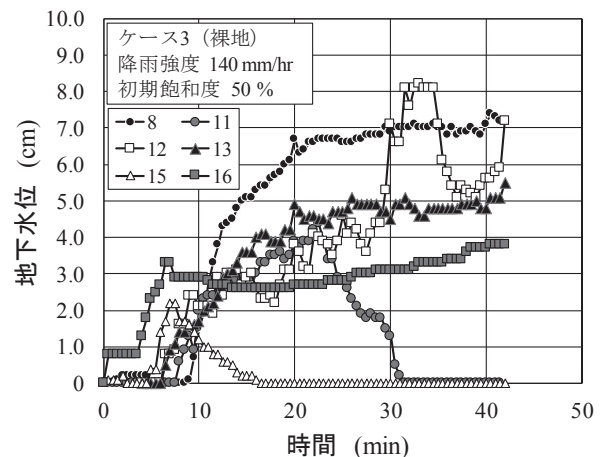


図-6 ケース 3 における地下水位の経時変化

ここで、 $f$ : 想定される表面流出水量,  $Q$ : 累積流出水量,  $A$ : 土層下端の断面積,  $v$ : 地下水流速,  $T$ : 流出水量初観測時からの経過時間である。なお, 地下水流速はダルシーの法則を用いて算出した。

図-5 からケース 2 では全体を平均して約 32.9 分から地下水水位が上昇し始め, 約 42.7 分に斜面崩壊が発生した。また, 全体の中でピークとなる地下水水位が高かったピエゾメータは番号 8 が最も高く, 次いで 9, さらに次いで 12 であった。写真-1 から斜面崩壊はピエゾメータ番号 15 真上の表面付近から 13 にかけて発生している。ただし, 番号 13 から 15 のピエゾメータからは変動を全く観測できなかったため, 崩壊発生地点と地下水水位の高さとの因果関係は分からない。さらに, 地下水水位の平均上昇速度は 0.52 cm/min であった。なお, ここでいう地下水水位の平均上昇速度とは, 地下水水位が形成され始めてから水位がピークとなるまでに要した時間あたりの水位上昇量とする。また, 地下水水位形成の始めとは地下水水位が上昇し続け, 1.5cm (1.5cm 以下で水位一定または水位の上下動を繰り返すことが多い) 以上上昇した場合の上昇開始時間とし, 上昇開始までの経過時間は反応を示したピエゾメータ全体を平均して算出している。以降, 同様の定義とする。

一方, 図-6 よりケース 3 では全体を平均して約 6.2 分から地下水水位が上昇し始めており, ケース 2 よりも約 26 分早く地下水水位の上昇が始まっている。このことはケース 3 では初期飽和度が 50% であるのに対しケース 2 では 30% であるためと考えられる。しかし, ケース 2 は地下水水位が上昇し始めてから約 10 分後に崩壊が発生したのに対しケース 3 では約 37 分後に崩壊が発生しており, ケース 3 が崩壊するまでかなりの時間を要し, ケース 3 の地下水水位の平均上昇速度は 0.20 cm/min とケース 2 の半分以下となっている。ケース 3 の地下水水位の経時変化では, 番号 12, 13 を除くピエゾメータにおいて, 地下水水位の瞬間最大上昇速度を 14.5 分までに観測している (瞬間最大上昇速度の観測時間が早いピエゾメータで番号 15 の 5.5~6.0 分, 番号 16 の 6.0~6.5 分, その他のピエゾメータは 10 分以降に観測)。また, 実験中における観察からケース 3 では実験開始後 15 分ごろから徐々に斜面両端が地表流により削られていることが確認されており, 図-8 に示したケース 2 とケース 3 を比較しても分かる通りケース 3 ではケース 2 よりも, 算出された 30 秒ごとの表面流出量が約 0.2 kg ずつ多くなっている。そこで, 図-8 中のケース 3 における 14~15 分の表面流出水量に着目し, その前後を比べると, 約 10 分頃から流出量一定となっていた状態から増加し始める分岐点となっていることが分かる。これらのことから, 地表流によって削られた箇所から地下水があふれ出したことで地下水水位の上昇が抑えられ斜面崩壊までに時間がかかったと考えられる。このことは, 15 分を境に平均上昇速度を求めると 15 分以前では 0.55 cm/min とケース 2 と同様の上昇であったのに対し, 15 分以降では 0.13 cm/min となっていることからいえる。そのため, 以降の比較では 15 分以前の値を用いることとする。

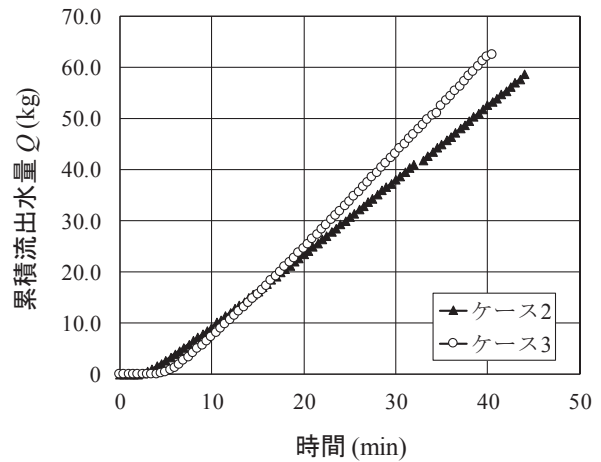


図-7 ケース 2, 3 における累積流出水量

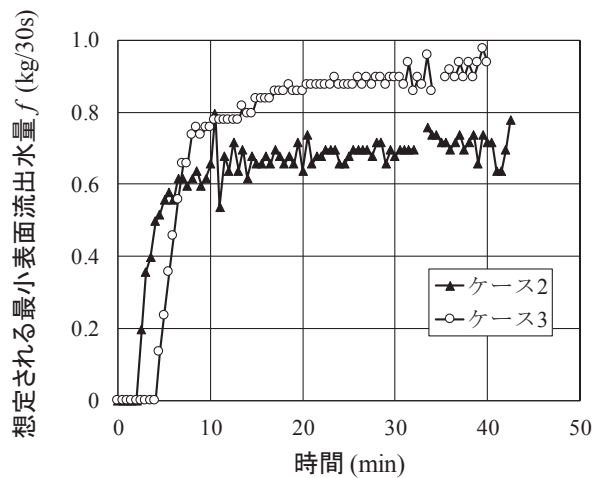


図-8 ケース 2, 3 において想定される最小の表面流出水量

また, 図-6 よりケース 3 では, 全体の中でピークとなる地下水水位が高かったピエゾメータは番号 12 が最も高く, 次いで 7, 8 が近い値であった。写真-2 から斜面崩壊はピエゾメータ番号 12 真上の表面付近から 10 にかけて発生しており, 地下水水位のピークが高かった位置は斜面崩壊発生位置またはその 30, 40cm 下方に位置している。

各ケースにおける地下水水位の瞬間最大上昇速度はケース 2 では図-2 における番号 7 のピエゾメータによって 40.5~41.0 分の間に観測された 1.80 cm/min, ケース 3 では番号 12 のピエゾメータによって 29.5~30.0 分の間に観測された 3.60 cm/min であった。ただし, ケース 3 における番号 12 のピエゾメータは図-6 からわかる通り地下水水位が上昇してから終始急激な地下水水位の上下動を繰り返しており, 14.5 分までに地下水水位の瞬間最大上昇速度を観測したその他のピエゾメータ (番号 13 を除く) の挙動と異なっている。そこでケース 3 において次点となる地下水水位の瞬間最大上昇速度を求めると番号 11 のピエゾメータによって 9.5~10.0 分の間に観測された 2.20 cm/min となっており, 以降の比較ではこの値を用いることとする。

また, 本稿では述べていないがケース 1 においても図-8 に示したケース 2, 3 と同様にホートン表面流出が確認さ

れたことから降雨強度 85mm/hr, 140 mm/hr よりも大きい飽和透水係数である  $6.04 \times 10^{-3}$  cm/s ( $\approx 217$  mm/hr) の土試料を用いた裸地斜面における実験において、地盤の浸透能は飽和透水係数よりも非常に小さくなるということがいえる。

また、**図-8**における表面流出水量がケース 2, 3 ともに 10 分前後から 0.7~0.9 前後を推移しているが、この値から降水量における表面流の割合を算出するとおよそ 90%が表面流として流出したことが分かった。

#### 4.2 フィルター敷設斜面における実験

実験ケース 4, 5 では斜面表面に、上述したフィルターを敷設して実験を実施した。なお、フィルターの状態は、ケース 4 では自然乾燥状態、ケース 5 では水で飽和させてから 10 分間鉛直に吊るして放置した後の状態（水が滴らない程度、水分の重さをフィルターの乾燥時の重さで除した値で 333.5%）で敷設した。裸地斜面における実験と同様に間隙比 0.90 で統一し、土の初期飽和度および降雨強度は、ケース 4 ではケース 3 と同様の条件である初期飽和度 30%・降雨強度 140 mm/hr、ケース 5 ではケース 2 と同様の条件である初期飽和度 50%・降雨強度 140 mm/hr で実験を実施した。ケース 4, 5 における斜面崩壊発生時の斜面状況を**写真-3**、**写真-4**にそれぞれ示す。なお、ケース 5 では斜面崩壊時に土砂とともにフィルターが斜面下部へ流下しており、**写真-4**中では確認できない。また、ケース 4, 5 における地下水位の経時変化を**図-9**、**図-10**にそれぞれ示す。なお、先程と同様に図中の凡例は**図-2**におけるピエゾメータの番号を示している。また、ピエゾメータは特徴的な挙動示したものを代表して示している。

**図-9** からケース 4 では全体を平均して約 5.3 分から地下水位が上昇し始め、約 9.9 分に斜面崩壊が発生した。また、全体の中でピークとなる地下水位が最も高かったピエゾメータは番号 6、次いで 13 であった。**写真-3** から斜面崩壊はピエゾメータ番号 13 真上の表面付近から 12 にかけて発生しており、地下水位のピークが高かった位置は斜面崩壊発生位置、または 60cm 下方に位置する。さらに、**図-10** からケース 5 では全体を平均して約 10.4 分から地下水位が上昇し始め、約 13.3 分に斜面崩壊が発生した。また、全体の中でピークとなる地下水位が最も高かったピエゾメータは番号 5、次いで 13 であった。**写真-4** から斜面崩壊は他のケースと異なり、斜面全体が流下する形となっており、崩壊位置との因果関係は分からない。

地下水位上昇から斜面崩壊までに要した時間はケース 4 では約 4.5 分であるのに対しケース 5 では約 3 分、地下水位の平均上昇速度はケース 4 では 2.00cm/min、ケース 5 では 2.21cm/min となっており、初期飽和度 50% のケース 4 よりも初期飽和度 30% のケース 5 の方がより地下水位上昇、斜面崩壊しやすくなっている。これは斜面表面に敷設したフィルターの初期状態における含水状況が影響したと考えられる。また、**図-9**、**図-10** からわかるとおりケース 4, 5 ともにすべてのピエゾメータにおいて地下水位の



写真-3 ケース 4 における崩壊時の斜面状況



写真-4 ケース 5 における崩壊時の斜面状況

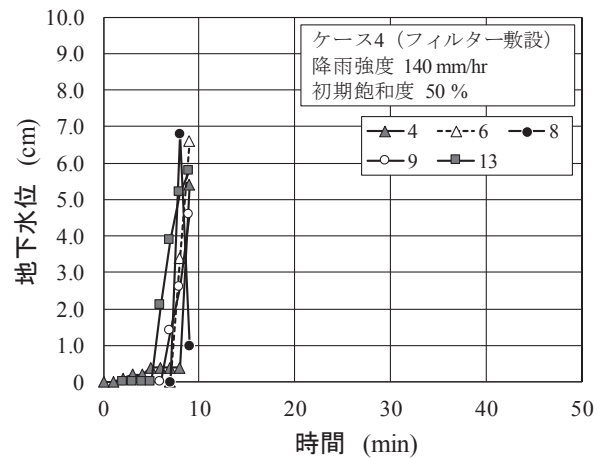


図-9 ケース 4 における地下水位の経時変化

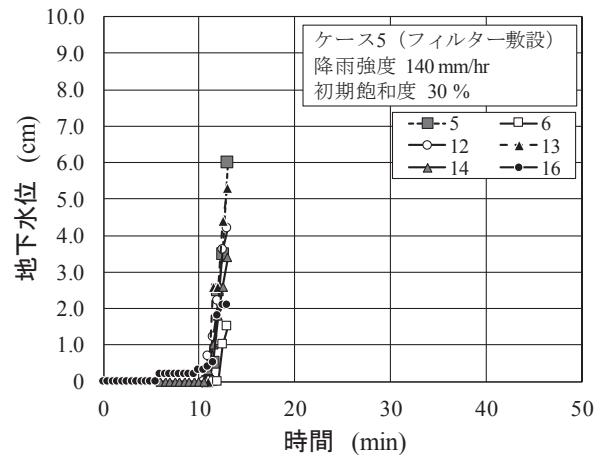


図-10 ケース 5 における地下水位の経時変化

上昇がほぼ同時かつ一気に上昇する結果となった。なお、各ケースにおける地下水位の瞬間最大上昇速度はケース 4 では**図-2**における番号 8 のピエゾメータによって 7.0~8.0 分の間に観測された 6.80 cm/min、ケース 5 では番号 13 のピエゾメータによって 11.0~11.5 分の間に観測された 5.20 cm/min であった。さらに、ケース 4, 5 ではケース 1, 2, 3 (**図-7**) のような流出水（斜面内部からの流出水と表面流、ただしフィルター内の流下も含む）はほぼ観測されなかつ

た。裸地斜面における実験では図-8 に示したように一定量の表面流が発生したと想定されたことから、ケース 4, 5 で流出水が観察されなかったことはフィルターによって表面流出が抑制されるとともに、斜面内部からの流出水が発生する前に一気に崩壊が発生したためであると考えられる。しかし、このことは上述したような、「森林斜面では斜面全体が均一ではないことから降雨強度が土壤の浸透能以下となる場合でも表面流が発生する」ということと異なっているため、フィルターは斜面全体の均一性を高めたと考えられる。このように考えると、地下水位の上昇がほぼ同時かつ一気に上昇する結果となったことも斜面全体の均一性が高まったためであると説明できる。

ここで、前述した松本ら<sup>13)</sup>によって行われた野外の実斜面実験による研究との比較を、地下水位の発生時間と地下水位上昇速度の観点から行う。松本らが実験した斜面の表層の構成を図-11、斜面のサイズと地盤内の間隙水圧の配置箇所を図-12、各実験時の表層、斜面構成、降雨に関する条件を表-3 に示す。図のように、斜面は幅 10m、長さ 20m で不透水層の上に厚さ 0.3m の礫層、さらにその上に厚さ 1.0m のまさ土層という構造となっている。松本らの実験では実験 3, 4, 5 ではそれぞれ厚さ 7, 12, 20mm のフィルターが用いられており、本実験で用いたフィルター（厚さ 7mm）と同じものより厚いものが用いられている。降雨強度は 1 時間降雨量 100mm の条件で行われており、実験 4 では降雨開始 2 時間後に 1 時間の降雨中断時間（インターバル）を設定し、その後降雨を再開している。

松本らの実験結果における間隙水圧の値から地下水位の上昇開始時期と平均上昇速度に注目すると、裸地条件の実験 2 では表面流による浸食が起こり地下水位はインターバル後の降雨再開から約 80 分後に 0.77cm/min の速度で上昇している。実験 3（フィルター厚さ 7mm）では、降雨開始直後から地下水位が約 1.22~2.80 cm/min で上昇し、実験 4（フィルター厚さ 12mm）では降雨開始直後、場所によっては降雨開始から約 80 分後から 0.78~1.76 cm/min の速度で上昇した。松本らの実験 2 の裸地条件の値は、本研究のケース 2, 3（裸地斜面）における地下水位の平均上昇速度（0.20~0.55 cm/min）よりもやや大きく、フィルター敷設斜面である実験 3 と実験 4 の値は、本研究のケース 4, 5 における地下水位の平均上昇速度（2.00~2.21 cm/min）とほぼ同程度の値となっている。本研究における裸地斜面、フィルター敷設斜面の平均上昇速度は、松本らの野外実斜面での実験結果ともおおむね対応していると考えられる。

### 4.3 裸地斜面とフィルター設置斜面の実験結果の比較

初期飽和度および降雨強度のそれぞれを同様の条件とし、斜面表面へのフィルター敷設の有無のみが異なるケース 2 とケース 5、ケース 3 とケース 4 についてそれぞれ結果の比較を行う。

ケース 2（裸地斜面）とケース 5（フィルター敷設斜面）を比較すると地下水位上昇開始までの経過時間はケース 2 で 32.9 分、ケース 5 で 10.4 分とフィルターを敷設するこ

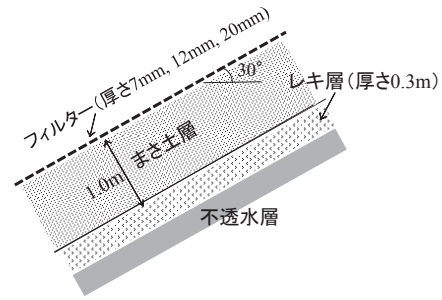


図-11 松本らの野外実験における斜面の構成（論文の情報より作成）<sup>13)</sup>

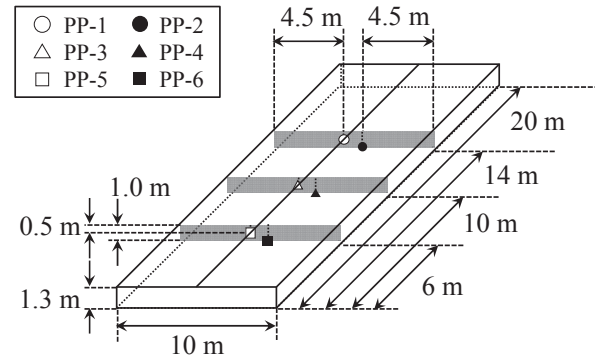


図-12 松本らの実験における間隙水圧計配置図<sup>13)</sup>に加筆

表-3 松本らの野外実物大実験の実験条件

実験名	表層の条件	斜面構成	降雨条件
実験 2	裸地	まさ土層 1m, 粗粒砂層 0.3m	100mm/h, 約 5 時間, インターバルあり
実験 3	フィルター (7mm)	まさ土層 1m, レキ層 0.3m	100mm/h, 約 5 時間, インターバルなし
実験 4	フィルター (12mm)	まさ土層 1m, レキ層 0.3m	100mm/h, 約 5 時間, インターバルあり
実験 5	フィルター (20mm)	まさ土層 1m, レキ層 0.3m	100mm/h, 約 5 時間, インターバルなし

とによって約 22.5 分短縮、崩壊までの経過時間もケース 2 で 42.7 分に対しケース 5 で 13.3 分と約 29.5 分短縮される結果となった。また、地下水位の平均上昇速度はケース 2 で 0.52 cm/min に対しケース 5 で 2.21 cm/min となりフィルターを敷設することにより約 1.7 cm/min の上昇、地下水位の瞬間最大上昇速度においてもケース 2 で 1.80 cm/min であったのに対しケース 5 では 5.20 cm/min と約 3.40 cm/min の上昇となった。同様に、ケース 3（裸地斜面）とケース 4（フィルター敷設斜面）を比較すると地下水位上昇開始までの経過時間はフィルターを敷設することにより約 1.0 分の短縮、崩壊までの経過時間も約 33.0 分短縮される結果となった。また、地下水位の平均上昇速度はケース 3 で 0.55 cm/min に対しケース 4 で 2.00 cm/min と約 1.5 cm/min の上昇、地下水位の瞬間最大上昇速度においてもケース 3 の 2.20 cm/min に対しケース 4 では 6.80 cm/min と約 4.60 cm/min の上昇となった。

また、ケース 1, 2, 3 における裸地斜面では流出水（斜面

内部からの流出水と表面流)が確認されたのに対しケース4,5におけるフィルター敷設斜面ではほとんど流出水が確認されず、斜面崩壊に至るまでほぼすべての雨水が地盤内に浸透したと考えられる。さらに、裸地斜面における実験では地下水位が上昇し始めるタイミングがピエゾメータごとある程度異なっているのに対しフィルターを敷設したケースではほぼ同時に上昇し始める結果となった。

実験全体では、ピエゾメータの番号6から13と斜面中央より少し上方で地下水位のピークが高くなる傾向となった。斜面崩壊位置はケース5では斜面全体で発生したが、他のケースでは番号10から15にかけて発生する結果であった。このように斜面中央より上方で崩壊が発生し、その下方で地下水位のピークが高い地点が観測される同様の傾向が得られた。

以上のことをまとめると斜面表面にフィルターを敷設することにより斜面からの流出水、特に表面流はほぼ観測されず、地盤は浸透性の高い状態を保っていたと考えられる。地下水位上昇開始までの経過時間および崩壊までの経過時間は約30分~35分程度短縮され、地下水位の平均上昇速度は約2.0~3.5倍の上昇となるとともに、地下水位が上昇し始めるタイミングはほぼ同時となる結果となった。これらのことはフィルターが、土壌クラストが斜面表面に形成されるということを抑制し、斜面地盤の浸透能を非常に高い状態に保つとともに斜面全体の均一性を高めたためであると考えられる。

本実験ではフィルターを使用した方が、土砂災害が発生する実斜面では斜面表面が下層植生やリター等によって覆われており、そのことによって上述したとおり雨滴衝撃が緩和されるとともに土壌クラストの形成が抑止されることが確認されている<sup>4)</sup>。しかし、上述したように野外実験において表面流出が起こっていることから<sup>3),6)</sup>、下層植生やリター等によって覆われていても今回模型斜面表面にフィルターを敷設して行った実験のように雨水がすべて表層から浸透するという条件ではないと考えられる。しかし、下層植生やリター等の存在により裸地条件での模型実験よりは多く浸透するはずである。今回の模型実験結果と実斜面の関係を図-13に模式的に表したが、図のように下層植生やリター等のある斜面はフィルターを敷設した条件と裸地斜面の条件の中間の条件にあると考えられる。地形や土地の表層部が雨水の表面流出に及ぼす影響は、河川工学で流出係数(全降雨に対する表面流出量の比)として評価されている。たとえば、国土交通省の河川砂防技術基準では「こう配の緩い山地」と「こう配の急な山地」で、流出係数の標準値の範囲がそれぞれ0.20-0.40, 0.40-0.60とされている<sup>15)</sup>。降雨浸透とそれによる地盤内地下水を模型実験によって検討するためには、実斜面の表層の条件による表面流出特性を把握して、模型実験において条件を一致させる必要がある。この点は本論文の検討範囲外であり、今後の課題である。

本論文では、フィルターがない場合に本実験の条件では表面流出が約90%となり、一方でフィルターを敷設した場

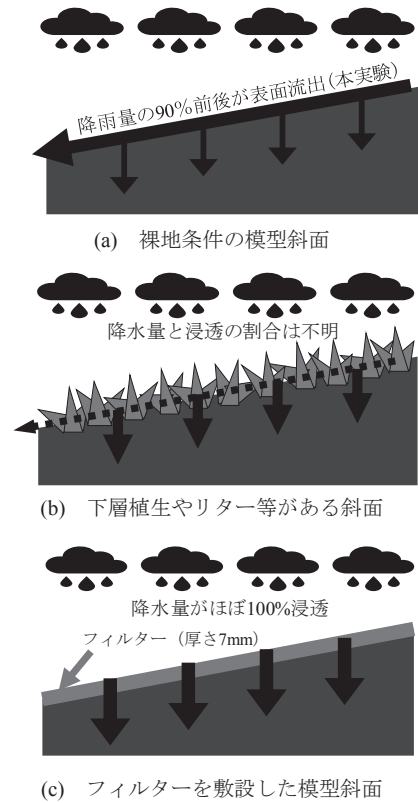


図-13 本実験の結果と実斜面のイメージ

合に雨水がほぼすべて斜面内に浸透する条件での実験となったことを示し、表面流出と地盤浸透の関係が地盤内の地下水位の発生に大きく影響することを示した。ただし、本実験で使用したフィルターは上述の松本ら<sup>13)</sup>の実験で使用された3種類のフィルターの中で最も薄い(厚さ7mm)のものを用いていることに注意を要する。本実験ではフィルターを通じた流れがほとんど観察されなかったが、フィルターの厚さが増加すればフィルター内の流下によって、地盤への浸透が抑制されることが考えられる。実際に松本らの実験では、厚さ20mmのフィルターを敷設した条件(実験5)において、地盤内の間隙水圧の上昇は斜面の上部と中部では観察されておらず、フィルター内の流下により地盤内浸透が抑制されていると推定できる。今後この観点からフィルターの効果をさらに検討する必要がある。

## 5. 結論

本研究では、模型斜面を用いた裸地斜面における実験は下層植生等が繁茂し裸地斜面であることの少ない実斜面の現象と異なるのではないかとこの観点から模型斜面の表面に厚さ7mmのフィルターを敷設し、地表流を抑制させるとともに地盤表面からの浸透性を高めた状態で模型実験を行い、地下水位がどのように上昇するかを裸地斜面における実験結果と比較することで検討した。以下に本研究で得られた結果を示す。

(1) 飽和透水係数  $6.04 \times 10^{-3}$  cm/s ( $\approx 217$  mm/hr)の裸地斜

面に降雨強度 85mm/hr, 140 mm/hr の降雨を与えた実験においてホートン表面流出が確認され、裸地斜面における浸透能は飽和透水係数よりも非常に小さくなることが分かった。

- (2) フィルターを敷設した斜面における実験では斜面内からの流出水、特に表面流はほぼ観測されず、地盤は浸透性の高い状態を保ったと考えられる。しかし、一般的に知られている、森林斜面において降雨強度が土壌の浸透能以下となる場合でも表面流が発生することと異なっており、このことはフィルターが斜面全体の均一性を非常に高い状態にしたためであると考えられる。
- (3) 裸地斜面とフィルターを敷設した斜面における実験結果の比較からフィルターを斜面表面に敷設することにより地下水位上昇開始までの経過時間および崩壊までの経過時間は約 30 分～35 分程度短縮され、地下水位の平均上昇速度は約 2.0～3.5 倍上昇することがわかった。このことは、フィルターが雨滴衝撃を緩和するとともに非常に薄い難透水層である土壌クラストが斜面表面に形成されることを抑制し、斜面表層の浸透能を高い状態に保ったためであると考えられる。

今後は、下層植生やリター等に関して実斜面の状況を把握し、それを実験でどのように再現するかを明らかにする必要がある。また、フィルターの厚さを増加させた場合のフィルター内流下による地盤浸透低減効果についても検討する必要がある。

#### 謝辞

本実験で用いた不織布フィルターは多機能フィルター株式会社に提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 気象庁 HP : アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>, 確認年月日 2017.6.1.
- 2) アタパッツ A. M. R. G., 丸野雄太朗, 土田孝, 丸田亮, 米良知己: パイプフローが斜面の安定に及ぼす影響に関する実験的研究, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.131-138, 2015.
- 3) 湯川典子, 恩田裕一: ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (I) 散水型浸透計による野外実験, 日本森林学会誌, Vol.77, No.3, pp.224-231, 1995.
- 4) 恩田裕一, 湯川典子: ヒノキ林において下層植生が土壌の浸透能に及ぼす影響 (II) 下層植生の効果に関する

室内実験, 日本森林学会誌, Vol.77, No.5, pp.399-407, 1995.

- 5) 宮田秀介, 恩田裕一, 五味高志, 水垣滋, 浅井宏紀, 平野智章, 福山泰治郎, 小杉賢一朗, Roy C. Sidle, 寺嶋智巳, 平松晋也: 森林斜面におけるホートン型地表流の発生に影響を与える要因—地質および降雨特性の異なる 3 サイトにおける観測結果の解析—, 日本森林学会誌, Vol.91, No.6, pp.398-407, 2009.
- 6) 村井宏, 岩崎勇作: 林地の水および土壌保全機能に関する研究 (第 1 報) —森林状態の差異が地表流下, 浸透および侵食に及ぼす影響—, 林試研報, No.274, pp.23-84, 1975.
- 7) 田中樹: 土壌クラストの形成機作とそれに影響を及ぼす諸条件, 土壌の物理性, Vol.71, pp.17-21, 1995.
- 8) Gomi, T., Sildle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., and Onda, Y.: Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer, *Water Resources Research*, Vol.44, No.8, W08411, 2008.
- 9) Wainwright, J. and Parsons, A. J.: The effect of temporal variations in rainfall on scale dependency in runoff coefficients, *Water Resources Research*, Vol.38, No.12, 1271, 2002.
- 10) 藤原東雄, 福田靖, 上俊二, 桑嶋啓治, 常村忠生: 開放型フィルターによる斜面の安定, 地盤と建設, Vol.21, No.1, pp.23-30, 2003.
- 11) 坪郷浩一, 中村勝美, 山本一夫, 上俊二, 福田靖: 不織布フィルターの降雨時法面保護機能に関する研究, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.169-175, 2010.
- 12) 坪郷浩一, 中村勝美, 山本一夫, 上俊二, 福田靖: 不織布フィルターを用いた降雨時の法面浸食防止に関する研究, 地盤と建設, Vol.29, No.1, pp.89-97, 2011.
- 13) 松本品, 河内義文, 兵動正幸: 土石流源頭部を再現した実物大モデルによる降雨実験, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.211-216, 2016.
- 14) 多機能フィルターHP: 製品概要, [http://www.takino.co.jp/tech\\_21.html](http://www.takino.co.jp/tech_21.html), 確認年月日 2017.6.8.
- 15) 国土交通省 HP: 河川砂防技術基準 調査編, 第 3 章 水文解析 第 2 節 流出解析 2.4 主要な流出モデルの事例, [http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html), 確認年月日 2017.10.1.

(2017 年 6 月 19 日 受付)