

## 不織布フィルターを用いた降雨時の法面侵食防止に関する研究

## Study on Slope Protection Function at Rainfall of using Nonwoven Filter

坪郷浩一 Koichi TSUBOGO (多機能フィルター (株))  
中村勝美 Katsumi NAKAMURA (多機能フィルター (株))  
山本一夫 Kazuo YAMAMOTO (多機能フィルター (株))  
上俊二 Shunji UE (徳山工業高等専門学校)  
福田靖 Yasushi FUKUDA (徳山工業高等専門学校)

法面保護工法の中で侵食防止を主目的として環境保全を考慮した保護材の一つに不織布フィルターがある。本研究では、3種類の不織布フィルターについて繊維構造の違いによる法面侵食防止に対する効果を調べた。さらに裏打ち材を付加した不織布フィルターの初期濁水および雨水浸透抑制効果を検討した。その結果、表層土との密着性が高く、雨滴衝撃から法面を保護できる撥水性繊維の不織布フィルターが侵食防止に有効であることが明らかになった。また、撥水性の高い裏打ち材を付加したフィルターは、雨水の地中層への浸透が緩和されることにより濁水流出が抑制されることが明らかになった。

キーワード：侵食防止，不織布フィルター，雨水の地中層浸透率，濁水流出抑制，  
雨水排出能力 (IGC : E-6)

## 1. はじめに

わが国において、梅雨時の長雨や局所的な集中豪雨は増加傾向にある。特に、集中豪雨は50mm/hrを超え、大規模な斜面災害を誘引する<sup>1), 2)</sup>。豪雨による土砂災害を防ぐためにも法面侵食防止対策は重要である。このように降雨から法面を保護する対策が必要不可欠であり、かつ自然環境に配慮した法面工が求められている。このようなことから降雨による表層土侵食に関する研究は数多く行われており、さまざまな有用な知見を提供している。

たとえば、雨滴衝撃の研究として、岩垣ら<sup>3)</sup>は、砂質土について雨滴侵食量および表層土での湛水量を計測し、雨滴衝突エネルギーと侵食量の関係を示している。また、福桜<sup>4)</sup>は、雨滴と表層土との衝突を解明し、雨滴侵食の機構を明らかにしている。さらに、牧野ら<sup>5)</sup>は、沖縄県の土壌を用いて雨滴衝撃が表層土の侵食に与える影響を実験的に明らかにしている。また、深田ら<sup>6)</sup>は、雨水による表層流の掃流力が限界掃流力を超えない場合でも、雨滴衝突により表層土に侵食が発生することを示している。

雨水浸透に伴う斜面崩壊に関する研究として、笹原ら<sup>7)</sup>は、砂質土斜面の人工降雨による崩壊実験を行い、地中変位量と地中水分量の関係について解析を行い、急勾配斜面の不飽和状態における崩壊発生機構を、不飽和土の変形および破壊特性の観点から示している。また、森脇ら<sup>8)</sup>は、雨水浸透に伴う地下水流発達および減衰過程を把握し、それに関与する要因の評価により斜面崩壊・地すべりの発生

に及ぼす影響を示している。

植物を有する法面に関する研究として、新田<sup>9)</sup>や宮田ら<sup>10)</sup>は、降雨による雨滴衝撃作用および表層流水による侵食作用を植物が防止することを示している。表層土が植物で密に被覆されていると、雨滴衝撃は植物体で受け止められ緩衝して土中空隙の閉塞作用を防ぐことから、植物で完全に表層土が被覆されていると雨滴侵食は防止できる。さらに、表層土の植生被覆は表層流水に対する表層土の粗度を増加させ、雨水が地中層に浸透し地中層に貯留する機会が得られ水資源涵養機能が高まる。また同時に、表層土の侵食および侵食土砂の流出と密接に関係している表層流水を抑制できることを示している。法面の保護・緑化に関する既存技術として、厚層基材吹付工<sup>11), 12), 13), 14)</sup>、人工張芝工<sup>15)</sup>などの植生工<sup>16), 17), 18)</sup>や法面の侵食防止効果と緑化機能を有する不織布フィルター<sup>19), 20)</sup>による法面侵食防止工法などが代表工法として挙げられる。

不織布フィルターを用いた降雨侵食の研究として、藤原ら<sup>19)</sup>や筆者ら<sup>20)</sup>は、不織布フィルターで法面を保護して降雨実験を行い、雨滴からの侵食防止機能を評価した。しかし、不織布を使用する場合、土壌凝集剤等を使用しない限り降雨初期段階の濁水流出は避けられないことが示されている。

降雨による土壌侵食に関して上述のような研究事例がある。しかし、牧野らが指摘しているように降雨特性が仮に同じとしても、土壌の性質は地域性が強く、既往の研究

事例をそのまま流用して良いかの判断は難しい。したがって山口県における降雨侵食対策を考えるに当たっては、山口県の土壌を用いた雨滴による侵食特性を検討しておく必要がある。また、既往の研究では、降雨により侵食された表層土流出に伴う濁水状況の時間的変化に関するデータ数が不足している。さらに、筆者らの知る限りでは不織布フィルターを用いた法面侵食防止機能評価に関する研究事例は藤原ら<sup>19)</sup>や筆者ら<sup>20)</sup>などと少ない。

そこで本研究では、不織布フィルターを用いた降雨実験を行う。具体的には、3種類の不織布フィルター（図-1参照）の雨滴侵食および表層流水による表層土侵食などに対する防止効果について考察する。また、その侵食防止効果を明確にするため、フィルター材を構成する撥水性繊維や親水性繊維などの繊維性質の違いによる侵食防止に対する効果を調べ、3種類の不織布フィルターの特徴を把握することを目的とする。また、中国地方で最も広く分布している花崗岩風化土であるまさ土（山口県周南市にて採取）を用いて盛土法面を造成する。この盛土表面に不織布フィルターを設置し、降雨時の侵食防止状況を確認する降雨実験を行う。各不織布フィルターの雨滴による衝撃に対する耐久性を比較することにより、不織布の厚さ等と侵食防止効果の関係を検討する。さらに、不織布フィルターの降雨時間と濁水抑制能力の関係について検証する。

また、不織布の効果として降雨時には、表層土と密着した不織布層が雨滴の衝撃を緩和するとともに、一旦、地中に入った雨水は流速抵抗の少ない不織布内や表面を流下させ、雨水を排出させることにより、表層土の侵食を防止する。しかし、不織布を用いた場合の問題点として、前述のように降雨初期段階に濁水が流出する点が挙げられる。さらに、不織布は空隙率が99.0~99.7%と高く粗い繊維構造のため局所的な集中豪雨などが発生した場合、不織布の排出機能の限界を超え、地中層の地下水位が急激に上昇する。そのため雨水浸透にともなう地中層の土粒子間に作用するサクシジョンの消失などによる表層崩壊が起こりやすいと考えられる<sup>21)</sup>。そこで本研究では、後述の実験結果（3.1参照）から侵食防止に最適な不織布フィルターを選択し、不織布フィルターの表層土側に裏打ち材を付加（図-2参照）した場合の検討を行った。

本研究では、以下の2点に着目した。

- (1) 裏打ち材の有無による濁水流出の状況を把握する。
- (2) 裏打ち材の有無による雨水遮断効果を確認する。

(1)では、裏打ち材の有無による初期段階および降雨時間経過にともなう濁水流出の抑制効果を確認する。また、

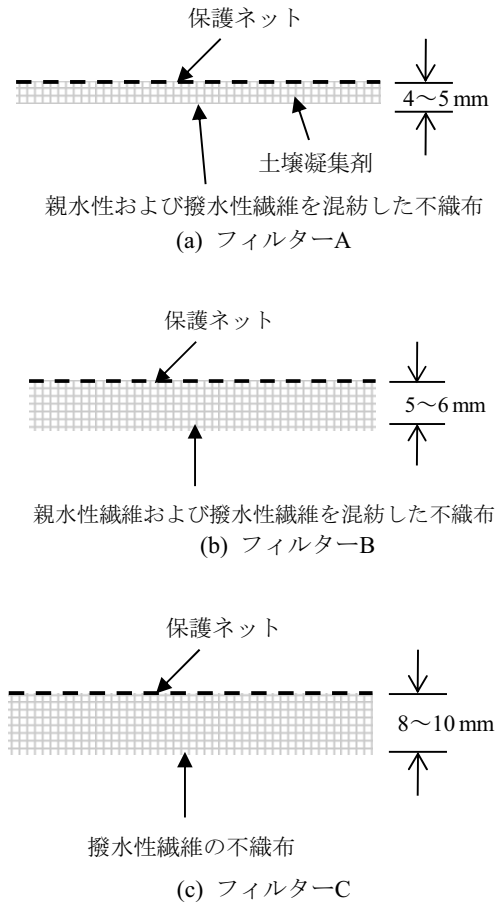


図-1 不織布フィルターの種類と構造

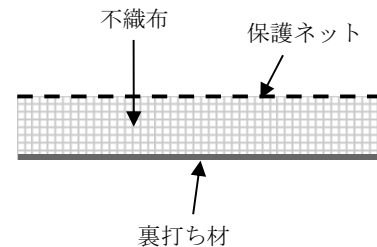


図-2 不織布フィルターと裏打ち材の位置関係の一例

表-1 使用資材の特性

(a) 各不織布フィルターの特性

|        | 厚み(mm) | 保水能力 | 燃焼性 |
|--------|--------|------|-----|
| フィルターA | 4~5    | 小    | 難燃性 |
| フィルターB | 5~6    | 中    | 易燃性 |
| フィルターC | 8~10   | 大    | 難燃性 |

(b) 各裏打ち材の特性

|        | 厚み(mm) | 保水能力 | 遮水能力 |
|--------|--------|------|------|
| 裏打ち材 X | 0.27   | 大    | 小    |
| 裏打ち材 Y | 0.21   | 小    | 大    |

(2)では、雨水の地中層への浸透抑制効果を検討し、裏打ち材の有無による雨水に対する遮水性能を確認する。

## 2. 実験概要

### 2.1 各種不織布フィルター

本研究では、図-1 に示す 3 種類の不織布フィルターA, B, C を用いて実験を行った。不織布フィルターA (以後、フィルターA) は、親水性繊維と撥水性繊維を混紡した不織布構造であり、過剰な水分を排出でき、不織布に付加した土壤凝集剤により土粒子の移動や微細なものを吸着させ濁水流出を抑制する。不織布フィルターB (以後、フィルターB) は、撥水性繊維と吸湿性が高い繊維を混紡した不織布構造は、余剰水をフィルター内で排出処理でき地中に余分な雨水を浸透させない効果が期待でき、侵食防止機能を大幅に向上させたものである。不織布フィルターC (以後、フィルターC) は、植物の毛細根に似た極細の撥水性繊維をランダムに配した不織布構造であり、降雨などから表層土を保護する機能を持っている。またいずれの不織布フィルターにも打設固定するために不織布の押さえとして樹脂性の保護ネットが貼付けてあり、不織布フィルターは空隙率 99.0~99.7% をもつ繊維構造体である。なお、表-1 (a) に各不織布フィルターの特性を示す。

### 2.2 降雨実験に使用した裏打ち材

本研究では、2 種類の裏打ち材 X, Y を用いて実験を行った。裏打ち材 X は、目付量 20~30g/m<sup>2</sup>、保水性の高い繊維を配した裏打ち材構造であり、雨水の保持効果が高い。裏打ち材 Y は、目付量 40~50g/m<sup>2</sup>、撥水性繊維を密に配した裏打ち材構造であり、雨水の遮水効果が高い。2.1 の不織布と異なり密に繊維を配した布状の繊維構造体である。なお、表-1 (b) に各裏打ち材の特性を示す。

### 2.3 試料

本研究では山口県周南市より採取したまさ土を使用した。図-3 に試料の粒径加積曲線、表-2 に物理的性質を示す。

### 2.4 降雨実験装置

図-4 に示すように、傾斜角 30°、法長 0.9m、法幅 0.6 m、深さ 6cm の法面を造成し、降雨装置により人工的に雨を降らせた。さらに、法面の盛土は、最大乾燥密度 95% 以上で締め固めた。また、雨水が不織布フィルター内部や表層土を通るときに発生する水の流れを表層流と定義する。

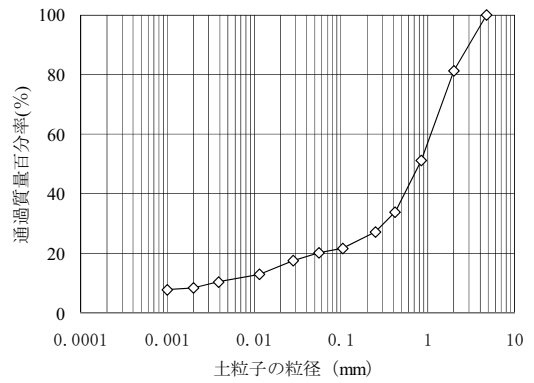
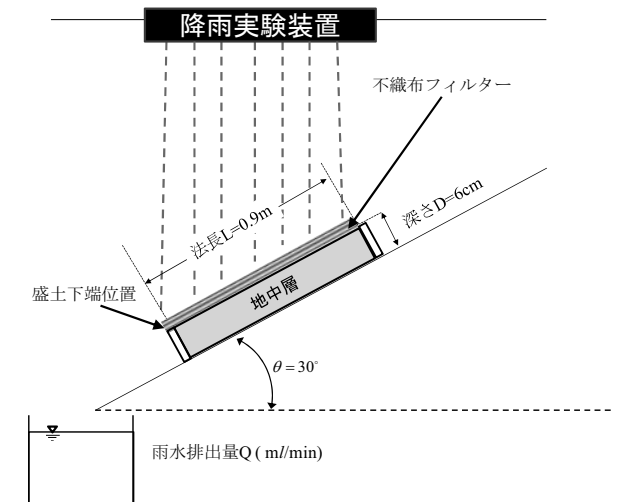


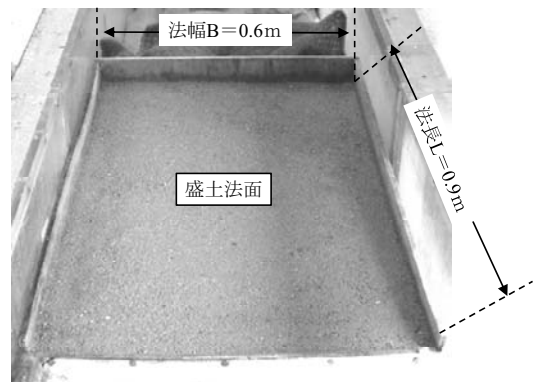
図-3 粒径加積曲線

表-2 試料の物理的性質

|                                      |         |
|--------------------------------------|---------|
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.633   |
| 均等係数 $U_c$                           | 322.128 |
| 曲率係数 $U'_c$                          | 28.261  |
| 最適含水比 $W_{opt}$ (%)                  | 10.200  |
| 最大乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.804   |



(a) 降雨実験の法面形状



(b) 実験装置

図-4 降雨実験の装置

## 2.5 濁りの指標<sup>22)</sup>

3の実験では流出水を採取して濁りの指標を測定する。本研究で使用した濁りの指標は、濁度、SS量である。

以下にそれらの定義および測定方法を説明する。

### (1) 濁度<sup>20)</sup>

濁度の定義は、純水 1 リットル中に精製カオリン 1mg を含むときの濁りを 1 度 (または 1ppm (mg/l)) とする。この値の計測は濁度計を使用して行う。

### (2) SS (浮遊懸濁物質 : Suspended Solids の略)<sup>22)</sup>

SS は、主に工場排出などで使われる指標であり、水の外見上のきれいさを決める因子の一つである。すなわち、水中に溶けていない濁りの原因物質の総量が SS である。ただし、SS と濁度の測定結果は相関関係がない場合があり注意が必要である。

測定方法は、まず、採取した水をろ紙に注水し、ろ過する。通常は採取した水をろ紙でろ過したとき通過しない成分を浮遊懸濁物質とする。このろ紙を 110°C で乾燥させて量った質量から元々のろ紙の質量を引いたものが浮遊懸濁物質質量になり、この量を採取した流出水量 ( $l$ ) で除したものを SS (mg/l) とする。

また、山口県公害防止条例施行規則<sup>23)</sup>などでは流出が許容される水の SS は 200mg/l 以下と定められている。以後、本研究では、この基準を参考に SS=200mg/l を雨水排出 SS 量の許容値とする。

## 2.6 降雨流量の算定

本研究では、想定する降雨量  $R$  (mm/hr) から降雨流量  $Q_R$  (m<sup>3</sup>/s) を算出する。図-5 から法長  $L$  (m)、法幅  $B$  (m)、傾斜角  $\theta$  のモデル法面としたとき  $Q_R$  は以下の式になる。

$$Q_R = \frac{1}{3.6 \times 10^6} R \cdot A \quad (1)$$

このとき水平面積  $A$  (m<sup>2</sup>) は、 $A = L \cdot \cos \theta \cdot B$  となる。

## 2.7 雨水に対する遮水性能評価

降雨時のフィルターや裏打ち材から地中層に浸透する雨水量を把握するための式を提案する。そこで図-4 の実験装置下端からの流出水の流量を雨水排出量  $Q$  (ml/min) と定義する。

雨水が地中に浸透しない場合を完全遮水とし、このときの雨水排出量  $Q_p$  (ml/min)、それ以外のときの雨水排出量を  $Q_n$  (ml/min) としたときの雨水の地中層浸透率  $Q_k$  (%) を次式で定義する。

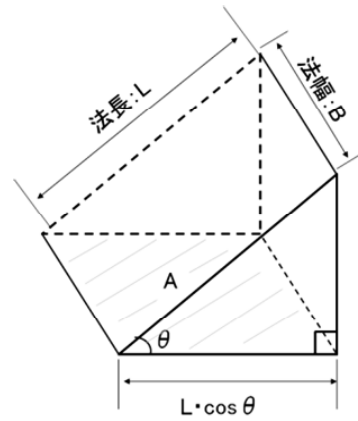


図-5 降雨流量  $Q_R$  の概略図

$$Q_k (\%) = \frac{Q_p - Q_n}{Q_R} \times 100 (\%) \quad (2)$$

式(2)を用いて裏打ち材の有無による地中層への雨水浸透状況の違いを調べる。

盛土下端位置にあるフィルター内を流下する断面 (長方形形状) は表層流が遷移する位置にあるため支配断面になる<sup>23)</sup>。式(3)より雨水排出量  $Q$  を実験法面幅  $B$  (m) で除して単位幅流量  $q$  (m<sup>2</sup>/s) を求める。また、支配断面の水深  $h$  は式(4)より求まる。なお、 $g$  は重力加速度である。

$$q = Q / B \quad (3)$$

$$h = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

つぎに、フィルター内の Manning の粗度係数  $n$  を算出する。フィルター内を流下するときの流水面積を  $A_f$ 、流速を  $V_f$ 、法面勾配を  $I$  とすると、連続の式より、

$$Q = A_f V_f \quad (5)$$

Manning の流速公式より

$$V_f = \frac{1}{n} \left( \frac{A_f}{S} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで潤辺  $S$  を  $B + 2h$  とし、両辺に  $A_f$  をかけ式(5)を用いて式(6)を式(7)のように書き直す。

$$n = \frac{1}{Q} \frac{A_f^{\frac{5}{3}}}{(B + 2h)^{\frac{2}{3}}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入することで流速が求まる。

また、雨水浸透にともなう地下水流の形成・発達 は地中層を不安定にする要因になっている。そこで本研究では、雨水浸透がもたらす地下水流のエネルギーおよび運動量の発達状態を、盛土法面下端位置の表層流の比エネルギーおよび比力から把握する。それらの考え方を以下に説明す

る。

(1) 表層流の比エネルギー  $E$

雨水浸透にともなう地下水流の発達・減衰により、表層流のエネルギーが増減すると考えられることから流出水の降雨時間ごとの流量から表層流の比エネルギーを求め、雨水浸透率との関係について検討する。

(2) 表層流の比力  $F$

地中層への雨水浸透量が増加すれば、地下水流が発達し地中層の水の運動量が増加する。一方、表層流の運動量は減少すると推測されることから流出水の降雨時間ごとの流量から表層流の比力を求め、雨水浸透率との相関関係について検討する。

表層流の比エネルギー  $E$ 、比力  $F$  を以下の手順で算出する<sup>24)</sup>。

式(8)から比エネルギー  $E$  を求める。

$$E = h + \frac{q^2}{2gh^2} \tag{8}$$

また、式(9)から比力  $F$  を求める。

$$F = \frac{h^2}{2} + \frac{q^2}{gh} \tag{9}$$

### 3. 実験結果

#### 3.1 裏打ち材がない場合の降雨実験

表-3 より、裏打ち材がない場合の降雨実験 (CASE(1)) は、降雨量を 115mm/hr、降雨時間を 1440 分とする。不織布フィルター A, B, C を法面に設置して降雨実験を行った。なお、実験前に設置したフィルターへ散水を行い表層土との密着性を高めた。降雨時間経過による法面に設置した不織布フィルターの性能を評価する。降雨開始から 60 分後までは 10 分ごと、60 分以後は、30 分ごとに流出水を採取し、濁度、SS (2.5 参照) を測定した。

図-6 に降雨時間と濁度、図-7 に降雨時間と SS の関係、写真-1 に降雨時間と法面の状況を示す。図-6 より、フィルター A は、初期段階から濁度が 200ppm を下回ったが、一方で、降雨開始から 150 分後では濁度が上昇し、フィルター B, C の濁度を上回った。これは降雨時間の経過と共にフィルター A に付加した土壌凝集剤の効果が低下したため、結果としてフィルター C より濁度が高くなったものと考えられる。フィルター B は、実験終了まで濁度が 200ppm を下回らず、濁度の改善が見られない。これはフィルター B と土粒子が絡み合わずに表層土との密着性が十分ではなく法面が雨滴侵食されたものと考えられる。フィルター C は、降雨開始から 10 分後では濁度が 200ppm を超えているものの、実験終了後の法面は雨滴侵食されて

表-3 降雨条件 (裏打ち材がない場合)

| ケース       | 法面保護資材 | 裏打ち材の種類 | 降雨量(mm/hr) |
|-----------|--------|---------|------------|
| CASE(1)-1 | フィルターA | なし      | 115        |
| CASE(1)-2 | フィルターB |         |            |
| CASE(1)-3 | フィルターC |         |            |

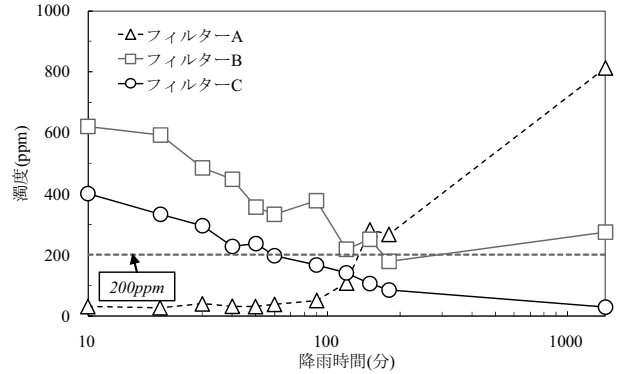


図-6 降雨時間と濁度の関係 (降雨量 115mm/hr)

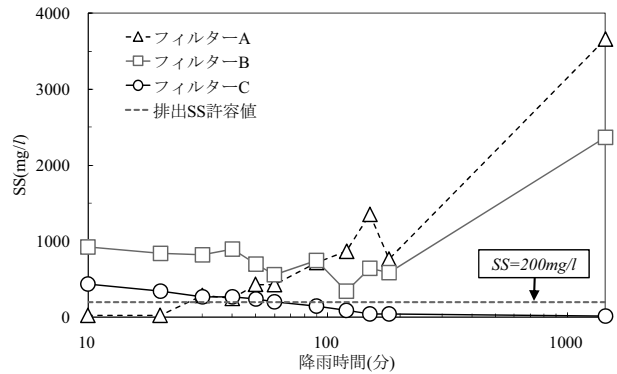


図-7 降雨時間と SS の関係 (降雨量 115mm/hr)

いない。これは降雨時間経過とともにフィルター C の不織布と表層土の土粒子が絡み合い、土粒子の動きを止め雨水による侵食から法面を保護したと考えられる。

また、図-7 より、フィルター A は降雨開始から 50 分後に土粒子の流出が増大して侵食が進行したため SS 量が増加し、実験終了時には約 3600mg/l に達した。フィルター B の SS 量は降雨開始から 120 分後に 350mg/l まで減少したが、それ以降増加に転じ、実験終了時には約 2300mg/l に達した。これは法面が侵食され続けていることを表している。フィルター C が一定の侵食防止機能を発揮するため時間経過とともに法面の細粒分だけが流されてしまい、その結果として降雨開始から 60 分後には SS 量が雨水排出 SS 量の許容値 200mg/l を下回った。

実験終了後の写真-1、図-7 および図-8 から、フィルター A は、降雨により不織布が損傷したため法面から土砂が流出した。降雨開始から 1440 分後の濁度が 812ppm、SS 量が 3662mg/l まで増加した。また、フィルター B は、降雨により多くの孔食跡が認められ、濁度が 274ppm、SS 量

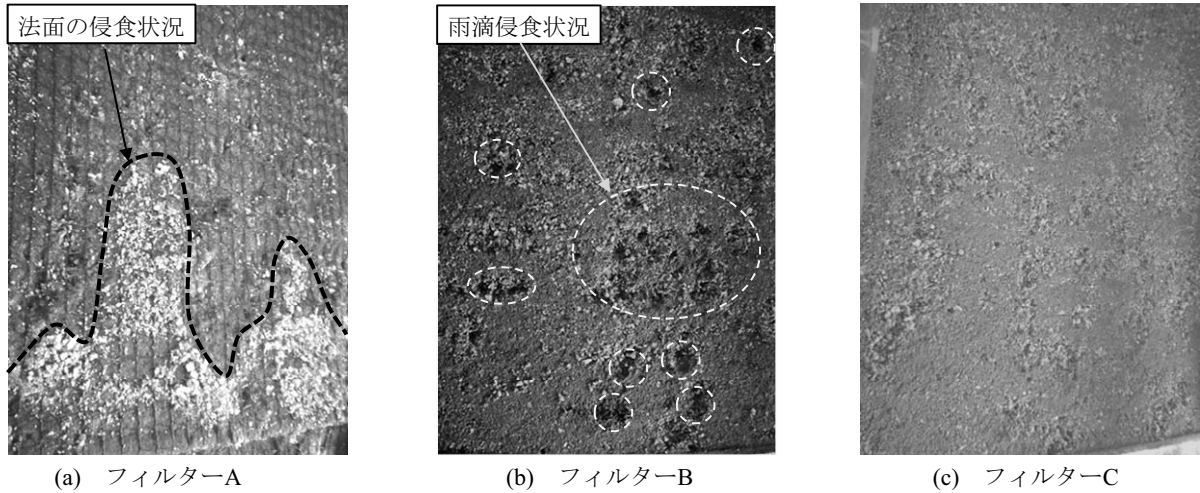


写真-1 降雨 1440 分後のときの法面状態の関係 (降雨量 115mm/hr)

が 2370mg/l まで増加した. 一方, フィルターC は, ほとんど雨滴侵食を受けず, 降雨開始から 1440 分後の濁度が 28ppm, SS 量が 21mg/l の低い値を示すことから表層土が侵食されていないと考えられる. これは, フィルターC の不織布厚がフィルターA, B より厚く雨滴侵食を緩和する効果が高く, 材質が 100%撥水性の繊維で構成されているために雨水の水分を含んでも一定の空隙を保持していることが要因と考えられる. なお, フィルターA は, 不織布の破損や法面崩壊の影響からフィルターを外すときに表層土の土粒子が流れ落ちてしまったため本論文ではフィルターが付いたままの写真を掲載した.

### 3.2 裏打ち材がある場合の降雨実験

3.1 の実験結果から, 降雨開始から 1440 分後の法面の雨滴侵食が少なく, 濁度および SS 量の排出が最も少ないフィルターC が法面の保護機能が最も優れていると考えられる. そこで本節では, フィルターC に裏打ち材 X または Y を付加して降雨実験を行い, 裏打ち材がある場合の降雨初期段階の濁水流出の抑制効果および雨水の地中層への浸透抑制効果を評価した. 具体的には, 降雨時間ごとの濁度および SS 量の値と雨水の地中層浸透率の関係を把握し裏打ち材の濁水流出の抑制効果を検討する. また, 地中層への浸透が表層流の運動量の増減に及ぼす影響について降雨時間ごとの比エネルギーおよび比力を算出することで把握する.

表-4 より, 裏打ち材がある場合の降雨実験 (CASE(2)) は, 実験施設の基本的条件および計測方法が CASE(1)と同様に行う. 降雨量を平成 21 年 7 月山口県防府市の最大降雨量 74mm/hr, 降雨時間を 3 時間とした. また, 表-4 の CASE(2)-2, 3 より, 裏打ち材 X, Y が初期濁度流出およ

表-4 降雨条件 (裏打ち材がある場合)

| ケース       | 法面保護資材 | 裏打ち材の種類 | 降雨量(mm/hr) |
|-----------|--------|---------|------------|
| CASE(2)-1 | フィルターC | なし      | 74         |
| CASE(2)-2 |        | 裏打ち材 X  |            |
| CASE(2)-3 |        | 裏打ち材 Y  |            |

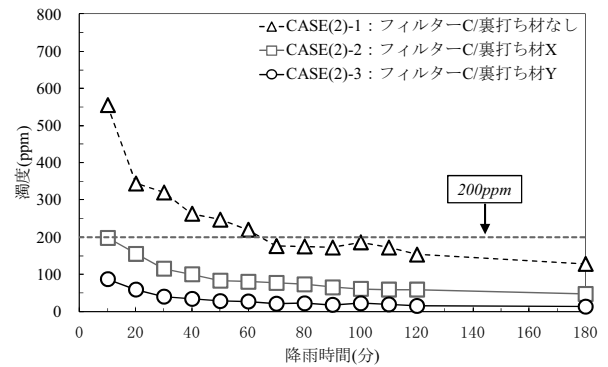


図-8 降雨時間と濁度の関係 (降雨量 74mm/hr)

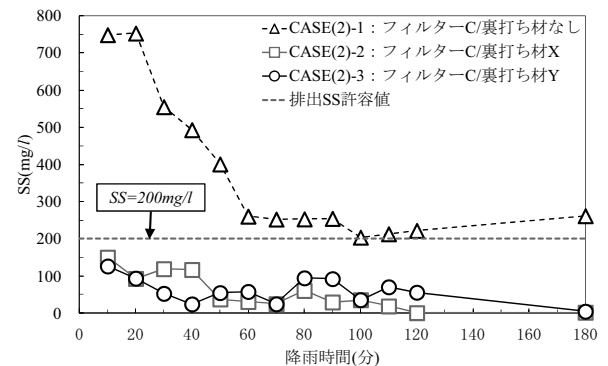


図-9 降雨時間と SS の関係 (降雨量 74mm/hr)

び地中層への雨水浸透などの抑制効果について確認する. なお, 比較としてフィルターのみのケースも実施する.

不織布フィルターを用いた降雨時の法面侵食防止に関する研究

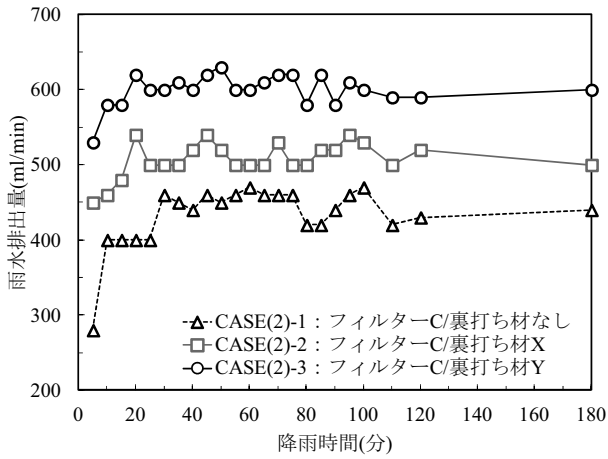


図-10 降雨時間と雨水排出量の関係

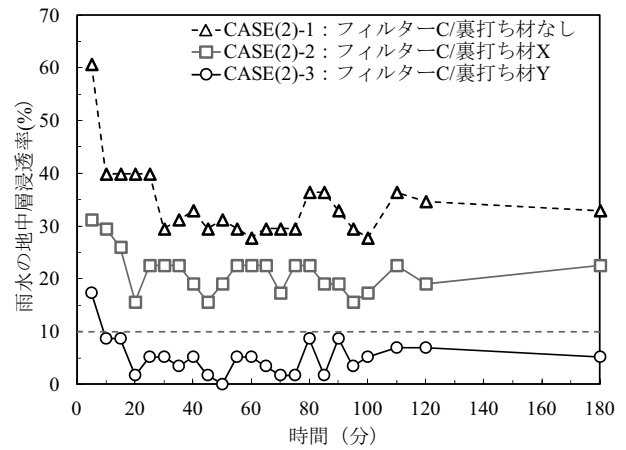


図-11 降雨時間と雨水の地中層浸透率の関係

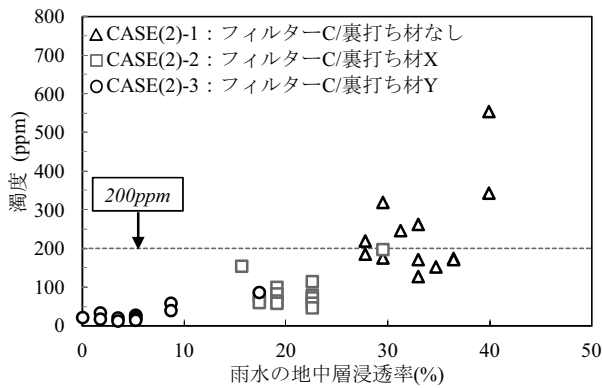


図-12 雨水の地中層浸透率と濁度の関係

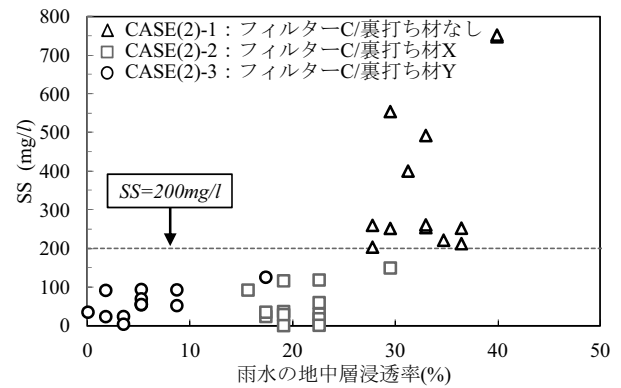


図-13 雨水の地中層浸透率とSSの関係

表-5 降雨開始から180分後の流量測定試験結果

|           | $Q_R \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ | $h \times 10^{-4} (\text{m})$ | $A_f \times 10^{-4} (\text{m}^2)$ | $n$    | $V_f (\text{m/s})$ | $Q_k (\%)$ | $E \times 10^{-4} (\text{m})$ | $F \times 10^{-7} (\text{m}^2)$ |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|------------|-------------------------------|---------------------------------|
| CASE(2)-1 | 0.7  | 2.5                           | 1.5                               | 0.0608 | 0.035              | 32.9       | 3.7                           | 0.7                             |
| CASE(2)-2 | 0.8  | 2.7                           | 1.6                               | 0.0617 | 0.037              | 22.5       | 4.1                           | 0.8                             |
| CASE(2)-3 | 1.0  | 3.0                           | 1.8                               | 0.0629 | 0.039              | 5.2        | 4.6                           | 1.0                             |

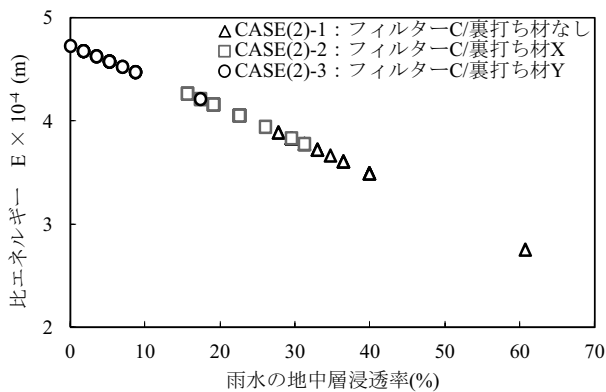


図-14 雨水の地中層浸透率と比エネルギーEの関係

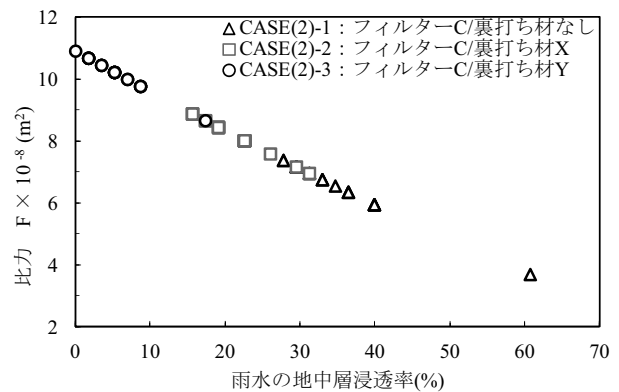


図-15 雨水の地中層浸透率と比力Fの関係

図-8 に降雨時間と濁度, 図-9 に降雨時間とSSの関係を示す. 図-8 より, CASE(2)-1 は, CASE(2)-2 の3倍, CASE(2)-3 の6倍程度の初期濁度を示し降雨開始から50

~60分まで濁度が200ppmを下回らないが, 降雨時間の経過に伴い流出水中の濁度が減少した. フィルターCに裏打ち材を付加した場合は, 初期濁水の発生を抑制する効果が

あることを示している。

図-9より、CASE(2)-1は、SS量が実験終了まで200mg/lを下回らない。一方、CASE(2)-2およびCASE(2)-3ともに降り始めからSS量が排出SS許容値を満し降雨開始から180分後にはSS量がほとんど検出されなかった。

図-10に降雨時間と雨水排出量の関係、図-11に降雨時間と雨水の地中層浸透率を示す。表-5に降雨開始から180分後の流量測定試験結果を示す。

降雨開始から図-10より、CASE(2)-1のとき降雨初期の雨水排出量が少ないのは、地中層へ雨水が速やかに浸透したためと考えられ、その後、雨水排出量が一定となることから定常状態になったと考えられる。実験終了時のCASE(2)-3の雨水排出能力は、CASE(2)-1の1.3倍程度、CASE(2)-2の1.2倍程度と高い排出能力を有している。表-5から、降雨開始から180分後の雨水の地中層浸透率は、CASE(2)-2の場合で約20%程度の降雨が地中層に浸透し、降雨量の8割程度を排出している。一方、CASE(2)-3の場合、約5%である。これは、裏打ち材Yの目付量が裏打ち材Xより多く裏打ち材の気密性が高い状態である。裏打ち材Yを用いた場合は、雨水の地中層への浸透を裏打ち材Xより抑制したと考えられる。

図-11より、雨水の地中層浸透率が降雨開始から5分後と180分後ではCASE(2)-1で約20%、CASE(2)-2で約5%、CASE(2)-3で約10%浸透率が低下している。これは、表層土が雨滴により圧縮されて、地中層の土粒子間の間隙が閉塞されたため浸透率が低下したと考えられる。文献25の宮良らの降雨実験の結果と同様な実験結果が得られたと考えられる。

図-12に降雨時間ごとの雨水の地中層浸透率と濁度の関係、図-13に降雨時間ごとの雨水の地中層浸透率とSSの関係を示す。図-12, 13より、雨水の地中層への浸透率が約30%前後から濁度が200ppmおよびSSが200mg/lを超える。これは地中層の土粒子間の間隙へ雨水が浸透し微細土粒子を排出したためであると考えられる。一方で、雨水の地中層浸透率が20%以下では、濁度が200ppmおよびSSが200mg/lを下回っている。これは、裏打ち材がある種の不透水層の役割を果たし地中層の土粒子間の間隙への雨水浸透を抑制したものと考えられる。

表-5より、粗度係数 $n$ は裏打ち材の有無に関わらず約0.06になる。これは地盤上(直線形状で等断面積の土の水路を仮定した場合に粗度係数 $n$ は $n=0.016\sim 0.025$ となる)<sup>26)</sup>に水が流れる約3倍程度であり、フィルターが表層流の流速を減少させる要因になっていると考えられる。さらに、流速は、裏打ち材0.035~0.040m/sとなり裏打ち材の有無により若干の差異が見られるが、ほぼ同値と考えられる。

図-14に雨水の地中層浸透率と表層流の比エネルギーの関係、図-15に雨水の地中層浸透率と表層流の比力の関係を示す。図-14, 15より、雨水の地中層浸透率の増加に伴い、表層流の比エネルギーおよび比力が低下していることから雨水の地中層への浸透が抵抗となり表層流のエネルギーおよび運動量の損失が認められる。これは、雨水浸透にともない地下水流が発達したためと考えられる。

#### 4. まとめ

裏打ち材がない場合の降雨実験は、各種不織布フィルターのパフォーマンスと降雨時侵食防止効果の関係についての検討を行った。裏打ち材がある場合の降雨実験は、降雨初期の濁水抑制効果および降雨の地中層への浸透抑制効果を得るために行った。これらの結果から得られた知見について以下にまとめる。

- (1) 裏打ち材がない場合の降雨実験で、フィルターAおよびBは雨滴衝撃により法面が侵食されたのに対して、フィルターCは、雨滴による孔食を受けなかった。フィルターAの降雨初期の濁度がフィルターBやCより低いのは、土壌凝集剤の効果によるものと考えられる。また、不織布の厚さが薄い不織布ほど法面の雨滴侵食の影響を受けている。
- (2) フィルターCに裏打ち材を付加した場合の降雨実験は、裏打ち材XまたはYを付加することで降雨初期の濁水流出を抑制することができた。降雨の地中層浸透率を算出した結果、フィルターCに撥水性の高い裏打ち材Yを付加したときに遮水性が高まることが認められた。
- (3) 一定の降雨量の場合は、地中層浸透率の増加が表層流の流体運動を低下させ、地中層内部の有効応力を増加させる。このことは、雨水の地中層への浸透状況が降雨時間経過にともなう表層流の運動量の発達・減衰が地中層の有効応力の状況の推定につながると考えられる。
- (4) 裏打ち材がない場合は、表層土の粗度を増加させる効果があり表層流による侵食作用を防止する作用がある。しかし、降雨初期段階では地中層の土粒子間の間隙へ雨水が浸透し微細土粒子を移動させ濁水を流出させている。裏打ち材がある場合は、雨水浸透に伴う微細土粒子の移動が緩和されことから降雨開始からの濁度およびSS量が低い値を示していると考えられる。

上記の結果から、裏打ち材を付加した不織布フィルターは、従来の不織布フィルターの耐侵食機能強化につながり、



局所的集中豪雨対応の不織布フィルターとしての有効性を示している。また、今後は異なる降雨条件および土質条件での盛土下端位置の表層流の比エネルギーおよび比力のデータ集積を進めることで、雨水の地中層浸透率と比エネルギー・比力との間に相関関係が得られることが推定される。この相関関係が得られれば、雨水の地中浸透率と表層流の盛土下端位置の比エネルギー・比力の値の関係から簡便に地中層内部の地下水流の発達・減衰を評価することが可能となり、地盤工学的に非常に有益であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会 2009 年 7 月豪雨による山口県土砂災害緊急 調査団：2009 年 7 月 21 日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，地盤工学会誌，Vol.57，No.12，pp.39-42，2009.
- 2) 地盤工学会九州北部土砂災害調査団：平成 21 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害調査報告書，地盤工学会，2010.
- 3) 岩垣雄一，土屋義人：水滴による地面浸食に関する二，三の実験，土木学会論文集，Vol.35，pp.55-63，1956.
- 4) 福桜盛一：水滴の衝撃に対する破砕の影響について—水滴の衝撃と土壌飛散に関する基礎的研究(I)—，農業土木論文集，Vol. 101，pp.26-32，1982.
- 5) 牧野敏明，仲座栄三，津嘉山正光，S.M.B.RAHAMAN：沖縄県の土壌浸食に水滴衝突が及ぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.796/II-72，pp.69-80，2005.
- 6) 深田三夫，藤原輝男，日下達朗：雨滴衝撃を伴う流れによる土粒子の剥離および輸送に関する考察，農業土木学会論文集，Vol.165，pp.9-22，1993.
- 7) 笹原克夫，海老原和重，綱木亮介：急勾配斜面の崩壊発生機構に関する実験的研究，日本地すべり学会誌，Vol.32，No.4，pp.1-8，1996.
- 8) 森脇寛，矢崎忍，黄文峰：降雨浸透に伴う地下水流の発達・減水過程と斜面崩壊に及ぼす影響に関する考察，日本地すべり学会誌，Vol. 43. No. 1，pp.9-19
- 9) 新田伸三：水による浸食と崩壊に対する植生工の限界，土と基礎，土質工学会，Vol.17，No.3，pp.41-42，1969.
- 10) 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，Sidle Roy C.，寺嶋智巳，平松晋也：森林斜面におけるホートン型表面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—，日林誌，Vol.91，398-407，2009.
- 11) 猪俣景悟，木伏英世：団粒化注入客土緑化工法および長繊維混入厚層基材吹付工によるダム湖湛水斜面緑化に関する試験，日本緑化工学会誌，Vol. 25，No.4，pp.465-468，2000.
- 12) 上村恵也，倉井達夫，藤田豊：植生工における吹付基材の配合試験について，日本緑化工学会誌，Vol.25，No.4，pp.579-582，2000.
- 13) 木村正信，岩本篤彦，夏目祥吾，井上あゆみ：粉碎材吹付け法面での植生復元状況と生育基盤特性について，日本緑化工学会誌，Vol.25，No.4，pp.645-648，2000.
- 14) 上村恵也，倉井達夫，藤田豊：軟岩地の植生成育実態調査，日本緑化工学会誌，Vol.27，No.1，pp.331-334，2001.
- 15) 津下圭吾，谷口伸二，實松秀夫：人工芝工の植生追跡調査，日本緑化工学会誌，Vol. 27，No.1，pp.265-268，2001.
- 16) 山田守，原田信，岡本憲治：山口県瀬戸内地域の切土のり面における植生誘導工の実施事例，日本緑化工学会誌，Vol.33，No.1，pp.199-202，2007.
- 17) 全権雨，廉圭眞，全起成，江崎次夫：韓国的高速道路のり面における緑化工法の適用，日本緑化工学会誌，Vol. 33，No.1，pp.223-226，2007.
- 18) 中菊重弥，今井克己，島崎雅弘，谷口伸二：同一のり面に敷設した植生誘導マット工および植生マット工の施工事例，日本緑化工学会誌，Vol. 34，No.1，pp.179-182，2008.
- 19) 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，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol.21，No.1，pp.23-30，2003.
- 20) 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侵食防止機能に関する研究，地盤と建設，地盤工学会中国支部論文報告集，技術・研究ノート，Vol.28，No.1，pp 169-176，2010.
- 21) 小林公明，片山弘憲，丸岡雄一郎，荒木義則，中井真司，小野秀史，柳崎剛，笹原克夫：まさ土よりなる自然斜面中の土壌水分特性曲線の降雨強度依存性，第 5 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，土木学会西部支部，pp.137-142，2010.
- 22) 半谷高久，高井雄，小倉紀雄：水質調査ガイドブック，丸善株式会社，pp59-61，74-75，1999.
- 23) 山口県：山口県公害防止条例施行規則，山口県規則第四十六号，1973.
- 24) 小松利光，矢野真一郎 監修：新編水理学，理工図書，pp.83-103，2011.
- 25) 宮良志乃，志茂守孝，宜保清一，翁長謙良：国頭マージの土壌表層におけるクラスト形成について，琉球大学農学部学術報告，Vol.46，pp.109-112，1999.
- 26) 土木学会：土木学会ハンドブック I，p.494.

(2011 年 6 月 27 日 受付)

