

## 不織布フィルターの降雨時法面保護機能に関する研究

## Study on Slope Protection Function at rainfall of 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。また近年、降雨により増加する表層部の水分量から得られる土壌雨量指数が法面・斜面崩壊に影響しているとされ、法面表層部の水分コントロールは法面保護には重要であるといわれている。本研究では、雨水侵食から法面を保護する機能が高い不織布フィルターの選定を目的に、3種類の不織布フィルターに対して降雨実験および越流実験を試みた。その結果、地表面との密着性が高く、雨滴衝撃から法面を保護でき、さらに雨水排出能力が高い撥水性繊維の不織布フィルターが法面保護に有効であ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，法面保護，限界流量，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、短時間で多量の雨を狭い地域にもたらし、その時間雨量は 50mm を超える<sup>1), 2)</sup>。最近では、平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨が挙げられる。山口県防府市では、7 月 21 日 6 時～12 時の 6 時間雨量は 200 mm を超え、防府市を中心に県内各地に 200 件近い土砂災害が発生し、大きな被害を与えた<sup>1)</sup>。また、九州北部では、7 月 24 日から 26 日にかけて局所的に 1 時間あたり 100mm を超える雨量を記録し、大規模な斜面災害を誘引した<sup>2)</sup>。豪雨による土砂災害を防ぐためにも斜面保護対策は重要である。

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るが、これまでの法面保護対策工はコンクリート構造物を中心に採用されている。一方で近年、環境保護や自然との共生などが注目され、法面保護では盛土や切土の裸地法面を周囲の環境と同化させるか、あるいは環境に配慮した法面工が求められている。法面植生工は環境に配慮した法面保護対策工であるのはいままでのない。

法面に植生工を行う主な目的は、雨水による雨滴衝撃作用および表層流水による侵食作用を防止することにある<sup>3)</sup>。地表部が植物で被覆されていると、雨滴衝撃は植物体で受け止められ緩和されることから、植物で完全に地表が被覆されていると雨滴侵食は防止できる。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>4), 5), 6), 7)</sup>、人工張芝工<sup>8)</sup>などの植生工<sup>9), 10), 11)</sup>が代表工法として挙げられる。

厚層基材吹付工は、緑化基盤材(客土、種子など)を法面に吹付ける工法であり、人工張芝工は、張設した樹脂製ネットに植生基材を吹付ける工法である。これらの技術には、法面が植物で完全に被覆する前には、降雨により雨滴侵食を受け、表流水により客土や種子の流出があるなどの欠点がある。法面の侵食と緑化基盤材の流出が不均一な緑化の原因となると同時に、流出物により環境汚染が発生する。また、降雨時の濁水が環境汚染につながる副産物を生み出す。これら従来工法の弱点は緑化が完成する前では強い気象ストレスへの抵抗力が乏しいという点である<sup>12)</sup>。

前述の問題に対応した法面保護工として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による法面保護工法がある。

この工法は、撥水性や親水性繊維などで構成された不織布で法面を被覆し、保護する。不織布の繊維は地表面の土粒子と絡み合い密着する。また、降雨時の表層流は高い空隙率の不織布部分を通り排出させる。他にも、雨滴による衝撃を緩和し、雨滴侵食を防止するなど、風雨のような気象環境の変化から法面を保護する効果がある。さらに、不織布は軽量であるため法面に設置する作業が容易で、特に平滑な法面を覆う場合は、特別な技術を必要とせず容易に施工ができる。

本研究では、現在流通している 3 種類の不織布フィルタ

一について繊維構造の違いによる法面保護に対する効果を調べ、法面保護に適した不織布フィルターを選定することを目的とする。具体的には、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、降雨時の法面保護状況を確認する降雨実験を行う。さらに、不織布フィルターの雨水排出能力を検証する越流実験を行い、法面保護効果および濁水の流出状況を比較する。また、越流実験<sup>12)</sup>は、大規模の実験施設を使用するため費用や時間を要する。そこで本研究では、簡単に不織布フィルターの侵食防止効果を確認できる簡易越流実験装置を製作した。

## 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、厚さ3.0mm、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る。また不織布に付加した土壤凝集剤により土粒子の移動を防ぎ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、厚さ8.6mm、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る。不織布フィルターC（以後、フィルターC）は、厚さ7.0mm、環境に配慮したトウモロコシと竹の繊維を主成分とする生分解性の不織布構造である。またいずれのフィルターにも樹脂性の保護ネットが貼付けてあり、空隙率99.0~99.7%をもつ不織布構造体である。

### 2.2 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-2に試料の粒径加積曲線、表-1に物理的性質を示す。

### 2.3 実験

#### 2.3.1 降雨実験

降雨実験では、図-3に示すように、傾斜角30°、法長0.9m、法幅0.6mの法面を造成し、降雨装置により人工的に雨を降らせた。降雨量は、58mm/hr、115mm/hr相当の2ケース、降雨時間は、2時間とする。不織布フィルターA、B、Cを法面に設置して降雨試験を行った。A、B、C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、不織布の厚さ等と法面効果の関係を検討する。

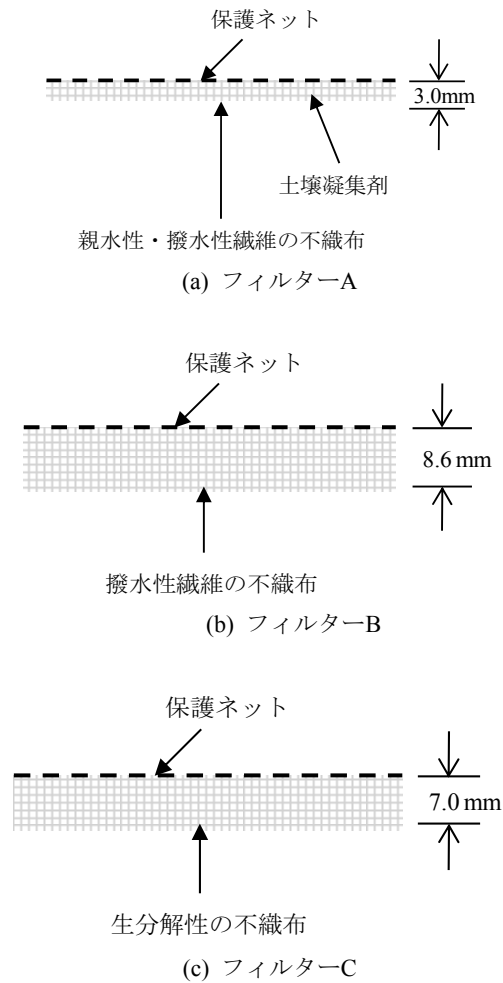


図-1 不織布フィルターの種類と構造

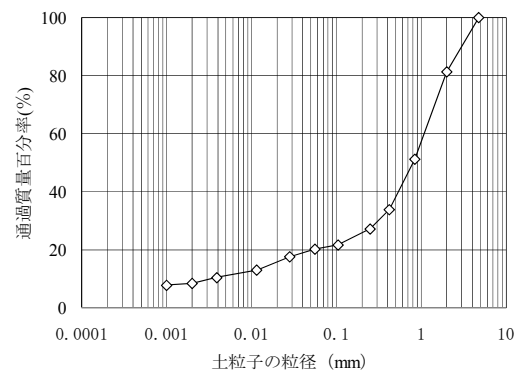


図-2 粒径加積曲線

表-1 試料の物理的性質

土粒子の密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	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 $\rho_d$ ( $g/cm^3$ )	1.804

さらに、降雨時間を2時間から5時間に延長し、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

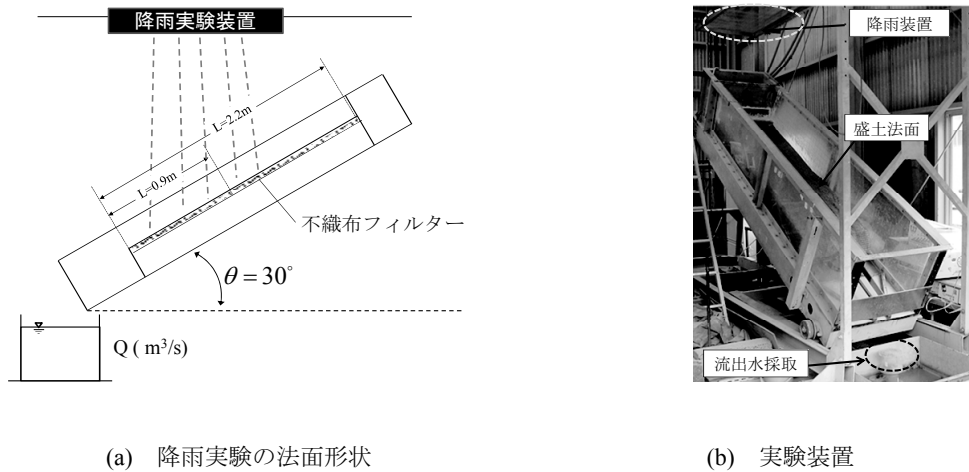


図-3 降雨実験の装置

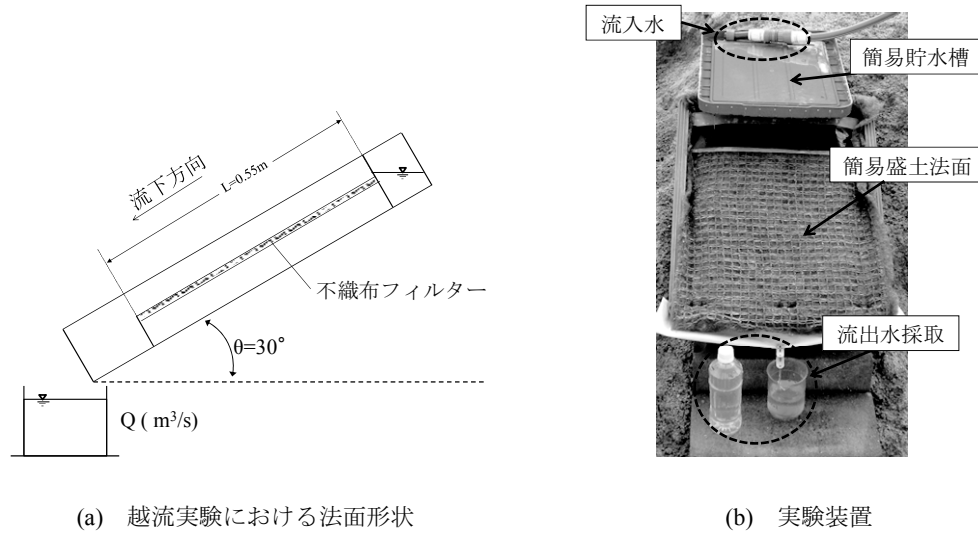


図-4 越流実験装置

評価する。この降雨実験は、法長  $L$  を 0.9m から 2.2m に延ばし、傾斜角  $30^\circ$ 、法幅 0.6m の法面を造成した。降雨量は、127mm/hr とする。

各法面の盛土は、最大乾燥密度 95% 以上で締め固めた。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、法長 0.9m の実験では濁度を、法長 2.2m の実験では濁度、SS、透視度 (2.4 参照) を測定した。

### 2.3.2 簡易越流実験

#### (1) 実験方法

図-3 のような実験装置を使用した場合、コストや時間がかかる。そこで本研究では、容易に不織布フィルターの法面保護機能を確認できるような簡易越流実験装置 (図-4) を製作した。

図-4 (b) に示すように傾斜角を 30 度として法長 0.55m、

法幅 0.45m にまさ土を締め固めた盛土法面を造成し、その表面に不織布フィルター A, B, C を設置した。一定流量  $Q$  で通水し始めてから 5 分経過後の流出水を採取した。法面が崩壊しない場合は流量を増やして同じ作業を行い、採取した流出水の SS を測定した。

#### (2) 越流実験における限界流量について

前節の降雨実験は現実に近い理想的な実験である。しかし、降雨実験では法面の位置により流量および流速が異なるため、条件を均一にするため、越流実験を行った後に流量を降雨量に換算した。降雨時の表流水排出は、99% 以上の空隙率をもった不織布の中を雨水が通ることによってなされる。通常、不織布と土粒子の密着は強く、法面保護効果がある。しかし、不織布フィルターを施していても、ある流量を境に雨水が不織布内に留まらず、土粒子の移動

が起こり法面の崩壊が始まる．このときの限界流量  $Q_L(m^3/s)$  を流出水の流量および SS(2.4 参照) で定義する．

図-5 の限界流量  $Q_L$  と SS の関係から限界流量  $Q_L$  は，盛土法面が崩壊したときの流量および SS(点 A)，並びに崩壊する直前の流量および SS(点 B) を一次近似直線で結び，SS の許容値をこの式に代入し求めた流量とする．また，山口県公害防止条例施工規則<sup>13)</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  $SS=200mg/l$  を雨水排出濁度の許容値とする．

以上の点に留意し，不織布フィルターの雨水排出能力を越流実験で検証を行う．

## 2.4 濁りの指標<sup>14)</sup>

2.3 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，透視度である．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>14)</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>14)</sup>

SS は，主に工場排水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．普通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  $110^{\circ}C$  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．

### (3) 透視度<sup>14)</sup>

透視度は水の透明程度を示すもので，主に河川や排水で使用される指標である．測定方法は，透視度計に採取した水を入れて上部から透視し，底部に記入された十字が初めて明らかに識別できるときの水層の高さ (cm) を示す．したがって，数値が高いほど透明であると言える．

降雨実験では，濁度，SS，透視度を測定する．越流実験では，SS を測定する．

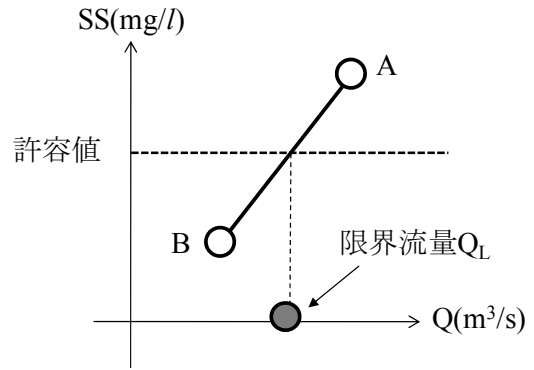
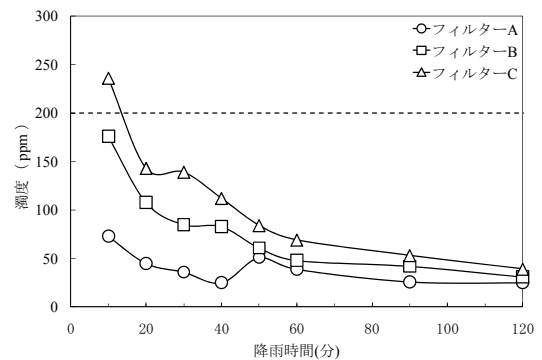
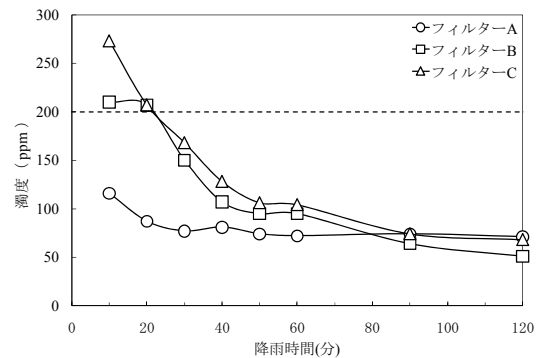


図-5 限界流量  $Q_L$  と SS の関係



(a) 降雨量 58mm/hr



(b) 降雨量 115mm/hr

図-6 降雨時間と濁度の関係

## 2.5 降雨量の算定

越流実験で説明した限界流量  $Q_L(m^3/s)$  から降雨量  $R$  を以下の手順で算出する．

式(1)より限界流量  $Q_L$  を実験法面の法幅  $B(m)$  で除して単位幅流量  $q(m^2/s)$  を求める．また，法幅  $1m$  の限界流量  $Q_{B=1m}$  は式(2)より求める．

$$q = Q_L / B \quad (m^2 / s) \quad (1)$$



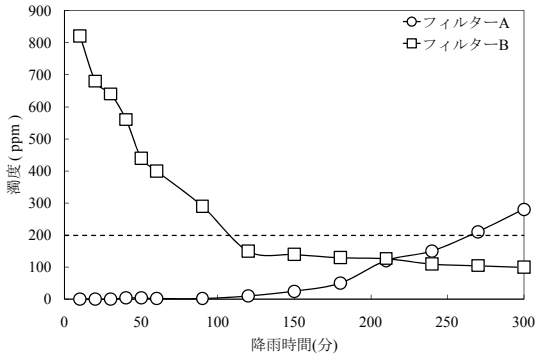


図-7 降雨時間と濁度の関係

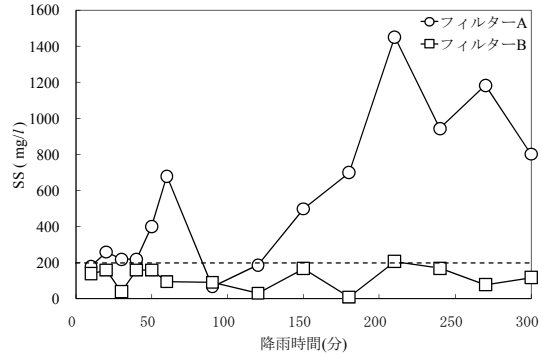


図-8 降雨時間とSSの関係

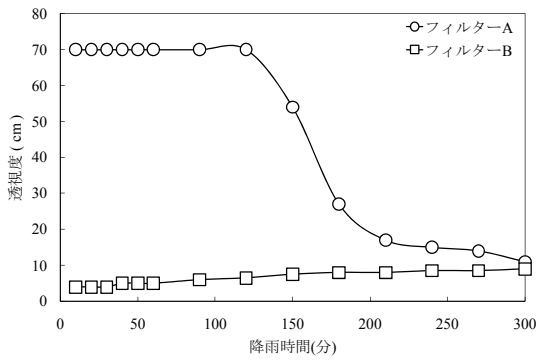
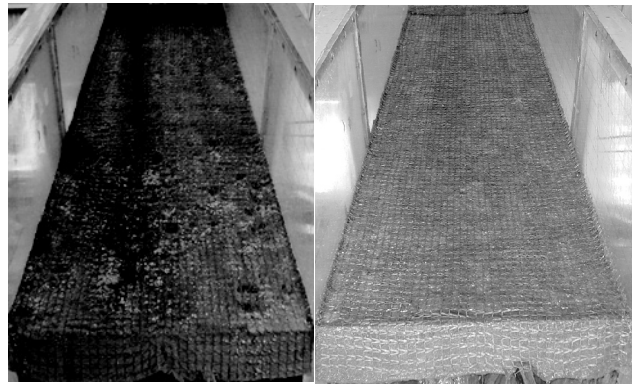
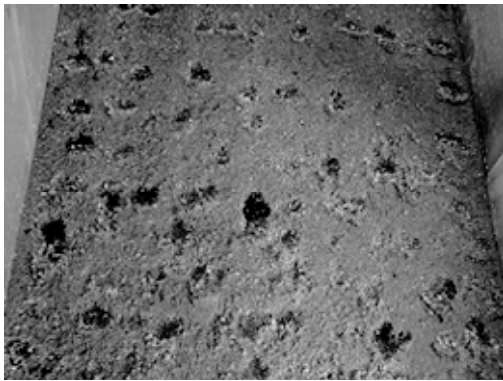


図-9 降雨時間と透視度の関係

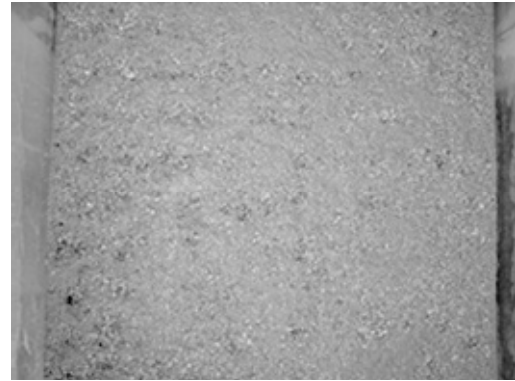


(a)フィルターA (b)フィルターB

写真-1 実験終了後(300分後)の法面



(a)フィルターA (孔食あり)



(b)フィルターB (孔食なし)

写真-2 実験終了後の法面侵食

$$Q_{B=1m} = q \times 1m \quad (m^3/s) \quad (2)$$

$$A_{B=1m} = L \cdot \cos \theta \times 1m \quad (4)$$

よって、式(3)より降雨量  $R(mm/hr)$ は流量  $Q_{B=1m}$ を降雨時の法幅  $1m$ の水平面積  $A_{B=1m}$ で除して算出する。

3章では、式(1)~(3)を用いて、不織布フィルターで保護された法面の限界流量を調べる。

$$R = 3.6 \times 10^6 \frac{Q_{B=1m}}{A_{B=1m}} \quad (mm/hr) \quad (3)$$

降雨実験では想定する降雨量から降雨流量  $Q_R$ を算出する。式(1)を以下のように書き換える。

法長  $L(m)$ 、傾斜角  $\theta$ のモデル法面としたときの法幅  $1m$ の水平面積  $A_{B=1m}$ は次式になる。

$$Q_R = Q_{B=1m} \cdot B$$

$$\therefore Q_{B=1m} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} R \cdot A_{B=1m} \quad (5)$$

式(5)で算出した降雨流量になるように調整を行う。

### 3. 実験結果

#### 3.1 降雨実験

##### 3.1.1 法長 0.9m の場合

図-6(a)に降雨量 58mm/hr, 図-6(b)に降雨量 115mm/hr のときの降雨時間と濁度の関係を示す。フィルターBとCは、10分後では濁度が200ppmを超える場合が見られるものの、実験終了後の法面は雨水侵食されていない。これは降雨時間経過とともに不織布と土粒子が絡み合い、法面との密着性が高まり法面侵食を抑制したと考えられる。初期段階からフィルターAは、濁度が200ppmを下回ったが、この要因は、不織布に付加された土壤凝集剤の影響であるものと考えられる。土壤凝集剤は雨が降ると溶けだして土粒子と密着する性質があり、微細土粒子をフロック化して濁水発生を抑制したと考えられる。一方で、図-6(b)を見ると、降雨時間90分後ではフィルターBの濁度がフィルターAより良好な値を示し、濁水発生が改善されている。これはフィルターBの不織布厚がフィルターAより厚く雨水排出能力が高いためフィルターAより濁度が低いことを示す(図-1)。

##### 3.1.2 法長 2.2m の場合

図-7に降雨時間と濁度, 図-8に降雨時間とSS, 図-9に降雨時間と透視度の関係を示す。フィルターAは、120分までは透視度および濁度ともに良好であるが、50分経過するとSSの値が上昇し、120分以降、流出水の透視度は低下し、濁度は増加して、270分を過ぎると濁度が200ppmを超える。さらに、フィルターAは降雨時間が長くなれば、不織布が破損して法面が侵食されることから土壤凝集剤の使用効果は降雨初期段階を除きほとんどない。一方、フィルターBは、初期段階の濁度は200ppmを超えているが、120分以降は200ppmを下回った。また、SSは概ね200mg/l以下であった。

写真-1に実験終了後(300分後)の法面, 写真-2に実験終了時点の法面侵食を示す。フィルターBが一定の侵食防止機能を発揮したのに比べ、フィルターAは、45分後から土粒子の流出が増大して侵食が進行したためSS量が増加した。

また、実験後、フィルターAの法面は降雨により多くの孔食跡が認められたが、フィルターBの法面には欠損が見られなかった。

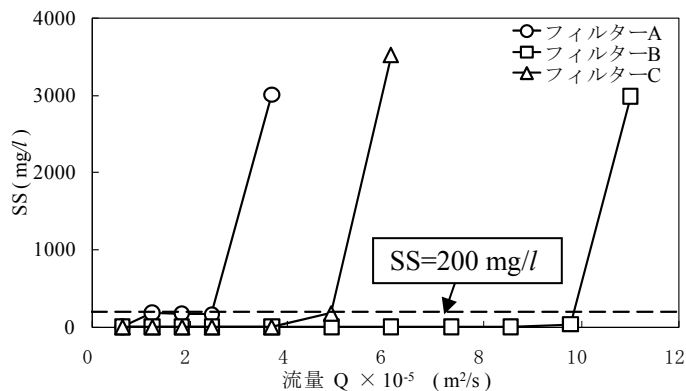


図-10 流量とSSの関係

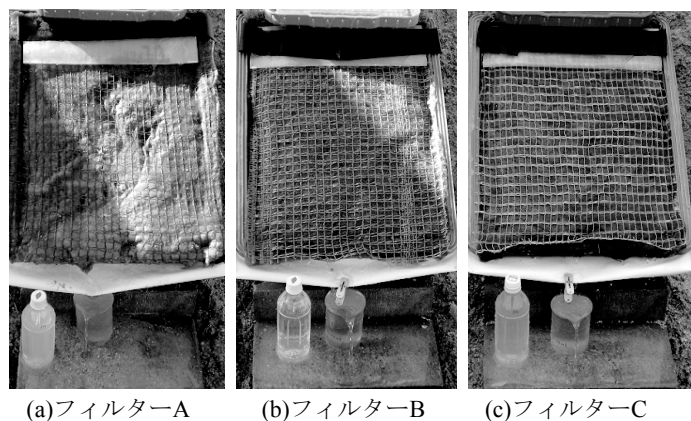


図-11 盛土法面状況一例 (流量 $3.67 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ )

表-1 換算降雨強度 (mm/hr)

資材	限界流量 $Q \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$	限界降雨強度(mm/hr)		
		法長0.55m	法長2.2m	法長10.0m
A	2.46	413.30	103.32	22.73
B	9.85	1653.78	413.45	90.96
C	4.90	822.58	205.65	45.24

#### 3.2 盛土法面の越流実験

図-10に流量とSSの関係, 図-11にフィルターAを設置した盛土法面が崩壊した流量 $3.67 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ のときの状況を示す。

図-10から、撥水性不織布のみで構成されたフィルターBは他のフィルター材と比べて、強い降雨強度に対してもSSが低く保たれることが示される。図-1および図-11より、不織布の厚さが薄いものから法面が限界に達して崩壊していることがわかる。これはフィルター内を排出可能な水量は厚みが厚い程大きいためと、材質が100%撥水性の繊維で構成されているために濡れても一定の空隙を保持していることが要因と考えられる。

図-10に示すように、限界流量まではSSは200mg/l以下になっている。このことにより限界流量以下では侵食防

止機能に差が見られない。一方、式(1)~(3)に限界流量  $Q_L$ 、幅  $B=0.45$  (m)、および法長  $L=0.55\text{m}$ ,  $2.20\text{m}$ ,  $10.00\text{m}$  を代入すれば、換算降雨強度が表-1 のように求まる。実際の法面に近い法長  $10\text{m}$  で換算するとフィルターA は  $22.7\text{mm/hr}$ 、フィルターB は  $91.0\text{mm/hr}$ 、フィルターC は  $45.2\text{mm/hr}$  である。各フィルターの降雨強度を比較すると、フィルターB が降雨量  $50\text{mm/hr}$  を上回る降雨強度を示している。これはフィルターB の雨水排出能力が高いためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、まず、不織布フィルターで法面を保護して降雨実験を行い、雨滴からの法面保護性能を評価した。また、越流実験を行い、雨水排出能力を検証した。本研究で得られた知見について以下にまとめる。

- (1) フィルターBやCは、雨滴による孔食を受けなかった。一方、フィルターAは雨滴衝撃により法面が侵食された。
- (2) 降雨実験で、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。
- (3) 簡易な越流実験装置を提案した。その結果、不織布の厚みが増すほど雨水排出能力が高いことがわかった。フィルターBの雨水排出機能は、他のフィルターと比べて非常に高い。

上記からフィルターBは、降雨実験では、初期段階の濁度は高いものの降雨時間の進行とともに濁水の発生を抑制できた。さらに雨滴による孔食から法面を保護できた。また、越流実験では限界流量が他のフィルターより高い値が示された。総合的に判断してフィルターBが最も優れた不織布であることがわかったが、降雨初期の濁水流出を防ぐ条件についてさらに検討を行う予定である。

#### 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) 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。
- 4) 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，第25巻，第4号，pp.465-468，2000。
- 5) 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，第25巻，第4号，pp.579-582，2000。
- 6) 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，第25巻，第4号，pp.645-648，2000。
- 7) 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，第27巻，第1号，pp.331-334，2001。
- 8) 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，第27巻，第1号，pp.265-268，2001。
- 9) 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，第33巻，第1号，pp.199-202，2007。
- 10) 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，第33巻，第1号，pp.223-226，2007。
- 11) 中菊亜弥，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，第34巻，第1号，pp.179-182，2008。
- 12) 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。
- 13) 山口県：山口県公害防止条例施工規則，山口県規則第四十六号，1973。
- 14) 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，pp.59-61，74-75，1999。

(2010年6月28日 受付)

