

草本植生を用いた播種工の施工初期に着目した 地表流に対する法面保護効果に関する一考察

A STUDY ON THE EFFECT OF SEEDING WORKS
WITH HERBACEOUS PLANTS AGAINST CONCENTRATED FLOW
AT THE EARLY PHASE SLOPE REVEGETATION

昌本 拓也¹・酒匂 一成²・伊藤 真一³

Takuya MASAMOTO, Kazunari SAKO and Shinichi ITO

¹鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

E-mail: k1073157@kadai.jp

²鹿児島大学学術研究院 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp

³鹿児島大学学術研究院 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

E-mail: itou@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: seeding works, slope revegetation, herbaceous plants, vegetational cover, concentrated flow

1. はじめに

近年、降雨量の増大に伴い、道路盛土のような土工構造物では、排水溝から溢れた水による地表流が法面を侵食し、やがて崩壊に至る事例が報告されている¹⁾。このような崩壊形態に対し、盛土や切土法面の侵食や風化を防ぐための工法として法面保護工があり、中でも、法面に草本植生の種子を散布する播種工は、一般に低価格²⁾で施工性が良く³⁾、自然環境の保全や修景も期待できる⁴⁾ため、様々な現場で適用される。播種工が施工された法面では、植生が成長し法面を被覆すると、葉や根の効果によって降雨や地表流に伴う侵食を抑制するため、裸地法面に比べて土砂の流出量が少なくなる⁵⁾とされる。北原⁶⁾によれば、このような植生の効果(以下、法面保護効果)の機構は、落葉層による効果も含めて以下の5つに大別される。即ち、i)雨滴に対しては植生地上部や落葉層によるエネルギー減殺機能、ii)地表流の流速に対しては茎や落葉層による流速減殺機能、iii)地表流の流量に対しては土壌の浸透能改善による流量減少機能、iv)地表流の掃流力に対しては根系による土粒子緊縛機能、v)凍上融解侵食に対しては落葉層による

保温機能の5つであり、これらが複雑に絡み合うことで、侵食を防止しているとされる。しかし、村井⁷⁾によれば、播種工は種子が発芽し法面に活着するまでに時間を要するため、植生の発芽から1カ月程度は降雨による侵食を受けやすいとされる。また、播種工の施工から3カ月程度では植生の発芽過程で土が緩み、裸地に比べて侵食量が増えると報告された研究例⁸⁾もある。一方で、これらの既往研究では降雨による侵食を対象としており、排水溝からの溢水等に起因する地表流が法面を流下する場合は想定されていない。

また、一般に播種工の成績判定は、植被率を指標として三段階評価で実施され、最高評価である「可」となるためには植被率70~80%以上であることが求められる⁹⁾。一方で、植被率と侵食量との関係は定量的に示されておらず、成績を「可」としても、どの程度の法面保護効果が期待できるのかについては言及されていない。

そこで本研究では、播種工の中でも種子散布工のような、地表面にシート等の付帯物を設置しない工法⁹⁾を想定し、施工初期において草本植生が地表流に対して発揮する法面保護効果がどのように変化する

るのかを明らかにすることを目的として、模型法面を用いた侵食実験を実施した。そして、植生の育成期間や植被率と、侵食量との関係について考察を行った。

2. 侵食実験の概要

(1) 供試体の作製条件

本研究で用いる模型法面(詳細は次節)に供試体を設置するため、プラスチック製の育苗箱を用意した。育苗箱の外寸は、縦26.5cm×横18.3cm×高さ7.7cm、容積は2,200cm³である。土試料として、串良川の堤体で採取された、しらす混じりの土(土粒子の密度2.48g/cm³、細粒分含有率25.5%)⁹⁾を用いて、供試体の間隙比が0.93となるように、5層に分けて締め固めた。このとき、供試体の含水比は最適含水比(23.8%)とした。なお、道路盛土の締め固め度は85~90%以上が望ましい¹⁰⁾ことから、供試体の間隙比は締め固め度90%を目安に設定されている。本試料の粒径加積曲線を図-1に、締め固め曲線を図-2に示す。

次に、種子の播種条件、および植生の育成条件について述べる。種子散布工の実務において、種子は地表面に播種される。しかし、実験室内で地表面に播種した場合、根が土に進入せず、根付かない様子が観察された。これは、降雨や風等による覆土を再現できなかつたためであると考えられる。そこで本研究では、供試体を締め固める際に4層目と5層目の間に種子を手播きした。また、各供試体の種子数を等しくするため、種子は1.5cm 間隔の格子状に播種した。本研究で使用する植生は技術指針類^{5), 10)}を参考に、イネ科のセンチピードグラス (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack.) のティフブレア種(以下、TB)と、マメ科のホワイトクローバー (*Trifolium repens* L., 以下、WC)とした。植生の育成期間はそれぞれの植生種において、8, 14, 21, 28, 56日間と設定し、表-1に示す数を準備した。そして、これらの供試体を実験当日まで LED ライト(LDA7D-G-E17-G4105-2P, 朝日電器株式会社, LDA6D-G-E17 IH22, 株式会社オーム電機, APL-75RBUI-40W, Epharm, 中国, の3種併用)下に静置し、散水、施肥を行い、植物を育成した。水は、実験の24時間前まで毎日、それぞれの供試体に10時頃と18時頃に100ml ずつ与えた。ただし、供試体の地表面をできるだけ乱すことの無いように、水を噴霧上にして散水を行った。肥料は、窒素(N):リン(P):カリウム(K)=1:2:1の化成肥料(エードそのまま液15号, 住友化学園芸株式会社)を、供試体の作製日から起算して1

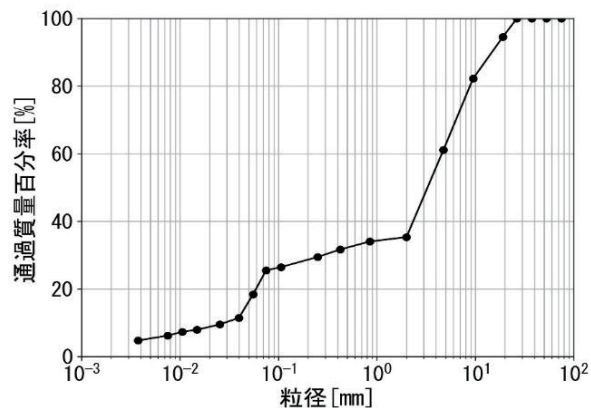


図-1 串良川堤体土の粒径加積曲線⁹⁾

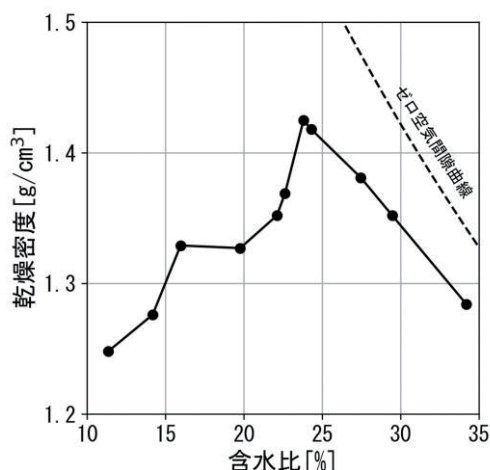


図-2 串良川堤体土締め固め曲線⁹⁾に加筆

表-1 侵食実験に用いた供試体の種類と個数

供試体数[個]	供試体の育成(養生)期間[日]				
	8	14	21	28	56
ティフブレア	2	3	4	3	5
ホワイトクローバー	3	2	1	4	3
裸地	2	4	4	4	4

週ごとに、28ml ずつ与えた。また、植生が侵食量にどの程度影響を与えるのかについて定量的に議論するために、播種を行わない裸地供試体を同様の締め固め条件の元で作製し、散水、施肥、光源についても同様の条件の元で養生させた。なお、裸地供試体の養生期間は、植生の育成期間に対応させ、表-1に示す数を準備した。(以下、養生期間も育成期間と記す。)

(2) 模型法面と侵食を発生させるための流水

侵食実験は、排水溝から溢水した水が法面上を流

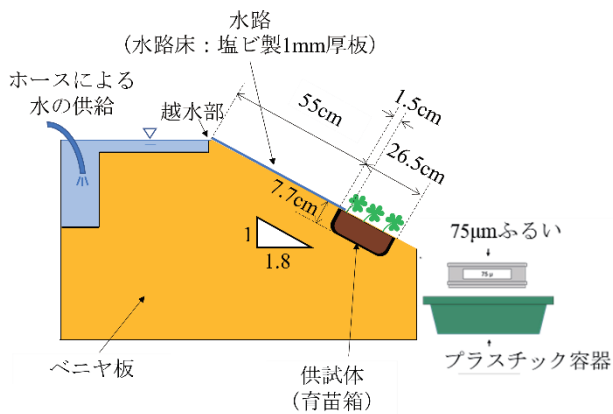


図-3 侵食実験に用いた模型法面の側面図

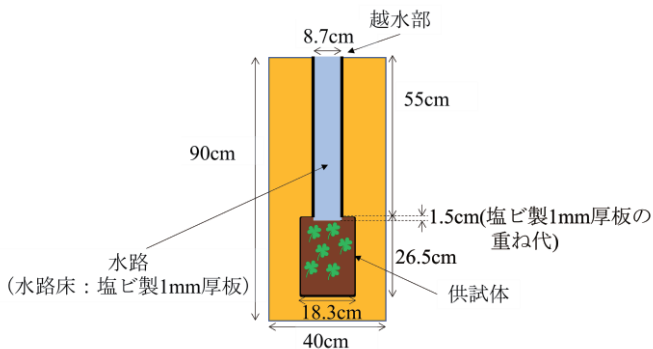


図-4 侵食実験に用いた模型法面の斜面部平面図

下する現象を想定し，図-3，図-4，写真-1，写真-2に示すような模型法面を用いて行った。斜面部の勾配は，しらす道路盛土の標準勾配である1:1.8¹⁰⁾とし，水路の途中には供試体を設置するための開口部を設け，供試体の地表面と水路底部が同じ高さとなるようにした。このとき，供試体上流側の際部の侵食が卓越すると，水が供試体の地表を流下せず，実験が成立しない恐れが考えられた。そこで，模型法面の斜面部には1mm厚の低発砲塩ビ樹脂製の板(FOREX，アクリサンデー株式会社)を，供試体に1.5cm重ねて設置し(図-3，図-4)，水が地表を滑らかに流れるように工夫した。流水は，水路上流の水槽部にホースで給水し，水槽の水位を一定に保ちながら越水させることにより発生させた。このときの水路から流出する水の流量は各実験の直前に計測し，流量に変化が無いことを確認した。なお，流量は約247ml/sであった。また，目視により水路上の流況を確認したところ，各実験において変化は見られなかった。よって，地表流が供試体上に流入する直前に発生する流速，流体力は，各実験に寄らず一定であると考えられる。

(3) 植被率の計測

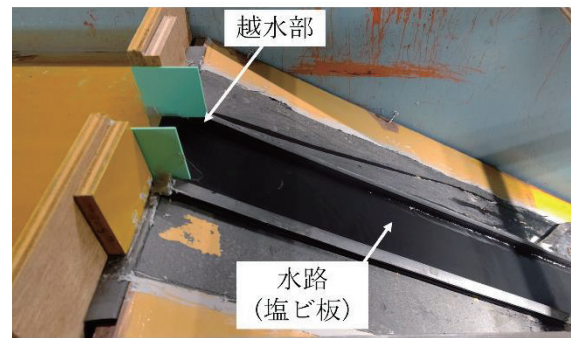


写真-1 模型法面の越水部

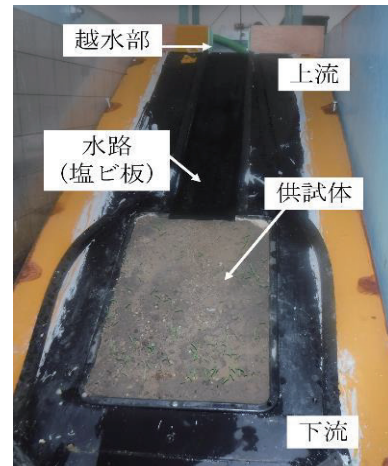


写真-2 模型法面の斜面部と供試体設置状況

植被率とは，ある面積に対する植生の投影面積¹¹⁾であり，前述の通り，播種工の成績判定の指標として用いられる。植被率の計測は目視で行うことが一般的⁴⁾であるが，筆者のみの判断では主観的で不正確な計測値となってしまいう可能性が考えられた。そこで，実験の直前に撮影された各供試体の写真を用いてアンケート調査を実施した。そして，回答された植被率の平均値を，各供試体の植被率と定めることで，できるだけ客観的な植被率の計測値を得た。なお，アンケートの回答は14名から受領した。(ただし，TBで育成期間を8日間とした供試体の植被率については，3名から回答を受領した。)

(4) 実験の手順

侵食実験は，以下の手順により実施した。まず，模型法面の斜面部に供試体を設置した後，整流のために水を5秒間流下させる。その後，水を1分間継続して流下させ，流出した土砂を75μmふるいにより回収した。また，ふるいを通過した土砂はプラスチック容器に流入させ，24時間経過した後に沈殿分を回収した。回収した土砂はそれぞれの実験毎に乾燥炉によって110℃で24時間乾燥させた後，乾燥重量を

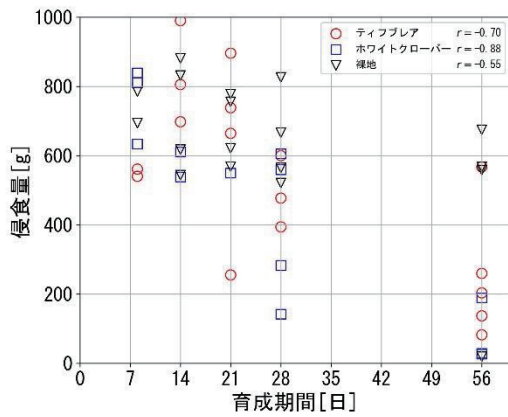


図-5 供試体の育成期間と侵食量の関係

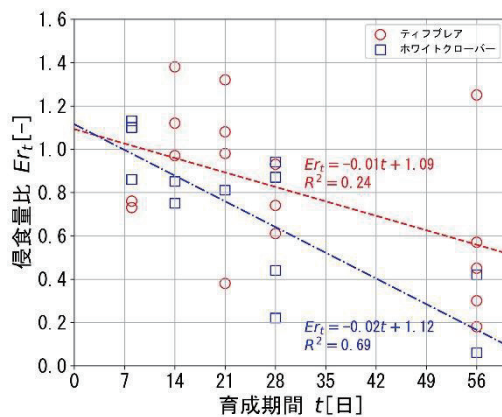


図-6 育成期間と侵食量比

測定した。そして、ふるい、プラスチック容器の両方から得られた乾燥重量を、その供試体の侵食量と定めた。また、侵食量の結果を用いて侵食量比の算出を行った。侵食量比とは、裸地域で発生する侵食量を1とした場合の植生被覆域で発生する侵食量であり、植生の法面保護効果を議論する際に、しばしば用いられる¹²⁾。本研究では、各供試体の育成期間に対する侵食量比を式(1)、各供試体の植被率に対する侵食量比を式(2)のように定義した。

$$Er_t = \frac{V_t}{B_t} \quad (1)$$

$$Er_{t,CR} = \frac{V_{t,CR}}{B_t} \quad (2)$$

ここに、 t : 各供試体の育成期間[日]、 CR : 植被率[%]、 Er_t : 植生の育成期間 t における各植生有供試体の侵食量比[-]、 V_t : 植生の育成期間 t における各植生有供試体の侵食量[g]、 B_t : 育成期間 t における各裸地供試体の侵食量の平均値[g]、 $Er_{t,CR}$: 植生の育成期間 t 、植被率 CR における各植生有供試体の侵食量比[-]、



図-7 育成期間 56 日とした TB の育成状況の違い (左) $Er_t=1.25$, $CR=13.0\%$ (右) $Er_t=0.18$, $CR=50.9\%$

$V_{t,CR}$: 植生の育成期間 t 、植被率 CR における各植生有供試体の侵食量[g]。

3. 実験の結果・考察

(1) 育成期間と侵食量との関係

育成期間と各供試体の侵食量の関係を図-5に示す。なお、図-5中に示された r は、ピアソンの積率相関係数である。すべての供試体の種類で、育成期間と侵食量の間には負の相関が見られた。ここで、裸地供試体の場合、56日の育成期間を経た供試体の1つでは、侵食量が非常に少ない(約19g)結果となったが、実験データの数に限りがあるため本研究では外れ値と見なしていない。仮にこのプロットを無視した場合、裸地供試体の r は-0.39となるため、裸地供試体では、育成期間と侵食量の間相関はさらに弱くなる可能性がある。各供試体の種類別に侵食量の結果を見ると、植生有供試体の方が裸地供試体に比べ、育成期間が増えるにつれて侵食量が減少する傾向が見られた。

次に、育成期間と侵食量比の関係を図-6に示す。なお、図-6中の直線は最小二乗法によって得た近似式を示している。両植生種ともに、育成期間が長くなるほど侵食量比は減少する傾向が見られた。しかし、いくつかの供試体では侵食量比が1を超え、植生有供試体の方が裸地供試体よりも侵食量が多くなる結果となった。また、その傾向は育成期間を8, 14, 21日間とした供試体で目立った。この原因として、既往研究^{7, 8)}で報告されているように、根が十分に活着していないこと、植生の発芽過程で土が緩んだことが考えられる。しかし、データのばらつきが大きく、近似式への当てはまりはあまり良くない(TB で $R^2=0.24$ 、WC で $R^2=0.69$)。

このようにばらつきが大きい結果になった原因は、植生の育成期間が等しい場合においても、植生の育成状況が供試体毎に異なるためと考えられる。その例として、図-7に育成期間を56日としたTBについて、侵食量比がそれぞれ1.25, 0.18となった供試体の育成状況を示す。これらの供試体における植被率の

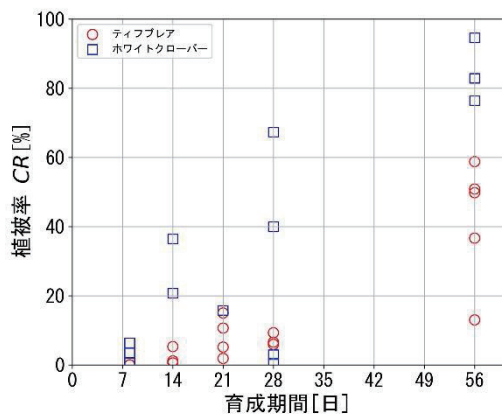


図-8 育成期間と植被率の関係

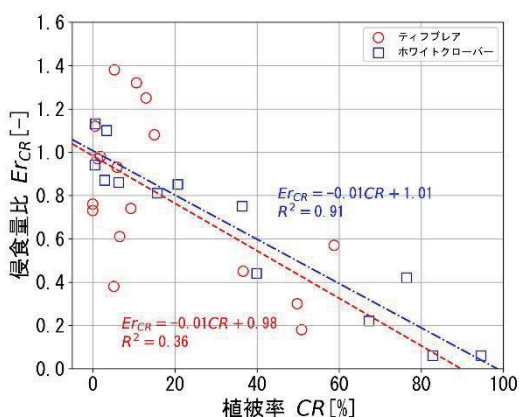


図-9 植被率と侵食量比の関係

差は約37%であった。よって、各供試体の植生の育成状況を育成期間で一律に評価することは、適切でないと考えられる。

(2) 植被率と侵食量の関係

本節では、供試体毎に植生の育成状況を評価するために、植被率の計測値に着目する。各供試体の育成期間と植被率の関係を図-8に示す。育成期間が等しい場合であっても植被率は異なるため、供試体毎に植生の状態を評価できていることが伺える。次に、植被率と侵食量比の関係を図-9に示す。両植生種とも、植被率が大きいほど侵食量比が減少する傾向が見られた。また、育成期間で整理した侵食量比に比べ、当てはまりの良い近似式が得られている。WCでは、播種工の成績判定が「可」となる植被率70%以上の場合、侵食量比が0.3以下になるような近似式($R^2=0.91$)が得られた。よって、植生が地表流に伴う侵食量を70%程度減少させるような法面保護効果が期待できる可能性がある。一方で、植被率が10%以下の場合、侵食量比が1を超え、裸地供試体よりも侵

食量が増える供試体も確認された。TBでは、本研究で設定した育成期間では、成績を「可」とする植被率が得られなかったが、植被率50%程度でも侵食量比が0.4程度になるような近似式が得られた。ただし、WCに比べて植被率の偏りが見られ、侵食量比のばらつきが大きい結果となった。また、そのばらつきは植被率が小さい(本研究では植被率20%以下)範囲で目立ち、Quinton et al.¹³⁾や岩崎ら¹⁴⁾による降雨実験と同様の傾向が確認された。このように侵食量比のばらつきが大きくなった理由として、TBの葉は細く、水平方向よりも鉛直方向に成長する形質であるため、地下部の根系が成長しても、見た目の植被率に寄与しづらいためではないかと推察する。従って、植生種によっては植被率のみでなく、地下部の根系の分布や量を計測する手法¹⁵⁾が有効である可能性が考えられる。

4. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、播種工の施工初期において草本植生が地表流に対して発揮する法面保護効果がどのように変化するかを明らかにすることを目的として、模型法面を用いた侵食実験を実施した。その結果、植生の育成期間が長くなるにつれ、植被率が大きくなり(図-8)、植被率が大きくなるにつれ侵食量比が減少するような傾向が見られた(図-9)。よって、ある程度の育成期間を確保することで植被率の向上につながり、植生が侵食量の減少に寄与することが考えられた。しかし、供試体毎に育成状況が異なり(図-7)、育成期間に対する侵食量比のばらつきが大きい結果(図-6)となったため、育成期間により植生の育成状況を一律に評価することは適切でないことが考えられた。そこで、各供試体の育成状況を植被率で評価し、植被率と侵食量比の関係を整理した。その結果、TB、WCともに、育成期間で整理した侵食量比(図-6)に比べ、当てはまりの良い近似式が得られた(図-9)ことから、植生の育成状況の評価には、育成期間よりも植被率の方が好ましいと考えられた。また、このとき、WCでは施工初期(播種後56日程度)においても、植被率70%以上の範囲で侵食量比が0.3以下となるような近似式($R^2=0.91$)が得られたため、植生の効果によって地表流に伴う侵食量を70%以上減少させるような法面保護効果が期待できる可能性が考えられた。一方で、植被率が10%以下では、植生は侵食量を増やす可能性が考えられた。TBでは植被率50%程度で侵食量比が0.4程度となったが、WCに比べ近似式の当てはまりは良くない($R^2=0.36$)結果とな

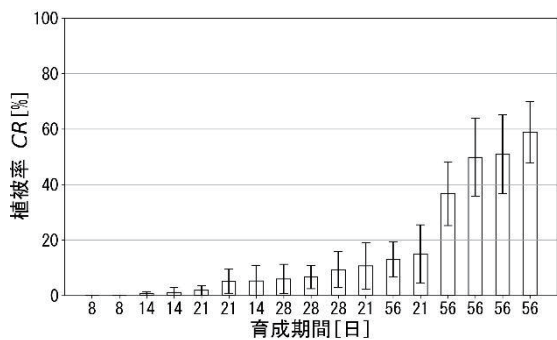


図-10 植被率の計測結果(ティフブレア)

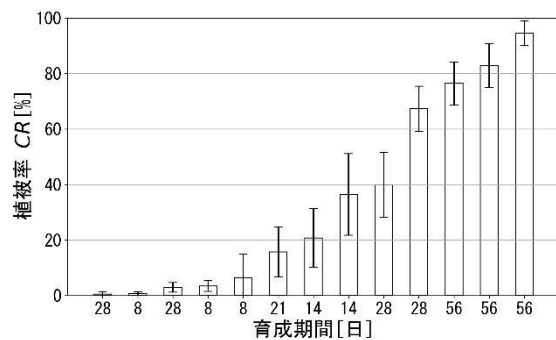


図-11 植被率の計測結果(ホワイトクローバー)

り、植被率が20%以下となる範囲で侵食量比のばらつきが大きくなる傾向が見られた。

今後の課題として、まず、本研究で侵食外力として設定した流量は、実際の法面で起こり得る排水溝からの溢水により発生する地表流の流量と比べて妥当な値なのか、調査を行う必要があると考えられる。次に、実験結果のばらつきに関する詳細な評価を行う必要がある。特に、裸地供試体と植被率の小さい植生有供試体についてデータを蓄積し、侵食量比が1を有意に上回るか、統計的な分析が必要であると考ええる。また、本研究において、植被率に対する侵食量比のばらつきが大きくなった原因として、i)TBのように、成長の形質が見た目の植被率の増加に寄与しづらい植生種では、植被率のみで植生の育成状況を評価できないこと、ii)各人によって植被率の計測結果が異なる(図-10, 図-11, エラーバーは標準偏差)ため、植被率の計測値が正確でないことの2点が考えられる。前者 i)に対しては、地下部の根系の分布や量を計測する手法¹⁵⁾が有効である可能性がある。後者 ii)に関しては、画像解析等を用いた、客観的で精度の良い植被率の計測手法を導入する必要があると考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたっては、令和2年度追加分九州地域づくり協会調査研究等助成事業の支援を得た。また、侵食実験を実施するにあたり、城本一義氏(当時、鹿児島大学技官)、釘崎夏彦氏(当時、鹿児島大学4年生)のご協力を頂いた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会令和2年7月豪雨地盤災害調査団: 令和2年7月九州豪雨による地盤災害調査報告書, pp.149-194, 2021.
- 2) 一般社団法人経済調査会: 季刊土木施工単価 '22・冬号, pp.102-113, 2022.

- 3) 公益財団法人高速道路調査会: 高速道路の土工技術史, pp.4-2-4-5, 2019.
- 4) 一般社団法人全国特定法面保護協会: のり面緑化工の手引き, 山海堂, 148p., 2009.
- 5) 公益社団法人日本道路協会: 道路土工切土・斜面安定工指針(平成21年度版), pp.191-275, 2009.
- 6) 北原 曜: 森林が表面侵食を防ぐ, 森林科学, 22 巻, pp.16-22, 1998.
- 7) 村井 宏: 林地の草地転換が地表流下・浸透・および土砂流出に及ぼす影響, 水利科学, 18 巻, 4 号, 1974.
- 8) 細木大輔, 柏木 亨, 松江正彦: 植生基材吹付工施工後 3 カ月間の植生基材の耐侵食性, 日本緑化工学会誌, 33 巻, 1 号, pp.9-14, 2007.
- 9) 酒匂一成, 齋田倫範: シラス堤防の浸透および越水に対する安定性に関する検討, 河川砂防技術開発公募報告書, 188p., 2018.
- 10) 国土交通省九州地方整備局: しらす地帯の河川・道路土工指針(案), 179p., 2017.
- 11) 村井 宏, 堀江保夫: 新編治山・砂防緑化技術-荒廃環境の復元と緑の再生-, ソフトサイエンス社, p.191, 1997.
- 12) Zuazo, V. H. D. and Pleguezuelo, C. R. R.: Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review, Agronomy for Sustainable Development, Vol.28, No.1, pp.65-86, 2008.
- 13) Quinton J. N., Edwards, G. M. and Morgan, R. P. C.: The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion: results from a rainfall simulation study in south east Spain, Soil Use and Management, Vol.13, No.3, pp.143-148, 1997.
- 14) 岩崎貴大, 篠原慶規, 大谷荘平, 久保田哲也: 森林表土を用いた緑化における表土採取場所による土壌侵食量の違い, 九州大学農学部演習林報告, 94 号, pp.18-22, 2013.
- 15) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), pp.90-92, 2012.

(2022.5.30 受付)