播種工の施工初期における草本植生の成長と飽和透水係数に関する一考察

A STUDY ON HERBACEOUS PLANT GROWTH AND SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN THE EARLY STAGE OF SEEDING WORKS

昌本 拓也[1]・吉田 大斗[2]・村上 哲[3]
Takuya MASAMOTO, Hiroto YOSHIDA and Satoshi MURAKAMI

[1]福岡大学工学部（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: t.masamoto@fukuoka-u.ac.jp
[2]元 福岡大学工学部（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
[3]福岡大学工学部（〒814-0180　福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: sato4murakami@fukuoka-u.ac.jp

***Key Words**: plant, revegetation, saturated hydraulic conductivity, seeding works*

1. はじめに

近年，道路盛土等の土工構造物では，降雨量の増大に伴い，小段排水溝のような表面排水施設（以下，排水溝）から溢れた水によって法面が侵食され，その進行に伴い崩壊に至る事例が多数報告されている[例えば1)]。排水溝からの溢水に起因する土工構造物の崩壊は，従来想定されてきた雨水浸透のみによる場合に比べ，規模が大きくなる可能性が指摘されている[2)]。また，現行の法面（斜面）災害に対するソフト対策に用いられる雨量に基づく規制基準[例えば3)]では，溢水を伴う崩壊形態は想定されておらず，排水溝の溢水対策の必要性が指摘されている[2)]。

一般に，法面の排水溝の設計[4)]では，排水溝の深さに対しある程度の土砂堆積を見込み，通水断面積を縮小することで，排水溝で溢水せずに流下可能な流量（以下，排水性能）を算定する。そして，排水性能が，排水溝で処理しなければならない流量（以下，雨水流出量）を上回るようにして，排水溝の断面が決定される。ここで，雨水流出量の算定時には，地表に降った雨量のうち，地中に浸透しない雨水の割合を示す係数として，流出係数が用いられる。流出係数は，流域の特性や土壌・地被状態などの浸透特性，降雨特性によって異なり[5)]，地表面種別毎に様々な値が適用されるが，法面においてその根拠となるデータは十分でない[4)]。また，法面表層が植生で被覆される場合には，植生の繁茂状態（以下，植生量）によって土の浸透特性が変化する[6)]と言われているため，流出係数にも影響すると考えられるが，現行の流出係数の標準値[4)]に植生量の違いは考慮されていない。これは，植生の性能（ここでは，地表流量の減少効果）[7)]を定量化する統一的手法が，未だ確立されていない[8)]ためであると考える。以上から，植生が土の浸透特性に与える影響を考慮し，雨水流出量を適切に評価することは，排水溝からの溢水を伴う法面災害を防止する上で重要である。

法面に植生を繁茂させる工法である法面緑化工のうち，草本植生の種子を散布する工法（以下，播種工）は，一般に低価格で施工性が良く[9)]，様々な現場で用いられる。播種工の品質を確認するための成績判定は，施工から 3 カ月程度経過した後に実施される[10)]。これは，植生の発芽，成長を考慮し，一定期間経過後の植生状態の良否を判定するためである[8)]。一方，播種工の施工初期は，地上部の被覆状態や地下部の根系の発達状態が経時的に変化する。よって，植生の地表流量減少効果を評価する際，植生

表-1　植生と飽和透水係数の関係に関する研究事例

著者	対象植生（育成期間）	供試体条件	主な知見
光原ら[12]	圃場自生植生 （育成期間不明）	圃場から根系を含む乱さない試料を採取。	根の混入率が大きいほど飽和透水係数が増加。
福原ら[13]	河川堤防法面の草本植生 （育成期間不明）	堤体から採取した根系を含む乱さない試料と，根系を除去して再構成した試料の比較。	根系を含む試料で飽和透水係数が増加。根茎量と飽和透水係数の明瞭な関係は見られない。
Tang et al.[14]	草本植生 （3，5，7 カ月）	大型土槽（Trough）内での再構成試料により植生を育成した後，根系を含む乱さない試料を採取。供試体は，かさ密度（Bulk Density）約 1.2 Mg/m^3 として作製※。	育成期間の経過に伴い飽和透水係数が増加。一方，育成期間 3 カ月では，裸地条件と同程度または下回る可能性がある。
Leung et al.[11]	草本，木本植生 （2，4，6，8 週間）	カラム内での再構成試料により植生を育成。供試体は，乾燥密度 1.4 Mg/m^3 として作製※。	育成期間，根量，根長密度の増加に伴い飽和透水係数も増加。一方，育成期間 2 週間の草本植生では，裸地状態と同程度。
Vergani and Graf[15]	木本植生 （1，2，4，8 カ月）	育苗ポット内での再構成試料により 1 カ月間植生を育成し，その後，実験用ポットに移植。供試体は，乾燥単位体積重量で 16 kN/m^3 として作製※。	育成期間，根長密度が増加すると飽和透水係数も増加するが，一定程度の成育を超えると，その傾向が逆転し，飽和透水係数が低下。

※供試体の締固め度，土粒子の密度，間隙比は示されていない。

が十分に繁茂した状態だけでなく，植生の成長初期段階の考慮も重要である[11]。そこで本研究では，播種工の施工初期における植生の成長過程と，浸透特性の指標の一つである飽和透水係数 k_s との関係に着目することとした。

表-1 に，植生と k_s の関係に関する研究事例を示す。なお，各研究で用いられた植生の成長量（以下，植生量）の評価指標の定義は，それぞれの参考文献を参照されたい。例えば光原ら[12]は，圃場で採取された試料を用いた検討において，植生の地下部根系の増加に伴って，k_s も増加すると報告している。また，福原ら[13]は，河川堤防法面で採取された試料を用いて，植生根系が存在する場合は，そうでない場合に比べ，k_s が増加する可能性を示している。一方で，Leung et al.[11]や Tang et al.[14]は，植生の育成初期における k_s への影響が明瞭でないことを示している。また，Vergani and Graf[15]は，植生の育成初期では，裸地条件に比べ k_s が大きくなるものの，植生の成長が一定程度を超えると，裸地条件に比べ k_s が小さくなる可能性を示している。以上から，植生が k_s に与える影響は，植生の育成期間や植生量によって異なると考えられる。

一方で，これら既往研究では，対象とする植生種，育成期間，植生量の評価指標，供試体の作製条件が異なる。特に，土工構造物における盛土法面での播種工を想定した供試体を用いた検討事例は，著者らの調査では見られなかった。

そこで本研究では，法面緑化工による地表流量減少効果の評価に向けた基礎的検討として，土工構造物の盛土法面を想定した供試体を用いて，成長初期段階の草本植生の植生量と飽和透水係数 k_s との関係を評価することとした。具体的には，植生の育成期間を最長で 56 日間とすることで，播種工による植生の成長初期段階を再現した。そして，植生量を簡易に計測可能な根の乾燥質量，植被率により評価し，それらと k_s との関係を整理，考察した。

2. 実験手法

(1) 供試体の作製条件

本研究では，飽和透水係数を得るための試験方法として定水位透水試験（JIS A 1218 : 2020）を準用した。以下，単に透水試験と称す。土試料には，福岡市内で採取した建設発生土（工学的分類：細粒分混じり礫質砂（SG-F））を用いた。**表-2**，**図-1** にそれぞれ，土試料の物性値，粒径加積曲線を示す。

供試体は，**図-2** に示すように，透水円筒に塩化ビニール製管（長さ 125.8 mm，内径 100.5 mm），フィルターにステンレス製メッシュ（開口径 77 μm）を用いて，8 層に分けて突き固めることで作製した。

表-2　土試料の物性値および供試体作製条件

土粒子の密度	2.64 Mg/m^3
工学的分類	細粒分混じり礫質砂（SG-F）
最大乾燥密度	1.96 Mg/m^3
最適含水比	10.88 %
締固め度	90 %
間隙比	0.50
乾燥密度	1.76 Mg/m^3

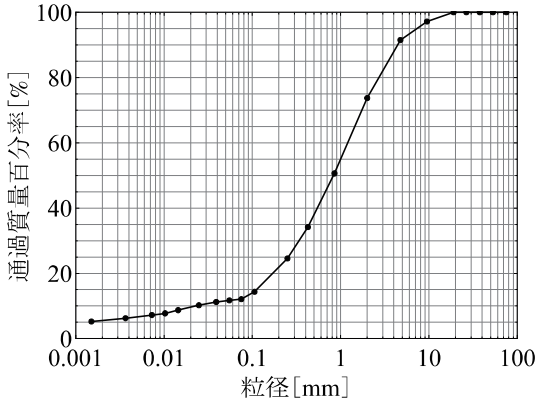


図-1　粒径加積曲線

突き固めの目標値は，道路土工構造物における盛土法面を想定し，突き固めによる土の締固め試験のA-b 法（JIS A 1210 : 2020）で得られた最大乾燥密度に対し，締固め度 90 %[16]となるような間隙比とした。含水比は，最適含水比とした（**表-2**）。なお，このときの乾燥密度は 1.76 Mg/m^3 であり，**表-1** に示す既往研究に比べ大きいため，より密な供試体条件であると考える。ただし，既往研究で用いた土試料とは土粒子の密度が異なると考えられるため，間隙比による直接の比較は難しい。

植生の育成のために，7 層目の突き固め後に，法面緑化工に利用される草本植生種であるホワイトクローバー（Trifolium repens L.）[8]の種子を，15 mm 間隔で計 32 粒播種した。さらに，7 層目と 8 層目の土には，植生の育成を促進するために液体化成肥料をそれぞれ 6 g 程度添加した（**図-2**）。以下，このように作製した供試体を植生供試体と称す。なお，全ての植生供試体において播種工の適用性を確認するために，7 層目の突き固め後の土壌硬度を，山中式土壌硬度計により計測した。その結果，土壌硬度はいずれも 10 mm 程度であり，播種工の適用上限の土壌硬度である 23 mm[10]を下回ることを確認している。

また，植生供試体の対照データを得るために，種子を播種しない裸地供試体も同様の条件で作製した。

これらの供試体を，植生の育成のために屋外のビニールハウス内に静置した。このとき，植生に水分

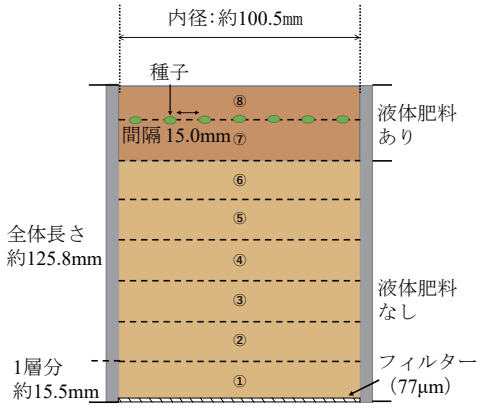


図-2　植生供試体作成時の透水円筒縦断面図

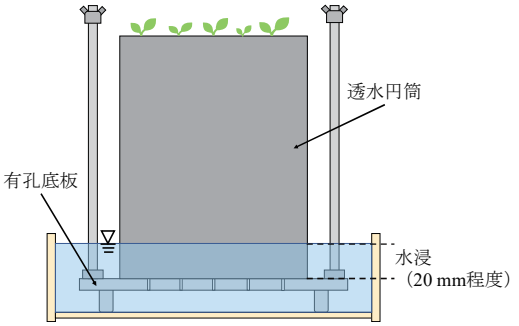


図-3　植生育成時における水の供給方法

を供給するために，**図-3** に示すように，供試体を有孔底板の上に乗せ，供試体下部（約 20 mm）が水に浸されるようにした。育成期間（裸地供試体では養生期間）は植生供試体，裸地供試体ともに，7，14，28，42，56 日間とした。供試体数は，両供試体種の育成，養生期間 42 日間で 2 個，それ以外で 3 個ずつとした。以下，本文及び図表を簡潔にするために，裸地供試体における養生期間も育成期間と記す。

(2) 透水試験の概要

本節では，透水試験の方法と飽和透水係数の算出方法，植生量を定量化するための方法について述べる。まず，透水試験の方法として，各育成期間を経過した植生供試体は，地上部の植生を切り取り，減圧容器内に 20 時間程度水浸し，真空ポンプを用いて飽和させ，その後，透水試験を実施した。なお，裸地供試体も同様の条件で飽和させ，試験を実施した。

植生供試体の飽和透水係数は，次章で述べるように，鉛直方向の根系の分布の影響を受ける[14]と考え，供試体を成層地盤にモデル化することとした。本研究では，層数を上下の 2 層に分け，層厚はそれぞれ供試体の全体長さ（**図-2**）の半分とした。そして，式(1)により供試体上層の飽和透水係数 k_{s_up} を算出することで，植生供試体の飽和透水係数を評価した。

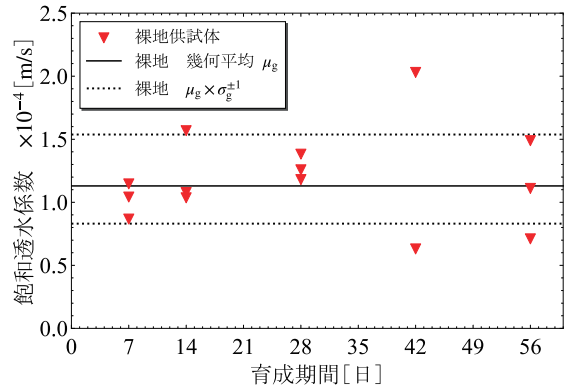


図-4　育成期間と飽和透水係数の関係（裸地供試体）

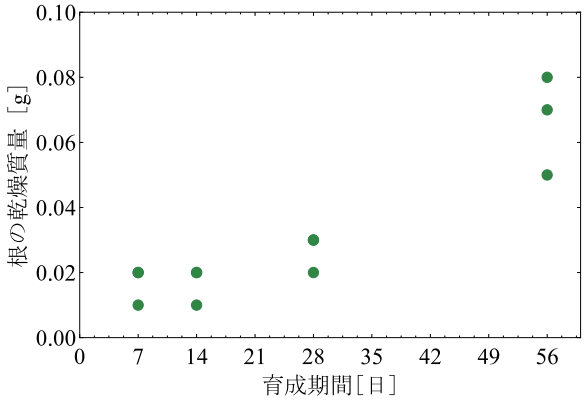


図-5　育成期間と根の乾燥質量の関係

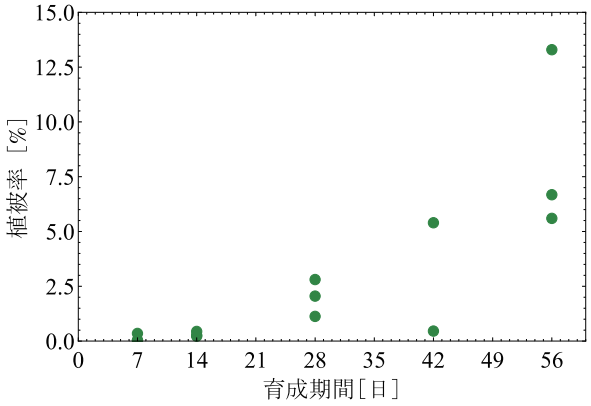


図-6　育成期間と植被率の関係

$$k_s = \mathrm{H} \Big/ \left(\frac{\mathrm{H_{up}}}{k_{s_up}} + \frac{\mathrm{H_{lo}}}{k_{s_lo}} \right) \quad (1)$$

ここに，k_s，k_{s_up}，k_{s_lo} はそれぞれ，供試体全体，上層，下層の飽和透水係数[m/s]，H，H_{up}，H_{lo} はそれぞれ，**図-2** に示す供試体の全層厚（約 125.8 mm），上層厚（⑤～⑧層の厚さ，約 62.9 mm），下層厚（①～④層の厚さ，約 62.9 mm）。なお，k_{s_lo} については，次章にて述べる。

次に，植生量の定量化方法について述べる。地下部の植生量は，根長密度（root length density）[15]や，根直径（root diameter）[17]を評価する事例があるが，本研究では比較的簡易に計測が可能な，根の乾燥質量を採用した。根の乾燥質量は，透水試験終了後に供試体を崩し，根を全て回収し，それらを炉乾燥（110℃で 24 時間以上）させた後に，電子天秤（最小表示：0.01 g；標準偏差：0.01 g）で計測した。地上部の植生量は，植生の地被状態を示す一般的指標で法面緑化工の評価指標 [8]の一つでもある植被率（地表面に対する植生の水平投影面積を百分率で示した数値[18]）を採用した。植被率は，地上部の植生を切り取る前に，デジタルカメラにより供試体を真上から撮影し，得られた画像を解析[19]し計測した。

3. 結果・考察

(1) 裸地供試体の透水試験結果

図-4 に，裸地供試体の育成期間と飽和透水係数 k_s の関係を示す。**図-4** より，k_s は 0.5×10^{-4}～2.0×10^{-4} m/s 程度の値となり，育成期間との関係は明瞭でない結果となった。これらの関係をさらに検討するために，無相関の検定を行った。以下では，k_s は対数正規分布に従いばらつくと考え，対数変換された k_s を用いた。その結果，帰無仮説が採用された（p>0.05）ため，本研究の裸地供試体の k_s は，育成期間によらないと判断した。**図-4** には，全育成期間における k_s の幾何平均 μ_g=1.13×10^{-4} m/s と，幾何不偏標準偏差の幅 $\sigma_g^{\pm1}$（=1.36）を示す。

(2) 植生の成育結果

図-5，**図-6** にそれぞれ，植生供試体における育成期間と根の乾燥質量，植被率との関係を示す。ただし，育成期間 42 日間の供試体における根の乾燥質量は，データ欠損のため**図-5** に反映されていない。また，**図-7** には，植生の成育結果の例として，育成期間 56 日において植被率が 13.3 %となった供試体の地表面画像，および画像解析結果を示す。育成期間が長いほど，両植生量ともに大きくなる傾向が確認され（無相関の検定；p<0.05），本研究で設定した育成期間である 56 日間において，植生が徐々に成長したことが分かる。

(3) 植生供試体の透水試験結果

植生供試体から根を回収した際に，根系は上層に多く分布することが観察された。従って，下層への根系の侵入が飽和透水係数に与える影響は小さいと考え，植生供試体の飽和透水係数は，式(1)による

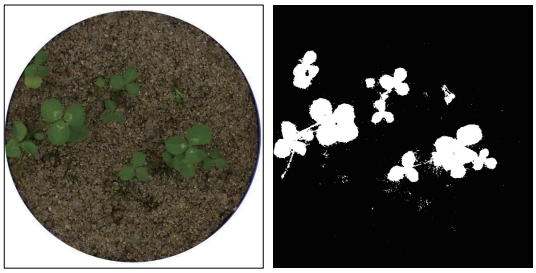


図-7　植被率の計測例（育成期間 56 日，植被率 13.3 %）

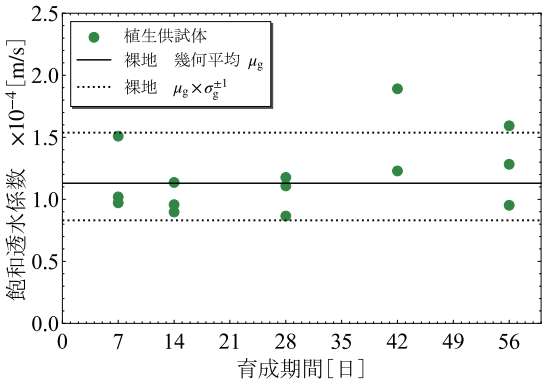


図-8　育成期間と飽和透水係数の関係（植生供試体）

k_{s_up} により評価した。式(1)中の k_{s_lo} は，裸地供試体で得られた μ_g として，k_{s_up} を算出した。

図-8 に，育成期間と植生供試体の飽和透水係数 k_{s_up} の関係，および裸地供試体における μ_g，$\mu_g \times \sigma_g^{\pm 1}$ を示す。育成期間によらず，k_{s_up} は約 0.8～1.8×10^{-4} m/s であり，裸地供試体の k_s のばらつきの範囲内（$\mu_g \times \sigma_g^{\pm 1}$）に概ね収まった。従って，本研究で設定した育成期間 56 日間において，植生の成長による明瞭な透水性の向上は確認されなかった。

次に，植生量と植生供試体の飽和透水係数との関係について述べる。**図-9**，**図-10** にそれぞれ，根の乾燥質量および植被率と植生供試体の k_{s_up} との関係を示す。両植生量とも，それらの増加に伴う k_{s_up} の明瞭な変化は確認されず，有意な相関関係は確認されなかった（無相関の検定；p>0.05）。以上から，本研究では育成期間を経るに伴って根の乾燥質量や植被率は有意に増加したものの，それらと k_{s_up} の明瞭な関係は見られなかった。

この理由として，本研究における植生供試体では，根の成長に伴う供試体内部の間隙構造の変化が，k_{s_up} に明瞭に反映される段階に至っていなかった可能性が考えられる。著者らの既往研究[20),21)]では，本研究と同様に締固め度 90 %を目安として作製した供試体を用いてホワイトクローバーを 56 日間育成したが，植被率は 80～100 %程度であった。本研究とは供試体の間隙比，育成環境，施肥，散水条件等が異なるため単純な比較はできないが，本研究における植被率の最大値が 13.3 %であったことを踏まえると，本研究では植生の成長が限定的であったと考える。その理由の一つとして，本研究における供試体の間隙比が 0.50 であり，既往研究での間隙比 0.93[20)]，1.19[21)]に比べ小さく，供試体内部の気相の確保や根の侵入が抑制された可能性が考えられる。

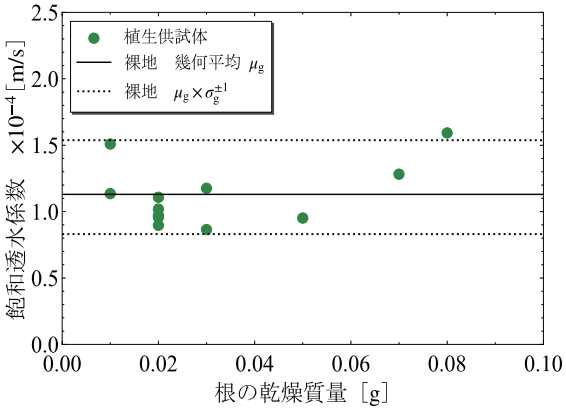


図-9　根の乾燥質量と飽和透水係数の関係（植生供試体）

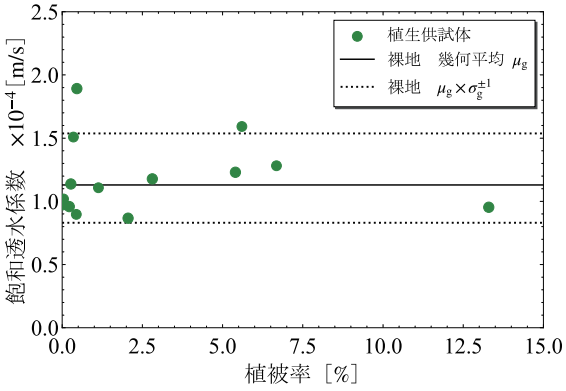


図-10　植被率と飽和透水係数の関係（植生供試体）

以上より，植生の成長と飽和透水係数との関係を検討するためには，植生量の変化と併せて，供試体内部の間隙構造の変化を評価する必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では，法面緑化工による地表流量減少効果の評価に向けた基礎的検討として，土工構造物の盛土法面を想定して作製した供試体に，草本植生（ホワイトクローバー）の種子を播種し，育成初期段階での植生の成長と飽和透水係数 k_s との関係を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1)　植生量の定量的指標として，地下部の根の乾燥質量，地上部の植被率を用いた。両植生量は，育成期間が長いほど増加傾向であることが確認された。ただし，育成期間 56 日における植

生供試体の植被率の最大値は 13.3 %であり，植生の成長は限定的であった。

(2) 植生供試体の飽和透水係数は，育成期間 7 日から 56 日の範囲において，裸地供試体の実験結果のばらつきの範囲内に概ね収まった。従って，本研究条件下では，植生の成長に伴う飽和透水係数の明瞭な変化は確認されなかった。

(3) 根の乾燥質量および植被率と，飽和透水係数との間には，明瞭な関係が確認されなかった。その理由として，本研究条件下では，植生量は増加したものの，根の成長に伴う間隙構造の変化が，飽和透水係数に明瞭に反映される段階には至っていなかった可能性が考えられた。よって，本研究では，飽和透水係数の観点から，播種工の施工初期における植生の地表流量減少効果を明瞭に示す結果は得られなかった。

今後は，植生供試体の作製条件を見直すことに加え，植生基盤材の有無や厚さ，植生種，施肥条件，育成環境等を考慮し，植生が十分に成長する条件に設定した上で，再検討する必要がある。また，供試体内部の間隙構造の変化や浸透特性を評価し得る指標を整理する必要がある。

謝辞：本研究の一部は令和 7 年度一般社団法人九州地域づくり協会調査研究助成事業，福岡大学令和 7 年度若手・女性研究基盤構築支援事業(GW2514)の支援を得た。また，福岡大学 4 年生の木村優斗氏には，一部の実験を補助頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 浅井健一，林浩幸，宮本浩二，佐々木靖人：事例分析により明らかになった最近の国道斜面災害の特徴と道路斜面管理における留意点，応用地質，54 巻，6 号，pp. 281-298，2014.
2) 小泉圭吾，岩本遼生，藤原優，久田裕史：排水構造物で生ずる溢水による表層崩壊メカニズムの一考察，土木学会論文集，79 巻，2 号，22-00105，2023.
3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部，気象庁大気海洋部，国土交通省国土技術政策総合研究所：土砂災害警戒情報の基準設定及び検証の考え方，34p.，2023.
4) 公益社団法人日本道路協会：道路土工要綱（平成 21 年度版），丸善出版，pp. 100-193，2009.
5) 田中茂信：安定浸透強度・降雨強度関係式の提案，土木学会論文集，80 巻，16 号，23-16128，2024.
6) 竹下敬司：土壌表層浸透能の物理的構成と植生（Ⅰ），水利科学，54 巻，5 号，pp. 1-45，2010.
7) 北原曜：植生の表面侵食防止機能，砂防学会誌，54 巻，5 号，pp. 92-101，2002.
8) 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[改訂版]，189p.，2024.
9) 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.
10) 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)，丸善出版，pp. 202-275，2009.
11) Leung, A., Boldrin, D., Liang, T., Wu, Z. Y., Kamchoom, V. and Bengough, A.: Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment, Geotechnique, Vol.68, No.7, pp.646-652, 2018.
12) 光原圭祐，弓削こずえ，中野芳輔：植物根が土壌の保水性・透水性に及ぼす影響，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp. 68-69，2007.
13) 福原直樹，森啓年，服部敦：植生の根茎が河川堤防法面の浸透・強度特性に与える影響，河川技術論文集，20 巻，pp. 491-496，2014.
14) Tang, Y., Pan, H., Zhang, T., Cao, L. and Wang, Y.: The dynamics of soil macropores and hydraulic conductivity as influenced by the fibrous and tap root systems, Agriculture, 14, 1676, 2024.
15) Vergani, C. and Graf, F.: Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective, Ecohydrology, Vol.9, No.5, pp.830-842, 2016.
16) 公益社団法人日本道路協会：道路土工 盛土工指針（平成 22 年度版），丸善出版，p. 219，2010.
17) Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E. and Li, Y.: Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review, Progress in Physical Geography, Vol.29, No.2, pp.189-217, 2005.
18) 日本緑化工学会：緑化技術用語事典，山海堂，p. 101，1990.
19) 昌本拓也，酒匂一成，伊藤真一：草本型播種工の客観的な成績判定に向けた可視光画像解析技術の適用可能性の検討，地盤工学ジャーナル，18 巻，1 号，pp. 81-95，2023.
20) 昌本拓也，岩永蓮大郎，酒匂一成，伊藤真一：可視光画像解析と室内侵食実験による地表流に対する草本植生の法面保護効果に関する検討，第 15 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 390-396，2023.
21) 昌本拓也，岩永蓮大郎，酒匂一成，伊藤真一：可視光画像解析と室内侵食実験による草本植生の法面保護効果と土粒子の粒径との関係に関する一考察，Kansai Geo-Symposium 2023 -地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム-論文集，pp. 97-102，2023.

（2026.5.29　受付）