日緑工誌，J. Jpn. Soc. Reveget. Tech., 42(4), 494–502,（2017）

論　文　*ORIGINAL ARTICLE*

特集「積雪寒冷地における緑化工技術の課題解決に向けて」

外来草本植物と地域性種苗の根系を含む土供試体のせん断特性と覆土厚との関係

宗岡寿美[*1)]・山崎由理[2)]・小俣悟得[1,3)]・石川玲奈[1,4)]・福田尚人[2,5)]
木村賢人[1)]・辻　　修[1)]

1）帯広畜産大学　Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine
2）岩手大学大学院連合農学研究科　The United Graduate School of Agriculture, Iwate University
3）現）(株)ルーラルエンジニア　Rural Engineer Co., Ltd.
4）現）北海道大学大学院工学研究院　Faculty of Engineering, Hokkaido University
5）現）(有)開成舎　Kaiseisha Co., Ltd.

摘要：法面緑化工（客土種子吹付工）を想定して作製された土供試体の一面せん断試験を実施し，クリーピングレッドフェスク（*Festuca rubra* L.）およびクサヨシ（*Phalaris arundinacea* L.）の根系を含む土供試体のせん断特性と覆土厚との関係を考察した。土供試体内に草本植物の根系を含むことにより，強度定数のうち粘着力 c のみが増大し，せん断抵抗角 ϕ に差はみられなかった。また，覆土厚が薄いほど粘着力 c は大きい傾向を示した。2 種類の草本植物を比較すると，覆土厚にかかわらずクサヨシにおける粘着力 c はつねに大きかった。とりわけ覆土厚が 1.5 cm 以上の場合，クリーピングレッドフェスクにおける粘着力 c は根系を含まない土供試体 c_{blank}（1.1 kN/m^2）と同程度にまで低下した。根系に着目すると，2 種類の草本植物の根長密度は覆土厚との間に負の相関があり，粘着力 c との間には正の相関が認められた。このように，土供試体の粘着力 c は根系の発達状況に影響を受けており，クリーピングレッドフェスクでは覆土厚 1.0 cm 程度が土層の粘着力 c を保持する上で妥当であった。また，地域性種苗のクサヨシは覆土厚にかかわらず生育状況および粘着力 c が良好であり，積雪寒冷地における法面保全の立場から植生工への適用可能性が高いことが示唆された。
キーワード：クリーピングレッドフェスク，クサヨシ，一面せん断試験，粘着力 c，覆土厚，根長密度

MUNEOKA, Toshimi, YAMAZAKI, Yuri, OMATA, Gou, ISHIKAWA, Rena, FUKUDA, Naoto, KIMURA, Masato and TSUJI, Osamu: **Relationship between shear characteristics and soil cover thickness on soil specimen including roots of *Festuca rubra* L. and *Phalaris arundinacea* L.**

Abstract: Direct shear tests on soil specimens including roots of *Festuca rubra* L. and *Phalaris arundinacea* L. based on the soil dressing seed spraying Engineering were conducted under the methods both of unconsolidated-undrained (UU) test and of constant pressure shear. Here, we discussed the relationships between the shear characteristics of soil specimen including roots of herbaceous plants and the soil cover thickness. When the soil specimen included the roots of herbaceous plants, the cohesion, c values increased, but the angle of shear resistance, ϕ values stayed. Also, the c values tended to large with the thinner soil cover. The c values of *P. arundinacea* were larger than *F. rubra* with any soil cover thickness. However, the c values of *F. rubra* decreased to the c_{blank} (1.1 kN/m^2) including no roots with 1.5 cm or larger in the soil cover thickness. The root length density had a negative correlation with the soil cover thickness, had a positive correlation with the c values in both of *F. rubra* and *P. arundinacea*. Therefore, the c values were affected by growing condition of the roots in the soil specimens. *F. rubra* needed about 1.0 cm of the soil cover thickness to keep the strength of the c values. While *P. arundinacea* showed good growing condition and high c values with any soil cover thickness, and high applicability of the revegetation engineering for the slope conservation in the cold region with snowfall.
Key word: *Festuca rubra* L., *Phalaris arundinacea* L., direct shear tests, cohesion c, soil cover thickness, root length density

＊連絡先著者（Corresponding author）：〒080–8555　帯広市稲田町西 2 線 11 番地　　E-mail：muneoka@obihiro.ac.jp

1. はじめに

1.1 北海道における植生工の背景と課題

法面緑化工としての植生工は，景観・自然保護の観点からも多用されているが，表土（客土）保持・侵食抑制，ひいては根系の緊縛力による土壌の補強効果などが期待される[15]。とりわけ積雪寒冷地の北海道では，植生工（とくに客土種子吹付工）の施工後から冬期を迎えるまでの生育期間が十分に確保されない場合，法面基盤土と吹付けられた客土層との間の接触面を翌年の春先に融雪水・降雨が流下するため，主として切土法面では表層崩壊が頻繁に発生している。

一般に，積雪寒冷地の北海道で植生工の施工適期を考えるとき，植物の生育上の阻害要因となる気温を設定し，草丈がある程度生長するまでの気温と生育日数から施工適期（施工限界期）が検討されてきた[8, 10, 20]。しかし，草本植物の草丈のみならず，根系を含む土層の力学的特性を視野に入れて施工適期が検討された事例はみられない。

1.2 根系を含む土層の強度特性に関する既往研究と課題

これまでの間，樹木の根系を含む土層の力学的特性に関する検討は比較的古くから実施されている[6]。また，森林の崩壊防止機能に関する研究[23]や樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究[3]として森林保全的見地から樹木根系による土層の保持機能が体系的にまとめられ，こうした成果は学術誌にも多数報告されている[1, 2, 4, 5, 25, 26]。他にも，国内[21, 29]・国外[7, 18, 19, 27, 28]を問わず，樹木根系による土の補強効果などが検討・報告されてきた。

樹木根系を含む土層のせん断特性として，クーロンの破壊規準における強度定数（粘着力 c，せん断抵抗角 ϕ）のうち，粘着力 c が増加すると結論づけている報告が多い[1, 6]。しかし，小橋[11]は，木本植物（一部は草本植物）の根系を含む土層のせん断特性に関する実験結果を整理する中で，垂直応力が小さい場合には土層の条件によって粘着力 c，せん断抵抗角 ϕ の両方に作用するとしており，こうした問題にはさらなる検討が求められる[24]。

根系を含む土層のせん断強度をはかるとき，既往の研究では個々の研究者・技術者が独自の手法を用いて室内・原位置における各種せん断実験を実施してきた。しかし，土供試体の大きさ，せん断深さ，せん断変位速度をはじめ，あらゆる条件設定に対して一定の基準はなく，個別に蓄積された実験結果をそのまま比較・検討できる段階には至っていない。

1.3 草本植物の根系を含む土層のせん断方法の提案

造成後の切土法面（裸地面）を保全する上で，草本植物の根系の緊縛力による土壌の補強効果は法面緑化工の目標のひとつである。しかし，緑化工技術的見地から実際の植生工を視野に入れて草本植物の根系を含む表層土の力学的性質（たとえばせん断特性）を定量評価した事例はこれまでほとんどみられない[12]。

いま，積雪寒冷地の緑化工技術に関する地域ルールづくりを考えるとき，法面緑化の目的をより明確にする上で，草本植物の根系を含む土層のせん断特性を定量的に評価・判定できる方法を検討する必要がある。そのためには，①土供試体の大きさ，せん断変位速度など一定の条件設定のもとで基準化された一面せん断試験方法を採用すること，②実際の植生工（客土種子吹付工）を想定してせん断深さなどの条件を統一すること，その上で③草本植物の種類・生育環境がそれぞれ異なる土層を用いて多くの一面せん断試験を実施することが十分条件となる。この①～③の条件を担保したケーススタディの積み重ねによって蓄積された実験結果を相互共有し，草本植物の根系を含む土層のせん断特性を評価・判定できるシステムの構築を目指していく段階にきている[12]。

1.4 北海道の植生工に使用される外来草本植物と課題

他方，北海道の植生工（主として客土種子吹付工など）では，事業実施主体（国・北海道），種別（道路・河川・農業）の違いにかかわらず，トールフェスク（*Festuca arundinacea* Schreb.），ケンタッキーブルーグラス（*Poa praten sis* L.）およびクリーピングレッドフェスク（*Festuca rubra* L.）などの外来草本植物が混播する形で長年にわたり使用されてきた。しかし，2005 年に施行された「外来生物法」によって，法面緑化の主要な外来草本植物のトールフェスクが「要注意外来生物リスト」に記載された。以降，北海道における植生工では，周辺自然環境への影響を危惧してトールフェスクの使用を控える傾向が続いてきた。

近年，ハードフェスク（*Festuca longifolia* Thuill.）が新たに使用されるようになった。しかし，北海道におけるハードフェスクの使用実績はほとんどなく，施工後の長期モニタリングを含めた生育評価に関する情報が少ない。このため，トールフェスク以外で使用実績を有する上記 2 種類の外来草本植物の情報収集・評価の充実はもとより，自然環境保護の視点から地域性種苗の法面緑化への積極的な導入も視野に入れた植生工に関する検討が求められる。

1.5 客土種子吹付工と覆土厚に関する課題

客土種子吹付工は，数種類の種子・肥料・粘着剤・土壌改良剤などを客土に混合して法面に直接吹き付ける工法であり，北海道では客土厚を 3 cm に設定することが多い[9]。日本法面緑化技術協会[16]によると，播種量は期待発生本数を基準として設計されるが，発芽には種子の覆土厚の影響を受ける。このとき，発芽可能な覆土厚（有効深さ）はトールフェスク・クリーピングレッドフェスク種子で 2.0 cm，ケンタッキーブルーグラスでは 0.5 cm とされており[16]，外来草本植物の種類と覆土厚との関係次第では，発芽・生育しないこともある。

すなわち，草丈など茎葉部の生育に加えて根系を含む土層の力学的特性を指標として，草本植物の種類と覆土厚との関係に関する情報を整理しておくことは，積雪寒冷地における緑化工技術を進展させる上で重要であると著者らは考える。

1.6 研究の目的

この研究では，客土種子吹付工を想定して作製された土供試体の一面せん断試験を実施し，草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性と覆土厚との関係について考察した。対象とした草本植物は，北海道の客土種子吹付工に使用されてい

る外来草本植物の１種類であるクリーピングレッドフェスクである。あわせて，自然環境保護の視点からも法面に定着しやすいとされる地域性種苗の１種類としてクサヨシ（*Phalaris arundinacea* L.）を比較対照の草本植物とし，積雪寒冷地における法面保全の立場から地域性種苗（クサヨシ）の適用性および土層を強化する根系の役割などを検討した。

2.　材料および実験方法

2.1　材料

2.1.1　緑化用客土

この実験には，北海道十勝管内で採掘された緑化用客土（黒土）を用いた。この土は園芸用の黒土として一般に販売されていた。同時に，緑化用客土として緑化業者間でも取引されており，2012 年には十勝管内における実際の法面施工現場で客土種子吹付工などの播種工に使用された。

この緑化用客土を実験室内で空気乾燥させた後に 2 mm ふるい（一部は 0.425 mm ふるい）を通過させた。その後，日本工業規格（JIS）にもとづき，土粒子の密度試験（JIS A 1202），土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205），土の粒度試験（JIS A 1204）および土の強熱減量試験（JIS A 1226）などを実施した。地盤材料の工学的分類方法（地盤工学会基準 JGS 0051–2009）を参考として，採掘地の周辺状況・地質的背景のほか，この緑化用客土を観察するなど総合的に評価した結果，火山灰質粘性土（Ⅰ型，VH_1）に分類された（表–1）。

一般に，客土種子吹付工などに用いる客土には，レキ分が 5% 以下，最大粒径が 6 mm 以下のもので，腐植等の有機質を含んだものが望ましいと明記されている[15]。こうした条件を満足させるため，この実験では自然含水比（102%）の状態で 4.75 mm ふるいを通過した緑化用客土を用いて草本植物の根系を含む土層の一面せん断試験に供した。

2.1.2　草本植物（種子）

この実験には，外来草本植物のクリーピングレッドフェスクおよび地域性種苗のクサヨシの 2 種類の種子を用いた。クリーピングレッドフェスクはイネ科の多年草であり，積雪寒冷地の北海道では外来生物法（2005 年）の前後を通じた長い期間の中で，各種播種工に仕様が規定されている。クサヨシは全国に自生する多年生の草本植物であり，生長が早く法面によく定着することでも知られる。

一般に，クサヨシは和名であり，英名ではリードカナリーグラスと表記する。この研究では，これまで河川堤防などの法面緑化に導入されてきた外来草本植物のリードカナリーグラスと区別して表記する必要があるため，地域性種苗として和名“クサヨシ”をあえて用いることにした。

この実験では，期待発生本数を 2,500 本/m^2 に設定し，工法，立地条件，施工時期，種子の発芽率，種子の単位粒数および種子の純度などを考慮して播種量を算出した[14]。

2.1.3　肥料

客土種子吹付工において，客土厚が 3 cm 未満の場合には適当な施肥量は 50～100 g/m^2 であるとされており[15]，機械播種工の場合，一例として 10 kg/100 m^2 の施肥量が示されている[14, 17]。そこで，この実験には 3 要素（窒素(N)・リン(P)・カリウム(K)）の含有量が 42%（N：P：K＝14：14：14）の高度化成肥料を 10 kg/100 m^2 の割合で使用した。

2.1.4　育苗箱

この実験には縦 34.0 cm×横 49.0 cm×高さ 10.0 cm（内径）の育苗箱（ヤマト育苗箱，B 型）を使用した。この育苗箱は，水・空気の移動はもとより鉛直下方への根系の伸長が可能なように底部が 2.0 mm 角のメッシュ状になっている。

2.1.5　一面せん断試験機

この実験には，改良型一面せん断試験機（SG-83，(株)丸東製作所）を使用し，地盤工学会基準（JGS 0561–2009）で規定された土の定圧一面せん断試験方法にできる限り準拠した。

2.2　実験方法

2.2.1　緑化用客土の調整

土供試体の作製には，4.75 mm ふるいを通過した緑化用客土（自然含水比 102%）を使用した。

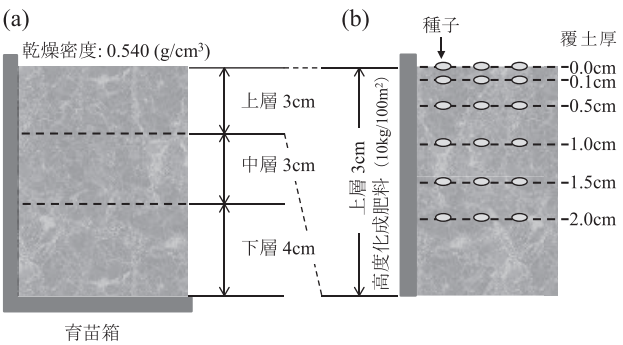
緑化用客土が一定の乾燥密度となるように合計 15 箱の育苗箱に 3 層（下層から上層にかけて厚さ 4 cm，3 cm および 3 cm）に分けて同一条件で充てんした（図–1(a)(b)）。このとき，すべての育苗箱には，上層 3 cm に充てんする緑化用客土に高度化成肥料を 10 kg/100 m^2（17.0 g/箱）の割合で

表–1　緑化用客土の物理的性質

Table 1　Physical property of the additional soil for greening

土粒子の密度	(g/cm^3)	2.373
コンシステンシー	液性限界（%）	77.1
	塑性限界（%）	57.8
	塑性指数	19.3
粒　度	砂　分（%）	40.3
	シルト（%）	51.8
	粘　土（%）	7.9
有機物含有量*	（%）	19.6
土　性	地盤材料の工学的分類方法	VH_1

*強熱減量法による



図–1　実験用の育苗箱（a）緑化用客土の充てん方法（b）6 種類の覆土厚

Fig. 1　Filling of the additional soil for greening for the nursery box (a); Six types of soil cover thickness (b)

施用した[14, 17]。

なお，育苗箱内に充てんするときの緑化用客土（自然含水比 102%）の乾燥密度は，突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）で使用されるランマー（質量 2.5 kg，落下高 30 cm）およびモールド（内径 10 cm，容量 1,000 cm^3）を用いて突固めたときの乾燥密度（0.675 g/cm^3）の 80%（0.540 g/cm^3）を十分条件的に担保した。この程度の乾燥密度以下であれば，育苗箱（土層）内の連続間隙を下方に向けて根系が伸長できた。また，この程度の乾燥密度以上であれば，2.2.3 で後述する土供試体の採取から一面せん断試験終了までの間，圧縮変形が少なく崩壊せずに土供試体が円柱形を維持できた。

ここで「突固め」とは，調整された土（ここでは緑化用客土）を 3 層に分けてモールド内に充てんするとき，各層において落下高 30 cm を確保して 25 回ずつランマーを自由落下させた状態に土を締固めることを指す。

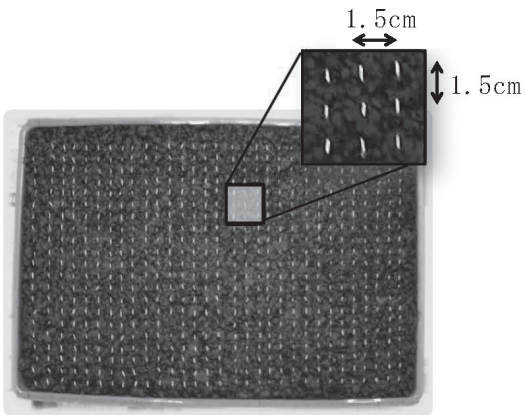
2.2.2　播種・生育方法

これら 15 箱の育苗箱のうち，12 箱（標準型）にはそれぞれ異なる各 6 種類の覆土厚(0.0 cm，0.1 cm，0.5 cm，1.0 cm，1.5 cm および 2.0 cm) が設定されるようにクリーピングレッドフェスクおよびクサヨシの種子を一定の密度（発生期待本数 2,500 本/m^2（1.5 cm 間隔）[14]）で均一に点播した(写真–1)。

さらに 2 箱には，クリーピングレッドフェスクおよびクサヨシの播種密度を 2 倍程度（1.0 cm 間隔；実質 2.25 倍）に設定した育苗箱（過密型，覆土厚 0.1 cm）を 1 箱ずつ作製した。以上の 14 箱に加えて，草本植物の種子を含まない育苗箱（以降，ブランク）を 1 箱作製した。

ここで，十勝地域における植生工の施工適期（施工限界期）[8, 10, 20]を考慮して，これら 15 箱の育苗箱を帯広畜産大学構内の実験圃場に移植し，2012 年 8 月 20 日～10 月 29 日の 71 日間，自然条件下でこの 2 種類の草本植物を生育させた。圃場における草本植物の生育状況を写真–2(a)(b)に示す。

この間，クリーピングレッドフェスクおよびクサヨシの発芽率および草丈を 2 週間に 1 回程度の割合で測定した。このとき，あらかじめ設定しておいた 50 本の草丈をそれぞれ 1 mm 単位まで測定し，その平均値を草丈の測定値とした。



写真–1　育苗箱への播種方法（標準型）

Photo 1　Standard type of seeding method of the nursery box

なお，実験圃場近傍において気温，降水量，全天日射量，日照時間および蒸発量を気象官署に準じた条件で連続測定した。生育期間中の気象環境を表–2 に示す。

2.2.3　土供試体の作製および一面せん断試験

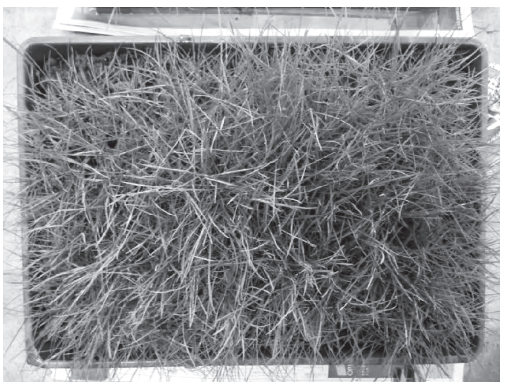
同年 10 月 30 日にはすべての育苗箱を実験室内へ搬入し，発芽率・草丈を最終測定した。ここで茎葉部を刈り取った後，80℃ で 72 時間通風乾燥させたときの乾物重（茎葉部）を測定した[22]。その後，草本植物の根系を含む土層について，各育苗箱内の土を地表面下 3 cm の位置がせん断面となるように，地表面下 2～4 cm の部分を不撹乱状態で直径 6.0 cm×高さ 2.0 cm の円柱形（56.5 cm^3）に採取した。以降，こうして採取した円柱形の土塊を「土供試体」とよぶ。

上記の方法で作製された合計 15 箱（15 パターン）の土供試体について，地盤工学会基準（JGS 0561–2009）にできるだけ準拠して土の定圧一面せん断試験を実施した。今回の実験は非圧密非排水（UU）条件下で実施し，せん断変位速度を 0.20 mm/min に設定した。また，せん断変位が 7.0 mm を超えた後もしばらくせん断過程を継続し，8.0 mm に達するまでの間におけるせん断応力の変化もあわせて観察した。

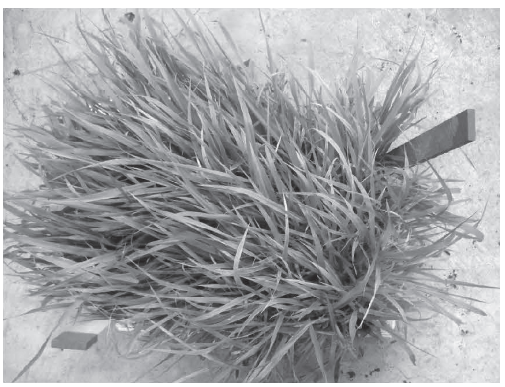
2.2.4　一面せん断試験結果の評価

今回の実験で得られた 15 パターンの土供試体の一面せん

(a)　クリーピングレッドフェスク



(b)　クサヨシ（いずれも，標準型：覆土厚 0.1 cm）



写真–2　草本植物の生育状況（2012 年 10 月 30 日）
(a) クリーピングレッドフェスク (b) クサヨシ

Photo 2　Growing condition of the herbaceous plants in 30th October 2012 (0.1 cm of the soil cover thickness). *Festuca rubra* L. (a); *Phalaris arundinacea* L. (b)

表–2　草本植物の生育期間中の気象環境

Table 2　Meteorological environment during the growing period of herbaceous plants

	積算温度 (℃・days)	降水量 (mm)	全天日射量 (MJ/m²)	日照時間 (h)	蒸発量 (mm)
8月20日	20.1	0.0	5.0	7.0	1.0
下旬	196.5	22.0	128.2	68.1	24.0
9月上旬	160.3	41.0	118.0	41.9	16.5
中旬	177.3	2.0	110.1	42.1	21.0
下旬	107.2	25.5	70.8	16.3	4.0
10月上旬	80.8	0.5	185.7	37.6	0.8
中旬	52.6	42.5	194.8	54.1	0.9
21～29日	21.8	51.0	153.8	47.9	0.4
合計値	816.6	184.5	966.4	315.0	68.6

断試験結果について，クーロンの破壊規準における強度定数（粘着力 c，せん断抵抗角 ϕ）を用いて評価した。同一条件の土供試体を複数個用意し，異なる垂直応力条件下で複数回試験を実施すると，せん断応力 τ は垂直応力 σ に比例し，両者の関係から強度定数 c・ϕ が求められる（図–2，式(1)）。

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \qquad (1)$$

このとき，τ はせん断応力 (kN/m²)，c は粘着力 (kN/m²)，σ は垂直応力 (kN/m²)，ϕ はせん断抵抗角 (°) である。

ここで，粘着力 c は垂直応力 σ に関係のない土の構造にもとづく成分である。一方，せん断抵抗角 ϕ は破壊面に働く垂直応力 σ に比例する摩擦抵抗を表すもので，力学的要因にもとづく成分である。

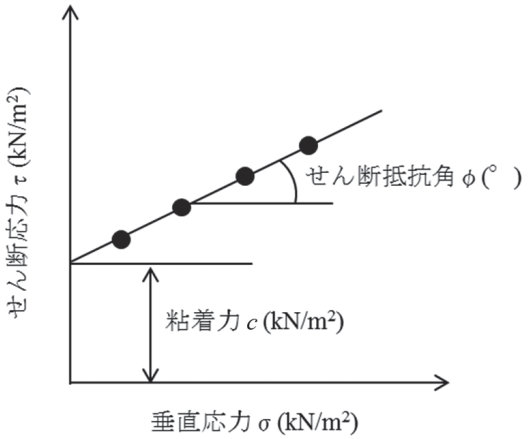
一定の試験基準のもとで，それぞれ異なる条件下で作製された土供試体の一面せん断試験を実施し，さまざまな実験結果を強度定数（c・ϕ）で評価した。この実験では，同一条件（同一パターンの土供試体）における試験回数を各4回とし，そのときの垂直応力 σ を 2.5 kN/m²，5.0 kN/m²，7.5 kN/m² および 10.0 kN/m² とした。

2.2.5　草本植物の根系評価

土の一面せん断試験後には土供試体内に含まれる根系をすべて採取した。このとき，種子根・節根と側根とを可能な限り目視により分離してそれぞれの根長を1 mm 単位まで測定した後，根長密度および乾物重（根系）を指標として根系を評価した。ここで根長密度（cm/cm³）とは，根系の長さの総和（cm）を土供試体の体積（56.5 cm³）で除した値のことである[13]。乾物重（根系）については根長を測定した後，80℃ で 72 時間通風乾燥させたときの根系の質量とした[22]。

3.　結　　果

今回の実験結果のうち，合計 15 箱（15 パターン）の育苗箱内で生育されたクリーピングレッドフェスク・クサヨシの茎葉部 (発芽率，草丈および乾物重 (茎葉部)) に関する評価の結果を表–3 に示す。あわせて，15 パターンの育苗箱ごとに実施された土供試体の一面せん断試験の結果から得られる強度定数（粘着力 c，せん断抵抗角 ϕ）を表–4 に示す。な



図–2　クーロンの破壊規準

Fig. 2　Coulomb's failure criterion; The cohesion, c and the angle of shear resistance, ϕ were calculated from a proportional relationship between the shear stress, τ and the normal stress, σ

お，一面せん断試験後に実施した根系（根長密度および乾物重 (根系)) に関する評価の結果を表–3 の中にあわせて示す。

はじめに，草本植物の根系を含まない土供試体（ブランク）における強度定数のうち，粘着力 c_{blank} は 1.1 kN/m² であり，せん断抵抗角 ϕ_{blank} は 27.3° であった（表–4）。

3.1　草本植物の茎葉部および根系の評価

標準型 12 パターンのうち覆土厚 0.0 cm (2 種類・2 パターン）をみると，覆土厚 0.1～2.0 cm（10 パターン）と比較して発芽率が著しく低く，クリーピングレッドフェスクで 2.4 %，クサヨシでも 12.6% であった（表–3）。また，草丈・乾物重（茎葉部）などの生育状況も劣悪であり，育苗箱内に均一な密度で生育していなかった。このことは，草本植物の発芽および良好な生育には，少なくとも 0.1 cm 程度以上の覆土厚が必要であることを示唆している。

覆土厚 0.0 cm（2 パターン）の場合，同程度の株数（種子根数）の土供試体を 1 つの育苗箱内から複数個採取することは困難であり，正確な強度定数 c・ϕ を得ることはできないと判断して一面せん断試験を断念した。おそらく，覆土厚 0.0 cm における土供試体の強度定数はブランク値（c_{blank}・ϕ_{blank}）と同程度であったと推察される（表–4）。

標準型 12 パターンのうち覆土厚 0.1～2.0 cm を有する 2 種類・10 パターンの育苗箱に生育した 2 種類の草本植物の茎葉部を評価した。クリーピングレッドフェスクの発芽率は 19.0～51.3%，草丈は 7.2～11.1 cm，乾物重（茎葉部）では 4.1～26.5 g/箱であった。一方，クサヨシの発芽率は 50.5～63.5%，草丈は 34.1～37.8 cm，乾物重（茎葉部）では 55.9～88.9 g/箱であった（表–3）。

また，2 種類・10 パターンにおける土供試体内の根系を評価すると，クリーピングレッドフェスクの根長密度は 2.9～20.9 cm/cm³，乾物重（根系）は 0.046～0.139 g/供試体であった。クサヨシの根長密度は 18.5～24.2 cm/cm³，乾物重（根系）は 0.278～0.355 g/供試体であった（表–3）。

表–3　草本植物の茎葉部および根系の生育環境
Table 3　Growing condition of leaves, stems and roots of the herbaceous plants

		クリーピングレッドフェスク					クサヨシ				
		茎葉部評価			根系評価		茎葉部評価			根系評価	
育苗箱［タイプ］	覆土厚（cm）	発芽率（%）	草丈（cm）	乾物重（g/箱）	根長密度（cm/cm³）	乾物重（g/供試体）	発芽率（%）	草丈（cm）	乾物重（g/箱）	根長密度（cm/cm³）	乾物重（g/供試体）
ブランク	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
標準型	0.0	2.4	5.4	0.5	—	—	12.6	20.1	18.4	—	—
	0.1	51.3	11.1	26.5	20.9	0.121	59.0	37.8	88.9	22.5	0.347
	0.5	48.4	9.2	18.2	17.8	0.110	63.5	36.6	66.8	24.2	0.336
	1.0	46.0	11.1	22.9	14.2	0.139	57.6	35.9	56.4	18.8	0.355
	1.5	31.5	8.8	8.8	8.4	0.090	51.5	34.4	56.5	18.5	—
	2.0	19.0	7.2	4.1	2.9	0.046	50.5	34.1	55.9	18.9	0.278
過密型	0.1	34.3	9.3	19.0	22.2	0.081	30.3	25.6	39.1	22.4	0.251

表–4　草本植物の根系を含む土供試体の強度定数（c・ϕ）の評価
Table 4　Evaluation of the strength parameter (c and ϕ) of the soil specimens including the herbaceous plants and the root system

		クリーピングレッドフェスク		クサヨシ	
育苗箱［タイプ］	覆土厚（cm）	粘着力 c（kN/m²）	せん断抵抗角 ϕ（°）	粘着力 c（kN/m²）	せん断抵抗角 ϕ（°）
ブランク	—	1.1	27.3	1.1	27.3
標準型	0.0	—	—	—	—
	0.1	2.7	28.0	3.6	28.4
	0.5	2.4	27.6	3.6	28.4
	1.0	2.3	27.5	3.2	28.4
	1.5	1.5	27.5	3.5	27.7
	2.0	1.2	27.6	3.0	28.0
過密型	0.1	3.0	27.7	3.8	27.8

過密型（覆土厚 0.1 cm）では，標準型と比較して発芽率が低く，クリーピングレッドフェスクで 34.3%，クサヨシでも 30.3% であり，発生本数は標準型（覆土厚 0.1 cm）の場合と大きな差はみられなかった。また，草丈・乾物重（茎葉部）も標準型ほど良好に生育していなかった（表–3）。

吉田・久野[30]は，芝草の初期の生長とその密度効果に関する研究の中で，播種量が増加するほど発芽時の水分競合により発芽率が低下すると報告している。今回，過密型における 2 種類の草本植物の生長が抑制され，標準型の場合と同程度以下と評価された原因を考える上で，今後は発芽時の水分環境などもあわせて検討していく必要があろう。

3.2　草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性

標準型 12 パターンのうち覆土厚 0.1～2.0 cm を有する 2 種類・10 パターンの土供試体について，草本植物の根系を含む土供試体の一面せん断試験を実施した（表–4）。その結果，クリーピングレッドフェスク・クサヨシとも粘着力 c のみが大きく増加し，せん断抵抗角 ϕ に大きな差はみられなかった。

クリーピングレッドフェスクでは，粘着力 c が 1.2～2.7 kN/m²，せん断抵抗角 ϕ が 27.5～28.0° であり，クサヨシでは，粘着力 c が 3.0～3.6 kN/m²，せん断抵抗角 ϕ が 27.7～28.4° であった。このように，土供試体に草本植物の根系が含まれることにより，根系を含まない土供試体（ブランク）の粘着力 c_{blank}（1.1 kN/m²）と比較してクリーピングレッドフェスクで最大 2.5 倍，クサヨシでは最大 3.3 倍にも増大していた（表–4）。

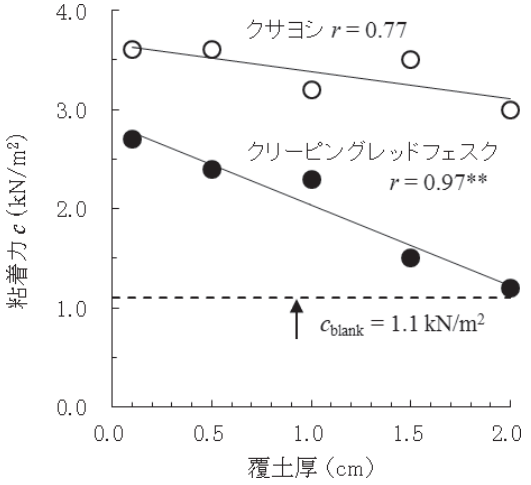
過密型（覆土厚 0.1 cm）2 種類・2 パターンのせん断特性をみると，クリーピングレッドフェスクの粘着力 c は 3.0 kN/m²，せん断抵抗角 ϕ は 27.7° であり，標準型（覆土厚 0.1 cm）の場合とほぼ同程度の値であった。一方，クサヨシの粘着力 c は 3.8 kN/m²，せん断抵抗角 ϕ は 27.8° であり，標準型（覆土厚 0.1～0.5 cm）の場合とほぼ類似した値を示していた（表–4）。今回の結果から，期待発生本数以上の量を播種したとしても土供試体の強度定数は必ずしも増加していなかった。

3.3　草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c と覆土厚との関係

図–3 は，表–4 に示した値の一部を用いて，クリーピングレッドフェスク・クサヨシの根系を含む土供試体の粘着力 c と覆土厚（0.1～2.0 cm）との関係に注目して示したものである。

このとき，2 種類の草本植物ともに覆土厚が厚くなると粘着力 c は小さくなる傾向にあった。しかし，クサヨシは覆土厚にかかわらず粘着力 c はあまり低下していない一方，クリーピングレッドフェスクでは覆土厚が厚くなると粘着力 c は大きく低下していることがわかる。

2 種類の草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c を覆土厚ごとに比較すると，クサヨシの方がつねに大きい値を示し



図–3　草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c と覆土厚との関係

Fig. 3　Relationship between the cohesion, c of the soil specimens including roots of herbaceous plants and the soil cover thickness

ていた。とりわけ覆土厚 0.1～2.0 cm 間で粘着力 c の大きさを比較すると，クサヨシにおける覆土厚 2.0 cm の粘着力 c（3.0 kN/m²）は，クリーピングレッドフェスクにおける覆土厚 0.1 cm の粘着力 c（2.7 kN/m²）よりも大きい値を示していた（図–3）。

つぎに，クサヨシでは覆土厚 1.5 cm における粘着力 c（3.5 kN/m²）の方が，覆土厚 1.0 cm の粘着力 c（3.2 kN/m²）よりも大きい値を示しており，粘着力 c と覆土厚との関係が逆転していた。覆土厚の異なる土供試体では，せん断される根系の鉛直方向の位置も異なる。つまり，せん断される根系の形状や密度が土供試体のせん断強度に関係していることが考えられる（図–3）。

ここで注目されるのは，覆土厚の増加に伴うクリーピングレッドフェスク根系を含む土供試体の粘着力 c の低下傾向である。覆土厚 1.0 cm 以下の場合，粘着力 c は 2.3～2.7 kN/m² と比較的大きな値を示していた。しかし，覆土厚 1.5 cm 以上の場合には粘着力 c は 1.2～1.5 kN/m² となり，根系を含まない土供試体（ブランク）の粘着力 c_{blank}（1.1 kN/m²）と同程度の粘着力しか発揮できていない（図–3）。

日本法面緑化技術協会[16]によれば，期待発生本数を基準として播種量を考えるとき，クリーピングレッドフェスク種子の発芽可能な覆土厚（有効深さ）は 2.0 cm としている。しかし，この実験圃場のある北海道十勝地域中部における施工適期（施工限界期：ここでは 8 月下旬）を考慮して播種した場合，冬期を迎えるまでの間に土層の緊縛力などが期待できる覆土厚は 2.0 cm よりも薄く，実際のところ覆土厚 1.0 cm 程度と考えることが妥当あろう。

4. 考　察

4.1　草本植物の生育が土供試体の強度特性に及ぼす影響

標準型 12 パターンのうち，覆土厚 0.1～2.0 cm を有する 2 種類・10 パターンの育苗箱について草本植物の茎葉部を覆土厚との関係で評価した（表–3）。

覆土厚が 0.1 cm 以上の場合，2 種類の草本植物ともに覆土厚が厚くなるにつれて発芽率は低下し，草丈は短くなり，乾物重（茎葉部）は軽くなる傾向がおおむね認められた。根長密度・乾物重（根系）を指標とした場合も覆土厚との間に同様の傾向がみられた。

このとき，クリーピングレッドフェスクでは覆土厚が 0.1～1.0 cm と薄い場合のみ茎葉部・根系が良好に生育していた。一方，クサヨシの場合，覆土厚の違いにかかわらず茎葉部・根系の生育は良好であった。こうした 2 種類の草本植物の生育状況と覆土厚との関係は，3.3 に前述した草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c と覆土厚との関係　（図–3）と同様の傾向を示した。換言すれば，播種時における覆土厚が薄いと草本植物の生長が良好となり根系も発達する。このことが土層のせん断特性にも影響を及ぼしていた。

さらに，草本植物の根系に着目すると（表–3），クリーピングレッドフェスク・クサヨシともに根長密度と覆土厚との間には負の相関関係がみられ，粘着力 c と根長密度との間には正の相関関係が認められた（図–4，図–5）。すなわち，草本植物の根系を含む土供試体内のせん断特性と覆土厚との関係を評価する上で，根長密度は重要な要素の 1 つであった。

4.2　地域性種苗（クサヨシ）の植生工への適用

北海道東部は積雪寒冷地の中でもとりわけ寒冷・少雪の気候を呈する地域であり，冬期間から翌春に至るまでの間には土壌凍結・凍上・融解などの現象に起因して切土法面にはさまざまな被害が頻発している。よって，植生工の施工後から冬期間を迎えるまでの間，できるだけ早期かつ確実に草本植物を法面に定着させる技術・施工管理等が求められる。

3.3 でも前述したように，北海道における植生工の施工適期を考慮して 2 種類の草本植物を生育させたとき，クサヨシはクリーピングレッドフェスクよりも生育が良好であった。また，覆土厚の違いにかかわらず，クサヨシの根系を含む土供試体の粘着力 c は大きいことが確認できた。法面保全の視点から考えると，客土種子吹付工に用いる草本植物の 1 種類としてクサヨシを適用することは有効であろう。

しかし，外来草本植物と比較して地域性種苗としてのクサヨシの種子は顕著に高価である。加えて，播種工などに草本植物として仕様規定された場合，広範囲の法面施工現場の需要に対応可能な種子量の安定的確保などが今後の検討課題としてあげられる。よって，地域性種苗であるクサヨシは，自然公園などの生物多様性や生態系保全の重要度が高い地域やその周辺における法面施工現場で優先的かつ積極的に適用していくべきである。さらに，クサヨシは植生工に用いられる一般的な外来草本植物と比較して生存年限が長いという特徴がある。このため，上記以外の地域・場所であっても，植生工などに少量配合される 1 種類（補完的構成種）として仕様化に向けた道を開くなど，地域性種苗“クサヨシ”の植生工への適用可能性に関する議論を深めていく必要がある。

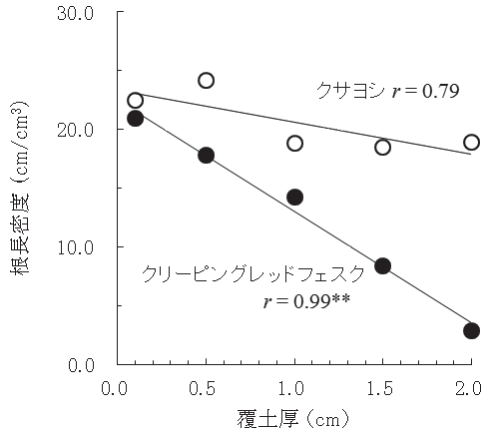


図-4　草本植物の根系を含む土供試体の根長密度と覆土厚との関係

Fig. 4　Relationship between the root length density of the soil specimens including roots of herbaceous plants and the soil cover thickness

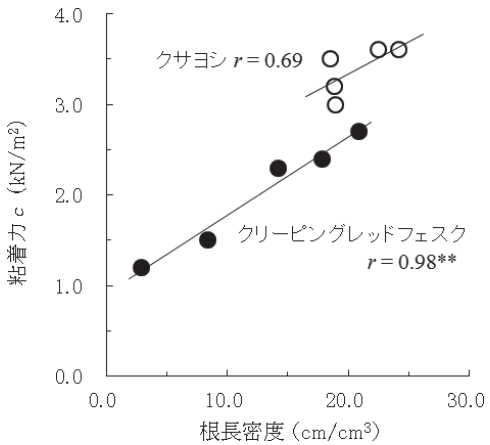


図-5　草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c と根長密度との関係

Fig. 5　Relationship between the cohesion, c and the root length density of the soil specimens including roots of herbaceous plants

4.3　土層に含まれる根系の力学的役割と今後の課題

一面せん断試験が実施された土供試体内の根系を取り出して根長密度・乾物重（根系）を測定する前に，土供試体内の根系の形状を目視で観察した。さらに，育苗箱内に残存した根系を取り出して根系全体の形状も観察・確認した。ここでは，土層の力学的特性に作用する根系の果たす役割について検討を加える。

クリーピングレッドフェスク・クサヨシはともに単子葉植物であり，ひげ根型根系を持つとされている[13]。目視による観察の結果，根系のうち“種子根・節根”（以降，主として節根）の発達が顕著であり，せん断面（地表面下 3 cm）付近では主として鉛直下方（せん断面に対して垂直方向）に多数伸長していた。一方，種子根・節根から発生する“側根”はあまり発達しておらず，細く短い 1 次側根が多くみられた。このため，株と株（根系同士）が相互に絡み合ったり，同じ株内における節根同士，側根同士，あるいは節根と側根とが相互に絡み合ったりする状態はあまり確認できなかった。

今回の実験結果では，土供試体に草本植物の根系を含むことで粘着力 c のみが増大した。これは土供試体 （せん断面）に対して種子根・節根が比較的均一な間隔で鉛直方向に複数本含まれることによって土塊の構造が変化し，せん断面に対して土の補強効果がもたらされたと考えられる。一方，草本植物の種類，覆土厚の違いはもとより，土供試体内の根系の有無にかかわらず，土供試体のせん断抵抗角 ϕ に大きな変化は認められなかった。同時に，今回の実験の中でこの理由を明らかにすることはできなかった。

一般に，根系の発達過程において，側根は数や長さで多くを占めて根系の形成に大きな役割を果たすとされている[13]。今回の実験における草本植物の生育期間は 8 月下旬から 10 月下旬までの 71 日間であった。今後は北海道における植生工の施工適期の再検討も視野に入れて，草本植物の播種時期を早めたり，越年（越冬）させて草本植物を経年的に生育させたりするなど，より長い生育期間を通じて発達した根系を含む土層のせん断特性に関する討議を加える必要がある。こうして草本植物の種子根・節根のみならず側根の発達に伴い土層全体の根系形成に及ぼす影響を検討することを通じて，せん断抵抗角 ϕ の変化に関する有用な情報を得ることが期待できる[12]。

図-2 に示すように，土供試体の強度特性のうち粘着力 c は垂直応力 σ が小さい場合に大きく影響する。一方，せん断抵抗角 ϕ は垂直応力 σ が大きいほどより大きな影響を及ぼす。

実際の問題として，客土種子吹付工が施工される法面基盤には大きな垂直応力 σ を想定していないため，法面表層への補強効果としては粘着力 c の大きさが有効である。 しかし，積雪寒冷地では冬期間になると法面上に積雪が荷重として作用するため，垂直応力 σ が大きい場合を想定した法面表層の補強効果も考える必要がある。このとき，せん断抵抗角 ϕ を増大させる技術的な方法に関する検討が急務の課題である。

今回の研究では，屋外（実験圃場）において育苗箱を平地に設置した状態で草本植物を生育させ，根系を含む土供試体の一面せん断試験を実施した。しかし，実際には法面（斜面）に生育した草本植物の根系を含む土層のせん断特性を評価する必要がある。

この実験で想定した吹付け客土と基盤土との境界面（せん断面，地表面下 3 cm）に対して根系（主に節根）が鉛直下方に伸長すれば，斜面表層崩壊を抑制するための土層の補強効果は高まる。しかし，実際の法面では両者の間に角度が生じる。こうした物理的環境の違いが土層のせん断特性に及ぼす影響を検証することが今後の重要な課題の 1 つとなる。さらに，法面方位の違いにより水文・気象・地盤環境も大きく異なるため，草本植物の生育に影響を及ぼすことが予想される。このことが草本植物の根系の伸長（ひいては土供試体のせん断特性）にも影響を及ぼすため，今後の研究では草本植物の根系を含む土層のせん断特性に及ぼす法面方位の影響についても検証する必要がある。

5. おわりに

この研究では，客土種子吹付工を想定して作製された土供試体の一面せん断試験を実施した結果，外来草本植物（クリーピングレッドフェスク）と地域性種苗（クサヨシ）の根系を含む土供試体のせん断特性と覆土厚との関係について若干の知見が得られた。土層中に草本植物の根系を含むことにより，強度定数のうち粘着力 c のみが増大する。このとき，クリーピングレッドフェスク根系を含む土層の緊縛力が期待できる覆土厚は 1.0 cm 程度が妥当である。一方，クサヨシは覆土厚（0.1～2.0 cm）にかかわらず法面保全上の効果が高く，今後の北海道における植生工への適用可能性が示唆された。

著者らは，2002～2005 年にかけてトールフェスク根系を含む土供試体のせん断特性に関する一連の研究を実施する中で多くのデータを蓄積してきた[12]。しかし，2005 年に施行された「外来生物法」により，トールフェスクが「要注意外来生物リスト」に記載されて以降，北海道の植生工では周辺自然環境への影響を危惧してトールフェスクの使用を控える傾向が続いた。このため，上記の研究成果を正式な形で学術誌に公表する機会を失ったまま現在に至っている[12]。

2015 年 3 月には「生態系被害防止外来種リスト」が新たに施行され，限定的ではあるものの積雪寒冷地の北海道でもトールフェスクの再使用に向けた可能性と期待は高まりつつある。しかし，北海道の行政諸機関ではこうした議論がいまだ緒についた段階である。トールフェスクは長年の間，急速な法面緑化に使用されてきた外来草本植物であるが，周辺環境への影響や法面に定着後の生存年限などに関する技術的検証・評価はあまり進んでおらず，再使用に向けて検討すべき課題も多い。

著者らは，トールフェスクに関する一連の成果を整理する中で，今回の知見をさらに進展させ，草本植物の種類・生育期間などの異なるさまざまなケーススタディの積み重ねを通じて，土層のせん断特性に果たす草本植物の根系の役割に関する有用な情報を蓄積・公表していく予定である。

引 用 文 献

1）阿部和時（1984）樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果，緑化工技術，10(3): 1–9.
2）阿部和時（1996）原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究，日本緑化工学会誌，22(2): 95–108.
3）阿部和時（1997）樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究, 森林総合研究所研究報告, 373: 105–181.
4）Abe, K. and Iwamoto, M. (1986) An evaluation of tree-roots effect on slope stability by tree root strength, J. Jpn. For. Soc. 68(12): 505–510.
5）Abe, K. and Ziemer, R.R. (1991) Effect of tree roots on a shear zone: modering reinforced shear stress, Can. J. For. Res. 21: 1012–1019.
6）遠藤泰造・鶴田武雄（1968）樹木の根が土のせん断強さにあたえる作用（第 1 報），林業試験場北海道支場年報: 167–182.
7）Gray, D.H. and Megahan, W.F. (1981) Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith, USDA, For. Serv Res. Pap. Int-271: 11–19.
8）北海道開発局道路建設課・土木試験所ほか関係開発建設部（1969）植生のり面保護工の施工適期に関する調査について，第 13 回（昭和 44 年度）北海道開発局技術研究発表会論文集：77–89.
9）福田尚人（2007）北海道の自生種導入事例と今後の課題，日本緑化工学会誌，32(3): 415–420.
10）環境庁自然保護局監修（1982）自然公園における法面緑化基準の解説，道路緑化保全協会，pp. 118–126.
11）小橋澄治（1983）：斜面安定に及ぼす根系の影響についての最近の知見，緑化工技術，10(1): 14–19.
12）宗岡寿美（2006）寒冷少雪地域における斜面保全と緑化工技術の問題点，日本緑化工学会誌，31(4): 429–430.
13）根の事典編集委員会［編］(1998) 根の事典，朝倉書店，pp. 76–82, pp. 87–89.
14）日本道路協会（1999）道路土工―のり面工・斜面安定工指針，pp. 233–245.
15）日本道路協会 (2009) 道路土工―切土工・斜面安定工指針，pp. 222–256.
16）日本法面緑化技術協会編（2005）のり面緑化技術―厚層基材吹付工―，山海堂，pp. 52–53.
17）農業土木事業協会（1990）のり面保護工―設計・施工の手引き―，農山漁村文化協会，pp. 113–122.
18）O'Loughlin, C.L. (1974) A study of root strength following clear-felling, Can. J. For. Res. 4: 107–113.
19）O'Loughlin, C.L. and Ziemer, R.R. (1982) The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests, Proceedings of IUFRO Workshop, P.I. 07–00 Ecology of Subalpine Zones, Corvallis, OR: 70–78.
20）佐々木晴美 (1980) 寒冷地ののり面保護工，土木技術資料，22(8): 18–23.
21）杉山太宏・大塚泰洋・福田耕司・赤石　勝（2003）樹木根系の引張り強度特性と法面補強効果に関する一考察，地盤工学会誌（土と基礎），51(11): 53–55.
22）植物栄養実験法編集委員会編（1990）植物栄養実験法，博友社，120–121.
23）塚本良則（1987）森林の崩壊防止機能に関する研究，東京農工大学演習林報告，23: 65–124.
24）塚本良則（1991）森林は斜面崩壊の抑止にどれだけ役立っているか，森林科学，3: 45–51.
25）塚本良則・峰松浩彦・藤浪武史（1986）樹木根系の斜面安定効果―主として水平根の量と働きについて―，緑化工技術，12(1): 11–20.
26）塚本良則・峰松浩彦・城戸　毅・小宮山浩司（1984）斜面の基盤構造と樹木の斜面安定効果，緑化工技術，11(1): 1–7.
27）Wu, T.H., Beal, P.E. and Lan, C. (1988) In-situ shear test of soil-root system, J. Geotech. Eng. 114(12): 1376–1394.
28）Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T. and Beal, P.E. (1988) Study of soil-root interaction, J. Geotech. Eng. 114(12): 1351–1375.
29）矢田部龍一・八木則男・須賀幸一・榎　明潔（2001）根系による土の補強効果と斜面安定への寄与，第 4 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集：197–200.
30）吉田博宣・久野　武（1966）芝草の初期の生長とその密度効果，造園雑誌，30(4): 29–35.

（2017 年 2 月 14 日　受理）