

10 種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性

宗岡寿美^{*1)}・下田誠也²⁾・山崎由理³⁾・木村賢人¹⁾・辻 修¹⁾

1) 帯広畜産大学 Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

2) 帯広畜産大学 Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

(現:北海道オホーツク総合振興局 Hokkaido Government Okhotsk General Subprefectural Bureau)

3) 岩手大学大学院連合農学研究科 The United Graduate School of Agriculture, Iwate University

(現:東京農業大学地域環境科学部 Faculty of Regional Environmental Science, Tokyo University of Agriculture)

摘要: 客土種子吹付工を想定して作製された 10 種類の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。土供試体内に根系を含むことにより 10 種類とも粘着力 c が増大し、3 種類ではせん断抵抗角 ϕ が増大した。土供試体内に根系を含むことによる粘着力 c の増加量 Δc がブランク値 c_{blank} よりも大きい 5 種類では、茎葉部の良好な生育に伴い根系の発達も顕著であった。一方、せん断抵抗角 ϕ (の増加量 $\Delta \phi$) が最大であった PRG は多くの茎葉部・根系指標で最大値を示し、生育本数の少ない RCG・HF では土供試体中の株数当たりの根系指標が大きいなど、こうした根系指標がせん断抵抗角 ϕ に影響している可能性が示唆された。

キーワード: 草本植物, 一面せん断試験, 粘着力 c , せん断抵抗角 ϕ , 根長, 乾物重 (根系)

MUNEOKA, Toshimi, SHIMODA, Seiya, YAMAZAKI, Yuri, KIMURA, Masato and TSUJI, Osamu: **Shear characteristics on soil specimen including roots of 10 types of herbaceous plants.**

Abstract: Direct shear tests were made on soil specimen including ten types of herbaceous roots for the soil dressing seed spraying engineering. Ten types of herbaceous roots led to increase the c values and three led to increase the ϕ values. The Δc (c value increases) of MF, TF(N), RCG, TF(D) and ChF showed larger than the c_{blank} (c values of soil). Leaves and stems well grew with rich root system development of these five types of plants. Meanwhile, PRG showed the largest ϕ values of three types (PRG, RCG and HF) whose the ϕ values increased. Also, PRG had the largest values of dry weight of root and shoot and root length of all plants. Although the number of growers of RCG and HF was small, root dry weight per plant showed large values. Development of herbaceous root system appears to increase not only the c values but also the ϕ values of the soil specimen.

Key words: herbaceous plant, direct share test, cohesion c , angle of shear resistance ϕ , root length, root dry weight

1. はじめに

法面緑化のための植生工 (とくに播種工) は、景観・自然保護のみならず、茎葉部の被覆による表土 (客土) 保持・侵食抑制、根系の緊縛力による土壌補強効果が期待される²⁾。とりわけ積雪寒冷地の北海道では、播種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 (境界面) 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¹⁰⁾。よって、播種工を実施するには、草本植物の根系が十分に伸長できる生育期間を確保する立場から「施工限界期」を考慮することが法面保全上有効な対策の 1 つとなる⁵⁾。

一般に、北海道で播種工を実施するとき、トールフェスク

(*Festuca arundinacea* Schreb.), ケンタッキーブルーグラス (*Poa pratensis* 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使用されてきた³⁾。2005 年の「外来生物法」施行後はトールフェスクの代替種としてハードフェスク (*Festuca longifolia* Thuill.) が使用されており、上記 4 種類以外でもたとえばホワイトクローバー (*Trifolium repens* L.) などが使用された事例も一部に見受けられる¹⁰⁾。

近年、北海道の播種工において仕様規定されてきた上記の外来草本植物と比較検討される形でハードフェスクに関する生育情報が収集・評価されてきた^{11,13)}。しかし、草本植物の根系を含む土層の力学的特性に関する調査研究はいまだ緒についた段階であろう^{2,3,5)}。

他方、法面緑化工以外の各種土木工事はもとより、公園・

* 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

庭園・ゴルフ場など多くの需要に応じて、寒冷地でも外来草本植物が使用されている。このため、緑化工の技術の見地から北海道における植生工（播種工）の地域ルールづくりを考えると、仕様に規定する草本植物の種類や混播のあり方などを検証する中で、草本植物の生育特性（ひいては根系を含む土層の力学的性質）に関する基礎的情報を広く収集していく必要がある。

この研究では、法面基盤土と吹付け客土との境界面付近の比較的含水状態が高い表層土を想定し、北海道における播種工（客土種子吹付工）に適用可能な10種類の草本植物を選定して、根系を含む土供試体の一面せん断試験を実施した。さらに、対象植物の根系を含む土層の強度定数（粘着力 c ・せん断抵抗角 ϕ ）を生育1年目の茎葉部・根系の生育状況と比較検証することにより、積雪寒冷地における施工初年度の法面表層（浅層）の土壌補強効果と根系の役割に関する基礎的な検討を加えた。

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・販売された黒土（以降、緑化用客土）について、自然含水比（98.4%）の状態での4.75mmふるいを通過させたものを使用した⁸⁾。この緑化用客土を空気乾燥してから2mmふるい（一部は0.425mmふるい）を通過させた後、各種土質試験を実施した。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（II型、VH₂）に分類された³⁾。

2.1.2 草本植物（種子）

この実験には、北海道の播種工で仕様規定されているケンタッキーブルーグラス、クリーピングレッドフェスクおよびハードフェスク、旧仕様であるトールフェスクの普通種・改良種のイネ科植物5種類およびホワイトクローバー（マメ科植物）1種類を選定した。また、上記以外で寒冷地法面に適用可能性が高いと考えられるメドウフェスク（*Festuca pratensis* Huds.）、ペレニアルライグラス（*Lolium perenne* L.）およびチューイングフェスク（*Festuca rubra* var. *commutata* Gaud.）のイネ科植物3種類も比較対象とした。さらに、上記9種類の外来草本植物のみならず、地域性種苗クサヨシ（イネ科植物、英名リードカナリーグラス *Phalaris arundinacea* L.）を加えた合計10種類の草本植物を使用した（略称表記、表-1）。一般にクサヨシは和名であるが、この研究では過去に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リードカナリーグラスと区別して表記するため、地域性種苗としての和名“クサヨシ”を併記した⁵⁾。

この実験では、発生期待本数を2,500本/m²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⁷⁾。

2.1.3 肥料

この実験には、播種工で規定された施肥量を参考にして、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10kg/100m²の割合で施用した^{8,9)}。

2.1.4 育苗箱

この実験には縦34.0cm×横49.0cm×高さ10.0cm（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2.0mm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準拠した。

2.2 実験方法

2.2.1 緑化用客土の調整

調整時における緑化用客土の乾燥密度が一定となるように合計12箱の育苗箱に3層（下層から上層にかけて厚さ4cm，3cmおよび3cm）に分けて同一条件で充てんした（図-1）。このとき、すべての育苗箱には上層3cmに充てんする緑化用客土に高度化成肥料を10kg/100m²（17.0g/箱）の割合で施用した^{8,9)}。

なお、育苗箱内に充てんするときの緑化用客土（自然含水

表-1 10種類の草本植物

Table 1 10 types of herbaceous plants

種類	略称	備考
ケンタッキーブルーグラス	KBG	イネ科 単子葉植物 外来種
クリーピングレッドフェスク	CRF	イネ科 単子葉植物 外来種
ハードフェスク	HF	イネ科 単子葉植物 外来種
トールフェスク（普通種）	TF(N)	イネ科 単子葉植物 外来種
トールフェスク（改良種）	TF(D)	イネ科 単子葉植物 外来種
ホワイトクローバー	WC	マメ科 双子葉植物 外来種
メドウフェスク	MF	イネ科 単子葉植物 外来種
ペレニアルライグラス	PRG	イネ科 単子葉植物 外来種
チューイングフェスク	ChF	イネ科 単子葉植物 外来種
クサヨシ （リードカナリーグラス）	RCG	イネ科 単子葉植物 地域性種苗 :北海道原産

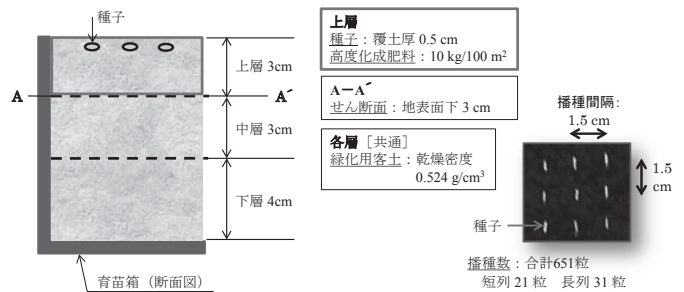


図-1 実験用の育苗箱，緑化用客土の充てん方法および播種
Fig.1 Filling of the additional soil for greening and seeding for the nursery box

比 98.4%) 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 cm³) を用いて突固めたときの乾燥密度 (0.698 g/cm³) の 75% (0.524 g/cm³) を調整時の乾燥密度として十分条件的に担保した^{3,5)}。

2.2.2 播種・生育方法

これら 12 箱の育苗箱のうち、10 箱には覆土厚 0.5 cm となるようにそれぞれ 1 箱ずつ 10 種類の草本植物の種子を一定の密度 (発生期待本数 2,500 本/m² (1.5 cm 間隔)⁷⁾) で均一に点播した (図-1)。以上の 10 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 2 箱作製した。

この実験では十勝地域における植生工の施工適期 (施工限界期: ここでは 8 月中旬¹⁰⁾) を参考にして、これら 12 箱の育苗箱を帯広畜産大学構内の実験圃場 (平地) に移植し、2017 年 8 月 11 日~10 月 22 日の 73 日間、自然条件下で 10 種類の草本植物を生育させた (写真-1(a)~(j))。

生育期間中、10 種類の草本植物の生育本数および草丈を合計 5 回測定した。ここで、あらかじめ任意に設定しておいた育苗箱内の短辺 3 列分 (最大 63 本分) で草丈をそれぞれ 1 mm 単位まで測定し、その平均値を測定値とした。同年 10 月 22 日にはすべての育苗箱を実験室内へ搬入し、翌 10 月 23 日に生育本数・草丈を最終測定した。その後、育苗箱の真上から写真を撮影し、その画像をもとに植被率を算出した。ここで茎葉部を刈り取り、80 °C 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¹²⁾。また、実験圃場近傍では気象官署に準じた条件で気象データを連続測定した (表-2)。

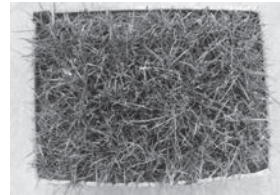
2.2.3 土供試体の作製および一面せん断試験

茎葉部の刈取り後、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 (図-1, A-A' 面) がせん断面となるように、地表面下 2~4 cm の部分を不攪乱状態で直径 6.0 cm × 高さ 2.0 cm の円柱形 (56.5 cm³) に採取した。以降、こうした円柱形の土塊を「土供試体」とよぶ。

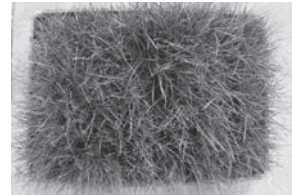
上記の方法で作製された合計 12 箱 (12 パターン) の土供試体を乱さないようにせん断箱に挿入し、土の定圧一面せん断試験を実施した。せん断変位速度を 0.20 mm/min とし、

せん断変位が 7.0 mm を超えるところまで試験を継続した。この実験では、各育苗箱から 4 個の土供試体を採取し、土供試体内の含水比・根系指標はすべて 4 供試体の平均値で表記した。なお、試験時における土供試体の乾燥密度 (平均値) は 2 つのブランクで 0.515~0.524 g/cm³、草本植物の根系を含む 10 種類の土供試体では 0.522~0.566 g/cm³ であった。

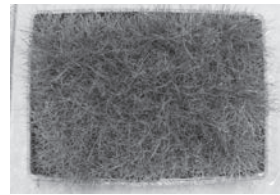
(a)KBG 植被率 41.0 %



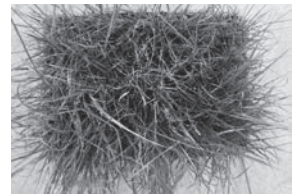
(b)CRF 植被率 96.7 %



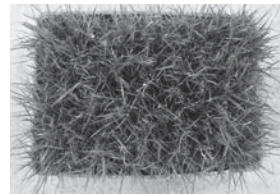
(c)HF 植被率 95.4 %



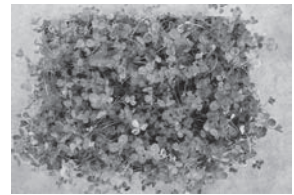
(d)TF(N) 植被率 77.1 %



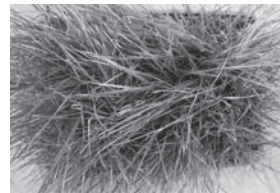
(e)TF(D) 植被率 88.0 %



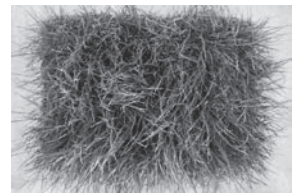
(f)WC 植被率 91.8 %



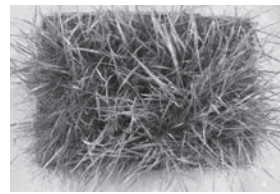
(g)MF 植被率 86.3 %



(h)PRG 植被率 78.4 %



(i)ChF 植被率 90.0 %



(j)RCG 植被率 88.8 %



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

2017年	積算温度 (°C·days)	降水量 (mm)	全日射量 (MJ/m ²)	日照時間 (h)	蒸発量 (mm)
8月 中旬	168.9	12.5	92.0	12.6	6.0
下旬	213.2	28.5	135.6	40.1	11.0
9月 上旬	172.3	7.5	158.3	60.6	21.3
中旬	152.5	158.5	97.0	33.8	1.2
下旬	132.3	20.5	95.7	48.3	6.9
10月 上旬	120.3	1.5	94.4	0.0	9.0
中旬	61.0	34.0	93.5	9.0	11.0
21~22日	19.8	17.0	8.7	0.1	0.0
合計値	1040.3	280.0	775.2	204.5	66.4

写真-1 10 種類の草本植物の生育状況 (2017 年 10 月 23 日)

Photo-1 Growing condition of the 10 herbaceous plants in 23rd October 2017

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 12 パターンの土供試体の一面せん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 $c \cdot \phi$ が求められる（図-2、式(1)）。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{1}$$

このとき、 τ はせん断応力 (kN/m^2)、 c は粘着力 (kN/m^2)、 σ は垂直応力 (kN/m^2)、 ϕ はせん断抵抗角 ($^\circ$) 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り、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力学的要因にもとづく成分である。

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それぞれ 4 回とし、そのときの垂直応力 σ を 2.5 kN/m^2 、 5.0 kN/m^2 、 7.5 kN/m^2 および 10.0 kN/m^2 とした。このように、一定の基準で実施された 12 パターンの実験結果から強度定数 ($c \cdot \phi$) をそれぞれ算出した。

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（WC では主根）と側根とを可能な限り目視によって分離し、それぞれの根長を 1 mm 単位まで測定した。その後、 80°C で 72 時間通風乾燥させたときの乾物重（根系）を測定した¹²⁾。

3. 結果

今回の実験結果をもとに、10 箱（10 パターン）の育苗箱内で生育された 10 種類の草本植物の茎葉部および一面せん断試験後に実施した根系の評価結果を表-3 に示す。また、12 箱（12 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 4 供試体の平均含水比とともに表-4 に示す。

3.1 草本植物における茎葉部・根系の評価

10 種類（10 パターン）の育苗箱で生育した草本植物の茎葉部のうち（表-3）、生育本数（最終）は 249~598 本、草丈（最終）は

8.2~26.0 cm、乾物重（茎葉部）は 19.6~75.1 g/箱の範囲にあり、生育状況に大きな差がみられた。このとき、上記の茎葉部 3 指標のうち 2 指標以上が 10 種類中 1~5 番目に大きな値を示す草本植物は TF(N)・TF(D)・MF・PRG・RCG の 5 種類であった。一方、植被率（最終）は 41.0~96.7% の範囲にあり、KBG（41.0%）を除いて大差はみられなかった（写真-1(a)~(j)）。

一面せん断試験後の土供試体内の根系をみると（表-3）、根長は 232.0~1,209.4 cm、乾物重（根系）では 0.079~0.603 g/供試体の範囲にあり、いずれも大きな差がみられた。この根系 2 指標が 10 種類中 1~5 番目となる草本植物は MF・PRG・ChF の 3 種類であり、根系 1 指標のみが 1~5 番目となる草本植物は TF(N)・TF(D)・RCG・HF の 4 種類であった。

このように、10 種類の草本植物の播種数はもとより、緑化用客土の含水比・乾燥密度、施肥量、育苗箱の設置条件、生育日数および水文・気象環境など多くの同一条件で生育させたにもかかわらず、草本植物の種類によって茎葉部・根系の生育状況は大きく異なることが確認された。

3.2 土供試体の平均含水比

はじめに、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体および根系を含まない土供試体 1 箱（ブランク①）の合計 11 パターンの一面せん断試験を実施した（表-4）。

一面せん断試験後の土供試体内の平均含水比はブランク①で 102.6%、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体では 86.3~99.6% であった。既往の研究結果³⁾よりこの緑化用客土は含水比の違いにより強度定数 ($c \cdot \phi$) も大きく異なる。そこで、もう 1 箱のブランク（ブランク②）を含水比調整した後に一面せん断試験を実施すると、平均含水比は 92.6% となった。この結果、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体の平均含水比は、ブランク①（平均含水比 102.6%）に 3 種類（KBG・HF・WC、96.1~99.6%）が近似し、ブランク②（平均含水比 92.6%）には 7 種類（CRF・TF(N)・TF(D)・MF・PRG・ChF・RCG、86.3~93.6%）が近似した。

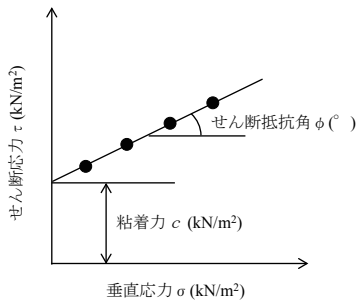


図-2 クーロンの破壊規準
Fig.2 Coulomb's failure criterion

表-3 草本植物の茎葉部および根系の生育状況

Table 3 Growing condition of leaves, stems and roots of the herbaceous plants

	茎葉部				根系			
	生育本数* (本)	草丈* (cm)	乾物重 (g/箱)	植被率* (%)	根長 (cm)	種子根・節根長**	側根長	乾物重 (g/供試体)
KBG	432	8.2	19.6	41.0	459.7	203.1	256.6	0.079
HF	338	8.7	30.9	95.4	798.8	366.6	432.2	0.238
WC	574	11.6	38.5	91.8	232.0	51.3	180.7	0.204
CRF	501	11.7	46.9	96.7	680.1	283.0	397.1	0.211
TF(N)	448	24.8	70.4	77.1	871.9	361.9	510.0	0.300
TF(D)	598	12.2	58.6	88.0	669.7	421.8	247.9	0.415
MF	528	26.0	66.5	86.3	1,209.4	527.3	682.1	0.384
PRG	539	16.9	75.1	78.4	952.9	578.6	374.3	0.603
ChF	395	16.8	49.3	90.0	1,052.4	497.2	555.2	0.407
RCG	249	24.9	62.9	88.8	656.7	222.9	433.8	0.364

*2017年10月23日（最終測定値）

**WCでは、主根長

3.3 草本植物の根系を含む土供試体の強度定数の評価

一面せん断試験の結果、ブランク①、ブランク②の強度定数はそれぞれ、粘着力 c で 1.00 kN/m^2 , 0.85 kN/m^2 , せん断抵抗角 ϕ では 21.7° , 24.3° であった。一方、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体の強度定数は、粘着力 c で $1.39 \sim 2.04 \text{ kN/m}^2$, せん断抵抗角 ϕ では $21.8 \sim 30.0^\circ$ の範囲にあった。いま、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体について、平均含水比が近似するブランク①・ブランク②の値とそれぞれ比較すると、10 種類ともに粘着力 c が増大し、このうち 3 種類ではせん断抵抗角 ϕ も増大した (表-4)。

草本植物の根系を含まない土供試体 (ブランク) の粘着力・せん断抵抗角をそれぞれ c_{blank} ・ ϕ_{blank} と表現すると、土供試体に草本植物の根系を含むことによる強度定数の増加量はそれぞれ $\Delta c (= c - c_{\text{blank}})$ ・ $\Delta \phi (= \phi - \phi_{\text{blank}})$ と表現することができる。

このとき、土供試体に草本植物の根系を含むことにより、粘着力 c の増加量 Δc は $0.39 \sim 1.19 \text{ kN/m}^2$ の範囲にあった。とくに、MF (1.19 kN/m^2)、TF(N)・RCG (1.13 kN/m^2)、TF(D) (0.98 kN/m^2) および ChF (0.88 kN/m^2) の 5 種類では平均含水比が近似するブランク値 (c_{blank}) よりも Δc 値の方が大きい値を示した。せん断抵抗角 ϕ の増加量 $\Delta \phi$ ($-0.2 \sim 5.7^\circ$) は PRG (5.7°)、RCG (2.4°) および HF (1.7°) の 3 種類において 1.0° 以上増大していた (表-4)。

4. 考察

4.1 草本植物の根系指標が土供試体の強度定数に及ぼす影響

合計 12 箱 (12 パターン) の育苗箱を対象として、草本植物の根系を含む土供試体の強度定数 ($c \cdot \phi$) を茎葉部・根系の生育状況と比較検証した (表-3, 表-4)。

はじめに、粘着力 c の増加量 Δc が増大した可能性を整理する。 Δc がブランク値 c_{blank} よりも大きい 5 種類 (MF・TF(N)

・RCG・TF(D)・ChF) では、草丈 (最終)・乾物重 (茎葉部)・乾物重 (根系) で 10 種類中 1~6 番目に大きな値を示した。生育 1 年目では、草本植物の茎葉部が生長して根系 (初期は種子根・節根、後に側根) の発達が促進する。このことが粘着力 c を増大させていたと考えられる。

ここで、せん断抵抗角 ϕ の増加量 $\Delta \phi$ が増大した可能性について考える (表-3~表-5)。 $\Delta \phi$ が増大した 3 種類 (PRG・RCG・HF) は、茎葉部および根系の評価指標について傾向が異なっていた。 $\Delta \phi$ が最大の PRG は乾物重 (茎葉部)・乾物重 (根系)・根長 (種子根・節根長) が 10 種類中最大値を示した。また、RCG でも草丈 (最終)・乾物重 (茎葉部)・乾物重 (根系) が 10 種類中で 2~5 番目に大きな値を示すなど生育は良好であった。一方、HF の草丈 (最終)・乾物重 (茎葉部)・乾物重 (根系) は 10 種類中 7~9 番目であり、PRG・RCG と比較して生育が良好ではなかった。

いま、土供試体中の根長当たりの乾物重 (根系) を指標とすると、PRG・RCG ではイネ科植物 9 種類の中で 1~3 番目の値を示した。一方、HF はこの指標で大きな値が認められなかった。今回の実験における RCG, HF の生育本数 (最終) はそれぞれ 249 本, 338 本であり、10 種類中で最も少なかった。土供試体中の株数当たりの根系指標に着目すると、根長は RCG (156.3 cm/株) で 2 番目、HF (140.1 cm/株) では 3 番目となり、乾物重 (根系) では RCG (0.0865 g/(供試体・株)) で最大値、HF (0.0418 g/(供試体・株)) でも 5 番目であった。1 株ごとにみると HF の根系生育は比較的良好であり、このことが $\Delta \phi$ の微増に関係していた可能性が考えられる。

以上より、草本植物の生育が最も良好であった PRG・RCG は根長当たりの乾物重 (根系) で大きな値を示し、RCG・HF では生育本数は少ないものの株数当たりの根長・乾物重 (根系) が比較的大きな値を示した。こうした根系指標がせん断抵抗角 ϕ にも影響を及ぼしたと推察される。

表-4 草本植物の根系を含む土供試体の強度定数の評価

Table 4 Evaluation of the strength parameter of the soil specimens including the herbaceous roots

	粘着力	せん断抵抗角	強度定数増加量		平均含水比	4供試体の含水比の範囲	
	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	Δc (kN/m^2)	$\Delta \phi$ ($^\circ$)	(%)		
KBG	1.39	21.9	0.39	0.2	99.6	98.3 ~ 101.6	
HF	1.75	23.4	0.75	1.7	96.1	94.9 ~ 97.0	
WC	1.65	21.8	0.65	0.1	96.4	95.7 ~ 97.1	
ブランク①	1.00	21.7			102.6	100.3 ~ 104.0	
CRF	1.51	24.3	0.66	0.0	92.4	91.0 ~ 94.7	
TF(N)	1.98	24.6	1.13	0.3	90.8	88.1 ~ 92.7	
TF(D)	1.83	24.5	0.98	0.2	93.6	91.8 ~ 94.7	
MF	2.04	24.1	1.19	-0.2	86.3	85.4 ~ 87.7	
PRG	1.56	30.0	0.71	5.7	92.0	91.2 ~ 92.7	
ChF	1.73	24.5	0.88	0.2	92.3	88.5 ~ 94.1	
RCG	1.98	26.7	1.13	2.4	90.5	88.8 ~ 91.6	
ブランク②	0.85	24.3			92.6	92.3 ~ 92.9	

表-5 単位根長・株数当たりの根系指標の評価

Table 5 Evaluation of the root index per root length and plant

	根長当たり		株数当たり		
	乾物重 (根系) (mg/cm)	乾物重 (根系) (g/(供試体・株))	根長 (cm/株)	種子根・節根長*	側根長
KBG	0.175	0.0108	63.0	27.8	35.2
HF	0.299	0.0418	140.1	64.3	75.8
WC	0.937	0.0208	23.7	5.2	18.5
CRF	0.309	0.0249	80.0	33.3	46.7
TF(N)	0.359	0.0395	114.7	47.6	67.1
TF(D)	0.607	0.0407	65.7	41.4	24.3
MF	0.318	0.0426	134.4	58.6	75.8
PRG	0.632	0.0656	103.6	62.9	40.7
ChF	0.389	0.0608	157.1	74.2	82.9
RCG	0.553	0.0865	156.3	53.1	103.2

*WCでは、主根長

4.2 土供試体の強度定数と積雪寒冷地の法面保全

ここで、客土種子吹付工を想定して作製された土供試体の強度定数 ($c \cdot \phi$) がもたらす法面保全上の効果を考える。

実際の法面基盤と吹付け客土 (たとえば厚さ 3 cm) との境界面をせん断面 (図-1, A-A' 面) とみなすとき、大きな垂直応力 σ を想定していない。よって、法面表層 (浅層) の補強効果としては粘着力 c の大きさが有効である (図-2)。しかし、寒冷少雪地域では法面方位の違いによって冬期の気象・地盤環境は異なり^{2,4)}、堆雪状態で春先の融雪期を迎えることもある。この場合、法面表層 (浅層) でも大きな垂直応力 σ が想定されるため、せん断抵抗角 ϕ の大きさが法面保全上有利である (図-2)。

著者ら^{3,5)}は、8月下旬~10月下旬 (生育期間 65~71 日、積算温度 817~869 °C・days) に生育させた合計 4 種類の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。その結果、草本植物の種類・生育年、生育環境条件 (平地・4 方位法面) などの違いにかかわらず、土層に根系を含むことにより粘着力 c のみが増大するという知見が得られた。

今回の実験では、8月11日~10月22日 (生育期間 73 日、積算温度 1,040 °C・days) の間に生育させた 10 種類の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。その結果、土層に根系を含むことにより粘着力 c が増大するのみならず、3 種類ではせん断抵抗角 ϕ も増大していた (表-4)。すなわち、寒冷少雪の十勝地域中部において草本植物の播種時期を 10 日間程度早めるなど十分な生育期間を確保することにより、草本植物の根系を含む土層の力学的特性として強度定数 $c \cdot \phi$ の両方に影響する可能性が示唆された。

一般に生育期間が長くなると根系の形状が変化し、側根の発達が促進される⁶⁾。小橋¹⁾は、せん断面が浅い場合、根系を含む土層の力学的強度は粘着力 $c \cdot$ せん断抵抗角 ϕ の両方に作用する可能性を指摘していた。今回の実験では、根長のうち、種子根・節根長と側根長の割合などの根系指標が強度定数 ($c \cdot \phi$) に及ぼす因果関係を明確にはできなかった。今後は、草本植物の根系指標がせん断抵抗角 ϕ に及ぼす影響を含めて、長期間生育させた草本植物を検討対象として、生育 2 年目以降 (経年評価) に関する検証が求められる。

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、10 種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性を検討した。その結果、土供試体中に草本植物の根系を含むことにより粘着力 c が増大し、生育期間が十分に確保される条件下ではせん断抵抗角 ϕ も増大する可能性がある。このとき、粘着力 c (の増加量 Δc)、せん断抵抗角 ϕ (の増加量 $\Delta \phi$) には、土供試体内の根系指標が強く関係していると考えられる。

北海道における植生工を考えると、MF・TF(N)・TF(D) の根系を含む土供試体の粘着力 c の増加量 Δc はとくに大き

く、PRG ではせん断抵抗角 ϕ (の増加量 $\Delta \phi$) が最大になり、RCG では $c \cdot \phi$ の両方に強く作用していた。今後は、施工初年度の法面に定着した草本植物の根系を含む土層について、凍結融解・融雪時に (飽和状態で) せん断したときの強度定数 ($c \cdot \phi$) の有効性についても検証する必要がある。

謝辞: この研究の実施にあたり、雪印種苗 (株)・入山義久氏には 9 種類の外来草本植物の種子をご提供いただいた。また、(有)開成舎・福田尚人博士には、地域性種苗クサヨシの種子をご提供いただき、草本植物の生育評価などに貴重なご助言を賜った。帯広畜産大学・宗岡研究室の学部学生各位には、緑化用客土の調整・転圧、草本種子の点播作業などに多大なご尽力をいただいた。ここに記して深謝の意を表する。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 宗岡寿美 (2006) 寒冷少雪地域における斜面保全と緑化技術の問題点. 日本緑化工学会誌, 31(4): 429-430.
- 3) 宗岡寿美・菅原大貴・山崎由理・木村賢人・辻 修 (2017) 法面方位の違いを考慮した 2 種類の外来草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性. 日本緑化工学会誌, 43(1): 15-20.
- 4) 宗岡寿美・土谷富士夫・辻 修・武田一夫 (2004) 冬期の気象環境が斜面の積雪・凍結に及ぼす影響. 日本雪氷学会誌, 66(2): 217-226.
- 5) 宗岡寿美・山崎由理・小俣悟得・石川玲奈・福田尚人・木村賢人・辻 修 (2017) 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. 日本緑化工学会誌, 42(4): 494-502.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 日本道路協会 (2009) 道路土工一切土工・斜面安定工指針. pp. 222-256.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 佐藤厚子・山田 充・山梨高裕 (2017) 植生基盤材の厚さまたはわらむしろ・育苗シートが積雪寒冷地の緑化植物の生育に与える影響について. 日本緑化工学会誌, 43(1): 327-330.
- 12) 植物栄養実験法編集委員会編 (1990) 植物栄養実験法. 博友社, pp. 120-121.
- 13) 山田 充・山梨高裕・佐藤厚子 (2014) 法面緑化におけるトールフェスク代替種と播種量の検討について. 寒地土木研究所月報, No.736: 19-24.

(2018 年 7 月 10 日受理)