

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：10105

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06284

研究課題名（和文）寒冷地法面の保全に向けた草本植物の根系を含む土層のせん断特性と諸因子の検討

研究課題名（英文）Toshimi Muneoka

研究代表者

宗岡 寿美（Toshimi, Muneoka）

帯広畜産大学・畜産学部・教授

研究者番号：50301974

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、寒冷少雪の北海道十勝地域における植生工を想定して作製された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、法面保全的見地から表層土のせん断特性を詳細に検討した。その結果、施工適期初期（6月初旬）に草本植物を播種して十分に生育させた場合、翌春の凍結融解時期（高含水状態）には根系を含む土供試体の強度定数（粘着力 $c$ ・せん断抵抗角 $\phi$ ）の低下を抑制していた。また、施工限界期以前（8月下旬）に播種することで草本植物の生長が一定程度促進でき、翌春の凍結融解時期には根系を含む土供試体の粘着力 $c$ の低下を抑制するとともに根系の引き抜き抵抗力を発揮させられるなどの法面保全効果が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

寒冷少雪の北海道十勝地域において植生工を用いて法面を保全するには、施工適期内に草本植物の茎葉部の生育のみならず根系を伸長・発達させておく必要がある。このことは、冬期間を経て翌春の凍結融解時期に頻発する法面表層崩壊の抑制につながる。また、生態系・種・遺伝子レベルでの生物多様性保全に配慮した法面緑化が求められる中、外来草本植物に加えて北海道原産の自生種植物（地域性種苗）の植生工への適用が求められる。こうした、植生工への地域性種苗の適用に向けた技術を確認するための今回の研究成果は、防災・減災、国土強靱化と生物多様性保全との両立を考える上で学術的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Direct shear tests were made on soil specimens including several types of herbaceous roots for vegetation work in the cold region with less snow, strength parameters (cohesion  $c$  and angle of shear resistance  $\phi$ ) were aging evaluated. As the result, in the case that some herbaceous plants grew in proper time for revegetation, the  $c$  ( $c$  value increases) and the  $\phi$  ( $\phi$  value increases) on soil specimens including roots of herbaceous plants were suppressed the decreases of shear resistance force caused by the condition with high water content of soil surface. In addition, in the case that the plants grew before limit time for revegetation, the  $c$  on soil specimens including roots was larger compared with those in the former year before winter season. The results showed that the seed and nodal roots increased the cohesion  $c$  of the slope surface soil. Furthermore, the binding force of the surface soil due to the development of lateral roots increased the angle of shear resistance  $\phi$ .

研究分野：農業農村工学

キーワード：法面保全 寒冷少雪地域 草本植物根系 せん断特性 粘着力 $c$  せん断抵抗角 凍結融解時期 緑化工技術

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

北海道では3種類の外来草本植物を混播する形で法面緑化工(植生工)が長年にわたり実施されてきた。この植生工には、景観・自然保護、茎葉部による表土の被覆・保持・侵食抑制および根系の緊縛力による土壌補強効果などが期待されている。しかし、寒冷少雪の北海道東部地域では、冬期間の積雪および土壌凍結・凍上、ひいては春季の融雪・凍結融解に起因する法面表層崩壊が現在も頻発している。こうした地域で草本植物を用いて法面表層土の保全効果を発揮させるには、「施工適期(北海道十勝地域では5月下旬~9月上旬)」内に植生工を実施(草本植物を播種)する必要がある。

これまでの間、申請者は北海道の植生工で用いられる外来草本植物・地域性種苗などの草本植物を対象として、根系を含む土供試体のせん断特性に関するいくつかの実験を試みた。その結果、北海道十勝地域で施工限界期以前(8月下旬)に数種類の草本植物を播種し、生育期間60日間程度(積算温度800・days)を確保した場合、生育1年目には根系を含むことにより土供試体の強度定数のうち粘着力 $c$ が増大した<sup>1)</sup>。また、播種時期を前倒して8月中旬に播種し、生育期間70日間以上(積算温度1,000・days超)を確保すると、生育1年目には根系を含む土供試体の強度定数は粘着力 $c$ の増大のみならずせん断抵抗角も増大する可能性が示唆された<sup>2)</sup>。さらに、生育期間を延長して翌年の夏季まで経年で生育を継続(生育期間365日間、経年積算温度3,000・days程度)すると、多くの草本植物で根系を含む土供試体の強度定数( $c$ ・)は生育2年目に大きく増大することを確認した<sup>3)</sup>。今回の研究では、施工適期初期(6月初旬)に外来草本植物・地域性種苗を播種して十分な生育期間を確保(生育期間62~462日間、経年積算温度1,071~4,862・days)した結果、根系を含む土供試体の強度定数( $c$ ・)は生育1年目のうちに増大し、生育2年目でも強度は維持できていることを確認した<sup>4,5)</sup>。このように、根系を含む土供試体の強度定数( $c$ ・)の大きさには、草本植物の種類に加えて、生育開始時期・生育期間や法面方位など生育環境条件の違いが大きく影響していた。

寒冷少雪の北海道十勝地域では、春先の融雪・凍結融解時期に法面表層崩壊が多発するため、この地域で植生工(播種工)を用いて法面保全効果を発揮するには、冬季以前の間草本植物を十分に生育させた上で(法面表層土の補強効果を発揮できる状態で)冬期間に備える必要がある。しかし、法面保全の見地から植生工(とくに播種工)による土壌補強効果を検討する上で、凍結融解期(直後:高含水状態)の草本植物の根系を含む法面表層土の力学的強度を評価・検討した事例はほとんどみられない。

### 2. 研究の目的

そこで、この研究では寒冷少雪の北海道十勝地域にお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、生育1年目に生育させた上で冬期間を経た直後の翌年春季の凍結融解期(高含水状態)に土供試体の強度定数( $c$ ・)を算出した。

(1) 1つめの実験では、施工適期初期(6月初旬)に外来草本植物と地域性種苗を播種し、生育1年目に十分な生育期間を確保した上で冬期間を経た直後の凍結融解期(高含水状態)における土供試体のせん断特性を定量評価した。とくに、地域性種苗の植生密度に着目して植生工と法面表層土の保全問題に若干の検討を加えた。

(2) 2つめの実験では、施工限界期前後(8月下旬・9月下旬)に3種類の外来草本植物を播種し、生育1年目の生育後、翌春の凍結融解直後(高含水状態)における土供試体のせん断特性を定量評価した。とくに、高含水状態での土層の力学的特性と根系の役割について検討を加えた。

### 3. 研究の方法

この実験では、法面緑化工としての植生工(播種工、とくに客土種子吹付工)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。2つの実験に共通する手法は以下のとおりである。

育苗箱(長さ49.0cm×幅34.0cm×深さ10.0cm)内に緑化用客土(火山灰質粘性土型(VH<sub>1</sub>), 4.75mmふるい通過分)を一定の自然含水比・乾燥密度で充填した。表層3cmには高度化成肥料(42%, 10kg/100m<sup>2</sup>)を施用し、設定した発生活待本数で各種草本植物種子を点播して0.5mmの厚さで覆土した。その後、帯広畜産大学実験圃場へ移植して各種草本植物を一定期間生育させた。期間中、実験圃場近傍では各種気象環境を観測した。

実験室内では乾物重(茎葉部)を測定後、各育苗箱内の地表面下2~4cm部分の土塊をかく乱状態で円柱形(土供試体、直径6.0cm×高さ2.0cm)に採取・整形し、地表面下3cmがせん断面となるように土の定圧一面せん断試験(地盤工学会基準 JGS 0561-2009・JGS 0561-2020)を実施した。試験時の垂直応力は2.5, 5.0, 7.5および10.0kN/m<sup>2</sup>である。その結果を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)で評価した。試験後、土供試体内の含水比を測定後、根系指標(根長・乾物重(根系))を測定した。なお、根長測定の際、種子根と節根の区別(見分け)は困難なため、種子根は“節根”に含めて評価した。

(1) 1つめの実験では、北海道の植生工に用いられる3種類の外来草本植物の中からクリーピンググレッドフェスク (*Festuca rubra* L.; CRF) を選定し、北海道原産の地域性種苗クサヨシ (*Phalaris arundinacea* L.; RCG) との比較検討に供した。発生期待本数が 2,500 本/m<sup>2</sup> (CRF・RCG)・900 本/m<sup>2</sup> (RCG)・460 本/m<sup>2</sup> (RCG) となるように点播した4パターンおよび種子を含まない1パターン(ブランク)の計5パターンの育苗箱を各6箱作製し、施工適期初期(2019年6月2日)に帯広畜産大学実験圃場へ移植した<sup>4,5)</sup>。その後、同年8月4日、9月17日、11月2日、2020年3月28日、7月17日および9月6日の順に各5パターンの育苗箱を6回に分けて実験室内に搬入した。この報告では2019年11月2日(3回目)および2020年3月28日(4回目)に取り上げた2回分の実験結果を主な比較検討対象とした。

(2) 2つめの実験では、北海道の植生工の仕様植物であるトールフェスク (*Festuca arundinacea* Schreb.; TF), クリーピンググレッドフェスク (*Festuca rubra* L.; CRF) およびケンタッキーブルーグラス (*Poa pratensis* L.; KBG) の外来草本植物3種類である。発生期待本数 2,500 本/m<sup>2</sup> で点播した後、2020年8月31日(施工限界期前)・9月27日(施工限界期後)の2回に分けてそれぞれ作製した育苗箱(TF・CRF・KBG(各3個×3回分)およびブランク4個(4種類,計22個))を帯広畜産大学実験圃場に移植した。生育期間中、生育本数・草丈の測定および各種気象観測などを実施した後、3種類×2回分(6個)およびブランク1個の計7個(7パターン)の育苗箱を同年10月30日(先行研究)<sup>6)</sup>および2021年3月28日にそれぞれ取り上げて実験室内に搬入した。この実験では、土供試体内の含水比・根系指標(根長・乾物重(根系))の測定とは別に、各育苗箱内の10株を対象として最長の節根長も測定した。

#### 4. 研究成果

今回の実験結果を整理する上で、草本植物の根系を含む土供試体の強度定数( $c \cdot$ )からブランクの強度定数( $c_{blank} \cdot$ )を差し引いた値、すなわち土供試体に根系を含むことによる強度定数の増加量  $\alpha (= c - c_{blank})$  ( $= - c_{blank}$ ) を指標として、根系を含む土供試体の力学的特性を評価した(図-1)。

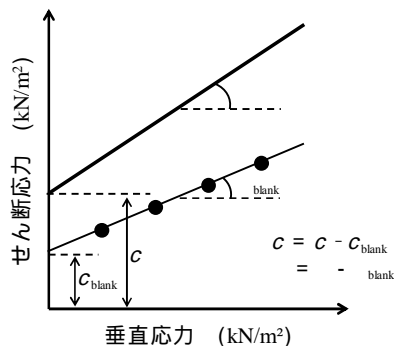


図-1 強度定数の増加量 ( $c \cdot$ ) 評価

(1) 1つめの実験において(表-1), 冬季を迎えるまでの間に十分な生育期間を確保した(3回目:2019年11月2日に取り上げた)場合、草本植物の種類や植生密度の違いにかかわらず生育1年目における2種類の草本植物の植生率は77.1~86.0%の範囲にあり、茎葉部は良好の生育していた。

生育1年目・冬季以前(3回目:2019年11月2日取り上げ、積算温度 2,402.3  $\cdot$  days)のせん断特性をみると、根系を含まない土供試体(ブランク)と比較して強度定数( $c \cdot$ )はともに増大していた。このとき、RCG (2,500 本/m<sup>2</sup>)では、土供試体の  $\alpha$ (1.54kN/m<sup>2</sup>) $\cdot$  (6.8 $\cdot$ )が最大値を示した。また、生育期間を十分に確保することにより、生育が比較的遅いCRFであっても  $\alpha$ (1.18kN/m<sup>2</sup>) $\cdot$  (5.8 $\cdot$ )は植生密度の小さいRCG・RCG ( $c$ :1.08~1.13kN/m<sup>2</sup>,  $\cdot$ :5.3~5.7 $\cdot$ )と同程度まで増大していた。このとき、生育1年目における土供試体の強度定数( $c \cdot$ )に影響を及ぼす主な指標は根長であることが示唆された。

つぎに、生育2年目・凍結融解直後(4回目:2020年3月28日取り上げ、生育1年目の積算温度 2,491.9  $\cdot$  days, 凍結指数 521.1  $\cdot$  days, 生育2年目の積算温度 29.1  $\cdot$  days)では、生育1年目(3回目)と比較してブランクを含めたすべてのパターンで土供試体の強度定数( $c \cdot$ )自体が低下していた。ここで、RCGにおける  $c$ (1.81kN/m<sup>2</sup>) $\cdot$  (8.4 $\cdot$ )は最大値を示し、強度定数の増加量は3回目よりも相対的に大きくなっていった。このことは、融雪・凍結融解直後の高含水条件下において地盤の強度が低下する中で、植生密度が最大(発生期待本数 2,500 本/m<sup>2</sup>)のRCGでは根系を含む表層土が一定の強度を発揮したことを示唆している。一方、同じ植生密度のCRF( $c$ (0.50kN/m<sup>2</sup>) $\cdot$  (5.6 $\cdot$ ))は根長が最大にもかかわらず乾物重(根系)は最小(すなわち、単位根長当たりの質量が最小)であった。すなわち、高含水状態での根系の引き抜きや凍上作用による根系の断裂などに対して、CRFの根系を含む表層土は緊縛力を保持できずに地盤のせん断強度は低下したと考えられる。

ここで、生育1年目および凍結融解期(直後)を含めて、RCGの根系を含む土供試体の強度定数増加量( $c \cdot$ )には植生密度が大きく影響していた。とりわけ凍結融解直後には、植生密度が小さなRCG・RCG(発生期待本数 460~900 本/m<sup>2</sup>,  $c$ :0.55~0.89kN/m<sup>2</sup>,  $\cdot$ :7.5~7.6 $\cdot$ )であってもCRF(発生期待本数 2,500 本/m<sup>2</sup>,  $c$ (0.50kN/m<sup>2</sup>) $\cdot$  (5.6 $\cdot$ ))よ

り大きな法面保全効果が認められた。このように、凍結融解期における法面表層土の保全効果を検討するとき、農業農村整備における地域性種苗（北海道原産クサヨシ RCG）の植生工（播種工）への適用可能性を含めた混播のあり方などを考えていく必要がある。

表-1 草本植物の茎葉部評価および根系を含む土供試体の強度定数評価（2019～2020）

移植日：2019年6月2日夕方 (生育開始日：同年6月3日)	茎葉部評価 (育苗箱当たり)				根系評価 (供試体当たり)		強度定数 ( $c \cdot \theta$ ) 増加量			
	生育 本数 (本)	草丈 (平均値) (cm)	乾物重 (平均値) (g)	植被率 (%)	根長 (cm)	乾物重 (根系) (g)	$c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )	含水比 (平均値) (%)	
3回目(冬季以前) 2019年11月2日取り上げ										
生育期間：152日間	CRF	549	26.9	151.7	81.1	1,800.2	0.309	1.18	5.8	79.6
積算温度：2,402.3 days	RCG	567	59.8	182.3	77.1	2,319.4	0.878	1.54	6.8	78.8
	RCG	220	53.0	164.5	82.3	1,801.1	0.692	1.08	5.7	80.7
	RCG	104	59.9	170.1	86.0	1,361.7	0.615	1.13	5.3	81.2
4回目(凍結融解直後) 2020年3月28日取り上げ										
生育期間：299日間	CRF					2,139.4	0.332	0.50	5.6	106.8
積算温度：2,491.9 days	RCG					1,873.5	1.236	1.81	8.4	98.5
	+ 29.1 days	RCG				1,324.2	0.863	0.89	7.6	95.5
凍結指数：521.1 days	RCG					1,968.4	1.081	0.55	7.5	96.8

中心部 短辺3列 最大63本(21本×3列)の平均値

根系を含まない土供試体(ブランク)の含水比(平均値)：3回目81.5% 4回目106.6%

(2) 2つめの実験において、生育1年目(冬期前)における7パターン(3種類×2回分およびブランク)の土供試体の強度定数( $c$ 値：0.79～2.48  $\text{kN/m}^2$ ， $\theta$ 値：25.9～27.2 $^\circ$ ，含水比  $w$ ：78.9～95.0%，先行研究データ<sup>6)</sup>)と比較すると、凍結融解直後( $c$ 値：0.23～1.60  $\text{kN/m}^2$ ， $\theta$ 値：21.6～22.6 $^\circ$ ，含水比  $w$ ：92.2～113.3%)は高含水状態のため強度定数( $c \cdot \theta$ )は相対的に低下していた(図-2(a)～(c))。

凍結融解期における土供試体の  $c$  値と総根長との間には強い正の相関関係 ( $r=0.98^{**}$ ) が認められた。根系指標を詳細にみると、 $c$  値と節根長との間に正の相関関係 ( $r=0.84^*$ ) がみられた(図-2(a))。高含水比条件下ではせん断時に節根の引抜き抵抗が減少するため、 $c$  値を増大させるには土供試体中に 50cm 程度以上の節根を必要とすることが示唆された。つぎに、 $c$  値と側根長との間にも強い正の相関関係 ( $r=0.97^{**}$ ) が認められ(図-2(b))、側根が未発達であっても  $c$  値は 0.10  $\text{kN/m}^2$  以上増大していた。しかし、 $c$  値・側根長がともに大きい施工限界期前播種の2種類(TF・前，CRF・前)では総根長に対する側根長の割合が66～68%と顕著に大きかった。いま、1株ごとの根系に着目すると(図-2(c))、最長の節根長が5cm程度以下であれば  $c$  値は増大せず、節根長がさらに伸長する中で(とりわけ節根の発達過程において)  $c$  値が増大する挙動が捕らえられた。このように、法面表層土の保全効果を考えるとき、節根の存在が土供試体中の粘着力  $c$  の増大に影響していた。あわせて、節根から伸長する側根が発達して相互に絡み合うことで、凍結融解期の高含水比条件下では根系の引抜き抵抗力を発揮していた。

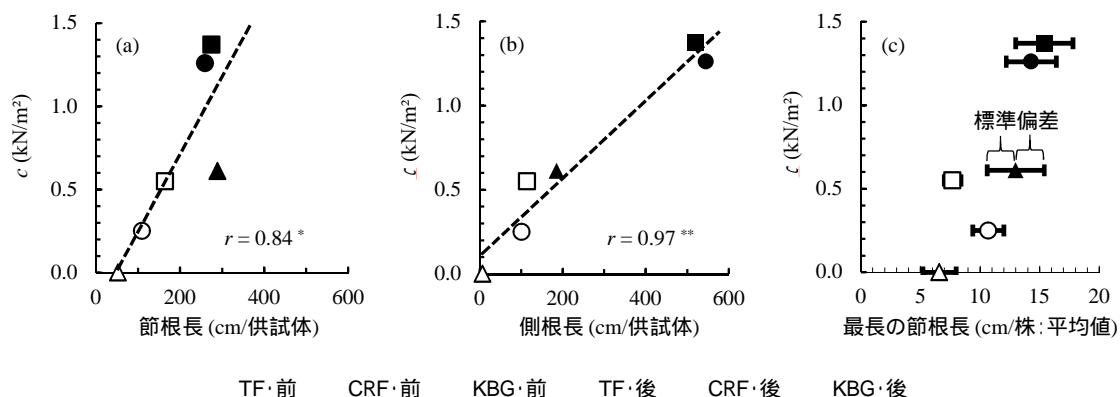


図-1 粘着力  $c$  の増加量 ( $c$ ) 値と根系指標との関係 (2021)

<引用文献>

- 1) 宗岡寿美・菅原大貴・山崎由理・木村賢人・辻 修：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)，pp.15～20(2017)
- 2) 宗岡寿美・下田誠也・山崎由理・木村賢人・辻 修：10種類の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 44(1)，pp.9～14(2018)
- 3) 宗岡寿美・新田祥吾・山崎由理・木村賢人・辻 修：10種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性に関する経年評価，日本緑化工学会誌 48(1)，pp.33～38(2022)
- 4) 宗岡寿美・佐藤龍則・山崎由理・木村賢人・辻 修：2種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性と生育期間・植生密度の検討，第51回日本緑化工学会大会 岩手 Web 大会 研究交流発表部門要旨集，pp.27～28(2020)
- 5) 宗岡寿美・新津七海・山崎由理・木村賢人・辻 修：2種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性と生育期間・植生密度に関する経年評価，第52回日本緑化工学会大会研究交流発表部門要旨集，p.8(2021)
- 6) 宗岡寿美・山田歩実・山崎由理・木村賢人・齋藤貴史：施工限界期の前後に播種した3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 農業農村整備における植生工と法面表層土の保全効果の検討( ) ，第70回農業農村工学会研究発表会講演集，pp.41～45(2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宗岡寿美・上原もなみ・山田歩実・中島直久・木村賢人・中村大・川口貴之
2. 発表標題 凍結融解期における3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 農業農村整備における植生工と法面表層土の保全効果の検討( )
3. 学会等名 令和5年度（第72回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菱谷綾乃・宗岡寿美・木村賢人・辻 修・中村大・川口貴之
2. 発表標題 凍結融解期における2種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性－農業農村整備における植生工と法面表層土の保全効果の検討( )－
3. 学会等名 第70回農業農村工学会北海道支部研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------