

農業農村整備事業における法面保護工（植生工）の効果の検討

北海道十勝総合振興局産業振興部整備課 ○藤内 尚幸
北海道上川総合振興局産業振興部南部耕地出張所 齋藤 貴史
帯広畜産大学 宗岡 寿美

1. はじめに

（１）調査の背景

農業土木工事で造成した人工斜面（切土・盛土法面）が降雨・融雪水の流去により土壌侵食・流亡（ひいては法面崩壊）する事例が長年にわたり発生しつづけてきた。こうした法面の侵食～崩壊挙動は周辺河川への汚濁負荷の発生因子の1つとなり、下流域の水質環境（さらには水産業）に大きな影響を及ぼしてきた。他方、ゲリラ降雨・線状降水帯など、局地的に短時間豪雨が頻発するような降雨特性の変化傾向が今後も予想されている¹⁾。いま、「防災・減災、国土強靱化」の視点からも、農業農村整備事業を推進する上で“法面”を効果的・持続的に保全することが求められる。

造成された法面を力学的に安定させるためには法面保護工（植生工）が有効である。しかし、寒冷少雪の北海道東部地域では一般に草本植物の生育期間が比較的短いため、植生工の適用には草本植物の種類・生育期間などの諸条件について十分に考慮・検討する必要がある。北海道十勝総合振興局では、こうした植生工の適用による法面保全上の効果に関する有用な基礎情報を蓄積するため、令和2年度（2020年度）より帯広畜産大学と連携し植生工の効果に関する個別具体的な各種実験を積み重ねている。

（２）北海道の植生工と施工適期（施工限界期）の考え方

北海道農政部が実施する農業農村整備事業では、景観・自然保護に配慮しながら造成法面表層を力学的に安定させるため、主として数種類の外来草本植物を混播する植生工が多く実施されてきた。積雪寒冷地の北海道で植生工（とくに播種工）を実施するには施工適期の中でも「施工限界期」（すなわち、施工適期の終期）が重要な指標とされている。

北海道東部の十勝地域内陸部における播種工の施工適期は5月下旬～9月上旬が目安²⁾とされている。北海道農政部では「施工完了後、日平均気温5℃以上が60日間確保されると予想される時期まで」の期間を施工適期³⁾としている。アメダスデータ（帯広、日平均気温（平年値：1991～2020年））をもとに十勝地域内陸部の施工限界期を算出すると、日平均気温が5℃以上の最終日（11月9日）から60日間さかのぼると9月11日となることから、施工限界期は9月10日と考えることができる。

（３）植生工で使用される外来草本植物について

北海道内における植生工には、ケンタッキーブルーグラス（*Poa pratensis* L. ; KBG）、クリーピングレッドフェスク（*Festuca rubra* L. ; CRF）およびトールフェスク（*Festuca arundinacea* Schreb. ; TF）など3種類の外来草本植物を混播する形で使用されている。北海道農政部ではこの3種類が植生設計施工要領（特記仕様書（例））³⁾に記載されている。

一方、2005年に「外来生物法」が施行されたことにもない、国土交通省北海道開発局では周辺自然環境への影響を危惧して「要注意外来生物リスト」に記載されたTFの使用が控えられ、2012年度より代替種としてハードフェスク（*Festuca longifolia* L. ; HF）が使

用されてきた⁴⁾。その後、2015年には「生態系被害防止外来種リスト」が新たに施行され、TFは産業管理外来種として利用上の留意点が示されている。

(4) 草本植物の根系を含む土層のせん断特性—既往の研究経緯—

帯広畜産大学・宗岡研究室では、法面表層土を想定した外来草本植物・地域性種苗の根系を含む土供試体のせん断特性に関する独自の実験を長期間にわたり積み重ねてきた⁵⁻¹⁶⁾。これらの一連の研究では、北海道十勝管内中央部における植生工（播種工、とくに客土種子吹付工）を想定し、施工適期（とくに施工限界期以前）に一定の条件で作製された土層に草本植物を播種・生育後、育苗箱内から採取した土塊の一面せん断試験を実施した。これらの結果をもとに、育苗箱内に再現された法面表層土において草本植物根系がもたらす土層の強度特性を定量評価した。ここで得られた知見はおおむね以下のとおりである。

法面表層土中に草本植物の根系を含むことにより、生育1年目では、北海道十勝管内中央部の施工限界期以前（8月下旬）までに播種すると冬期を迎えるまでの間（生育期間60日程度、積算温度 $800^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 台）に粘着力 c が増大した^{5,6)}。生育期間を8月前半（生育期間60日間+ α 、積算温度 $1,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 超）に前倒すことにより、せん断抵抗角 ϕ も増大する可能性が示唆された⁸⁾。さらに2か年にわたり生育させたり、生育1年目の施工適期初期（6月初旬）に播種したりするなど、十分な生育期間を確保することで強度定数（ $c\cdot\phi$ ）はともに増大することも確認できた^{7,9-12,15,16)}。こうした根系を含む土層の力学的特性には、草本植物の種類・生育期間のみならず、植生密度、覆土厚および法面方位など、多くの因子が影響していた。

(5) 残された課題とこの報告の目的

積雪寒冷地の北海道で施工限界期以降に植生工を実施（播種）した場合、冬期を迎えるまでの間に草本植物は十分に繁茂しないため、植生工（播種工）を回避する必要がある。しかし、施工限界期以降に播種した場合を含めた草本植物の根系を含む土層のせん断特性（および経年評価）に関する定量的な基礎データはほとんどみられない。

今回、北海道農政部の植生工（播種工）で使用する3種類の外来草本植物（KBG・CRF・TF）を対象として施工限界期の前後に播種後、冬期を迎える前までの間（生育1年目）に加えて、越冬後～翌夏までの間（生育2年目）でそれぞれ生育させた。こうして生育1年目・2年目における茎葉部・根系の生育状況および根系を含む土供試体のせん断特性を定量評価した。以上の結果をもとに、寒冷少雪の十勝地域を対象として実施した植生工の法面保全効果に関する実験を通じて得られた有用な知見の一部を報告する。

2. 材料および方法

(1) 材料および播種・生育方法

今回の実験では、北海道農政部の植生工で仕様規定されている3種類の外来草本植物（KBG・CRF・TF、いずれもイネ科植物）を対象とした。市販の育苗箱（長さ49.0 cm×幅34.0 cm×高さ10.0 cm）に北海道十勝管内で採掘・販売された緑化用客土（火山灰質粘性土（I型、VH₁）：4.75 mmふるいを通過分）を一定の含水比（98.4%）・乾燥密度（ $0.524\text{g}/\text{cm}^3$ ）で充填し、表層（3 cm）には高度化成肥料（42%、 $10\text{ kg}/100\text{m}^2$ ）を施用した。その上に1.5 cm間隔（発生期待本数 $2,500\text{ 本}/\text{m}^2$ ）¹⁷⁾で上記3種類の外来草本植物の種子を点播し、0.5 cmの厚さで覆土した。その後、2020年8月31日（施工限界期前）・9月27日（施工限界期

後)の2回に分けて作製した育苗箱(TF・CRF・KBG(各3個×2回分)およびブランク(計2個)の4種類(計14個))を帯広畜産大学実験圃場に移植し、屋外にて外来草本植物を生育させた。その後、3種類×2回分(6個)およびブランク1個を含めた計7個の育苗箱を同年10月30日および2021年7月26日にそれぞれ取り上げて実験室内に搬入した。なお、ブランクとは、外来草本植物を播種していない(根系を含まない)土層のことを意味する。

生育期間中、外来草本植物の茎葉部(生育本数・草丈)を定期測定するとともに、育苗箱の真上から生育状況を撮影した写真をもとに植被率を算出した。同時に、実験圃場近傍において各種気象データを連続測定した。

(2) 実験・測定方法

実験室内では、各種茎葉部指標の最終測定後に茎葉部を刈り取り、乾物重(茎葉部)を測定した¹⁸⁾。その後、吹付け客土と法面基盤土との境界面(地表面下3cm)がせん断断面となるように、育苗箱内の土層から不かく乱状態で円柱形(直径6.0cm×高さ2.0cm)に採取した土供試体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。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3~4回とし、そのときの垂直応力 σ を2.5kN/m²、5.0kN/m²、7.5kN/m²および10.0kN/m²とした。試験後、土供試体内の含水比を測定し、根系指標として根長(種子根・節根長/側根長)および乾物重(根系)を測定した^{18,19)}。

(3) 根系を含む土供試体の強度定数評価

なお、3種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性はクーロンの破壊規準による強度定数(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-1)。

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi = (\tan \phi) \cdot \sigma + c$$

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。

このように、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、強度定数($c \cdot \phi$)を用いて実験結果を経年評価した。

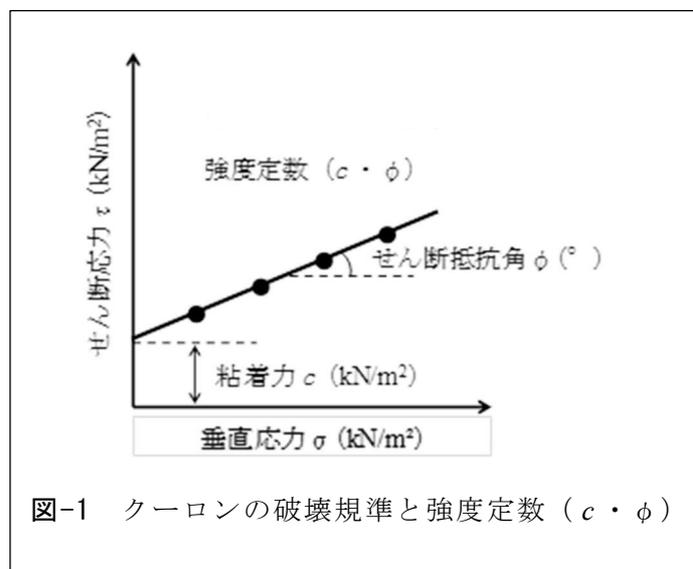


図-1 クーロンの破壊規準と強度定数($c \cdot \phi$)

3. 結果および考察

今回対象とした3種類の外来草本植物 (KBG・CRF・TF) のうち、施工限界期前の2020年8月31日夕刻に育苗箱を移植して生育開始させた3種類を以降、KBG・前、CRF・前およびTF・前と表記する。同様に、施工限界期後の2020年9月27日夕刻に育苗箱を移植して生育開始させた3種類を KBG・後、CRF・後およびTF・後と表記する。

(1) 外来草本植物の茎葉部評価

はじめに、3種類の外来草本植物に関する茎葉部の生育状況を表-1 (a) (b)に示す。

生育1年目の草丈、乾物重(茎葉部)および植被率について、草本植物の種類で比較すると KBG < CRF < TF の傾向が顕著であり、播種時期で比較すると [施工限界期後] < [施工限界期前] の傾向がみられた。また、生育本数は生育2年目に減少する中で、施工限界期前の3種類(なかでも TF・前、CRF・前)で生育は良好であった。施工限界期後に播種した場合、生育2年目には3種類とも植生は十分に定着しなかった。

(2) 根系を含む土供試体の強度定数の経年評価

つぎに、一連の実験等で得られた土供試体の一面せん断試験結果を表-2 (a) (b)に示す。

表-1 茎葉部の生育状況

(a) 生育1年目					(b) 生育2年目				
	生育本数 (本/箱)	草丈 (cm)	乾物重 (茎葉部) (g/箱)	植被率 (%)		生育本数 (本/箱)	草丈 (cm)	乾物重 (茎葉部) (g/箱)	植被率 (%)
TF・前	628	19.3	64.3	98.9	TF・前	416	26.7	77.7	87.1
CRF・前	487	8.1	43.7	99.1	CRF・前	501	28.7	149.3	97.5
KBG・前	397	4.0	8.4	80.5	KBG・前	224	20.6	30.5	73.6
TF・後	648	5.0	4.0	53.2	TF・後	26	17.5	8.3	53.3
CRF・後	529	3.4	2.2	33.5	CRF・後	41	13.4	7.8	14.8
KBG・後	521	1.8	0.4	5.7	KBG・後	14	14.9	1.7	10.5

表-2 土供試体の強度定数

(a) 生育1年目				(b) 生育2年目			
	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	平均含水比 W (%)		粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	平均含水比 W (%)
TF・前	2.48	27.2	78.9	TF・前	2.96	27.6	73.3
CRF・前	1.51	26.9	84.2	CRF・前	2.96	31.0	74.4
KBG・前	1.31	27.0	89.0	KBG・前	2.51	26.4	71.5
TF・後	1.53	26.4	89.5	TF・後	2.05	24.2	61.8
CRF・後	1.06	25.9	89.4	CRF・後	—	—	60.9
KBG・後	0.79	26.4	88.8	KBG・後	—	—	58.9
ブランク	0.79	26.1	95.0	ブランク	1.51	24.6	70.1

生育1年目でみると、播種時期の違いにかかわらず、根系を含む粘着力 c はすべて増大していた。播種時期で比較すると生育期間が長いほど（施工限界期前播種で）粘着力 c はより増大し、外来草本植物の種類で比較すると粘着力 c は $\text{KBG} < \text{CRF} < \text{TF}$ の傾向が顕著であった。しかし、積算温度 $800^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ 程度の生育条件下ではせん断抵抗角 ϕ が増大しなかった（表-2(a)）。

生育2年目において、施工限界期後に播種した場合、経年の積算温度が $1,000^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ 超（生育1年目 $413^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ + 生育2年目 $1,519^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ ）であったが、せん断抵抗角 ϕ は増大しなかった。一方、施工限界期前に播種した場合（経年積算温度 $2,490^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ ）には、強度定数（ $c \cdot \phi$ ）はともに増大していた。外来草本植物の種類で比較すると、粘着力 c の大きさは $\text{KBG} < \text{CRF} \approx \text{TF}$ 、せん断抵抗角 ϕ では $\text{KBG} < \text{TF} < \text{CRF}$ の傾向となっており、生育2年目における土層の強度定数は CRF が最も大きくなっていた（表-2(b)）。

（3）土供試体の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）の経年評価と根系指標の影響

表-2(a)(b)に示した実験結果について、それぞれの外来草本植物の根系を含む土供試体の粘着力 c ・せん断抵抗角 ϕ から、根系を含まない土供試体（ブランク）の粘着力 c_{blank} ・せん断抵抗角 ϕ_{blank} をそれぞれ差し引いた値が、土供試体に根系を含むことによる実質の強度定数増加量（ $\Delta c (= c - c_{\text{blank}})$: $\Delta \phi (= \phi - \phi_{\text{blank}})$ ）と考えることができる。

今回、経年的な実験結果を通して以下のことがわかった。根系を含む土供試体の強度定数のうち、粘着力 c を増大させるのは土供試体中の種子根・節根長の存在が主な要因であった。一方、せん断抵抗角 ϕ を増大させるのは乾物重(根系)および総根長が相互に関係しており、とりわけ種子根・節根から生育する側根長が主な要因であった。

このように、北海道農政部において実施する植生工の仕様植物（外来草本植物3種類）を施工限界期前に播種すると、生育1年目・2年目ともに根系を含む法面表層土の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）が増大することが想定できる。しかし、施工限界期後に播種した場合は経年積算温度が $1,000^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ 超であってもせん断抵抗角 ϕ は増大しないなど、草本植物の繁茂のみならず根系の伸長・発達（ひいては土層の力学的強度）は期待できない結果となった。このことは、北海道農政部植生設計施工要領³⁾で示すように、「北海道では施工限界期以降の播種は行わない」という方針は法面保全上のみならず国土強靱化の視点からも重要な考え方であることが示唆された。

4. おわりに

今回の報告では、寒冷少雪の十勝地域において植生工で使用する3種類の外来草本植物を施工限界期前に播種すると、生育1年目には根系を含む表層土の強度定数のうち粘着力 c が増大し、生育2年目には根系を含む表層土の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）がともに増大するなど植生工に関する有用な知見が得られた。外来草本植物の種類で比較すると TF は施工初年度における法面の早期安定化に役立つとともに、生育2年目では CRF の生育が良好であった。

今後は、国土強靱化に加えて生物多様性保全に配慮した法面緑化を推進していく上で、周辺環境に調和しつつ十分な法面保全効果を有する植生工のあり方を長期的な視点で議論できるよう、さらなる情報収集に努めることが重要である。

引用文献

- 1) 文部科学省、気象庁：日本の気候変動 2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書、pp.13～14 (2020)
- 2) 環境庁自然保護局：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 (1982)
- 3) 北海道農政部農村振興局事業調整課：土地改良事業等 積算資料 現場技術資料、pp.599～607 (2022)
- 4) 北海道開発局農業水産部農業設計課：農業土木工事特記仕様書、植生工 pp.3～5 および見積参考資料 (2023)
- 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：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)、pp.494～502 (2017)
- 6) 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)
- 7) 宗岡寿美・高橋幸志・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に関する経年評価、地盤工学会誌 67(1)、pp.20～23 および口絵写真 (2019)
- 8) 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)
- 9) 宗岡寿美・木村賢人・辻 修：北海道の水路法面保全と外来草本植物の適正管理への留意点、農業農村工学会誌 (水土の知) 88(11)、pp.19～23 (2020)
- 10) 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)
- 11) 宗岡寿美：草本植物の根系を含む土供試体の強度定数 ($c \cdot \phi$) 評価—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(I)—、第70回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp.34～37 (2021)
- 12) 菱谷彩乃・宗岡寿美・木村賢人・辻 修・中村大・川口貴之：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(II)—、第70回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp.38～41 (2021)
- 13) 山田歩実・宗岡寿美・木村賢人・山崎由理・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(III)—、第70回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp.42～45 (2021)
- 14) 宗岡寿美・中田ちひろ・中島直久・木村賢人・山田歩実・山崎由理・齋藤貴史：施工限界期の前後に播種した3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(IV)—、第70回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp.2～3 (2022)
- 15) 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)
- 16) 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)
 - 17) 日本道路協会：道路土工－のり面工・斜面安定工指針、pp.233～245 (1999)
 - 18) 植物栄養実験法編集委員会：編植物栄養実験法、pp.120～121、博友社 (1990)
 - 19) 根の辞典編集委員会 [編]：根の辞典 (新装版)、pp.76～82、pp.87～89、朝倉書店 (2009)