

牧草品種を用いた営農環境に配慮した法面保護工（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

○河端 亮一

北海道上川総合振興局産業振興部整備課上川中部整備室 三井 祐二

帯広畜産大学 宗岡 寿美

1. はじめに

(1) 調査の背景

北海道東部（十勝・釧路・根室管内）には広大な“酪農地域”が存在する。こうした牧草地周辺で法面を造成（播種工を施工）する際、外来草本植物の種子が牧草地に飛散した場合、翌年度には雑草として営農上の問題が生じる。一方、仮に播種工に牧草用種子を適用した場合、種子が飛散しても牧草地には益草であり問題は生じない。よって、播種工の仕様植物に牧草種を適用することで営農環境はもとより牧草地周辺の地域生態系に調和した法面緑化が可能となる。

これまでの間、帯広畜産大学・宗岡研究室では、外来草本植物・地域制種苗など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多くの研究成果を通じて、積雪寒冷地の法面保全と緑化工技術に関する知見を積み上げてきた^{1~16)}。しかし、北海道農政部農村振興局（農業土木工事共通仕様書¹⁷⁾）では、播種工の仕様植物に牧草用種子が一括リストアップされていないため、牧草用草種の法面緑化への適用に関する研究事例はいまだに少ない¹⁶⁾。

この報告では、北海道東部で5月下旬・8月中旬（牧草用草種の播種適期）に播種・生育させた5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生育1・2年目を実施して強度定数（ $c \cdot \phi$ ）を経年評価した。その上で、産業管理外来種トールフェスクの代替種としての可能性を含め、牧草用草種チモシーの法面緑化への適用可能性に関する基礎的検討を加えた。

2. 材料および研究方法

(1) 材料および播種・生育方法

実験に使用した材料は、草本植物種子、育苗箱、緑化用客土および化学肥料（高度化成肥料）である。

草本植物種子には、北海道における植生工の仕様植物（外来草本植物3種類：ケンタッキーブルーグラス KBG，クリーピングレッドフェス

ク CRF, トールフェスク TF) および地域性種苗クサヨシ RCG に加えて, 牧草用草種チモシー Tim の計 5 種類を使用した。

育苗箱には, 市販されている既製品 (ヤマト育苗箱 (B 型)) を使用した。形状は長さ 49.0 cm×幅 34.0 cm×深さ 10.0 cm であり, 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 0.2 cm 角のメッシュ状になっている。

緑化用客土には, 十勝地域で採取された植生工に使用実績のある黒土を使用した。一般に, 播種工に用いる客土はレキ分が 5% 以下, 最大粒径 6 mm 以下のもので, 腐食等の有機質を含んだものが望ましい¹⁸⁾。そこで, この緑化用客土を自然含水比 (60.4%) の状態で 4.75 mm ふるいを通過させて今回の実験に使用した。また, この緑化用客土を実験室内で風乾させた後に 2 mm ふるい (一部は 0.425 mm ふるい) を通過させた。この緑化用客土を対象として, 日本工業規格 (JIS) にもとづき各種土質試験を実施した。さらに, 地盤材料の工学的分類方法 (地盤工学会基準 JGS 0051-2020) を参考として, 採掘地の周辺状況・地質的背景のほか, この土を観察するなど総合的に評価した結果, 緑化用客土は火山灰質粘性土 (I 型, VH₁) に分類された (表-1)。

市販の育苗箱 (長さ 49.0cm×幅 34.0cm×高さ 10.0cm) に北海道十勝管内で採掘・販売された緑化用客土 (4.75mm ふるいを通過分) を一定の自然含水比 (60.4%) ・乾燥密度 (0.633g/cm³) の条件で充填した。下層 (4cm) ・中層 (3cm) に充填後, 表層 (3cm) には充填前に高度化成肥料 17g/箱 (42%, 10kg/100m²) を施用した。その後, 1~2 種類の播種間隔で 2~5 種類の草本植物種子を点播し, 0.5cm 厚で覆土した。

育苗箱を作製後, 帯広畜産大学構内の実験圃場に移植 (設置) し, 任意の生育期間で草本植物を生育させた。生育期間中, 実験圃場近傍にて各種気象データを連続測定するとともに, 外来草本植物の茎葉部指標を定期測定し, 育苗箱の真上から生育状況を撮影した。

(2) 土の一面せん断試験および茎葉部・根系の測定方法

北海道の植生工の仕様植物 3 種類 (KBG・CRF・TF), 地域性種苗 RCG および牧草種 Tim の草本植物 5 種類を使用し, 一定の植生密度 (1.5cm×1.5cm 間隔 (発生期待本数 2,500 本/m²)¹⁸⁾) となるよう上記 5 種類の草本植物の種子を点播した。

牧草種の播種時期として 5 月下旬 (春播種) および 8 月中旬 (夏播種) を想定し, 2023 年 5 月 22 日および 8 月 18 日の 2 回に分けてそれ

ぞれ 12 箱ずつ作製した育苗箱（草本植物 5 種類＋ブランクの 2 パターン×2 回：計 24 箱）を帯広畜産大学実験圃場に設置した。

一定期間生育後、同年 9 月 27 日および 10 月 26 日に各 1 種類（草本植物 5 種類＋ブランク：6 箱）の育苗箱をそれぞれ取り上げて実験室内に搬入した（令和 5（2023）年度受託研究¹⁶⁾）。残りの 12 箱についてはそのまま越冬させ、翌 2024 年 7 月 28 日および 8 月 13 日に各 1 種類（6 箱）ずつ育苗箱を取り上げて実験室内に搬入した（今年度（令和 6）年度受託研究）。

実験室内では、各種茎葉部指標を最終測定して育苗箱上部から画像を撮影した。その後、測定後に茎葉部を刈り取り、80℃で 72 時間通風乾燥させてから乾物重（茎葉部）を測定した¹⁹⁾。撮影画像をもとに、撮影した RGB 画像を HSV 系に変換した後、画像に占める緑色（および緑色＋黄色）のピクセル数の割合から植被率を算出した。なお、画像の変換およびピクセル数の測定には Python Ver.27-OpenCV を使用した。

その後、茎葉部の生育状況を最終測定した後、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 0561-2020）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。

土の定圧一面せん断試験後に土供試体（土部分）の含水比を測定後、すべての土供試体中の土と根系とを完全に分離した。そして、同一条件下の土供試体 3～4 個に含まれる根系のうち根量が中位のものを任意に各 1 つ選定して根長（種子根・節根長 / 側根長）を 1 mm 単位まで測定した。その後、すべての土供試体中の根系を 80℃で 72 時間通風乾燥させたときの乾物重（根系）を測定した¹⁹⁾。この乾物重（根系）は同一条件下（3～4 個）における平均値とした。

（3）根系を含む土供試体の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）評価

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）。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

τ : せん断応力 (kN/m²) , c : 粘着力 (kN/m²) ,
 σ : 垂直応力 (kN/m²) , ϕ : せん断抵抗角 (°)

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、強度定数 ($c \cdot \phi$) を用いて実験結果を評価した。

3. 結果および考察

(1) 草本植物の生育期間と積算温度

生育 2 年目 (2024 年) の各種気象環境を表-2(a)(b)・表-3 に示す。

ちなみに、2023 年 8 月 18 日に播種し同年 10 月 26 日に取り上げた育苗箱の生育期間は 69 日間、積算温度は 1,169°C・days であった (以降、生育 1 年目・8 月 18 日播種)。越冬させた後に翌 2024 年 8 月 13 日に取上げた育苗箱の生育期間は 361 日間、積算温度は 1,361+1,693°C・days であった (以降、生育 2 年目・8 月 18 日播種)。

2023 年 5 月 22 日に播種し同年 9 月 27 日に取上げた育苗箱の生育期間は 128 日間、積算温度は 2,587°C・days であった (以降、生育 1 年目・5 月 22 日播種)。越冬させた後に翌 2024 年 7 月 28 日に取上げた育苗箱の生育期間は 433 日間、積算温度は 3,099+1,263°C・days であった (以降、生育 2 年目・5 月 22 日播種)。

(2) 茎葉部の生育状況に関する経年評価

5 種類の外来草本植物 (KBG・CRF・TF・RCG・Tim) の生育期間終了直後 (取り上げ時) の茎葉部の評価結果を表-4(a)(b)に示す。

8 月 18 日播種について、生育 2 年目の生育本数は 98~323 本、乾物重 (茎葉部) は 29.0~269.4g/箱、自然草高は 11.5±3.1~60.6±17.2cm、植被率 (緑色部分) では 33.3~91.2% であった。生育 1 年目と比較すると、生育本数は RCG 以外で減少し、乾物重 (茎葉部) ・自然草高は 5 種類とも増大していた。植被率 (緑色部分) もおおむね良好であったが、生育 2 年目の Tim の植被率のみが 59.5% から 33.3% へと大きく低下していた。

5月22日播種について、生育2年目の生育本数は88～127本、乾物重（茎葉部）は86.4～282.4g/箱、自然草高は $28.1 \pm 17.4 \sim 66.6 \pm 31.3$ cm、植被率（緑色部分）では53.5～67.2%であった。生育1年目と比較すると、生育本数はRCGのみで減少し、乾物重（茎葉部）・自然草高はおおむね増大傾向にあった。5月22日播種の育苗箱では多くの草本植物が生育初期に枯死したため、植被率（緑色部分）は経年で不良であり、なかでも生育2年目のTimで植被率（53.5%）が最も低い値であった。

（3）根系を含む土供試体の強度定数の経年評価

5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結果について表-5および表-6に示す。

8月18日に播種した生育2年目における草本植物の根系を含む土供試体の強度定数をみると、根系を含まない土供試体（blank： $c=0.43$ kN/m²， $\phi=27.1^\circ$ ）と比較して粘着力 c で0.68～2.48kN/m²，せん断抵抗角 ϕ では28.6～34.2°であり，生育1年目よりも大きな値を示した。このとき，強度定数（ $c \cdot \phi$ ）はCRF・RCGで大きくなっていた。

5月22日に播種した生育2年目における草本植物の根系を含む土供試体の強度定数をみると，根系を含まない土供試体（blank： $c=0.13$ kN/m²， $\phi=30.4^\circ$ ）と比較して粘着力 c で0.78～1.72kN/m²，せん断抵抗角 ϕ では32.9～36.2°であり，生育1年目よりも大きな値を示した。このとき，粘着力 c はRCGで大きく，せん断抵抗角 ϕ はCRF・RCGで大きくなっていた。

（4）強度定数増加量（ $\Delta c \cdot \Delta \phi$ ）と根系指標との関係

ここで，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blank（根系なし）の粘着力 c_{blank} ・せん断抵抗角 ϕ_{blank} を差し引いた値，すなわち土供試体中に根系を含むことによる粘着力 c ・せん断抵抗角 ϕ の増加量 $\Delta c (= c - c_{\text{blank}}) \cdot \Delta \phi (= \phi - \phi_{\text{blank}})$ 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-2）。

いま，強度定数増加量（ $\Delta c \cdot \Delta \phi$ ）と根系指標を表-7(a)(b)に示す。

8月18日播種するとき，5種類の草本植物の根系を含む土供試体の粘着力増加量 Δc は，生育1年目で0.12～0.59kN/m²，生育2年目では0.25～2.02kN/m²であった。また，せん断抵抗角増加量 $\Delta \phi$ は生育1年目で0.0～0.9°，生育2年目では1.5～7.1°であった。

5月22日播種するとき，5種類の草本植物の根系を含む土供試体の粘着力増加量 Δc は，生育1年目（3種類）で0.58～1.39kN/m²，生育2年目では0.65～1.59kN/m²であった。また，せん断抵抗角増加量 $\Delta \phi$ は

生育 1 年目（3 種類）で $0.4 \sim 1.2^\circ$ ，生育 2 年目では $2.5 \sim 5.8^\circ$ であった。

生育 1 年目では，8 月 18 日播種（生育期間 69 日間，積算温度 $1,169^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ ），5 月 22 日播種（生育期間 128 日間，積算温度 $2,587^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ ）ともに草本植物の生育期間は十分であったにもかかわらず， $\triangle \phi$ 値はそれぞれ $0.0 \sim 0.9^\circ$ ， $0.4 \sim 1.2^\circ$ であり，ほとんど増大しなかった。このことには，5 月 22 日播種直後の生育初期に多くの草本植物が枯死したことが関係していた。一方，生育 2 年目では，播種時期の違いにかかわらず草本植物の根系を含むことによる土供試体の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）はともに生育 1 年目よりも増大しており，せん断抵抗角 ϕ の増大が顕著にみられた。

草本植物の種類で評価すると，生育 1 年目・8 月 22 日播種の $\triangle c$ 値は CRF・RCG・TF で $0.45 \sim 0.59 \text{ kN/m}^2$ の範囲にあり，Tim（ 0.50 kN/m^2 ）もこれらの草本植物と同程度の法面保全効果を発揮できていた。生育 2 年目・8 月 22 日播種の $\triangle c \cdot \triangle \phi$ は CRF・RCG でそれぞれ 2.05 kN/m^2 ， 7.1° ， 2.02 kN/m^2 ， 5.4° と顕著に大きく，TF でもそれぞれ 1.38 kN/m^2 ， 3.7° と比較的大きかった。このとき，Tim はそれぞれ 1.02 kN/m^2 ， 2.8° とこれらの草本植物よりも法面保全効果は小さくなっていた。生育 2 年目・5 月 22 日播種の $\triangle c$ 値は CRF・RCG・TF で $1.31 \sim 1.59 \text{ kN/m}^2$ ， $\triangle \phi$ 値も CRF・TF もそれぞれ 5.8° ， 3.8° と大きかった。このとき，Tim の $\triangle c \cdot \triangle \phi$ は 0.97 kN/m^2 ， 2.5° であり，KBG（ 0.65 kN/m^2 ， 2.8° ）に準ずる低い値となっていた。

以上より，播種時期の違いにかかわらず，生育 2 年目の Tim は根系を含む土供試体の強度定数が相対的に小さくなっていた。今後，牧草用草種 Tim の法面保全効果の向上には追肥の必要性なども考えられる。

ここで，生育 2 年目に大きく増大した草本植物の根系を含む土供試体の強度定数増加量（ $\triangle c \cdot \triangle \phi$ ）と根系指標との関係を検討した。生育 2 年目には，播種時期にかかわらず $\triangle c$ と節根長との間で高い相関を示し，8 月播種の場合には土供試体内に節根が存在することで粘着力 c は増大していた（図-3(a)）。また， $\triangle \phi$ と側根長との間にも高い相関が認められ，土供試体内に十分な側根が伸長した場合に緊縛力が発生し，8 月播種の場合には側根が $500 \sim 700 \text{ cm}$ 程度以上伸長することでせん断抵抗角 ϕ は 1° 以上増大することが確認できた（図-3(b)）。

4. おわりに

この報告では、令和 6 年度受託研究「営農環境に調和した法面保護工（植生工）の効果の検討」の最終年として、北海道東部の牧草地および周辺における「牧草用草種チモシー Tim」の法面緑化への適用可能性に加えて、「産業管理外来種トールフェスク TF」を含めた法面緑化に用いる仕様植物の代替種としての適用可能性について検証した。

北海道十勝管内中央部において、播種工の仕様植物 3 種類（KBG・CRF・TF）・地域性種苗 RCG に加えて牧草用草種 Tim を含めた生育 1 年目・2 年目における 5 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結果を実施し、強度定数（ $c \cdot \phi$ ）を経年評価した。

生育 1 年目には牧草種 Tim は生育 1 年目に粘着力 c を増大させる一方、生育 2 年目の強度定数（ $c \cdot \phi$ ）が他種よりも小さくなっていた。経年評価を通して産業管理外来種 TF の代替種には地域性種苗 RCG の適用可能性が示唆されるなど有用な知見を集積できた。

法面保全効果が期待できる土木材料として安価かつ安定供給可能な外来草本植物を多量に使用する法面緑化から、周辺の環境と調和した生態系・種・遺伝子レベルでの生物多様性の保全に配慮された法面緑化が求められる時代へとシフトしてきている。今後、積雪寒冷地の北海道で土木工事により毎年発生する広大な法面を保全する上で、法面緑化用の草本植物の種類を含めた地域生態系への配慮も必要となってくる。

今後は、法面保全・緑化工技術の見地から、外来草本植物がもたらす法面保全効果と生物多様性保全への配慮との両立が目下の課題である。外来草本植物を用いた法面緑化に関する「北海道ガイドライン」の構築に向けて、一連の受託研究成果を含めた情報収集・意見交換を通じて有用な知見にもとづく建設的な議論を進めていく段階にきている。

引用文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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）

- 4) 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）
- 5) 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）
- 6) 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）
- 7) 宗岡寿美・内藤綾乃・山崎由理・永井晶・熊田勇斗・中島直久・木村賢人：張芝工による外来草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性と法面方位の影響，日本緑化工学会誌 51(1)，pp.7～12（2025）
- 8) 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）
- 9) 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）
- 10) 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）
- 11) 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）
- 12) 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）
- 13) 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）
- 14) 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：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（V）—，2023 年度（第 72 回）農業農村工学会大会講演要旨集，CD/ROM（2023）
- 15) 阿部かな子・宗岡寿美・中島直久・木村賢人・山崎由理・三井祐二：2 種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性と播種時期・生育期間の検討—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（VI）—，第 72 回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，pp. 16～17（2023）
- 16) 宗岡寿美・石井凱・中島直久・木村賢人・山崎由理・三井祐二：牧草地周辺の法面緑化と 5 種類の草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性—営農環境に調和した法面保護工の保全効果の検討（I）—，第 73 回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，pp. 46～47（2024）
- 17) 北海道農政部：農業土木工事共通仕様書，pp.96～98（2022）
- 18) 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）
- 19) 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）
- 20) 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.513～529（2021）

表-1 緑化用客土の物理的性質

土粒子の密度		(g/cm ³)	2.472
コンシステンシー	液性限界	(%)	66.3
	塑性限界	(%)	50.8
	塑性指数		15.5
粒 度	砂 分	(%)	43.9
	シルト	(%)	48.1
	粘土	(%)	8.0
有機物含有量*		(%)	17.7
土 性	地盤材料の 工学的分類方法		VH ₁ **

*強熱減量法による **火山灰質粘性土（I型）

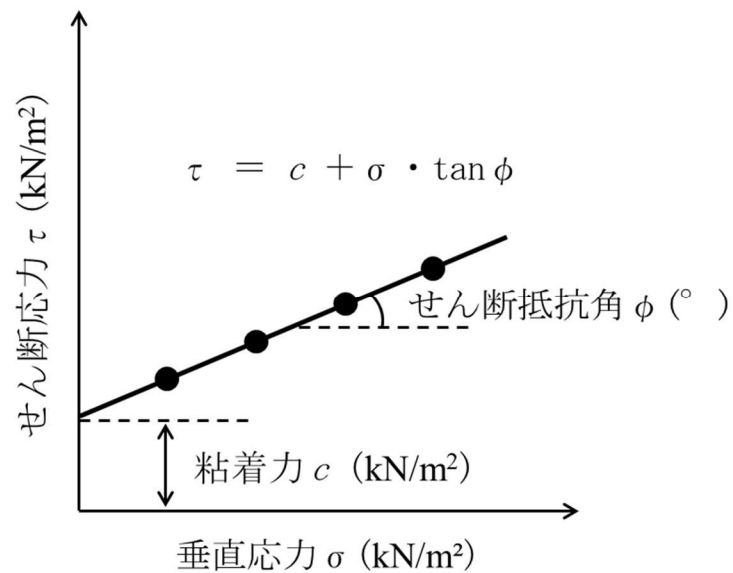


図-1 クーロンの破壊規準と強度定数（ $c \cdot \phi$ ）

表-2 生育期間中の水文・気象環境（2024）

（a）2024年5月28日設置・9月16日取り上げ

2024年	積算温度 (°C·days)	降水量 (mm)	灌水量 (mm)	全天日射量 (MJ/m ²)	日照時間 (h)	蒸発量 (mm)
5月 29～31日	34.6	10.5	10.0	42.1	10.6	2.0
6月 上旬	127.6	5.5	13.0	144.6	35.7	9.0
中旬	188.8	8.5	21.5	167.5	48.3	19.0
下旬	186.2	22.1	15.0	176.6	54.6	15.0
7月 上旬	218.5	8.5	30.0	199.0	69.8	20.0
中旬	224.6	3.5	30.0	196.0	73.1	23.0
下旬	248.2	48.5	0.0	147.0	42.6	16.0
8月 上旬	233.4	24.0	15.0	122.0	21.2	10.0
中旬	219.3	29.5	0.0	101.0	12.3	7.0
下旬	238.4	72.8	5.0	114.7	26.4	8.0
9月 上旬	201.5	1.5	10.0	144.8	65.3	13.0
11～16日	104.2	21.5	15.0	77.3	29.4	8.0
合計値	2,225.3	256.4	164.5	1,632.6	489.3	150.0

（b）2024年8月28設置・10月31日取り上げ

2024年	積算温度 (°C·days)	降水量 (mm)	灌水量 (mm)	全天日射量 (MJ/m ²)	日照時間 (h)	蒸発量 (mm)
8月 29～31日	66.9	32.0	0.0	21.7	2.4	1.0
9月 上旬	201.5	1.5	10.0	144.8	65.3	13.0
中旬	172.6	21.5	15.0	138.5	57.8	15.0
下旬	144.4	11.5	0.0	109.3	35.8	7.0
10月 上旬	142.0	36.8	0.0	91.5	40.0	4.0
中旬	103.6	20.5	0.0	106.4	60.4	6.0
下旬	99.2	29.0	0.0	104.8	73.0	2.0
合計値	930.2	152.8	25.0	717.0	334.7	48.0

表-3 生育期間，積算温度および凍結指数（2023～2024）

	生育期間	生育期間 (日)	凍結指数 (°C・days)	積算温度 (°C・days)
5月22日播種 生育1年目	2023年5月23日 ～ 2023年9月27日	128	—	2,587
8月18日播種 生育1年目	2023年8月19日 ～ 2023年10月26日	69	—	1,169
5月22日播種 生育2年目	2023年5月23日 ～ 2024年7月28日	433	702	2023：3,099 2024：1,263
8月18日播種 生育1年目	2023年8月19日 ～ 2024年8月13日	361	702	2023：1,361 2023：1,693

表-4 草本植物の茎葉部評価（2023～2024）

(a)	生育	自然	標準			乾物重 (茎葉部)	植被率	
	株数 (株/箱)	草高 (cm)	偏差	(cm)			綠色 (%)	綠色＋黄色 (%)
5月22日播種・生育1年目								
KBG	2	46.4	±	8.7		14.2	26.8	33.7
CRF	40	6.3	±	1.9		7.1	40.8	46.6
TF	10	29.0	±	8.8		26.6	54.6	67.5
RCG	128	23.6	±	8.4		85.2	62.2	68.4
Tim	1	25.7				6.7	38.7	42.3
8月18日播種・生育1年目								
KBG	150	1.7	±	0.6		3.6	18.0	25.0
CRF	300	3.8	±	1.3		15.0	75.8	78.2
TF	303	7.9	±	3.0		16.5	72.0	74.3
RCG	309	12.8	±	5.0		29.8	70.3	82.2
Tim	219	7.9	±	3.3		13.6	59.5	66.5

(b)	生育	自然	標準		草丈	標準 偏差	乾物重 (茎葉部)	植被率		
	株数 (株/箱)	草高 (cm)	偏差	(cm)				綠色 (%)	綠色＋黄色 (%)	
5月22日播種・生育2年目										
KBG	96	28.1	±	17.4	30.0	±	19	86.4	60.6	62.5
CRF	61	23.7	±	7.0	42.4	±	21	135.9	55.9	81.2
TF	82	66.6	±	31.3	76.4	±	31	282.4	67.2	84.4
RCG	88	51.6	±	14.2	55.9	±	21	155.7	57.7	76.6
Tim	127	42.1	±	29.9	46.7	±	31	170.5	53.5	61.4
8月18日播種・生育2年目										
KBG	112	9.5	±	2.7	11.5	±	3.1	29.0	51.5	57.8
CRF	100	44.7	±	14.7	60.6	±	17.2	176.3	65.8	75.0
TF	105	37.2	±	15.8	51.3	±	19.8	269.4	91.2	94.6
RCG	323	25.3	±	15.4	27.2	±	15.4	113.3	77.5	83.2
Tim	98	34.0	±	19.0	35.8	±	19.5	52.7	33.3	38.2

表-5 土供試体の一面せん断試験結果（生育1年目，2023）

	粘着力 c (kN/m ²)	せん断 抵抗角 ϕ (°)	含水比 (%)	w
			平均値	範囲
<u>5月22日播種・生育1年目</u>				
KBG			66.7	
CRF	1.03	26.3	54.2	55.3 ～ 55.7
TF	1.21	25.9	54.6	52.9 ～ 56.3
RCG	1.84	25.5	59.3	58.8 ～ 60.7
Tim			61.3	
ブランク	0.45	25.1	63.8	63.0 ～ 64.7
<u>8月18日播種・生育1年目</u>				
KBG	0.76	32.2	62.3	60.7 ～ 63.8
CRF	1.23	31.6	60.2	59.8 ～ 60.4
TF	1.09	31.7	55.2	54.2 ～ 55.8
RCG	1.21	31.6	58.4	53.8 ～ 60.8
Tim	1.14	31.3	59.2	56.8 ～ 61.6
ブランク	0.64	31.3	61.1	60.9 ～ 61.4

*土供試体（3～4個）中の平均値

表-6 土供試体の一面せん断試験結果（生育2年目，2024）

	粘着力 c (kN/m ²)	せん断 抵抗角 ϕ (°)	含水比 (%)	w
			平均値	範囲
<u>5月22日播種・生育2年目</u>				
KBG	0.78	33.2	57.2	50.0 ～ 61.1
CRF	1.44	36.2	50.0	46.3 ～ 53.1
TF	1.44	33.1	49.2	45.3 ～ 51.5
RCG	1.72	34.2	49.5	46.3 ～ 52.3
Tim	1.10	32.9	52.7	48.1 ～ 59.1
ブランク	0.13	30.4	64.5	63.7 ～ 65.6
<u>8月18日播種・生育2年目</u>				
KBG	0.68	28.6	53.4	49.1 ～ 56.3
CRF	2.48	34.2	47.8	39.4 ～ 55.0
TF	1.81	30.8	45.0	40.9 ～ 47.3
RCG	2.45	32.5	49.5	46.7 ～ 52.6
Tim	1.45	29.9	47.5	46.0 ～ 48.4
ブランク	0.43	27.1	55.9	54.9 ～ 56.8

*土供試体（3～5個）中の平均値

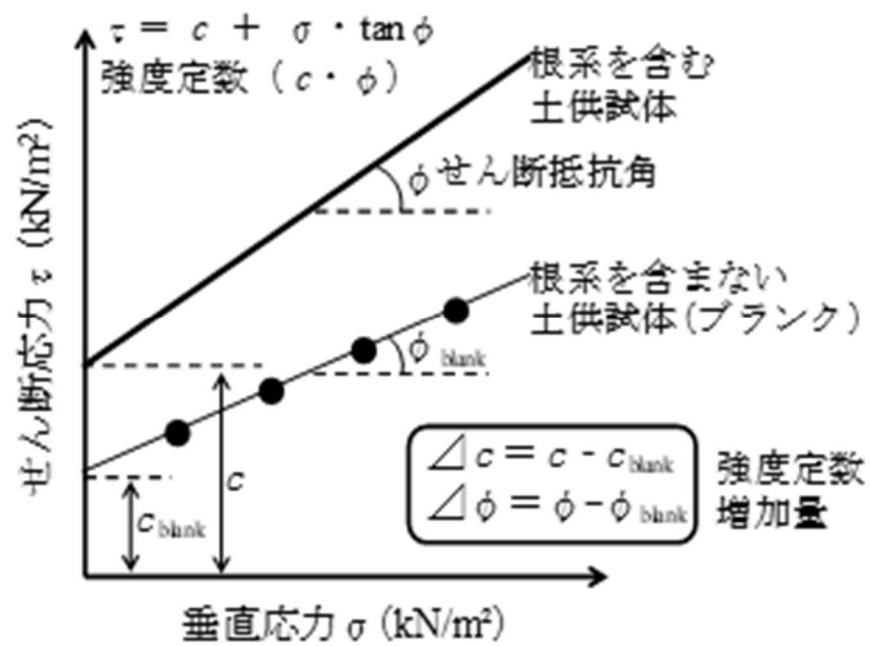
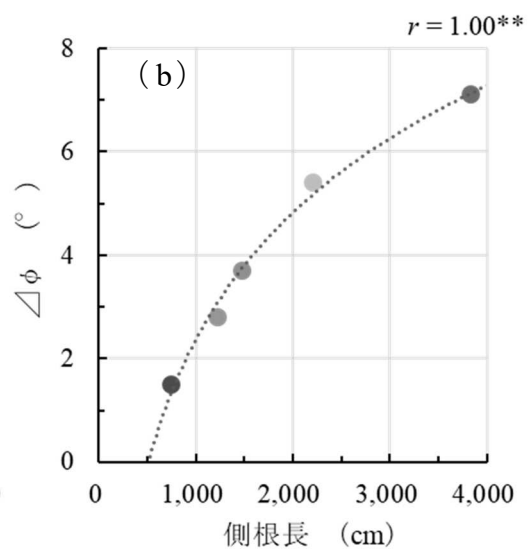
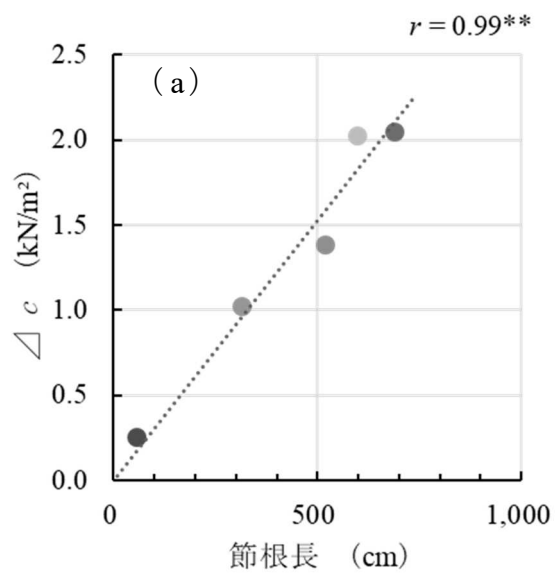


図-2 強度定数増加量 ($\Delta c \cdot \Delta \phi$) の考え方

表-7 強度定数増加量と根系指標の経年評価（2023～2024）

(a)	粘着力 増加量 $\triangle c$ (kN/m ²)	せん断抵抗角 増加量 $\triangle \phi$ (°)	総根長 (cm)	節根長 (cm)	側根長 (cm)	節根率 (%)	側根率 (%)	乾物重 (根系) (g/供試体)
5月22日播種・生育1年目								
KBG			236.8	149.0	87.8	62.9	37.1	0.067
CRF(1株)	0.58	1.2	361.5	153.9	207.6	42.6	57.4	0.018
CRF(複数株)			667.6	337.1	330.5	50.5	49.5	0.073
TF(1株)	0.76	0.8	284.1	151.3	132.8	53.3	46.7	0.062
TF(複数株)			709.8	406.5	303.3	57.3	42.7	0.165
RCG(1株)	1.39	0.4	892.1	482.5	409.6	54.1	45.9	0.142
RCG(複数株)			1,179.3	688.4	490.9	58.4	41.6	0.252
Tim			503.8	345.4	158.4	68.6	31.4	0.138
8月18日播種・生育1年目								
KBG	0.12	0.9	245.4	150.0	95.4	61.1	38.9	0.026
CRF	0.59	0.3	505.5	296.9	208.6	58.7	41.3	0.048
TF	0.45	0.4	291.5	167.8	123.7	57.6	42.4	0.066
RCG	0.57	0.3	479.7	232.6	247.1	48.5	51.5	0.134
Tim	0.50	0.0	438.9	210.7	228.2	48.0	52.0	0.078
(b)	粘着力 増加量 $\triangle c$ (kN/m ²)	せん断抵抗角 増加量 $\triangle \phi$ (°)	総根長 (cm)	節根長 (cm)	側根長 (cm)	節根率 (%)	側根率 (%)	乾物重 (根系) (g/供試体)
5月22日播種・生育2年目								
KBG	0.65	2.8	1,176.3	177.2	999.1	15.1	84.9	0.325
CRF	1.31	5.8	2,583.4	268.7	2,314.7	10.4	89.6	0.598
TF	1.31	2.7	1,908.3	361.3	1,547.0	18.9	81.1	0.566
RCG	1.59	3.8	2,482.6	852.0	1,630.6	34.3	65.7	0.691
Tim	0.97	2.5	1,346.2	252.4	1,093.8	18.7	81.3	0.757
8月18日播種・生育2年目								
KBG	0.25	1.5	804.3	57.0	747.3	7.1	92.9	0.101
CRF	2.05	7.1	4,523.7	686.7	3,837.0	15.2	84.8	0.695
TF	1.38	3.7	1,993.6	519.5	1,474.1	26.1	73.9	0.381
RCG	2.02	5.4	2,811.1	597.6	2,213.5	21.3	78.7	0.593
Tim	1.02	2.8	1,535.9	314.2	1,221.7	20.5	79.5	0.195



● KBG ● CRF ● TF ● RCG ● Tim

図-3 強度定数増加量と根系指標との関係
(2024年8月18日播種・生育2年目の一例)