樹木根系の有する崩壊発生抑制力の簡易評価手法の確立に向けて

信州大学農学部　○林　由佳
信州大学学術研究院農学系　平松　晋也

1.　はじめに

スギの水平根を対象として実験室内で引張試験を実施することにより，根系の有する崩壊発生抑制力の定量的評価を試みた。そして，崩壊発生抑制力評価のために従来より実施されてきた根系の現地引き抜き試験に伴う作業負荷の軽減を目的として，室内での根系引張試験に基づく崩壊発生抑制力評価手法を提示するとともに，その妥当性を検証した。

2.　試験地の概要と室内引張試験の方法

信州大学農学部付属手良沢山ステーション内の 56 年生のスギ林内で採取したスギの水平根を対象として室内引張試験を実施した。引張試験では，引張試験機を用いて，根系を一定の速度で引っ張り，その抵抗力の時間変化を計測し，試験終了時には根系の破断部の直径を計測した。

3.　根系の室内引張試験結果

209本の根系に対し室内引張試験を実施し，プーリンググリップからの脱落やプーリンググリップの破断などが発生せず，試験が成功した 59 本の試験結果を解析に使用した。塚原（2022）により実施された，スギ根系を対象とした現地引き抜き試験と同様に室内引張試験においても，引張試験開始後の時間経過とともに根系の抵抗力は直線的に増加し，根系が破断する直前に最大抵抗力を示し，破断直後には抵抗力が 0 となる抵抗力–変位曲線が確認された（図-1）。また，根系の直径の増加とともに最大抵抗力：F_{max} が増加し，破断時間：T_{max} は遅くなる事実が確認された。

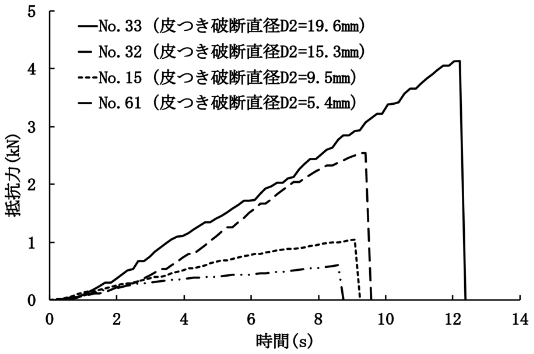

図-1 抵抗力の時間変化の例

4.　根系の有する抵抗力の時間変化モデルの構築と妥当性の検証

スギの水平根に対する室内引張試験により得られた皮つき破断直径：D_2 と破断強度（最大抵抗力）：F_{max} および破断時間：T_{max} との関係を図-2 に示す。破断強度：F_{max} と破断時間：T_{max} は，皮つき破断直径：D_2 を説明変数として(1)，(2)式を用いてそれぞれ近似可能となる。

$$F_{max} = 0.019 \cdot {D_2}^{1.8} \quad (1)$$

$$T_{max} = 4.12 \cdot {D_2}^{0.35} \quad (2)$$

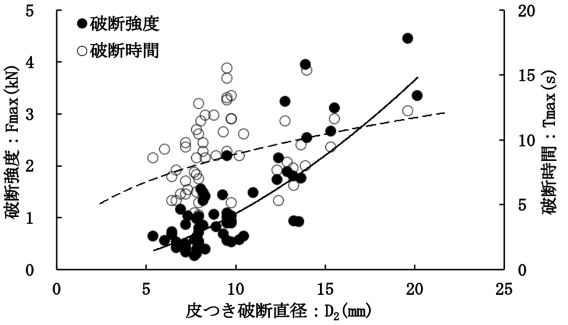

図-2 破断直径：D_2 と破断強度：F_{max}，及び破断時間：T_{max} の関係

(1)式により得られる破断強度：F_{max} は，室内引き抜き試験で得られた実測値を概ね良好に再現しているのに対し，破断時間：T_{max} については，室内引き抜き試験で得られた実測値にばらつきがあり，(2)式により得られる破断時間：T_{max} の再現精度は若干劣っていることがわかる。

室内引張試験結果（図-1）を考慮し，根系の抵抗力は破断強度：F_{max} を示す破断時間：T_{max} まで直線的に増加するものと仮定し，再現性を向上させるための補正係数（0.59）を加味して，引張試験開始後の任意の時刻 t での根系（単根）が発揮する抵抗力：F(t)を(3)式を用いて算出した。

$$F(t) = \frac{F_{max}}{T_{max}} \cdot t \cdot 0.59 \quad (3)$$

(1)～(3)式を用いて個々の根系に対して得られる抵抗力を，(4)式に代入することにより根系の総抵抗力：TF(t)（崩壊発生抑制力）の時間変化を求めた。

$$TF(t) = \Sigma F(t) \quad (4)$$

塚原（2022）によって根系の現地引き抜き試験が実施されたトレンチ断面No.1を例として，(1)～(4)式で構成される根系の抵抗力の時間変化モデル（以下，本モデル）により得られた崩壊発生抑制力の経時変化と現地引き抜き試験により得られた実測値を図-3 に，現地引き抜き試験を実施したトレンチ断面 No.1～6 での崩壊発生抑制力の最大値について再現値と実測値を比較したものを図-4 にそれぞれ示す。図-3 より，本モデルにより崩壊発生抑制力の経時変化が概ね良好に再現可能となることがわかる。また，図-4 より，断面内に多くの礫が確認されたトレンチ断面 No.4 を除き，各断面における再現値は実測値に対して 84～121%の範囲内にあり，下流方向に伸長する水平根の崩壊発生抑制力（総抵抗力）に対する本モデルの再現性は概ね良好である事実が確認された。

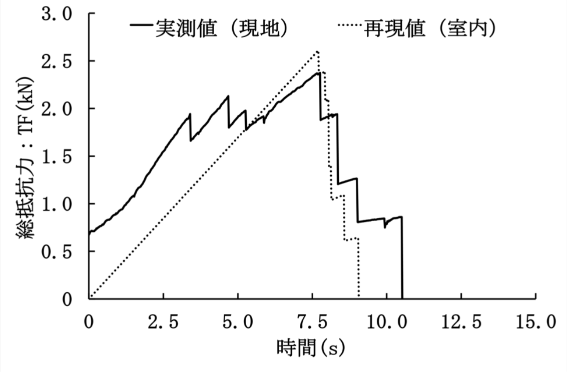

図-3 断面 No.1 の崩壊発生抑制力の時間変化

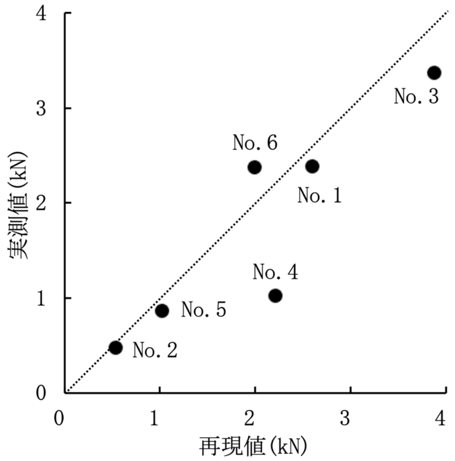

図-4 各断面の最大崩壊発生抑制力

5. 斜面安定解析

根系の現地引き抜き試験が実施された根系 27 本が同一土層断面上に存在すると仮定し，本モデルを適用することにより得られた根系の崩壊発生抑制力を用いて，(5)式を用いて斜面安定解析を実施した。崩壊発生抑制力は，せん断抵抗力の補強分としてせん断抵抗力に加算した。斜面安定解析での入力条件を表-1 に示す。

$$Fs = \frac{C + \sigma_o \cdot cos^2\beta \cdot tan\emptyset + TF_{max}}{\sigma_o \cdot sin\beta \cdot cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

ここに，Fs：斜面の安全率，C：土の粘着力(kN/㎡)，ϕ：土の内部摩擦角（°），σ_o：鉛直応力（kN/㎡），TF_{max}：樹木根系による崩壊発生抑制力（総抵抗力）の最大値(kN/㎡)，β：斜面勾配（°）である。

斜面安定解析の結果，本モデルを適用した場合の安全率：Fs は 4.26 となり，実測値（3.74）の 1.14 倍程度と若干過大評価となる事実が確認された。本モデルによる崩壊発生抑制力と安全率の再現値が，現地引き抜き試験による実測値より若干過大となった原因としては，室内引張試験では曲がりがない直線形状をした根系を用いたこと，また根系採取後から室内引張試験開始までに根系が若干乾燥してしまったという事実が挙げられる。

表-1 斜面安定解析への入力条件

深度	土層厚 Δd(m)	湿潤密度 ρ_t(g/cm^3)	粘着力 C(kN/ m^2)	内部摩擦角 ϕ(°)
A層	0.3	0.80	7.49	33.34
B層浅部	0.3	1.20		
B層深部	0.4	1.38		

6. おわりに

本研究において提示した(1)～(4)式で構成される根系の抵抗力の時間変化モデルによる再現精度には少なからず改善の余地が認められるものの，崩壊発生抑制力の簡易評価手法としては概ね妥当と判断された。本モデルでは従来実施されてきた根系の現地引き抜き試験に伴う作業の省力化が可能となるものの，本モデルを用いる場合でも根系の直径や根系分布の情報は必要となるため，依然として山地斜面でのトレンチ断面掘削が必要となる。今後はトレンチ断面掘削を行うことなく根系の直径と根系分布の情報が推定できるよう，胸高直径や樹齢と根系の直径との関係を把握することで，樹種の相異をはじめとして胸高直径や樹齢の情報を用いて根系の直径が推定可能となる手法を構築する必要がある。また，本研究で提示した根系の抵抗力の時間変化モデルの再現精度をさらに向上させるために，(3)式に用いた補正係数を再検討する必要がある。さらに，今後は他の樹種に対しても同様の検討を行い，本手法の適用の可否について考察を加えていく予定である。