

樹木根系の引張り強度特性と法面補強効果に関する一考察

Characteristics of Tree Root Strength and Effects of Tree Roots on the Slope Stability

杉山太宏 (すきやま もとひろ)

東海大学工学部助教授 土木工学科

福田耕司 (ふくた こうじ)

東海大学大学院土木工学専攻

大塚泰洋 (おおつか やすひろ)

㈱京葉カス 人材開発センター

赤石 勝 (あかいし まさる)

東海大学教授 工学部土木工学科

1. はじめに

環境問題がクローズアップされるようになって、法面緑化の目的や方法が次第に変わりつつある。近年の植生工では、生態系や景観に配慮して外来種の代わりに在来種(郷土種)による播種やポット苗が推奨されるようになり、木本による法面の樹林化も行われている¹⁾。日本道路公団では、CO₂ 吸収のための緑地として、盛土法面のみならず切土法面も積極的に樹林化するとしている²⁾。また、道路土工-のり面工・斜面安定工指針が、平成11年3月、約13年ぶりに改訂され、新たに環境・景観に関する調査から維持管理までが追記された³⁾。植生工の緑化目標の設定や工法の選定方法など、より細かく記述されるとともに、法面緑化の目的は侵食防止効果に加え、根系の緊縛力による土壌の補強効果であることが明記されている。しかしながら、根系の補強効果をどのように設計に反映させるのかは記述されていない。根系の伸張が生育環境(気象、地盤条件など)に影響されること、すなわち、生物であるがゆえの不確定要素がその大きな理由と考えられる。

ところで、農林業の分野では、自然斜面を対象にした根系の補強効果に関する数多くの研究が報告されている。これらの成果を踏まえ、土木あるいは地盤工学の見地から更なるデータ収集を行って、人工法面の補強効果を解明することが、今後に残された大きな課題である⁴⁾。

本論文では、まず樹木根系の緊縛力に関する既往の研究成果を概観した。次に根系の材料特性を調べることを目的に、14種の樹木から採取した単一根の引張り試験を行って、引張り強度特性の違いを検討した。また、根系の補強効果(せん断強さ)と斜面安定解析について考察した。

2. 樹木根系の緊縛力に関する既往の研究

根系の緊縛力には、単一根の引抜き抵抗力、引張り抵抗力、せん断抵抗力が考えられる^{4),5)}。これらが外力に対して同時に、あるいは個別に効力を発揮するものと考えられる。緊縛力は、根系全体の緊縛力として樹木の引抜き(引倒し)試験、崩壊すべり面に残存した根系や室内模型に設置した根に対する引抜き試験、根の引張り抵抗力(強度)を調べる引張り強度試験、原位置あるいは

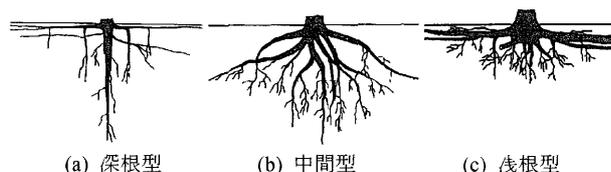


図-1 根の張り方による樹木根系の分類

室内での直接せん断試験などによって調べられている。

豪雨などに起因する山崩れや倒木の危険性、あるいは農林地開発の抜根や集材機用アンカーとしての根株強度を評価するために引倒し試験が行われ、根全体の抵抗力による根系の抑止機能とその効果が調べられている^{6)~9)}。植林されたスギ等の人工林を対象にしたものが多いが、道路の切土法面に進入した樹木に対する報告もある^{10)~12)}。

塚本⁴⁾、阿部⁵⁾は崩壊した自然斜面の観察結果に基づいて、単一根の引抜き試験が緊縛力の評価には最適と考え、引抜き試験結果を利用した斜面安定機構を説明している。

O'Loughlin (オルグリッ)ら¹³⁾、中根ら¹⁴⁾、野々田ら¹⁵⁾、陶山ら¹⁶⁾は、生木あるいは伐採木単一根の引張り抵抗力を調べた結果、伐採後、時間の経過に伴い急激に低下することを報告している。しかし、試験方法が確立されていないので、それぞれが独自の方法を採用している。

原位置や室内で行われた根系を含む地盤材料(主に砂質土)の直接せん断試験では、見かけの粘着力 c が増加する^{17),18)}、あるいはせん断抵抗角 ϕ が増加する¹⁹⁾等の知見が得られている。

これらの試験結果は主に自然斜面の植林木を対象で、調査樹種数は決して多いと言えない。在来種による法面緑化が推奨される現状を踏まえ、樹種の違いによる緊縛力の比較検討も必要と思われる。

3. 引張り強度試験の方法ならびに結果と考察

3.1 樹種の選定

樹木の分類方法としては、針葉樹と広葉樹、常緑樹と落葉樹などが良く知られている。苅住は、樹木根系に関して膨大な調査を行い⁶⁾、各樹種の根鉢形状によって計9種類に大別し分類している。本研究では、根の張り方

論文

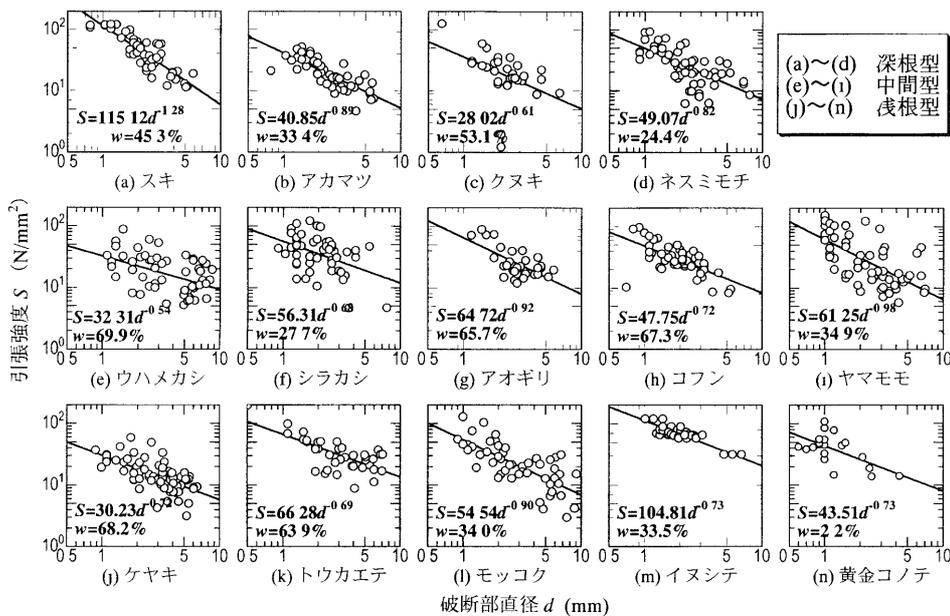


図-2 根系の引張強度 S と直径 d

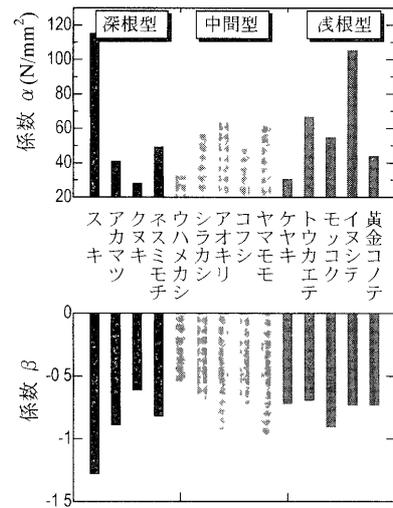


図-3 係数 α と β の比較

によって図-1のような深根型、中間型、浅根型の3タイプに分類し、引張り強度特性の差異について調べた。

樹種は、深根型のスキ、アカマツ、クヌキ、ネスミモチ、中間型のウハメカシ、シラカシ、アオギリ、コフシ、ヤマモモ、浅根型のケヤキ、トウカエテ、モッコク、イヌシテ、黄金コノテの計14種である。これらは、大学校内に植樹された樹齢25年から30年（黄金コノテは苗木）の樹木で、根系は根元から1, 2 mの地点を約50 cm掘り返して採取したので、ほとんどか水平根である。

3.2 実験方法²⁰⁾

本研究で使用した試験装置は、一般的な材料引張り試験機 (AUTOGRAPH (AG-E 100 kN)) で、根を拘束するつかみ部は、平チャック型の既製品である。直径 $d = 10 \text{ mm}$ 以下¹⁵⁾、長さ14 cm以上の採取根を対象とした。根に付着した土を水で洗い落とし、両端の樹皮をはいた後、接着剤を蒔いたアルミパイプ (直径10 mm、長さ3 cm) に根を挿入して固結した²¹⁾。供試根を試験機つかみ部にセットし引張り速度10 mm/minで引張して、破断時の引張り抵抗力、伸長量と切断部の皮付き直径を測定した。

3.3 実験結果と考察

破断時の引張り力を破断した根の断面積で割って引張り強度 S と定義し、直径 d との関係を示したのが図-2である。上段から深根型、中間型、浅根型の結果で、図中の w は試験後に測定した水分量の平均値、直線は引張り強度の回帰結果 ($S = \alpha d^\beta$) である²²⁾。引張り強度は、3~150 N/mm²の範囲に広く分布し、全体的に相関性が高いとは言えない。しかし、根系の強度が、直径の増加とともに低下する傾向はすべてに共通している。また、破断時の伸び量は3~15 mmにはらついたが、直径には関係なく平均的に10 mm程度であった。

図-3は、図-2に示した回帰式の係数 α と β を樹木ことに比較したものである。直径1 mmの強度を表す α は、樹種によって4, 5倍の差があるものの (スキと

イヌシテを除く)、傾き β では最大でも2倍ほどである。また、両係数とも根の張り方による特徴は見当たらず、これら14樹種の範囲では、引張り強度と根の張り方の相関性は低いと考えられる。なお、水島ら²³⁾も、道路緑化木35種に対して引張り抵抗力を調べ、根の張り方などには相関のないことを示している。

樹木根系を表層法面の補強材と捉えたと、根系の強度に樹種による大きな違いがなければ、設計上は単純化できて便利である。斜面の安定解析にはずへり面周辺の根量の推定や根量とせん断強度の定量化が必要なため⁴⁾、引張り強度に加えて根系を含んだ土のせん断強度特性のデータを集めることが重要である。

4 根系を含む地盤のせん断強度と斜面安定

4.1 根系の補強効果と斜面安定

一般に、盛土法面は時間の経過とともに安定化に向かい、切土法面では不安定化に向かうと言われている。樹林化によって根系の補強効果が期待できるのは、施工後数年以上経ってからであろう。したがって、法面の表層崩壊に対しては、この点を十分考慮する必要がある。

ところで、極限釣合い法による斜面の安定計算で粘着力 c をゼロとすると、図-4のような表層付近 (Oを中心とする円弧) の安全率が最小値を示すことかある。垂力応力 σ の小さい表層部では、わずかな粘着力を与えることにより最小安全率の発生を阻止できる。砂質土を中心とした既往の研究では、根系か土の粘着力を増加させるとするものが多く、表層崩壊の抑止効果として安定計算上は有効と思われる。

4.2 三軸 CU 試験による関東ロームの強度定数²⁴⁾

粘性土に対する根系の補強効果を調べる目的で行った再構成した関東ロームの CU 試験結果について述べる。詳細は文献²⁴⁾を参照されたい。図-5は再構成したローム供試体への根系の設置方法で、実根の代わりに風糸を使用した。風糸を設置したいすれのケースも、上

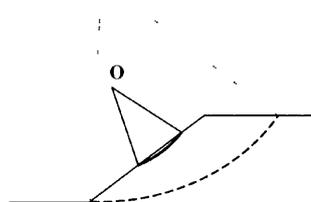
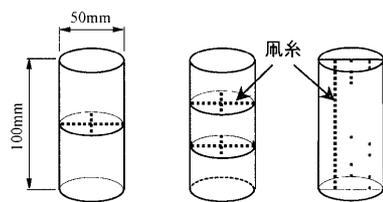


図-4 斜面安定解析の円弧すべり面

図-5 根系の設置方法²⁵⁾

下 側面排水で圧密し、試料下部で測定した圧密後の間隙圧係数 B は 0.97 以上であった。図-6 は、根系の有無による有効応力経路を比較したものである。圧密圧力によらず根系を設置することによって最大軸差応力 q (非排水せん断強度) が増加し、限界状態線は根系の設置によって上方に平行移動している。有効応力に関するローム単体の強度定数は $c' = 0$, $\phi' = 37.2^\circ$, 横 2 分割では c' が 10 kN/m^2 に増加した。根系の結果ではあるが、根系が粘性土の粘着力 c' を増加させる可能性を示唆している。

5. おわりに

根系の引張り強度特性が根の張り方や樹種によって分類可能かどうかを調べたが、今回の 14 種には明確な違いが見られなかった。根系の強度特性を分類できる他のパラメーターの有無について更に調べる必要があるが、引張り強度の最低値、もしくは平均値と根系を含む地盤のせん断強度増加量の相関性を調べることが重要である。

根系による地盤の補強効果をプラス要因とすれば、緑化、特に樹林化によるマイナス要因も考えられる。例えば、風による樹木の振動により地盤のせん断強さを低下させる、道路法面上の樹木では強風時の倒木などである。プラス要因とマイナス要因に関する力学的・工学的な裏付けと解明がなされて初めて、体系化された法面緑化(樹林化)手法が構築されると思われる。

なお、本研究は、平成 13 年度文部科学省科学研究費補助金(奨励研究(A) 13750478)ならびに東海大学総合研究機構研究奨励補助金を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 笛木 坦 松下 潤 丘陵地の宅地造成と自然生態系の保全, エコ シビルエンジニアリング読本, 土木学会誌 [別冊増刊], Vol 77~79, pp 62~65, 1992
- 2) 上村恵也 グリーンハイウェイ宣言, 日本緑化学会誌, 特集「行政における緑化の取り組み」, Vol 26, No 2, pp 29~33, 2000
- 3) ㈱日本道路協会 道路土工-のり面工 斜面安定工指針, 1999
- 4) 塚本良則 森林は斜面崩壊の抑止にとれたけ役立っているか, 森林科学, No 3, pp 45~51, 1991
- 5) 阿部和時 樹木根系が持つ崩壊防止機能の評価方法に関する研究, 森林総研研報, No 373, pp 105~181, 1997
- 6) 刈住 昇 樹木根茎図説, 誠文堂, pp 101~111, 1980
- 7) 中村英碩 林業機械の効果的作業技術, 林業試験場研究報告, 第225号, pp 1~29, 1969
- 8) 玉手三葉寿 櫻山徳治 笹沼たつ 高橋亀久松 立木引

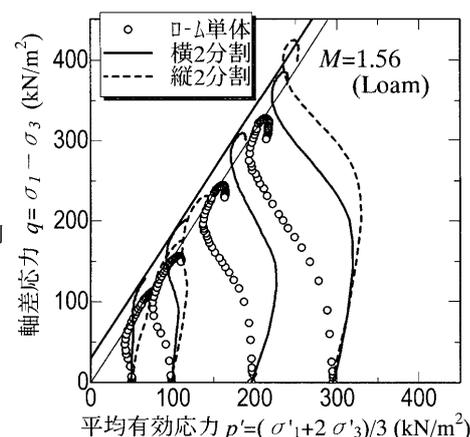


図-6 根系設置による有効応力経路の比較

き倒し試験, 日本林学会誌, Vol 47, No 5, pp 210~213, 1965

- 9) 北村嘉一, 難波宣土 抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能, 林業試験場研究報告, 第313号, pp 175~208, 1981
- 10) 清宮 浩 切土のり面侵入木の耐風強度に関する調査, 道路と自然, Vol 16, No 2, pp 38~42, 1991
- 11) 草野 信 樹木の道路のり面に及ぼす影響調査, 日本道路公団試験所報告, pp 216~223, 1980
- 12) 前田浩之助 杉山太宏 赤石 勝 切土斜面上に侵入, 成長した傾斜樹木の引抜き抵抗力, 日本緑化学会誌, Vol 25, No 4, pp 311~316, 2000
- 13) O'Loughlin, C L A study of tree root strength deterioration following clearfelling, Can J For Res, pp 107~113, 1974
- 14) 中根周歩 中川勝範 高橋実樹 アカマツの山火枯死腐朽に伴う引張強度の低下, 日本林学会誌, Vol 65, No 5, pp 155~165, 1983
- 15) 野々田稔郎 林 拙郎 川邊 洋 根系の引張強度と曲げ強度から推定した樹木根系の斜面安定効果, 日本林学会誌, Vol 76, No 5, pp 456~461, 1994
- 16) 陶山正憲 原 敏男 樹木根系の工学的評価に関する実験的研究 (I) - 木質根系の引張強度特性について, 昭和61年度砂防学会研究発表会概要集, pp 246~249, 1986
- 17) 遠藤泰造 鶴田武雄 樹木の根か土のせん断強さに与える作用, 林試北支年報, pp 167~181, 1968
- 18) 矢田部龍一 八木則男 須賀幸一 榎 明彦 根系による土の補強効果と斜面安定への寄与, 第4回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp 197~200, 2001
- 19) 小橋澄治 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, Vol 10, No 3, pp 14~19, 1983
- 20) 福田耕司 上杉 聡 杉山太宏 赤石 勝 樹木根系の引張強度特性, 土木学会第29回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp 1038~1039, 2002
- 21) K Abe and M Iwamoto An Evaluation of Tree-Root Effect on Slope Stability by Tree-Root Strength, J Jpn For Soc, Vol 68, No 12, pp 505~510, 1986
- 22) Wu, T H, Mckinnell III, W P and Swanston, D N Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska Can Geotech J 16, pp 19~33, 1979
- 23) 水島秀二 山辺正司 樹種別に見た樹木根系の抗張力の検討, 第32回日本緑化工学会大会, pp 157~160, 2001
- 24) 前田浩之助 杉山太宏 赤石 勝 人工樹木根系を含む関東ロームの非排水せん断強度特性, 東海大学紀要工学部, Vol 37, No 1, pp 155~160, 1997

(原稿受理 2003 2 7)