

森林根系の崩壊防止機能—力学的評価法—

信州大学農学部森林科学科 北原 曜

1. 森林根系の力学的評価法

森林根系の崩壊防止機能を初めて力学的に評価した研究は、遠藤泰造・鶴田武雄（1969）です。原位置剪断試験により、根系の剪断抵抗力補強効果はクーロン式の粘着力増分として表されることを示しました。すなわち、 τ を剪断抵抗力、 σ を上載荷重、 ϕ を土の内部摩擦角、 C を土の粘着力、 ΔC を根系による粘着力増分（つまり補強強度）とすると

$$\tau = \sigma \tan \phi + C + \Delta C$$

その後1970～80年代にかけて、上記研究をもとに米国を中心として根系の力学的評価研究が始まりました（Swanston 1970、O' Loughlin 1974、1982、Burroughs and Thomas 1979、Gray and Megaham 1981、Waldron and Dakessian 1981）。我が国でも1970年前後より、根系の力学的評価研究が始まりましたが、立木の幹あるいは切り株を引っ張る試験による抜根抵抗力を測定する事例が多く（北村・難波 1968、1981、勝見 1971など）、クーロン式のような物理的評価を行ったものではありませんでした。しかし、1977年ころより根系を含めた土壌の現場剪断試験あるいは室内剪断試験および原位置引き抜き試験が行われるようになりました（河野 1977、薄井ほか 1983、1984、塚本ほか 1984、阿部ほか 1986など）。その結果、根系の原位置引き抜き試験は根系の剪断抵抗力補強強度としての粘着力増分の評価法としてふさわしいものであること、根系量を土壌単位体積あたり、あるいは土壌単位断面あたりで求め、1本あたりの引き抜き抵抗力を乗じて加算していくことにより、単位面積あたりの補強強度が算出できることが分かってきました。

すなわち、 N を直径階別本数、 P をその直径階の引き抜き抵抗力とすると、

$$\Delta C = k \sum (N_i \cdot P_i)$$

ここで、係数 k （=1.12）についてですが、崩壊時にすべり面では、根系は引き抜き抵抗力として作用しますが、崩壊時はすべり面に垂直方向に引き抜かれるのではなく、崩壊力方向に傾斜して引き抜かれます。そのため、垂直方向の引き抜き抵抗力の112%となることが実験的に確認されています（Wu 1979）。

一方、引き抜き抵抗力測定は大変な労力が必要とされることから、材料試験機（万能試験機）を用いて根系試験片の引張り強度を調べることも行われています（中根ほか 1983、森岡ほか 1987、陶山ほか 1988など）。しかし、この方法は根系の引っ張り破断の測定にはなっても、実際の引き抜き時の根系の作用（引き抜けと破断が発生し土粒子との摩擦抵抗が生じると考えられる）を反映したものとは言い難く、また根系試験片作成時に周囲の樹皮などを削剥してしまうため、自然状態の引き抜き状態ではありません。また、試験片の乾燥などによる強度変化も考えられます。さらに、原位置剪断試験は効率が大変悪いこと、土壌の粘着力と根系の粘着力増分の合計が得られ、根系の補強強度だけを直接測定できません。

以上のように ΔC を求めるためには、原位置引き抜き抵抗力と根系分布を測定することが最も効率的な方法であります。しかし、この方法は、土壌を掘削し根系の直径階別本数を測定すること、あるいは根系を

全て抜き取り空間分布を調べることに、根系直径(Dmm)と引き抜き抵抗力(Tkgf/mm)の関係曲線を作成する必要があります。

T~D関係は、a、bを係数とすると

$$T=aD^b$$

で表されることが多くあります。それは引き抜き時に根系が引き抜け形態をとらず、根系を挟んで引っ張る作用点で破断が起きた場合は、破断強度(引っ張り強度)が根系断面積に比例するならば根系直径Dの2乗をとるはずですが、実際は破断と引き抜けが発生し、破断の場合も作用点より深部の細い部分で破断することが多いため、b値は通常2以下です。一方、a値は根系断面の単位面積あたりの引っ張り強度を表していると考えられ、樹種の違いが反映されているものと考えられています。



写真.1 根系引き抜き試験(信州大学農学部付属演習林内)

2. 引き抜き抵抗力の樹種による違い

引き抜き試験は、これまでスギやヒノキなど特定の樹種で測定されたものが報告されています。過去の測定例は必ずしも多いものではありませんが、以下にこれまで原位置引き抜き試験で得られたa、b値を紹介します。

表. これまでの原位置引き抜き試験で得られた引き抜き抵抗力のa、b値

	a	b	直径10mmの 引き抜き抵抗力	文 献
スギ	3.221	1.338	70.14	盛岡ほか1989
スギ	4.31	1.48	130.16	石垣ほか1989
スギ	12.94	1.08	155.57	同
スギ	1.98	1.6	78.83	阿部ほか1996
トドマツ	0.875	1.71	44.87	神原ほか2002(垂直根のみ)
アカマツ	1.09	1.70	54.63	北原ほか2002
ヒノキ	1.248	1.801	78.92	野毛ほか2002
ヒノキ	2.348	1.682	112.90	相馬2004(自然含水状態)
ヒノキ	1.587	1.694	78.45	同(飽和状態)
カラマツ	1.253	1.463	36.39	久保田2005
コナラ	4.01	1.41	103.07	石垣ほか1989
広葉樹	1.13	1.74	62.10	北原ほか2002
スギ、広葉樹	2.80	1.45	78.91	塚本1987(樹種で差がない)

※文献は末尾参照

以上のように、a値は0.875～12.94までばらつきがありますが、これはデータ数が少ない場合が含まれているためで、データ数の多いものを拾って平均してみると、スギ3.1、ヒノキ1.8、カラマツ1.3、アカマツ1.1、広葉樹2.6となります。このようなa値の違いは前述のように樹種の材質の違いを反映しているものと考えられます。

一方、b値についてもデータ数の多いものだけを拾って平均すると、スギ1.47、ヒノキ1.74、カラマツ1.46、アカマツ1.70、広葉樹1.53で、あまり大きな差はありません。なお、このa値とb値はデータ数が少ないと連動してしまうことがあり、少なくとも30点くらいのデータは必要でしょう。

最後に、根系直径10mmの引き抜き抵抗力を計算してみました(上表)。その結果、スギ70～130、ヒノキ80～110、カラマツ40、アカマツ55、広葉樹60～100kgfで、さらに大雑把に括ると、スギ、ヒノキと広葉樹は同等で100kgf程度、カラマツやアカマツはその半分程度と言えるでしょう。

ニセアカシアなど治山用樹種も含めて樹種による違いは今後の課題です。

3. 土壌含水状態が根系の引き抜き抵抗力に及ぼす影響

これについては、2件しか報告がありませんが、まったく異なった結果が出ています。塚本(1987)は自然含水状態と飽和状態で引き抜き抵抗力に有意差がないとしました。

$$\text{自然含水状態} : T = 2.80D^{1.45}$$

$$\text{飽和状態} : T = 3.11D^{1.25}$$

ただし、根系直径10mmで試算すると、自然含水状態は78.9kgfであるのに対し、飽和状態では55.3kgfであり、飽和すると70%になっています。

一方の相馬(2004)では、

$$\text{自然含水状態} : T = 2.348D^{1.682}$$

$$\text{飽和状態} : T = 1.587D^{1.694}$$

であり、b値はほとんど変化せずa値が68%に低下しています。したがって、根系直径10mmの場合は、飽和すると69%に低下しています。

以上の2件の報告から、飽和すると引き抜き抵抗力はやはり70%程度に減少すると考えても良さそうです。

4. 単位断面積あたりの ΔC

以上は一本あたりの根系の引き抜き抵抗力であります。先に述べたようにこれに直径階別本数を乗じて単位断面積あたりの ΔC を求める必要があります。ただし、根系は立木直近が太いものが多く、周縁に向かうにつれて太い根は少なくなり断面積合計も減ってきます。塚本(1987)は、水平根が根株からどのように減少していくのか、根株間の距離を無次元化してモデルを作成しました。モデルは立木間隔を胸高直径で除して水平根量と比較したもので、立木間中央がもっとも低い値となっています。これについては、野毛(2002)および白井(2004)が実測値で示し、実際に中央がもっとも弱い部分で立木直近の25%程度の ΔC となることを示しました。立木間中央の ΔC はおよそ500~1000kgf/m²程度であり、阿部(1998)がまとめた国内外の補強強度の平均565kgf/m²と同様の結果でした。

立木間中央の ΔC と間伐など森林施業との関係については白井(2004)の報告があり、間伐が適正に行われた森林は根系の発達もよいため、 ΔC が大きくなり崩壊防止機能が高まることを示しました。

5. 水平根の効果

これまで、根系を含んだ土壌層の斜面安定モデル作成においては、無限長斜面や二次元断面を想定するケースが多くありました。しかし、二次元でモデルを作成する場合、垂直根は考慮されますが、水平根は考慮されにくいいため十分な評価がなされてきませんでした。すなわち、水平根の力学的評価をはじめて行ったのは塚本(1987)でしたが、その後も近年まで水平根の効果は考慮されてきませんでした。北原(2002)は水平根を含めた斜面安定モデルを作成し広島災害の崩壊地で計算した結果、 ΔC のうち水平根の占める割合は90%以上に及ぶこと、崩壊規模に影響を受けることなどを示しました。

おわりに

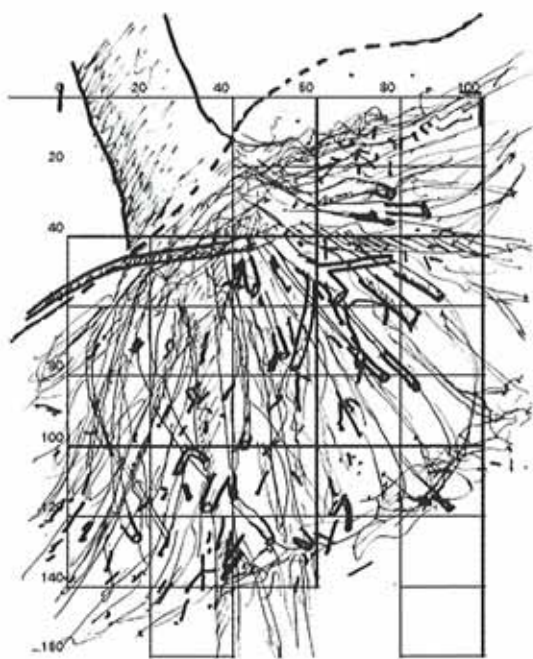
森林根系の崩壊防止機能は非常に重要な研究課題でありながら、力学的評価法が十分確立していないことや、調査に土壌掘削などかなりの労力を必要とすることなど、多くの制約を受けているため、研究の進捗が遅れています。そのため、崩壊防止のための樹種選定や育成法あるいは間伐の影響など森林施業との関係はほとんど分かっていません。この報文が今後の根系の崩壊防止機能研究に役立つことを望むところであります。



写真.2 ヒノキ根系分布調査(信州大学農学部附属演習林内)



クリ 根系図



提供：園訪地方事務所林務課