1. 森林根系の崩壊防止機能に関する従来の考え方の問題点

従来の森林根系の崩壊防止機能に対する考え方は、2次元無限長斜面や2次元円弧すべりで考えることが多かったが、これでは森林根系のうち鉛直根しか評価できず、すべり面が根系より深い、あるいは固結した岩盤上にある崩壊では、森林根系は機能しないと結論づけられてしまうことが多い。しかし、崩壊は3次元で発生しており、3次元で斜面安定を考慮する時、2次元で無視されてきた水平根を無視することはできない。崩壊すべり面が鉛直根より深くても水平根は崩壊防止機能を発揮しているからである。このように2次元断面で斜面安定を考えることは森林根系の崩壊防止機能、とりわけ水平根を軽視するなど現象を正しく捉えているとはいえず、今後は3次元で根系の崩壊防止機能を正しく評価することが重要である。

2. 根系の崩壊防止力の定義

根系の力学的はたらきは以下のクーロン式の粘着力増強分として評価されることが分かっている(遠藤ほか1968, 阿部ほか1986など多数)。

$$\tau = \sigma \tan \phi + C + \Delta C \quad \dots (1)$$

ここで、 τ : 剪断抵抗力, σ : 上載荷重, ϕ : 土の内部摩擦角, C : 土の粘着力, ΔC : 根系による粘着力増強分 (kN/m^2) であり, 土壌の単位断面積あたりの根系の引き抜き抵抗力の総和として, 直径階別引き抜き抵抗力 T_i (引き抜き試験より得られた回帰式より) と, 直径階別根系本数 N_i (根系分布調査より得られる) の積として表される (Wu1979)。

$$\Delta C = k \sum T_i \cdot N_i \quad \dots (2)$$

ここで、 k は根系の引き抜き方向に関する補正值で 1.12 である (Wu1979) が、この値は1と大差なく、また根系の引き抜き抵抗力のバラツキのほうが大きいので、ここでは k をわざわざ乗じる必要はないものと判断し、以下の計算では $k = 1$ とする。

なお T は、以下の回帰式で表されることが知られている (阿部ほか1996など)。

$$T = a D^b \quad \dots (3)$$

ここで、 T : 引き抜き抵抗力 (N または kN), D : 根系断面直径 (mm), a と b : 係数。

以上より、土壌の単位断面積あたりの ΔC (例えば kN/m^2) が根系の崩壊防止力であり、それは、根系引き抜き試験と山地土層を掘削する根系分布調査より算出される。ただし、引き抜き試験は、根系の分布深さの違い、地質や土壌の違い、土壌水分の違い、樹種の違いごとに試験する必要がある、また根系分布調査は、立木間のどの位置をどのように掘削すればよいのか、地質や地形など場所による違いやバラツキはどうかなど、これまた多数の試験を行う必要がある。

3. 試験結果と考察

3.1 引き抜き試験の結果

これまでにローム質黒色土、花崗岩マサ土など様々な土質条件下で、ヒノキ、カラマツ、アカマツ等針葉樹人工林、ミズナラ、コナラ等落葉広葉樹天然林、マダケ林などで多数の根系の引き抜き試験した。なお、統計に耐えるため、1ヶ所あたり、あるいは1樹種あたり 50~100本の根系を引き抜いている。その結果、引き抜き抵抗力に関して以下の諸点が明らかになった。

1. 根系の地表面からの深さによる差はない。様々な樹種で検証したが、いずれも差はない。
2. 引き抜けた形状による差はない。様々な樹種で検証したが、いずれも差はない。
3. 地形、土質による差はない。マサ土やローム土などで検証したが、いずれも差はない。また、斜面傾斜で差がない。
4. 土壌水分が飽和時は自然含水時の 30%減となった。飽和時は、係数 a が自然含水状態の 70%程度に低下する一方、係数 b はほとんど変化しない。
5. 樹種による差は明確にある。直径 10mm の引き抜き抵抗力の概略値 (N) は、スギ 700~1300、ヒノキ 800~1100、アカマツ 500、カラマツ 400 程度であり、広葉樹ではケヤキが強く 2500、コナラ 1000、その他は概ね 500~900 程度である。

3.2 根系分布の調査結果

崩壊の発生するような 30 度以上の急斜面に、長さ 2 m、深さ 1 m、幅 0.6m ほどのトレンチを多数掘削し、根系分布を調べた。調査は、ヒノキ、カラマツ、アカマツ、広葉樹天然林などいろいろな樹種のいろいろな林齢を対象に、様々な立木間隔 (1.5~5 m 程度) で行っている。その結果、根系の分布本数と断面積合計に関して以下の諸点が明らかになった。

1. 崩壊の起こるような 30 度以上の斜面においても根系の最深は 1~1.2m 程度であった。
2. 立木間のどの位置でも根系本数 50 ± 20 本/m²程度で、また林齢が異なっても変わらなかった。
3. 斜面位置による根系本数の差はあまりないようである。
4. 断面積合計は立木間中央が最小で、立木から 50cm 離れた場所の断面積合計の 1/4 程度であった。
5. 立木密度が高いと細い根ばかりとなり、本数は変わらないものの断面積合計は減少する。

3.3 ΔC の算出結果

根系の崩壊防止力 ΔC (kN/m²) を、3.1 引き抜き試験結果および 3.2 根系分布調査から(2)式で算出した。ΔC について、これまでの結果をまとめると以下のとおりである。

1. 立木間中央の ΔC は、根際の 1/4 程度で 5~50kN/m² であり、立木間中央が林内の最弱部であった。この値は、一般の表層土の粘着力 C が 0~3kN/m² 程度であるから、最弱部といえども根系の ΔC は非常に大きいことが分かる。
2. 同一林分ならば、立木間隔が狭いほうが立木間中央の ΔC は大きい。
3. 立木密度の異なる多数の林分で平均立木間隔を算出しその ΔC を比較すると、立木密度が減少すると、立木間中央の ΔC は増加する。
4. 適正な間伐を行った森林では、林齢が増すと立木間中央の ΔC は増加する。
5. 根系本数が林内で一定 (前述) ならば、引き抜き抵抗力は直径の約 1.5 乗に比例するため、細い根が多数あるより、太い根が混じるほうが立木間中央の ΔC は大きくなる。
6. 通常規模の表層崩壊では、ΔC に占める水平根の寄与は鉛直根に比べ圧倒的に大きい。

以上のように、立木間中央の最弱部といえども ΔC は表層土の粘着力より 1 オーダー大きく、大きな崩壊防止力を持っていることが分かる。また、ΔC は立木密度と密接な関係にあることが分かるが、これは、根系の量が樹冠部の体積あるいは投影面積と密接な関係にあるためと考えられる。

4. おわりに

根系の崩壊防止力 ΔC が、斜面安全率に寄与する割合を様々な条件下でシミュレーションしているが、豪雨等で発生する通常規模の崩壊に対して安全率を高めていることが確認された。また、間伐の有効性も確認された。なお、引用文献はスペースの都合上割愛します。