

平成18年7月豪雨災害の教訓

土砂災害に強い森林づくりに向けて

—信州大学農学部治山学研究室の森林根系研究成果より—

信州大学農学部森林科学科
教授 北原 曜

1 はじめに

平成18年7月豪雨により長野県内、とりわけ諏訪岡谷から上伊那にかけて大きな土砂災害を被った。特に岡谷市では湖南山地の小田井沢川や志平川、本沢川などで崩壊とそれに引き続く土石流により、人命財産は大きな被害を受けた。大きな被害を出した土石流は、流域谷頭部の崩壊が端緒となり流下する途中で大量の土砂を巻き込んでいったが、崩壊地と土石流流下部はほとんど全てが人工林であり、間伐遅れなど森林整備の遅滞が災害を防げなかった原因の一つであることを指摘する声もあった。この災害と同じように、全国の土砂災害でも森林の崩壊防止機能が毎度のように問われている。しかし、森林の崩壊防止機能とその限界に関する研究は、掘削しなければ目に見えない地下部の調査が必須であるため非常に遅れており、十分に社会的なニーズに応えきれていないのが現状である。統計的には、戦後の拡大造林期に発生した多数の崩壊資料をもとに崩壊防止機能は証明されているが、力学的な検討は非常に不十分で、さらに樹種の違いや間伐など森林整備とどのような関係にあるのかなど細部についての研究はほとんど皆無である。

そこで、ここではまず森林根系の力学的強度の説明を行い、信大治山学研究室で行ってきた最新の根系調査結果から、力学的強度と樹種や間伐などとの関係を明らかにし、土砂災害に強い森林づくりのためにどのような施業をおこなっていくべきかを提案する。

2 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

これまでの森林根系の崩壊防止機能に対する考え方は、斜面土層の縦断面すなわち2次元断面で考えることが多かった。これは斜面安定を考える上で、計算がしやすいことなどによるものであるが、崩壊すべり面が根系範囲(1~1.5m)より深い場合は根系の崩壊防止機能は発揮されないとされてきた。また浅いところに岩盤がある場合は、根系が侵入できないため、この場合もまた根系の崩壊防止機能はないとされてきた。このように2次元で考える時、森林根系のうち鉛直根しか評価できないこと、すべり面が深いと鉛直根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、崩壊は広がりをもった3次元で発生している。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機能している。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。

実際に崩壊地を観察してみると、崩壊縁に多数の根系がゴボウ状態あるいは破断状態で露出しているのがわかる。本来根系は分岐しているはずであるが、ゴボウ根となっているのは、分岐した根が外力により削ぎ落とされた結果であるし、破断されているのは大きな外力がはたらいたことを証明している。さらに注意すべきは、崩壊縁に沿って露出しているのは水平根が圧倒的であることであり、根系でも水平根の崩壊防止機能を正しく評価することがいかに重要であるかがわかる。

3 森林根系の力学的はたらき

では、森林根系は力学的にはどのようなはたらきがあるのか概略を述べることにする。これまで

の国内外の研究で、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。

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

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である。崩壊時のすべり面での根系の挙動は、すべり面の剪断力に対して根系は引き抜き抵抗力としてはたらいっている。実際には全根が引き抜けることは少なく根系が引き抜かれつつ、根系のより先端で破断することが多い。これは2次元での鉛直根のはたらきであるが、3次元での崩壊縁における水平根の挙動においても同様のはたらきを行っている。すなわち、森林根系は崩壊すべり面のどの部分においても引き抜き抵抗力としてはたらいっている。

根系の引き抜き抵抗力は、以下の回帰式で表されることが知られている。

$$y = a D^b \quad \dots (2)$$

ここで、 y : 引き抜き抵抗力 (ここでは分かりやすいように kgf とする)、 D : 根系断面直径 (mm)、 a と b : 係数。 b が2であると断面積に比例することになるが実際はそれより小さい (後述)。

また、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は、以下の式で表される。

$$\Delta C = k \sum y_i \cdot N_i \quad \dots (3)$$

ここで、 k : 根系の引き抜き方向に関する補正值 (後述)、 y_i : 直径階別引き抜き抵抗力 (引き抜き試験より得られた回帰式(2)より)、 N_i : 直径階別根系本数 (根系分布調査より得られる)。根系の引き抜き方向はすべり面に沿うため、根系の延長方向の引き抜き抵抗力より $k = 1.12$ 倍大きくなることが知られている (Wu1979)。しかし、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 $k = 1$ としている。

4 試験結果と考察

4. 1 引き抜き試験の結果

これまでに上諏訪町福沢川上流、岡谷市志平沢上流、南箕輪村信大構内演習林、伊那市手良沢山信大演習林、伊那市西春近などで、ヒノキ、カラマツ、アカマツ、ミズナラ、マダケなどの根系を多数引き抜き試験した。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 (相馬 2004, 2006)。
2. 引き抜けた形状 (破断や全根引き抜けなど) による差はない (相馬 2004, 2006)。
3. 地形、土質による差はない (相馬 2004, 2006)。
4. 土壌水分による差はある。野外実験では飽和時は自然含水時の30%減となった。(相馬 2006)。ただし、同一根系に対して水分条件をいろいろに変えて繰り返し室内実験した結果では、90%減という結果も出ている (相馬 2006)。今後正確な減少割合を求めるべきである。
5. 樹種による差はある (久保田 2006, 2007 など)。(2)式 $y = a D^b$ の a と b の値および直径10mmの引き抜き抵抗力を以下の表に示す。

表に示したように、根系直径10mmの引き抜き抵抗力は、スギ70~130、ヒノキ80~110、カラマツ40、アカマツ50、広葉樹60~100kgfで、スギ、ヒノキと広葉樹(ナラ類)はほぼ同等で100kgf程度、アカマツはその半分、カラマツは4割程度である。

表. 引き抜き試験で得られた引き抜き抵抗力の回帰式中の a、b 値

	a	b	直径 10mm の引き抜き抵抗力 (kgf)	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 : 信大
ヒノキ	1.248	1.801	78.92	野毛ほか 2002 : 信大
ヒノキ	2.348	1.682	112.90	相馬 2004 (自然含水状態) : 信大
ヒノキ	1.587	1.694	78.45	同 (飽和状態) 信大
カラマツ	1.253	1.463	36.39	久保田 2005 : 信大
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 : 信大
スギ、広葉樹	2.80	1.45	78.91	塚本 1987 (樹種で差がない)
ミズナラ	2.11	1.56	76.61	久保田 2006 : 信大
アカマツ	1.19	1.59	46.30	久保田 2006 : 信大
マダケ (ひげ根)	1.38	1.73	—	岩波 2006 : 信大

(ひげ根は 5mm まで。地下茎は断面直径と関係なく平均 638kgf)

4. 2 根系分布の調査結果

引き抜き試験と同じ林内に長さ 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。調査はいろいろな樹種や立木間隔で行っている。出現した根系は、樹種、座標位置、断面直径を記載した。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. 根系の最深は 1~1.2m 程度であった (野毛 2002、白井 2004 など)。
2. 立木間のどの位置でも根系本数は変わらなかった (白井 2006)。
3. 根系本数 (本/m²) は、ミズナラ 70 > カラマツ 55 = ヒノキ 53 > アカマツ 28 で、樹種による差があった (久保田 2007)。根系本数は樹種と土壌条件などで決定される可能性がある。
4. 断面積合計は立木間中央が最小であった (白井 2006)。
5. 立木密度が高いと細い根ばかりとなり、断面積合計は減少する (白井 2006)。

4. 3 ΔC (単位断面積あたりの粘着力増強分) の算出結果

引き抜き試験結果および土壌の単位断面積あたり直径階別根系本数から算出した ΔC について検討した。その結果、以下の諸点が明らかになった。

1. 立木間中央の ΔC は、根際の 1/4 程度で 0.5~5 tonf/m² であった (白井 2006)。立木間中央が林内の最弱部であった。また、一般の表層土の粘着力 C は 0~0.3 tonf/m² であるから、根系の ΔC は非常に大きい。
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 (白井 2006)。

3. 立木密度が減少すると、立木間中央の ΔC は増加する（白井 2006）。
4. 林齢が増すと、立木間中央の ΔC は増加する（白井 2006）。
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 1.6 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 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（北原 2002）。

4. 4 間伐と ΔC

まず、伐採木の根系腐朽については、伐採後の経過年数を t 年とおくと(2)式中の a 、 b 値と t には以下のような関係があった（水野 2004）。

- a は経過年とともに指数関数的に減少し、 $a = 2.56 t^{-1.62}$
- b は経過年と無関係に一定。

すなわち、例えばヒノキならば以下の回帰式が得られた。

$$y = 2.56 t^{-1.62} D^{1.74}$$

具体的に示すと、根系断面直径が数 mm の細い根は数年でほとんど無視できるぐらいの引き抜き抵抗力となる。また、伐採後経過年数に伴う ΔC の変化は、

$$\Delta C = \alpha t^{-1.62}$$

となる（水野 2004）。ここで、 α : 伐採後 1 年の ΔC であるが、針葉樹でも伐採後しばらくは生きているので、伐採前の ΔC でよいと考えられる。ヒノキ林において立木間中央の ΔC を試算した結果では、伐採後 5 年で ΔC は 1/10 に低下した。

一方、残存木の根系は、間伐後の経過年数とともに間伐木周辺へ急速に伸びていく。間伐後の根系調査は、まだ少数例しかないので明確なことが言えないが、間伐木がほぼ完全に腐朽した伐採後 10 数年で、旧立木間中央（間伐木と残存木の立木間中央）の ΔC は数倍、新立木間中央（間伐木直下）の ΔC は間伐前と同じ値に戻ったことが確かめられた（今井 2007）。

以上の結果から若干の推定も含めて考察すると、林内の最弱部である立木間中央の ΔC は、造林木の成長とともに増加するが、間伐が遅れると頭打ちになると考えられる。これに対して適期に間伐すると、伐採木直下の ΔC は伐採木根系の腐朽により急速に低下するものの、残存木根系の伸長により伐採後少なくとも 10 数年後には元の状態に戻り、以降さらに増加するものと考えられる。

なお、間伐後十分な年数を経た林分では、間伐により立木間中央の最弱部の箇所数が減ることになり、これも林分全体の機能を高めていることになる（今井 2007）。

4. 5 根系を考慮に入れた斜面安定計算

平成 18 年 7 月豪雨災害において多数の崩壊を発生させた岡谷市小田井沢川と本沢川流域を対象に、全崩壊地の測量（周囲、縦断、横断など）、土質定数（飽和時の内部摩擦角と粘着力、飽和時重など）測定（森林総合研究所および長野県林業総合センターの資料提供による）、根系調査（崩壊縁における残存根系の樹種、断面直径、本数など）から得たデータをもとに、各崩壊地の安定計算を行った（鈴木 2007）。計算では、崩壊時の土壌水分を再現させるため飽和条件とし、崩壊斜面を 1×1 m のブロックに分け、根系による ΔC は周縁部のブロックにのみ働くことにした。また、飽和による引き抜き抵抗力の減少を 30% と 90% に想定して計算した。

その結果、森林根系の存在により斜面安全率は大きく増加すること、飽和時を想定した引き抜き抵抗力 90%減で斜面安全率がほぼ 1 となり、崩壊発生が予測される結果となった。この安定計算では各崩壊地のすべり面を近似的に欠球型と仮定して算出したことなどいくつかの仮定が入っているが、根系が斜面安定に寄与していること、根系を入れた斜面安定計算の意義は非常に大きいことを確認できた（鈴木 2007）。

5 土砂災害に強い森林づくりへの提言

以上の結果と考察をもとに、災害に強い森林づくりに関する提言を以下に行う。ただし、あくまでも崩壊が起こることが考えられる斜面（谷頭の集水斜面で傾斜 25 度以上）を対象としている。また、ここでは表面侵食（ヒノキ過密林分で著しい）や風倒などは考慮していない。

1. 森林の崩壊防止機能には限界があるが、森林施業により機能を高めることは十分可能である。
2. 統計的には崩壊箇所数や崩壊頻度、崩壊面積を減少させていることが証明されている。一方、力学的には鉛直根、水平根とも崩壊すべり面において、粘着力増強分として剪断抵抗力を大きくさせ崩壊抑止力を増加させている。
3. 土壌の単位断面あたり粘着力増強分は、立木間中央が最弱であるため、林内に最弱部を連続させないことと、最弱部の強度を高めるように施業することが基本である。
4. 樹種ではスギ、ヒノキ、ナラ類など広葉樹が好ましい。カラマツやアカマツは半分程度の強さだが、侵入木や下層木が育成できるように施業するとよい。
5. 林齢が増すとともに崩壊防止機能は高まるが、間伐をしないと頭打ちとなる。立木密度は順次減らす必要がある。
6. 適期の間伐は太い根系を多くし崩壊防止機能を高めることに有効である。
7. 地質・土壌に関しては、土の粘着力がほとんど 0 の花崗岩まさ土で根系は特に大きな役割を持っている。花崗岩地帯では皆伐は避ける。
8. 地形に関しては、崩壊が多発する谷頭は優先的に間伐を進め根系の崩壊防止機能の向上に努める。可能なら保安林指定して本数調整伐にする。
9. 間伐方法に関しては、林内に崩壊縁となるような弱線を作らない。列状間伐は好ましくない可能性がある。また、収量比数を極端に小さくするような強度間伐は、残存木の立木間中央への根系侵入に時間がかかるため問題がある。
10. 間伐木は、崩壊や土石流が想定されるような場所に放置しない。流木となり被害を増加させることがある。
11. 侵入木に関しては、アカマツ松枯れ危険地帯において広葉樹などの侵入木をあらかじめ育成しておくことが重要である。
12. その他、施業に関しては、つる切りをし巻き添え崩壊を防ぐ。
13. 林道に関しては、横断排水溝を崩壊の起こる可能性のある急峻な集水斜面などに設置しない。

6 おわりに

この報告の大部分は、信州大学農学森林科学科治山学研究室の大学院生の血と汗の成果であり、2002 年卒業の野毛伴基君、2004 年卒業の水野隆次君、2006 年大学院修士卒業の白井隆之君と相馬健人君、2007 年卒業の今井裕太郎君と鈴木健太君、同年大学院修士卒業の久保田 遼君と岩波定裕君には深甚の謝意を申し上げます。また、信州大学農学部アルプス圏フィールド科学教育研究センター手長沢山演習林、長野県林務部と同林業総合センターには試験地提供など多方面から惜しみないご協力をいただきました。以上の皆様のご協力に深く感謝申し上げますとともに、この 6 年間に根系の崩壊防止機能の研究が著しく進展できたことを皆様と率直に喜びたいと思います。

森林の崩壊防止機能には、まだまだ未解明な課題が数多くありますが、今後も地道に調査研究し、森林の崩壊防止機能が発揮増進される森林管理方法の確立を目指すつもりです。引き続き諸賢のご

協力をお願いします。

引用文献（信大分のみ）

- 野毛伴基：ヒノキ林における水平根の崩壊防止機能の力学的評価、一伐採1年後の伐根間における根系の補強強度一、信州大学農学部専攻研究論文、2002
- 北原 曜・野毛伴基・小野 裕：ヒノキ林における水平根の崩壊防止効果、113 回日林論、2002
- 水野隆次：伐採経過年数にともなう森林根系の力学的評価一伐採後1～15年ヒノキ根系を対象として一、信州大学農学部専攻研究論文、2004
- 白井隆之：根系の崩壊防止機能に及ぼす立木密度の影響、信州大学農学部専攻研究論文、2004
- 白井隆之：立木密度がヒノキ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響、信州大学農学研究科修士論文、2006
- 白井隆之・相馬健人・北原曜・小野裕：樹木根系による崩壊防止機能に及ぼす立木密度の影響、中部森林研究、54、187-190、2006
- 相馬健人：飽和条件下における森林根系の崩壊防止機能の評価、信州大学農学部専攻研究論文、2004
- 相馬健人：異なる土壌水分条件下におけるヒノキ根系の力学的評価、信州大学農学研究科修士論文、2006
- 相馬健人・北原曜・小野裕：土壌水分状態がヒノキ根系の引き抜き抵抗力に及ぼす影響、中部森林研究、54、183-186、2006
- 久保田 遼：カラマツ水平根の崩壊防止機能の評価、信州大学農学部専攻研究論文、2005
- 久保田 遼・北原曜・小野裕：表層崩壊に及ぼすカラマツ根系の引き抜き抵抗力に関する力学的評価、中部森林研究、54、191-194、2006
- 久保田 遼：3樹種における根系分布と引き抜き抵抗力の違い、信州大学農学研究科修士論文、2007
- 岩波定裕：マダケ根系の崩壊抑止機能の評価、信州大学農学研究科修士論文、2007
- 今井裕太郎：間伐がヒノキ根系の崩壊防止機能に及ぼす影響、信州大学農学部専攻研究論文、2007
- 鈴木健太：斜面安定解析から導いた森林根系の崩壊防止機能の評価一平成18年7月豪雨災害に伴う崩壊地における残存根系調査より一信州大学農学部専攻研究論文、2007
- 以上のほかに印刷中の文献がいくつかあります。