

技術的解説

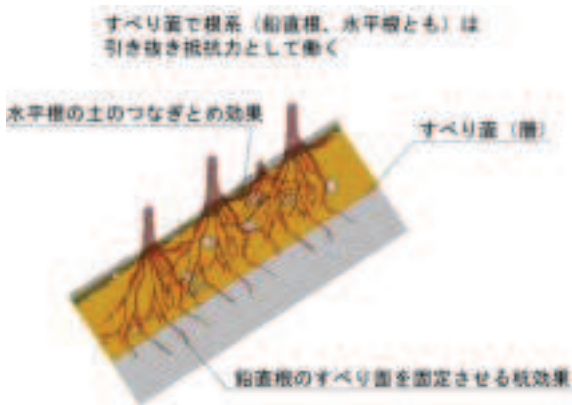
1 森林根系を考慮した斜面安定解析	2
2 樹木の崩壊土砂抑止機能と落石抑止機能	4
3 樹木の災害緩衝機能	5
4 樹木の引き倒し抵抗力	6
5 森林土壌	8
6 森林の管理指標	10
7 災害に強い森林づくりの候補樹種	11



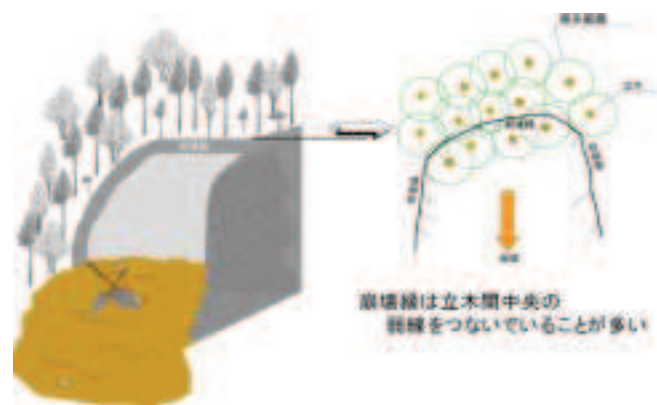
【土石流・山地崩壊で倒伏しなかったカラマツ林(諏訪市南真志野)】

1 森林根系を考慮した斜面安定解析

樹木の根系は、垂直（鉛直）根がすべり面を固定させる杭効果を、水平根が土をつなぎ止めようとする働きを持つものと考えられています（図-1）。実際の崩壊地を観察すると、崩壊縁は立木間中央の弱線をつないでいます（図-2）。近年の研究で、水平根が崩壊の規模に影響を与えることがわかってきました。森林根系による崩壊防止機能評価では、水平根を正しく評価することが必要です。



【図-1 根系の引き抜き抵抗力模式図】



【図-2 崩壊縁の模式図】

樹木根系と土砂崩壊の関係には、以下の特徴があります。

- ① 根系はクーロン式の粘着力増分として表わすことができます。

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

ここで、

τ : 剪断抵抗力 C : 土の粘着力 σ : 上載荷重
 ΔC : 根系による粘着力増分(補強強度) ϕ : 土の内部摩擦角

- ② 引き抜き抵抗力は、樹種による違いがあります。
- ③ 土壌含水状態が根系の引き抜き抵抗力に及ぼす影響は、飽和すると 70%程度に減少します。
- ④ 水平根の単位土壌断面積あたり根系本数は、立木からの距離や立木間隔と関係なく林内ほぼ一定と考えられます。立木間中央は根系の断面積合計が最小であり、立木密度が高いと細い根ばかりとなり断面積合計が減ります。
- ⑤ 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ります。根系による補強強度（ ΔC ）は立木間中央がもっとも低い値となり、立木直近の 25%程度となります。
- ⑥ 間伐が適正に行われた森林は根系の発達もよいため、補強強度（ ΔC ）が大きくなり崩壊防止機能が高まります。間伐履歴がある人工林では太い根が多数認められます（図-3）。

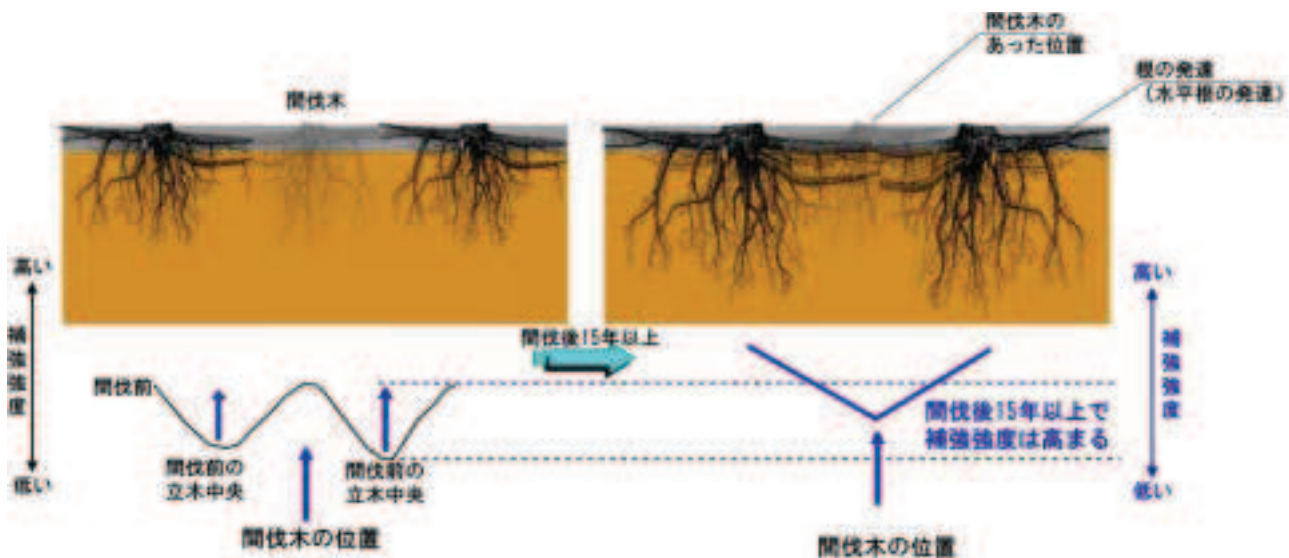


間伐遅れの林分の根



間伐履歴があるカラマツの根

【写真-1 間伐履歴と根系の発達の違い】



【図-3 間伐と根系による補強強度 ΔC の関係模式図】

これらの特徴から、森林根系を考慮した力学的評価(斜面安定解析)は以下となります。この式を用いて樹木根系による斜面安定解析が可能となりました。

$$FS = \frac{W\gamma \times \sum (Di \times \cos \theta i \times \tan \phi) + C + \Delta C}{W\gamma \times \sum (Di \times \sin \theta i)}$$

ここで、

Fs (Factor of Safety) : 斜面安全率

斜面安全率 $Fs < 1$ 崩壊

斜面安全率 $Fs \geq 1$ 安定

$W\gamma$: 土壌単位体積重量 Di : 細分化された各土塊の体積 θi : 各土塊の底面の傾斜

ϕ : 土壌内部摩擦角 C : 球面全ての土壌粘着力

ΔC : 球面に出現した根系の粘着力増分(補強強度)

2 樹木の崩壊土砂抑止機能と落石抑止機能

崩壊が発生した場合や落石が発生した場合など、崩壊土砂の流下エネルギーを緩衝して下方への土砂流出を抑制する、または落石に対して緩衝機能を発揮する森林が「崩壊土砂抑止林」です。

崩壊土砂の到達距離は、崩壊の高さ（H）とほぼ同じ距離まで達し、なかには50m以上も下方に流下する場合があります。このような崩壊土砂の流下エネルギーに対し、立木の抵抗力が勝る場合に土砂流出抑止林としての機能が発揮されます。立木に作用する崩壊土砂の衝撃力と立木の抵抗力の関係から、力学的には以下のように表わすことができます。



【写真-2 崩壊土砂の衝撃力が勝り、崩壊土砂を抑止できなかったカラマツ】

$$F_s = \frac{\text{崩壊土砂の衝撃力に対する樹木の抵抗力}}{\text{立木に作用する崩壊土砂の衝撃力}}$$

ここで、

F_s : 樹木の抵抗安全率

崩壊土砂の衝撃力に対する樹木の抵抗安全率 $F_s < 1$ …… 立木は倒伏する

崩壊土砂の衝撃力に対する樹木の抵抗安全率 $F_s \geq 1$ …… 立木は倒伏しない

この力学的検討によって、「土砂流出抑止としての機能が期待できる樹種であるか」、「樹木がどの大きさ（太さ、根の深さ）まで成長した場合に緩衝機能を果たすことができるか」、「どの程度の大きさの樹木が何本生育しているのが望ましいか」などを推定することができます。

落石に対しては、落石が斜面に衝突するとき、あるいは斜面上でのすべり運動などのときに作用する摩擦力（等価摩擦係数）が重要となります。一般的に、落石が発生する斜面の凹凸や立木の多さなどの条件を用いて、落石の速度やそのエネルギーを計算します。この摩擦力を左右するのが立木や灌木などの障害物です。さらに、近年の研究成果で、斜面に堆積している落葉や枝なども影響していることが解ってきました。

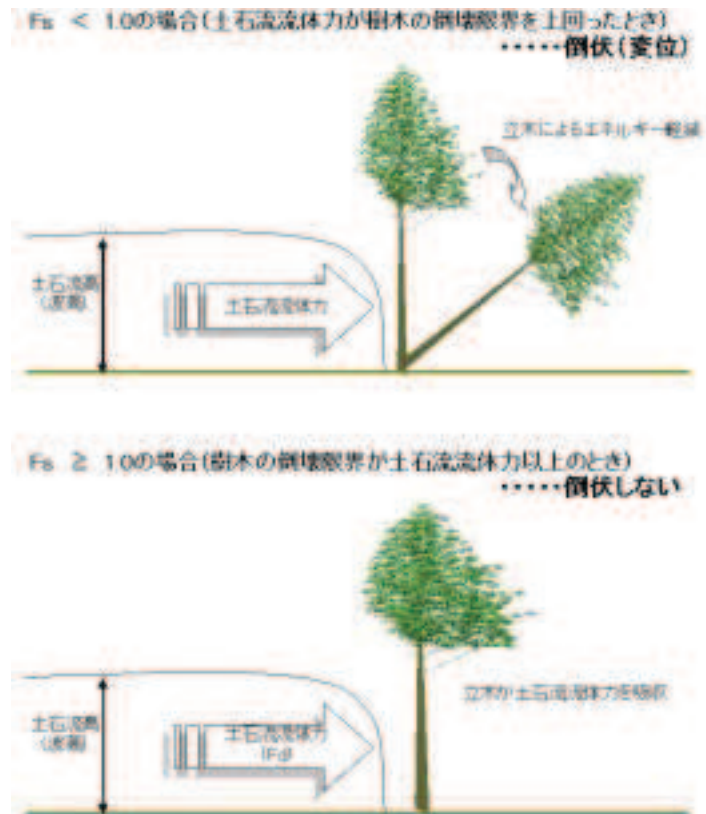
以上のことから、崩壊土砂や落石を抑止する機能を有する森林は、大きく（太く）、根系の支持力（抵抗力）が大きい立木が生育し、斜面に落葉や枝などが堆積し A_0 層が発達することが必要です。このような森林は、やはり、針葉樹と広葉樹が混交した森林であると考えられます。

3 樹木の災害緩衝機能

一般的に、溪流に生育する森林は「**溪畔林**」と呼ばれています。溪畔林は、流水の氾濫や湿潤性土壌の存在など、溪流からの影響を受けている立地に成立する森林です。また、溪流の変動に支配されるだけでなく、溪流の地形、水質、そこでの生態系に極めて重要な影響を与えています。

溪畔林は、土砂移動の軽減、溪岸侵食の軽減、土石流流体力のエネルギー軽減等の防災的機能を有しています。このうち、土石流等の災害を防止または軽減させるために、森林の樹幹による抵抗力を利用し、流下する土石等の森林内での堆積を促進させるための森林を「**災害緩衝林**」と呼んでいます。土石流に対し樹木（立木）が倒伏しない場合に緩衝林としての機能が発揮されます。

そこで、立木に作用する土石流の力（流体力）と立木の倒伏限界（抵抗力）の関係から、力学的には崩壊土砂抑止林と同様（前述）に、以下の式で表わすことができます。



【図-4 立木の倒伏限界と土石流流体力の模式図】

$$F_s = \frac{\text{土石流の流体力に対する樹木の倒伏限界}}{\text{立木に作用する土石流の流体力}}$$

ここで、

F_s : 樹木倒伏安全率

土石流の流体力に対する樹木の倒伏安全率 $F_s < 1$ …… 立木は倒伏する

土石流の流体力に対する樹木の倒伏安全率 $F_s \geq 1$ …… 立木は倒伏しない

この力学的検討によって、「緩衝林としての機能が期待できる樹種であるか」、「溪畔の樹木が、どの大きさ（太さ、根の深さ）まで成長した場合に土石流に対して緩衝機能を果たすことができるか」などを推定することができます。

4 樹木の引き倒し抵抗力

土石流に対する緩衝機能、崩壊土砂および落石に対する抑止機能を評価するためには、立木の抵抗力を知る必要があります。立木の抵抗力、すなわち根の支持力を知るためには、原位置引き倒し試験を実施します。

原位置引き抜き倒し試験は、重機等で立木を引っ張り、そのときの引き倒し抵抗力と立木の変位を計測するなどの方法が用いられます。写真-3は、岡谷市の土石流流下痕跡のある溪岸のカラマツ引き倒し試験の状況です。



【写真-3 原位置立木の引き倒し試験(左:試験状況、右:荷重計測器・写真中央赤円)(2007.5.15)】

立木の引き倒し抵抗力は、立木の胸高直径（根元から 1.2mの高さ）と関係があり、以下の式で表されます。

$$Y = a X^b$$

ここで、

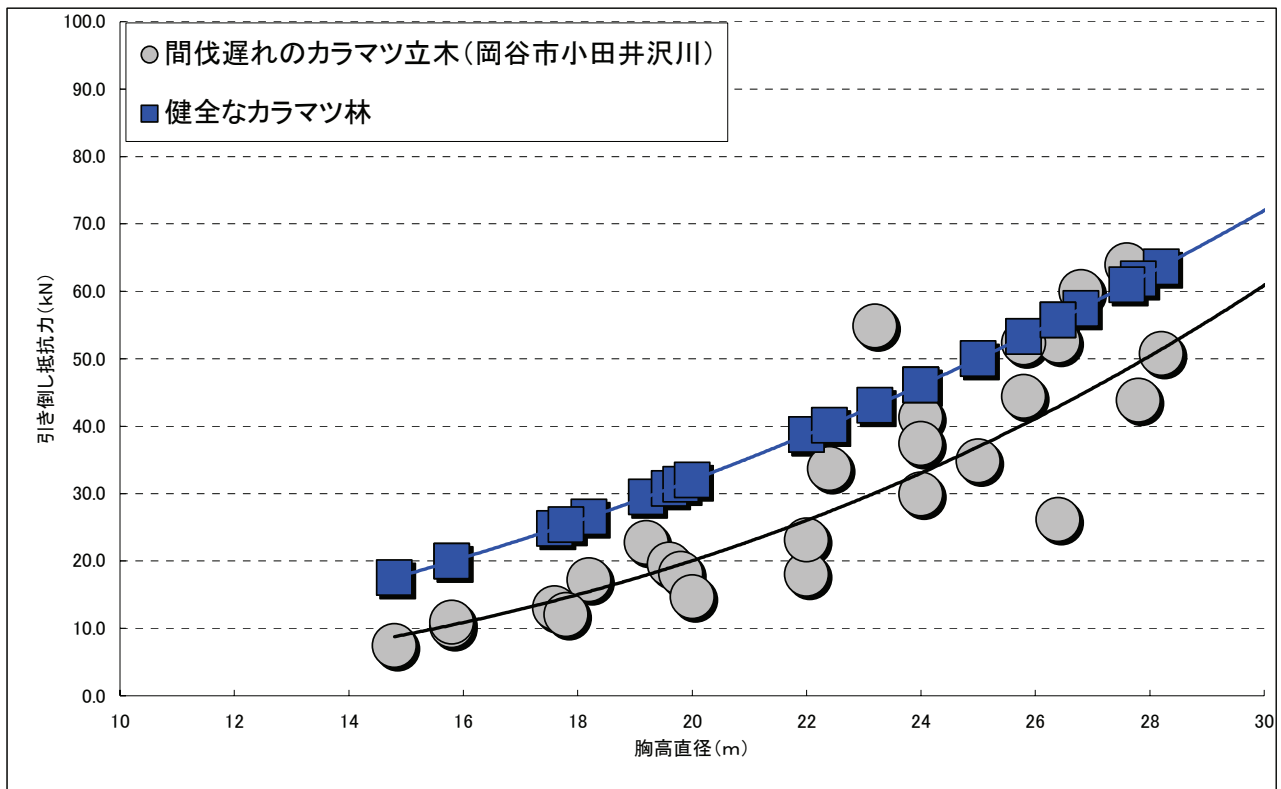
Y:引き倒し抵抗力(kN)、X:胸高直径(cm)、a値、b値:樹種によって異なる

平成 18 年 7 月豪雨災害で、土石流が流下した岡谷市の溪流沿いのカラマツの立木は、既知の健全木の抵抗力と比較すると、ほとんどの立木が健全木の抵抗力を下回る結果となりました(図-5)。

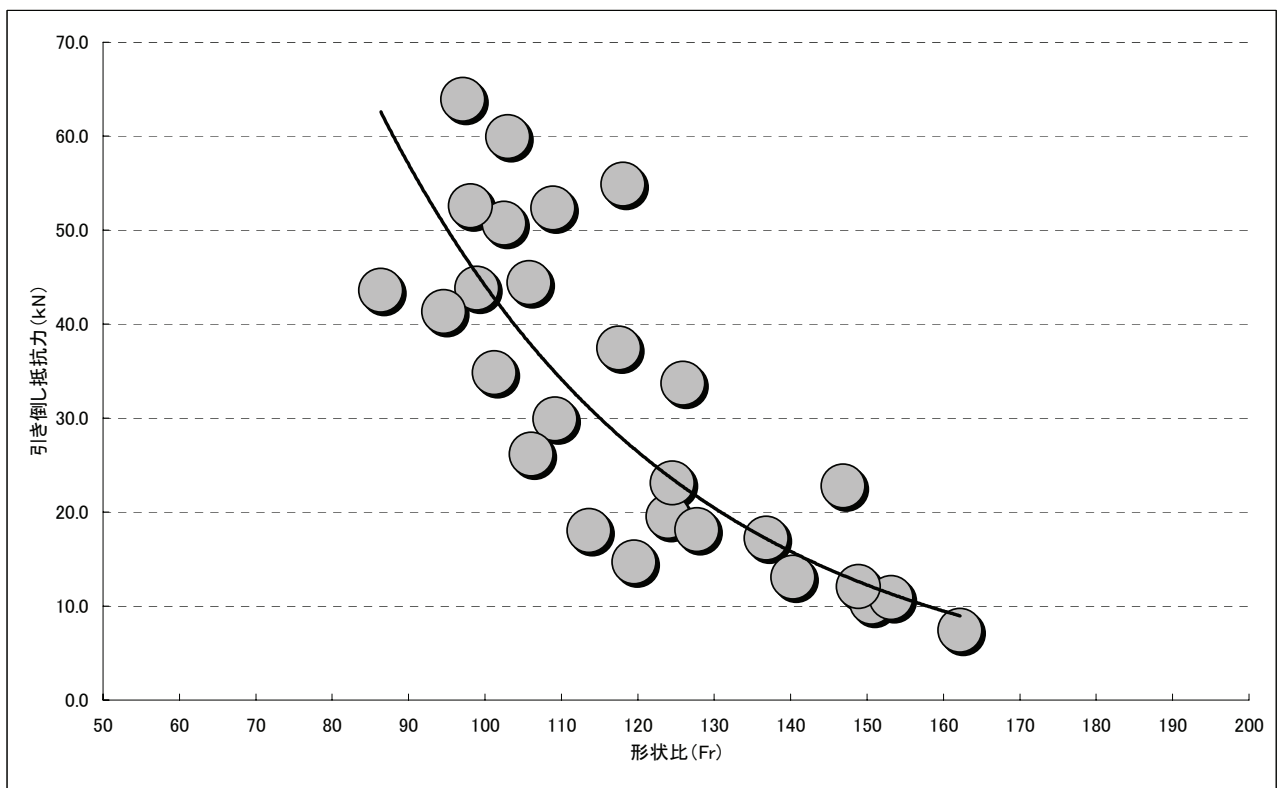
試験を行った立木は、形状比（樹高÷胸高直径×100）が高く、極めて高密度の下で生育した立木といえます。形状比と抵抗力の関係は、形状比が小さな立木（どっしりした樹形）では抵抗力が高く、形状比が大きく（ひょろひょろとした樹形）なるにつれ抵抗力が減少していく傾向を示しました(図-6)

また、樹冠長率（樹冠長÷樹高×100）と抵抗力の関係では、樹冠長率が低い立木（樹冠が短い）で抵抗力が低く、樹冠長率が高く（樹冠が長い）なるにつれ抵抗力が増加する傾向を示しました。

このことから、胸高直径が小さく、形状比が大きい立木、すなわち間伐が行き届かない過密な森林の立木は、抵抗性が低いことが解ります。



【図-5 胸高直径と引き倒し抵抗】

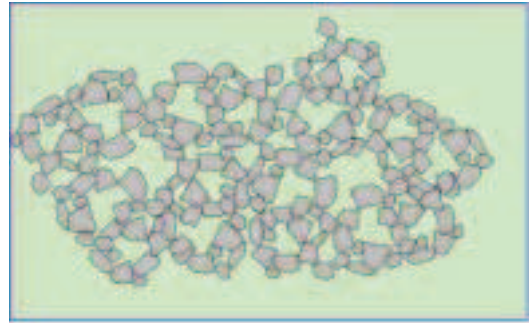


【図-6 カラマツの形状比と引き倒し抵抗 (岡谷市小田井沢川における試験結果)】

5 森林土壌

土壌は岩石や火山噴出物等が風化を受けた後に、礫、砂、粘土などの鉱物質粒子に、生物や、生物からもたらされた有機物が付加したものです。土壌の粒子の間にはさまざまな隙間（孔隙）があり、この隙間は一定の容積の土壌の中で50～80%を占めています。孔隙は土壌中の水分や空気の貯留・移動の場となっており、その大きさによって水の動き方が異なります（図-7）。

土壌が水を保持するはたらき（保水機能）を発揮する上で、孔隙は重要な役割を果たしています。また、土壌の構造や含まれている有機物（腐植）の性質を詳しく調べることで、過去の災害の履歴や土地利用、植生の変化を推定することができます。

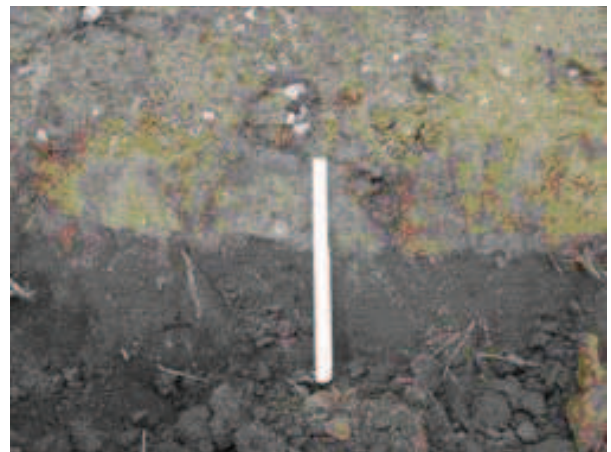


【図-7 土壌粒子の集合体モデル】

平成18年7月豪雨災害が発生した岡谷市の土石流跡地では写真-4のような光景が多く見られ、あたかも、2～3mの厚さに堆積していた褐色土層が豪雨によって飽和し、流れ去ったように見えました。川底のように見える黒土層は固く締まっていました。褐色土層が残った場所の断面を写真-5に示しました。黒土層の上に不連続に褐色土層がのっています。これは褐色土層が山地崩壊や土石流により供給されたことを示しています。



【写真-4 土石流跡に現れた黒色土層】



【写真-5 下部黒色土層と褐色ローム質土層】

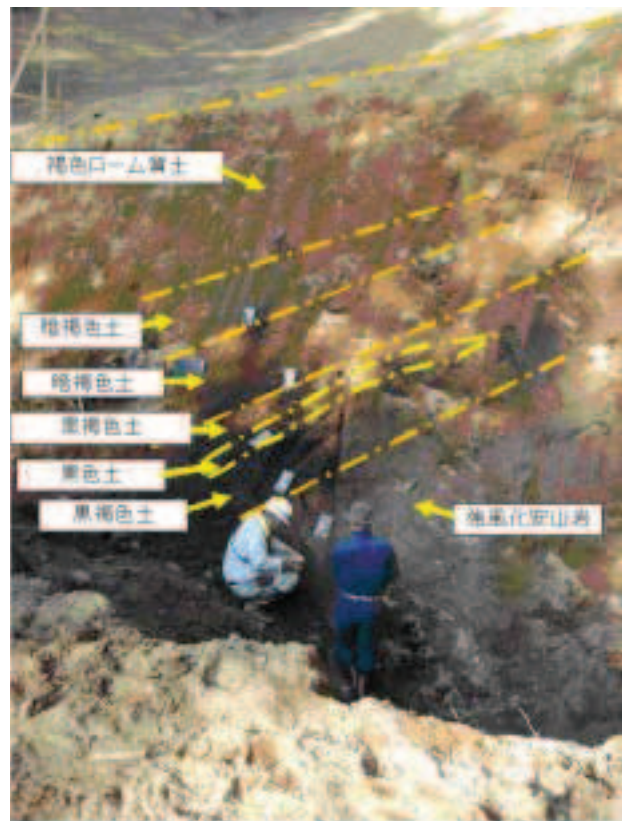
- ① 土壤に浸透した豪雨に対して、黒土層が川底のような役割を果たした可能性について、土壤の透水性試験により検討しました（写真-6）。黒土層は、褐色土に比べて明らかに低いいため、豪雨時には難透水層として機能し、その結果表層の褐色土層の土壤水分の飽和を助長したと推定されました。なお、この黒土層の低い透水性は、母材である塩嶺累層風化物の性状を反映したものと考えられます。
- ② 黒土層の生成年代は10,000～4,000年前までさかのぼり、黒土層は縄文時代以降、数千年にわたって繰り返された「火入れ」と、それにより形成された草原植生により生成されたことが明らかになりました。

黒土層の上部に崩壊起源と推定される褐色土がのっている（写真-5、図-8）ことがよく見受けられること、また土石流源頭部付近に馬蹄形の落ち込み地形が多いこと、岡谷市花岡区の古い地図では「〇〇久保」という地名をもつ場所が随所に見られることから、過去にも土石流が発生していたと推定されます。

このように、山地災害の記録が、地下の土層や地形・地名などに残されていることがよく見受けられます。「災害に強い森林づくり」にあたっては、こうした視点からも危険地の判断を行いながら対応していく必要があります。



【写真-6 土壤透水性試験に使用する
土壤サンプルの採取状況】



【図-8 黒土層年代調査】

6 森林の管理指標

間伐等により森林管理を行う上で、対象森林の状況を定量的な指標として把握することは大変重要です。

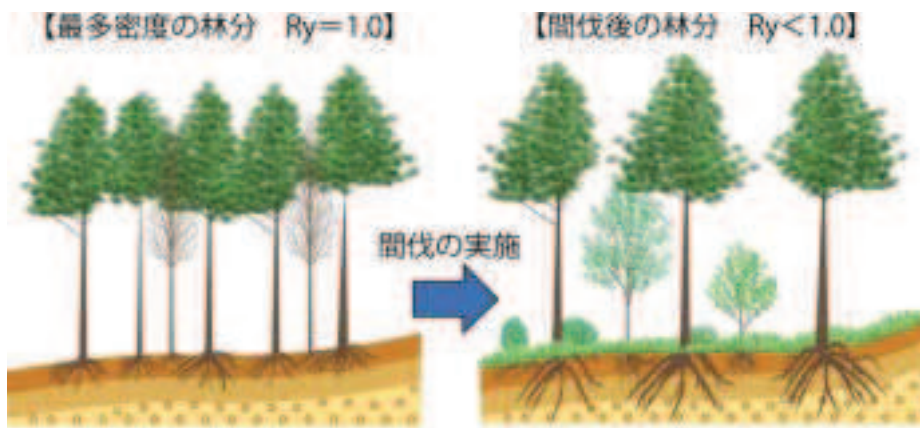
森林の管理指標には様々なものがありますが、間伐を行う際に現在最も使用されている指標が、立木密度を表す指標である収量比数 (R_y) です。

ただし、 R_y を使用できるのは、同種同齢で生育条件が一様な針葉樹人工林等に限られるため、樹木の形状等が同一でない広葉樹主体の林分の場合は、その他の指標を使用して森林管理を行うこととします。

以下に、代表的な森林の管理指標を示します。

①収量比数 (R_y)

植栽樹種等の各生育段階には、立木間競争により自然枯死が発生して成立本数が減少する上限の立木密度が存在し、これを「最多密度」と呼びます。この最多密度の林分の材積に対して、同じ樹種、同じ平均樹高の現実林分の材積との比を収量比数 (R_y) と呼び、値が小さいほど立木密度が低いことを表します。



【図-9 収量比数(R_y)のイメージ図】

②相対幹距比 (S_r)

対象林分における立木間の平均距離（幹距）と対象林分の平均樹高との比を百分率で表した指標で、立木密度が高いほど、また本数が同じ林分では平均樹高が高いほど値は小さくなります。一般に安定した壮齡林では $S_r=20$ 程度の値で安定しています。

③形状比 (F_r)

立木の平均樹高 (m) と平均胸高直径 (cm) との比を百分率で表した指標で、樹高に対して幹が太く物理的に安定した立木であるほど値は小さくなります。形状比には単木レベルの値と林分レベルの値がありますが、林分レベルの場合、 F_r が 60 以下の場合には気象害等に対して耐性が高く安全、90 を超える場合は留意が必要とされています。

④胸高断面積合計 (G)

対象林分における全立木の胸高断面積の合計を表す指標です。一定面積における G の値はほぼ決まった数値になることが知られており、80~100m²/ha 程度とされています。このときの成立本数の値を「限界成立本数」といいます。

7 災害に強い森林づくりの候補樹種

長野県内において災害に強い森林を整備する場合に、「どのような樹種を導入すればよいのか」を検討するために表-1を作成しました。

樹種の選定にあたっては、針広計100種が記載されている「長野県の樹種別特性表」(長野県林業総合センター, 2007)を参考とし、本指針における森林の立地状態区分別に、それぞれの立地環境に適合する代表的な樹種を以下の条件により選定しましたので参考にしてください。

①高木性の樹種で、ある程度の長寿であること

森林の土砂災害防止機能は、高木性の樹種で、直径が太い木ほど高いと考えられています。このため、その地域で大きく成長し、寿命がある程度長い樹種に限定しました。

②根系の土壌緊縛力が大きいこと

樹木の土壌緊縛力は環境によっても差が生じますが、樹種による違いも明らかです。このため、土壌緊縛力が小さな樹種(刈住, 1987)は含めないこととしました。

③長野県産の苗木が供給可能なこと

地域の山づくりを進めていく上では、地域産の苗木を使うことが求められます。現在、一部の針葉樹を除いて法的な規制はありませんが、遠くから苗木を持ち込んだ場合には成長等への悪影響が出る場合もあります。

そこで、長野県内の苗木生産者が現在生産している樹種を選定しました。

④それぞれの立地環境に適合していること

樹種選定にあたっては、適地適木の前提に従って、それぞれの環境に適合する樹種を選びました。なお、樹種ごとに適する気象条件もあります。特に温度環境に相当する標高の因子は極めて重要な条件になりますので、標高区分を与えて樹種を選定しました。

【表-1 災害に強い森林づくりの候補樹種】

林型	標高区分	広葉樹														針葉樹						
		オニグルミ	ケヤマハンノキ	コバノヤマハンノキ	アカシデ	ブナ	コナラ	ミズナラ	クヌギ	クリ	ケヤキ	ホオノキ	ナナカマド	シナノキ	サワグルミ	エノキ	カツラ	トチノキ	アカマツ	ウラジロモミ	スギ	
崩壊防止型	~700		○		○		○		○	○	○									○		
	~1000		○		○		○		○	○	○								○			
	~1300		○		○	北部		○		○	○								○			
	~1600		○		○	北部		○		○	○		○						○			
崩壊抑止型 土砂	~700	○	○	○		北部	○		○	○	○	○				○				○	○	
	~1000	○	○	○		○	○		○	○	○	○				○				○	○	
	~1300	○	○	○		○	○	○		○	○	○				○				○	○	
	~1600	○	○	○		○	○	○		○	○	○				○				○	○	
溪畔林型	~700m	○								○	○				○						○	
	~1000	○								○	○				○						○	
	~1300	○								○	○				○						○	
	~1600												○	○		○	○	○				

「長野県の樹種別特性表」(長野県林業総合センター, 2007)より

森林の土砂災害防止機能に関する検討委員会

【検討委員会名簿】

(委員長) 北原 曜	: 信州大学農学部	教授	(治山工学)
落合 博貴	: 独立行政法人 森林総合研究所	研究室長	(山地防災)
岡本 透	: 独立行政法人 森林総合研究所	主任研究員	(森林土壌)
片倉 正行	: 長野県林業総合センター	育林部長	(森林生態)
富樫 均	: 長野県環境保全研究所	主任研究員	(地 質)
河崎 則秋	: 中部森林管理局	治山課長	(国有林行政)
久米 義輝	: 長野県林務部	森林整備課長	(民有林行政)

(所属、役職名は、平成 20 年 1 月現在)

【検討委員会の開催】

(平成 18 年度)

- 第 1 回検討委員会・・・平成 18 年 10 月 26 日 (木曜日)
- 第 2 回検討委員会・・・平成 18 年 12 月 4 日 (月曜日)
- 第 3 回検討委員会・・・平成 19 年 1 月 24 日 (水曜日)
- 第 4 回検討委員会・・・平成 19 年 2 月 26 日 (月曜日)
- 第 5 回検討委員会・・・平成 19 年 3 月 16 日 (金曜日)

平成 19 年 (2007 年) 3 月 : 「災害に強い森林づくり報告書」を公表

(平成 19 年度)

- 第 1 回検討委員会・・・平成 19 年 5 月 15 日 (火曜日)
- 第 2 回検討委員会・・・平成 19 年 7 月 13 日 (金曜日)
- 第 3 回検討委員会・・・平成 19 年 9 月 28 日 (金曜日)
- 第 4 回検討委員会・・・平成 19 年 11 月 29 日 (木曜日)
- 第 5 回検討委員会・・・平成 20 年 1 月 28 日 (月曜日)

平成 20 年 (2008 年) 1 月 : 「災害に強い森林づくり指針」を公表
: 「災害に強い森林づくり指針解説」

災害に強い森林づくり指針

平成 20 年（2008 年）1 月

森林の土砂災害防止機能に関する検討委員会編

企画・編集：長野県林務部（森林整備課 治山係）



〒380-8570

長野市大字南長野幅下 692-2

T E L 026-235-7269

F A X 026-234-0330

E-mail shinrin@pref.nagano.jp
