

1. はじめに

崩壊や地すべりによる土砂の流出を軽減・防止するために、土砂流出防備保安林が設けられているが、その規模や施業方法については経験的に決定される場合が多いようである。また、河道沿いの林木や土砂流下斜面の林木が流出土砂に巻き込まれ、流木としてダム放水路の閉塞や橋脚の流出につながるなどの悪影響が指摘されることもある。したがって、崩壊土砂の流下が予想される斜面や河道の樹林帯に土砂流出防備効果を期待する場合には、まず流出土砂に対する林木の抵抗力を把握したうえで樹木の大きさ、樹林帯密度、幅、長さ等を定量的に決定して樹林帯の維持管理を行う必要がある。本稿では、樹林帯の機能を形態的に考察したうえで、抵抗形態の一つである転倒による立木の損失エネルギーを測定して、土砂流出防備のための樹林帯の規模を定量的に決定するための方法を検討した。

2. 樹林帯による土砂流下防止の形態

樹林帯によって土砂流が停止する場合には、図-1に示したような樹木、樹林帯の抵抗力が作用することによって土砂流の運動エネルギーが徐々に減少し、停止すると考えられる。すなわち、崩壊などによって土砂流下が始まり樹林帯に衝突すると、土砂流のもつ衝撃力 P_g あるいは P_s (図-2) が第一列目(人工造林地を考える場合)の樹木に作用する。 P_g , P_s に対して樹木の樹幹最大曲げ折損抵抗力 σ_t と根元からの転倒に対する最大抵抗力 R_t が小さければ樹幹折損や転倒が起こるが、逆に大きければ土砂流の一部は樹木上部に堆積するが、その他は林木間を流下することになる。そして、 P_g , P_s が大きく、樹木の折損や転倒が何列も生ずる場合でも、土砂流のエネルギー E_s は折損、転倒に費され、しだいに減少して立木間を流下するようになると考えられる。このように立木間を流下するようになると、土砂流中の立木の抵抗エネルギー E_{rt} と地表面での摩擦エネルギー E_r が作用して E_s は徐々に減少する。そして、 $E_s \leq 0$ となるときに土砂流は停止すると

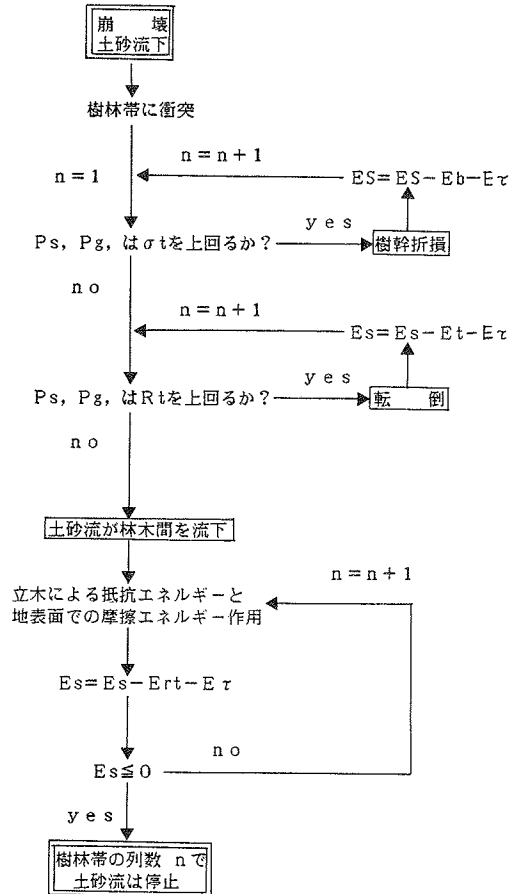


図-1 土砂流が樹林帯を通過するときの樹木の抵抗形態

考えられるであろう。

3. 土砂流の強度と樹木の抵抗力

3.1 樹木に与える土砂流の衝撃力

土砂流の衝撃力は実験や現場での測定から、一般に図-2に示すような形で示されることが知られている。すなわち、土砂流の先端部が物体に衝突するとき衝撃圧は急な立ち上がりを示し、ピーク P_g が出現する。その後続く土砂流は流体として物体に作用し、流体圧 P_s が負荷される。一方、 P_s 、 P_g は衝突する物体の形状によっても変化する。立木など柱類に対する P_s や P_g はそれぞれ式(1)、(2)によってそれぞれ示され、雪崩の場合には図-3に示した推定値が示されている^{1) 2)}。

$$P_s = \rho_d \cdot A \cdot V^2 \cdot C / 2g \quad \text{--- (1)}$$

A : 土砂衝突面積 C : 樹幹形等による係数

V : 土砂流の速度 ρ_d : 土砂流の単位重量

$$P_g = K \cdot P_s \quad \text{--- (2)}$$

定数 K は平尾らが行った清水およびベントナイト溶液を用いた実験結果によれば $K = 1.0 \sim 4.5$ の値が求められている。また、土砂流の運動エネルギー E_s は(3)式で表わせる。

$$\begin{aligned} E_s &= \rho_d \cdot V^2 \cdot h \cdot l_d \cdot w / 2g \\ &= \rho_d \cdot Q \cdot V^2 / 2g \quad \text{--- (3)} \end{aligned}$$

Q : 土砂流の体積, h : 土砂流の高さ, l_d : 土砂流の長さ, w : 土砂流の幅

3.2 土砂流に対する樹木の抵抗力

(1) 樹幹の最大曲げ折損抵抗力 (W_f) : 樹幹を円断面単一バー片持ばりとして、図-4に示すように外力 W_f が作用し折損する場合を考えると、折損部分の曲げモーメント M_f は(4)式で表わせる。

$$M_f = Z_{x_0} \cdot \sigma_{b_0} = -W_f \cdot H / 2\beta \quad \text{--- (4)}$$

Z_{x_0} : 最大曲げ応力発生部位 x_0 における断面係数

$$(x_0 = 1/2\beta, \quad \beta = D/d - 1)$$

σ_{b_0} : 無欠点生材条件での曲げ強さ

(4)式から

$$W_f = -Z_{x_0} \cdot 2\beta \cdot \sigma_{b_0} / H \quad \text{--- (5)}$$

ここで

$$\begin{aligned} Z_{x_0} &= ((1 + \beta \cdot x_0)^3 / (1 + \beta)^2) Z_1 \\ x_0 &= 1/2\beta, \quad Z_1 = (\pi/32) D^3 \end{aligned}$$

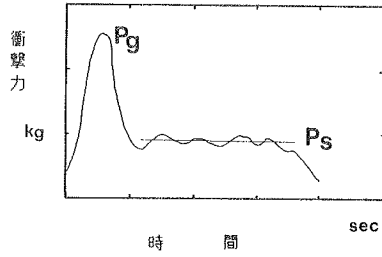


図-2 土砂流が物体に衝突するときの衝撃力

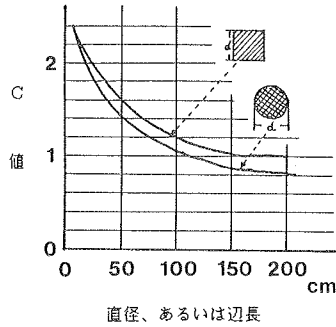


図-3 Cの推定値 (古川による)

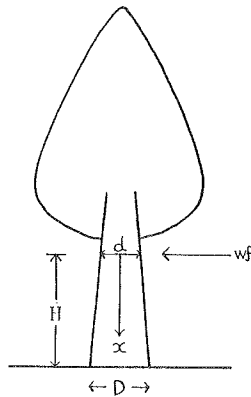


図-4 樹木に外力が加わる時の各要素

Z_1 : 根元の断面係数, $\sigma_{b_0} = 0.005 E_g$ (針葉樹の推定式), E_g : 樹幹の平均ヤング率
を代入すると(6)式を得る。

$$Wf = 3.313 \times 10^{-3} \cdot \beta \cdot D^3 \cdot E_g / (1 + \beta)^3 \cdot H \quad \text{--- (6)}$$

よつて, Wf より小さい外力であれば樹幹は折損しない。⁴⁾

(2) 樹木の転倒抵抗力 (R_t), 転倒エネルギー (E_t) : R_t , E_t は抜根試験により測定した。試験方法は図-5に示すように樹木を引き抜くときの抵抗力と変位を測定するものである。図-6はスギ林木を対象に行つた抜根試験で典型的な抵抗形態を示した一例である。 R_t はこの試験のように徐々に载荷する場合と衝撃力が加わる場合とでは大きさを違いが予想されるが, 本報では安全側に立つて抜根抵抗力の最大値を R_t とした。スギについては(7)式の関係が求められている。⁵⁾

$$\log R_t = 1.530 \log D - 1.451 \quad \text{--- (7)}$$

また, E_t は図-6から面積(仕事量)を測定することによつて求めた。図-7は10回の試験結果から E_t と D の関係求めたもので, その関係は(8)式で示される。

$$E_t = 6.30 \cdot D^{2.26} \quad \text{--- (8)}$$

(3) 土砂流中における立木の抵抗エネルギー E_f

次に, E_s が減少し樹木が倒伏せず土砂流が林木間を流下するようになった場合を考える。まず, E_s は土砂流が樹木に加えた仕事量だけ減少する場合には単木がもつ抵抗エネルギー

E_f' は(9)式で示される。さらに, 立木間隔 x で方形植栽された一斉造林地を想定し, 土砂流が通過する第一列目の林木がもつ抵抗エネルギー E_{f1} は(10)式で示される。

$$E_f = P_s \cdot l = C \cdot d \cdot h \cdot \rho_d \cdot V^2 \cdot l / g \quad \text{--- (9)} \quad E_{f1} = E_f \cdot w / x \quad \text{--- (10)}$$

また, 列間での地表面での摩擦抵抗力 τ_f を考えると, 摩擦による損失エネルギー $E_{\tau f}$ は(11)式で示せる。

$$E_{\tau f} = \tau_f \cdot x = ((\rho_d / g) Q \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi + C) \cdot x \quad \text{--- (11)}$$

よつて, n 列目の林帯の抵抗エネルギー E_{fn} , n 列目通過後の土砂流のエネルギー E_{sn} は(12)(13)式で示される。

$$E_{fn} = \rho_d \cdot w \cdot C \cdot d \cdot h \cdot V_{n-1}^2 \quad \text{--- (12)}$$

$$E_{sn} = E_{s_{n-1}} - E_{fn} - n \cdot E_{\tau} \quad \text{--- (13)}$$

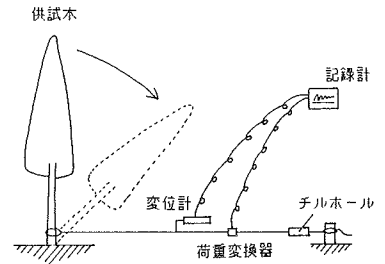


図-5 抜根試験模式図

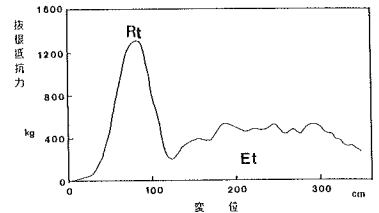


図-6 抜根試験による変位と抜根抵抗力の関係

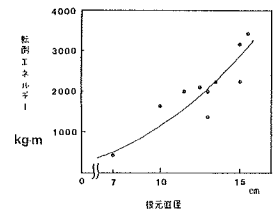


図-7 根元直径と根元エネルギーの関係

したがって、 $E_{sn} \leq 0$ になるとき土砂流は停止し、停止させるために n 列の樹林帯が必要になる。

4. モデルの適応例

つぎに、図-1に示したフローチャートにしたがって、モデル計算を行った。図-8に示すように崩壊が起こった斜面の下部にある樹林帯によって崩壊土砂流の流下が阻止されるとする。土砂流、および樹林帯の規模は表-1に示すとおりである。なお、土砂流には P_g を極端に上昇されるような岩礫は含まれないものとする。また、動摩擦係数は崩壊地の斜面勾配と崩壊土砂の到達距離、崩壊高の関係から求めた。⁶⁾ 樹林帯の規模は茨城地方国有スギ林収穫表から求めたもので、これらの樹木が方形植栽された場合の地位と林齢別に6種類の樹林帯について、その効果を表-1の各因子をパラメーターにしてそれぞれ計算した。

計算の結果より、土砂流が樹林帯中を通過する際の衝撃力の変化と通過した列数の関係を図-9に示した。図より、6種類の樹林帯のうち樹木が最も小さい地位-3、20年生林分では第1列から10列目までが転倒して22列目まで土砂流が到達することを、また樹木が最も大きい地位-1、60年生林分では第2列までが転倒して、10列目まで到達することを示している。このように、成長が良く大きい林木からなる樹林帯ほど、樹木の被害が少なく土砂流出抑止効果を発揮すると考えられた。また、土砂流下距離をみると林木の大きさにあまり影響は受けず、6種類の樹林帯とも39~43mであった。なお、樹幹の曲げ折損抵抗力は転倒抵抗力に比べてかなり小さい(表-1)ため曲げ折損の発生は稀と考えられた。

5. おわりに

このモデルには立木への土砂流の衝撃力、樹木の衝撃に対する抵抗力、動摩擦係数、林内での流体としての運動、土砂流の速度、巨礫が多く含まれる場合など、個々に解明されなくてはならない多くの課題が含まれている。現モデルでも一応の結果は得られるが、その信頼性は十分でない。崩壊現場での資料をもとにした実証的裏付けも含め、今後も一層詳細な検討を行う予定である。

引用文献 (1) 防雪工学ハンドブック：88~93, 19 (2) 古川巖：電線路雪害対策研究委員会報告VI, 1956 (3) 平尾公一ほか：新砂防, 76, 11~16, 1970 (4) 沢田稔：林試北支研究資料, 1983 (5) 北村嘉一：林試研報313 (6) 森脇寛：25回地すべり学会, 146~147, 1986

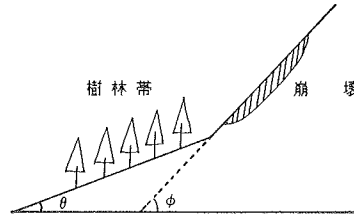


図-8 崩壊発生位置と樹林帯の関係

表-1 土砂流・樹林帯の規模

土砂流の規模	高さ	1.2 m	単位体積重量	1500 kgf/m ³
	長さ	15.0 m	崩壊斜面勾配	35°
	幅	10.0 m	樹林帯斜面勾配	20°
	速度	6.0 m/sec	動摩擦係数	0.39
樹林帯の規模	地位	1 3		
	林齢	20 40 60	20 40 60	
	DBH cm	15.9 27.5 33.3	11.3 20.3 24.4	
	林木密度 本/ha	1965 860 640	2630 1255 995	
最大曲げ抵抗力 t		8.43 32.3 52.6	3.78 15.2 23.9	
最大転倒抵抗力 t		1.52 3.17 4.14	0.99 2.10 2.69	

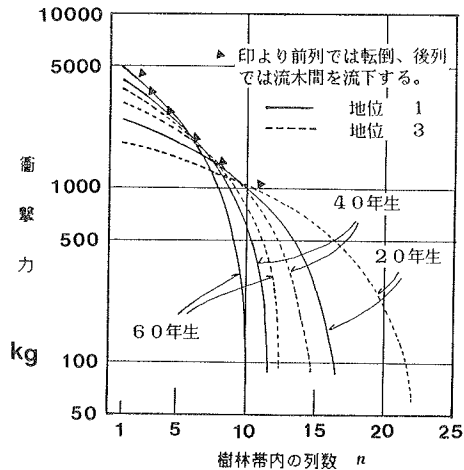


図-9 土砂流が樹林帯に衝突したときの土砂流の衝撃力の変化と樹林帯内の樹木列数の関係