

建設省土木研究所 ○ 福本 晃久

矢澤 昭夫

水山 高久

はじめに

土石流が停止する勾配近傍の溪床上の立木は、土石流に抵抗し、土石流の停止、体積を促進する可能性がある。また、砂防ダム近傍上流の立木は、土石流によって破壊されても、砂防ダムにとって一種の緩衝材として働くことが考えられる。これらの機能を評価するには、立木の土石流に対する抵抗力や破壊限界を明かにする必要がある。立木が土石流によって破壊される形態には、土石流流体力による押し倒し、土石流中の礫による曲げ破壊、立木近傍の洗掘が考えられる。

ここでは、立木の土石流に対する抵抗と、土石流流体力による押し倒し限界を検討した。模型立木の静的引き倒し実験と、実験水路内での疑似土石流による押し倒し実験により破壊機構を考察し、林学分野で多く実施されてきた抜根試験を参考にして、実際の立木の押し倒し限界を推察したので報告する。

## 1. 実験の概要

実験に用いた水路は、長さ5m、幅20cmの両面アクリルの木製勾配可変水路である。水路勾配は17°とし、立木群（樹林帯）は、水路末端より1m上流の位置に設置した。立木の設置方法は、水路に固定した場合（固定木）と、土石流により移動可能な場合（可動木）の2種類とした。立木は、図-1に示すような直径（D）が0.5～1.5cm、高さが30cmの円柱に、長さ（R）が3～7cmの板を根として付けた木製のものを使用した。立木の配置は、縦断方向へ3列、5cmまたは10cm間隔とし、横断方向へ1～5本を等間隔に設置し樹林帯とした。河床材料は、平均粒径 $d_m=1.6\text{mm}$ の砂を使用した。

実験は、河床材料を水路内に厚さ5cm、長さ3mで敷き、上流端より2ℓ/secの水を供給して、土石流を発生させた。土石流及び樹林帯は、側面より観察し、VTRカメラを用いて記録した。

立木の強度の測定は、土石流実験に用いた立木を使って、水平方向に引き倒す限界値をバネバカリにより測定した。その際、砂層厚（X）を2～12cm、含水比（W）を0.9～23.3%の範囲で変化させた。

## 2. 実験の結果と考察

### 2.1 樹林帯による土石流の制御効果

樹林帯による土石流の制御効果（ $V/V_0$ ）と樹林帯の密度（ $S = n \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{1}{S_0}$ ）の関係を図-2に示した。ここで、 $V$ ：樹林帯での土石流フロントの平均流速、 $V_0$ ：樹林帯がない場合の土石流フロントの平均流速、 $S_0$ ：単位面積、 $n$ ： $S_0$ 内の立木の本数である。

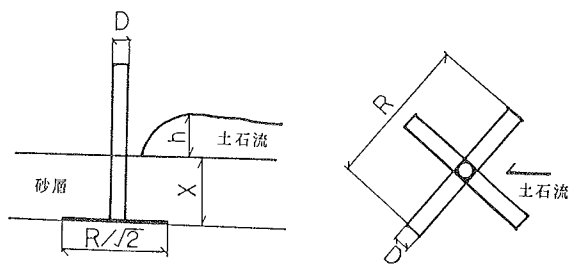


図-1 立木模型の概念図

流速は、ばらつきが大きいですが  $S = 5\%$  程度では、流速は低下しておらず、この程度の樹林帯では、制御効果は、期待できないようである。

樹林帯をスリットとして考えた場合、本実験では、 $\Sigma b/B$  が  $0.63 \sim 0.95$  であり、池谷らによる効果的なスリットの密度  $\Sigma b/B = 0.4 \sim 0.6$  よりは大きい。ここで、 $\Sigma b$  : スリット幅の総和、 $B$  : 水路幅である。

## 2.2 立木の破壊強度

引き倒し試験時の立木 (図-1) の力の釣り合いにより導かれる引き倒し強度は、木の自重の効果を無視し根の下端を作用点とすると、

$$\frac{M_w}{D \cdot \rho \cdot X} = \frac{1}{6} \cdot C_x \cdot X + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot C_r \cdot R \cdot \left( R - \frac{D \cdot \pi}{8} \right) \dots (1)$$

で表わされる。ここで、 $M_w$  : 立木の強度 (モーメント)、 $D$  : 立木の径、 $\rho$  : 砂層の単位体積重量、 $X$  : 砂層厚、 $R$  : 根の長さ、 $C_x$ 、 $C_r$  : 係数である。

立木の強度の測定結果を、図-3~図-6に示す。(1)式の係数  $C_x$ 、 $C_r$  を図-3~図-6から求めると、含水比 ( $W$ ) = 3% では  $C_x = C_r = 8$ 、 $W = 22\%$  では  $C_x = C_r = 4$  となった。図-3~図-6に示す実線は、(1)式の計算値を示している。

図-3~図-6は、立木の引き倒し強度が、砂の含水比によっても変化することを示している。図-7に、 $D = 1\text{ cm}$ 、 $R = 5\text{ cm}$ 、 $X = 5\text{ cm}$ での含水比 ( $W$ ) と、 $M_w$  の関係を示した。図より  $M_w$  は、 $3\% < W < 18\%$  では一定値を示すが、 $W > 18\%$  となると減少する。図-7より、引き倒し強度の変化を係数  $C_x$ 、 $C_r$  の値の変化として表現すると  $C_x$ 、 $C_r$  と  $W$  の関係は、図-8のようになる。

## 2.3 土石流流体力による立木の破壊 3種類の根の全て

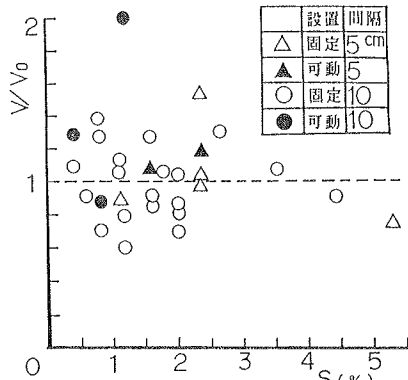


図-2 土石流フロントの流速と樹林帯の密度の関係

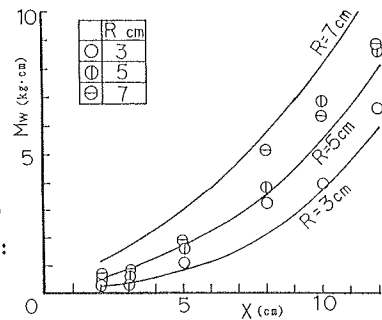


図-3 立木強度の測定結果 ( $D = 1\text{ cm}$ ,  $W = 3\%$ )

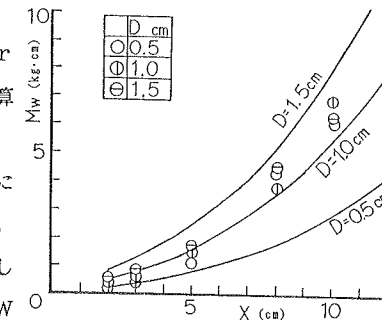


図-4 立木強度の測定結果 ( $R = 5\text{ cm}$ ,  $W = 3\%$ )

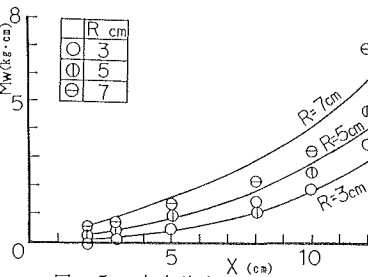


図-5 立木強度の測定結果 ( $D = 1\text{ cm}$ ,  $W = 22\%$ )

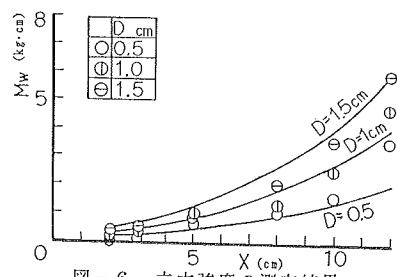


図-6 立木強度の測定結果 ( $R = 5\text{ cm}$ ,  $W = 22\%$ )

について可動木群に土石流が到達すると、フロント部では倒れないが後続流で倒れた。

立木に作用する土石流流体力は、

$$F = C d \cdot \frac{\rho_0}{2 \cdot g} \cdot U^2 \cdot D \cdot h$$

..... (2)

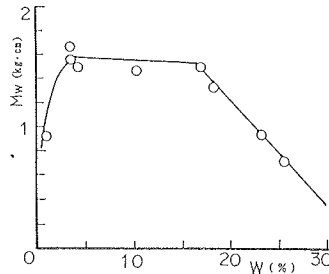


図-7 立木強度と含水比の関係 (D=1 cm, R=5 cm, X=5 cm)

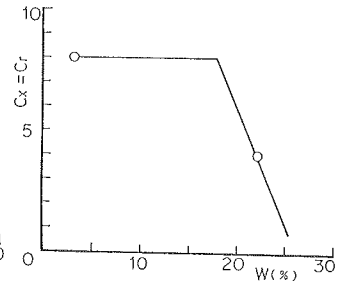


図-8 Cr \* Cxと含水比の関係

で表わせる。ここで、F：土石流流体力、 $\rho_0$ ：土石流の単位体積重量、U：土石流の流速、D：立木の径、h：土石流の水深（波高）、g：重力加速度、Cd：抗力係数である。

表-1 土石流の諸元

	単位体積重量 $\rho_0$	波高 h	流速 U
土石流フロント	2 g/cm	4.1 cm	35.3 cm/sec
後続流	2	3.4	136

立木に作用する土石流流体力のモーメント (Md) は、

$$Md = F \cdot (h/2 + X) \quad \dots (3)$$

となる。ここで、X：砂層厚である。

図-9は、(2)、(3)式より求まるMdと(1)式より求まるMwを比較したものである。このときの立木の強度 (Mw) は、飽和状態としてW=24%、X=5 cmとした場合の計算値を、土石流流体力のモーメント (Md) は、表-1に示す諸元を用い、抗力係数は、土石流中の砂粒子の衝突を考慮してCd=2とした場合の計算値を使用している。図-9より土石流フロントの流体力に比べて後続流の流体力の方が大きくなっていることがわかる。図-9より立木は、フロント部でなく後続流によって倒壊されることになり、実験に於ける立木の後続流による倒壊が説明される。

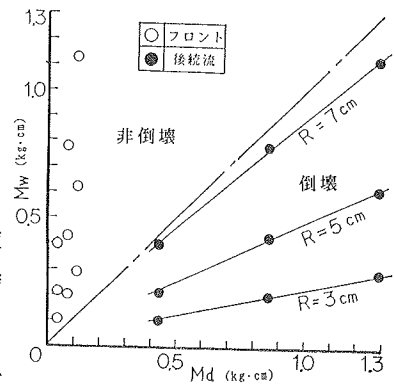


図-9 立木強度 (Cr=Cx=2, X=5 cm) と土石流流体力 (Cd=2,  $\rho_0=2\text{g/cm}^3$ ) の比較

### 3. 実際の立木の破壊限界

#### 3.1 土石流流体力による立木の破壊限界

前節で得られた傾向は正しいとして、実際の立木の抜根試験の結果をもとに、土石流流体力による立木の破壊限界を検討する。立木の抜根試験結果は、図-10に示した北村らによる試験結果を用いる。なお、北村らは、ワイヤーを立木の地際にセットし抜根試験を行っている。

抜根抵抗力 (P) と、(2)、(3)式で求まる土石流流体力 (Md) より、立木の破壊限界を推定するために、立木に作用する力の支点を地中X (根の深さ) と仮定して考察すると

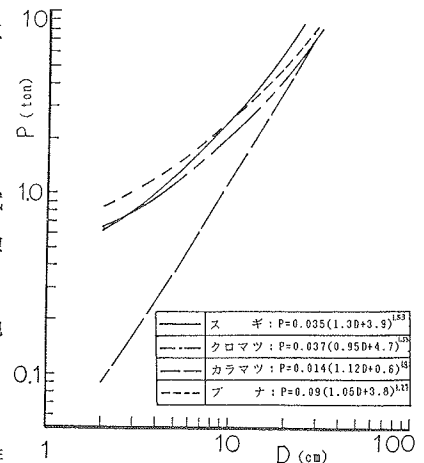


図-10 抜根抵抗力と胸高直径の関係

立木の強度は、(4) 式のように示される。

$$Mw = P \cdot X \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、Mw：立木の強度（モーメント）である。

立木の強度と、土石流流体力のモーメントとが等しいとして、立木の倒壊時の波高と流速を求めると(5) 式のようなになる。ここでは、立木に作用する土石流流体力の作用点を土石流水深の1/2の高さとしている。

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot Mw}{Cd \cdot \rho_0 \cdot D \cdot h \cdot (h/2 + X)}} \quad \dots (5)$$

図-11、図-12は、杉の場合の(5) 式から求められる倒壊限界の波高と流速の関係を示したものである。このときの  $\rho_0 = 1.5t/m$ 、 $Cd = 1.17$  (円柱)とした。図-11は、立木に作用する力の支点を地中1mとした場合の胸高直径(D)と倒壊限界の関係を示したものである。杉の場合は、胸高直径(D)による違いはあまりみられない。図-12は、胸高直径(D)を20cmとした場合の立木に作用する支点の位置(X)と倒壊限界の関係を示したものである。杉の場合、根の深さは1~3mの範囲が多いと考えられる。立木に作用する力の支点の位置と根の深さが等しいとすれば、根の深さに関する情報が不足しているが、これを仮定すると倒壊限界が大略推定できる。

おわりに

立木の倒壊限界については、根の下端を支点とした抜根抵抗力と土石流流体力の釣り合いより推定することを考えた。この結果と、土石流中の礫による破断限界を比較すれば、立木の破壊が予測できる。ただし、土石流が立木周辺を洗掘した場合の、立木の抵抗力に与える影響はまだわかっていない。

ここでは、樹林帯による土石流の制御効果は、樹林帯の密度が  $S = 5\%$  程度では、あまり期待できないという結果を得た。しかし、樹林帯の規模を大きくした場合や、密度を大きくした場合の、樹林帯による土石流の制御効果については、今後検討する必要がある、立木の礫による破壊も考慮して、更に研究を進めて行く必要がある。

参考文献

- 1) 池谷 浩, 上原信司: スリット砂防ダムの土砂調節効果, 土木研究所資料 22-7 (1980) PP.33~38
- 2) 北村嘉一, 難波宣土: 抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能, 林業試験場研究報告 第 313号, 1981, PP.175~ 208
- 3) 矢澤昭夫, 水山高久, 鈴木浩之: 樹木の衝撃エネルギー吸収能に関する基礎実験報告書, 土木研究所資料 第2430号, S62年2月

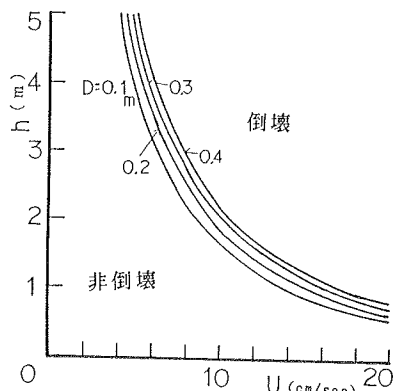


図-11 土石流流体力による立木(杉)の倒壊限界 (X = 1 m)

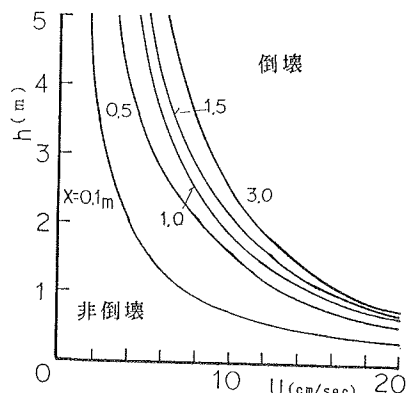


図-12 土石流流体力による立木(杉)の倒壊限界 (D = 20cm)