

23 遊砂地における樹木の倒壊に関する一考察

○財団法人 建設技術研究所 小田 晃
 京都大学大学院農学研究科 水山 高久
 財団法人 建設技術研究所 泉 岩男
 同 上 阿部 彦七

1. はじめに

最近では、氾濫等の原因とならない場所における溪畔林を維持する方向で、砂防計画が立案されるようになってきた。それに伴い、施設配置計画の検討手法のひとつである、地形模型による水理模型実験においても樹木に見立てた丸棒を使用しての実験が多く実施されるようになってきた。樹木の倒壊・流出に大きく影響する根系の抵抗力の再現は丸棒底面に板を設置するなどの試み¹⁾が行われているが、その再現性について言及されるまでには至っていないのが現状である。

一方、遊砂地などにおいて、長期間、出水による土砂移動が発生しない場合、樹木が繁茂している状況がよく見られる。このような樹木は根系の深さが浅いため、洪水時には倒壊・流出し易いと考えられる。その原因として、樹木周辺の局所洗掘による根系の支持力低下と流体力の他に浮力の影響も大きいと考えられる。

樹木の倒壊・流出については現地での抜根試験²⁾や実験・研究³⁾が行われており、樹種による倒壊限界時の根系の深さと抵抗力の関係等が示されている。しかし、樹木の流出については現地での樹木流出時のデータが少ないため抵抗力と流体力、浮力等の関係について不明な点が多い。

ここでは、樹木の倒壊限界について、現地での抜根試験結果から得られた根系の深さと抵抗力の関係を、樹木を丸棒として根系の抵抗を差込み深さの抵抗に置き換えた基礎的実験結果と比較する。次に、樹木の流出限界について、砂層中の摩擦力（抵抗力）と流体力、浮力による力の釣り合いと実験結果から示し、差込み深さによる抵抗力を根系の抵抗力に置き換えることの妥当性について考察する。

2. 実験の概要

樹木を丸棒として、その倒壊限界と流出限界時の水深を求める実験を実施した。水路幅は 1.0m であり、水路中央部の 2.0m の区間を移動床とし、粒径 1.0mm の均一砂を敷き詰めた。底面勾配は水平である。使用した丸棒の直径 D は 2.0mm、長さ ℓ は 30cm である。実験は、水路下流端の堰を上げて丸棒周辺の砂が移動しないように水を水路内に溜め、流量を徐々に増加させて所定の流量に到達させた。その後、堰を下げて水深を低下させ、丸棒が倒壊・流出する状況を観察した。なお、差込み深さ X は 1.0, 2.0, 3.0cm の 3 種類、流量は 8.0~25 l/s である。

3. 樹木の倒壊限界について

樹木の倒壊限界は、樹木周辺の局所洗掘が発生しない状態を対象とした。樹木を丸棒と仮定してその下端を支点 O としたモーメント⁴⁾を考える。流体力 F の作用点を水深の $1/2$ とすると、流体力によるモーメント M_F は以下ようになる。なお、樹木の自重と浮力については無視した。

$$M_F = F \cdot L_F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot u^2 \cdot Dh \cdot \left(X + \frac{h}{2}\right) \quad (1)$$

ここに、 C_D は丸棒の抗力係数、 h は水深、 u は平均流速、 ρ は水の密度、 X は差込み深さ、その他の記号は図-1 に示すとおりである。

一方、現地の樹木引き抜き試験結果から得られた倒壊限界モーメント M_c と樹木の胸高直径 D との関係は $M_c \propto D^{2\sim3}$ であり、胸高直径 D と根系の深さ X の関係は $D \propto X$ である⁵⁾。これらから、現地の樹木の倒壊限界モーメントは根系の深さのべき乗に比例する。ここに、 $i=2\sim3$ である。

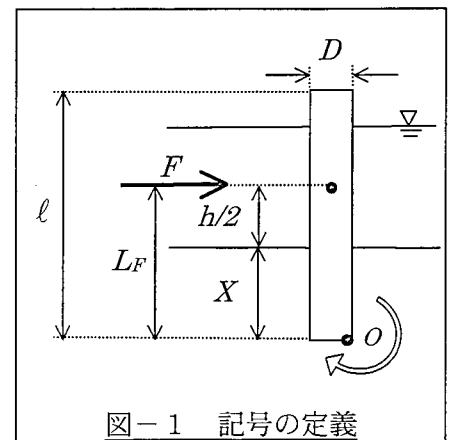


図-1 記号の定義

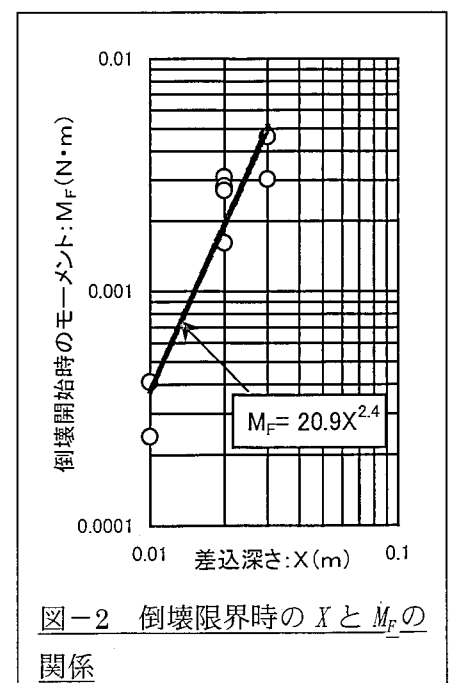


図-2 倒壊限界時の X と M_F の関係

$$M_c \propto X^i \quad (2)$$

実験から得られた倒壊限界時の水深を用いて式(1)から流体力によるモーメント M_f を計算し、差込深さ X との関係求めた。なお、倒壊限界とは樹木に見立てた丸棒が傾斜し始める時とした。

図-2に流体力によるモーメント M_f と差込深さ X の関係を示す。この結果より M_f と X の関係は、

$$M_c \propto X^{2.4} \quad (3)$$

となり、現地の樹木引き抜き試験結果から得られた倒壊限界モーメント M_c と根系の深さ X の関係と一致する。これより、今回の条件では樹木の倒壊限界は定性的傾向が概ね正しく表されると考えられ、樹木根系の抵抗を差込深さに置き換える事の妥当性が示された。

4. 樹木の流出限界について

樹木の流出は、流体力の他に浮力が影響するものと考えられる。ここでは、実験観察をもとに、樹木の流出時の状況を、浮力を考慮しない場合と考慮した場合とに分け、実験結果を用いて考察を行う。

実験観察から、今回の条件における流出時の状況は、樹木先端部が水面と一致するまで傾斜した後、水深の低下とともに傾斜が進行し、やがて、引き抜かれるように流出する状況がほとんどであった。なお、差込深さが 1.0cm のケースは倒壊開始と同時に流出した。

この実験観察から、流出時は倒壊限界で考えた樹木下端を支点とするモーメントによる釣り合いではなく、丸棒軸方向の力の釣り合いを考えることとする(図-3)。

流出時における抵抗力を砂層中の丸棒回りの摩擦力、引き抜き力を流体力及び流体力と浮力の合力と仮定し、それらの関係について実験値をもとに整理した(図-4)。

砂層中の丸棒回りの摩擦力を R 、丸棒軸方向に作用する流体力を F_θ 、浮力を W_F とすると各力は以下で表される。

$$\left. \begin{aligned} R &= f_r \frac{\pi D X}{\sin \theta} & F_\theta &= F \cos \theta \\ W_{F\theta} &= W_F \cos \theta = \frac{\pi}{4} D^2 h \rho g \cos \theta \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに、 f_r は丸棒周面の摩擦係数(ここでは $f_r=1.0$ とした。)、 g は重力加速度、 θ は流出時の傾斜角度であり $\theta = \sin^{-1}\{(h+X)/l\}$ である。図中には、抵抗力と引き抜き力が等しいとした場合の点線も示した。

この結果から、実験値は浮力を考慮することで抵抗力と引き抜き力が等しいとした場合(図中の点線)に近づくことが示された。したがって、極めて簡単な力の釣り合い条件による検討ではあるが、樹木先端部が水面と一致するまで傾斜した後、引き抜かれるように流出する状況では浮力の影響も無視できないと考えられる。

また、式(4)に表されるように抵抗力 R は差込深さ X の関数でもある。このことから、根系の抵抗の差込深さによる置き換えが、樹木流出時にも成立するものと考えられ、実際の樹木流出時においても根系の抵抗が、樹木に見立てた丸棒の差込み深さによる抵抗で置き換えられる可能性が示唆された。

5. おわりに

今まで樹木の倒壊・流出を定性的に扱っていた水理模型実験において、根系の抵抗を丸棒の差込み深さによる抵抗で適切に置き換えることができれば実験による流量等の定量的な評価に近づく。今後は実際の樹木が流出する時の諸条件についての調査と、丸棒の径等を変化させた検討を実施する予定である。

参考文献 1) 井良沢道也・石川芳治・福本晃久・水山高久：樹林帯の土石流制御効果，土木技術資料，33-5，pp.30~37，1991。2) (財)リバーフロント整備センター編：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)，山海堂，p.24，1994。3)北川 明・島谷幸広・小栗幸雄：洪水による樹木の倒伏，土木技術資料，30-7，pp.9~14，1988。他 4) 矢澤昭夫・水山高久・福本晃久：立木の土石流制御効果と倒壊限界，土木技術資料，29-12，pp.54，1987。5) (財)リバーフロント整備センター編：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)，山海堂，p.22，1994。

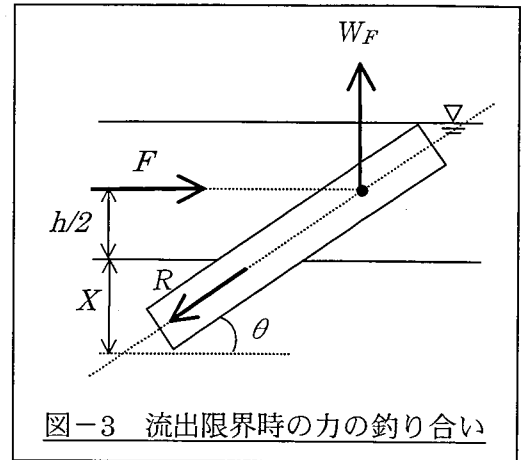


図-3 流出限界時の力の釣り合い

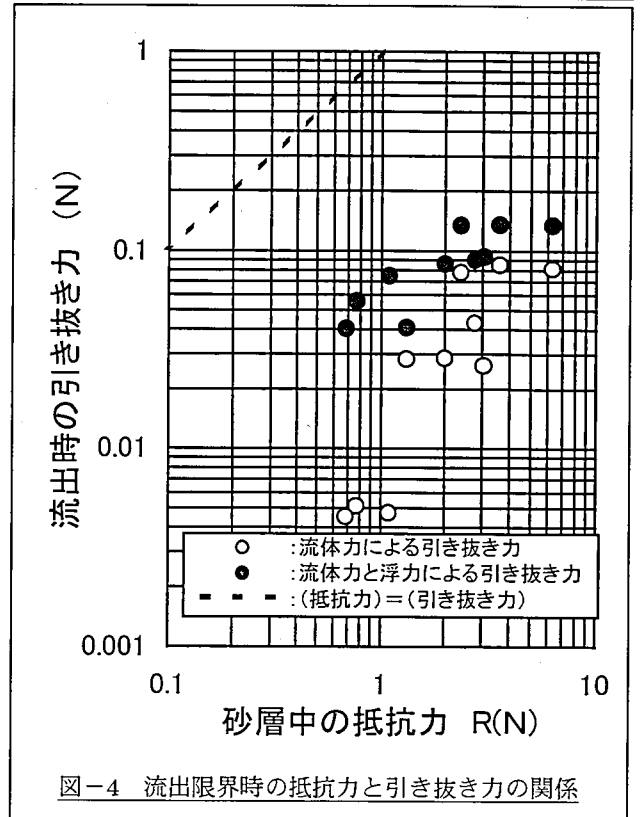


図-4 流出限界時の抵抗力と引き抜き力の関係