

建設技術研究所 ○坂東 高
 建設省土木研究所 水山 高久
 同 上 井良沢道也
 同 上 福本 晃久

1. はじめに 最近、緑の砂防ゾーン創出事業を始めとして、河道内または遊砂地内の樹林により流出する土砂を捕捉する工法が計画・施工されるようになってきた。しかし、樹林帯による流出土砂の捕捉効果については明らかでなく、土石流あるいは掃流状態で流出する土砂を樹林によってどの程度捕捉できるか定量的・定性的に把握するには水理模型実験が有効な手段と考えられる。

ある現象を水理模型実験によって検討する場合、その現象に支配的な因子が原型と模型とで相似であることが必要である。一般に水理現象を模型で再現する場合、慣性力と重力が卓越することからフルードの相似則が用いられている。しかし、樹林帯の検討において立木の外力に対する抵抗力をどのように模型に再現させるかが模型実験上の課題となっている。

そこで、立木の現地試験結果をもとに、立木の外力に対する抵抗力を検討し、その抵抗力を再現する実験手法を検討したので、ここに報告する。

2. 立木の抵抗力について 立木の抵抗力は、樹木の断面力（せん断力、曲げ応力）、根張りの状態（根と土の粘着力）、土質の状態（含水率、粘着力）等によるものと考えられる。樹木の断面力は樹径が大きいと大きくなり、根張りの状態は樹径に、樹径は土質の状態に左右されると考えられる。このことから、樹径は立木の抵抗力を代表する因子であると考えられる。そこで、土木研究所砂防研究室で実施した立木の衝撃載荷試験ならびに静的引き倒し試験結果^{1), 2)}をもとに、樹径と最大荷重、最大曲げモーメント、力積およびエネルギー吸収能との関係について調べた。なお図-1、図-2に示すように胸高径、立木の高さ等が根元径によって表されることから、樹径として根元径を採用した。

(1) 根元径と最大荷重

図-3に根元径と最大荷重との関係を示す。図より根元径が大きくなると、最大荷重も大きくなる傾向があるが、破壊（根抜け、根の破損等）が生じている根元径に対して

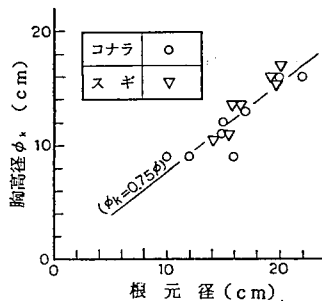


図-1 根元径と胸高径との関係

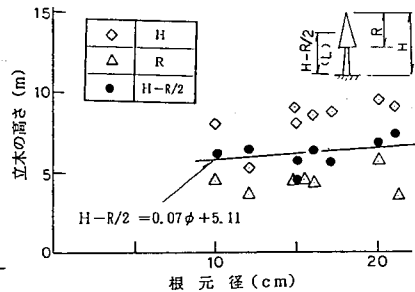


図-2 立木の高さと根元径との関係

最大荷重が異なっている。したがって、最大荷重のみで立木の抵抗力を表現するには無理があると考えられる。

(2) 根元径と最大曲げモーメント

図-4に根元径と最大曲げモーメントとの関係を示す。

両者の関係は、最大荷重とほぼ同じ傾向がある。

(3) 根元径と力積

図-5 に根元径と力積との関係を示す。引き倒し試験結果のデータは、兩名間において密な関係が認められるが、衝撃载荷試験データの力積は、破壊が生じているにもかかわらず非常に小さく、引き倒し試験データと一致しない。

(4) 根元径とエネルギー吸収能

エネルギー吸収能を、引き倒し試験では荷重～変位曲線において最大荷重が生じる時点までの(荷重)×(変位)の総和とし、衝撃試験では最終変位までの荷重と変位の積の総和として、根元径との関係を調べた(図-6)。

図よりエネルギー吸収能は、根元径の増加とともに大きくなり、これまでの最大荷重、最大曲げモーメント、力積等の関係に比べて、引き倒し試験と衝撃試験とのデータが混在してくる。したがって、立木の抵抗力はエネルギー吸収能によって表されることができると考えることができる。しかし、データのバラツキが大きいので、エネルギー

吸収能の算定方法を図-7に示すように、立木の破壊時には変位が載荷点の高さまで生じるものと仮定して、その間の荷重～変位曲線を直線近似して求めることにした。ここではこのエネルギー吸収能を100%エネルギー吸収能と呼ぶことにする。図-8に根元径と100%エネルギー吸収能との関係を示す。図より、衝撃試験で引き倒し試験データの

バラツキは少なく、根元径φと100%エネルギー吸収能Eとの関係は、次式で表わされる、

$$\begin{aligned} \text{コナラ材: } E &= 9.074 \times 10^{-5} \phi^{3.14} \\ \text{スギ材: } E &= 3.122 \times 10^{-4} \phi^{2.35} \end{aligned} \quad (1)$$

(単位; E: tonf・m、φ: cm)

(5) 立木の抵抗力

土石流あるいは掃流状態で流下する流体中の立木には、ある平均的な力が継続して作用すると考え

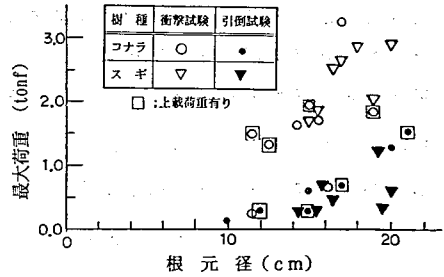


図-3 根元径と最大荷重との関係

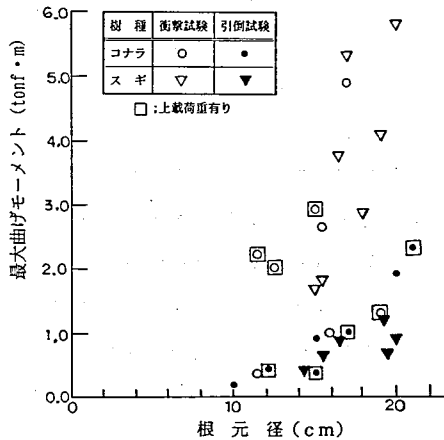


図-4 根元径と最大曲げモーメントとの関係

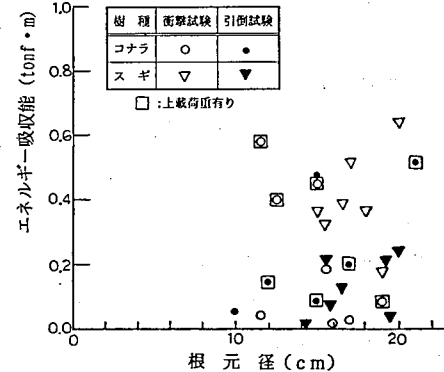


図-6 根元径とエネルギー吸収能との関係

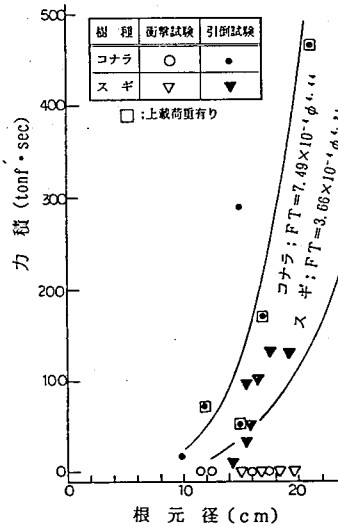


図-5 根元径と力積との関係

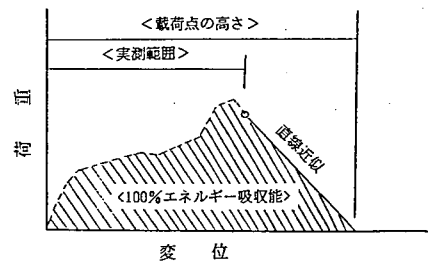


図-7 100%エネルギー吸収能の算定方法

られることから、先に求めた 100%エネルギー吸収能を最終変位で除した平均荷重が立木の抵抗力と考えることができる。図-9に根元径 ϕ と平均荷重(抵抗力R)との関係を示す。図より抵抗力Rは(2)式で表わされる。なお、(2)式において力はずべての抵抗に関する諸量を樹木の内部応力 σ に代表させ、また長さに l を代表させると、 $R = \sigma l^2$ で表わされ、 l として ϕ を取ると $R = \sigma \phi^2$ の関係があることから、 ϕ の2次関数でRを表現している。コナラ材： $R = 1.872 \times 10^{-3} \phi^2$

$$\text{スギ材}：R = 1.863 \times 10^{-3} \phi^2 \quad (2)$$

(単位；R：tonf、 ϕ ：cm)

3. 相似則について³⁾

流体中の立木に作用する力として、流れの慣性力 F_i 、立木の抵抗力R、流れに作用する重力 F_g が考えられ、原型と模型が相似であるためには、常時すべての力が相似になることが必要である。この関係をパイナンバーの形で表し、それぞれのパイナンバーを代表値で表して、相似を求めると、図-10のようになる。図より流体中の立木にしては、立木の抵抗に関する応力の代表値が l/l' の比となる立木を用いれば、相似性が満たされることになる。

4. 実験手法について

(1) 立木模型について

原型の立木を幾何学的に相似させ、抵抗に関する応力が (l/l') の比になる樹木を作製することは困難である。そこで、模型では抵抗に関する応力が相似になるような疑似的な模型(図-11)を考える。すなわち、樹径を相似させた丸木材の底板を設け、底板上の河床礫の自重によって外力に抵抗させることにする。したがって、この底板の大きさを選定することにより抵抗に関する応力を一致させることになる($\sigma' = \sigma \lambda_m$ とする。 λ_m :模型縮尺)。

図より立木模型の抵抗力は、微小項を無視して支点Oにおけるモーメントとして(3)式で与えられる

$$M_R' = B^3 \cdot D \cdot w_s (1 - \lambda) / 2 \quad (3)$$

ここに、 M_R' :立木模型の抵抗モーメント、B:立木模型の底板の幅、D:立木模型の底板の設置深さ、 w_s :砂の単位重量、 λ :空隙率である。

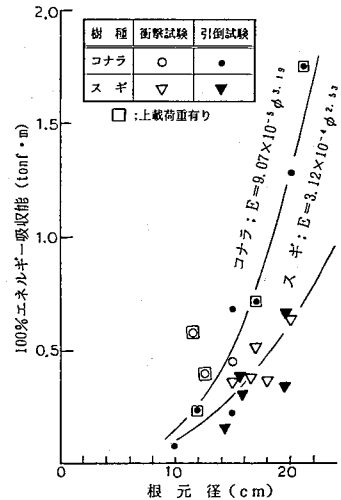


図-8 根元径と100%エネルギー吸収能との関係

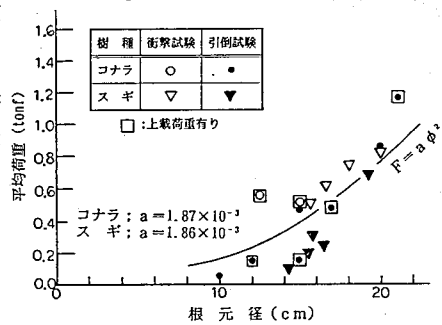
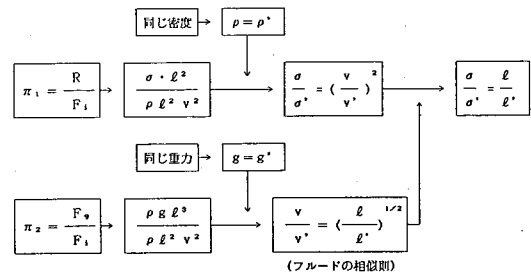


図-9 根元径と平均荷重との関係



(フルードの相似則)
ここに、 ρ は密度、 m は質量、 a は加速度、 l は長さ、 t は時間、 v は流速であり、いずれも代表値である。また σ は内部応力で立木の抵抗に関する応力をすべて含んでいる。
(prime)をつけた数値は模型に対するものである。

図-10 立木モデルの相似則

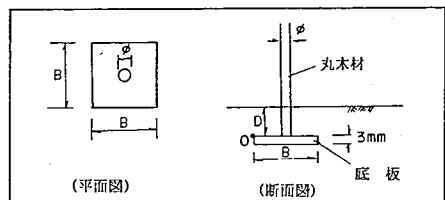


図-11 立木模型の概要図

また、原型の立木の抵抗モーメント M_R はモーメントに関する長さを L として、(4)式で表され、応力の相似、幾何学的相似より原型の立木の抵抗モーメント M_R は模型で (5)式となる。立木模型では、(5)式の M_{Rm} と (3)式の M_R' とを等しくする必要があることから (6)式が得られる。

$$M_R = R \cdot L = \sigma \phi^2 \cdot L \quad \text{-----(4)}$$

$$M_{Rm} = \sigma' (\phi')^2 L, \quad \sigma' = \sigma \lambda_m = a \lambda_m \quad \text{-----(5)}$$

$$B^3 \cdot D \cdot w_s (1 - \lambda) / 2 = a \phi^2 (\lambda_m)^4 L \quad \text{-----(6)}$$

(6)式を満足する立木模型の B 、 D および L が得られれば、立木の抵抗力を考慮した模型実験が可能となる。ここで、立木模型の B 、 D および L について検討する。立木模型が転倒した場合を想定すると、底板および立木自体が流れを阻害することになるので B 、 D とも小さい方が好ましいといえる。したがって、(6)式の性質上 $B = D$ -----(7) が適切と考えられる。また代表長 L は立木の抵抗力が立木全体に渡って均等に作用していると考え、立木の有効高さとしてもよいと考えられる。立木の有効高さを地面から枝葉部の $1/2$ までと仮定すると、図-2に示すように $L = 0.07\phi + 5.11$ -----(8) なる関係が得られる。したがって、(6),(7),(8)式によって立木模型の寸法が得られる。

(2) 立木模型の抵抗力の確認実験 図-11における流体中で立木模型に作用する流体力と抵抗力の釣り合いは次式で与えられる。

$$\rho C_D V^2 \phi h (h/2 + B) = B^4 (\rho_s - \rho) g (1 - \lambda) \quad \text{---(4)}$$

ここに、 ρ 、 ρ_s ; 水、砂の密度、 C_D ; 抗力係数、 V ; 流速、 h ; 水深である。なお、上式は立木模型の寸法で $B = D$ としている。

図-12は、水路実験において(4)式を検証したものである。図より B が小さい ($2 \sim 3$ cm) と、(3)式で無視した微小項の影響が表れている。したがって、立木模型は $B (D)$ に制限があると考えられる。

(3) 模型縮尺について 模型の縮尺はなるべく小さい方が経済的であるが、本検討の立木模型を使用する場合には、①立木の寸法(市販の丸木材の制限)、②底板の製作上の制限、③底板の敷砂の厚さ等の制約がある。いま、立木径を10cmとして模型縮尺毎との底板の寸法を求めた(図-13)。図より①市販の丸木の径は2mmである、②底板は2cm程度が限度である、③敷砂の厚さは2~3cmが最小である。等から立木模型の縮尺 $1/40$ 以上と考えられる。

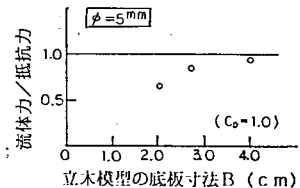


図-12 立木模型の流体力と抵抗力との比と底板(深さ) B との関係

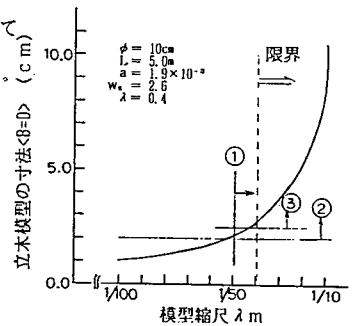


図-13 模型縮尺の限界

6. まとめと今後の課題 本検討の立木模型を用いることによって、ある程度立木の抵抗力を考慮した樹林帯の配置計画が実験的に検証できる。しかし本模型は、立木の有効長によって抵抗力が異なってくる、また樹林帯内での洗掘に対して抵抗力が小さくなること、あるいは堆積に対して抵抗力が大きくなることになり、樹木あるいは現地の状況を十分に把握して立木模型の寸法を決定することが必要である。

<参考文献> 1) 立木の衝撃緩衝効果に関する試験報告書、土木研究所砂防研究室、土木研究所資料第2560号、1988。 2) 立木の衝撃緩衝効果に関する試験報告書(Ⅱ)、土木研究所砂防研究室、土木研究所資料第2737号、1989。 3) 江守一朗著：模型実験の理論と応用(第二版) 技報堂出版、1985。