

はじめに

砂防ダムを建設する場合、現在堆砂地内にある樹木は伐採している。しかし、堆砂域にある樹木に土石流の衝撃力を緩和する効果があれば、この樹木を利用することによって、砂防ダムの安全性を向上させることが出来る。このためには、樹木の衝撃緩衝効果を定量的に評価することが必要となる。本研究は、その第一段階として、立木を単純梁と仮定して衝撃曲げ破壊試験、静的載荷試験及びシャルピー試験を実施し、樹木の持つ衝撃エネルギー吸収能を調べたものである。

1、実験の概要

衝撃載荷実験は、供試体が自由に回転できる構造の架台にスパン2mの皮付き杉生丸太を設置し、中央点に重量150kgf, 200kgfの重錘を自由落下させて衝撃荷重を与えた。計測項目は、衝撃荷重、載荷点の変位である。実験に用いた木材は杉で、切り出してから一週間以内のものを使用した。木材は全長240cm, スパン200cmとし、長さ方向で余り径が変化しないようなものを選び、中央径が10, 13, 15cmの三種類に分類した。静的載荷実験は、200tアムスラー型試験装置を用いて実施した。載荷形式は、供試体の中央点への集中載荷とし、平均載荷速度は100kgf/分とした。計測項目は、静的荷重と載荷点の変位である。供試体は、衝撃載荷試験と同一のものを使用した。シャルピー試験は、シャルピー衝撃試験器を用いて、ハンマー重量を14.746kg、ハンマーの重心からハンマーの回転中心までのアーム長は0.4312m、ハンマーの振り上げ角度 α は128.9度で実施した。供試体は、衝撃載荷試験に使用した材料の中心部付近から、一辺2cmの正方形断面を持つ全長30cmの試験片を採取して使用した。

2、実験結果

(1) 荷重持続時間

衝撃載荷試験において計測された荷重の作用時間 T_0 は、0.05~0.07秒となっており、 $T_0/2T \geq 1$ であるので強制振動 (Forced vibration) ¹⁾ となり、梁の変位応答は外力の位相と同じになる。

(2) 最大荷重

最大衝撃荷重と木材径の関係を図-1に示した。図から、最大衝撃荷重は木材径に比例して大きくなることが分かる。また、実験ではほとんどの木材が破壊されているので、最大衝撃荷重は木材の最大耐力に等しいと考えられる。従って、木材の耐力は木材の径に比例して大きくなると考えられる。

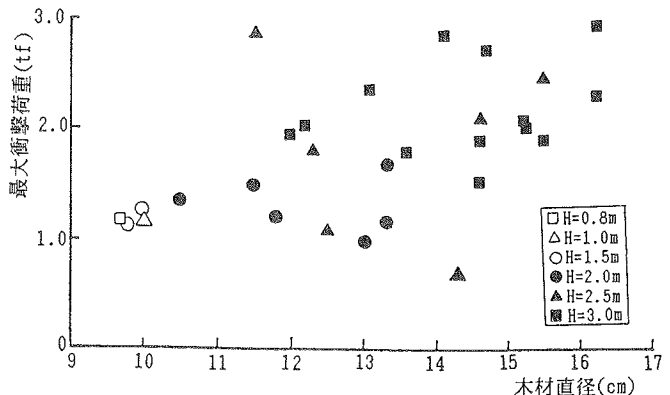


図-1 木材径と最大衝撃荷重

しかし、木材単純梁の最大荷重の理論式は、

$$P = \frac{4\sigma z}{L} = \frac{4\sigma}{L} \cdot \frac{\pi}{32} (2r)^3 = 3.14 \times \frac{\sigma}{L} \cdot r^3$$

で表され、理論的には直径の3乗に比例することから、実験結果は、木材の直径に比例して大きくなる傾向を示しており、更に広い範囲での実験を実施して確認する必要がある。

また、重錘の落下高と最大衝撃荷重の関係は、重錘の落下高さ、即ち落下速度が大きくなるほど最大衝撃荷重は大きくなっていることから、木材の耐力は重錘の衝突速度が大きくなるにつれて増加する傾向のあることが分かる。このことから、木材においてもコンクリートや鋼材のようなひずみ速度効果による耐力の向上が認められる。

(3) バネ定数

木材単純梁のバネ定数の理論式は、²⁾

$$P = \frac{48EI}{L^3} \cdot \delta = \frac{48}{L^3} \cdot \frac{\pi (2r)^4}{64} \cdot E \cdot \delta = 12\pi \frac{r^4 E}{L^3} \cdot \delta$$

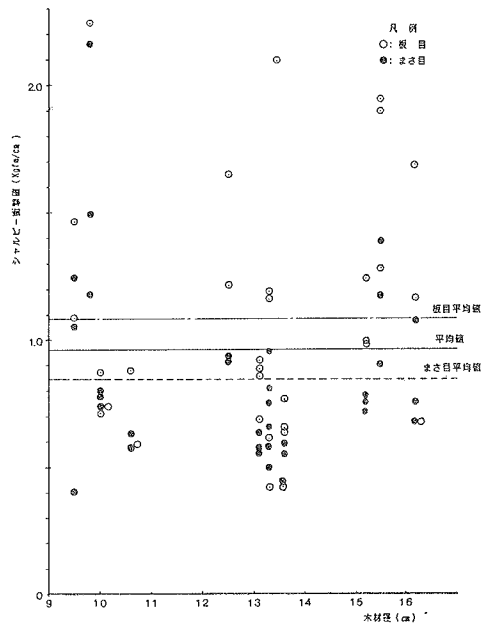
で表される。実験では、バネ定数は木材径に比例して大きくなる傾向を示している。しかし、単純梁のバネ定数は(1)式でも分かるように、理論的には木材の半径の4乗に比例することを考えると、実験結果はデータのバラツキが大きいことに起因する傾向と考えられる。

(4) シャルピー試験結果

シャルピー試験は、試験片を採取した木材の直径をパラメータとして、衝撃方向を板目及び柎目として実施した。試験結果と木材径の関係を図-2に示す。図から以下の特性が認められる。

① 今回の試験は直径方向の位置を一定として、長さ方向に位置を変化させて採取したものであり、努めて均質な試験片とした。しかし、同一の木材から採取した試験片においても、シャルピー試験値はバラツキが大きく、素材レベルでの強度が均一でないことを示している。

② 衝撃方向の違いによるシャルピー試験値を比較すると板目の方が柎目よりも大きくなる傾向を示している。これは、板目の方が変形性能を十分発揮でき、柎目では変形性能を制約されるために吸収エネルギー



が小さくなるものと考えられる。また、板目と柎目 図-2 シャルピー衝撃値 (kgfm/cm) のバラツキをみると、板目の方が柎目よりもバラツキが大きい。これは、繊維そのものの強度が大きくバラツキしているためにその影響を直接受けているものと考えられる。

3、静的エネルギー吸収能Es

アムスラー型試験装置により木材に荷重を载荷し始めてから、終局変位に到るまでの仕事量を静的エネルギー吸収能Esとした。本実験におけるスパンL=2.0mの単純支持の杉丸太の静的エネルギー吸収能Esは、図-3に示すように次式のように木材の直径の一次関数として表すことができる。

$$E_s = 0.03426d - 0.2902 \dots \dots \dots (1)$$

d:木材の直径 (cm)

E_s :静的エネルギー吸収能 (tf・m)である。

但し、(1)式は原点に帰着しないこと、(1)式のデータとなっている最大荷重の実験値が理論値より若干小さくなる傾向を示していることから、更に実験を広い範囲で実施して (1)式の適用性を検討する必要がある。

4、 衝撃エネルギー吸収能 E_{D1}

衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} は、重錘が木材に衝突してから終局変位に到るまでの仕事量と定義した。測

定値より求めた E_{D1} に静的エネルギー吸収能 E_s の式(1)を重ねてみると図-4のようになる。図中に点線で囲んだ異常値を除外すると E_{D1} はほぼ E_s に近い値を示していることから、 E_{D1} は E_s そのままの値を使用しても良いと考えられる。

5、 シャルピー試験値と

衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} の比較

衝撃実験で求めた衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} を梁の載荷点の断面積で割って単位面積当りのエネルギー吸収能を求めて図-5に示した。この値を等価シャルピー換算値 E_{D1}' と呼ぶとすればバラツキはあるものの、 $E_{D1}' = 1.27 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}$ となり、シャルピー試験値 $E_{D2} = 1.078 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}$ に近い値を示している。しかし、シャルピー試験値は梁のスパン長によって変わるものと考えられるので、このシャルピー試験値と E_{D1}' の一致はむしろ、シャルピー試験と衝撃載荷実験の条件の相似を表していると考えられる。

6、 立木の衝撃エネルギー吸収能の推定

本実験では立木が土石流中の石礫の衝突を受けた場合、単純梁として応答すると仮定してスパン2mのケースについて実験を行い、衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} は静的エネルギー吸収能 E_s に等しいという結論を得た。この結果から立木の衝撃エネルギー吸収能を推定するためには、任意のスパンに適用で

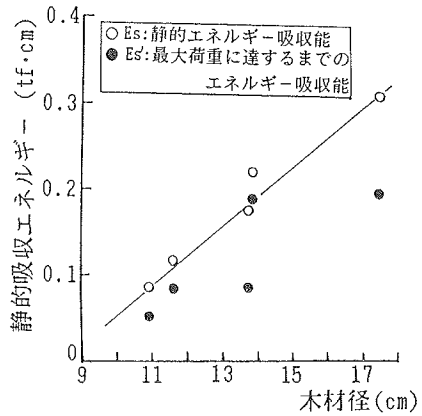


図-3 木材径と静的吸収エネルギー

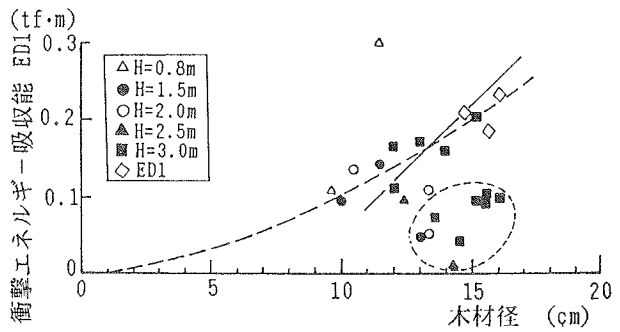


図-4 衝撃エネルギー吸収能

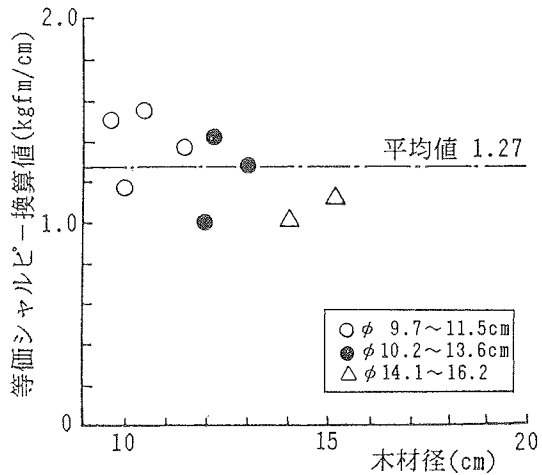


図-5 等価シャルピー値

きるように整理すること、実際の立木が何mのスパンの単純梁と仮定されるかの検討が必要である。後者に関しては、今回の実験結果から推定することはできないので今後の研究で検討するものとし、前者について検討する。

実験の結果から、衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} = 静的エネルギー吸収能 E_s と見なしてよいので、静的試験のF- δ 曲線から任意のスパンに対する E_s を求める。まず、木材の応力-ひずみの関係を完全弾性体と仮定すると、エネルギー吸収能はF- δ の積分値で表され、次式のようになる。²⁾

$$E_s = F_{max} \delta_p + \frac{1}{2} F_{max} \delta_e = F_{max} (\delta_p + 0.5 \delta_e) \dots \dots \dots (2)$$

$$F_{max} = \frac{4 Z \sigma}{L} \quad \delta_e = \frac{F_{max} \cdot L^3}{48 E I}$$

ここに、 F_{max} :最大荷重(kgf) (比例限界荷重と最大荷重の間値とする。)、 δ_e :弾性ひずみ(m)、 δ_p :塑性ひずみ、 σ :曲げ応力強度(kgf/cm) $\sigma = (\sigma_u + \sigma_{oe})/2$ 、 L :梁のスパン、 E :木材の弾性係数(kgf/cm²)、 I :断面2次モーメント(m⁴)である。

ここで、 σ_u , σ_{oe} , E に実験結果の平均値を代入すると、 $E = 4.49 \times 10^8$, $\sigma = 3.41 \times 10^6$

次に、塑性ひずみ δ_p は実験結果より、 $\delta_p = \alpha \delta_e$ ($\alpha = 2.61$)となるので、 $\delta_p = \frac{16.52 \times 10^{-4} Z}{I}$

ここで、木材の断面を円と仮定し、径をd(m)とすると $Z = \frac{\pi}{32} d^3$, $I = \frac{\pi}{64} d^4$ となる。

上記の実験値から求めた値を(2)式に代入して整理すると、

$$E_s = 5.28 \times 10^3 d^2 L \quad (\text{Kgf} \cdot \text{m}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)式から、立木のスパンL及び直径dが決まれば静的エネルギー吸収能 E_s 、即ち、衝撃エネルギー吸収能 E_{D1} が求められる。この(3)式は、対象とする木材の種類が変わっても、その木材の弾性係数、最大荷重のデータが得られれば定数項を変えることによって適用できる。

おわりに

上記のように、実験結果から、任意のスパンを持つ立木の衝撃エネルギー吸収能を求める方法を推定した。今後は、今回の実験の範囲では確認できなかった事項や仮定事項などを確認する必要がある。また、提案した(3)式は木材の直径が10cm<d<15cmの狭い範囲の実験に基づいており、もっと広い範囲での実験を実施して(3)式の適用性を確認する必要がある。なぜならば、(3)式の衝撃エネルギー吸収能は直径の2乗に比例すること、(3)式の元となっている(1)式が原点に帰着しないこと、最大荷重が理論値よりも小さくなっているなどの問題点が含まれているためである。

参考文献

- 1) 本書編集委員会編, 振動工学ハンドブック, 養賢堂 昭和56年6月10日
- 2) 西林新蔵, 土木工学, 朝倉書店 昭和52年3月20日
- 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, 土研資料 第2430号, 昭和62年1月

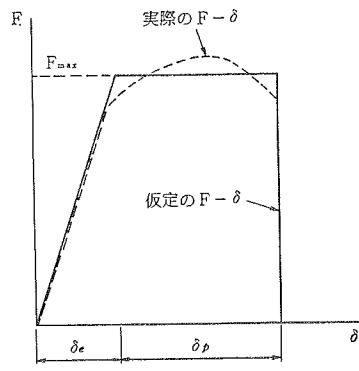


図-6 F- δ Curve