

1. 緒言 近年、山岳地帯に砂防ダムを建設する場合、これまではダム域内に生育している樹木(以下、立木と呼ぶ)を伐採してきたが、これらを積極的に活用する施策が検討されており、このためには巨礫に対する衝撃抵抗力を定量的に把握する必要がある。著者らは、このような観点から、伐採したばかりの杉材や実際の立木に対する衝撃実験を行ってきた^{1), 2)}。本研究は、これらの実験結果をふまえて、これを解析的にシミュレートするため、オイラーによる離散化モデルを用いて巨礫に対する立木の衝撃応答解析を行い、その適用性と立木の衝撃吸収能力について検討したものである。

2. 解析モデルと衝撃応答解析の基本式 本解析に用いた離散化モデルは、図-1(a)に示すような連続した質量と剛性を有する実際の立木を、図-1(b)に示すように任意長のはり要素に分割し、個々の要素が実際の立木が持つ質量と剛性を有する片持ちばりとした。外力としては、衝突点に局部ハネにより接続された巨礫(実験における重錘)に衝突時の初速度を与えることにより作用させた。また、各要素のモーメント(M)～回転角(θ)の関係は、樹幹部におけるはり要素については、図-2(a)に示すような静的単純ばり試験のP～δ関係から、また樹根部におけるはり要素については、図-2(b)に示すような静的引き出し実験のP～δ関係から、それぞれ要素長や樹径変化の影響を考慮したうえで、図-3に示すようなtrilinear-softening typeの線形関係にモデル化した。次に離散化モデルを用いた立木の衝撃応答解析の基本式は、分割点iにつり合い条件および変形適合条件を適用して、次式のように表わされる。

$$m_i \ddot{y}_i = P_i + (M_{i+1} - M_i) / l_{i+1} - (M_i - M_{i-1}) / l_i \quad (1a)$$

$$\theta_i = -y_{i-1} / l_i + (1 / l_i + 1 / l_{i+1}) \times y_i - y_{i+1} / l_{i+1} \quad (1b)$$

$$M_i = 2EI\theta_i / (l_i + l_{i+1}) \quad (1c)$$

ここに、 m_i 、 y_i 、 θ_i 、 M_i はそれぞれ分割点の質量、変位、回転角および曲げモーメント、 l_i 、 l_{i+1} は分割点iの隣接ハネ初長、 P_i は作用外力である。また巨礫をモデル化した質点Wにおいて、衝撃力Pは次式により与えられるものとする。

$$P = -m_w \ddot{y}_w = C_w (\dot{y}_w - \dot{y}_{AP}) + k_w (y_w - y_{AP}) \quad (2)$$

ここに、 C_w は局部ハネの減衰定数、 k_w は局部ハネのハネ定数であり、両者は単純ばりの落錘衝撃試験¹⁾より測定したものをを用いた。また y_w は局部ハネの変位、 y_{AP} は衝突点変位である。数値解析においては、分割数をN=41として、ニューマークのβ法を用いた数値計算を行った。解析プログラムのフローチャートを図-4に示す。

3. 解析結果と実験値との比較および検討 (1) 衝突点の荷重応答について：図-5は、立木の衝突点における荷重の時刻歴応答を現地実験の結果(根の浮き上がりで破壊した)と

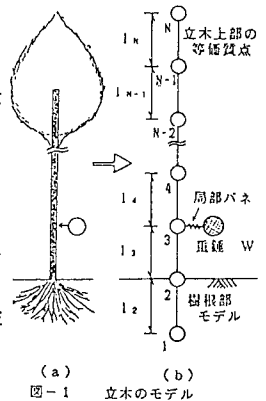


図-1 立木のモデル

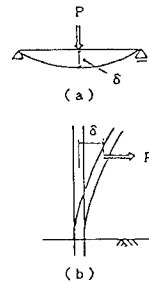


図-2 各要素に与える P～δ関係と実験結果の P～δ関係

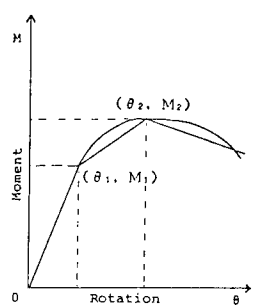


図-3 幹における M～θ関係のモデル化

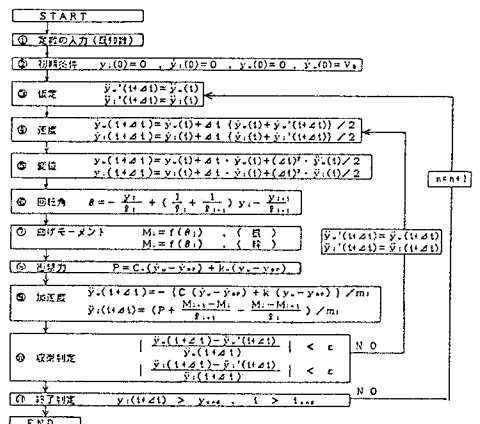


図-4 計算手順

比較して図示した一例である。衝突後40msecまでの範囲においては波形的に比較的良好一致を示すが、それ以降実験結果は単調減少するのに対し、解析結果は同じ大きさの荷重が持続している。これは、解析においては重錘が面内で衝突するものと仮定しているのに対し、実験では立木に衝突後平面外へそれたためと思われる。（2）立木の衝突点変位について：図-6は、衝突点における変位の時刻歴応答について解析結果と実験結果とを比較した一例で、両者は良好一致を示すことが認められる。

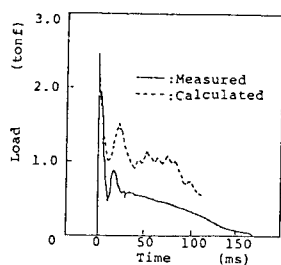


図-5 実験値および計算値の荷重～時間曲線

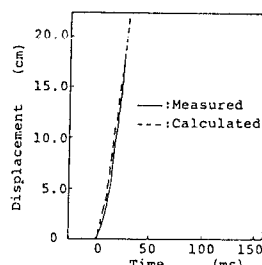


図-6 実験値および計算値の変位～時間曲線

4. パラメトリック スタディ

本解析手法を用いて、実験では実施できなかった条件域での応答を予測するため、衝突速度、衝突点の高さ、重錘重量をパラメータとして解析を行った。（1）衝突速度の影響：図-7に、衝突速度 v を6.0m/s, 8.0m/s, 10.0m/sに変化させた場合の荷重～時間曲線の変化を示す。衝突速度の増大に伴い、衝突直後に生ずる最大荷重は増大することが認められる。

一方、それ以降の応答は、 $v = 6.0\text{m/s}$ に対し、 $v = 8.0\text{m/s}$ の方が大きくなるものの、 $v = 10.0\text{m/s}$ においては樹幹の折損の影響により逆に小さくなっていることが認められる。

（2）衝突高さの影響：図-8に、衝突高さ h を1.0m, 1.5m, 2.0mに変化させた場合の荷重～時間曲線の変化を示す。衝突直後の最大荷重が生ずるまでの応答域においては、衝突点が低くなるにつれて最大荷重が大きくなっている。しかし、それ以降の応答については、 $h = 1.0\text{m}$ が最も小さくなっており、これは $h = 1.0\text{m}$ のケースが衝突直後に樹幹部が折損することの影響によるものと思われる。

（3）重錘重量の影響：図-9に、重錘重量を500kgf, 1000kgfに変化させた場合の荷重～時間曲線の変化を示す。重錘重量が増加しても衝突直後のピーク値が現れる段階での応答に変化はみられないが、それ以降の応答においては、1000kgfの場合50msec付近で急激に荷重が低下している。これは、衝突点の樹幹部が折損したためと思われる。

5. 結言

本研究の結果を要約すると以下ようになる。（1）衝撃を受ける立木の衝撃抵抗力は、単純な離散化モデルを用いることにより近似的に解析が可能である。（2）重錘の持つ衝突エネルギーが増大するにつれて、樹幹部の折損による破壊モードが卓越してくる。また根元近くに衝突する場合においても樹幹部の折損による破壊モードが卓越してくる。（3）樹幹が折損する破壊モードにおいては、他のケースに比べてエネルギー吸収能が小さくなる。これは、樹幹部の $M-\theta$ 関係が、樹根部のそれに比べ、タキリティが小さいことに起因するものと考えられ、同じ立木であっても破壊モードの違いによりエネルギー吸収能の違いが生ずることを示唆している。（4）解析と実験との差異は、実験において重錘が衝突後ずれを生じたことによるほか、解析においてせん断の影響を考慮していない点および木材の剛性や強度さらに根の浮き上がりの強度の値を一義的に決定しえない点に起因するものと考えられ、今後これらの影響を考慮して解析する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、斉藤英明氏、小林直行氏のご協力を得たことを付記し、謝意を表します。

参考文献 1) 香月、斎藤、石川、水山：杉材の破壊エネルギーの簡易推定法について、土木学会第42回年次学術講演会概要集，pp.190～191，昭和62年9月 2) 小林、斎藤、石川、水山：巨礫による立木の衝撃応答実験に関する一考察，第15回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.22～23，昭和63年3月

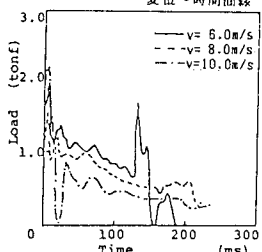


図-7 衝突速度によるP-t曲線の変化
($\phi=13.5\text{cm}$, $h=1.5\text{m}$, $V=500\text{kgf}$
 $v=10.0\text{m/s}$ は16msに折損)

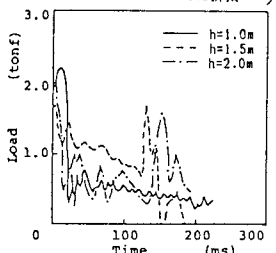


図-8 衝突高さによるP-t曲線の変化
($\phi=13.5\text{cm}$, $v=8.0\text{m/s}$, $V=500\text{kgf}$
 $h=1.0\text{m}$ は20msに折損)

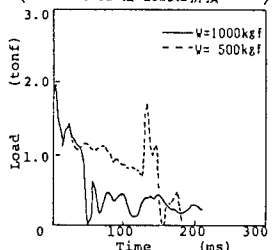


図-9 錘球重量によるP-t曲線の変化
($\phi=13.5\text{cm}$, $h=1.5\text{m}$, $v=8.0\text{m/s}$
 $W=1000\text{kgf}$ は35msに折損)