

## 落石の運動特性に関する研究（樹木の速度減衰効果）

(株)第一コンサルタント ○右城 猛  
 (株)第一コンサルタント 篠原昌二

### 1. まえがき

建設省土木研究所が実施した落石防護工の被害に関する実態調査(1997)の結果、「被災地の80%が樹木の繁茂した斜面であり、樹木で落石が停止しているケースが多く見られる」と報告されている。裸地斜面よりも落石が多いという意味ではなく、わが国の斜面のほとんどが植林等により樹木が繁茂しているためであるが、樹木が落石の速度減衰に寄与していることは確かである。しかしながら、樹木の速度減衰効果を定量的に評価する研究は全くなされていない。

筆者らは平成12年10月に高知県幡多郡西土佐村岩間地区の檜の植林地内で落石実験を行った。その際に、数個の落石が立木に衝突する瞬間をデジタルビデオカメラで撮影することができたので、衝突時における落石の挙動と、衝突による速度減衰の推定方法について発表する。

### 2. 樹木に衝突後の落石の挙動

69個の投石のうち8個が立木に衝突した。図1は、そのうちのひとつで、落石が檜の幹に衝突した様子をビデオカメラで捉えたものである。

落石が樹木に衝突した後の運動について、今回の実験では図2に示す4パターンが観察された。

パターン1～3は、落石が立木のほぼ法線方向から衝突した場合である。パターン1は跳躍運動した落石が立木の幹に衝突し、速度を完全に失い、地面に自由落下した後に転がり運動へ移行するものである。パターン2は、衝突後に跳ね返り地面へ落下し、転がり運動へ移行するケースである。パターン3は、跳躍運動した落石が樹木根元の地面とのポケットに入り込み停止する場合である。パターン4は、樹木をかすめるように衝突する場合で、衝突時に減速はするものの跳躍運動を継続するパターンである。

落石の樹木に対する入射角が小さいと、落石の運動は衝突点で一旦リセットされるため、樹木のエネルギー散逸、速度減衰効果は極めて大きいといえる。

### 3. 速度減衰の定式化

幹径  $D$  の樹木が  $\lambda$  の間隔で存在すると、跳躍運動

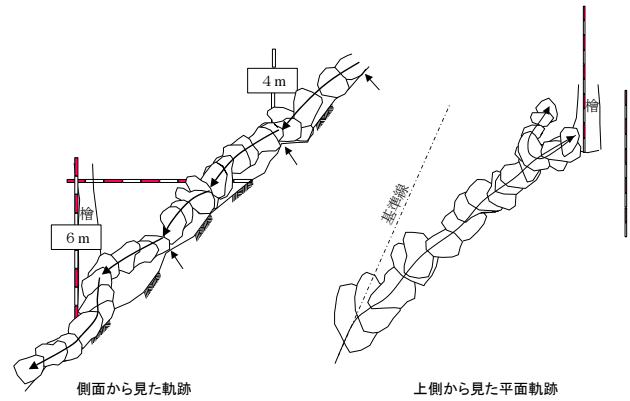


図1 落石が檜の幹に衝突する様子

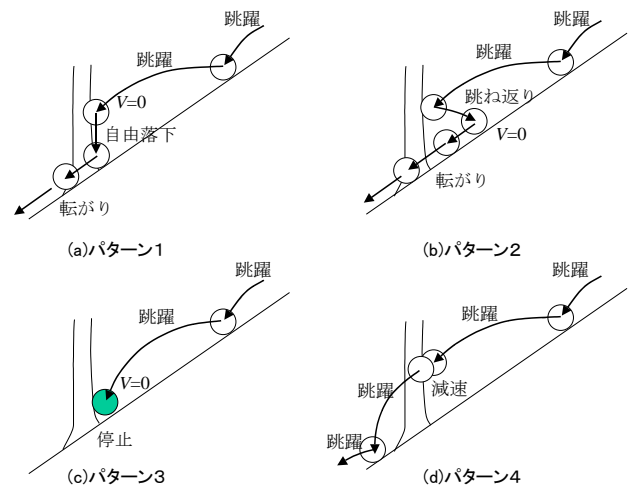


図2 樹木衝突後の落石の運動パターン

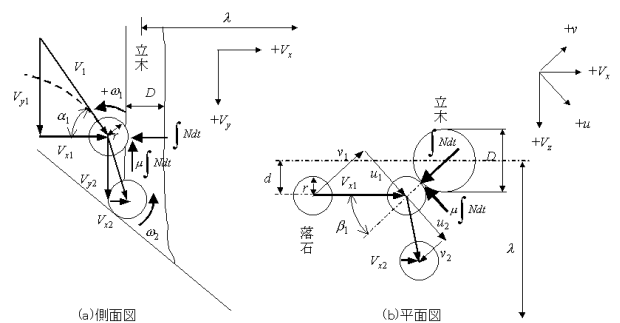


図3 落石の樹幹への衝突

あるいは線運動中に落石は式(1)の確率  $P_r$  で立木に衝突する。衝突前の線速度を  $V_1$ 、角速度を  $\omega_1$ 、鉛直入射角を  $\alpha_1$ 、水平入射角を  $\beta_1$ 、反発係数を  $e_r$ 、動摩擦係数を  $\mu_t$  とし、衝突時にすべりを伴うものと仮定

すれば、式(2)の衝撃運動方程式が立てられる。ただし、 $m$  は落石の質量、 $I$  は落石の慣性モーメントである。

$$P_r = \frac{D + 2r}{\lambda} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} m(v_2 - v_1) &= - \int N dt \\ m(V_{y2} - V_{y1}) &= - \mu_t \int N dt \\ m(u_2 - u_1) &= - \mu_t \int N dt \\ I(\omega_2 - \omega_1) &= r \mu_t \int N dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= V_{x1} \cos \beta_1 \\ u_1 &= V_{x1} \sin \beta_1 \\ V_{x2} &= u_2 \sin \beta_1 + v_2 \cos \beta_1 \\ v_2 &= -e_r v_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)と式(3)より、衝突後の鉛直速度  $V_{y2}$ 、水平速度  $V_{x2}$ 、角速度  $\omega_2$  が式(4)のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} V_{y2} &= V_{y1} - \mu_t \cos \beta_1 (1 + e_r) V_{x1} \geq 0 \\ V_{x2} &= V_{x1} \left\{ \sin^2 \beta_1 - \mu_t \sin \beta_1 \cos \beta_1 (1 + e_r) - e_r \cos^2 \beta_1 \right\} \geq 0 \\ \omega_2 &= \omega_1 + \frac{m r \mu_t \cos \beta_1 (1 + e_r)}{I} V_{x1} \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

衝突時の偏心距離を  $d$  とすると水平入射角  $\beta_1$  は式(5)で与えられる。なお、 $d$  は  $0 \leq d \leq (r + D/2)$  の範囲の一様乱数として決定する。

$$\beta_1 = \sin^{-1} \frac{d}{r + D/2} \quad (5)$$

#### 4. 試計算

##### (1) 試計算条件

落石は球で、その半径は  $r=0.15\text{m}$ 、質量  $m=0.037\text{t}$ 、樹幹径  $D=0.4\text{m}$ 、落石の衝突速度を  $V_1=10\text{m/s}$ 、角速度  $\omega_1=-66.7\text{rad/s}$ 、鉛直入射角  $\alpha_1=30^\circ$ 、反発係数  $e_r=0.3$ 、動摩擦係数  $\mu_t=0.4$  とする。

##### (2) 計算結果

樹木の間隔が  $\lambda=2\text{m}$ 、 $3\text{m}$ 、 $4\text{m}$  の各ケースについて、斜面方向の植樹行数と落石が樹幹に衝突する確率を算定すると図4となる。樹木が  $\lambda=2\text{m}$  の場合3行、 $\lambda=3\text{m}$  の場合5行、 $\lambda=4\text{m}$  の場合6行それぞれ植樹されていれば、落石は1回以上樹木に衝突することになる。

図5は、樹木への落石の水平入射角度  $\beta_1$  と

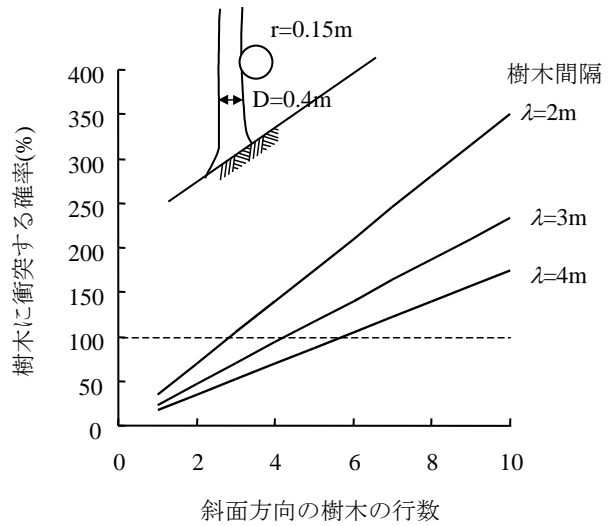


図4 落石が樹幹に衝突する確率

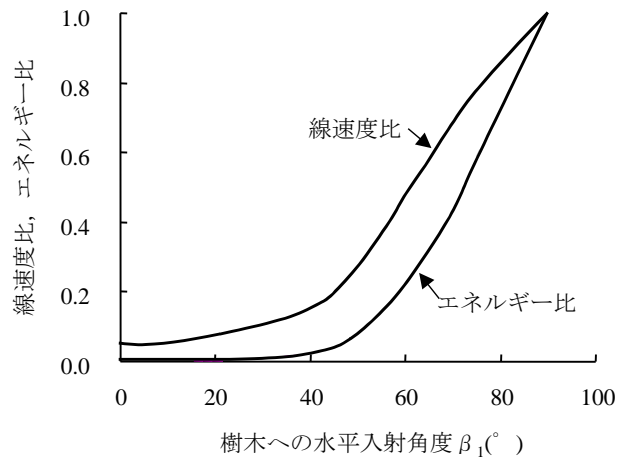


図5 落石の入射角による減衰効果

線速度比、エネルギー比の関係を調べたものである。ただし、線速度比は式(6)で、エネルギー比は式(7)で計算した。

$$\alpha_v = \frac{\sqrt{V_{x2}^2 + V_{y2}^2}}{V_1} \quad (6)$$

$$\alpha_E = \frac{V_{x2}^2 + V_{y2}^2 + I\omega_2^2}{V_1^2 + I\omega_1^2} \quad (7)$$

#### 5. あとがき

筆者らは、モンテカルロ法を用いた2次元の質点系力学による落石数値シミュレーション専用ソフトDRSP(Daiichi Consultants Rockfall Simulation Program)を開発中である。DRSPには、樹木による速度減衰も評価できる機能を盛り込む予定である。