

立木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析

Numerical Analysis of Rock Fall with a Model of Trees

倉岡千郎*, 太田敬一**, 杉山 実**

Senro KURAOKA, Keiichi OTA, Minoru SUGIYAMA

* 工博 日本工営 (株) 中央研究所 主任研究員 (〒300-1259 茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原 2304)

** 日本工営 (株) 中央研究所 研究員 (〒300-1259 茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原 2304)

キーワード：落石、個別要素法、DEM、数値解析

Rock Fall, Distinct Element Method, Numerical Analysis

1.はじめに

落石運動を解析する方法としては、従来の経験式に加え、落石を円、球あるいは多角形としてモデル化する数値解析手法がある。いずれの手法においても主な抵抗機構として、斜面との摩擦や破壊に起因するエネルギーロスが考慮されている。一方、立木による影響を全ての抵抗機構の一部として含め、平均的な抵抗効果として速度に比例する抵抗力を考慮する方法が提案されている¹⁾。本解析では、落石と立木の衝突を直接モデル化する一つの方法として、個別要素法 (DEM) による平面解析を行ない、立木による速度の低減効果を求めた。次にその低減効果を縦断面方向の DEM 解析に反映させ、跳躍高さ及び速度を求めた。

2.対象斜面の概要

対象とした斜面は傾斜が $30\sim 45^\circ$ であり、防護対象とする家屋から発生源までの比高は約 120m である (図 5)。発生源周辺の岩盤は硬質な輝緑凝灰岩及び頁岩からなるが、風化や木根類の発達により亀裂が発達し落石が発生しやすくなっている。標高 520m \sim 460m は風化岩盤が露出しているが 460m 以下では礫質土が表層を覆っている。さらに標高 470m \sim 430m には直径 0.2 \sim 0.4m の杉が 10m^2 に一本程度の割合で林立しており、落石との衝突による擦痕が地表から 0.5 \sim 1.5m のところに認められた。

3.落石解析手法の概要

立木をモデル化した平面解析では、立木及び落石を円形要素で表わし、要素間には図 1 に示すような接触機構を設定した。一方、縦断面の DEM 解析では落石を多角形として取り扱い、平面モデルと同様の接触機構を設定した。また、縦断面の解析では、立木の影響を反映するために速度に比例する抵抗力を加えた。速度に比例する抵抗は式(3)及び(4)にある抵抗係数によって設定される。

解析手順として、まず平面解析を行い落石が立木領域を抜け出した直後の速度と式(3)から求められる速度が一致するように式(3)の抵抗係数を決定した。さらに、その抵抗係数を用いて縦断面解析を行った (図 2)。

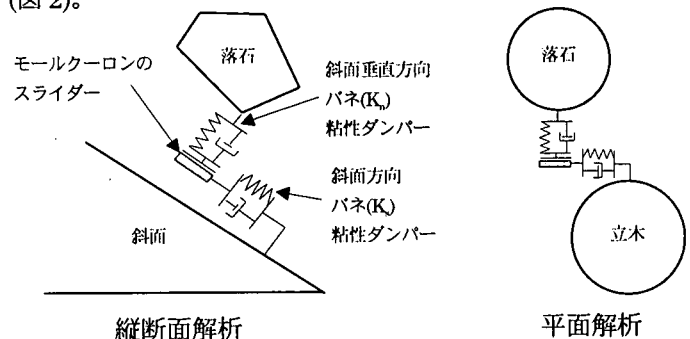


図 1 DEM による落石のモデル

3.1 DEM による平面解析

立木を定められた直径と間隔の範囲で一様乱数により配置させた。計算は立木の配置をランダムに変

化させて 100 回行った(図 4)。

ばね係数は、立木を地盤に固定された片持梁と考え、落石の衝突する位置での変位と力の勾配から求めた。摩擦係数は落石対策便覧の区分 D 相当の値を設定し、反発係数は落石の平面的な広がり角度が 45° 以上にならないように試行錯誤で設定した。解析領域は立木領域に限るので、落石が立木領域内に到達した時点の速度を平面解析での初速度として与えた(図 3 及び 4)。初速度は式(1)において傾斜(θ)=50° 等価摩擦係数(μ)=0.35 とし、落石開始位置と立木ゾーンまでの標高差(H)40m より求めた。

$$V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) H} \quad \text{式(1)}$$

落石の推力は重力加速度であり、斜面方向の加速度成分を落石に与える。加速度(a)は式(2)において立木領域内の平均的な傾斜を 33° とし求めた。

$$a = 2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) g \sin \theta \quad \text{式(2)}$$

平面解析から推定される立木の抵抗効果は、以下のようにして縦断面解析に反映させた。立木のある斜面の落石実験を解析した既往の例によれば、抵抗力は速度に比例すると考えられ、速度と距離を推定する一つの方法として式(3)及び(4)が提案されている¹⁾。そこで、平面解析から求められる立木領域の通過直後の平均速度(終端速度)及び落下距離から式

(3)及び(4)を用いて抵抗係数 C_k を算出し、縦断面解析に適用した。

$$v = \frac{\alpha}{C_k} + \left(v_0 - \frac{\alpha}{C_k}\right) e^{-C_k t} \quad \text{式(3)}$$

$$S = \frac{\alpha}{C_k} t + \frac{1}{C_k} \left(v_0 - \frac{\alpha}{C_k}\right) \left(1 - e^{-C_k t}\right) \quad \text{式(4)}$$

$$\alpha = g(\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

V:斜面に沿う t 秒後のすべり速度
θ:斜面の傾斜角度
V₀:初速度
μ:摩擦係数
S:t 秒間に斜面にそってすべる距離
α:斜面方向の加速度

3.2DEM による縦断面解析

落石の開始地点から落石を発生させ立木領域を通過する間は、平面解析で求めた抵抗係数を用いて速度に比例する抵抗力(抵抗係数×速度)を落石の合力から差し引く。対象とする落石は確定した岩塊ではなく、発生源における呼び径 50cm 以下の塊状の落石を想定するので簡単な正方形とした。落石の角の方向を不確定要因と考え、開始位置の角の方向を 0° ~90° の間で 9° ずつ変化させ 10 通り設定した(図 5)。抵抗係数以外のパラメータ(摩擦係数及び反発係数)は、落石の跳躍高ささと現地調査で得られた擦痕高さや落石経路等を基に調整した。

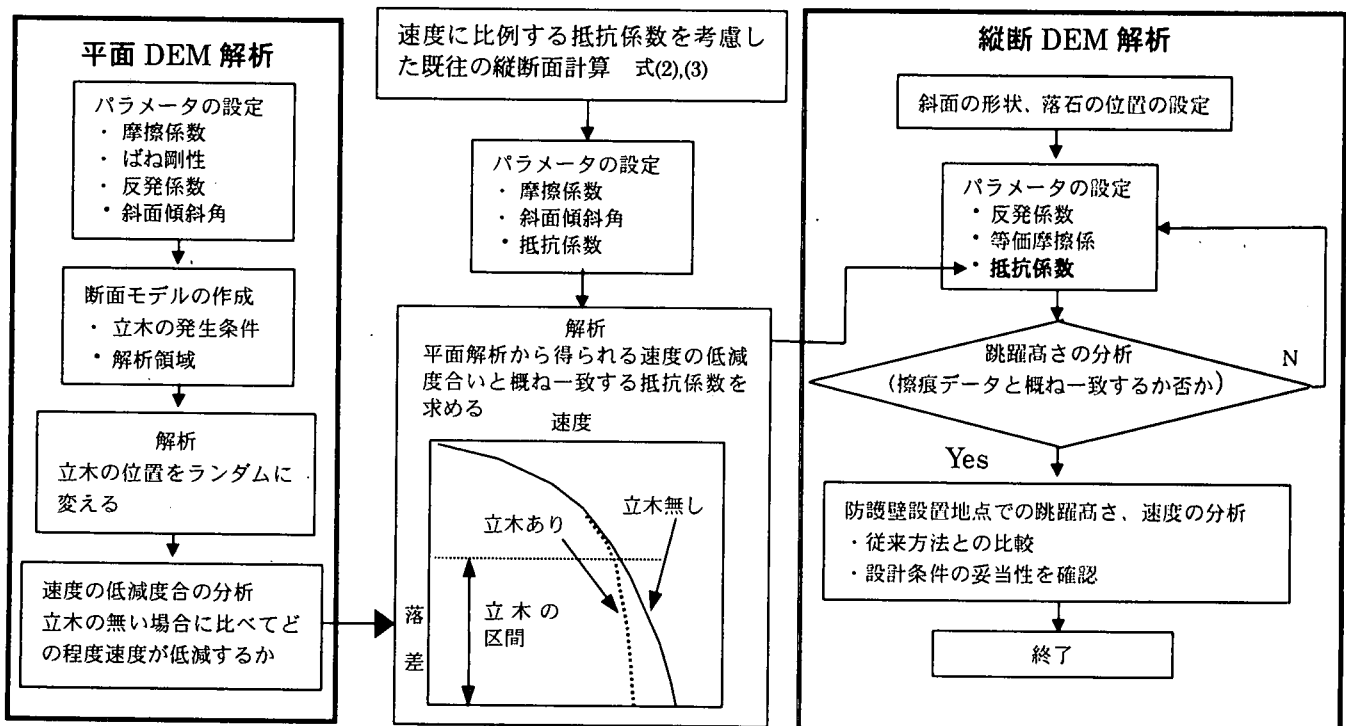


図 2 立木を考慮した解析のフロー

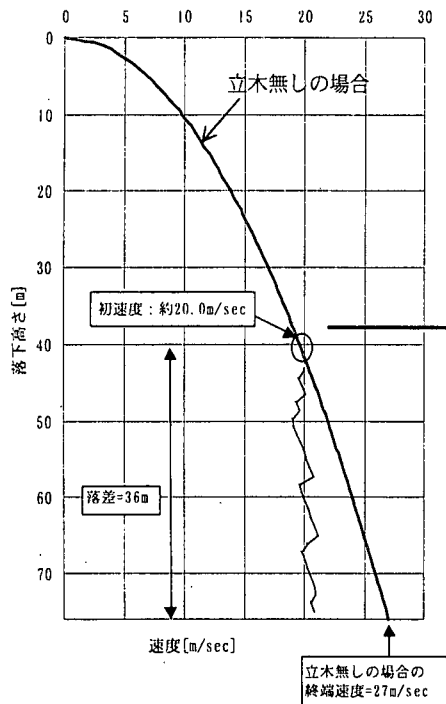


図3 平面解析における速度変化

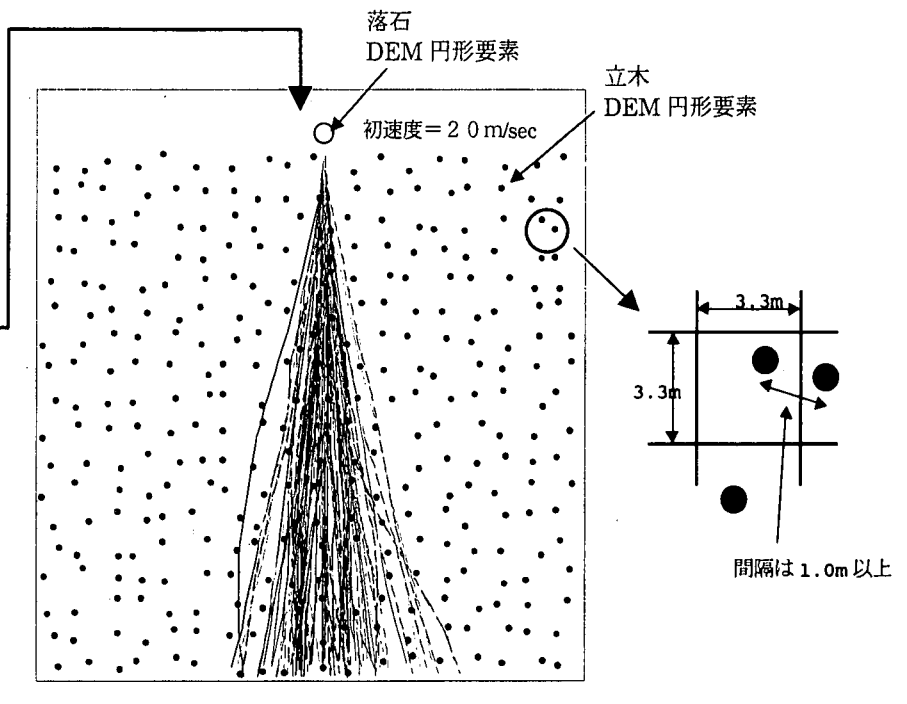


図4 落石の軌跡

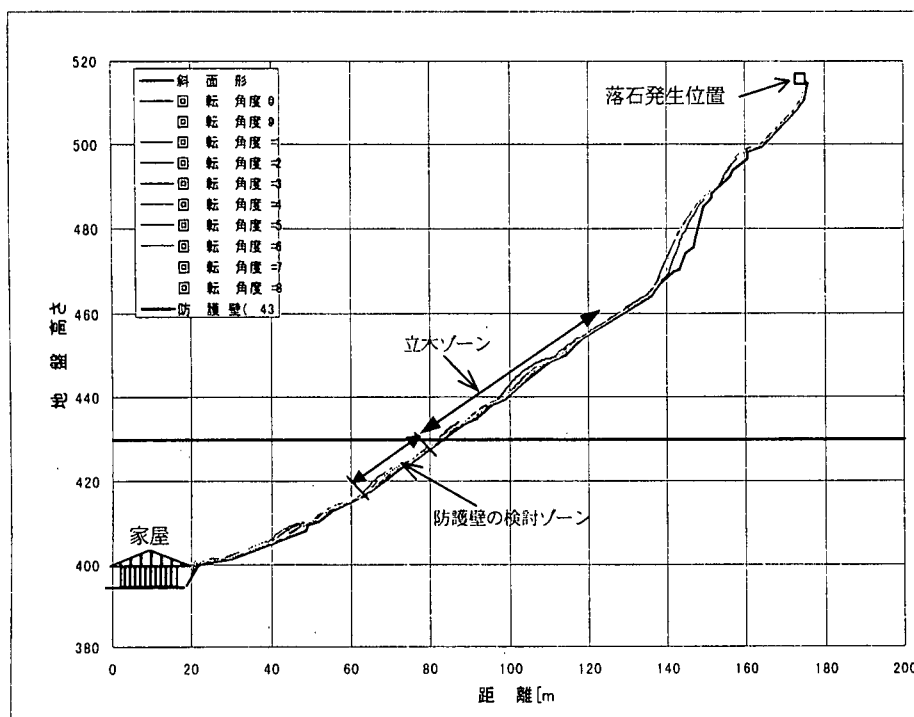
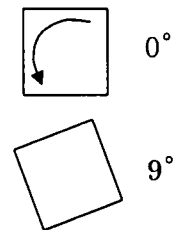


図5 縦断面

落石の初期位置における方向の回転(例)



4. 解析結果

4.1 平面解析

図4は立木の配置の一例に全軌跡(100ケースの結果)を重ねたものであり、図3に速度の例を示す。

100ケースの結果によれば立木がある場合の終端速度は、立木が無い場合に比べて平均で2~3割程度減少することが示された。しかし、立木の配置によってばらつきが発生するため、どの程度の速度低

減効果を見込むかという点に今後の課題がある。ここでは、平均的な低減効果を考慮した解析を行った。抵抗係数(C_d)は平面解析から求められた平均終端速度から算定すると0.1となった。

4.2 縦断解析

図6は抵抗係数=0.1とし落石の初期回転角を変化させた10回の解析から求めた跳躍高さである。ここで、跳躍高さとは落石の重心から斜面鉛直方向

の距離である。また図中には現地調査から選ばれた擦過高さ(立木と落石の衝突跡)が示されており、解析結果と概ね一致している。

落下高さ 40m 近傍で跳躍高さが大きいのは、落石が切り立った岩盤斜面から離脱するためである。その後、跳躍高さは概ね 1m 以下に低減しているが、2m 程度跳躍の生じている箇所は、斜面の凸部の影響である。

図 7 に縦断面解析から求められた速度と式(1)において斜面勾配を 35° 及び 50° とし計算した速度を示す。切り立った岩盤斜面から離脱するまでの過程で速度は顕著に増すが、その後の斜面との衝突により概ね一定速度(18m/sec)以下になっている。

解析結果は割愛するが立木に衝突せずに落下する場合もありうるので、抵抗係数=0 とした解析も実施した。全ての結果を総合すると防護柵を跳躍高さが小さく速度が低減している位置(落下高さ 90m 前後)に設置すれば、従来の設計手順より決められた防護壁の規格を満たすことが確認された。

5.まとめ

平面解析では落石と立木の衝突を直接モデル化するので、実際の立木の密度と配置を反映した速度低減効果を推定することに役立てうると考えられる。例えば立木の影響を考慮することにより落石の速度が制限されるなら、対策工費の削減の検討にも適用できるものと考えられる。

今後は、①確率的に妥当な計算回数及び結果の評価方法の検討、②実現象との比較による検証等が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 吉田博、右城猛、榎谷浩、藤井智弘：斜面性状を考慮した落石復興の衝撃荷重の評価、構造工学論文集、Vol.37A, pp.128-141, 1991.

謝辞

本解析を実施するにあたって御指導及び貴重なコメントをいただいた群馬県富岡行政事務所森林部森林土木課の関係各位に、深くお礼申し上げます。

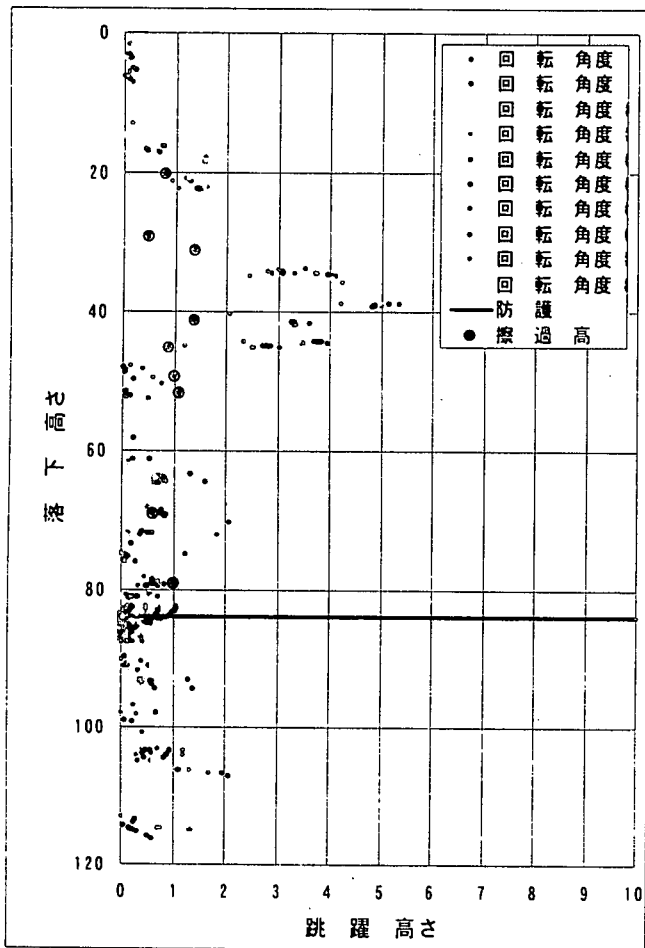


図 6 跳躍高さ－落下高さ

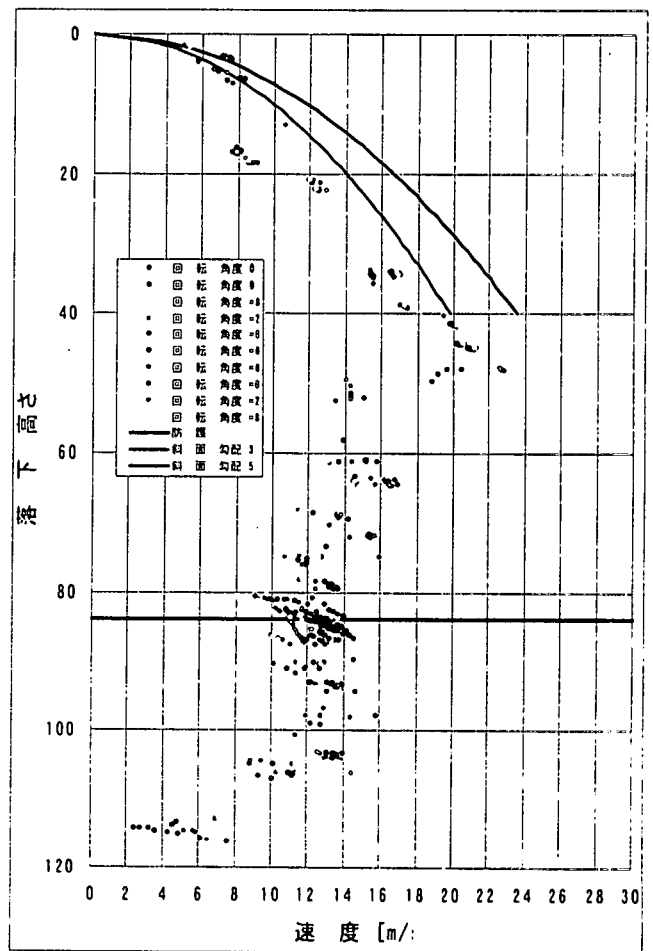


図 7 速度－落下高さ