

岩盤構造物に対する不連続変形法の適用性に関する調査研究

大西有三*

1. 研究の目的

わが国では急峻な山地が多く、落石により斜面に隣接する道路などの交通施設などの安全性が損なわれる場合が多い。落石現象への有効で合理的な対策を行うためには、落石の軌跡、速度、落石到達域での落石分布等を正確に評価することが必要である¹⁾。これまでの落石解析手法の多くは、2次元落石解析手法であり、3次元的な落石挙動を評価するための落石解析手法が必要とされている。本論文では落石を剛体球で表現し、不連続変形法（DDA）の理論を用いて落石の三次元的挙動の解析を試みる。DDAを落石挙動解析に適用するためには、落石が斜面へ衝突する際のエネルギー損失を評価することが重要であり、速度エネルギー比という概念を導入することにより衝突時のエネルギー損失を評価する。

2. 研究方法

DDAでは、全ポテンシャルエネルギー Π の最小化原理に基づいている²⁾。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial D} = \frac{\partial \Pi_v}{\partial D} + \frac{\partial \Pi_l}{\partial D} + \frac{\partial \Pi_{PL}}{\partial D} + \frac{\partial \Pi_\mu}{\partial D} + \frac{\partial \Pi_c}{\partial D} = 0 \quad (1)$$

ここで、上式の右辺各項は体積力、慣性力、点荷重、粘性力、接触力などの各種荷重条件によるポテンシャルエネルギーの最小化を表す。ただし、剛体球を導入したため、弾性ひずみと初期応力によるポテンシャルエネルギーは考慮しなくてよい。全ポテンシャルエネルギーを最小化することにより次式の全体つり合い方程式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \Lambda & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & & K_{2n} \\ M & & O & M \\ K_{n1} & K_{n2} & \Lambda & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ M \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M \\ F_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。 $[K_{ij}]$ は、上述の接触力などの各種条件のポテンシャルエネルギー最小化により得られる係数マトリックスである。また、 $[F_i]$ は、ブロック i に作用する荷重条件を表すサブマトリックスである。 $[D_i]$ は未知変位ベクトルであり剛体球として扱うことにより、剛体球の重心の剛体変位 (u_c, v_c, w_c) と、剛体回転 (r_x, r_y, r_z) のみとなる。また、剛体球の運動により生じる剛体球要素内の任意点 $P(x, y, z)$ における変位 (u, v, w) は、剛体球要素の重心 (x_c, y_c, z_c) を用いて、次式で表される。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_c & -(y - y_c) \\ 0 & 1 & 0 & -(z - z_c) & 0 & x - x_c \\ 0 & 0 & 1 & y - y_c & -(x - x_c) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= [T(x, y, z)] [D_i]$$

DDA に剛体球要素を用いたことにより、接触の判定が簡略化され接触力の計算が容易となる。DDA では剛体球が他の剛体球或いは、壁要素（平面要素）と接触するときペナルティーバネが導入される。ペナルティーバネはブロック同士間に貫入が生じないようにするとともに、接触時のブロック間での力の伝達する役割を持つ。

剛体球と壁要素（平面要素）との接触について述べる（図1）。壁要素は落石解析において斜面を構成する要素となり、剛体球と平面の間で接触が生じると、平面に垂直な方向に、球の中心と平面間に法線方向接触バネが挿入される。ここで k_n はバネ係数であり、 (l_x, l_y, l_z) は壁要素の法線ベクトル表し、 s_0 は前解析ステップにおける剛体球と壁要素間の距離とすると、壁要素のとの接触によるサブマトリックスは、次式から得られる。全体つり合い方程式(2)に重ねられる。

$$\begin{aligned} k_n [T_i(x_0, y_0, z_0)]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z) &\rightarrow [K_{ii}] \\ -k_n s_0 [T_i(x_0, y_0, z_0)]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T &\rightarrow [F_i] \end{aligned} \quad (4)$$

落下する落石同士の接触を表すために、剛体球間の接触力の導入について述べる（図2）。剛体球 i と剛体球 j の法線方向のペナルティーバネにおける接触力は貫入量とバネ係数との積で表される。ペナルティーバネ係数を k_n 、 (l_x, l_y, l_z) を剛体球の中心を結ぶベクトルの方向余弦、 s_n を前解析ステップでの剛体球間の接触距離とすると、剛体球同士の接触によるサブマトリックスは、次式で表され、全体つり合い方程式(2)に重ねられる。

$$\begin{aligned} k_n [T_i]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z) [T_i] &\rightarrow [K_{ii}] \\ k_n [T_j]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z) [T_j] &\rightarrow [K_{jj}] \\ -k_n [T_i]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z) [T_j] &\rightarrow [K_{ij}] \\ -k_n [T_j]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z) [T_i] &\rightarrow [K_{ji}] \\ -k_n s_n [T_i]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T &\rightarrow [F_i] \\ k_n s_n [T_j]^T (\lambda_x \ \lambda_y \ \lambda_z)^T &\rightarrow [F_j] \end{aligned} \quad (5)$$

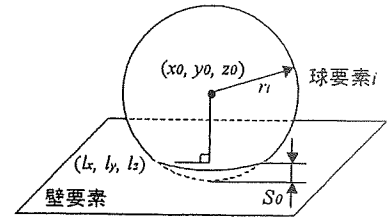


図1 剛体球と壁要素の接触

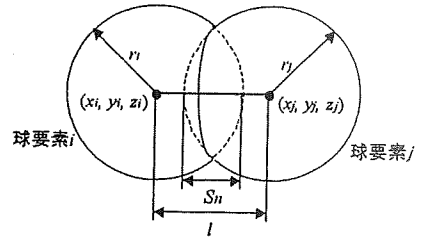


図2 剛体球要素同士の接触

DDA では、ブロック同士の接触はバネのみによりモデル化されており、接触時にブロックシステム全体でのエネルギー損失は生じない³⁾。しかし、落石が斜面へ衝突する際にエネルギー損失が生じるため、DDA を落石解析に適用するためには、エネルギー損失を評価する手法が必要となる。本研究では、速度エネルギー比と呼ばれるパラメータを導入することにより、衝突時のエネルギー損失の評価が可能としている。速度エネルギー比とは衝突前後の落石の持つ運動エネルギーの比であり、衝突前の速度を V_{in} 、衝突後の速度 V_{out} として次式で表される。

$$\gamma = \frac{V_{out}^2}{V_{in}^2} \quad (6)$$

本手法の落石挙動解析への適用性を示すために、解析モデルとともに落石の落下軌跡及び落下速度を図3に示す。本研究で用いた三次元 DDA には、落石が斜面へ衝突する際のエネルギー損失を評価するためのパラメータとして速度エネルギー比を導入している。右城ら⁴⁾は既往落石実験から

得れた速度エネルギー比のばらつきがあるものの平均値が0.66～0.71となると報告しており、これに基づき速度エネルギー比を0.6、0.7、0.8、の3種類に設定し解析を行った。本手法を用いることにより3次元的な落石の落下軌跡を得ることができるようになった。また、図3に示すように速度エネルギー比が落石の落下軌跡及び落下速度に与える影響が大きいことがわかる。

3. 得られた成果

DDAの理論に剛体球を導入することにより、接触の判定を大幅に簡略化するとともに、三次元空間での落石挙動を解析することが可能となった。また、速度エネルギー比を導入することにより、落石の挙動を解析するにあたり最も重要となる斜面へ衝突する際のエネルギー損失を評価することが可能となった。今後この三次元DDAを用いて落石解析を行うためには、速度エネルギー比を適切に設定することが必要である。この他にも、植生の影響を考慮するパラメータなどがあり、既往の落石実験等と解析結果の比較検証を繰り返すことにより速度エネルギー比を含め適切な解析パラメータを抽出し評価していく必要がある。

4. 謝 辞

本研究は、平成16年度関西電力株式会社より委託されたものであり、関係各位に謝意を表する。

5. 参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、平成12年6月
- 2) Shi G. H., Discontinuous Deformation Analysis A New Numerical Model for the Static and Dynamics of Block System, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkely, 1989,
- 3) 布川哲也、楊萌、大西有三、西山哲、三木茂：不連続変形法(DDA)を用いた3次元落石解析に関する研究、第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp469-474、2004
- 4) Jian-Hong Wu, Y. Ohnishi, S. Nishiyama: Simulation of the mechanical behavior of inclined jointed rock masses during tunnel construction using Discontinuous Deformation, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, pp731-743, 2004

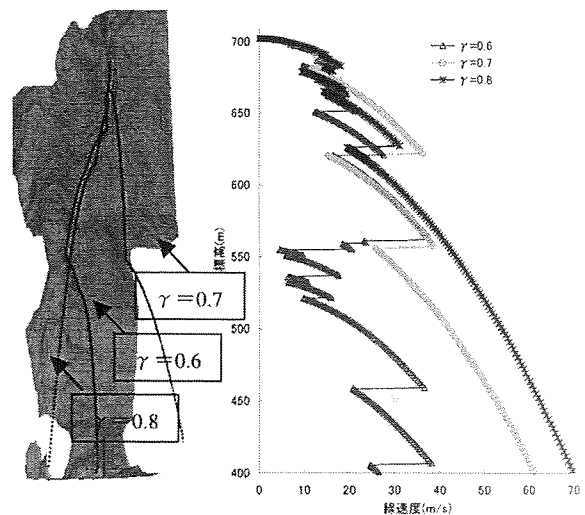


図3 解析モデル・落石軌跡及び落下速度