# 原位置落石実験の三次元不連続変形法(DDA) による検討

佐々木 猛1\*・萩原 育夫<sup>1</sup>・島内 哲也<sup>2</sup>・大西 有三<sup>3</sup>・小山 倫史<sup>4</sup>・三木茂<sup>5</sup>

<sup>1</sup>サンコーコンサルタント(株)(〒136-8522東京都江東区亀戸1-8-9)
 <sup>2</sup>オフィスim3(〒174-0063東京都板橋区前野町3-6-10)
 <sup>3</sup>関西大学都市環境工学部(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)
 <sup>4</sup>京都大学大学院工学研究科(〒615-8540京都市西京区京都大学桂クラスターC1-2棟)
 <sup>5</sup>基礎地盤コンサルタンツ(株)(〒136-8577東京都江東区亀戸1-5-7)
 \*E-mail: sasakit@suncoh.co.jp

急峻な地形を有する我が国では,鉄道,道路,ダムなどの重要な構造物は斜面に近接していることが多 い.そのため,降雨や地震などを引き金とする落石現象などの斜面災害が頻発している.斜面からの落石 現象を的確に予測し,合理的な対策を講じることは,最も重要な防災対策の一つである.また,我が国に 多く見られる自然斜面は一般に樹木などが繁茂しており,落石現象の的確な予測を更に複雑にしている. これまでに,斜面の樹木を考慮した解析は,二次元DDAなどにより,樹木の影響を粘性係数や速度エネ ルギー比に置き換え,間接的に評価していた.本研究では,あるダムの下流斜面で行われた落石実験を, 三次元DDAを用い樹木を直接モデル化して,その影響を検討した結果について述べる.

Key Words : rock fall, in-situ experiments, observations, vegetation, 3D DDA

# 1. はじめに

我が国に多く見られる道路斜面は,その内外に樹木な どの植生が繁茂していることが多い.これまでの二次元 DDAなどを用いた落石解析では,樹木などの影響は粘 性係数や,速度エネルギー比などにその影響を間接的に 考慮することにより経験的に評価していた<sup>1)-4</sup>.三次元 解析では,斜面上の樹木の密度や配置など三次元的な影 響を直接モデル化することができる<sup>5,6</sup>.これらは,落 石経路の樹木の衝突や斜面の三次元的な影響による側方 への広がりなどが求められるため,落石防護壁などの位 置や幅などを適切に決定できる長所がある.これまで, 三次元解析は,そのデータ作成に多大の労力を要してい たが,最近では,地形の三次元データが三次元レザー測 量機などの進歩により,比較的容易に得られるようにな った.また,解析手法も工学的な精度を考慮することに より,現実的な時間で解析が可能になっている<sup>7</sup>.

# 2. 実験の概要

実験現場は,東北地方のあるダムサイト計画地の斜面

である.実験の目的はダム周辺の斜面上に存在する落石 から,ダム本体や作業員を防護する対策を検討するため である.



図-1 ダムサイト周辺の斜面と実験現場

図-1にダムサイト周辺の斜面と実験現場を示す.サイト内の7つの検討斜面の内,ここではダム下流右岸のR1 斜面の実験と解析について述べる.図-2に実験領域(R1)の地質分布を示す.本領域の地質は,頁岩,安山岩,砂 岩の互層となっており,斜面下部の河川部の一部が崖錐 堆積物となっている.

また,斜面には直径7~25cm,高さ5m程度の立木と, 高さ20~30cmの笹薮などの植生が繁茂している.この ため,実験時には,想定落下経路に沿う,幅10m~15m の範囲の笹薮を伐採した.



図-2 実験領域(R1)の地質



図-3 実験現場平面図,カメラ配置と落下軌跡

図-3は,実験現場平面図,カメラ配置と落下軌跡を示 す.実験の記録は,斜面の対岸と斜面上~中段に配置し た合計8台のビデオカメラで行った.図中,青が球形, 赤が立方体を示す.図-4は,図-3中の断面線に沿う落石 軌跡と平均勾配を示す.斜面上部では約39°,斜面下部 では約45°となっている.図-5は,実験および解析に用 いた落石形状を示す.落石の寸法は1辺が40cmのモルタ ルで作成した立方体10個,直径が40cmの球体と砂岩, 安山岩の自然石8個(12面体で模擬)である.これらを 斜面頂部に設置した仮設台から人力で投下した.





図-6は,カメラ5から見た落下軌跡である.落下軌跡 が所々で急に方向が大きく変化するのは,立木との衝突 や,植生の下に隠れた木の根やツルに引っ掛かり跳ね上 がることが原因である.このような変化は球体より立方 体に多く観察された.

3. 三次元DDA理論の概要

(1) ブロックの変位関数

図-7は三次元DDA<sup>50</sup>の座標系とブロック重心の未知数 を示す.これらの未知数は式(1)で示される.

$$\{D_i\} = (u_c v_c w_c r_x r_y r_z \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{yz} \gamma_{zx} \gamma_{yy})^T$$
(1)

ここに,  $\{D_i\}$ :ブロック重心の未知数,  $u_{c_1} v_{c_2} w_{c_2}$ :剛体 変位,  $r_{s_0} r_{s_1} r_{z_2}$ :剛体回転,  $\epsilon_{s_0} \epsilon_{s_1} \epsilon_{s_2} \gamma_{s_2} \gamma_{s_2} \gamma_{s_2}$ :ブロック i の ひずみである.ブロック i 内の任意点の変位は式(2)で示 される.

$$\begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} = [T_i(x, y, z)] \{ D_i \}$$
<sup>(2)</sup>

ここに,変位関数は式(3)で表される.

$$[T(x, y, z)] = \begin{pmatrix} 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ z \ -y \ x \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{z}{2} \ \frac{y}{2} \\ 0 \ 1 \ 0 \ -z \ 0 \ x \ 0 \ y \ 0 \ \frac{z}{2} \ 0 \ \frac{x}{2} \\ 0 \ 0 \ 1 \ y \ -x \ 0 \ 0 \ 0 \ z \ \frac{y}{2} \ \frac{x}{2} \ 0 \end{pmatrix}$$
(3)

(2) ブロックの運動方程式

ブロックの運動方程式は, Hamiltonのエネルギー最小 化原理により式(4)で示される.

$$[M]{\dot{u}} + [C]{\dot{u}} + [K]{u} = {F}$$
(4)

ここに,それぞれブロック重心の,M:質量マトリックス,C:粘性マトリックス,K:剛性マトリックス,



 $X(u_c, r_x, \mathcal{E}_x, \gamma_{xy})$ 

図-7 三次元DDAの座標系と未知数

F:外力ベクトル, $\ddot{u}$ :加速度ベクトル, $\dot{u}$ :速度ベクトル,u:変位ベクトルである.

### (3) 運動方程式の時間積分

式(4)の運動方程式は、Newmarkのβ、パ法を用いて解い ている.ここに、β=0.5、パ=1.0とすれば、式(4)は式(5)の 増分系の変位を解くことに帰着する.

$$\widetilde{K} \cdot \Delta u = \widetilde{F} \tag{5}$$

$$\widetilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + \frac{\rho^c}{\rho^0} [K_e + K_s]$$
(6)

$$\widetilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u} + (\Delta F - \sum \int \sigma dv) - M\alpha(t)$$
(7)

ここに,  $\Delta u$ : 増分変位, M: 質量マトリックス, C: 粘性マトリックス,  $K_e$ : 剛性マトリックスの線形項,  $K_s$ : 剛体回転に伴う初期応力マトリックス, u: ブ ロック重心の速度テンソル,  $\rho^0$ : 変形前の体積,  $\rho^c$ : 変 形後の体積,  $\alpha(t)$ : 地震による時間依存加速度などであ る.

# (4) 粘性係数および接触機構

式(6)の粘性マトリックスは,粘性係数ηが質量Mと速度に比例するものとし,式(8)を仮定している.これは, ブロックの速度に比例した減衰として作用する.

$$C = \eta M \tag{8}$$

図-8はブロックの接触機構を示す.式(9)は接触時の貫入によるエネルギーを示し,貫入エネルギーが貫入量dとペナルテイp,接触粘性係数 $\eta_p$ の積として表され, これを最小化することにより,接触マトリックスが得られる.

$$\prod_{p\eta} = \frac{1}{2} \left( p + \frac{\eta_p}{\Delta t} \right) d^2 \tag{9}$$

式(9)の右辺第一項は,ブロックの貫入による反発力で あり,第二項は,接触時の速度に比例する粘性抵抗である.



図-8 ブロックの接触機構

# 4. 三次元DDA解析

(1) 解析ケースと物性

当該斜面では,樹木が落石の経路や速度などに与える 影響を見るため,

- (a) 樹木が無いモデル
- (b) 3本/100平方メートルの密度モデル(計33本)

(c) 9本/100平方メートルの密度モデル(計99本)

の3つのモデルについて検討した.また,落石の形状は 図-5に示す実験で用いた,立方体,12面体,球体(80面 体)の3種類である.樹木は,一辺20cm四方,高さ5mの 立方体の剛体とした.これらの中で,樹木を99本とした ケース(c)が最も現場の状態を表している.図-9は座標系 と樹木が無い場合の解析モデルを示す.



図-9 座標系と解析モデル(樹木なし)

図-10 解析モデルと立方体の落石軌跡(樹木33本)

斜面は幅50m,奥行き110m,高さ108mで,表面約5mを 多角形でモデル化している.落石の初期位置は斜面上部 の地上高さ2mから,斜面前方と重力方向に,初速1m/sec, 回転0.1md/secを与えた.図-10は樹木が33本の場合の落石 形状が12面体のモデルを示す.落石は,落下の途中で3 か所程度,樹木と接触している.

図-11は樹木が99本の場合の落石形状が12面体のモデ ルを示す.落石は,落下の途中で6か所程度,樹木と接 触している.表-1は解析ケースおよび物性を示す.表中 の記号V/E(Slope)は斜面上部から下部の速度/エネルギー 比,V/E(River)は斜面下部に存在する河川部の速度/エネ ルギー比を示す.これは,斜面上の樹木以外の笹と,斜 面下部の崖錐のエネルギー損失を考慮したものである.

#### (2) 解析結果および考察

図-12,図-13,図-14は,それぞれ,樹木が無い場合, 樹木が33本の場合,樹木が99本の場合で,落石形状が立 方体,12面体,球体の軌跡を示す.

これらの斜面標高と水平方向の軌跡を図-15に示す. 図中,赤色系は立方体,緑色系は12面体,青色系は球体の軌跡を示す.落石の斜面直交方向のばらつきは,落石形状が矩形,12面体,球体の順となっている.

項目	立方体	立方体	12面体	球体
弾性係数	2GPa	5GPa	5GPa	5GPa
ペナルテイ	2GPa/m	5GPa/m	5GPa/m	5GPa/m
ポアソン比	0.3	0.25	0.25	0.25
単位体積重量	$22kN/m^3$	25kN/m <sup>3</sup>	25kN/m <sup>3</sup>	25kN/m <sup>3</sup>
時間刻み(秒)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
摩擦角(度)	35	35	35	35
最大変位比	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
速度減衰係数	0.03	0.03	0.03	0.03
V/E(Slope)	0.81	0.81	0.81	0.81
V/E(River)	0.36	0.36	0.36	0.36
計算ステップ	300000	300000	250000	250000



図-11 解析モデルと立方体の落石軌跡(樹木99本)

これらのモデルでは,落石の斜面に直交する方向の軌跡 が,特に立方体が樹木に接触することにより,樹木が無 い場合に比較して大きく異なっている.また,球体の軌 跡は樹木が無い場合と比較し,あまり変化が見られない. 12面体は,その中間のばらつきを示している.

図-16は,樹木が無い場合の落石落下高さと速度の関係を示す.図中の,印は,落石形状が立方体および球体の場合の速度の観測結果の一例である.この結果を見ると,平均的な落石速度は球体が,立方体,12面体より大きい.最大の落石速度の観測値は,10m/secから11m/secで,計算結果も,球体の場合がやや大きくなっているが,概ねその範囲に存在している.

図-17は樹木が無い場合の,落石の経過時間と速度との関係を示す.落石の経過時間を見ると,球体は落石投下から約20秒,12面体は約23秒,立方体は約25秒で河川に到着している.

図-18は樹木が33本の場合の落石落下高さと速度の関係を示す.落石の速度が極端に低下している区間は,樹木と接触して場所である.この場合,落石の速度のバラッキは,球体が落下高さ26m程度の場所で樹木に接しているため,立方体より大きくなっている.

図-19は樹木が99本の場合の落石落下高さと速度の関係を示す.落石の速度のバラツキは,樹木が33本の場合と比較して,落石が更に多く樹木と接触するため大きくなっている.この場合,落石形状が立方体に加え,球体もバラツキが大きくなっている.

図-20は樹木が99本の場合の落石経過時間と速度の関係を示す.落石投下から河川に到達する時間は,約30秒で樹木の無い場合より5秒から10秒程度長くなっている.















図-17 落石経過時間 速度分布(樹木0本)



図-18 落石落下高さ 速度分布(樹木33本)





図-19 落石落下高さ 速度分布(樹木99本)



落石実験と解析結果の比較では,落石形状の違いによ る落石軌跡や落下速度のバラツキの定性的な傾向は概ね 再現できている.しかし,樹木の影響による落石速度の バラツキの評価には更に検討が必要である.

#### 5. 結論および今後の課題

本研究では,実際のダム計画地点で行われた落石実験 を,樹木を考慮した三次元DDAで解析し,樹木の影響 を検討した.実験で得られた平均的な落石速度とDDA の結果は概ね整合的であった.落石の最終地点への到達 遅延時間に対する樹木の影響は,樹木が無い場合と比較 して約15%から30%程度となった.これは,落石が樹木 に衝突することにより,速度と移動距離が変化するため である.また,立方体の落下経路や速度の変化は,球体 と比較して大きい.

今後の課題として,現在のモデルでは樹木を剛体としているが,これらを弾性体とした場合についても検討する予定である.

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考資料-落石シ ミュレーション手法の調査研究資料-, 2002.
- 2) 萩原育夫,佐々木猛,大西有三:斜面落石の不連続変形法 (DDA)による解析,第8回計算工学講演会論文集,pp.181-182,2003.
- Hagiwara, I., Sasaki, T., Nishiyama, S., & Ohnishi, Y., : Estimation and simulation of vegetation effect on rock-fall using discontinuous deformation analysis, *ISRM Symposium & 3<sup>rd</sup> Asia Rock Mechanics Symposium*, Millpress, pp1249-1252, 2004.
- 4) 萩原育夫,佐々木勝司,島内哲也,中村公一,西山哲, 大西有三:現場落石実験から得られる斜面性状を考慮 した速度比の特徴について,土木学会,第38回岩盤 力学シンポジウム, pp.57-62,2009.
- Shi, G. H. : Three dimensional discontinuous deformation analyses. Proceedings of Fourth International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, pp. 1-21, 2001.
- 6) 佐々木猛,萩原育夫,三木茂,大西有三,西山哲,小山倫 史:三次元不連続変形法の接触機構と落石到達距離の評価, 第13回岩の力学国内シンポジウム,pp.97-102, 2013.
- Sasaki T., Hagiwara, I., Miki, S., Ohnishi, Y. and Koyama, T.: Numerical stability on rock fall problems by 3-D DDA, 47<sup>th</sup> US Rock Mechanics | Geomechanics Symposium, ARMA47, 13-489, 2013.

# STUDIES ON IN-SITU ROCK FALL EXPERIMENTS USING 3D DDA

# Takeshi SASAKI, Ikuo HAGIWARA, Tetsuya SHIMAUCHI, Yuzo OHNISHI Tomofumi KOYAMA and Shigeru MIKI

The authors analyzed the in-situ rock fall experiments by three dimensional DDA. The in-situ rock fall experiment was performed using the natural and the artificial mortal rock stones at the certain dam site slopes in Japan. The trajectories of the falling rock stones were monitored by eight video cameras. The vegetation grows thick on the surface of the slope. In this study, the trees on the slope are modeled directly in the 3D DDA. The rock falling behaviors are evaluated by comparison between the experiments and the DDA with modeling of trees. As a result, the average velocities of the falling stones of the DDA calculations are good agreement with observations of the experiments.