転動，流動した岩塊，土砂のリスク評価に向けた検討(3)

―岩隗転動実験に対する個別要素法による再現シミュレーション―

東電設計　　正会員　○中瀬　仁
鉄道総合技術研究所　正会員　阿部慶太　中島進　渡辺健治　獅子目　修一
元　原子力安全基盤機構　正会員　中村英孝　村田　雅明
日本大学　正会員　　中村　晋
東京都市大学　正会員　吉田　郁政

１．目的

原子力施設のリスク評価に際し，想定を超える地震動に対する斜面の崩壊挙動の評価に課題が残されており，粒子法や個別要素法[1)]等の離散系数値解析手法の整備が求められている．ここでは，斜面崩壊の評価に関して，連続した角度の異なる 2 枚の斜面を転がり落ちる人工岩塊の転動する様子[2)]を，個別要素法を用いて再現計算を行いその適用方法について検討する．まず，複数の球要素を連結し，人工岩塊の形状に近い外形を有する岩塊モデルを用いて，再現計算を行い実験結果と比較する．次に，これに近い結果を得るための，完全球による岩塊モデルによるシミュレーション方法について検討する．解析に用いるパラメータは，事前に行った反発試験[3)]および滑動試験を参照して定めた．

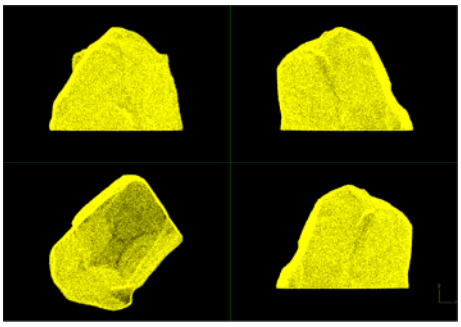


図-1　代表径 20cm の塊状岩塊

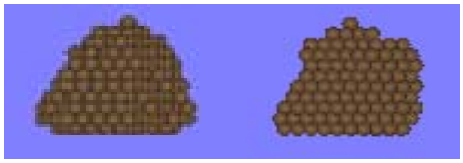


図-2　個別要素法の解析モデル

２．解析モデル

2.1 岩塊モデル

球形・塊状・扁平形状の 3 種類の人工岩塊が用いられたが，本検討では代表径 20cm の塊状岩塊を対象とした．レーザプロファイリングによる外形を図-1 に，個別要素法の解析モデルを図-2 にそれぞれ示す．岩塊を，小さい球要素 485 個連結することによりモデル化した．
表-1 に解析のパラメータを示す．接線方向のばね係数および粘性係数は，半径方向と同値とした．

2.2 斜面および底版モデル

斜面および底版モデルを図-3 に太い線で示す．図には省略したが法先以降に 30m の領域を確保した．なお，奥行きは 15m であり，斜面および底版は剛な平面として表現した．

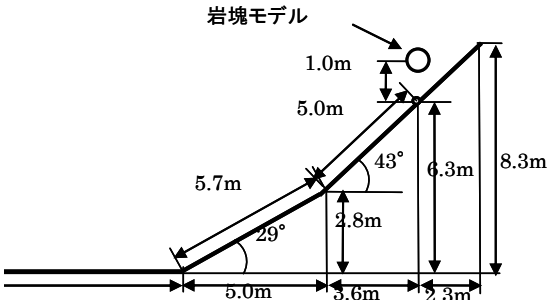


図-3　斜面モデル

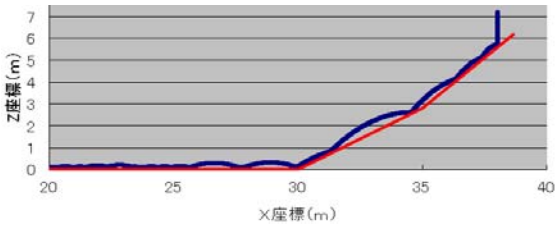
３．シミュレーション結果　シミュレーションは，岩塊モデルを初期位置でランダムに回転し，94 通りの初期状態から落下させた．図-4 はシミュレーション結果の一例である．軌跡を見ると岩塊モデルは斜面とほぼ平行に運動しているので，DEM の流下方向速度 V を x 方向速度と z 方向速度の二乗和で近似した．流下方向速度の比較では，DEM(青太)が実験(赤)に比べて初速から 2m/s 程小さい値となっている．同図水色太線は摩擦係数を 0.09 とした DEM 結果であり実験と整合する．ここ

表-1　解析のパラメータ

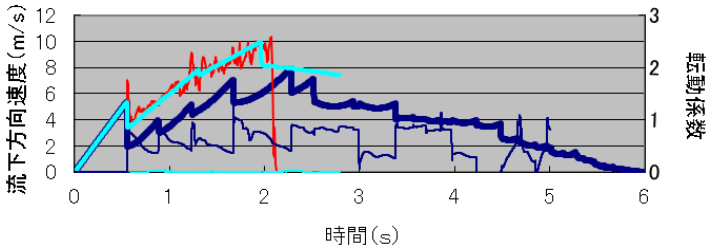
岩塊質量(kg)	要素半径(m)	要素数（個）	反発係数	密度(kg/m3)	半径方向ばね係数(N/m)	半径方向粘性係数(N・s/m)	摩擦係数
8.454	0.0116	485	0.343	2625	2.0×10^{6}	2.65×10^{3}	0.411

キーワード　落石，土砂，転動
連絡先　　〒135-0062　東京都江東区東雲 1-7-12　東電設計（株）　土木本部　ＴＥＬ03-6372-5563

で，DEM の転動係数（文献 3）参照）をみると，斜面上では，摩擦の大きい青細線は反発のたびに 1 となり，飛行中は落下速度増大に伴って減少する．摩擦の小さい水色細線は 0 に近く滑りが卓越していることが分かる．底版に達した後，摩擦が大きく転動し易い青細線は，転動中ほぼ 1.0 となり，この間滑らずに転がる挙動を示している．94 回のシミュレーションにおいてそれぞれの岩塊モデルが静止した位置の分布を，法先を到達距離の原点として，図-5(a)に示す．



(a) 変位軌跡



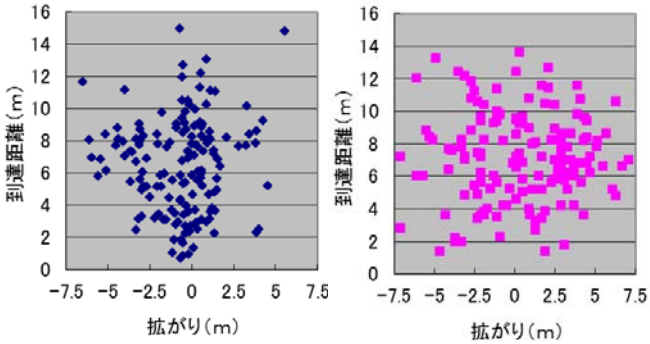
(b) 流下方向速度変位軌跡(青：DEM 摩擦大，水：DEM 摩擦小，赤：実験)と DEM 解析の転動係数(細線)

図-4 シミュレーション結果の一例

4．塊状岩塊の球要素一個によるモデル化

前節では、複数の球要素を組み合わせて岩塊の形状を忠実にモデル化したが，本章では，これを一個の球要素で表すことを考える．このモデルでは，砕石の凹凸による不規則な転がりや反発を，斜面や底面境界のモデルである固定した球要素群の包絡面がなす凹凸を用いて表現する．解析モデルを図-6 に示す．斜面および底版を表す要素間隔が XY 平面（XY方向については図-3 参照）で丁度直径になるよう格子配置してある(粗度：中)．この格子間隔によって，岩塊の挙動が大きく影響を受ける．粗度が小さいほど，拡がりおよび到達距離が大きくなる．

球要素の初期位置の X，Y 座標を直径の矩形内に 100 個ばらつかせ，斜面を転動させるシミュレーションを行った．最終位置の分布を図-5 の(b)に示す．



(a) 複数球連結モデル (b) 球 1 個モデル

図-5 最終位置の分布

複数球連結モデル(青)と球 1 個モデル(ピンク)の拡がりおよび到達距離の累積を図-87 に比較する．拡がりのばらつきは球 1 個モデルがやや大きく，到達距離はおおむね対応する結果となった．

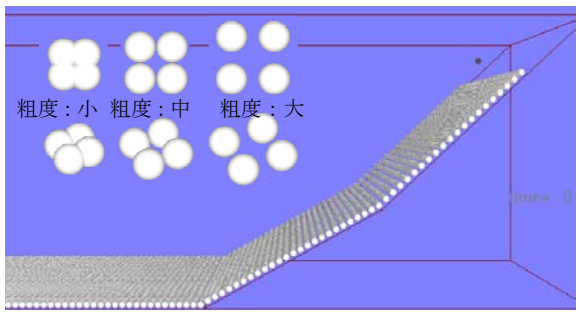


図-6 解析モデル

5．まとめ

実務では，崩落する岩塊一つ一つの形状をモデル化することが困難なことを考慮し，岩塊を 1 個の球要素でモデル化する簡易手法を考案した．拡がりのばらつきは大きめであるが，到達距離はおおむね詳細モデルと対応しており，簡易モデルを詳細モデルの代替として有効なものと考えられる．

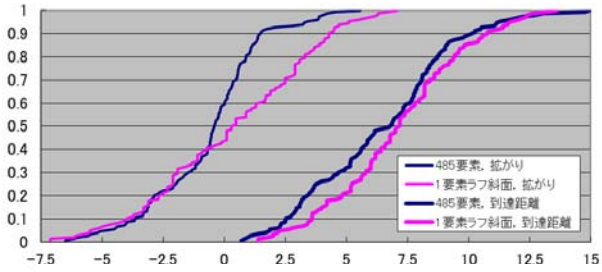


図-7 拡がりおよび到達距離の累積の比較

参考文献 1) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, 29, 1979. 2)獅子目他：転動，流動した岩塊，土砂のリスク評価に向けた検討(1) –岩塊，土砂の転動，流動衝撃試験の概要－第 69 回土木学会年次学術講演会，2014. 3)内藤他：岩塊転動が構造物に及ぼす影響の評価(2) –異なる岩塊形状および質量の人工岩塊を用いた反発試験-，第 49 回地盤工学研究発表会，2014.