

粒子法による弾塑性球体の落下挙動の基礎的検討

日本大学工学部土木工学科地震防災研究室 学生会員 ○新保 達也、正会員 中村晋

1. はじめに

1968年に集中豪雨による土砂崩壊によりバスが飛騨川に転落し、104名が犠牲者になるという事故が発生した。この事故を契機として、斜面崩壊により岩塊の滑落・転動挙動の予測法の関する技術開発が実施されている。その後も、豪雨のみならず地震に起因した斜面崩壊による岩塊の滑落・転動は人命や社会基盤施設に甚大な被害を多くもたらしており、その影響を定量的に評価し、必要に応じた対策を講じることが急務となっている。

これまで提案されている岩塊の滑落・転動挙動の予測法は、質点解析とDEMやDDAなどに代表される非質点解析の2つに大別することができる。いずれの方法も岩塊を剛体としてモデル化しており、滑落・転動挙動の解析に際して反発係数が重要なパラメータとなる。その係数は、過去に実施された様々な実験により、経験的に求められている。その係数を合理的に設定することは、斜面から対象施設までの距離に応じて、施設に影響を及ぼす岩塊の大きさなどの感度分析が可能になるとともに、斜面崩壊による岩塊群の滑落・転動挙動をより精度良く予測することが可能となる。

ここでは、岩塊の滑落・転動解析に必要な反発係数を合理的に設定するための基礎的な検討として、数値解析により弾塑性球体の落下挙動の検討を実施した。解析には、弾塑性体として球体のモデル化が可能であり、落下挙動の評価が可能な粒子法のうちMaterial Point Method(MPM)を用いた。解析のモデルパラメータ設定や得られる反発係数の妥当性を確認するため、既往のコンクリート製の球体の落下実験を参照データとして用いた。

2. 弾性体の落下挙動の解析手法

MPMはSulskyにより提案され、Lagrange粒子とバックグラウンド格子からなり、Update-Lagrangian法と陽解法の組み合わせによるアルゴリズムを用いており、粒子を用いるために球体の落下や跳ね返り挙動を解析できる。球体や地面を粒子の集合で表し、粒子で輸送した応力などの物理量を一定時間刻み Δt 毎にバックグラウンド格子の格子点に内挿関数で集約し、運動方程式を解く。 Δt 毎の過程では、まず格子点速度からひずみ増分 $\Delta \epsilon$ を求め、粒子の位置、物理量を更新し、格子は粒子を残して元に戻り、既存の構成則を用いてひずみ増分 $\Delta \epsilon$ から応力増分 $\Delta \sigma$ を計算する。MPMは、陽解法であることから、時間刻みには注意が必要で、安定性が確保できる時間刻み (Δt) を用いた。MPMはLagrange粒子がバックグラウンド格子を通過する際に生じるノイズについても留意が必要である。

3. 既往の実験概要

ここでは、解析モデルの作成や結果の確認に用いる既往の実験を以下に示す。

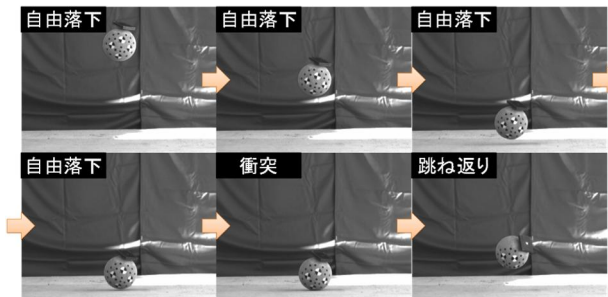


写真-1 コンクリート球の自由落下状況
表-1 球形岩塊モデルの落下実験結果

模型	サイズ	高さ(m)	反発係数		
球形岩塊	20cm	0.5	0.440		
		1.0	1回目	0.399	0.343 (平均値)
			2回目	0.287	
		1.5	0.312		
	40cm	0.25	0.12		
		0.5	0.067		
		1.0	1回目	0.096	0.151 (平均値)
			2回目	0.205	
		2.0	0.155		

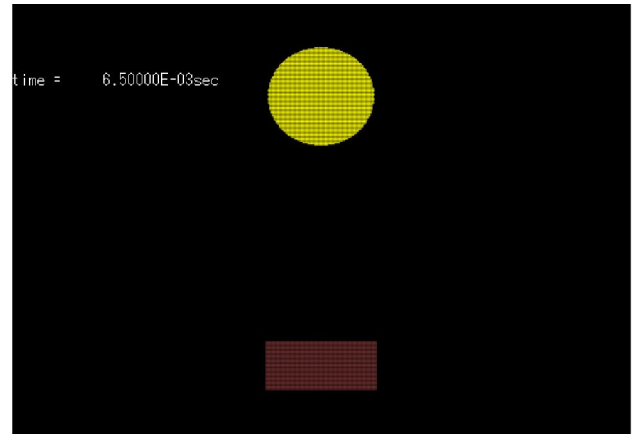
キーワード: 球体、落下、反発係数、非線形、粒子法

Keywords: sphere, drop, rebound coefficient, nonlinear, material point method

住所: 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学土木工学科 地震防災研究室

電話番号: 090-9230-9836

実験は写真－1に示すようにコンクリート製の球体を所用の高さからコンクリート床版にむけて自由落下させることにより実施した。反発係数は、衝突直前の鉛直速度と跳ね返り後の鉛直速度を画像解析により求め、その比として算出した。表－1に球形岩塊モデルの球体の直径と落下高さに応じた反発係数を示す。これより、反発係数は、直径が大きい方が小さな値となっていることが分かる。また、落下高さの影響については、直径20cmの球体は高さが高くなるにつれ小さくなっているが、40cmについてはその傾向がみられないことが分かる。



図－1 解析モデル

4. 自由落下解析の結果

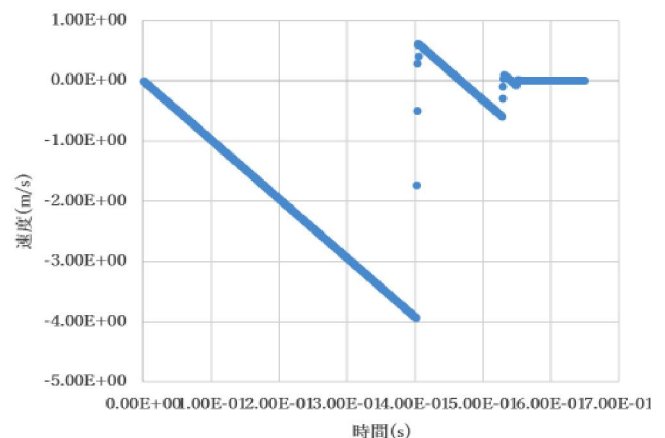
4.1 球体のモデル化

球体の解析モデルのうち、直径40cmの例を図－1に示す。球体は3次元形状を直接モデル化するのは複雑なので、2次元モデルとした。ここで、格子間隔は水平、鉛直方向および奥行き方向とも0.01mとした。球体の奥行き方向の幅は1格子間隔とした。また、粒子は各方向の1格子内に2個ずつ配置した。球体の中心高さは、床版の表面から1mとした。また、床版は横幅42cm、高さ20cm、奥行10cmである。

実験との比較によるモデル化の検討では、球体および床版を弾性体とした。それぞれの弾性係数はコンクリート強度が25(kN/m²)として25GPaに設定した。また、ポアソン比は、0.200を用いた。単位体積重量は球体のモデルが球ではなく板であるため、落下時の運動エネルギーを球と板が等価となるように質量を調整するための係数($= (4r)/(3t)$; r:球体、円板の半径、t:円板の厚さ)をコンクリートの単位体積重量に乘じた値とした。直径40cmのモデルについては、コンクリートの単位体積質量を2.4kN/m²として、64.0t/m³と設定した。

4.2 解析結果

図－1に示した解析モデルに対する解析結果として、図－2に球体の落下による鉛直方向の速度の時間変化



図－2 球体モデルの鉛直速度の時間変化

表－2 球体モデルの床板への衝突直前、直後の鉛直速度反発係数の関係

衝突直前の速度	-3.94E+00			
衝突直後の速度	6.11E-01	5.94E-01	4.05E-01	6.07E-01
反発係数	1.55E-01	1.51E-01	1.03E-01	1.54E-01

を示す。時間とともに下向きの速度が増加し、3.94m/sに達してから、速度の方向が逆向き、つまり反発していることが分かる。この床板への衝突時の速度はエネルギー釣り合いより求めた速度3.96m/sとほぼ一致している。

次に、反発直後数ステップに対する上向きの鉛直速度と衝突時の鉛直速度および得られた反発係数の値を表－2に示す。これより、衝突直後の球体モデルの鉛直速度は変化しているが、概ね0.15であり、前述の実験と同程度の値となっている。ここで、衝突直後の球体モデルの速度変化は球体自体の振動などに起因していると考えられる。この振動などによるエネルギー損失により、反発係数が1.0にならないと推定される。

5. あとがき

現在、球形の直径が異なる20cmの球体モデルについても解析を実施中であり、球形形状および落下高さが反発係数に及ぼす影響については、発表会にて報告予定である。