

サイズの大きい落体の斜入射実験に対する再現解析

東電設計(株) 正会員 ○佐藤 恭兵
 東電設計(株) 正会員 中釜 裕太
 東電設計(株) 正会員 中瀬 仁
 (株)構研エンジニアリング 正会員 牛渡 裕二

1. はじめに

原子力発電所内および近傍の斜面に対して、残余のリスク評価ツールとして粒子法や個別要素法（以下、DEM という。）等の離散数値解析手法の整備が求められている。原子力分野に限らず落体の数値解析においては反発係数が最も重要なパラメータであり、直径 50cm（重さ 170kg 程度）を超える落石がアスファルト舗装に鉛直に落下した場合の反発係数は、ほぼ 0 であることが分かってきた。一方、直径 2m のコンクリート製擬球形の試験体を斜入射した際の反発挙動を調べた結果、鉛直方向に若干跳躍し、見かけの反発係数が計測されることが分かった。本稿では DEM による再現解析を実施し、斜入射に対する鉛直方向の反発係数について検討する。

2. シミュレーション 1

シミュレーション対象とする実験ケースを表-1 に示す。2つの実験ケースで反発係数が変わるのは、衝突前の初速と入射角が異なるためである。ここでは、最も単純に、DEM の球要素 1 個を、図-1 のように境界に斜入射するシミュレーションを行った。球の質量は 9t、バネ係数は 1.0×10^9 N/m、減衰係数は鉛直落下した際、表-1 の跳ね返り高さから求めた実験の反発係数を再現するように定めた。これらは法線方向と接線方向で同値とした。初速として表-1 の衝突前速度を与えた。回転速度は、実験結果を参考に水平速度に対して滑らずに転がる値、つまり水平速度を半径（1m）で除した値とした。図-2 に鉛直方向位置の時系列について実験とシミュレーションの比較を

ピークの時刻を揃えて、2 ケースそれぞれ示す。跳ね返り高さは実験とシミュレーションでほぼ一致しているが、シミュレーションが若干大きめであるのは斜入射の影響であると考えられる。衝突後の速度は、衝突前とほとんど変化しなかった。実務には問題ない結果ではあるが、実際には、衝突前の初速と入射角と反発係数の関係が不明である。

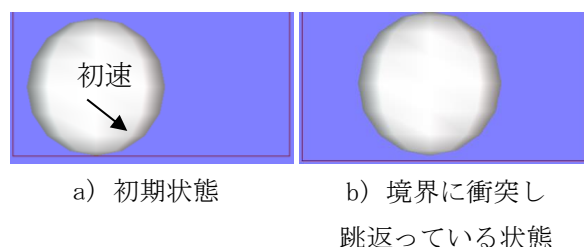


図-1 シミュレーション 1 の様子

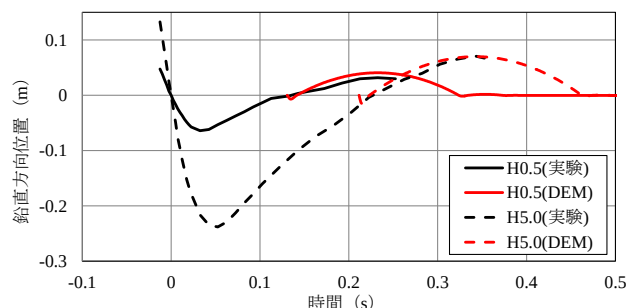


図-2 シミュレーション 1 と実験結果の比較

3. シミュレーション 2

ここでは、アスファルト舗装を DEM でモデル化し、これに落体モデルを斜入射する再現解析を行う。図-3 に 3m×3m、厚さ 1m のアスファルトモデルを示す。平均粒径 3cm、均等係数 1.2、バネ係数 1.0×10^7 N/m

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	放射高さ (m)	衝突前速度		衝突後速度		反発係数	入射角 (deg)
		鉛直 (m/s)	水平 (m/s)	鉛直 (m/s)	回転 (rad)		
H0.5	0.522	3.8	4.4	4.1	4.0	0.24	49
H5.0	5.05	10.4	4.8	3.5	3.7	0.12	24

キーワード 衝撃, 反発係数, 個別要素法

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12

東電設計株式会社 TEL 03-6372-5323

で互いの粒子の反発係数が 0.1 となるよう減衰係数を設定した。これらの値は法線方向と接線方向で同値とした。両者の半径の和の 1.5 倍（1 倍で粒子同士丁度接する範囲）の範囲の粒子については、引張力は 20,000N まで耐えてこれを超えると突然切断し、圧縮力には 600N に達すると頭打ちになる図-4 に示すようなバイリニアの構成関係を用いた。粒子間摩擦は 30° 、転がり摩擦は 0.1^1 とした。アスファルトモデルの側面には固定粒子を設置しこれより外側への動きを拘束した。手前と奥の固定境界面との摩擦角は 30° とした。これらのパラメータは、2 つの実験の反発係数を共通の解析パラメータで再現できるようにフィッティングした結果である。図-5 に鉛直方向位置の時系列について実験とシミュレーションの比較を 2 ケースそれぞれ示す。シミュレーションは、ケース H0.5 ではアスファルトへのめり込みが若干大きく、ケース H5.0 では逆に少し小さくなっている。跳ね上がり高さは両者ともに実験結果概ね再現できている。ケース H5.0 に対するシミュレーションの様子を図-6 に示す。

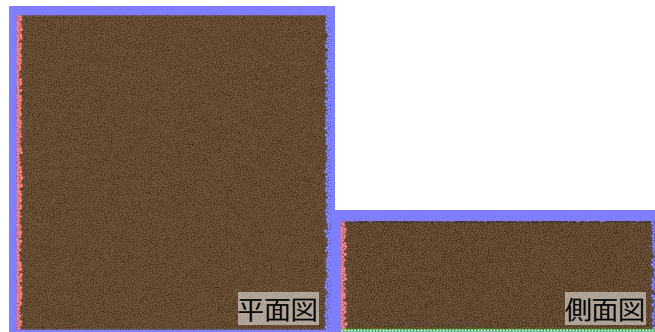


図-3 アスファルトモデル

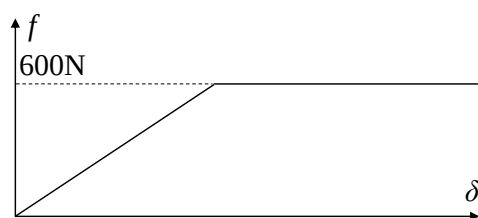


図-4 圧縮構成関係

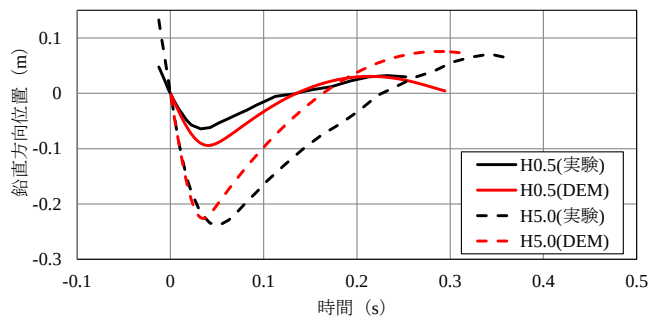


図-5 シミュレーション 2 と実験結果の比較

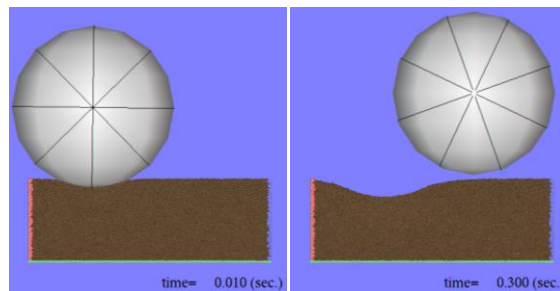


図-6 シミュレーション 2 の様子(ケース H5.0)

4. おわりに

本検討での再現解析結果を表-2 に示す。斜面や底面まで自由要素を用いてモデル化するシミュレーション 2 のような手法を実務で用いることは実際的でない。パラメトリックスタディを行って衝突前の初速 v と入射角 α と反発係数 e の関係を定め、この関係を斜面や底面を固定要素や境界でモデル化するシミュレーション 1 のような手法に用いる手順を考えている。そこでは、底面としてアスファルト以外の材料、例えばコンクリートや砂地盤に対する検討が必要である。さらに、モデルの信頼性を高めるため大比高の実験を実施する必要があると考えている。

謝辞 本研究を行うにあたり、土木研究所寒地土木研究所に多大なるご支援を戴いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献 1) 中瀬仁, 岩本 哲也, 曹国強, 田部井和人, 阪口秀, 松島亘志: 個別要素法簡易モデルによる地震起因性斜面崩落土の堆積範囲評価法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4(第 36 巻), I_694-I_703, 2017.

表-2 シミュレーション結果一覧

対象 実験ケース	シミュレーション 1			シミュレーション 2		
	衝突後速度		反発係数	衝突後速度		反発係数
	水平 (m/s)	回転 (rad)		水平 (m/s)	回転 (rad)	
H0.5	4.4	4.4	0.28	4.3	4.3	0.24
H5.0	4.8	4.8	0.12	4.5	4.6	0.12