

サイズの大きい落体の反発係数に関する検討

Study on coefficient of restitution of large falling stones

中瀬 仁*, 中釜 裕太**, 高橋 浩司***, 前田 健一****
Hitoshi Nakase, Yuta Nakagama, Koji Takahashi, Kenichi Maeda

*工博, 東電設計(株) (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12)

** 東電設計(株) (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12)

*** (株) 構研エンジニアリング (〒065-0018 北海道札幌市東区北18条 17-1-1)

**** 名古屋工業大学 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Key Words: Slope failure, Numerical Simulation

キーワード: 斜面崩壊, 数値シミュレーション

1. 序論

2011年東北地方太平洋沖地震以降設計を超えるリスクに備えることが求められている。このため、斜面では仮に崩壊した場合の崩壊土や崩壊岩塊の挙動解析が必要になる。数値解析手法のパラメータとしては反発係数が最も重要である。10cm程度以下のサイズの小さい試験体に対する反発係数については調査研究結果があるものの、直径1mを超える寸法の試験体に対するデータは少ない。本研究では、サイズの大きい落体に相当する試験体のコンクリート版、アスファルト版、表土に対する実験を行いその反発係数について分析し整理する。

2. 鉛直落下試験

本実験の概要図を図-1に示す。本実験は、所定の落下高さ(1m, 3m, 5m)から、質量の異なる鋼製重錘またはコンクリート球を鉛直自由落下させ、その挙動を高速度カメラ(400fps)で計測した。そして、計測で得られた画像

を解析し、落体に貼られたターゲットを追跡することで落体の変位、速度を算出した。落体の変位、速度を算出する際は、落体の地面衝突の衝撃による高速度カメラの揺れを補正する必要がある。そのため、落体の落下位置から十分離れた場所に不動点としてターゲットを設置し、補正を行った(図-2)。本実験では、特に質量の大きい重錘の場合、地盤に揺れが生じた。その様子を落体の落下位置から約2mの位置ターゲット(図-3)を用いて観測した。一例として図-4に地表面鉛直変位の時系列を示す。

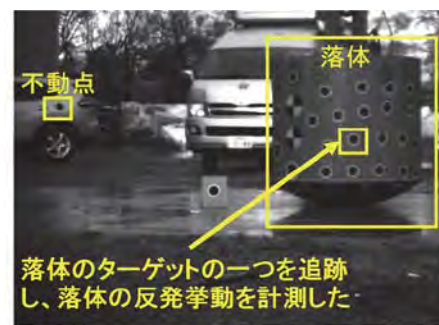


図-2 落体挙動の計測例



図-3 地表面の揺れの計測

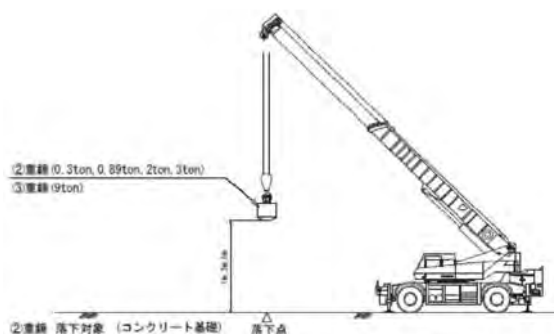


図-1 実験概要図

地表面は衝突直後 4mm 程度沈下した後再び浮上し、最終的に 1mm 沈下している。このことから、重錘の衝突により、地盤が弾塑性変形していることが分かる。

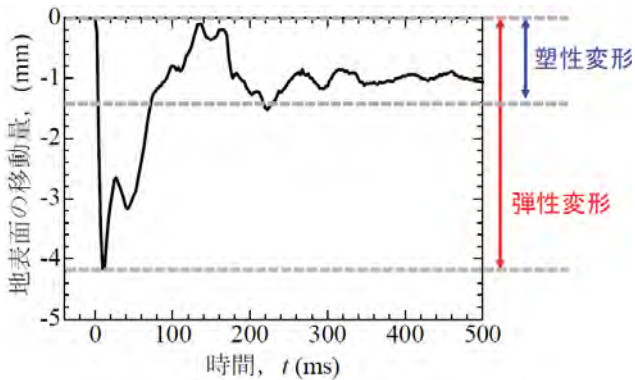


図-4 地表面の鉛直変位時系列

本研究では様々な質量 (0.11t (Φ0.4m相当)~9t (Φ2m)) の鋼製およびコンクリート製の重錘を用いてそれぞれ1回~3回実験を行った。一部を除き、重錘の底面形状は球面である。

図-5に反発係数~重錘質量~落下高さ関係を示す。図には一個落下対象がコンクリートのもの (1.6t-コンクリート) が混じっているが、残りはアスファルトに対する反発係数である。反発時に地表面よりも上に跳ね返っていないケースは0として示している。反発係数はいずれも0.140未満である。重錘質量が0.11t, 0.309tでは、落下高さが高くなるにつれて反発係数が小さくなる傾向が示された。1.0t以上の質量の重錘の反発係数は0であった。

図-6にコンクリートに対する反発係数~重錘質量~落下高さ関係を示す。3回実施したケースについては、中央値を採用している。落下高さと反発係数の関係に着目すると、同じ種類の重錘では落下高さが高くなるにつれて反発係数が小さくなる傾向にある。また、この傾向は重錘質量が小さいほど顕著に表れていることが分かる。重錘質量と反発係数の関係に着目すると、同じ落下高さでは重錘質量が大きくなるにつれて反発係数が小さくなる

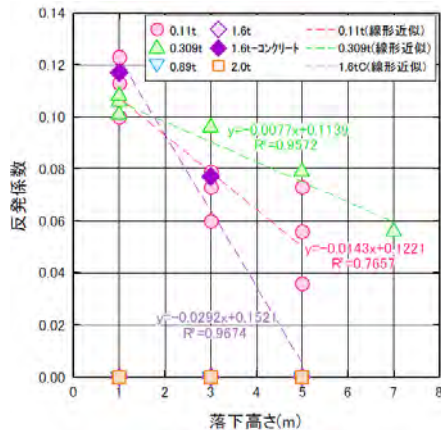


図-5 反発係数~重錘質量~落下高さ関係 (対アスファルト)

傾向にある。これらのことから、落体の運動量 (あるいは運動エネルギー) が大きくなるにつれて反発係数は小さくなる傾向にあることが分かった。

図-7は、表土に対する反発係数である。落下高さは1m, 重錘質量は2種類である。アスファルト、コンクリートに比べて反発係数は小さく0に近い (地表から離れない)と予想していたが、一定の反発係数を示すことが分かった。表土といえども、完全に塑性するだけではないことが分かった。しかしながらその値は小さく、重錘の質量にかかわらず0.1程度以下であった。

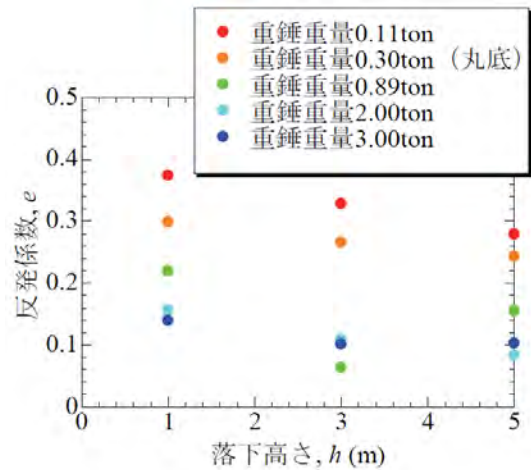


図-6 反発係数~重錘質量~落下高さ関係 (対コンクリート)

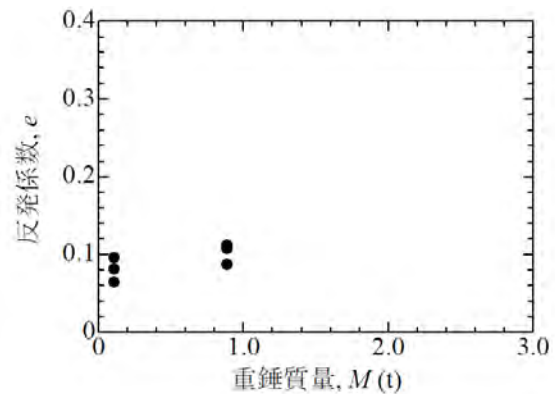


図-7 反発係数~重錘質量関係 (対表土)

3. 斜入射実験

表-1 に実験ケース一覧を示す。また、図-8にはコンクリート製の落体形状を示す。実験に用いた落体は、直径 2m の模擬球体であり、質量は 9.0 ton である。実験時の斜入射装置から放たれる高さ (放射高さ) は地表面からそれぞれ 0.5m および 5.0m である。図-9 に放射高さ 5.0m の斜入射実験装置を示す。

図-10に落体位置の時刻歴波形を示す。試験体がアスファルトに衝突した時刻を $t=0$ とする。鉛直成分が水平

成分に比べ著しく小さいので、鉛直成分には右軸のスケールを適用している。衝突以降、水平変位は増加勾配がおおむね一定であることが分かる。また、鉛直方向は H0.5, H5.0 でそれぞれ $t = 30\text{ms}$, $t = 50\text{ms}$ 程度で最大貫入を示し、 $t = 130\text{ms}$, $t = 220\text{ms}$ 程度で原地表面（変位ゼロ）から離脱していることが分かる。

表-2 に高速度カメラの計測結果を示す。最大入射速度と最大反射速度の速度比から求めた反発係数は H0.5, H5.0 でそれぞれ $e = 0.200, 0.167$ となった。一方、落下高さとの比の平方根から

0.12 となった。ただし、落体設置高さとの差求めた反発係数は H0.5, H5.0 でそれぞれ $e = 0.24$, による速度の鉛直成分の寄与は小さいのでこれを無視した。本実験の落体がもし鉛直落下した場合には反発係数はほぼ 0 であると想定されるが、斜入射した場合には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となった。見かけの反発係数が計測された要因と

表-1 実験ケース

実験ケース名	放射高さ (m)	落体設置高さ (m)	位置エネルギー (kJ)	架台角度 (°)
H0.5	0.522	1.740	15.66	5.4
H5.0	5.050	7.050	63.45	10.0

表-2 高速度カメラの計測結果

実験ケース名	最大入射速度と最大反射速度から求め			落下高さとの反発高さから求め		
	最大入射速度	最大反射速度	反発係数	落下高さ	反発高さ	反発係数
H0.5	441.5	88.3	0.200	0.522	0.032	0.24
H5.0	1090.9	181.8	0.167	5.050	0.071	0.12

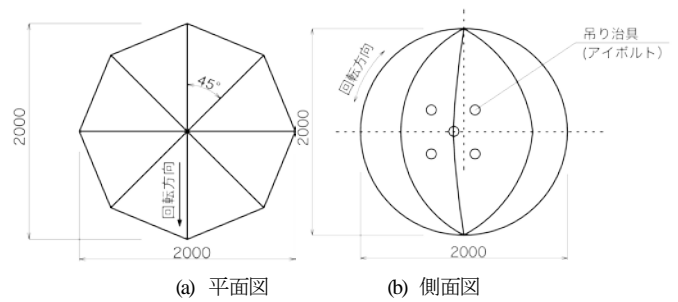


図-8 試験体形状

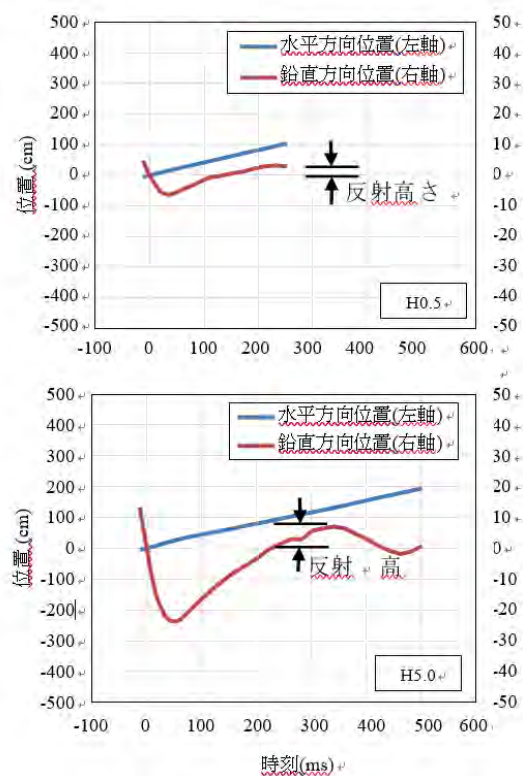


図-10 試験体位置の時系列

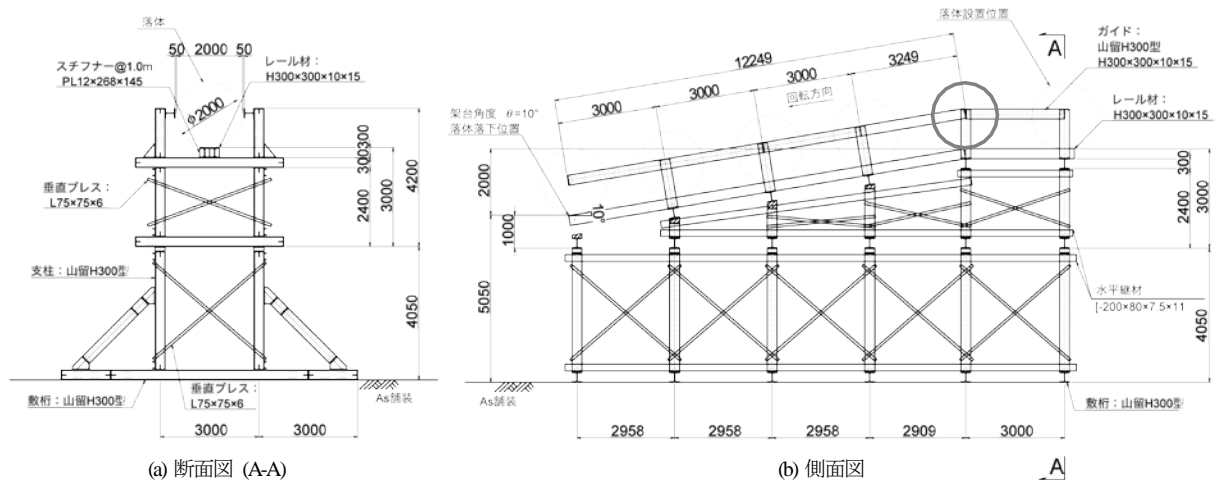


図-9 斜入射実験装置 (H5.0)

しては、衝突痕から離脱する際に落体自身の回転運動により駆け上がったことによるものと考えられる。

4. 斜入射実験に対する数値シミュレーション

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-11 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 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-12 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 0.11)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-13 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、両者ともに実験結果を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-14 に示す。

実務的には、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。

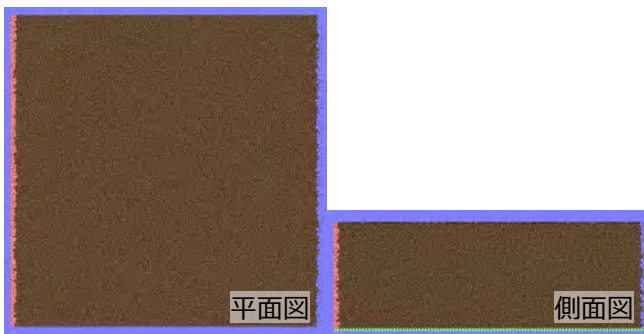


図-11 アスファルトモデル

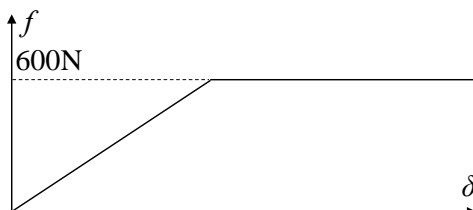


図-12 要素間のバネの圧縮方向の構成関係

5. 結論

鉛直落下の場合、アスファルト舗装面に質量の大きい試験体を衝突させると、反発速度は生じるものの地表面以上への反発高さは生じない程場合がある。地表面以上の反発高さが生じる場合には、落下高さおよび質量が大きいほど反発係数が小さくなる傾向にある。その相関係数は重錘質量 0.309t および

1.6t については $R^2=0.96$ 程度、0.11t については 0.7 程度と高い相関を示している。対象がコンクリートの場合でも、落下高さおよび質量が大きいほど反発係数が小さくなる傾向は変わらない。

斜入射すると、自分が作った陥没坑の斜面に沿って回転しながら駆け上がることで鉛直上方向の速度成分が発生する。

謝辞

本実験は北海道江別市にある国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所の角山実験場内にて行った。特に、今野久志氏には種々便宜を図って頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 表真也, 岡田慎哉, 日下部祐基: 落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 第 53 回北海道開発局技術研究発表会, 技 45, 2009.
- 2) Y. C. ファン (大橋義夫, 村上澄男, 神谷紀生共訳): 固体の力学/理論, 培風館, 19

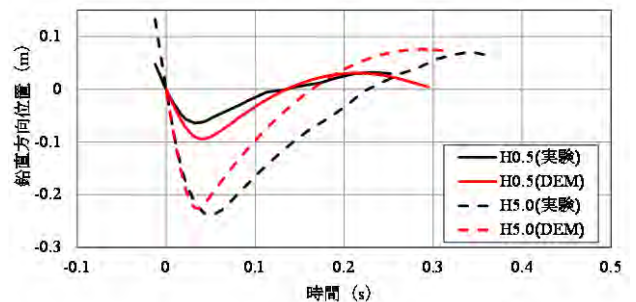


図-13 実験とシミュレーションの比較

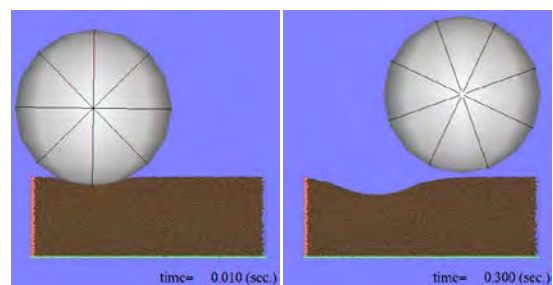


図-14 シミュレーションの様子