

岩塊群流動挙動の斜面法尻における速度減衰に及ぼす岩塊径の影響

Effect of rock mass diameter on velocity decay of rock masses flow behavior at the toe of slope

内藤直人*, 大村拓夢**, 山田泰弘**, 三浦均也***, 松田達也****

Naoto Naito, Takumu Ohmura, Yasuhiro Yamada, Kinya Miura, Tatsuya Matsuda

*博(工), 豊橋技術科学大学助教, 建築・都市システム学系(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

** 豊橋技術科学大学大学院, 建築・都市システム学専攻(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

***工博, 豊橋技術科学大学教授, 建築・都市システム学系(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

****博(工), 豊橋技術科学大学准教授, 建築・都市システム学系(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

キーワード: 岩盤斜面, 斜面崩壊, 岩塊群, 堆積距離, 粒状体流れ

Keywords: Rock slope, slope failure, rock masses, deposition distance, granular flow

1. はじめに

斜面对策工を戦略的に設計, 維持管理化するためには, 斜面崩壊時の崩壊土石の衝撃力・到達距離評価の合理化が必要不可欠である。たとえば, 斜面崩壊で生じる崩壊土石による衝撃力の評価式として国土交通省告示式第三百三十二号「移動の力」があるものの, その予測精度向上に向けてパラメータの設定法について現在も検討が進められている¹⁾。また, 当該評価式は飽和度の高い土砂流動実験²⁾を基に提案されたものであるため, 岩塊群のような比較的乾燥状態に近い粒状体流れへの適用性に関する検討が進められることが望ましい。過去の崩壊事例を基にした統計的なアプローチ³⁾もあるものの, 個別の斜面に対する高精度な到達距離評価をするものではない。

近年, 岩盤斜面崩壊時の岩塊群の堆積距離を予測する手法の一つとして個別要素法(DEM)⁴⁾を用いた数値解析の研究が進められている⁵⁾。DEM解析で設計的に安全側となる評価を行うためには, 岩塊群の斜面流動挙動を理解し, それを解析で再現可能なことを確認する必要がある。しかし, 既往の模型実験では, 岩塊サイズや斜面勾配などのパラメータは限定的な場合が多く, 例えば, 粒径が大きいほど堆積距離が大きくなる傾向が報告⁶⁾されているものの, 斜面勾配や流下高さが異なる条件でも同様の傾向が得られるか検討の余地がある。

そこで, 本研究では, 岩塊サイズ(3種類), 斜面勾配(3種類), 流下高さ(3種類)を網羅的に変化させた全27ケースの斜面流動実験を実施し, 特に岩塊径が堆積距離に及ぼす影響として, 岩塊群の最終堆積形状に加えて, PIV解析により岩塊群の斜面流動メカニズムについて考察した。

2. 実験概要

2.1 実験装置・材料・計測機器

実験は図-1に示す水平面長さ3m, 斜面長さ2mの傾斜角度が可変な斜面模型の上にスライド式の開放装置を幅0.4m, 高さ1.5mの土槽の中に設置した。岩塊は, 粒径4.75~9.50mm(小岩塊), 粒径9.50~19.0mm(中岩塊), 粒径19.0~37.5mm(大岩塊)を用いた。平均質量はそれぞれ0.36g, 4.03g, 19.85gである。

実験では, 斜面上に岩塊群40kgを堆積させ, 開放装置を上を引き上げることにより, 岩塊群を崩落させた。その際に高速度カメラを用いて500fpsで流下直交方向から斜面流動挙動を撮影した。また, 実験後は堆積距離と堆積形状の確認のために, 流下方向と土槽の上から写真を撮影した。

2.2 実験ケース

本実験では, 検討項目を岩塊サイズ, 斜面勾配 θ (30°, 45°, 60°), 流下高さ H (0mm, 400mm, 800mm)の3つとし, これらの検討項目を組み合わせることにより, 異なる斜面条件において岩塊サイズが流下挙動に及ぼす影

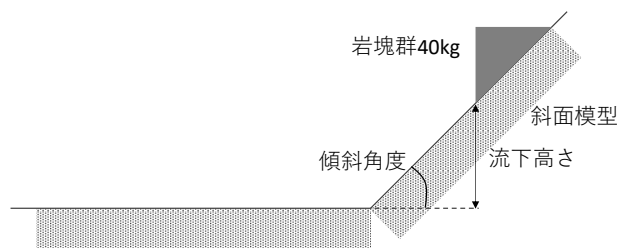


図-1 実験装置

表-1 実験ケース一覧

ケース名	斜面勾配(°)	流下高さ(mm)	岩塊径
30°_0mm_40kg_small	30	0	小岩塊
30°_0mm_40kg_medium			中岩塊
30°_0mm_40kg_large			大岩塊
30°_400mm_40kg_small		400	小岩塊
30°_400mm_40kg_medium			中岩塊
30°_400mm_40kg_large			大岩塊
30°_800mm_40kg_small		800	小岩塊
30°_800mm_40kg_medium			中岩塊
30°_800mm_40kg_large			大岩塊
45°_0mm_40kg_small	45	0	小岩塊
45°_0mm_40kg_medium			中岩塊
45°_0mm_40kg_large			大岩塊
45°_400mm_40kg_small		400	小岩塊
45°_400mm_40kg_medium			中岩塊
45°_400mm_40kg_large			大岩塊
45°_800mm_40kg_small		800	小岩塊
45°_800mm_40kg_medium			中岩塊
45°_800mm_40kg_large			大岩塊
60°_0mm_40kg_small	60	0	小岩塊
60°_0mm_40kg_medium			中岩塊
60°_0mm_40kg_large			大岩塊
60°_400mm_40kg_small		400	小岩塊
60°_400mm_40kg_medium			中岩塊
60°_400mm_40kg_large			大岩塊
60°_800mm_40kg_small		800	小岩塊
60°_800mm_40kg_medium			中岩塊
60°_800mm_40kg_large			大岩塊

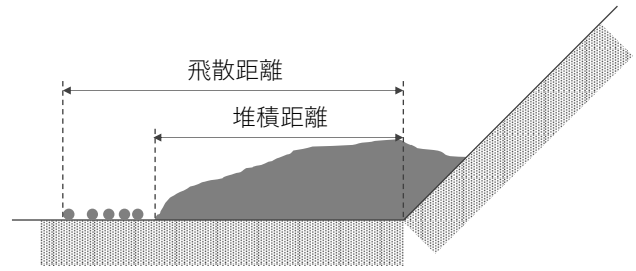


図-2 飛散距離と堆積距離のイメージ

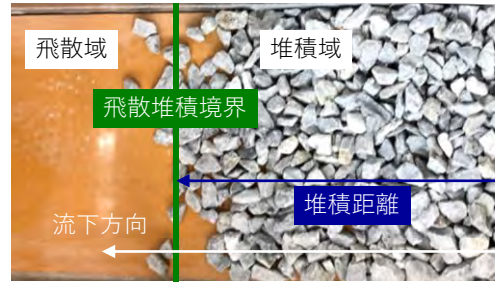
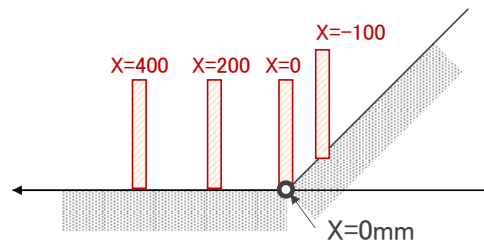
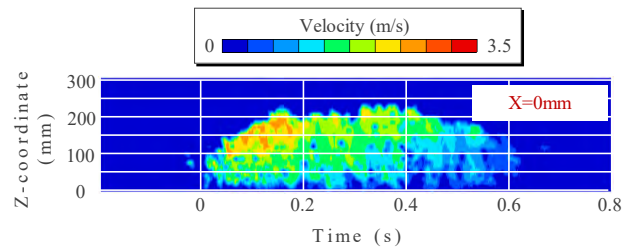


写真-1 飛散域と堆積域の境界



(a)速度測定領域



(b)速度の時刻歴コンタの例；縦軸：層厚，横軸：時間

図-3 速度計測

響を調べた。表-1 は実験のパラメータの組み合わせを示している。

2.3 データ整理方法

(1) 到達距離

本研究では、到達距離を図-2のように飛散距離と堆積距離に分けて定義した。写真-1のように岩塊が2段以上に重なっているところまでを堆積域とみなし、岩塊が飛散している範囲を飛散域とした。飛散域は単一岩塊の衝突問題と考えられるため、本研究では岩塊が群として大きな質量で衝突する領域の評価を目的に堆積距離の観点から実験結果を考察することとした。

参考のため、岩塊群の到達距離から流下方向の累積相対度数を算出した。飛散域については、岩塊個数とそれぞれの斜面法尻からの距離(x座標)を計測し、各岩塊の質量を2.1節に示す平均質量と仮定して、飛散域の岩塊質量 M_1 を算出した。堆積域については、画像から堆積形状を読み取り、岩塊群の総質量 $M_0=40\text{kg}$ から飛散域の質量 M_1 を除いた質量 M_2 (堆積域の質量)を堆積形状に応じて分配することで、岩塊群質量の累積相対度数を求めた。

(2) 流動速度

高速度カメラで撮影した画像からPIV解析により岩塊群の速度ベクトルを算出した。そのうえで、図-3(a)に示す測定領域の速度の時刻歴波形を出力し、図-3(b)に示

すような縦軸に層厚，横軸に時間をとった速度の時刻歴コンタを作成した。なお，時刻歴コンタでは，岩塊群の先端が水平面に衝突する瞬間を0sとしている。

3. 実験結果及び考察

3.1 結果一覧

図-4(a), (b), (c)はそれぞれ本実験で得られた全27ケースを岩塊サイズで分類した堆積形状，累積相対度数および岩塊サイズ毎に平均した累積相対度数を示している。これらの図から，岩塊サイズで比較した場合，ほとんど

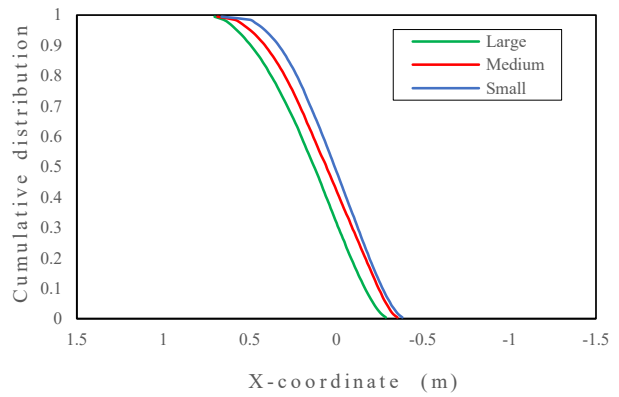
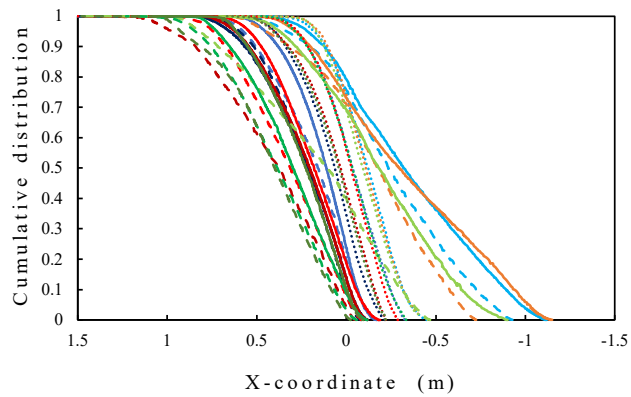
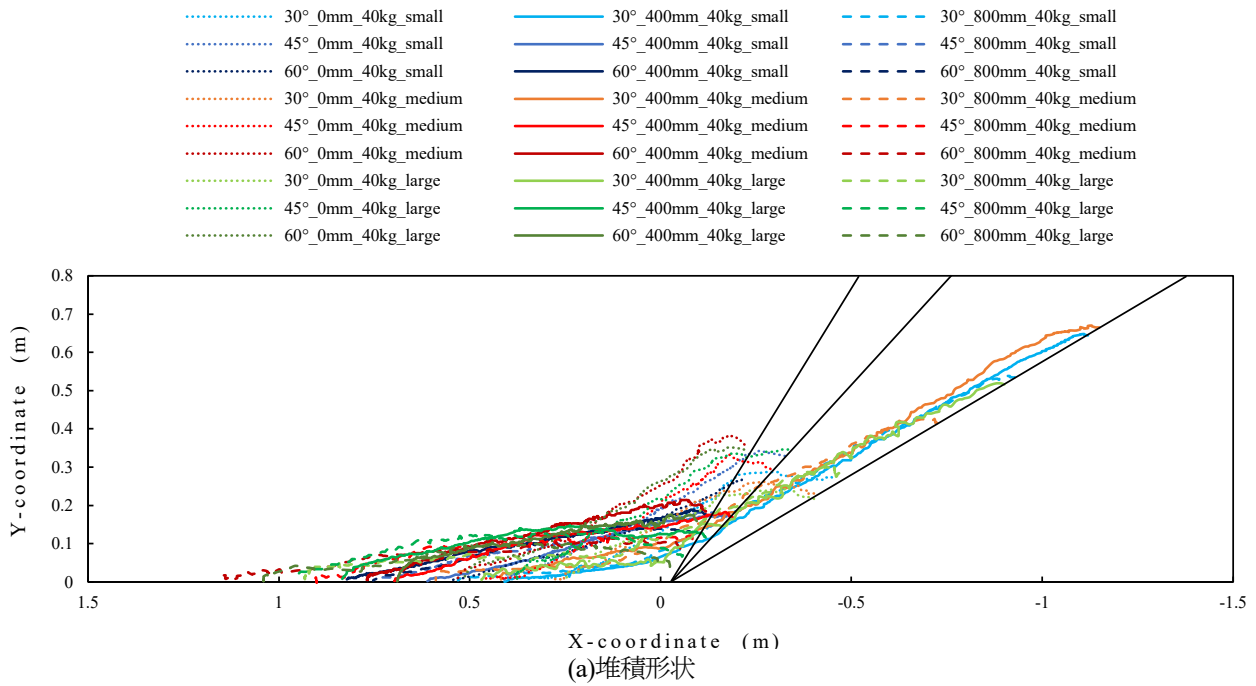


図-4 全ケースの到達距離

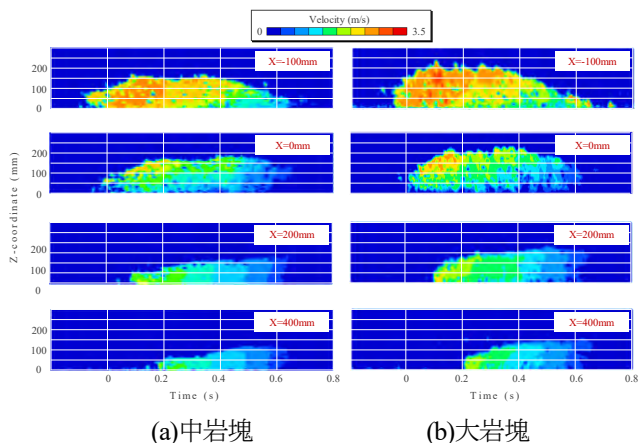


図-5 $H=400\text{mm}$, $\theta=45^\circ$ の速度の時刻歴コンタ

のケースでは岩塊サイズが大きいほど堆積距離は大きくなるという結果が得られた。

ここで、その一般的な流動挙動を代表ケース ($H=400\text{mm}$, $\theta=45^\circ$) で確認する。図-5 は中岩塊と大岩塊の

速度分布と時刻歴コンタを示している。これより、岩塊サイズが大きくなるほど流動層厚が厚くなる傾向があり、層厚が厚いほど速度が維持されやすい可能性が考えられる。ほとんどの斜面条件で岩塊サイズが大きいほど堆積距離が大きい理由として、粒子一個あたりの衝突回数が少ないという既往の研究の知見に加えて、層厚が厚いほど先端の岩塊群を後押しする運動量が大きく、速度が減少し難い可能性が考えられる。

3.2 特異ケースの岩塊群流動挙動

$H=400\text{mm}$, $\theta=60^\circ$ のケースは、岩塊サイズが大きいほど堆積距離が大きくなるという既往の知見とは異なる特異なケースである。図-6(a), (b)は堆積形状と累積相対度数を示している。この斜面条件では一般的な傾向とは異なり、岩塊サイズが小さいほど堆積距離が大きくなることわかる。また、図-7は $H=400\text{mm}$, $\theta=60^\circ$ における中岩塊と大岩塊の速度分布と時刻歴コンタを示してい

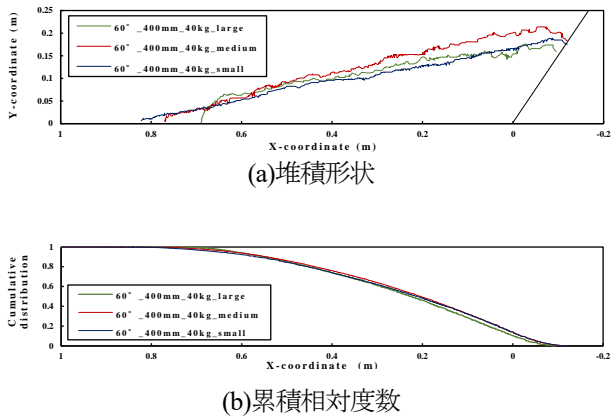


図6 $H=400\text{mm}$, $\theta=60^\circ$ の到達距離

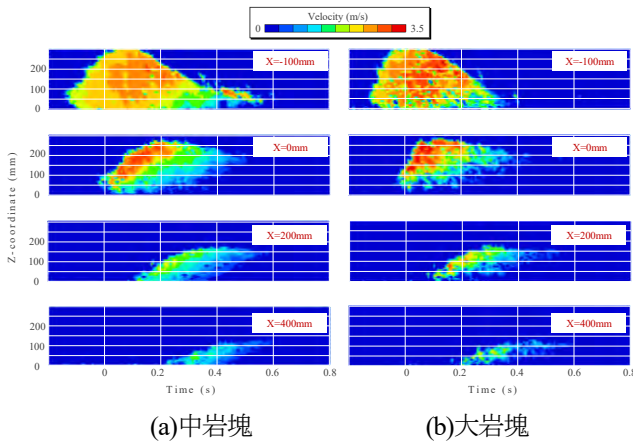


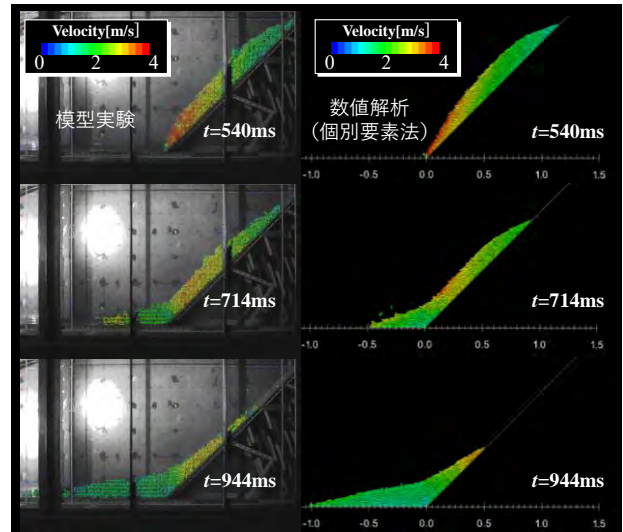
図-7 $H=400\text{mm}$, $\theta=60^\circ$ の速度の時刻歴コンタ

る。これより、岩塊群が水平面に衝突した後、斜面法尻付近の速度がゼロになる領域（以下、デッドゾーンと称す）が発生していることがわかる。特に大岩塊のデッドゾーンは中岩塊に比べて発生時刻が早く、その範囲が広いことが分かる。このデッドゾーンの発生条件が、岩塊サイズが大きいほど堆積距離が大きくなるという既往の知見と異なる結果となった原因になっている可能性もあり、今後詳細に検討を進めていく必要があると考える。

4. おわりに

本研究では、岩盤斜面崩壊を対象として、斜面勾配、流下高さ、岩塊径のパラメータの組み合わせが岩塊群の到達距離に及ぼす影響を調べた。その結果、斜面法尻における岩塊群の流動層厚は水平面上の速度減衰に寄与し、到達距離予測において重要なパラメータとなる可能性を示した。また、これまで岩塊径が大きいほど到達距離が大きくなるとされていたが、斜面法尻に速度がゼロの領域（デッドゾーン）が形成される崩落条件ではその限りではないことを明らかにした。

現在、三次元 DEM 解析による再現解析を済ませており（図-8）⁷⁾、今後は岩塊群内部の接触力分布や間隙比



の変化、より詳細な速度分布等の情報を基に、斜面法尻におけるデッドゾーンの発生条件について検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究に用いた装置の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 21K14239 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 長谷川陽一, 遊佐直樹, 金澤瑛, 瀧口茂隆, 中谷洋明: 小嶋孝徳待受式擁壁の設計に用いられる流体抵抗係数の設定に関する検討, 第56回地盤工学研究発表会, 13-10-4-08, 2021.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 神矢弘: 斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究, 京大防災研究年報, 第27号, B-2, pp.331-340, 1984.
- 3) 桑野健, 佐々木靖人, 脇坂安彦: 多変量解析による岩盤崩壊物質の到達範囲の検討, 応用地質, Vol.45, No.1, pp.31-41, 2004.
- 4) Cundall, P. A. and O. D. L. Stack.: A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 5) 中瀬仁, 曹国強, 田部井和人, 柘木均, 松島亘: 個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), vol.71, No.4, I_476-I_492, 2015.
- 6) 柘木均: 地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響, 電力中央研究所報告書, N09021, 2010.
- 7) 山田泰弘, 内藤直人, 大村拓夢, Arif Daniel Bin Azmi, 三浦均也, 松田達也: 岩塊群の堆積範囲評価に向けた斜面流動過程を再現可能な個別要素モデリング, 令和二年度土木学会中部支部研究発表会, III-17, 2021.