異なる斜面条件における岩塊群の堆積距離に及ぼす岩塊サイズの影響 (Effect of rock mass size on the depositional distance of rock masses under different slope conditions)

大村 拓夢¹,内藤 直人²,山田泰弘¹,Arif Daniel Bin Azmi¹,三浦 均也²,松田 達也²

1 豊橋技術科学大学大学院工学研究科・建築・都市システム学専攻

2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科・建築・都市システム学系

概 要

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)を用いた数値解析の研究が進め られている。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されているが、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は不明である。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、特に岩塊サイズが堆積距離に及ぼす影響 に焦点を当てて調べ、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。 キーワード:岩盤斜面、岩塊群、堆積距離、斜面流動、斜面崩壊

1. はじめに

これまで,斜面に対する安全性評価は斜面崩壊の安全 率算出に重点が置かれていた。しかし,原子力発電所等 の重要構造物の周辺環境についての安全性評価に関する 取り組みをはじめとして,近年,斜面崩壊時の到達距離 評価技術の研究が進められている。また,重要構造物だ けでなく道路や線路,人命や資産の保護につながる斜面 崩壊に関する対策工の設計,維持管理を合理化するため に,個別要素法¹⁾をはじめとする不連続体解析による到達 距離の予測精度の向上,実務設計レベルの到達距離予測 式の高度化が求められている。

これまで行われてきた斜面崩壊の実験では,斜面勾配 が一致の条件で岩塊サイズや崩落量を変える検討²⁾や岩塊 サイズが一定の条件で斜面勾配を変える検討³⁾などが行わ れているものの,各種条件の組み合わせによる影響につ いて述べられた研究はあまりない。また,既往の研究で は最終堆積形状のみに着目した検討⁴⁾が多く,岩塊群の流 動過程の検討は進んでいない。

そこで、本研究では、斜面の傾斜角度や流下高さ、岩 塊サイズの各種パラメータを網羅的に変化させ、それら が最終堆積形状や斜面流動挙動に与える影響について検 討することとした。

2. 実験概要

各種パラメータの影響を調べるために用いた装置,実 験の条件,実験方法,データの整理方法を以下に示す。

2.1 実験装置及び計測機器

実験は図-1 に示す水平面高さ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,斜面模型に岩塊群 を溜めて崩落させた。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。また,流下挙動を確認するために,高速 度カメラで撮影を行い,PIV 解析により岩塊群の流動速 度を計測した。



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 に分け、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。

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

表_1	宝驗条件
1X-1	大欧木口

2.3 実験方法

土槽の中に斜面模型と開放装置を設置し,斜面上に岩 塊 40kg を溜め,開放装置を上に引き上げることにより, 岩塊群を崩落させた。その際に土槽の流下直行方向に高 速度カメラを設置し,500fps で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。

2.4 データ整理方法

2.4.1 堆積形状

2.3 節で撮影した流下終了後の写真を用いて, 堆積形状 を 2 次元座標に起こす。その際, 図-2 のように飛散距離 と堆積距離に分ける。この境界の判断は写真-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距離と する。斜面からこの境界までの範囲を堆積形状とした。







写真-1 堆積域と飛散域の境界

2.4.2 到達距離の累積相対度数

まず,飛散域の x 座標と個数 N を計測し,式(1)から 飛散域の質量 M_1 を求め,式(2)から堆積域の質量 M_2 を 求める。ここで \overline{M} は岩塊の平均質量である。

$$M_1 = T \times \overline{M} \tag{1}$$

$$M_2 = M - M_1 \tag{2}$$

2.4.1 項で得た堆積形状の座標値を用いて微小の x 座標間 の面積 dA を求め (式 (3)), それを合計することで面積 A を求める (式 (4))。

$$dA = (y_1 + y_2) \times dx \tag{3}$$

$$A = \sum dA \tag{4}$$

微小面積 dA を堆積域の面積 A で除して堆積域の質量 M₂ を乗じることで微小 x 座標間の質量 dM を求める(式 (5))

$$dM = \frac{dA}{A} \times M_2 \tag{5}$$

dM と飛散粒子一つあたりの質量M₃を全体質量で除す。 それらを順に足し合わせることで累積相対度数を作成した。

2.4.3 流動速度

高速度カメラで撮影した動画を用いて,流動している 岩塊群の速度分布を PIV 解析によりベクトルで表示し, 画像として出力した。次に,図-3のように4つの線分を 通過する岩塊群の速度を出力して,時刻歴コンタを作成 した。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 として横軸を時間,縦軸を斜面模型の板か らの高さとした。



図-3 速度測定地点の概略図

3. 実験結果及び考察

本章では,既往の研究の知見や本実験で得られた一般 的な結果と異なる傾向が表れたケースについて考察を行 った。

3.1 岩塊サイズが堆積距離に及ぼす影響

ここでは、岩塊サイズの影響について考察する。図-4、 図-5、図-6 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=400mm、 θ=45°)で確認する。図-7、図 -8 はそれぞれ代表ケースの PIV による速度分布と時刻歴 コンタを示している。これらから、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、速度が減少しづらい可 能性が考えられる。

次に, 上記のような一般的な傾向である, 岩塊サイズ が大きいほど堆積距離が大きくなるという傾向が現れな かった H=400m, θ=60°のケースを確認してみた。図-9, 図-10 はそれぞれ H=400mm, θ=60°の堆積形状と累積相対 度数を示している。これらの図より、このケースでは一 般的な傾向とは異なり、岩塊サイズが小さいほど堆積距 離が大きくなるという結果が得られた。このケースの PIVによる流動挙動を確認してみる。図-11,図-12はそれ ぞれ H=400m, θ=60°のケースの速度分布と時刻歴コンタ を示している。これらの図から、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小岩塊や中岩塊に比べて発生 時刻が早く、その範囲も大きいことが分かる。このデッ ドゾーンが大きく影響したことにより他の一般的なケー スとは異なる結果が表れたと考えられる。さらに、この 特異なケースは一般的なケースで見られたような流動層 厚の差があまり見られなかった。そのため、流動層厚に よる速度の変化は見られず、デッドゾーンによる影響が 大きく表れたと考えられる。これらのことから、流動層 厚も堆積距離を考えるうえで重要なパラメータとなる可 能性がある。









図-6 岩塊サイズ毎の平均累積相対度数



図-7 斜面条件 H=800mm, θ=45°の速度分布



図-8 斜面条件 H=800mm, θ=45°の速度の時刻歴コンタ



図-9 斜面条件 H=400mm, θ=60°の堆積形状



図-10 斜面条件 *H*=400mm, *θ*=60°の累積相対度数



図-11 斜面条件 H=400mm, θ=60°の速度分布



図-12 斜面条件 H=400mm, θ=60°の速度の時刻歴コンタ



図-13 斜面勾配が堆積形状に及ぼす影響



図-14 斜面勾配が累積相対度数に及ぼす影響

3.2 斜面勾配が堆積距離に及ぼす影響

ここでは、斜面勾配の変化による影響について考察する。図-13、図-14、図-15 はそれぞれ本実験で得られた全 27 ケースを斜面勾配で分類した堆積形状、累積相対度数 および斜面勾配毎に平均した累積相対度数を示している。 これらから、多くのケースでは斜面勾配が大きくなるほ ど堆積距離が大きくなるという傾向が得られたが、一部 のケースでは異なる結果が得られた。

図-16,図-17 はそれぞれ H=400mm,大岩塊のケースの 堆積形状,累積相対度数を示している。H=400mm,大 岩塊,のケースにおいて,斜面勾配 45°の堆積距離が最も



図-15 斜面勾配毎の平均累積相対度数

大きくなるという特異な結果が得られた。この理由を調 べるために流動挙動を確認した。図-18,図-19 はそれぞ れ H=400mm,大岩塊,のケースの速度分布と時刻歴コ ンタを示している。これらの図から θ =30°,45°ではデッ ドゾーン発生していないのに対して, θ =60°のケースのみ デッドゾーンが発生していることがわかる。

また,図-18から θ=45°のケースと θ=60°のケースでは 速度分布にかなり差があるのに対して,このような特異 な結果が得られた理由として 3.1節と同じようにデッドゾ ーンが速度の減衰にかなり寄与している可能性が考えら れる。











図-18 H=400mm, 大岩塊の実験条件の速度分布



4. 結論

本研究では、斜面勾配、流下高さ、岩塊サイズのパラ メータの組み合わせが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 上の速度減衰に大きく寄与し、到達距離予測において重 要なパラメータである可能性がわかった。また、これま で斜面勾配が大きいほど、斜面勾配が大きいほど、岩塊 サイズ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。

今後は、本実験で用いたパラメータに追加して、岩塊 形状や斜面粗度の影響、二次崩壊を想定した先着堆積物 の影響について比較検討を進める予定である。また、数 値解析も併用して規模の大きな条件での岩塊群の流動・ 堆積機構を検討することで到達距離評価手法の高度化を 目指す。

参考文献

- Cundall, P. A. and O. D. L. Stack.: A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 2) 土田章仁,下條洋介,西村強,河野勝宣:斜面を流下する土砂の到達域に関する室内模型実験と質点モデルによる表現,地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.1, pp.159-169, 2020.
- 栃木均: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, N096021,2010.
- 内藤直人,前田健一,田中敬大,牛渡裕二,鈴木健 太郎,川瀬良司:個別要素法を用いた岩塊及び岩塊 群の到達距離に関する数値解析的検討,構造工学論 文集,,Vol.63A, pp.1107-1120, 2017.