

斜面崩壊土砂の壁面衝撃圧力に関する実規模土砂流下実験と DEM 解析

豊橋技術科学大学 学 〇高坂晏志 正 内藤直人 正 松田達也
名古屋工業大学 正 前田健一 学 木村綱
株式会社ライテック 正 難波正和

1. 研究背景と目的

降雨等により斜面表層土が飽和状態に至る前の不飽和状態で小規模な崩壊が発生することがあり、斜面法尻に待受け対策工が設置される場合がある。対策工を経済的に設計、維持管理するために土砂の流下挙動や衝撃力の発生メカニズムを解明することが求められている。現象の解明には実規模実験が有効な手段として挙げられるがコストが高く、多数の実験ケースを実施することは困難であるため、数値解析により実験の事前検討や補完的な検討を実施することが望ましい。

そこで、本研究では、不飽和土の粘着力を考慮した崩土の斜面流下挙動を数値解析で再現することを目的に、粒子間の付着・再付着が可能な簡易付着モデル¹⁾を導入した個別要素法²⁾ (Discrete Element Method, 以下 DEM と称す) を用いて、斜面法尻にコンクリートブロックを設置した実規模土砂流下実験の再現解析を実施した。本稿では、崩壊土砂の最終堆積形状とコンクリートブロックに作用する壁面衝撃圧力に対する解析モデルの適用性を調べた。

2. 実規模土砂流下実験概要

図-1 に示すように土砂 50 m³ を流下高さ約 29 m、勾配 50° の斜面から流下させる実験を実施した。流下させる土砂は「細粒分まじり砂質礫」で、平均粒径 3.2 mm、均等係数 352 であり、流動性を高めるため実験直前に加水し、単位体積質量が約 1600 kg/m³ の初期条件で崩壊装置に堆積させた。また、図-1 中に実験斜面の寸法を示している。

また、コンクリートブロックの中央付近に LW, LLW, LLLW の 3 種類の感圧シート³⁾ を設置し、コンクリートブロックに作用する最大圧力の鉛直方向分布⁴⁾ を計測した。感圧シートは作用した応力に応じて明度が変わるもので、測定容量はそれぞれ、2.5-10 MPa (LW)、0.5-2.5 MPa (LLW)、0.2-0.6 MPa (LLLW) であり、明度

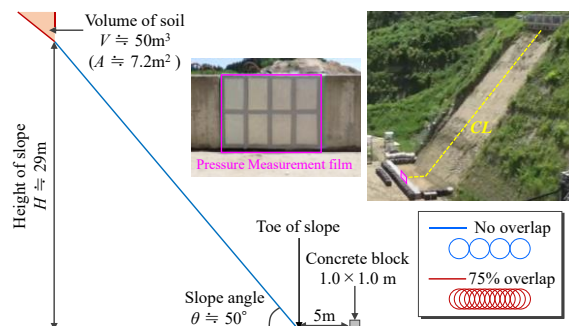


図-1 実験斜面の概要

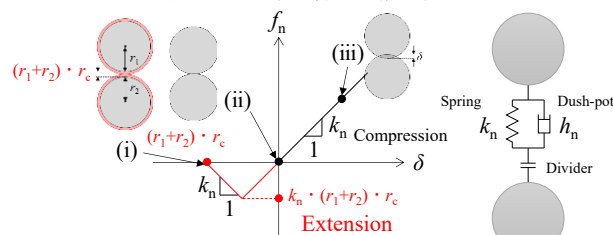


図-2 粒子間の付着・再付着が可能な接触モデル

表-1 解析パラメータ

パラメータ	設定値
最大粒子直径	0.02 m
最小粒子直径	0.01 m
法線方向ばね定数	2×10^7 N/m
接線方向ばね定数	5×10^6 N/m
単位体積質量	1600 kg/m ³ (間隙比 $e=0.52$)
減衰定数	1.0
摩擦係数	0.466 (=tan25°)
付着影響半径係数	0.001

と衝撃応力の関係は別途実施した校正試験³⁾から応力を算出している。

3. DEM 解析概要

3.1 粒子間付着モデル

本研究では、模型実験や実物大スケールのマクロな付着挙動を解析することを目的としているため、実物スケールの 2 つの砂粒子の間に存在するメニスカス水による粒子間距離と引張力の関係を厳密にモデル化するのではなく、ある程度の塊となった砂粒子群と別の

キーワード 崩壊土砂 衝撃力 個別要素法

連絡先 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 D 棟 D-803

豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 内藤 直人 TEL 0532-44-1301

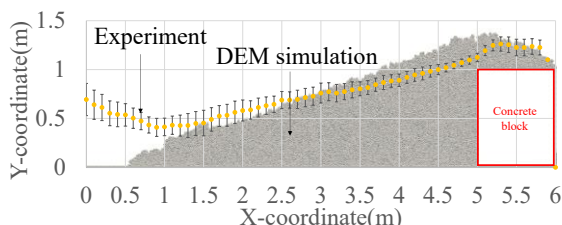


図-3 待受け対策工ありの条件の実験と解析の最終堆積形状

砂粒子群が接触した際に生じるマクロな引張力を付着現象としてモデル化することとした。図-2 に示すように粒子半径に対応した微小範囲（付着影響半径 r_c ）に引張ばねを導入した DEM を用いた。

3. 2 解析条件

境界粒子の配置条件は図-1 に示すとおりである。斜面粗度を再現するために境界粒子をオーバーラップさせることで境界粒子の表面形状を変化させている。斜面の粒子間ラップ率は 0%，水平面と崩壊装置はラップ率 75% で直線に粒子を配置した。斜面には数十 mm 程度の起伏がある一方で水平面は目立った起伏がなかったため、斜面より水平面の粗度を滑らかな条件とすることとした。

解析に用いた粒子パラメータは既往研究¹⁾を参考に表-1 のように決定した。実験に用いた土砂は 20 mm を超える粗礫が質量の 3 割程度を占めるが、解析では暫定的に最大粒径 20 mm として計算することとした。また、付着力を表現する付着影響半径 r_c は、土砂流下実験直前に実施したスランプ試験による土砂変形条件を再現するパラメータを用いた。

4. DEM 解析結果

4. 1 最終堆積形状と土砂表面流速

図-3 は土砂流下後の最終堆積形状を示している。土砂が集合体として連続して堆積した長さは、実験が 14-15 m 程度、解析結果では 14.5 m となり、堆積形状も概ね一致していることがわかった。解析結果の方が法尻付近の堆積層厚が薄くなる結果となっており、土砂や斜面のモデル化に検討の余地が残されている。

また、法尻に土砂先端が到達した時刻の最大流速は 16-18 m/s であり、解析結果は実験結果を概ね再現できていることを確認している。

4. 2 壁面衝撃圧力

図-5 はコンクリートブロックに作用する最大圧力の鉛直分布を示している。上部に比べ下部での圧力が大

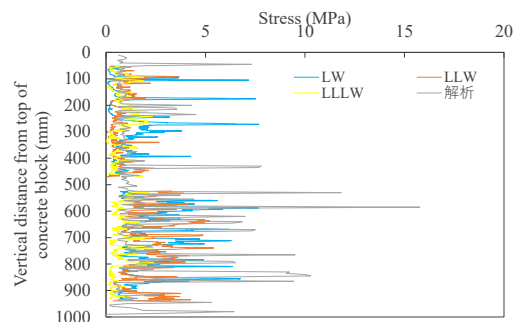


図-5 コンクリートブロックに作用する最大圧力の鉛直分布

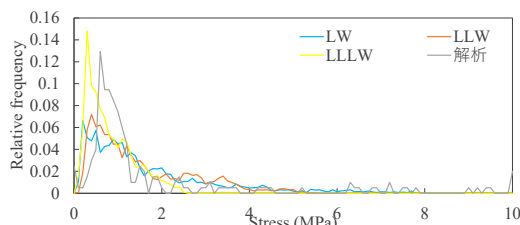


図-6 最大圧力の相対度数

きい等、実験の圧力を概ね再現できている。ただし、コンクリートブロック上端から 600 mm 付近で実験と比べて大きな圧力を示しており、解析モデルの改善の余地がある。図-6 は最大圧力の相対度数を示しており、相対度数の形状についても、解析結果は実験結果を概ね再現できていることがわかった。

5. 結論

本研究では、不飽和土の斜面流下挙動に対する粒子間の付着・再付着が可能な接触モデルを導入した DEM の適用性を検討するため、実規模スケールの土砂流下実験の再現解析を実施した。

その結果、土砂流下前のスランプ試験における土砂の変形状況を基にキャリブレーションした付着力を付与することで、DEM 解析は実験の最終堆積形状、土砂表面流速、壁面衝撃圧力を概ね再現できることを明らかとした。

解析で 20mm 以上の礫の粒径を考慮した場合には壁面衝撃応力が実験よりも大きくなる可能性も考えられるため、今後は粗礫のモデル化について引き続き検討を進める予定である。

参考文献 1) 内藤ら, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.75, No.2, I_433-I_444, 2019. 2) Cundall et. al., Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979. 3) 奥村ら, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.72, A-12, 2015. 4) 木村ら, 令和 3 年度土木学会中部支部研究発表会, III-26, 2022.