

崩壊土砂の衝撃力評価に向けた DEM 解析の適用に関する基礎的研究

A fundamental study on the application of DEM analysis for evaluation of impact force of collapsed soil

玉井宏樹*, 路馳**, 園田佳巨***, 別府万寿博****
Hiroki Tamai, Lu Chi, Yoshimi Sonoda, Masuhiro Beppu

* 博 (工), 九州大学大学院助教, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

** 九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

*** 工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

**** 博 (工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: collapsed soil, evaluation of impact force, water-retaining condition, DEM

キーワード: 崩壊土砂, 衝撃力評価, 含水状態, 個別要素法

1. 緒言

土砂災害は毎年のように全国各地で発生しており、我々の生活に大きな影響を与えている。また宅地開発により生活環境の広大化が進んだことで、土砂災害が発生し被害が予想される箇所が増えてきた。そのため、土砂災害から人命や財産を守ることを目的として、土砂災害防止工事などのハード対策と併せて、危険性のある区域を明らかにし、その中で警戒避難体制の整備や危険箇所への新規住宅等の立地抑制等のソフト対策を充実させて行くために、2001年に新たに「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」、通称「土砂災害防止法」¹⁾が制定された。国土交通省はその一部で、土砂災害の被害を受ける構造物の設計について新たに崩壊土砂の移動の力(以降、衝撃力と称す)と堆積した場合の力を考慮するための設計式(国土交通省告示第三百三十二号²⁾、以後「告示式」と呼ぶ)を定めているが、告示式で表わされている衝撃力は、崩壊土砂が形状を維持し質点として移動することを想定し、運動方程式を解くことにより算定されたものである。しかし、実際の斜面崩壊現象は、流下過程において流動的で複雑な運動をするため、形状を固定させた考えでは衝撃力を厳密に評価できているとは言い難く、実現象で発生しうる衝撃力を適切に評価可能か考察の余地があると言える。

一方、崩壊土砂による荷重評価やその推定方法に関する既往の研究を概観してみると、模型実験^{3) 4)}の他に数値解析を利用した検討がみられる。数値解析による検討では、土塊全体を質点として捉えた質点モデル、土砂を流体のような連続体として捉えた連続体モデル、土砂を離散化した粒子の集合体として捉えた離散体モデルに

大別できる。崩壊土砂は見かけ上、流体的な運動を伴うが、ミクロな視点からみると様々な材質、形状、大きさを伴った不連続な粒子の集合であり、それら要素ごとの特性を平均化し、連続体として考えると様々な不確定要素が浮き彫りになるため、土砂の動的挙動を解析するには不連続体の解析に適した離散化モデルを用いるのが一般的であり、現在までに様々な研究がなされている。中でも、特に個別要素法(以後、DEMと称す)の適用⁵⁾が多いが、解析におけるパラメータの設定が不明確であることや含水状態の適切なモデル化については残されている課題は多いと言える。

以上のような背景を踏まえて、本研究では、防護構造物への土砂の荷重特性を評価するために、まず、模型実験により斜面勾配、含水状態が土砂の流動特性ならびに衝撃荷重へ及ぼす影響を把握した。さらに、土砂の流動・衝突解析への拡張個別要素法(以後、EDEMと称す)の適用について基礎的検討を行った。

2. 土砂の流動・衝突現象把握のための模型実験

2.1 実験概要

斜面角度と含水状態による土砂の流動および衝撃荷重特性を把握するとともに、EDEM解析の適用性検証の比較用データを得るために、図-1のようなアクリル製模型斜面を用いた実験を実施した。本実験は、主に国総研の斜面崩壊実験³⁾の手法や装置を参考にした。なお、本実験は実際の斜面崩壊の現象を解くのではなく、あくまでも斜面角度と含水状態の違いによる土砂の挙動を調べることを目的としているため、比較的小さいスケールの模型を利用することとした。模型の材質は厚さ

15mm のアクリル板を使用し、開閉扉を開き、試料を土砂充填部より受架台まで 1000mm の斜面上を流下させ、受架台裏面に設置した3つのロードセルにより荷重を測定し、その合力を測定値として採用した。なお、高速カメラとビデオカメラを利用し、流下前の初期形状、流下後の堆積形状、水路上の土砂の残留状態、衝突時の形状変化、実験の全体像についても撮影することとした。試料はケイ砂 0.01 m³ を用い、実験ケースは斜面角度 2 ケース (45°と 60°)、含水状態 2 ケース (乾燥と含水比 10%) の計 4 ケースである。試料として用いたケイ砂の粒度分布を図 - 2 に示す。

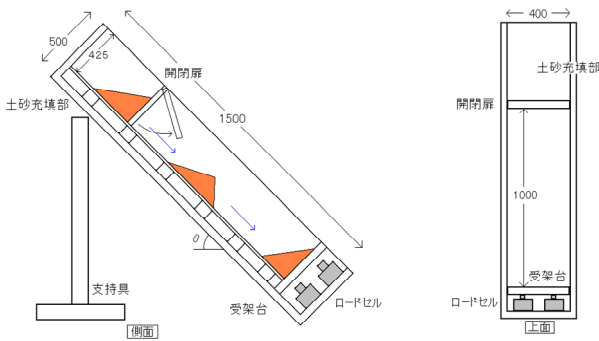


図 - 1 模型水路のイメージ図 (単位:mm)

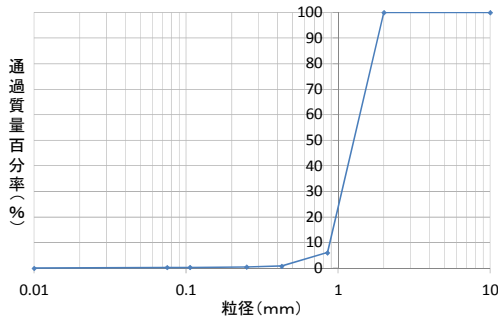


図 - 2 試料として用いたケイ砂の粒度分布

2.2 実験結果および考察

(1) 斜面角度の違いによる影響

図 - 3 に土砂の荷重-時間関係を示す。まず、斜面角度の違いによる影響に関して、この図より、乾燥砂と湿潤砂の両ケースに対して見られる同様の傾向として、斜面角度 45°では荷重変化はなだらかであるが、斜面角度 60°の場合は急激な荷重の立ち上がりが明らかとなった。つまり、45°の場合と比較して 60°の場合ではより衝撃的な荷重が励起される傾向にあるといえる。これは斜面角度が小さい場合では、土砂と斜面との摩擦から流動長が引き延ばされ、比較的長期の衝突運動を行うのに対して、角度が大きい場合では斜面との摩擦が小さくなることで重力が支配的要因となり、衝突速度が大きくなるとともに土砂が集中して受荷台に衝突するためだと推察される。また、堆積荷重の違いは、角度の違いにより斜面方向の荷重分担が変化するためであり、計測方法に起因して生じたものである。

(2) 含水状態の違いによる影響

次に、含水状態の違いによる影響については、斜面角度によらず両ケースに対して見られる同様の傾向として、乾燥状態の土砂では、なだらかに荷重が増加するのに対し、含水比 10%の土砂では、急激に荷重が立ち上がる傾向がみられた。これは、乾燥状態の土砂では砂粒子が離散しながら流動し、壁面に衝突するのに対し、含水した土砂では水分による付着力の効果である塊として流動・衝突したことによるものと推察される。また、斜面角度 60°の場合では、含水比 10%の土砂の場合で、乾燥砂の場合と比較して最大荷重で約 1.5 倍に上昇することが確認され、含水によって、土砂はより衝撃的な荷重を生じさせることが確認できた。

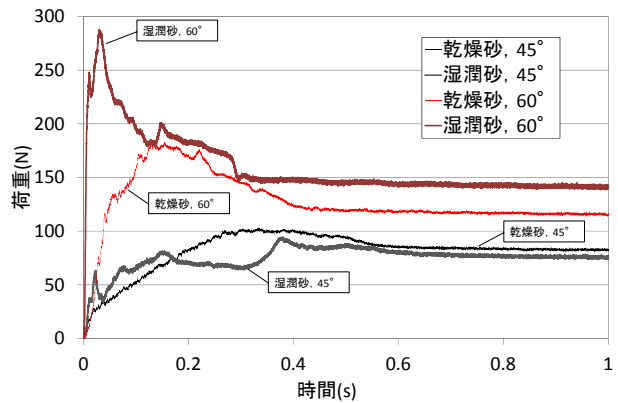


図 - 3 実験により得られた荷重 - 時間関係

3. 拡張個別要素法 (EDEM) による解析検討

3.1 拡張個別要素法 (EDEM) の概要

離散する要素集合の解析に適した手法に DEM がある。DEM では要素ごとの接触時の仮想的な変位と、図 - 4 のようなばねとダッシュポットの働きから動的な運動方程式を解くが、要素間に働く力は反発力のみに限られる。本研究では、土砂の含水による付着力を再現するために、伯野ら⁹⁾により提案された EDEM を用い、その間隙ばねに含水による付着効果を新たに導入することとした。EDEM の概念図を図 - 5 に示す。本研究では、間隙ばねの含水による付着効果として、要素中心間の距離 L_{ij} が式(1)を満たすときに要素同士の付着力 (引張力、せん断力のみ) が作用する条件を付与した。図 - 6 は影響範囲および接触モデルの概略図である。

$$r_i + r_j \leq L_{ij} < \alpha(r_i + r_j) \quad (1)$$

ここで、 r_i, r_j は要素半径、 α は水膜による影響範囲を現す定数である。

3.2 解析パラメータの決定

本解析は二次元解析であり、土砂の要素形状は半径 1mm の円形要素とし、要素数及び要素質量は解析対象の模型実験に準じて、それぞれ 7051 要素、2.028g (乾燥状

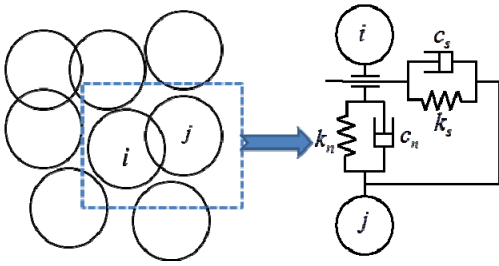


図 - 4 本研究で用いた接点のモデル化 (Voigt モデル)

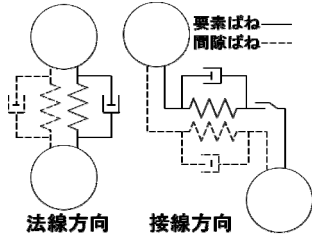


図 - 5 EDEM の概念図

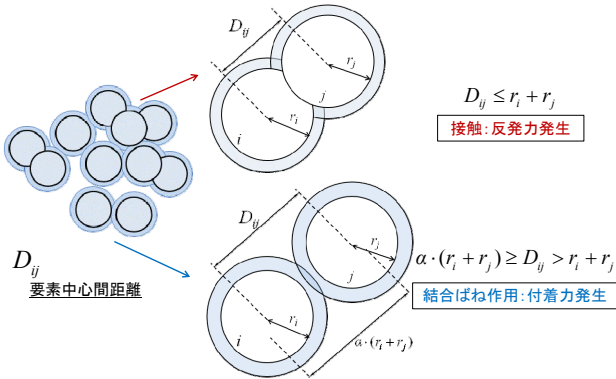


図 - 6 仮想水膜による含水状態の表現

態), 2.231g (含水比 10%) とした。DEM や EDEM を用いた解析の場合, ばね定数の決定法が問題となる場合が多いが, 本研究では, 要素ばねの定数は, 1 次元振動モデルを仮定したときの波動方程式と振動方程式の関係と, 一般に用いられるヤング率とポアソン比から求められる物質の波動の伝搬速度の関係から求めた。摩擦係数 μ については写真 - 1 および図 - 7 に示すような土砂の落下実験により落下後の土砂の安息角を測定し, その値 0.58 を採用した。さらに, 減衰定数, 間隙ばねの定数についてはパラメトリックスタディにより土砂流下実験の流動状態を再現できるよう調整し, 決定した。時間積分法は中央差分法として, 時間刻みを 1×10^{-5} 秒とした。主な解析パラメータを表 - 1 に記す。



写真 - 1 土砂の垂直落下による安息角確認試験

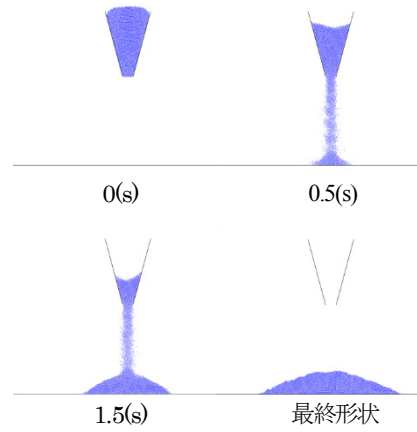


図 - 7 材料定数同定のための垂直落下試験のシミュレーションの一例

表 - 1 主な解析パラメータ

接点ばね定数 (法線)	k_n (N/mm)	263
接点ばね定数 (接線)	k_s (N/mm)	52
間隙ばね定数 (法線)	k_n' (N/mm)	10
間隙ばね定数 (接線)	k_s' (N/mm)	40
減衰定数	h	1.0×10^{-2}

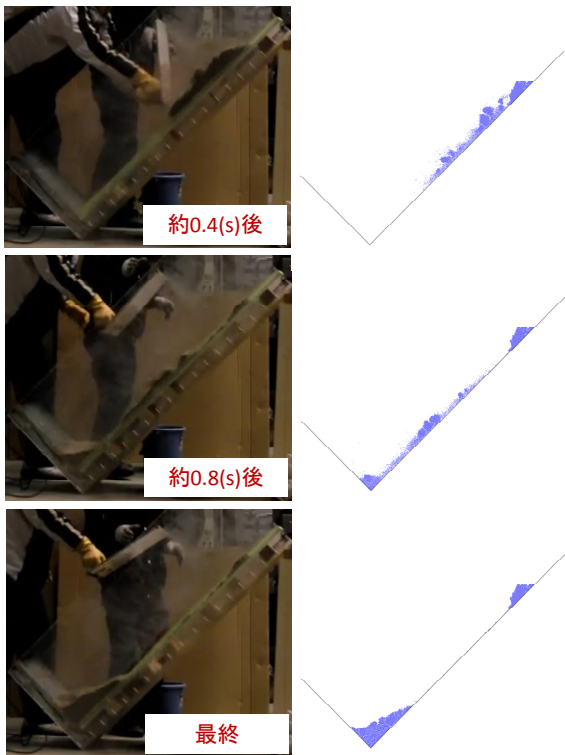
3.3 解析結果および考察

模型実験をもとに, 先に述べた解析パラメータを用いた EDEM 解析の再現性を検証した。まず, 図 - 8 に, 解析により得られた流動過程を実験結果とともに示す。図 - 8(a) は斜面角度 45° の乾燥砂, 図 - 8(b) は湿潤砂の場合である。まず, 乾燥砂の場合, 実験時の流動過程を時刻歴に比較したところ, 非常に良く再現できていることが確認できた。つまり, 上述の方法で設定した解析パラメータを用いた DEM 解析によって乾燥砂の流動を適切に再現可能であるといえる。次に, 湿潤砂の場合を比較すると, EDEM の間隙ばねに含水による付着効果を新たに導入したことにより, 含水比 10% の場合, 要素がある塊で流動しており, 実験と同様な挙動を表現できていることが確認できた。しかし, 形成されている土塊の形状や大きさに関しては実験時のものを再現することはできず, 今後, 仮想水膜の影響半径や間隙ばね定数などの設定を再考する必要があると考えられる。

また, 図 - 9 に荷重-時間関係の比較図を示す。図 - 9(a) は乾燥砂の場合, 図 - 9(b) は湿潤砂の場合である。これらの図より, 乾燥状態の場合, 最大荷重やその発生時間, 堆積荷重などを精度良く再現できていることが確認できたが, 含水比 10% の場合, 最大荷重や堆積荷重は精度良く再現できているが, 実験で確認できた急激な荷重の立ち上がりを解析では再現できていないことが確認できた。これは, 流動過程における土塊の形状や大きさまたは, その土塊の流下速度を再現できていないことに起因していると推察される。



(a) 乾燥砂の場合 (左: 実験, 右: 解析)



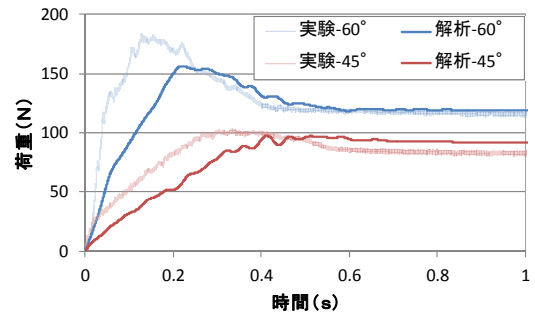
(b) 湿潤砂の場合 (左: 実験, 右: 解析)

図 - 8 土砂の流動過程の比較 (斜面角度 45°の場合)

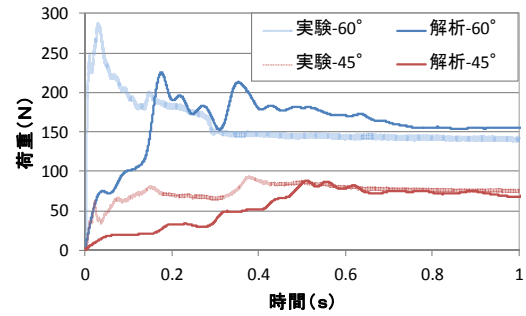
4. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 乾燥状態の土砂では砂粒子が離散しながら流動するのに対し、含水した土砂では水分による付着力の効果で塊として流動・衝突するため、荷重が急激に立ち上



(a) 乾燥砂の場合



(b) 湿潤砂の場合

図 - 9 荷重-時間関係の比較

がり、その値も大きくなることが確認できた。さらに、斜面角度が大きくなると底面摩擦力が低下し、流下速度が大きくなるため、荷重は大きくなる。

- 2) 間隙ばねに含水による付着力の効果を導入した EDEM 解析により、土塊を形成し土砂が流動するといった挙動を再現できることが確認できた。しかし、荷重特性は実験を再現できているとは言い難く、定性的な評価に留まっているため、今後、間隙ばね特性の決定法などについて熟考していく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省:土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律, 2001
- 2) 国土交通省:国土交通省告示第三百三十二号, 2001
- 3) 内田太郎, 曾我部匡敏, 小山内信智, 吉川修一, 亀田信康:室内実験による崩壊土砂の衝撃荷重に関する検討, 第7回, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.193-198, 2004.11
- 4) 内田太郎, 曾我部匡敏, 小山内信智, 吉川修一:崩壊土砂の作用荷重の空間分布が待受け式擁壁の安定性に及ぼす影響, 第7回, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-6, 2004.11
- 5) 小山内信智, 内田太郎, 倉岡千郎, 中島祐一, 杉山実:個別要素法を用いた流下土砂の構造物に作用する荷重に関する数値計算, 平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集, 2006
- 6) 伯野元彦:破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で破壊を追う-, 森北出版株式会社, 2004