

粒子サイズを再現した砂柱の崩壊シミュレーション

安田 紗菜¹, 村上 章², 藤澤 和謙^{2*}, 福元 豊³

¹東京都立戸山高等学校, ²京都大学大学院農学研究科, ³長岡技術科学大学

要旨

砂柱の崩壊は、砂粒子が大きく移動することで、砂柱が大変形する、最も基本的な砂の破壊現象の一つである。本研究では、砂柱の崩壊現象を実験・観察し、砂粒子の動きを一粒毎に計算できる DEM (Discrete Element Method)^(1,2) を用いてこの現象を数値的に解析した。実験では、粒径が約 1 mm のガラスビーズを実験材料とし、PIV (Particle Image Velocimetry)⁽³⁾ 解析によって砂柱が崩壊するときの変位及び変形速度を得た。数値解析においては、粒子サイズを実験と合わせてパラメトリックスタディを行い、実験における砂柱崩壊の再現を試みた。その結果、砂柱崩壊現象のシミュレーションには、減衰係数が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

重要語句：砂柱崩壊, 砂粒子, 粒子サイズ, 減衰係数, DEM (Discrete Element Method)

序論

国土面積の 4 分の 3 を山地が占める我が国では、地震や豪雨などによる土砂崩れの被害が後を絶たない。近年ではその対策が急がれ、各自治体がハザードマップを作成するなどして被害の縮小に努めている。しかし、依然として平成 26 年 8 月に発生した広島豪雨による土砂崩れのように、土砂災害による人的被害等、甚大な被害は後を絶たない。このような被害を軽減するには、土砂崩れの崩壊場所や崩壊の仕方（岩石が転がるように崩れるのか、泥が流れるようにくずれるのか等）を時系列で知ることが重要である。

土砂崩れは、地震動などの衝撃や豪雨時の土の脆弱化によって発生する土粒子の大移動を伴う土の崩壊現象である。そこで、本研究では土砂崩れの被害予知の基礎を築くことを目的として、土砂崩れと根本的に同じメカニズムによって生じる砂柱の崩壊現象を数値的にシミュレートすることを試みた。

実験概要

砂柱の崩壊現象を観察するため、室内実験により、砂柱の崩壊現象を観察した。また、ここで得られた実験データは後に述べる数値解析の再現性を検証するためのデータとした。実験では、PIV 計測を用いることで、崩壊中の砂の速度を測定した。PIV 計測とは、短い時間間隔で撮影された 2 枚のデジタル画像を解析することで、空間的な速度分布を算出する方法であり、非接触かつ面的に速度分布を計測できる点に特徴がある。

図 1 に実験に用いた装置の概要を示す。砂柱を成型する装置は、幅 200 mm、高さ 150 mm、奥行き 20 mm の寸数を持つように厚さ 5 mm の透明なアクリル板によって作成した。砂柱は、幅 50 mm、高さ 100 mm であり、仕切り板によって装置の左端に砂を充填することで作成した。この砂柱に対し、仕切り板を

手で素早く持ち上げることで砂柱崩壊を開始させ、砂柱崩壊の様子はハイスピードカメラ（撮影間隔 500 fps）を用いて撮影した（図 1）。実験材料としては砂粒子の代わりに粒径 0.9 mm ~ 1.3 mm のガラスビーズを用いた。これはガラスビーズの密度と粒径が砂粒子と類似し、かつ形が球形であることから、数値シミュレーションに理想的な条件を提供できるためである。用いたガラスビーズの粒子密度は 2500 kg/m³ であり、充填した砂柱の間隙比は 0.657 であった。

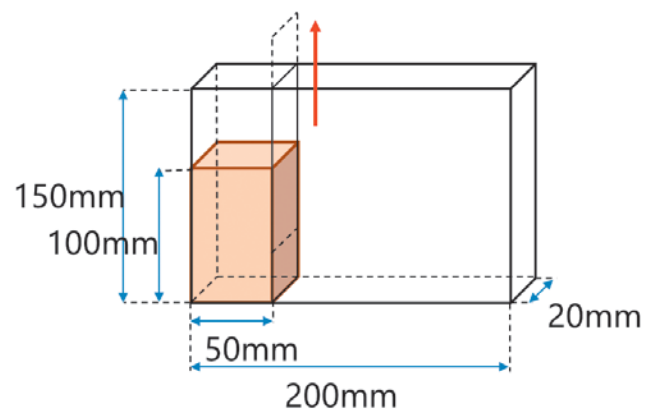


図 1. 実験装置。

実験結果

図 2 にはハイスピードカメラによって撮影されたスナップショット画像を示す。同図の画像は、0 秒後、0.15 秒後、0.30 秒後、0.45 秒後、0.60 秒後、0.75 秒後のものであり、砂柱の崩壊は非常に短い時間の間に進行する現象であることがわかる。このような写真から PIV 処理を行うと、図 3 のような速度分布図を得ることができる。同図は移動する砂柱の速度をベクトルとして描画したものであり、砂柱の崩壊は主に表面に近い粒子が素早く移動することで生じていることが見てとれる。0.15 秒後には重力によって、粒子は急激に速度を上げるが、斜面の傾斜が緩くなるにつれて速度がなくなり、0.75 秒後にはほとんどの粒子が停止する。また、砂柱の左下の箇所は、砂柱は崩壊している間であっても、ほとんど初期の位置から動くことなく停止している様子もわかる。

数値解析

1. DEM

数値解析に用いた DEM は、個別要素法とも呼ばれ、2 粒子間の相対運動に基づいて相互作用力を算出し、すべての粒子の運動方程式を解くことで粒子の運動を解析できる数値シミュレーション方法である。土砂のような粉粒体の多体衝突を厳密

* 内容に関する連絡先：fujik@kais.kyoto-u.ac.jp

に解くことは現実的ではないため、粒子間の単純化した力学モデルを設けてその運動を解くことができる DEM は本研究において最適な解析ツールであると考えた。

2. DEM 計算による砂柱崩壊シミュレーション

2次元の DEM 計算により、前節に述べた実験結果の再現を試みた。解析領域の大きさは、図 1 に示した実験装置のサイズと一致させ、その領域の左端に幅 50 mm、高さ 150 mm の領域を 0.92mm から 1.3mm の粒径を数値的に配置することで砂柱の初期状態を再現した。砂柱を構成するために必要とした粒子数は 4,408 個であった。

ガラスビーズの材料定数として粒子密度は 2500 kg/m^3 とし

たが、初期間隙比は実験のものよりも小さくなった。これは、今回の DEM 計算は 2次元解析であるためであり、2次元粒子をパッキングする（ある領域に詰める）際は、3次元粒子のパッキングに比べて間隙が小さくなるのが良く知られている。

砂柱を崩壊させるときの仕切り板の引き抜き速度は、計測結果から 1.2 m/s を与えた。DEM 計算の時間ステップ間隔は 5×10^{-6} 秒とした。以上の条件のもとで、粒子間の摩擦角と回転抵抗、減衰係数（粒子が衝突するときに発生する速度の減衰に関するパラメータ）を変化させてパラメトリックスタディを行い、実験結果を DEM によってどれほど正確に再現できるかを検証した。

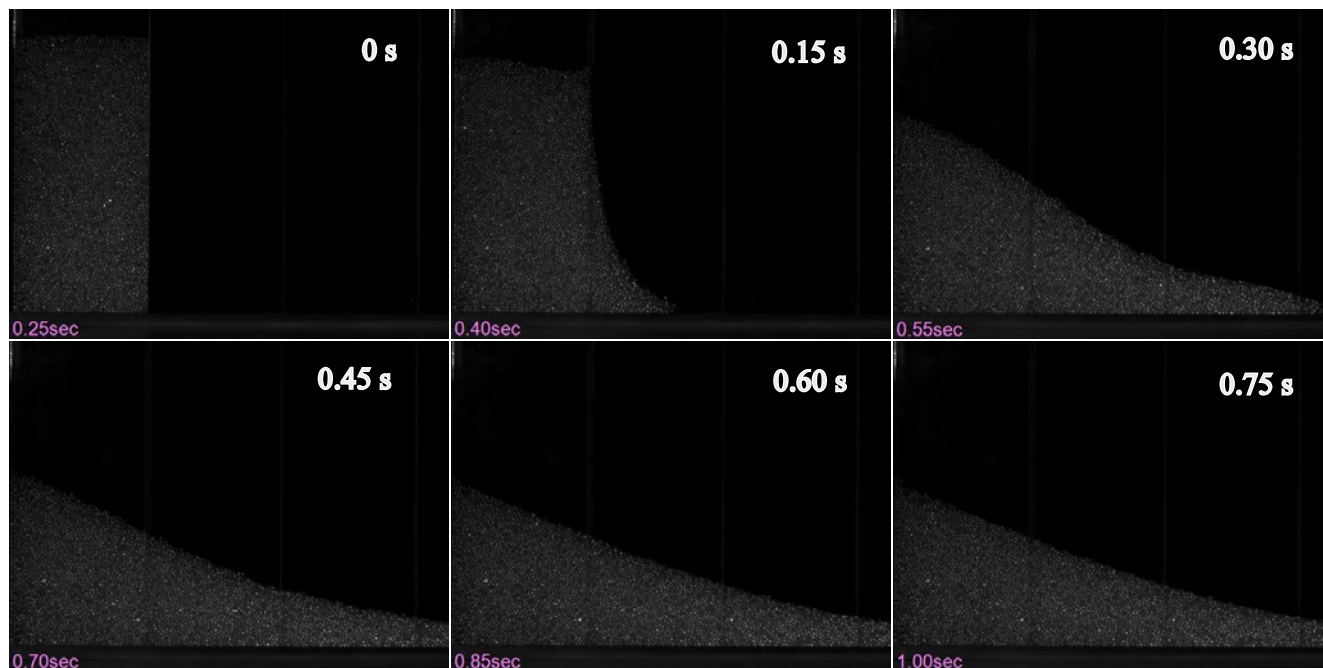


図 2. ハイスピードカメラによる砂柱の崩壊写真（0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 秒）。

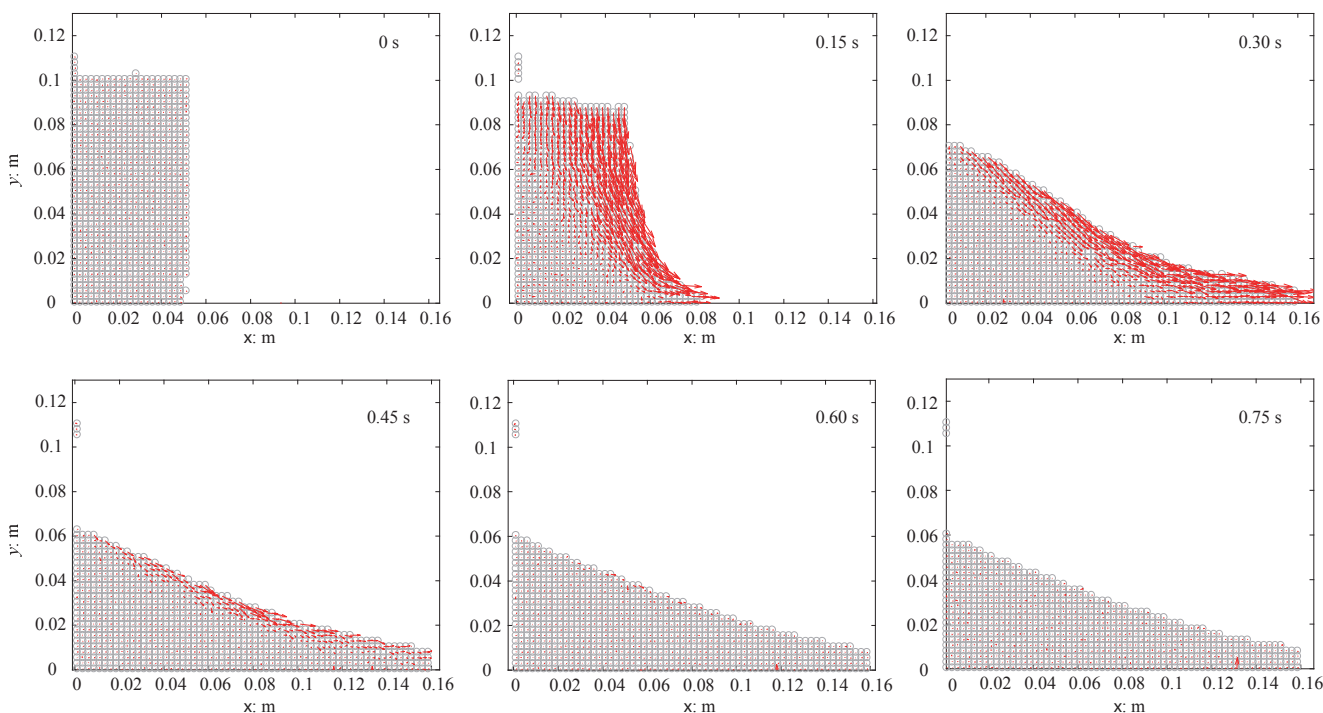


図 3. PIV による砂柱崩壊時の速度分布（0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 秒）。

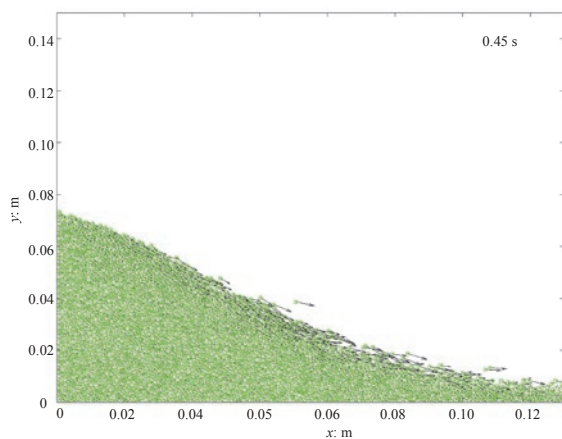
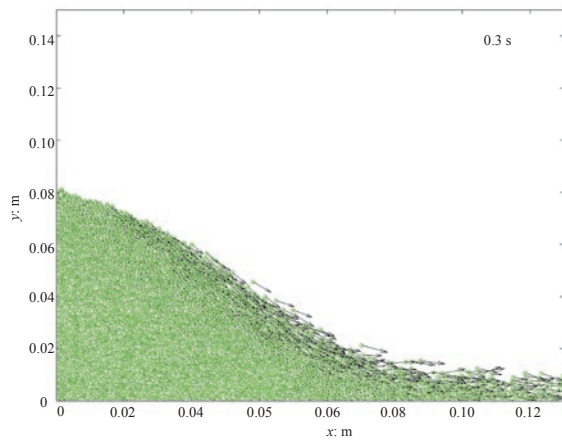
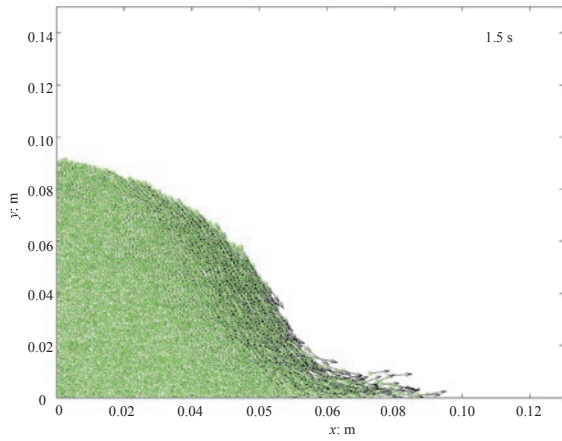
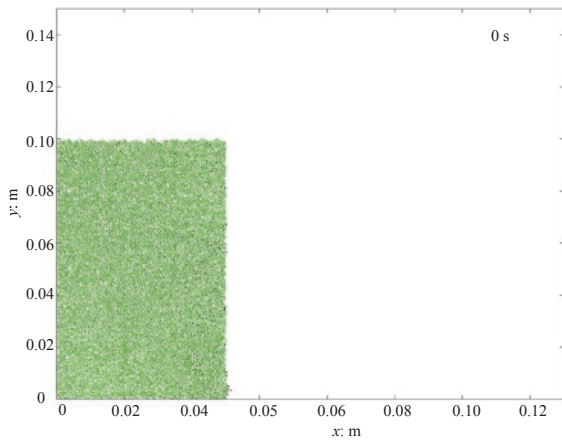


図 4. DEM による砂柱崩壊解析の結果（粒子間摩擦角 20 度，回転抵抗なし，減衰係数 0.03）.

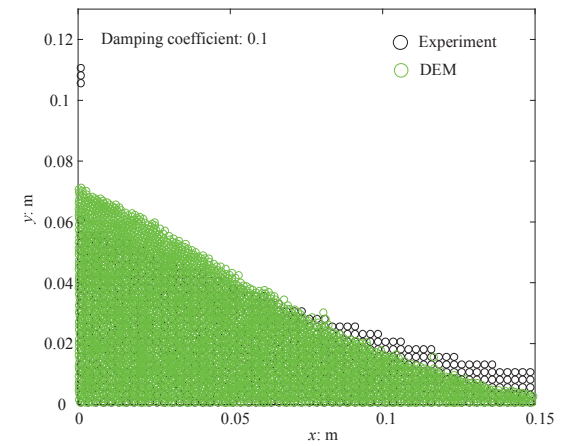
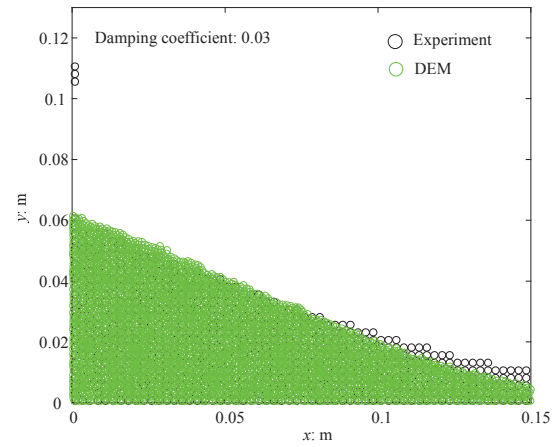
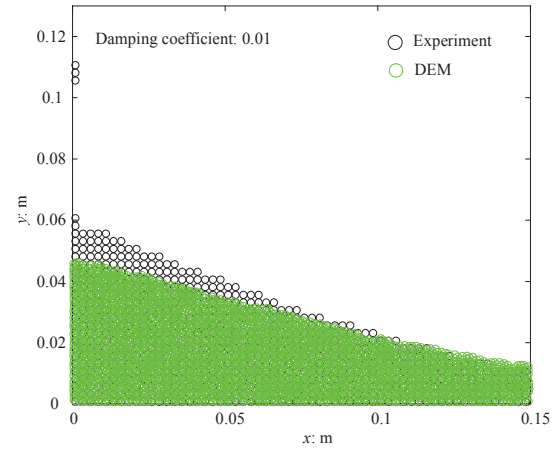


図 5. 減衰係数の違いによる最終斜面形状の変化（黒丸が実験の砂柱領域であり，緑色の丸で DEM の粒子領域を示す）.

解析結果

上述のように，粒子間摩擦角，回転抵抗，減衰係数を変化させた解析の結果，減衰係数が砂柱の崩壊現象に最も大きな影響を与えることが明らかとなった。減衰係数が小さい場合は，砂柱は短い時間で崩壊し，減衰係数が大きくなるにつれて崩壊のスピードは長くなった。これは，減衰係数が小さいときは粒子の速度が抑制されないためであり，行った解析では減衰係数の値が 0.03 のときに最も実験に近い解析結果を得た（図 4 参照）。なお，粒子間摩擦角は 20 度を与え，回転抵抗はないものとした。ここで考える減衰係数は，粒子間の接触時に以下の式で与えられる減衰力 F^d に関する係数 α に対応する。

$$\mathbf{F}^d = -\alpha |\mathbf{F}| \text{sgn}(\mathbf{v}) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{F}$ は粒子間接触力ベクトル、 $\mathbf{v}$ は粒子中心の速度ベクトルを意味する。

図5は、減衰係数を0.01, 0.03, 0.1と変化させて解析を行った結果のうち、砂柱崩壊後の最終的な斜面形状を示したものである。同図に示したような斜面角度には、粒子間摩擦角の影響が最も大きいと予想したが、実際にはほとんど粒子間摩擦角の影響はなく、減衰係数によって大きく変化した。これは、砂柱の崩壊現象が動的な問題であるため、粒子間の摩擦よりも、粒子同士の衝突によって速度が減衰する影響の方が大きいためだと考察する。

以上のように、砂柱の崩壊現象においては減衰に関するパラメータが、崩壊速度だけでなく最終的には崩壊形状にも影響を与える重要な計算定数であることが明らかとなった。

結論

本研究では、砂柱の崩壊現象を実験・観察し、砂粒子の動きを一粒毎に計算出来るDEMによってこの現象を数値的に解析した。実験では、粒径が約1 mmのガラスビーズを実験材料とし、PIV解析によって砂柱が崩壊するときの変位及び変形速度を得た。数値解析においては、粒子サイズを実験と合わせたパラメトリックスタディを行い、砂柱崩壊の再現を試みた。その結果、砂柱崩壊現象のシミュレーションには、減衰に関するパラメータが重要な役割を果たすことが明らかとなった。

しかしながら、本研究では2次元計算を行ったためシミュレーションの実用化には、3次元計算での検討が求められる。また、ガラスビーズの粒子間摩擦角について、本研究では検討できなかった一面せん断試験などから得られる内部摩擦角を再現するように決定すべきであると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、チューターを務めて頂いた京都大学大学院農学研究科修士課程の友部遼様、岡田紘明様、高松亮佑様には半年間のELCASでご支援をいただきました。感謝申し上げます。また、ELCAS事務局の皆様をはじめ、この研究を進めていく上で支えてくださった全ての方々はこの場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

1. Cundall, P. A. & O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29: 47–65. (1979).
2. Fukumoto, Y., J. Yoshida, H. Sakaguchi & A. Murakami. The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling. *Soils and Foundations* 54: 1117–1126. (2014).
3. Raffel, M., C. E. Willert, S. T. Wereley & J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, 2nd ed. Springer. (2007).

Simulation of Sand Column Failure with Actual Particle Size

SANA YASUDA¹, AKIRA MURAKAMI², KAZUNORI FUJISAWA^{2*} & YUTAKA FUKUMOTO³

¹Tokyo Metropolitan Toyama High School, ²Graduate School of Agriculture, Kyoto University, ³Nagaoka University of Technology

Abstract

There is one crucial parameter that governs the simulation of sand column failure. Our goal was to identify the parameters for applicability of DEM (Discrete Element Method) to simulate the failure of sand columns, one of the most fundamental phenomena underlying sand failure. In this study, we conducted an experiment on the failure of sand columns. We chose glass beads that have a grain diameter of approximately 1 mm as the material for the experiment. We employed PIV (Particle Image Velocimetry) analysis to obtain the profile of displacement and the speed of transformation during the failure process. We have simulated the sand column failure process using DEM and tried to reproduce the deformation that we observed in our experiment. We made the particle size in our analysis the same as that in the experiment, and conducted a parametric study that involved changing parameters, such as the friction angle between particles, the damping coefficient, and rolling friction. Our results indicate that the damping coefficient plays a significant role in simulations of sand column failure.

Key words: Sand Failure, Sand Particles, Particle Size, Damping Coefficient, DEM (Discrete Element Method)

*Correspondence Researcher: fujik@kais.kyoto-u.ac.jp